

Desarrollo de un sistema de alerta temprana para la malaria en Colombia

Coordinador:
Iván Darío Vélez B.



un
i Universidad
Internacional
de Andalucía

A Pr
de estudios
Iberoamericanos
Grupo La Rábida

mio 1
Área
Científico-Técnica

un
i Universidad
Internacional
de Andalucía

A Pr
E de estudios
Iberoamericanos
Grupo La Rábida

mio 1
Área
Científico-Técnica

Desarrollo de un sistema de alerta temprana para la malaria en Colombia

German Poveda J.

Martha Lucia Quiñones P.

Iván Darío Vélez B.

William Rojas M.

Guillermo L. Rúa-Uribe

Carlos Daniel Ruiz C.

Juan Santiago Zuluaga G.

Luz Elena Velásquez T.

Manuel David Zuluaga A.

Olver Olfrey Hernandez N.

EDITA: UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE ANDALUCÍA
Monasterio de Santa María de las Cuevas
Calle Américo Vespucio, 2
Isla de la Cartuja. 41092 Sevilla
www.unia.es

AUTORES:

German Poveda J.

Martha Lucia Quiñones P.

Iván Darío Vélez B.

William Rojas M.

Guillermo L. Rúa-Uribe

Carlos Daniel Ruiz C.

Juan Santiago Zuluaga G.

Luz Elena Velásquez T.

Manuel David Zuluaga A.

Olver Olfrey Hernandez N.

COPYRIGHT DE LA PRESENTE EDICIÓN:
Universidad Internacional de Andalucía

FECHA:
2008

ISBN:
978-84-7993-061-5



Índice

RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN GENERAL	14
CAPÍTULO 1. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA MALARIA (SIGMA)	18
CAPÍTULO 2. NDVI	22
CAPÍTULO 3. RELACIÓN DEL NDVI CON LA MALARIA EN COLOMBIA	30
CAPÍTULO 4. RELACIÓN ENTRE CASOS DE MALARIA, PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA.	34
CAPÍTULO 5. ESTADO ACTUAL DEL SIGMA	40
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS	46
CAPÍTULO 7. MODELACIÓN	58
CAPÍTULO 8. IMPACTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA SOBRE LOS ELEMENTOS ENTOMOLÓGICOS DE LA TRANSMISIÓN DE MALARIA	84
CAPÍTULO 9. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA INCIDENCIA DE MALARIA, LA DENSIDAD Y LA PARIDAD DE LOS VECTORES EN DOS ÁREAS ENDÉMICAS DE LA TRANSMISIÓN DE LA ENFERMEDAD	98

CAPÍTULO 10. ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA DURACIÓN DEL CICLO GONOTRÓFICO DE ANOPHELES ALBIMANUS	112
CAPÍTULO 11. EFECTO DE LA VARIACIÓN EN LA TEMPERATURA SOBRE LA DURACIÓN DEL PERÍODO ESPOROGÓNICO DE P. FALCIPARUM EN AN. STEPHENSI	124
CAPÍTULO 12. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL TIEMPO DE DESARROLLO, LA SUPERVIVENCIA Y LA ESPERANZA DE VIDA DE ANOPHELES ALBIMANUS	134
CAPÍTULO 13. RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DE LAS ALAS DE ANOPHELES ALBIMANUS Y LA PARIDAD, SUPERVIVENCIA Y TEMPERATURA, Y SU POSIBLE ASOCIACIÓN CON EL EVENTO CLIMÁTICO «EL NIÑO»	146
CONCLUSIONES GENERALES	162
REFERENCIAS	178
INVESTIGADORES	180



Resumen

La motivación de este estudio fue la posibilidad de incorporar los avances y herramientas en el estudio y predicción del clima, en un sistema de alerta temprana para la malaria en Colombia. Este sistema permitirá anticipar la ocurrencia de brotes y epidemias de malaria, y de éste modo, disponer de medidas preventivas para disminuir el impacto de epidemias de ésta enfermedad en las poblaciones en riesgo.

El uso de información obtenida por los satélites es clave para entender la dinámica espacial de procesos ambientales, ecológicos y vegetativos a gran escala, debido a la posibilidad de captar emisión de radiación proveniente de la tierra a distintas bandas del espectro electromagnético. Uno de esos parámetros que es posible obtener a partir de información digital es el llamado Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI, por sus iniciales en inglés). El NDVI es una medida de la productividad primaria de la vegetación. Se investigó la influencia de las fluctuaciones del ENSO (El Niño Oscilación del Sur) y la NAO (Oscilación del Atlántico Norte) sobre la vegetación en el trópico de Sur América (Colombia, Venezuela, Guyana y la cuenca del río Amazonas). Se concluye que el período entre Diciembre y Febrero es el que más impactado por el fenómeno del ENSO y por la NAO, mientras que el período entre Junio y Agosto es el que menos es afectado por el ENSO y el período entre Marzo y Mayo es el menos influenciado por la NAO.

Se exploró la relación del NDVI con la malaria en Colombia, tomando dos tipos principales de información: NDVI y la información malárica de Colombia. Se encontró que es necesario tener un valor de NDVI mayor que 0,35 para que se presenten más del 10% de los casos de malaria del año en un mes dado. Este umbral permitió construir un mapa de riesgo malárico el cual muestra, para cada punto de Colombia, el número de meses en los cuales se presenta un valor del NDVI mayor que 0,35, indicando riesgo epidemiológico.

Se actualizó y aumentó la información almacenada en la Base de datos del sistema SIGMA (Sistema de Información Geográfico para Malaria), software desarrollado en un proyecto previo. El SIGMA contiene los casos de malaria, discriminada por especie de Plasmodium para los departamentos de Colombia, a escala semanal, durante el periodo entre 1999 y 2003. El SIGMA, es un programa diseñado para visualizar, en un sistema de información georeferenciado y de manera interactiva, la base de datos de malaria del Ministerio de la Protección Social de Colombia, su relación con las principales variables climáticas a escala municipal, departamental y nacional. Dicha base de datos cuenta con información a escala municipal de variables entomológicas, como los tipos de vectores de la malaria presente; climática, como temperatura y precipitación; de población rural y urbana y clínicas que se refieren al número de casos de malaria registrados en cada municipio. Un módulo de visualización de series de tiempo, permite al usuario visualizar simultáneamente, de acuerdo con la información almacenada en la base de datos, los índices maláricos de

los municipios con información mensual, las variables macro-climáticas y variables hidroclimáticas del municipio, y permite estimar el coeficiente de correlación lineal entre estas variables. Un módulo de búsquedas interactivas permite al usuario ubicar municipios en los cuales se presenten circunstancias especiales de acuerdo a unas especificaciones dadas.

La inclusión de información satelital de lluvia constituye un avance importante en el entendimiento de la climatología colombiana, ya que permite analizar el fenómeno en los territorios marítimos del país y en las zonas de escasa cobertura de estaciones pluviográficas y pluviométricas. Se ha mejorado el conocimiento de las variables hidrometeorológicas en el departamento de Antioquia y zonas aledañas, incluyendo las principales áreas de investigación de campo del proyecto: la costa Pacífica y el Bajo Cauca antioqueño. Dichas mejoras son fundamentales para un adecuado diagnóstico de las condiciones climáticas que propician el surgimiento de brotes de malaria y para el desarrollo del sistema de alerta temprana de la enfermedad en Colombia.

Se desarrolló *una modelación matemática* para representar las interacciones entomológicas y climáticas de la transmisión de malaria por *Plasmodium falciparum* en regiones endémicas. Los estimativos de las variables exógenas se basan en datos obtenidos a través de las campañas de campo desarrolladas durante esta investigación, así como mediante experimentos de laboratorio.

Se propuso, en este trabajo, identificar aquellas variables del ciclo de transmisión de malaria, sobre las cuales actúan las variables climáticas y permitirían entender y cuantificar la magnitud de la asociación. Por un lado, para buscar variables indicadoras de predicción, y por otro lado, para entender las asociaciones y permitir determinar los riesgos epidemiológicos. Esta información alimentó el modelo de dinámica de sistemas. Se enfatizó en variables entomológicas, debido a su vulnerabilidad con relación al clima. Se evaluaron las variables componentes del modelo de capacidad vectorial: densidad, antropofilia, ciclo gonotrófico, ciclo esporogónico, longevidad, tamaño de ala y estado de paridad como indicativo de longevidad, esperanza de vida, dinámica de criaderos en un estudio longitudinal y en experimentos de laboratorio en cámaras climatizadas. Se asoció el incremento de temperatura con una reducción en la duración de los ciclos gonotrófico, esporogónico y el tiempo de desarrollo de los vectores. Se encontró un óptimo para la longevidad y supervivencia de los vectores a 27 C, temperatura promedio ambiental durante El Niño. Un tamaño mayor de ala de los vectores se asoció con su estado de paridad, pudiendo éste ser un marcador de longevidad, que es la variable de mayor influencia en la transmisión de malaria. Se encontró que al aumentar la temperatura durante El Niño, la capacidad vectorial aumenta en un 27%, lo que explica el aumento de los casos de malaria durante la ocurrencia de éste evento climático.



Introducción General

La variabilidad climática condicionada por cambios ambientales en asocio con los determinantes biológicos, humanos y ecológicos influye en el incremento del número de casos de enfermedades transmitidas por vectores (Patz et al, 1996). La incidencia de la malaria está determinada por múltiples factores como el grado de susceptibilidad y el comportamiento humano, las características de los vectores, la presencia del parásito y los cambios ambientales. Cualquier evento que modifique alguno de estos factores, podría determinar cambios en la transmisión de la enfermedad. Otras causas que generan la persistencia en la transmisión de la malaria en Colombia son factores socio-políticos, la dificultad en el suministro de los medicamentos, la falta de conocimiento en el comportamiento de los vectores, la resistencia de los medicamentos y la reforma de la salud por la Ley 100.

Un evento climático que altera las condiciones ambientales a nivel global es el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur genera drásticos efectos climáticos, ocasiona sequías en África al igual que en Australia y en la franja tropical de América del Sur, incluyendo Colombia, Venezuela y la mayor parte de la cuenca Amazónica. Genera inundaciones en la región sur de Sur América, así como en la costa Pacífica de Ecuador a Chile. Sus implicaciones no son solo ecológicas sino también sociales, económicas y en salud (Suplee, 1999).

Se ha registrado para diferentes regiones tropicales y subtropicales una fuerte asociación entre la ocurrencia del evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y el incremento en la transmisión de malaria (Bouma y Dye, 1997; Bouma et al, 1996; Bouma y Van der Kaay, 1996; Loevinsohn, 1994). En Colombia, Poveda y Rojas (1997) y Bouma et al. (1997), registraron la asociación entre aumento de la transmisión de malaria y el evento El Niño. Relacionaron la evolución temporal de la Incidencia de malaria por *P. vivax* (IVA), por *P. falciparum* (IFA) y el Índice Parasitario Anual (IPA) entre 1959 y 1994, con el promedio en la temperatura superficial del Océano Pacífico, un indicador de la ocurrencia del evento ENOS. Además, se ha encontrado una asociación entre el ciclo anual normal de malaria y el clima, lo cual permite establecer épocas mas pertinentes para ejecutar medidas de control en los programas de Salud Pública (Poveda et al, 2001). Estos resultados, los investigadores sugieren que el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación que se presenta en Colombia durante el evento El Niño, parecen ser los principales mecanismos que alteran el desarrollo del parásito y la dinámica poblacional de los vectores.

El impacto de los eventos climáticos sobre la transmisión de las enfermedades transmitidas por vectores se puede presentar a varios niveles: a) al afectar la dinámica de población de los vectores, generando cambios en la densidad, en la cantidad y calidad de los mosquitos adultos y de los sitios de reproducción y en la tasa de supervivencia (Martens, 1997), b) al actuar sobre la población del parásito, afectando su tasa de desarrollo (Patz et al, 1996), c) al actuar sobre la población humana, ocasionando migraciones, lo que genera una distribución de los patógenos

en nuevas áreas, y en donde la protección inmune de los pobladores es menor (Martens, 1997; Patz et al, 1996).

Desde el enfoque entomológico, es probable que los cambios ambientales y climáticos asociados con el evento ENOS influya en la dinámica de los criaderos, de los estadios inmaduros de mosquitos y de la longevidad de los vectores, afectando la transmisión de malaria. Si se comprende la asociación entre clima, malaria y vectores se podría generar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) en salud que pueda ser incorporado a las estrategias de prevención de brotes de malaria y así contribuir al diseño y aplicación de adecuadas medidas de control.

Durante el estudio previo a este proyecto: «Relación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur», se observó una clara relación entre la temperatura y la incidencia de malaria, sin embargo, no fue evidente la asociación entre las variables entomológicas evaluadas (densidad y paridad) y el clima o la transmisión de malaria. En el presente trabajo se consideran otras variables entomológicas como la calidad, medida como tamaño de ala, y longevidad de los mosquitos, y la duración del ciclo esporogónico del *Plasmodium*, dado que éstas variables pueden ser alteradas por los cambios climáticos. Se pretende establecer la calidad de los vectores mediante el estudio de la dinámica de población larval y del tamaño de los adultos generados. Mediante el empleo de métodos más sensibles para determinar la longevidad de los mosquitos y utilizar los datos entomológicos y climáticos para mejorar los modelos matemáticos de dinámica de sistemas.

Como hipótesis se planteó que existe un conjunto de variables climáticas y entomológicas que presentan una gran influencia en la transmisión de malaria. Estas variables se pueden analizar y procesar adecuadamente mediante diferentes técnicas estadísticas y modelos matemáticos, posibilitando la creación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) en salud, con el cual se podría realizar la predicción y prevención de brotes epidémicos de malaria en Colombia. Esta información se constituye en una herramienta de gran valor para las instituciones encargadas de la vigilancia y control de las enfermedades transmitidas por vectores.

Los objetivos del estudio son los siguientes:

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema de alerta temprana producto de la asociación de la variabilidad climática con la transmisión de malaria en dos áreas endémicas en Colombia (El Bagre, Antioquia y Nuquí, Chocó), y el entendimiento de los mecanismos físicos que vinculan el cambio climático con la ocurrencia de malaria, con especial referencia al evento El Niño y su efecto sobre la bionomía de los vectores.

Objetivos Específicos

1. Determinar el efecto de la ocurrencia del evento El Niño sobre las siguientes variables entomológicas: disponibilidad y fluctuación temporal de criaderos, dinámica de población de larvas de Anopheles y de sus predadores, duración del período esporogónico, densidad, longevidad y calidad de vectores en estado adulto, y como se relacionan con la aparición de brotes de malaria.
2. Desarrollar un modelo matemático-estadístico que explique la relación clima-malaria-vectores en Colombia, tanto durante períodos de tiempo entre fenómenos de El Niño como durante las variaciones climáticas anuales (períodos de lluvias y de sequías).
3. Recolectar nuevos datos entomológicos y climáticos para ampliar, validar y mejorar el Sistema de Información Geográfico de Malaria (SIGMA) desarrollado en durante el estudio «Relación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur».
4. Proponer a las autoridades competentes de salud la inclusión de los marcadores climáticos en los programas de prevención y control de la malaria en Colombia.



Capítulo I: Sistema de Información Geográfica para la Malaria (SIGMA)

1.1. Sensores Remotos. Antecedentes

Los sensores remotos o la percepción remota, involucra la medición y el análisis de la radiación electromagnética reflejada por los objetos que se encuentren en la superficie terrestre. La medición en estos momentos se realiza por medio de satélites y aviones, los cuales toman información multispectral. Ejemplo de estos son los satélites LandSat y Spot que pueden generar imágenes de datos en siete y tres bandas espectrales simultáneamente. En la actualidad el sensor que más bandas espectrales puede tomar simultáneamente es el AVIRIS el cual puede tomar datos de 224 bandas.

La información obtenida por medio de los sensores remotos hace posible examinar cualquier parte particular de la superficie terrestre, y permite estudiar la tierra como un sistema completo. La dinámica de la tierra y lo que los hombres hacen en ella puede ser estudiado desde imágenes de sensores remotos. Estas imágenes pueden ayudar a resolver muchos problemas tales como la localización de recursos naturales, la delimitación de cuerpos de agua, la planeación de proyectos de construcción, entre muchas otras aplicaciones.

Fotografías aéreas a blanco y negro, realizada por aviones espías en guerras fueron las primeras imágenes de sensores remotos, donde la milicia las usaba para reconocer el terreno de enemigo, y así atacarlo por su lado más débil. Este trabajo lo realizaban expertos, que contaban con gran experiencia e inteligencia. Cuando empezaron a aparecer nuevos sensores que suministraban más de tres bandas, este trabajo pasó a ser más apto para computadores que para expertos. (Hernández, 2003)

1.2. Metodología y Resultados

Los mosquitos transmisores de malaria principalmente se reproducen en depósitos de agua formadas por aguas lluvia, y por tanto su identificación resulta muy importante en los estudios de diagnóstico y prevención de la transmisión de la malaria.

Los Sensores Remotos constituyen una herramienta de identificación de cuerpos de agua que se encuentran en la zona de estudio, tanto en el espacio como en el tiempo. Existe gran cantidad de tipos de Imágenes de Satélite, entre ellas están las LanSat, Spot, Ikonos, etc. Las imágenes LandSat son las más usadas, debido a que el sensor usado para capturar estas imágenes censa el mismo punto de la tierra con un intervalo de discretización temporal de mínimo una vez por mes, aunque la resolución espacial de las imágenes es tan solo de 30 metros en siete bandas espectrales y 10 metros en una banda pancromática. Las imágenes Ikonos son la última tecnología, esta proporciona escenas con resolución espacial de 1m. Pero las imágenes de sensores remotos generalmente son muy costosas, variando

entre US\$343 y US\$1800 (<http://www.intecamericas.com/satprices.htm>). Aunque las imágenes LandSat son distribuidas gratuitamente en la Internet por algunas organizaciones luego de comprar y usar las imágenes, tales como el UNIACS (University of Maryland Institute for Advanced Computer Studies) (vease <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>).

En la página del UNIACS se buscaron las imágenes de satélite que incluyeran las zonas de los municipios de Nuquí y del El Bagre, encontrando dos y cinco imágenes para cada municipio, respectivamente. Las imágenes para Nuquí no sirvieron para el estudio debido a que estas presentan muy altos porcentajes de nubosidad, lo cual no permite una identificación fidedigna de los cuerpos de agua (ver **LISTA DE FIGURAS Y TABLAS: FIGURA 1.1**).

En varias de las imágenes de El Bagre no había presencia de nubes o estas eran muy pequeñas, entonces allí se inició la búsqueda de los cuerpos de agua. Para ello se usó una herramienta para la clasificación supervisada de sensores remotos (Hernández, 2003).

Como primera medida se establecieron las regiones de entrenamiento entre las que se encuentran el río (rojo), la ciudad (verde), charcas (magenta), sombra de nube (gris) y cuatro tipos diferentes de suelo o cobertura vegetal (azul, blanco, morado y amarillo). Con estas regiones de entrenamiento se inició la clasificación, para identificar las regiones con presencia o ausencia de charcas.

Durante el proceso de clasificación se encontró que las características de la sombra de las nubes y las charcas de agua en las imágenes de satélite son muy similares, por lo cual la clasificación de estas resulta un poco difícil. Al usar un algoritmo de lógica difusa para la clasificación se obtuvieron los siguientes resultados:

Como se puede observar en la **FIGURA 1.2**, se alcanza a discriminar el agua que existe en la región, pero además se agrega a estas zonas las sombras de las nubes, a pesar de haber incluido una clase aparte en el período de clasificación.

Los siguientes son otros resultados obtenidos con otras imágenes. En la **FIGURA 1.3** se observa una fuerte corriente nubosa que cubre gran parte de la zona oriental de la imagen, complicando así el proceso de clasificación y obteniendo resultados satisfactorios solo en la zona occidental de la misma.

1.3. Conclusiones

Se ha llegado a una primera aproximación en la clasificación de las zonas de acumulación de aguas, alrededor del municipio de El Bagre. Los primeros resultados son satisfactorios, pero se deberá continuar el trabajo con el fin de obviar problemas asociados con la cantidad de sombra de nube que los clasificadores identifican como agua.

1.4. Trabajo Futuro

Trabajar con las componentes principales de las seis bandas para tratar de diferenciar claramente la sombra de las nubes del agua.

La cantidad de imágenes que tenemos con bajos niveles de nubosidad es muy baja, con algunas otras imágenes, preferiblemente sin sombra de nubes, se podrán obtener mejores resultados.

El objetivo final de la clasificación es correlacionar la cantidad y distribución de los sitios cubiertos por agua, como fuente de criaderos, y la cantidad de malaria que se presenta en el momento en que se censó la imagen, con el propósito de correlacionar estas dos variables.



Capítulo II: NDVI

2.1. Introducción

Hay buena coherencia entre la dinámica de la vegetación en el trópico de Sur América (Colombia, Venezuela, Guyana y la cuenca del río Amazonas) y el fenómeno del ENSO.

El uso de información obtenida por los satélites es clave para entender la dinámica espacial de procesos ambientales, ecológicos y vegetativos a gran escala, debido a la posibilidad de captar emisión de radiación proveniente de la tierra a distintas bandas del espectro electromagnético. Uno de esos parámetros que es posible obtener a partir de información digital es el llamado Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI, por sus iniciales en inglés). El NDVI es una medida de la productividad primaria de la vegetación. El NDVI es la diferencia entre las radiaciones correspondientes a longitudes de onda del espectro visible (0,58-0,68 μm) y del cercano infrarrojo (0,725-1.1 μm), normalizada por la suma de esas radiaciones. El NDVI toma valores entre -1 y 1 . Tales radiaciones son medidas por el radiómetro de resolución avanzada muy alta (AVHRR) colocado a bordo de los satélites de órbita polar de la NOAA. La información global de este parámetro se puede obtener a una resolución espacial de $8' \times 8'$ para todo el globo.

En la sección 2.2 se hace un breve recuento de los datos incluyendo NDVI, SOI y NAO. En la sección 2.3 se muestra la metodología usada, En la sección 2.4 se muestran las correlaciones entre estos índices y se realiza una regresión lineal múltiple para tratar de explicar el NDVI a partir de estos índices macro climáticos y por último en la sección 2.5 se concluye.

2.2. Datos

En la primera parte se describen los datos de NDVI, posteriormente las series del SOI y la serie NAO.

2.2.1. NDVI

La información del NDVI fue suministrada por el Goddard Space Flight Center de la NASA. El NDVI es un índice calculado a partir de las imágenes de satélite tomadas por el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), el cual adquiere información en cinco bandas, todas con 1024 posibles valores a una resolución espacial de 4km. Para calcular los valores del NDVI sólo se usan dos de las cinco bandas, y se han realizado varias correcciones a estos datos a causa de:

1. Degradación y diferencias residuales en la calibración del sensor
2. Distorsiones causadas por nubes persistentes en bosques hojosos tropicales
3. Efectos solares del ángulo de visión
4. Aerosoles volcánicos
5. Efectos atmosféricos a corto plazo del aerosol, del vapor de agua y de las nubes.

Los datos del NDVI son suministrados en mapas raster con una escala espacial de 8km, y están proyectados mediante la transformación ALBERS *Conical Equal-area projection* usando el elipsoide de Clark. El NDVI está disponible desde julio de 1981 hasta diciembre de 2000.

Para el presente estudio, se usan los datos correspondientes al norte de Sudamérica, incluyendo toda la cuenca del Amazonas además de toda Colombia.

2.2.2. SOI y NAO

Los datos del Índice de Oscilación del Sur (SOI) y de Oscilación del Atlántico Norte (NAO) fueron tomados del Climate Prediction Center del National Weather Service de la NOAA de Estados Unidos. Esta información es suministrada gratuitamente a través de la página de Internet: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>. Allí encontramos datos mensuales desde 1950 hasta la fecha.

Para determinar el impacto del fenómeno de El Niño, el cual puede ser representado por el SOI, se promedió la información por trimestres, así: Diciembre-Febrero, Marzo-Mayo, Junio-Agosto y Septiembre-Noviembre. Para determinar si la ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña tienen influencia sobre el NDVI, para cada uno de los años El Niño y La Niña se hallaron las anomalías. (**FIGURAS 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 Y 2.5**)

para los años el Niño y las **FIGURAS 2.6 Y 2.7** para los años La Niña).

En la **FIGURA 2.1** podemos observar que El Niño en el año 1982-83 produjo una disminución de la vegetación en la Guyana, Surinam, Guyana Francesa y el norte de Brasil, en casi toda la cuenca del Orinoco y en el pie de monte occidental de la cordillera de los Andes aunque más levemente, en el trimestre de Junio, Julio y Agosto, mientras que en el centro de Brasil se ven unos incrementos muy leves en este mismo periodo. Entre Septiembre y Noviembre del 1982 se presenta una gran disminución del NDVI en la cuenca del río Orinoco, se disminuye más los niveles en las Guyanas y Surinam, mientras en Brasil se puede observar un leve incremento de los valores. En el periodo entre Diciembre del 82 y Febrero del 83 se observa una clara disminución del índice en la costa Atlántica Colombiana, en norte de Venezuela y en el sur oriente de Brasil. Por último en el período entre Marzo y Mayo del 83 se ve un aumento de los niveles del índice en casi toda la región, exceptuando el oriente Brasileiro y el pie de monte occidental de la cordillera de los Andes en el territorio Chileno.

La anomalía de NDVI del período El Niño entre 1986 y 1987 se puede observar en la **Figura 2.2**. Durante ese fenómeno El Niño, se observa un pequeño incremento en el NDVI en casi todo el territorio de estudio, presentando unas pequeñas disminuciones en el oriente de Brasil entre Junio y Agosto de 1986 y en el norte de Venezuela y sur de Colombia en el período comprendido entre Marzo y Mayo de 1987.

Durante El Niño de 1991 y 1992, mostrado en la **FIGURA 2.3**, se puede observar una clara disminución del NDVI en toda la cuenca de río Amazonas entre Junio y Noviembre de 1991. Entre diciembre de 1991 y Febrero de 1992 se puede observar una disminución del NDVI en la Costa Atlántica Colombiana y en el Oriente y en el Occidente de Brasil. Por último, en el período entre Marzo y Mayo se puede observar un leve incremento del NDVI en casi toda la zona de estudio, exceptuando la Costa Atlántica Colombiana y el sur de Brasil.

En la **FIGURA 2.4** se puede observar una disminución del índice en el centro de Brasil en entre Junio y Agosto de 1994. Entre Septiembre y Noviembre del mismo año, se observa una gran disminución del índice en las Guyanas, Surinam y el Norte de Brasil; por otro lado en la cordillera de los Andes se nota un gran aumento. Entre Diciembre de 1994 y Febrero de 1995 se mantiene el incremento en la cordillera de los Andes y se extiende un poco sobre la cuenca del Orinoco y la parte nor-occidental de la cuenca del Amazonas, mientras que en la zona sur-occidental y en el oriente de la misma se observa una disminución del índice. Entre Marzo y Mayo los niveles se mantienen muy constantes por el orden de la media.

En la **FIGURA 2.5** es posible observar que entre Junio y Agosto de 1997 un leve aumento de los niveles del NDVI en la cuenca del Orinoco mientras en la zona sur-

oriental del Brasil este aumento se torna más fuerte. Entre Septiembre y Noviembre de 1997 se observa una disminución de los niveles del NDVI en la zona central del Brasil, mientras que en la zona sur-oriental se tiene un pequeño aumento. Entre Diciembre de 1997 y Febrero de 1998 se puede observar un leve aumento en todo el Brasil y una leve disminución en el sur de Colombia, mientras que entre Marzo y Mayo de 1998 se puede observar una disminución del NDVI en el territorio Venezolano.

Las anomalías del NDVI durante el evento La Niña de 1988-1989 se muestran en la **FIGURA 2.6**. Entre Junio y Agosto de 1988 se puede observar un aumento en los niveles del NDVI en la región del oriente Brasileño, en el sur y oriente de Colombia y sur de la Cordillera Andina, mientras que en Perú, Bolivia y el sur de Venezuela se observar decrementos importantes en el índice. Entre Septiembre y Noviembre del mismo año se observa una fuerte disminución en los niveles del NDVI en el centro y occidente de Brasil, en el Perú y en Bolivia. Una ligera disminución se presenta en Bolivia y Paraguay y parte del sur de Perú, mientras en el resto de la zona los niveles se incrementan un poco con respecto a la media histórica entre Diciembre de 1988 y Febrero de 1989. En casi toda la cuenca de la Amazonía se observa una ligera disminución de los niveles del índice NDVI entre Marzo y Mayo de 1989. Mientras en la cordillera de los Andes se puede observar un ligero incremento.

Por último en la **FIGURA 2.7** se observa la anomalía del NDVI en el año Niña de 1988-1999. Entre Junio y Agosto de 1998 se observan ligeros aumentos en casi toda Sudamérica, exceptuando el oriente Brasileiro en donde se presentan unos niveles inferiores a los de la media y en Perú, Bolivia y la parte más al occidente del Brasil, donde se presenta un aumento significativo. Entre Septiembre y Noviembre de 1998 se observa un aumento en toda la cuenca del Orinoco y una disminución en el centro y oriente de Brasil. Entre Diciembre de 1998 y Febrero de 1999 los niveles permanecen muy por la media, pero entre Marzo y Mayo de 1999 se pueden observar unos aumentos considerables en el territorio venezolano, y en el sur de Brasil.

2.3. Metodología y Resultados

El primer paso en la manipulación de los datos fue agruparla por trimestres; para realizar este paso, se escogieron los datos y se promediaron los meses de Diciembre, Enero y Febrero, los datos de Marzo, Abril y Mayo, los datos de Junio, Julio y Agosto, y por último los datos de Septiembre, Octubre y Noviembre. Esto se realizó tanto para las series del SOI y del NAO, como para cada una de las series asociadas a cada uno de los píxeles de los mapas raster de NDVI.

Luego se estimaron las correlaciones de los datos trimestrales entre el SOI y el NAO y cada uno de los píxeles de NDVI. Los resultados se pueden apreciar en las

FIGURAS 2.8 Y 2.9 respectivamente. Para cada una de las cuatro series trimestrales de los píxeles de la imagen, se estimaron los coeficientes de correlación de éstos con las series del SOI y de la NAO, en los cuatro periodos siguientes, obteniendo así 16 mapas de correlaciones.

En el mapa de correlaciones entre las series del NDVI de los promedios trimestrales de Diciembre a Febrero y la serie del SOI en el mismo periodo, se puede observar que existe gran influencia de esta en la costa Atlántica, la Orinoquía y la Amazonía Colombiana, en el Oriente de Venezuela, en la Guyanas y Surinam y en el Oriente de Brasil, además de unas correlaciones positivas no tan altas en el norte de Venezuela y el Centro de Brasil.

Para los índices de correlación entre el SOI de Diciembre a Febrero y el NDVI de Marzo a Mayo, se observa una relación directa en Colombia, Venezuela y el sur de la cuenca del río Amazonas, mientras se observa una correlación negativa en el norte y centro de la cuenca del río Amazonas. En este mismo período del SOI, pero el NDVI entre Junio y Agosto se observa gran relación en el oriente del Brasil, mientras en el centro y sur de la cuenca del río Amazonas está influencia no es tan grande. En Venezuela y Colombia se observa una influencia negativa, pero muy tenue. Ahora teniendo en cuenta del NDVI entre Septiembre y Noviembre, se observa una fuerte correlación positiva en el Brasil y en el resto de la zona de estudio se observa influenciada positivamente, pero con una intensidad menor.

Pasando ahora al SOI entre Marzo y Mayo, el NDVI en el mismo período se observa una correlación negativa no muy alta en la cuenca del Amazonas y positiva muy leve en el resto de la zona de estudio. Teniendo en cuenta el NDVI entre Junio y Agosto se observa una influencia positiva en el centro y oriente del Brasil, por otro lado se puede observar una influencia negativa en Colombia y el oriente Venezolano. Con respecto al NDVI entre Septiembre y Noviembre, se observa una fuerte correlación en gran parte del territorio Brasileiro. Por último en el período entre Diciembre y Febrero se observa una muy fuerte relación en el oriente Brasileiro, además de una relación leve en la cordillera de los Andes y en el norte Venezolano. En el sur de la cuenca del río Amazonas se puede observar correlaciones negativas aunque no muy fuertes.

Teniendo en cuenta el análisis del SOI entre Junio y Agosto y el NDVI en el mismo período, se puede observar una leve influencia en la zona de estudio, a excepción del noroccidente Brasileiro y el sur Venezolano. Con el NDVI entre Septiembre y Noviembre se puede observar una relación positiva en el norte de la cuenca del río Amazonas, en el resto de la zona de estudio la influencia no es muy alta. Entre Diciembre y Enero se observan correlaciones positivas en la costa Atlántica y la Amazonía Colombiana, en las Guyanas y en el oriente Brasileiro. Por último entre Marzo y Mayo se pueden observar correlaciones positivas en la cuenca del río

Orinoco, y correlaciones negativas en la cuenca del río Amazonas.

Ahora para el caso del SOI entre Septiembre y Noviembre y el NDVI en el mismo período, se observan correlaciones positivas en la cuenca del río Orinoco y en el norte de la cuenca del río Amazonas, por otro lado en el sur de la cuenca del río Amazonas muestra correlaciones negativas no muy fuertes. Con el NDVI entre Diciembre y Febrero se observan correlaciones positivas en la costa Atlántica y la Amazonía Colombiana, el norte de Venezuela, las Guyanas y Surinam y el oriente Brasileiro. El NDVI entre Marzo y Mayo muestra correlaciones positivas pequeñas en la costa Atlántica Colombiana y en la cuenca del río Orinoco, y unas correlaciones negativas en la cuenca del río Amazonas. Finalmente con el NDVI entre Junio y Agosto se observan correlaciones positivas en el suroccidente de la cuenca del río Amazonas y el en oriente de Brasil, mientras en el occidente colombiano se observan unas correlaciones negativas pequeñas.

De acuerdo con los resultados anteriores se concluye que las series del SOI y de la NAO tiene influencia sobre el comportamiento de la vegetación. Partiendo de esta conclusión se realizó un análisis de regresión lineal múltiple, en donde los datos del SOI y del NAO se usaron como variables predictoras para la variable dependiente del NDVI.

Para realizar está regresión en cada píxel del mapa se estandarizaron las series del SOI, NAO y NDVI, y se planteó la siguiente ecuación:

Donde T va desde $t-4$ hasta t , obteniendo así cuatro posibles valores del NDVI a partir de los datos del SOI y de la NAO, para cada punto en la región de estudio.

2.4. Conclusiones

Se ha investigado la influencia de las fluctuaciones del ENSO y la NAO sobre la vegetación en el trópico de Sur América (Colombia, Venezuela, Guyana y la cuenca del río Amazonas). Se concluye que el período entre Diciembre y Febrero es el que más impactado por el fenómeno del ENSO y por la NAO, mientras que el período entre Junio y Agosto es el que menos es afectado por el ENSO y el período entre Marzo y Mayo es el menos influenciado por la NAO.



Capítulo III: Relaciones del NDVI con la Malaria en Colombia

3.1. Introducción

El uso de información obtenida por los satélites es clave para entender la dinámica espacial de procesos ambientales, ecológicos y vegetativos a gran escala, debido a la posibilidad de captar emisión de radiación proveniente de la tierra a distintas bandas del espectro electromagnético. Uno de esos parámetros que es posible obtener a partir de información digital es el llamado Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI, por sus iniciales en inglés). El NDVI es una medida de la productividad primaria de la vegetación. El NDVI es la diferencia entre las radiaciones correspondientes a longitudes de onda del espectro visible (0,58-0,68 μm) y del cercano infrarrojo (0,725-1.1 μm), normalizada por la suma de esas radiaciones. El NDVI toma valores entre -1 y 1 . Tales radiaciones son medidas por el radiómetro de resolución avanzada muy alta (AVHRR) colocado a bordo de los satélites de órbita polar de la NOAA. La información global de este parámetro se puede obtener a una resolución espacial de $8' \times 8'$ para todo el globo. Varios estudios han reportado que el NDVI es un muy buen indicador de las zonas aptas para la transmisión de malaria ya que está relacionado con la humedad del aire y del suelo.

3.2. Datos

Dos tipos principales de información se ha usado en esta investigación, la información del NDVI y la información malárica de Colombia.

3.2.1. NDVI

La información del NDVI fue suministrada por el Goddard Space Flight Center de la NASA. El NDVI es un dato calculado a partir de las imágenes de satélite tomadas por el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), el cual adquiere información en cinco bandas, todas con 1024 posibles valores a una resolución espacial de 4km. Para calcular los valores del NDVI solo se usan dos de las cinco bandas, con las correcciones mencionadas anteriormente.

El NDVI está disponible desde julio de 1981 hasta diciembre de 2000. Para el estudio que se presenta, se usan los datos correspondientes a Colombia.

3.2.2. Malaria

Los datos de Malaria han sido proporcionados por el Ministerio de Protección Social de Colombia, a escala mensual para el caso de varios municipios de Colombia y datos por períodos epidemiológicos de otros municipios. Para este trabajo a escala mensual para el caso de únicamente los datos de los municipios de los cuales se posee información mensual, ya que la información del NDVI es mensual.

3.3. Metodología y Resultados

Se han correlacionado los datos del NDVI con los registros de malaria en Colombia, en busca de algún umbral característico. En la **FIGURA 3.1** se muestra la relación entre NDVI y el porcentaje de casos mensuales (con respecto al total anual) de malaria total, para diversos municipios de Colombia. Se concluye que es necesario tener un valor de NDVI mayor que 0,35 para que se presenten más del 10% de los casos de malaria del año en un mes dado.

Este umbral nos permite construir un mapa de riesgo malárico (**FIGURA 3.2**) en el cual se muestra para cada punto de Colombia el número de meses en los cuales se presenta un valor del NDVI mayor que 0,35.

3.4. Conclusiones

Se ha investigado la influencia del NDVI en el porcentaje de casos de malaria en municipios colombianos. Se encontró que cuando el NDVI es mayor de 0.35 en ese mes suceden más del 10% de los casos de malaria en ese año. Se hizo un recuento histórico de la información del NDVI y se construyó un mapa en el cual se muestra los sitios colombianos en los cuales hay más probabilidad de que ocurra malaria.

Con el fin de actualizar y aumentar la información almacenada en la Base de datos del sistema SIGMA, se obtuvo información disponible del sitio web de la Organización Latinoamericana de Salud. (<http://www.col.ops-ms.org/sivigila/IndiceBoletines2003.asp>).

Esta información contiene los casos de malaria, discriminada en casos de *P. falciparum*, *vivax* y *mixta*; para los departamentos de Colombia, a escala semanal, durante el periodo entre 1999 y 2003.

Tal información fue incorporada a la base de datos del SIG y actualmente se está trabajando en su agregación a resolución temporal mensual, para complementar la información que actualmente se encuentra disponible en el despliegue de mapas a escala departamental.



Capítulo IV: Relación entre Casos de Malaria, Precipitación y Tempetura

El Sistema de Información Geográfica de la Malaria en Colombia (SIGMA) permite relacionar los casos de malaria en un determinado municipio de Colombia, con la precipitación y la temperatura en ese mismo lugar.

Para relacionar estas variables se realizan gráficos de la Amplitud del Ciclo Anual de Precipitación vs Temperatura Media y de los Totales de Precipitación vs Temperatura Media. En ambas, se grafican los casos de malaria discriminados en tres clases: Casos Altos, donde el número de casos se encuentra por encima de una desviación estándar de los mismos; Casos Medios, donde el número de casos se encuentran en el intervalo entre la media de los datos menos una desviación estándar y la media de los datos más una desviación estándar; y Casos Bajos, donde el número de casos se están por debajo de la media de los datos menos una desviación estándar.

4.1. Interfaz

La interfaz principal se presenta en la **FIGURA 5.1**; en ella se permite al usuario elegir el tipo de gráfico que desea visualizar, además de determinar si desea ver el gráfico para una año entre los meses enero y diciembre, o un año entre los meses Junio y Mayo. Una lista en el lado derecho le permite visualizar los municipios para los cuales estás gráficas se encuentran disponibles y entre ellos puede seleccionar uno o varios para generar las gráficas.

Después de haber elegido un municipio y un estilo de gráfica, se puede visualizar un gráfico como el presentado en la **FIGURA 5.2**, en la cual se pueden visualizar las tres clases de establecidas para casos de malaria en la el tipo de gráfica seleccionada en la interfaz principal.

4.2. Información Disponible

La visualización de las diferentes gráficas está condicionada por la disponibilidad de información en la base de datos, tanto de malaria como de las variables de precipitación y temperatura. Para llevar a cabo este módulo, se incorporó información en la base de datos estaciones en las cuales se tenían datos de precipitación y temperatura, ubicadas en diferentes municipios de Colombia.

Con el fin de actualizar y aumentar la información almacenada en la Base de datos del sistema SIGMA, se obtuvo información disponible del sitio web de la Organización Latinoamericana de Salud. (<http://www.col.ops-ms.org/sivigila/IndiceBoletines2003.asp>).

Esta información contiene los casos de malaria, discriminada en casos de P.

falciparum, vivax y mixta; para los departamentos de Colombia, a escala semanal, durante el periodo entre 1999 y 2003.

Tal información fue incorporada a la base de datos del SIG y actualmente se esta trabajando en su agregación a resolución temporal mensual, para complementar la información que actualmente se encuentra disponible en el despliegue de mapas a escala departamental.

4.2.1. Ciclo anual entre enero y diciembre

Para generar estas gráficas se utilizó la información de malaria anual de la que se dispone en la base de datos, y la información de variables recientemente insertadas. Los municipios que contaban con datos de estas tres variables fueron: Aguazul (Casanare), Arauca (Arauca), Arboletes (Antioquia), Armenia (Quindío), Barrancabermeja (Santander), Bello (Antioquia), Buenaventura (Valle), Cartagena (Bolívar), Cauca (Antioquia), Chinchiná (Caldas), Consacá (Nariño), Corozal (Sucre), Cúcuta (Norte de Santander), El Bagre (Antioquia), El Carmen de Bolívar (Bolívar), El Tambo (Cauca), Flandes (Tolima), Gigante (Huila), Girón (Santander), Guamo (Tolima), Ibagué (Tolima), Magangue (Bolívar), Manizales (Caldas), Medellín (Antioquia), Medina (Cundinamarca), Montelíbano (Córdoba), Mosquera (Nariño), Neiva (Huila), Palestina (Caldas), Palmira (Valle), Pasto (Nariño), Pinchote (Santander), Puerto Boyacá (Boyacá), Puerto Wilches (Santander), Quibdo (Chocó), Remedios (Antioquia), Restrepo (Meta), Salazar (Norte de Santander), San Marcos (Sucre), Santa Catalina (Bolívar), Santa Marta (Magdalena), Soledad (Atlántico), Tauramena (Casanare), Tibú (Norte de Santander), Tulúa (Valle), Valledupar (Cesar) y Villavicencio (Meta).

4.2.2. Ciclo anual entre junio y mayo

Para la generación de estas gráficas se usó la información de malaria mensual disponible en la base de datos, e información de las variables de temperatura y precipitación recientemente insertadas. Los municipios que contaban con datos de estas tres variables fueron: Magangue (Bolívar), Buenaventura (Valle) y Tibú (Norte de Santander).

4.3. Resultados

4.3.1. Ciclo anual considerado entre los meses de enero y diciembre

Para cada una de las gráficas generadas con la información disponible para años entre los meses de enero y febrero se hizo una revisión con el fin de observar algún

comportamiento similar. A continuación se presenta el análisis de seis de estos municipios.

4.3.1.1. Amplitud del Ciclo Anual de Precipitación vs Temperatura Media

Algunos de los gráficos de Amplitud del Ciclo Anual de Precipitación vs Temperatura Media generados para años entre los meses de enero y diciembre son presentados en la **FIGURA 5.3**, en ellos se puede observar que el comportamiento de estos gráficos no es similar:

- En el municipio de Soledad se observan casos altos y bajos en condiciones donde la temperatura media esta entre 27.5°C y 27.75°C y la amplitud del ciclo anual de precipitación es alta o baja en la escala de la gráfica.
- En el municipio de Palmira, se observa que los puntos de casos altos y bajos se presentan en los puntos donde la temperatura media es mayor.
- En el municipio de Caucasia, que es uno de los que mas información contiene, podemos observar como los casos altos se registran en tres de los cuatro extremos de la gráfica: cuando la amplitud del ciclo anual de precipitación es alta pero la temperatura media es baja, cuando la temperatura media es alta pero la amplitud del ciclo anual de precipitación es baja y cuando ambas variables son altas; además los casos bajos se presentan cuando la temperatura media es baja o alta.
- En el municipio de Remedios se observa que tanto los casos altos como los bajos se encuentran en el centro de la gráfica.
- En el municipio de Villavicencio, los casos medios se encuentran en condiciones donde o la amplitud del ciclo anual de precipitación es baja o la temperatura media lo es.
- Por último, en el municipio de Armenia se puede observar que los casos altos se presentan cuando la amplitud del ciclo anual es baja.

4.3.1.2. Totales de Precipitación vs Temperatura Media

Los gráficos de Totales de Precipitación vs Temperatura Media generados para años entre los meses de enero y diciembre, para los mismos municipios de la Figura 5.3, son presentados en la **FIGURA 5.4**, su comportamiento es detallado a continuación:

- En el municipio de Soledad es menos clara la forma como se presentan los casos altos y bajos.
- En el municipio de Palmira se observan que tanto los casos altos como bajos se presentan en los casos donde los totales de precipitación son menores.
- En el municipio de Caucasia las tres clases se encuentran dispersas en la gráfica.
- En el municipio de Remedios, se puede observar una concentración especial de

los casos medios en los puntos donde los totales de precipitación son mayores de 2400mm, y casos medios y bajos cuando los totales de precipitación son menores en la escala de la gráfica.

- En el municipio de Armenia la gráfica es mucho menos clara que la presentada en la **FIGURA 5.3**, ya que los datos altos, que antes se agrupaban, ahora se encuentran dispersos en la gráfica.
- Por último, en el municipio de Villavicencio se observa un comportamiento similar al de la **FIGURA 5.4**, es decir, los casos medios se encuentran en condiciones donde o la amplitud del ciclo anual de precipitación es baja o la temperatura media lo es.

4.3.2. Ciclo anual considerado entre los meses de junio y mayo

Para cada una de las gráficas generadas con la información disponible para años entre los meses de junio y mayo se hizo una revisión similar a realizada anteriormente. Esta revisión es presentada a continuación.

4.3.2.1. Amplitud del Ciclo Anual de Precipitación vs Temperatura Media

Para todos los municipios que disponían de información para generar las gráficas con años entre los meses junio y mayo, se realizaron gráficas de Amplitud del Ciclo Anual de Precipitación vs Temperatura Media, presentadas en la **FIGURA 5.5**. Con estas gráficas se pudo observar lo siguiente:

- En el municipio de Buenaventura, los casos bajos y medios se presentan en puntos donde la temperatura media se encuentra por encima del valor medio.
- En el municipio de Magangué, los casos bajos y medios se presentan en donde la amplitud del ciclo anual de precipitación se encuentra por debajo del valor medio de esta.
- En el municipio de Tibú, las tres clases se encuentran dispersas por la gráfica.

4.3.2.2. Totales de Precipitación vs Temperatura Media

Para todos los municipios que disponían de información para generar las gráficas con años entre los meses junio y mayo, se realizaron gráficas de Amplitud del Ciclo Anual de Precipitación vs Temperatura Media, presentadas en la **FIGURA 5.6**. Para los tres municipios se observó que las tres clases están dispersas por la gráfica.

4.4. Conclusiones

Las observaciones anteriores muestran un cierto agrupamiento entre clases que debe seguirse estudiando con el fin de determinar la relación entre las variables de Precipitación y Temperatura con los casos de malaria. Estos resultados están basados en poco número de años en los que se cuenta con información, es deseable ampliar las series de datos para ser mas concluyentes, tales como los que se presentan en el trabajo de Poveda et al. (2001)..



Capítulo V: Estado Actual del SIGMA

5.1. Introducción

El Sistema de Información Geográfica de Malaria en Colombia (SIGMA), es un programa diseñado para visualizar, en un sistema de información georeferenciado y de manera interactiva, la base de datos de malaria del Ministerio de la Protección Social de Colombia, su relación con las principales variables climáticas a escala municipal, departamental y nacional. Adicionalmente, dicha base de datos cuenta con información a escala municipal de variables entomológicas, como los tipos de vectores de la malaria presente; climática, como temperatura y precipitación; de población rural y urbana y clínicas que se refieren al número de casos de malaria registrados en cada municipio. Esta aplicación está en desarrollo en cooperación con el Ministerio de Protección Social

5.2. Base de Datos

Una valoración de la información existente permitió concluir acerca de la necesidad de utilizar un motor base de datos adecuado. Para ello se definió el uso del DBMS (Sistema Manejador de Base de Datos) denominado MySQL el cual es de dominio publico con licencia GPL (GNU Public Licence). Debido a su diseño, el MySQL presenta varias ventajas como: mayor velocidad y estabilidad que otros Manejadores de Bases de Datos, mayor rendimiento y menor consumo de recursos computacionales.

El análisis de la información malárica e hidroclimática existente en el país, permitió el desarrollo de un modelo relacional que describe la estructura de la base de datos del sistema de información, tal como se muestra en la Figura 6.1. Una vez diseñado el modelo relacional, se incorporó la información anual de incidencia malárica de Colombia correspondiente al período 1980 - 1996. Además datos de 17 municipios de los cuales se tiene información mensual: El Bagre, Caucasia, San Vicente, Tibú, El banco, Puerto Asís, Buenaventura, Nuquí, Bahía Solano, Tamara, Tauramena, Aguazul, Villanueva, Hato Corozal, Monterrey, Yopal y Magangué.

Adicionalmente, se importó información mensual a la base de datos, referente a índices macroclimáticos tales como: temperatura superficial del mar en las diferentes zonas del Océano Pacífico relevantes a la ocurrencia del fenómeno El Niño, el Índice de Oscilación del Sur y la temperatura superficial del Océano Atlántico, con el objeto de desplegar el grado de asociación entre los índices maláricos y la ocurrencia del fenómeno El Niño, durante el cual se presentan fuertes epidemias de malaria en Colombia.

5.3. Módulos del Software

El software se desarrolló por módulos de acuerdo con los requerimientos de visualización y actualización de información del sistema.

5.3.1. Visualización de Series de Tiempo

El módulo de visualización de series de tiempo, permite al usuario visualizar simultáneamente, de acuerdo con la información almacenada en la base de datos, los índices maláricos de los municipios con información mensual, las variables macro-climáticas (**FIGURA 6.2**) y variables hidroclimáticas del municipio (**FIGURA 6.3**), y permite estimar el coeficiente de correlación lineal entre estas variables.

La interfaz permite visualizar los datos reales y las anomalías estandarizadas de los índices macroclimáticos, asociadas principalmente al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. Con respecto a la información malárica, el usuario del sistema puede elegir entre desplegar el número de casos o las incidencias anuales de cada uno de los parásitos causantes de malaria (*P. vivax*, *P. falciparum*, malaria mixta), discretizada para todos los municipios en los cuales se cuenta con información mensual. Además, se le brinda al usuario la posibilidad de identificar la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña sobre las series de tiempo desplegadas en la interfaz. Para la visualización de esta información se utilizaron las librerías JFree-Chart, las cuales son de licencia GPL.

5.3.2. Visualización de Información Municipal

Un mapa de Colombia, con su división municipal, permite al usuario visualizar de manera fácil e interactiva, con un solo clic, las series de tiempo de las incidencias o el número de casos de malaria del municipio seleccionado (Ver **FIGURA 6.4**). Además, el sistema despliega la información referente al municipio y el departamento al cual pertenece y los tipos de mosquitos vectores transmisores de la malaria (*Anopheles*) presentes.

Para poder visualizar este mapa, se usó la librería de clases VisAD, la cual contiene un conjunto de componentes de Java para la visualización interactiva y colaborativa de datos numéricos, principalmente espaciales.

En la parte superior izquierda de la interfaz aparece el nombre del municipio y el departamento al que pertenece; en la superior derecha los tipos de *Anopheles* que se han detectado. En el lado izquierdo se visualiza el mapa de los municipios de Colombia y en el derecho la serie de tiempo del municipio seleccionado. En la **Figura 6.4** se presenta la información del municipio de Quibdó. En la parte inferior derecha

de la pantalla aparece un selector de municipios, ordenados alfabéticamente. En caso de ser seleccionado un municipio, éste aparecerá resaltado por su nombre y un color distintivo sobre el mapa de Colombia.

5.3.3. Visualización de Información Departamental y Nacional

La opción de visualización departamental es análoga a la municipal (Ver **FIGURA 6.5**). En este caso, las series de tiempo corresponden a los agregados de los registros de cada uno de los municipios que pertenecen al departamento seleccionado. La opción de visualización nacional presenta el mapa de Colombia con la información agregada de todos los municipios.

5.3.4. Búsquedas Interactivas

El módulo de búsquedas interactivas permite al usuario ubicar interactivamente municipios en los cuales se presenten circunstancias especiales de acuerdo a unas especificaciones dadas (Ver **FIGURA 6.6**). En el desarrollo de este módulo, se tuvieron en cuenta el número de incidencias e índices de malaria por *P. falciparum*, *P. vivax*, malaria mixta y parasitaria (suma de las tres anteriores), el número de habitantes y los años en los que se quiere efectuar la búsqueda.

Esta interfaz sirve tanto para realizar informes (Ver **FIGURA 6.7**) como para mostrar los municipios en el mapa de Colombia que concuerden con la búsqueda realizada (Ver **FIGURA 6.8**).

5.4. Actualización de información

La actualización de la información de la base de datos se puede hacer de manera interactiva, por medio de una interfaz que permite seleccionar los datos de un municipio, con un filtrado opcional por años, y actualizar o adicionar información. Los datos que se pueden actualizar son población y casos de malaria, y de acuerdo con la resolución temporal hay una interfaz para información anual (Ver **FIGURA 6.8**) y otra para información mensual (Ver **FIGURA 6.9**).

5.5. Conclusiones

Se ha adelantado el desarrollo del Sistema de Información Geográfica para el manejo y la visualización de la información malárica en Colombia, con posibilidades de visualizar espacial y temporalmente la información almacenada en la base de datos. El sistema posee diferentes herramientas que facilitan la consulta, despliegue y análisis de las relaciones existentes entre variables climáticas, macroclimáticas y de incidencia malárica en escalas municipal, departamental y nacional en Colombia. Se continuará en su desarrollo en conjunto con el personal del Ministerio de la Protección Social.



Capítulo VI: Análisis de Variables Hidrometeorológicas

6.1. Introducción

El clima y su comportamiento en diferentes escalas espaciales y temporales juegan un papel fundamental en todos los aspectos de la dinámica social, económica y ambiental, por lo cual deben ser estudiados e involucrados en el diseño de todo tipo de planes, obras y políticas. En Colombia son muchos los elementos que se conjugan para hacer del clima un sistema altamente complejo: su posición tropical; el movimiento anual de la Zona de Convergencia Intertropical; la vecindad con el Océano Pacífico, el Mar Caribe y la cuenca Amazónica; la presencia de la cadena montañosa de los Andes; el desarrollo de las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño – Oscilación del Sur) y la alta variabilidad intrínseca de procesos hidrológicos como la precipitación, la evapotranspiración, la humedad del suelo, etc. (León et al, 2000; Vélez et al, 2000; Poveda, 2004, Poveda et al, 2005a).

En escalas de tiempo interanuales, la más importante fuente de variabilidad del clima colombiano son las fases extremas del fenómeno ENSO (Poveda y Mesa, 1996; Poveda y Mesa, 1997; Poveda, 2004). Durante una fase cálida (El Niño) se presentan sobre Colombia anomalías hidrológicas negativas, es decir, disminución de la precipitación y de los caudales de los ríos; lo contrario (anomalías positivas) ocurre durante la fase fría del fenómeno (La Niña). El efecto de dicho fenómeno sobre la hidroclimatología colombiana es prácticamente inmediato, debido a la cercanía del país con el Océano Pacífico tropical Este (Poveda y Mesa, 1996).

Ya ha sido demostrado el alto grado de asociación existente entre la variabilidad hidroclimatológica, especialmente la debida al fenómeno ENSO, y el desarrollo de brotes de malaria en Colombia (Poveda y Rojas, 1996; Poveda y Rojas, 1997; Poveda et al, 2001). Por lo tanto, cualquier avance en la comprensión del comportamiento de las variables hidrometeorológicas implica un paso adelante en la prevención de dicha enfermedad. Así, dentro del marco de éste proyecto: “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA LA MALARIA EN COLOMBIA”, adelantado conjuntamente por el Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos (PARH) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, el Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales (PECET) de la Universidad de Antioquia y la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB), y financiado por COLCIENCIAS, se ha hecho evidente la necesidad de mejorar el conocimiento actual de la hidroclimatología colombiana.

Dentro de las variables hidrometeorológicas, la precipitación es tal vez la que encierra mayor complejidad en su análisis y en el estudio de su comportamiento espacial y temporal, pese a ser la componente del ciclo hidrológico de más fácil medición; esto es particularmente cierto en regiones tropicales montañosas como Colombia. La alta variabilidad de la lluvia se manifiesta en un amplio rango escalas espaciales y temporales (Mejía et al, 1999; Poveda y Mesa, 1997; Poveda et al

2005a). A diferencia de la evapotranspiración, para la que existen muchos métodos de estimación basados tanto ecuaciones empíricas como en principios físicos, o de la temperatura, que suele estar relacionada directamente con la altura, la lluvia sólo exhibe algunos patrones espaciales y temporales que se hacen evidentes a partir de observaciones y mediciones. Por tanto dicha variable es la más susceptible de ser mejorada involucrando más información y mejores técnicas de análisis.

Aunque la cantidad, calidad y cubrimiento espacial de las estaciones pluviométricas y pluviográficas en el país distan mucho de ser adecuados para el estudio de un fenómeno tan complejo como la lluvia, existen varios trabajos que son un referente obligado para el análisis de la precipitación en Colombia, tanto por sus altos componentes físicos y observacionales como por el rigor matemático y computacional con el que han sido desarrollados. Dentro del primer grupo pueden citarse los estudios de Snow (1976) y Oster (1979), que presentan mapas de precipitación media anual para nuestro país. En el trabajo de Oster se hace además énfasis en la existencia de óptimos pluviográficos, es decir, alturas sobre el fondo de los valles montañosos para las cuales la precipitación media anual es máxima, disminuyendo tanto por debajo como por encima de ellas.

Más recientes son los estudios de Eslava (1994), Vélez et al (2000) y Poveda et al (2005b). En el primero se hace un análisis del comportamiento espacial y temporal de algunas variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura, humedad, nubosidad, velocidad del viento, insolación, evapotranspiración y balance hídrico) en la región del Pacífico colombiano. En los otros trabajos se realiza un esfuerzo importante por caracterizar las componentes fundamentales del balance hidrológico (precipitación, evapotranspiración, caudales) en el país, obteniendo mapas de distribución espacial de cada una de ellas e integrándolos en un sistema de información geográfica (Hidro-SIG).

La estimación de mapas de precipitación media anual que reflejen el acervo observacional presentado en estos estudios y que además estén respaldados por más y mejores datos y por técnicas de interpolación rigurosas es el objetivo primordial de la fase del proyecto que se resume en este informe. Uno de los puntos más importantes es el uso de datos de precipitación de origen satelital, que permitan obtener los campos de lluvia sobre el Océano Pacífico y el Mar Caribe colombianos, tradicionalmente ignorados en este tipo de estudios y cuya influencia sobre la climatología del país está suficientemente demostrada (Poveda y Mesa, 1997). Se hace énfasis en mejorar la información en regiones como el Pacífico y el Bajo Cauca antioqueño, por estar dentro de los principales focos de malaria en el país y por ser además los puntos claves de la investigación de campo que se adelantó en ésta investigación.

En la sección 7.2 se resumen las fuentes de información primaria y secundaria

utilizadas, tanto de estaciones en tierra como de información satelital. La metodología empleada y los mapas obtenidos para las principales variables hidrometeorológicas en la región noroccidental del país se ilustran en la sección 7.3. En la sección 7.4 se resume el estado de desarrollo del nuevo mapa de precipitación de Colombia y en la sección 7.5 se presentan las conclusiones y consideraciones finales del capítulo.

6.2. Información utilizada

Para la estimación de un mapa de precipitación mejorado respecto a los actualmente existentes, que cuente con un fuerte carácter físico y que resuma de forma adecuada las dinámicas climáticas locales (como los óptimos pluviográficos, Oster, 1979) se hace necesario contar con información de alta calidad, con períodos de cubrimiento adecuados para capturar el comportamiento anual e interanual de ésta variable, y con una distribución espacial que permita caracterizar las subregiones de la zona de estudio. Sin embargo, en nuestro país la red observacional de pluviógrafos y pluviómetros dista mucho de estas condiciones ideales. La mayoría de las estaciones se concentra en la zona andina, dejando grandes porciones del territorio nacional prácticamente sin cobertura alguna. Adicionalmente, la calidad misma de los datos registrados en cada estación es bastante cuestionable, situación que no ha cambiado desde la época de Oster (1979), quién menciona que la única entidad que procesa adecuadamente sus registros es Cenicafé. A estos problemas se adiciona uno más grave aún: los datos hidrometeorológicos de la principal entidad estatal, el IDEAM, no son de acceso público, por lo que cualquier estudio que se quiera realizar se enfrenta siempre con el problema de información restringida y de alto costo.

Dado que vastas áreas del territorio de Colombia, en especial la Orinoquía y la Amazonía, están desprovistas de información pluviográfica o pluviométrica, debe entonces recurrirse a información de países limítrofes con Colombia y a las bases de datos de precipitación satelital (ambas de acceso público) que permiten mejorar el conocimiento de la lluvia tanto en regiones sin información como sobre el Océano Pacífico y el Mar Caribe. A continuación se resumen brevemente las fuentes de información utilizadas en el presente estudio; la cobertura temporal de los datos es muy variable y a menudo se cuenta sólo con los promedios mensuales y anuales en lugar de la serie completa de la estación. Sin embargo, se ha procurado usar la mayor cantidad de datos posibles, renunciando a ellos sólo cuando los períodos de cobertura son muy cortos y/o el porcentaje de datos faltantes es muy alto.

6.2.1. Información de Colombia.

Sobre el territorio nacional se cuenta en total con datos de 1180 estaciones, provenientes de las siguientes fuentes:

- 41 estaciones de Cenicafé, con registros mensuales de longitud variable entre 13 y 57 años.
- 154 estaciones del estudio de la Corporación del Valle del Cauca CVC sobre la precipitación en su jurisdicción (González, 1984), con promedios mensuales de largo plazo.
- 68 estaciones del trabajo de Eslava (1994), con promedios mensuales y anuales de largo plazo.
- 707 estaciones del Ideam, muchas de las cuales fueron incluidas en el proyecto de Balances Hídricos de Colombia (Vélez et al, 2000; Poveda et al, 2005b), y que presentan registros mensuales de longitud variable entre 6 y 94 años.
- 7 estaciones del trabajo de Mesa et al (1997), correspondientes a promedios mensuales y anuales de largo plazo en aeropuertos de las principales ciudades del país.
- 109 estaciones de las bases de datos del proyecto LBA (Large-scale Biosphere Atmosphere experiment) en la Amazonía, que provee de datos de acceso libre de temperatura, caudal y precipitación en un amplio sector de Suramérica (disponible en la página WEB <http://www.lba-hydronet.sr.unh.edu>). Los datos de lluvia obtenidos son registros mensuales de longitud variable entre 8 y 124 años.
- 16 estaciones de Empresas Públicas de Medellín EPM, con registros mensuales de longitud variable entre 24 y 50 años.
- 78 estaciones del trabajo de Rangel y Arellano (2004), que presentan promedios mensuales y anuales de largo plazo.

6.2.2. Información de países limítrofes

La información de precipitación en los países limítrofes de Colombia y en aquellos cercanos al territorio marítimo del país, necesaria para una comprensión adecuada de nuestra hidrometeorología, se resume a continuación:

- Antillas (Curazao): 1 estación de la base de datos de LBA, con 8 años de registros mensuales.
- Brasil: 49 estaciones de la base de datos HyBam (Hidrología da Bacia Amazônica, disponible en <http://golden.teledetection.fr/~gerard/whybam2/whybam.php>) con registros mensuales de longitud variable entre 6 y 41 años; 2 estaciones del trabajo de Mesa et al (1997), con promedios mensuales y anuales de largo plazo; 37 estaciones de la base de datos de LBA, con registros mensuales de longitud variable entre 6 y 71 años.

- Costa Rica: 5 estaciones del trabajo de Mesa et al (1997), con promedios mensuales y anuales de largo plazo.
- Ecuador: 246 estaciones de la base de datos de LBA, con registros mensuales de longitud variable entre 9 y 99 años; 16 estaciones del trabajo de Pourrut (1994), con promedios mensuales y anuales de largo plazo.
- Nicaragua: 2 estaciones del trabajo de Mesa et al (1997), con promedios mensuales y anuales de largo plazo.
- Panamá: 6 estaciones del trabajo de Mesa et al (1997), con promedios mensuales y anuales de largo plazo; 2 estaciones de la base de datos de LBA, con registros mensuales de longitud variable entre 14 y 80 años.
- Perú: 190 estaciones de la base de datos de LBA, con registros mensuales de longitud variable entre 11 y 49 años.
- Venezuela: 8 estaciones del trabajo de Mesa et al (1997), con promedios mensuales y anuales de largo plazo; 33 estaciones de la base de datos de LBA, con registros mensuales de longitud variable entre 8 y 98 años; 12 estaciones del trabajo de Pulwarty et al (1998), con promedios mensuales y anuales de largo plazo.

En la **FIGURA 7.1** se ilustra la disposición de todas las estaciones en tierra (1756 en total) que conforman la base de datos utilizada para la elaboración del mapa de precipitación de Colombia. Dichas estaciones cubren una región comprendida entre 90°W y 60°W de longitud y 10°S y 15°N de latitud. Se observa que sobre el territorio colombiano, las estaciones se concentran casi en su totalidad en la región andina, mientras que grandes zonas del oriente del país están prácticamente desprovistas de información.

6.2.3. Información de precipitación global – bases de datos satelitales

Para mejorar la cobertura espacial de la información de precipitación e incorporar a los análisis la lluvia sobre el Océano Pacífico y sobre el Mar Caribe se utilizan las bases de datos disponibles en Internet. Dichas bases de datos son de acceso público y varían tanto en su resolución espacial como temporal, así como en los algoritmos con los que han sido producidas y en los procedimientos de validación. Se enumeran a continuación las bases de datos analizadas, sus principales características y la fuente de donde provienen.

- GPCP (Global Precipitation Climatology Project): resolución espacial de 2.5° x 2.5°, datos mensuales desde Enero de 1979 hasta Marzo de 2004. Disponible en <http://cics.umd.edu/~yin/GPCP/main.html>
- Jaeger Monthly Mean Precipitation Data: resolución espacial de 2.5° lat x 5° long, de 1931 a 1960 sobre continentes y de 1955 a 1965 sobre océanos. Disponible en

http://daac.gsfc.nasa.gov/hydrology/readme_html/jaeger_gauge_precip_readme.shtml

- Legates Surface and Ship Observation of Precipitation: resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, climatología desde 1920 hasta 1980 construida a partir de datos de estaciones en tierra y mediciones en barcos. Disponible en http://daac.gsfc.nasa.gov/hydrology/readme_html/legates_gauge_precip_readme.shtml
- CRU – University of West Anglia: resolución espacial de 2.75° lat x 3.75° long, datos mensuales desde 1974 hasta 1994. Disponible en <http://www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/datasets/global/>
- RGPI (Reconstructed Global Precipitation Index): resolución espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, datos diarios desde Julio de 1983 hasta Diciembre de 2001. Disponible en <http://www.geog.ucl.ac.uk/~mtodd/research1b.htm>
- GPI (Global Precipitation Index): resolución espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, datos mensuales desde Enero de 1986 hasta Diciembre de 1995. Disponible en http://daac.gsfc.nasa.gov/hydrology/readme_html/arkin_gpcp_gpi_readme.shtml
- CMAP (Climate Merged Analysis of Precipitation): resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, datos mensuales desde Enero de 1979 hasta Diciembre de 2002. Disponible en ftp://ftp.cgd.ucar.edu/pub/CAS/XIE_ARKIN/
- Reanalysis NCEP/NCAR: resultados de un modelo de circulación general de la atmósfera que usa como condiciones de frontera, iniciales y para su validación datos de estaciones en tierra. Resolución espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, datos mensuales desde Enero de 1948 hasta Diciembre de 2004. Disponible en <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived.html>
- PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks): resolución espacial $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, datos cada 6 horas desde Marzo de 2000 hasta Enero de 2005. Disponible en: <http://hydis8.eng.uci.edu/persiann/>

De todas las bases de datos revisadas se escogieron para los análisis definitivos las de PERSIANN y LEGATES, debido tanto a su buena resolución espacial como al hecho de presentar valores de precipitación compatibles con los de las estaciones en tierra. Es común que los algoritmos de procesamiento de la información satelital (como GPI, CMAP, REANALISIS) se concentren más en representar las tendencias espaciales de los campos de lluvia que en obtener valores reales de precipitación. Estos últimos son imprescindibles en un estudio como el desarrollado aquí, para la combinación adecuada de los datos en tierra con la información satelital.

La **FIGURA 7.2** ilustra el mapa de promedios anuales de precipitación para la zona de estudio obtenidos a partir de la base de datos PERSIANN. Esta base de datos fue construida con la información de la misión TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission, Kummerov et al, 1998) por investigadores de la Universidad de California en Irvine (Hsu et al, 1997; Hsu et al, 1999). Se observa que el campo de lluvias anual corresponde cualitativamente bien con la distribución de la precipitación sobre Colombia: el Pacífico y Bajo Cauca antioqueño muy lluviosos, los Andes con precipitaciones medias, la Orinoquía y Amazonía lluviosas y la zona norte seca, en especial la Guajira. Además se nota que los valores coinciden aproximadamente con los de datos en tierra (por ejemplo, cerca de 8000 mm/año en el Chocó).

6.3. Metodología y resultados para el nor-occidente del país

Como una primera aproximación al problema en una región más detallada de Colombia, se desarrollaron mapas de precipitación media anual y temperatura media anual para el departamento de Antioquia y zonas aledañas, incluyendo las regiones de interés del Pacífico y del Bajo Cauca antioqueño. La estimación de la temperatura media anual es importante tanto para la obtención de otras variables hidrológicas (p. ej., evapotranspiración) como por el hecho de ser uno de los factores determinantes en el desarrollo del mosquito anofeles, organismo portador y transmisor de la malaria (Poveda et al, 1999; Rúa et al, 2005).

La información básica para la estimación de dichos mapas consistió en estaciones de precipitación y de temperatura en la región comprendida entre 5°N y 9°N y 77°40'W y 73°30'W. Las primeras proceden de los datos ya mencionados recopilados para Colombia, y son 383 en total [230 del Ideam, 12 de Cenicafé, 27 de Eslava (1994), 3 de Mesa et al (1997), 44 de la LBA, 20 de EPM y 47 de Rangel (2004)]. Las estaciones de temperatura son 130 en total y proceden de distintas fuentes [IDEAM, LBA, Eslava (1994) y Rangel (2004)]. Para mejorar la cobertura espacial de la información de temperatura media anual, se utilizaron los valores reportados por El Mundo (2000) y Senado de la República (1989). Las estaciones definitivas utilizadas para la obtención de los mapas de precipitación y temperatura se ilustran en la **FIGURA 7.3**.

La estimación de los mapas de precipitación promedio anual y de temperatura media anual sobre el departamento de Antioquia y zonas aledañas se realizó mediante interpolación espacial a partir de la información de las estaciones, usando el método de kriging (Bras y Rodríguez-Iturbe, 1985). Este método geoestadístico permite estimar el valor de una variable en todos los puntos de un campo a partir de datos puntuales, con la ventaja adicional de admitir información secundaria (deriva), relacionada con la variable de interés, para mejorar los campos calculados. En el caso del mapa de precipitación se usó como deriva el mapa de Oster (1979),

debido a la fuerte base física y observacional con la que fue construido. Dicho mapa fue combinado con los datos de la base LEGATES para incluir la información de precipitación en el Océano Pacífico y el Golfo de Urabá.

Para el mapa de temperatura se utilizó la elevación como variable auxiliar de apoyo para la estimación del campo distribuido, dada la relación existente entre altura sobre el nivel del mar y temperatura, que se evidencia en el comportamiento mismo de los datos. La **FIGURA 7.4** muestra un gráfico de Temperatura vs. Altura para el departamento de Antioquia y zonas aledañas, en el que están incluidas todas las estaciones; en él se muestra la relación lineal inversa existente entre ambas variables. A partir de dicho gráfico se infiere una disminución de 5.2 °C por cada 100 metros de aumento en la elevación, lo que es consistente con el gradiente térmico saturado teórico, de esperarse en el trópico húmedo.

Los mapas definitivos de precipitación y temperatura se ilustran en la **FIGURA 7.5**. La resolución espacial de ambos mapas es de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km.).

Se observa en el mapa de precipitación la presencia de zonas de valores altos en el Chocó y el Bajo Cauca Antioqueño y zonas secas en la Cordillera Central y en el Valle del río Cauca a la altura de Santafé de Antioquia. El mapa de temperatura refleja la distribución de la elevación en la región, con las zonas más frías en las partes altas de las Cordilleras Central y Occidental.

Los mapas obtenidos fueron validados siguiendo el procedimiento usual. Se retiraron del análisis algunas estaciones, se repite la estimación y se calculan los errores punto a punto entre los valores obtenidos mediante la aplicación del método de kriging y los valores observados (medidos). El mapa de precipitación media anual se validó retirando 80 estaciones; el error relativo promedio en la estimación fue de 20.2%, el error máximo fue de 196.6% y el mínimo de 0.2%. El error cuadrático medio en dicho mapa fue de 952 (mm/año)², valor aceptable si se tiene en cuenta que la precipitación en la región oscila entre 400 y 7200 mm/año aproximadamente. Para validar el mapa de temperatura se retiraron 61 estaciones, obteniéndose los siguientes resultados: error relativo promedio 5.2% (máximo=41%, mínimo=0.04%) y error cuadrático medio 1.949 (°C)², para valores de T en la región entre 6 y 29 °C. Una vez estimadas ambas variables, puede determinarse la evapotranspiración en la región haciendo uso de alguna de las fórmulas empíricas existentes (Barco y Cuartas, 1998; Vélez et al, 2000). En este caso se escogió el método de Turc, que permite estimar de manera sencilla la evapotranspiración real (ETR) sobre una región a partir de los valores de precipitación media anual y temperatura media anual, según la expresión:

Para $(P/L) > 0.316$

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

(1) $ETR = P$ Para $(P/L) < 0.316$

donde P es la precipitación media anual (mm/año), $L=300+25\cdot T+0.05\cdot T^3$ y T es temperatura media anual (°C). La fórmula de Turc se aplica entonces en todos los puntos de la región donde se estimó anteriormente la precipitación media anual y la temperatura para obtener la evapotranspiración media anual en mm/año.

Con la precipitación y la evapotranspiración puede calcularse la escorrentía neta en toda la región, partiendo de la ecuación de balance hídrico:

(2)
$$\frac{dS}{dt} = P - E - R$$

donde S es el almacenamiento de humedad en el suelo, P es la tasa de precipitación, E es la tasa de evapotranspiración real y R es la escorrentía neta en unidades de lámina de agua por unidad de tiempo. En el largo plazo (más de 20 años) se supone que los cambios en el almacenamiento de humedad en el suelo son muy pequeños en comparación con las demás variables de la ecuación (2), por lo que $dS/dt=0$, y la escorrentía neta en cada punto puede calcularse como $R=P-E$. Los mapas de evapotranspiración real (en lámina de agua por unidad de tiempo, en este caso, mm/año) y de escorrentía neta en cada punto (mm/año) se muestran en la **FIGURA 7.6**. La resolución espacial de dichos mapas es también 30 segundos de arco (~ 1 km.).

Se observa que los mayores valores de evapotranspiración se concentran en las zonas de alta precipitación y alta temperatura (Chocó y Bajo Cauca Antioqueño) y los menores valores se dan en las zonas altas de las Cordilleras Central y Occidental. La escorrentía anual, calculada mediante la ecuación del balance hídrico, refleja también las zonas de alta precipitación de la región; dicha escorrentía es la que se manifiesta en última instancia como caudales en los ríos, teniendo en cuenta los controles hidrográficos que definen las cuencas y la agregación aguas abajo de la escorrentía puntual.

Tanto la metodología empleada como los resultados obtenidos se presentan en el trabajo de Poveda (2006).

6.4. Un nuevo mapa de precipitación para Colombia

Más recientemente, el trabajo de Álvarez et al (2008) desarrolla una nueva metodología y usa información más actualizada para estimar un mejor mapa de precipitación promedio anual sobre el territorio de Colombia. El mapa resultante se muestra en la Figura **.

6.5. Conclusiones y consideraciones finales

Se ha mejorado el conocimiento de las variables hidrometeorológicas en Colombia y, en particular, en el departamento de Antioquia y zonas aledañas, incluyendo las principales áreas de investigación de campo del proyecto: la costa Pacífica y el Bajo Cauca antioqueño. Dichas mejoras son fundamentales para un adecuado diagnóstico de las condiciones climáticas que propician el surgimiento de brotes de malaria y para el desarrollo del sistema de alerta temprana de la enfermedad en Colombia.

La inclusión de información satelital de lluvia constituye un avance importante en el entendimiento de la climatología colombiana, ya que permite analizar el fenómeno en los territorios marítimos del país y en las zonas de escasa cobertura de estaciones pluviográficas y pluviométricas.



Capítulo VII: Modelación en Sistemas Dinámicos

Uno de los principales objetivos de las actividades de investigación es profundizar en el entendimiento de cómo el clima y/u otros factores interactúan con los elementos que juegan un papel fundamental en la dinámica de transmisión, empleando para ello varias estrategias de aproximación. Una de ellas está relacionada con el desarrollo, validación e implementación de modelos dinámicos basados en los mecanismos biológicos establecidos del ciclo de transmisión. Estas herramientas matemáticas tienen la fortaleza de que permiten integrar las variables climáticas relevantes, con la información demográfica, epidemiológica y entomológica característica de cada área de interés. Los principales objetivos de largo plazo de esta aproximación de modelación son:

(a) Evaluar el grado de efectividad (medición cuantitativa) de las intervenciones que se pueden llevar a cabo tanto en los Planes de Acciones Preventivas como en los Planes de Contingencia, y que pueden girar en torno a, entre otras, control vectorial, educación, participación comunitaria y tratamiento de casos infecciosos.

(b) Determinar cuáles son las intervenciones más importantes y cuándo ellas deben ser implementadas en cada sitio de interés.

Las comunidades científicas internacional y nacional han desarrollado varios modelos dinámicos para la representación de la epidemiología de la malaria, los cuales han contribuido significativamente a la profundización del entendimiento de la dinámica de transmisión de esta enfermedad. Muchos de ellos han sido revisados, discutidos y utilizados recientemente para apoyar los esfuerzos de erradicación de la malaria a nivel mundial. A pesar de que estos modelos pueden proveer unas aproximaciones adecuadas de algunas características biológicas y epidemiológicas de la transmisión, la gran mayoría de ellos no logran describir en su totalidad la compleja dinámica de esta enfermedad. En el desarrollo del proyecto se pretende utilizar la simulación para representar la dinámica de la malaria en condiciones de intensa transmisión y entender las complejas relaciones entre factores climáticos y no-climáticos y los brotes epidémicos de la misma.

Como propósitos fundamentales se plantearon: (a) comparar los resultados de simulación en condiciones de alta transmisión (para lo cual se seleccionaron dos áreas piloto), y (b) entender las asociaciones entre los patrones climáticos y los brotes epidémicos de la enfermedad, principalmente durante la ocurrencia del evento cálido del fenómeno ENSO. El desarrollo del modelo de simulación incluyó una extensiva revisión de los modelos propuestos por la comunidad internacional y la complementación/modificación de sus relaciones funcionales con el objetivo de representar las fluctuaciones observadas en la densidad del vector, así como otras características fundamentales de la transmisión.

Dentro del conjunto de objetivos del trabajo desarrollado se incluyeron: (a) estudiar el ciclo de transmisión de los parásitos con miras a definir las variables endógenas que son significativamente afectadas por condiciones climáticas; (b) estudiar la ecología del vector, los patrones de comportamiento de los mosquitos y los principales parámetros entomológicos, con el fin de determinar aquellas variables exógenas (y sus relaciones con anomalías climáticas), que se consideran relevantes para la representación de la dinámica de transmisión, haciendo particular énfasis en el entendimiento de las fluctuaciones en la densidad vectorial; (c) representar la dinámica poblacional de los mosquitos, particularmente durante sus estados juveniles, mediante la inclusión de análisis de disponibilidad de criaderos e interacciones con predadores naturales; y (d) analizar los resultados de simulación ante diferentes escenarios de cambio climático, perturbaciones en variables exógenas y cambios en los órdenes de magnitud de parámetros de control.

El macrodiagrama de interacción finalmente obtenido se muestra en la figura 8.1. El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas entre sí es el siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{HUS})}{dt} &= R_{na} \times P_{hu} + \gamma \times \text{HUM} - R_{mo} \times \text{HUS} - VC \times \frac{\text{HUF}}{P_{hu}} \times \text{HUS} \\ \frac{d(\text{HUI})}{dt} &= VC \times \frac{\text{HUF}}{P_{hu}} \times \text{HUS} - [\text{HUI}]_{t-(k_{in}+k_{er})} - R_{mo} \times \text{HUI} \\ \frac{d(\text{HUF})}{dt} &= [\text{HUI}]_{t-(k_{in}+k_{er})} - V \times \text{HUF} - R_{mo} \times \text{HUF} \\ \frac{d(\text{HUM})}{dt} &= V \times \text{HUF} - \gamma \times \text{HUM} - R_{mo} \times \text{HUM} \end{aligned}$$

para la componente que representa la población de humanos y, por lo tanto, la dinámica de transmisión de la enfermedad en los hospederos vertebrados.

Las variables de nivel HUS, HUI, HUF, y HUM denotan el número total de individuos susceptibles, infectados, infecciosos e inmunes en cada instante t , respectivamente. Esta propuesta se acerca al conjunto de ecuaciones propuestas por Martens (1997), aunque considerando el estado infectado en los hospederos humanos.

Para representar los estados juveniles de la población de mosquitos, se propuso el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \frac{d(E)}{dt} &= T_1(f_L) \times f_L \times f_{L_S} \times \langle (VS + VI + VF) \times R_{po} \rangle_{FI} - \frac{E}{k_E} - E \times \mu_E \times T_2(E) \\ \frac{d(L)}{dt} &= \frac{E}{k_E} - \frac{L}{k_L} - L \times \mu_L \times T_3(L) - a_S \times L \times PD \\ \frac{d(PU)}{dt} &= \frac{L}{k_L} - PU \times \mu_{PU} \times T_4(PU) - \frac{PU}{k_{em}} \end{aligned}$$

en donde las variables E, L y PU denotan el número total de huevos, larvas y pupas en cada instante de tiempo t, respectivamente. Para representar los estados imago de la población de vectores y, por lo tanto, la dinámica de transmisión de la enfermedad en mosquitos adultos, se propuso el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \frac{d(VS)}{dt} &= \frac{PU}{k_{em}} - (\mu_m + \alpha_m) \times VS - VS \times f \times \frac{HUF}{P_{hu}} \times S_V \\ \frac{d(VI)}{dt} &= VS \times f \times \frac{HUF}{P_{hu}} \times S_V - (\mu_m + \alpha_m) \times VI - \frac{VI}{n} \\ \frac{d(VF)}{dt} &= \frac{VI}{n} - (\mu_m + \alpha_m) \times VF \end{aligned}$$

en donde las variables VS, VI y VF representan el número total de mosquitos (adultos hembra) susceptibles, infectados e infecciosos en cada instante t, respectivamente. Finalmente, para representar la dinámica de los predadores naturales, se propuso inicialmente la siguiente ecuación, siguiendo los lineamientos del modelo de interacciones predador-presa tipo Lotka-Volterra (Lotka, 1925; Volterra, 1926; Sharov, 1996):

$$\frac{d(PD)}{dt} = b_p \times L \times PD - m_p \times PD$$

Las variables T1 (o OVI_M), T2 (o E_M_M), T3 (o L_M_M) y T4 (o PU_M_M) denotan las funciones tabuladas que representan los factores multiplicadores de, respectivamente, la tasa de ovipostura, la mortalidad de huevos, la mortalidad de larvas, y la mortalidad de pupas. Estas funciones fueron incluidas con el objeto de representar la competencia durante la ovipostura y los fenómenos sociales en las diferentes cohortes.

La herramienta tiene la posibilidad de ser ejecutada utilizando tres propuestas de modelos de transmisión: la Capacidad Vectorial, la Tasa de Inoculación Entomológica (EIR, por sus siglas en inglés), y la Tasa Básica de Reproducción, para diversas suposiciones de densidad vectorial: (a) la Tasa de Picadura a seres humanos registrada durante campañas en campo y para capturas peri e intradomiciliarias; (b) valores de la densidad del vector obtenidos a través de simulación y luego de la consideración de la dinámica de la ecología del vector; (c) la densidad crítica necesaria para mantener la transmisión del parásito (Dietz, 1988); (d) una densidad constante asumida; y (e) una densidad vectorial variable obtenida por consideración de fluctuaciones estacionales.

La función $\left\langle (VS + VI + VF) \cdot R_{po} \right\rangle_{FI}$ representa la tasa neta de ovipostura que ocurre

cada FI intervalos. Esto es, se asume que el intervalo de tiempo entre alimentaciones sanguíneas (aproximadamente la duración del ciclo gonotrófico) es equivalente al intervalo de tiempo entre dos oviposturas sucesivas.

En el módulo de interacciones predador-presa, PD representa la población total de predadores, aS el coeficiente de tasa de predación, bp la tasa de reproducción de los predadores por cada presa consumida, y mp la tasa de mortalidad natural de la población predador. El modelo de Ruiz et al., a pesar de que incluye inicialmente las interacciones tipo Lotka-Volterra, tiene la fortaleza de poder incluir otras propuestas como el modelo predador-presa tipo Henize (Henize, 1971; Toro y Aracil, 1988), el modelo presa-recursos de comida para la presa tipo Kaibab III (Aracil y Toro, 1993), el Sistema Ecológico con Forzamiento Externo (Toro y Aracil, 1988), y el Sistema Ecológico Autónomo (Toro y Aracil, 1988).

En el módulo de disponibilidad y productividad de criaderos, fL y fL_S representan, respectivamente, la disponibilidad del agua en los nichos larvarios y el nivel de desecación de los mismos (denotados por las funciones tabuladas FL_P y FL_P_S), características que afectan la ovipostura de los huevos al interior del módulo principal. Para considerar las preferencias de las hembras adultas por hábitats larvarios específicos, se sugirieron factores multiplicadores de 0.40, 0.30, 0.10, 0.10, 0.05 y 0.05, respectivamente, para nichos de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mm de capacidad. Finalmente, se asumió una capacidad de carga para representar la población máxima de mosquitos en una relación vectores-seres humanos de 30:1. El conjunto de variables exógenas y endógenas del sistema de ecuaciones diferenciales se describe en su totalidad en las siguientes tablas (tablas 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5). Las **FIGURAS 8.2** muestran algunas variables exógenas utilizadas por la herramienta.

7.1 Escenarios de Simulación

El grupo de trabajo propuso el desarrollo de actividades específicas en los municipios de El Bagre (Antioquia) y Nuquí (Chocó). Las principales características municipales se presentan únicamente para la segunda área de interés mencionada ¹:

El Municipio de Nuquí se encuentra ubicado en la parte occidental del Departamento del Chocó, en el Golfo de Tribugá, sobre la Costa Pacífica Colombiana, a unos 120 kilómetros de la capital Quibdó, a 15 minutos de viaje por vía aérea desde la misma y a 6 horas por vía marítima desde Buenaventura, Departamento del Valle del Cauca. La cabecera municipal está localizada a los 5°42'45" de latitud norte, 77°16'15" de

¹ Fuente de información: Plan de Atención Básica para el Municipio de Nuquí – Vigencia 2001-2003. Municipio de Nuquí, 2001.

longitud oeste y a una altura media sobre el nivel del mar de 5 metros.

La extensión aproximada del municipio es de 956 kilómetros cuadrados, que equivalen al 2,13% del área total del Departamento del Chocó (44.935 km²). Limita al norte con el Municipio de Bahía Solano, en el sector de la Ensenada de Utría; al sur con el Municipio de Bajo Baudó (Pizarro) en el Cabo Corrientes; al occidente con el Océano Pacífico; y al oriente con el Municipio de Alto Baudó, en la Serranía del Baudó.

El origen de Nuquí se atribuye a una porción segregada del Municipio de Bahía Solano. La Provincia del Pacífico, con cabecera en Nuquí, fue creada el 18 de diciembre de 1917 por Decreto Ejecutivo Nacional No. 2.057. En el año 1921 fue erigido municipio después de varios cambios administrativos e incluyó la Ensenada de Utría y la Bahía de Cupica.

El territorio municipal se encuentra dividido en siete corregimientos y la cabecera municipal. Se traslapa con tres resguardos indígenas, que tienen a su vez cinco comunidades. Los corregimientos se ubican sobre la costa y son, de norte a sur, Jurubirá, Tribugá, Panguí, Coquí, Jobí, Partadó (con su vereda Termales) y Arusí. Los resguardos indígenas, que están ubicados en las cabeceras de los ríos, incluyen el Cabildo Mayor del Pacífico, la Comunidad Indígena de Jurubirá, la Comunidad Indígena Chorí, Alto Baudó, la Comunidad Indígena del Río Nuquí Arriba, la Comunidad Indígena de La Loma y la Comunidad Indígena de Río Panguí Arriba. Adicionalmente, el municipio cuenta con jurisdicción en el Parque Nacional Natural Utría, el cual se comparte con Bahía Solano, Bojayá y Alto Baudó, y que posee una extensión total de 54.300 Ha, de las cuales cerca de 12.000 son marinas.

La cabecera municipal es el centro urbano del Municipio y como tal concentra distintos tipos de servicios administrativos, públicos, educativos, de salud, transporte, abastecimiento, comercio, entre otros. Se encuentra en proceso de crecimiento demográfico por ser receptor de pobladores de los corregimientos que migran a la cabecera en busca de servicios educativos y de oportunidades de empleo o generación de ingresos; igualmente, de emigrantes del interior del país que se dedican principalmente al comercio. Recientemente y dadas las dinámicas del desplazamiento forzoso, Nuquí ha empezado a recibir personas y familias de sus comunidades rurales y municipios vecinos.

La población del municipio es triétnica. Los negros e inmigrantes residen en poblados costeros y playas; los indígenas habitan en las cabeceras de los ríos en resguardos legalmente constituidos. Según censos demográficos y la información disponible en el Departamento Administrativo de Salud del Chocó, la población total del municipio para el año 1997 ascendió a 7.013 habitantes, distribuidos según: 3.577 personas (51%) en la cabecera municipal, y 3.436 individuos (49%) en el área rural. Para el

año 2005, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) estima una población total (en cabecera municipal) de 5.324 habitantes. En los resguardos traslapados con el Municipio de Nuquí se estimaron, en el año 1997, 1.078 habitantes. La población indígena directamente en el interior de la división político-administrativa, propuesta por el Gobierno Nacional, ascendió a 234 individuos. La tasa bruta de natalidad estimada para el municipio alcanza el 28.95%; la fecundidad general, por su parte, el 149.16%.

Los principales servicios públicos administrativos incluyen: la Notaría Única del Círculo de Nuquí, la Oficina de Registro de Instrumentos Públicos, la Registraduría del Estado Civil, la Empresa Solidaria de Salud Asociación Golfo de Tribugá (en proceso de liquidación), el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, la Policía Nacional, la Empresa de Telecomunicaciones TELECOM, la AeroCivil, el Juzgado Promiscuo Municipal, la Parroquia San Francisco Javier, la Iglesia Pentecostal, la iglesia Testigos de Jehová, la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Chocó (CODECHOCÓ), la Alcaldía Municipal, la Empresa Prestadora del Servicio de Energía Eléctrica ELECTRONUQUÍ, el Centro de Salud San Pedro Claver, y la Empresa Prestadora del Servicio de Suministro de Agua Potable (ACUANUQUÍ).

Entre las principales instancias de coordinación y control se encuentran: el Concejo de Gestión Municipal, los Círculos Sectoriales de Gestión, la Comisión de Personal, el Comité Asesor de Selección, el Consejo Territorial de Seguridad Social, la Junta Municipal de Educación, el Comité de Atención y Prevención de Desastres, el Consejo Municipal de Planeación, el Comité Coordinador de Control Interno, la Junta Municipal de Deporte, el Comité Municipal de Cultura y Turismo, el Comité Municipal de la Juventud, la Junta Municipal de Salud, y el Comité Plan de Atención Básica (PAB).

Las principales Organizaciones No Gubernamentales presentes en el municipio son la Fundación Natura y la Fundación para el Desarrollo Humano y Sostenible (DEHUMES). Como comunidad organizada se destacan la Organización OREWA, la Organización Los Delfines, las Asociaciones de Mujeres, las Organizaciones de Vivienda, las Asociaciones y Cooperativas de Pescadores, y los Grupos Juveniles. Sus condiciones climáticas muestran una continua presencia de agua, temperaturas cálidas, altos niveles de precipitación y humedad, excelentes condiciones para el mantenimiento de la biodiversidad, alta actividad biológica y productividad primaria, frecuentes desbordamientos de ríos y fuertes cambios de marea.

En torno a la educación, el municipio cuenta con formación en niveles básico y secundario, presentándose un alto grado de deserción en éste último. Las instituciones académicas son la Escuela de Niños Diego Luís Córdoba, la Escuela de Niñas Diego Luís Córdoba, el Instituto Litoral Pacífico Nocturno Municipal, el Colegio Semi-presencial Acelerado, y el Instituto Nacionalizado Litoral Pacífico. Hay

habitantes sin ningún grado de escolaridad y el nivel universitario está representado de manera precaria. La tasa de analfabetismo alcanzó el 12.8% para el año 1993.

Con respecto a la ocupación, en el municipio se destacan la agricultura, la pesca, la extracción de madera y productos no maderables de la selva, la cría de animales domésticos, el turismo alternativo, la educación, la construcción, el comercio, el servicio público en la Administración Municipal, el trabajo doméstico y los oficios varios. En general, se combinan distintas actividades remuneradas y no remuneradas simultáneamente, ya que en la cabecera municipal cobra importancia el trabajo asalariado. De acuerdo con el Sistema de Identificación de Beneficiarios (SISBEN), de una población total de 7.013 habitantes, 6.311 eran pobres (Plan Local de Salud, 1998).

En torno al transporte, el municipio experimenta serias dificultades debido a la ausencia de rutas comerciales estables en el transporte aéreo, principal forma de acceso a la región. Por otra parte, las rutas marítimas (principal forma de acceso de los productos) que conectan con Buenaventura y Bahía Solano son inconstantes, sobre todo para el transporte de carga.

En torno al servicio de acueducto, la entidad prestadora es la empresa ACUANUQUÍ. Paradójicamente, en una de las zonas del mundo con mayores niveles de humedad y disponibilidad de agua dulce, los sistemas de agua potable son precarios en el Municipio. La cobertura del servicio en la cabecera municipal alcanza el 98 % con agua no tratada y con deficiencia de suministro en época de verano. Los corregimientos de Tribugá, Coquí, Jobí, Termales y Arusí, cuentan con acueductos que tienen una cobertura de toda la población. Los corregimientos de Panguí, Partadó, y Jurubirá cuentan con el servicio pero muy deficiente, ya que requieren de la ampliación del sistema. Se emplea también, en particular en épocas de sequía, la apertura de pozos en los patios de las casas.

En relación con el alcantarillado de la cabecera municipal, éste cubre un 60% de la población. Sin embargo, ni siquiera la población aledaña a las redes de alcantarillado cuenta con el servicio, ya que las tuberías están altamente sedimentadas y prestan un servicio incompleto. Algunas casas cuentan con pozo séptico y otras descargan los residuos a zanjas o patios traseros que desembocan a los ríos Nuquí y Ancachí, lo cual genera significativos problemas de contaminación. En la zona rural, el único corregimiento que posee un sistema de baterías sanitarias es Jurubirá, que fue construido por la Fundación BIC (Banco Industrial Colombiano). En algunas viviendas de los demás corregimientos hay pozos sépticos, pero de igual forma éstos van a descargar a los ríos. Aún se emplea la playa o el monte para hacer necesidades fisiológicas, especialmente en las áreas rurales.

Con respecto al aseo público, los trabajadores del Municipio llevan a cabo el proceso de recolección de residuos mediante una unidad de acarreo (volqueta),

que traslada los desechos a un lote de terreno a cielo abierto donde son enterrados posteriormente sin ningún tipo de clasificación. Quienes poseen patios en sus viviendas proceden, a veces, a enterrar los desperdicios orgánicos para fertilizar los suelos, pero por lo general, todos los desechos se arrojan a la basura sin que se efectúe ningún tipo de reciclaje. La disposición de basuras es una de las mayores preocupaciones de los pobladores urbanos y rurales debido a las dimensiones que adquiere y las consecuencias de insalubridad, contaminación ambiental y de afeamiento de pueblos y playas que resultan poco atractivas para el turismo. Como no se tiene un medio claro para la disposición final, el manejo de basuras se ha convertido en una situación difícil para la administración. Sin embargo se adelanta la gestión para la implementación en el Municipio del Plan de Manejo Integral de los Residuos Sólidos.

En todos los corregimientos existen plantas eléctricas Diesel que atienden el alumbrado público. Los corregimientos reciben subsidios para la compra del combustible. En el casco urbano existe la empresa de energía ELECTRONUQUÍ encargada del suministro de la misma.

Finalmente, y de acuerdo con el diagnóstico epidemiológico del municipio (Plan Local de Salud, 1998), las cinco primeras causas de morbilidad registrada son: la Infección Respiratoria Aguda (IRA), la enfermedad ácido-péptica, el poliparasitismo intestinal, la hipertensión arterial, la enfermedad diarreica aguda y las enfermedades de la piel. Las causas de morbilidad sentida son: la malaria, la hipertensión arterial, la enfermedad diarreica aguda, la Infección Respiratoria Aguda y las enfermedades de la piel. También se presentan, dentro del grupo materno-infantil, la otitis media, la cefalea y la lumbalgia. Todas estas afectaciones son intervenibles en el primer nivel de atención si se desarrollan acciones de promoción, prevención, diagnóstico y tratamiento oportuno. Hay también accidentes y enfermedades relacionadas con el trabajo que se pueden reducir con estrategias preventivas.

En cuanto a la situación nutricional, la desnutrición global normal fue de 47 niños y la desnutrición global crónica de 48 niños. Es posible que estas cifras cambien de acuerdo con la comunidad estudiada, ya que por lo general, la población negra se encuentra en mejores condiciones nutricionales debido al acceso a la proteína animal (pesca marina) y a una dieta más diversa que las comunidades indígenas.

El tratamiento de éstas y otras enfermedades se hace desde dos sistemas médicos que coexisten en el Municipio: la medicina convencional y la tradicional. Generalmente, los pobladores acuden en primera instancia a los remedios tradicionales, muchos de los cuales pueden ser preparados en el hogar y, dependiendo de la gravedad, acuden a los centros de salud. La medicina tradicional se ha transmitido por generaciones y se basa en un conocimiento empírico de plantas y tratamientos, así como de intercambios de saberes entre curanderos. Existen curanderos, hierbateros y sobadores, cada uno con una especialidad. Hay enfermedades que sólo los

médicos tradicionales pueden curar como el «mal de ojo», el «pasma» y el «fuego». Su credibilidad radica en su efectividad y en la confianza que generan en los usuarios. Las comunidades indígenas cuentan con los jaibanás o chamanes que curan por medio de espíritus y poseen vastos conocimientos de botánica. Las parteras también prestan un servicio de vital importancia para las mujeres, tanto en los corregimientos como en la cabecera municipal. De hecho hay más partos atendidos por parteras que en los organismos de salud, donde generalmente atienden los casos complejos (Plan Local de Salud, 1998).

Generalmente las personas hacen uso de los dos sistemas, dependiendo de la enfermedad. Sin embargo, hay una creciente consulta a los médicos convencionales por pérdida de credibilidad de los curanderos y prácticos tradicionales. Las comunidades indígenas también acuden al centro de salud.

En cuanto a los servicios de medicina moderna, en la cabecera municipal se concentran en el Centro de Salud, que depende administrativamente del Hospital Julio Figueroa de Bahía de Solano y que presta su servicio al Municipio de Nuquí con una planta de cargo, nombrada por DASALUD y algunos por el Municipio. El personal de salud ubicado en la cabecera de Nuquí incluye 4 profesionales (rurales) y 26 auxiliares de enfermería y oficina.

Los servicios que presta el Centro de Salud son Consulta Externa, Urgencias, Hospitalización, Laboratorio Clínico, Odontología, y Promoción y Prevención. En la actualidad se están readecuando las instalaciones para ampliar los servicios y cobertura, ya que el recurso médico y paramédico es insuficiente. El Municipio se encuentra en el proceso de descentralización de su Centro de Salud San Pedro Claver, de tal forma que se obtenga autonomía administrativa y no se tenga dependencia de la unidad central en Bahía Solano.

Cada corregimiento y cada comunidad indígena poseen un Puesto de Salud en el cual opera un promotor básico y un microscopista. Sin embargo, éstos son limitados ya que no se cuenta con personal cualificado para atender eventos de mayor complejidad y padecen serios problemas de suministro.

De acuerdo con el Sistema de Identificación de Beneficiarios SISBEN, el 90% de la población es beneficiaria del régimen subsidiado y 10% del régimen contributivo. Teniendo como base el marco legal de la Ley 100 de 1993, que establece el Sistema General de Salud, en el año de 1995 fue autorizada por el Ministerio de Salud la creación de una ARS (Administración del Régimen Subsidiado) a la que se le dio el nombre de Asociación Golfo de Tribugá, Empresa Solidaria de Salud (ESS), que tiene alrededor de 5.020 afiliados. La empresa cuenta con una junta, gerente, cuerpo administrativo y equipo extra mural. Sin embargo, esta empresa está en proceso de liquidación.

La mala disposición final de basuras, de aguas servidas y residuales, la disposición final de excretas a campo abierto, la falta de tratamiento del agua, la convivencia con animales domésticos, la presencia de artrópodos y roedores en las viviendas, entre otros, son algunos de los factores causantes de las patologías que requieren de urgente atención en saneamiento básico. La infraestructura y dotación del centro y puestos de salud debe ser otra de las prioridades de atención del Municipio, al igual que el mejoramiento de la gestión administrativa y la captación de recursos adicionales.

En la identificación conjunta de los problemas de salud pública, la comunidad del municipio de Nuquí manifiesta que las 10 principales causas de morbilidad son los problemas de la piel, la infección respiratoria aguda, la malaria, la desnutrición, la vaginosis, la hipertensión arterial, los abortos inducidos, la mordedura de perros, las caries y las diarreas. Estos problemas afectan a toda la comunidad en todas las épocas del año, tanto en la cabecera municipal como en la zona rural, en cualquier edad, sexo y etnia. Algunas enfermedades como IRA y EDA afectan con mayor frecuencia a la población infantil, especialmente a los menores de 1 año. Las embarazadas y adolescentes se ven afectadas por problemas de vaginosis y abortos. En la minoría étnica indígena, es muy marcado el problema de desnutrición y poliparasitismo. La población de la tercera edad se ve afectada notoriamente por HTA. La presencia de estas patologías ocasiona en la población problemas individuales y colectivos en lo social, cultural y socioeconómico. Las afectaciones pueden presentar mayores complicaciones, requiriendo hospitalizaciones y pueden algunas de ellas ocasionar la muerte, especialmente en la población del área rural, quienes por dificultades de transporte no reciben atención médica oportuna.

La comunidad reconoce que los principales problemas asociados al medio ambiente que afectan significativamente la salud son: los cambios climáticos, la falta de agua potable, la falta o mal funcionamiento de sistemas de manejo de las aguas residuales, la deficiencia en el manejo de las basuras, la presencia de focos de contaminación, las prácticas tradicionales y el incremento de la población de roedores. Entre otros factores que influyen se mencionan:

- La falta de concienciación de la gravedad de las enfermedades.
- La falta de efectividad de los programas de prevención, promoción, control y vigilancia de los problemas que aquejan a la comunidad.
- Los malos hábitos alimentarios.
- El tabaquismo y alcoholismo.
- El hacinamiento y mal estado de las viviendas.
- Las precarias condiciones de vida.
- El uso de la leña para la cocción de alimentos.
- La mala administración municipal.

- El incumplimiento de los recursos para el PAB por parte de DASALUD.
- Los limitados recursos destinados para abordar el PAB.
- La ausencia de programas de educación sexual y reproductiva.

Las medidas que se han abordado son:

- Implementación del programa de las Enfermedades Transmitidas por Vectores Biológicos.
- Dotación e impregnación de toldillos.
- Relleno de charcas.
- Focalización de vectores.
- Charlas y talleres con la comunidad realizadas por los vigías de la salud.
- Capacitación de microscopistas.
- Programas de crecimiento y desarrollo, vacunación e hipertensión arterial en coordinación con el sector educativo.

Dentro del conjunto de actividades y acciones que se sugieren implementar en el Municipio para resolver los problemas de salud se incluyen:

- La campaña de vacunación a perros y gatos.
- El desarrollo de charlas sobre las enfermedades más graves en la comunidad con la ayuda de los estudiantes de los grados 10 y 11.
- El mejoramiento y construcción de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado, y manejo integral de los residuos sólidos.
- El mejoramiento de las condiciones de vida.
- La educación de la población.

7.1.1 Información disponible para la ejecución de Modelos Epidemiológicos en las Áreas Piloto Seleccionadas

Poblaciones en riesgo

Malaria. El Municipio de El Bagre cuenta actualmente con una población total aproximada de 65.342 habitantes, distribuidos en 40.872 (62,6%) y 24.470 (37,4%) individuos, respectivamente, en las zonas urbana y rural. En la última década, la población total ha crecido a una tasa del 3,09%, presentando los comportamientos mostrados en la figura 8.3, para las comunidades mencionadas. Los datos poblacionales para aquellos años en los cuales no se adelantaron censos demográficos han sido estimados utilizando técnicas de regresión.

El Municipio de Nuquí cuenta actualmente con una población total aproximada de 5.324 habitantes, distribuidos en 2.759 (51,8%) y 2.565 (48,2%) individuos, respectivamente, en las zonas urbana y rural. En la última década, la población total

ha decrecido a una tasa del 0,72%, presentando los comportamientos mostrados en la figura 8.4, para las comunidades mencionadas.

Registros epidemiológicos

Información disponible. Las autoridades de salud han dividido el año calendario en trece (13) períodos epidemiológicos (EP), cada uno constituido por cuatro (4) semanas epidemiológicas (EW). En términos generales, se puede asumir que el primer EP corresponde al mes de enero, mientras que el último EP (13) corresponde al mes de diciembre. El levantamiento de registros epidemiológicos se limita a la recopilación del número total de casos positivos de malaria por EP, EW o mes, según el caso, así como el tipo de infección (*Plasmodium falciparum*, *P. vivax* o infección mixta). Los registros finalmente obtenidos son el resultado del análisis conjunto de los datos disponibles en el Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (SIVIGILA) del Instituto Nacional de Salud y los registros de autoridades gubernamentales como las Direcciones Seccionales o Locales de Salud. Para el municipio de El Bagre, los análisis se extendieron a registros de casos positivos por EP o EW, tipo de infección y grupos de edades (<1 año, 1-4 años, 5-14 años, 15-44 años, 45-59 años, y >60 años).

Cabe resaltar que las series históricas epidemiológicas presentan significativas no-homogeneidades (fundamentalmente cambios en la media), debido a los continuos cambios en las políticas de recolección de información. Para el caso de Antioquia y la malaria en particular, desde el año 1984 hasta el año 1993, el Servicio de Erradicación de la Malaria (una Organización No Gubernamental operando desde el ámbito nacional y desarrollando sus actividades para el Ministerio de Salud), fue la institución encargada de la recolección de casos positivos de la enfermedad. Desde el año 1993 hasta el año 1998, el Servicio Seccional de Salud de Antioquia (SSSAnt, una institución pública operando únicamente en el ámbito departamental) estuvo a cargo del monitoreo de la enfermedad, y el almacenamiento y procesamiento de sus registros para un total de 125 municipios. El sistema de vigilancia SIVIGILA (que actúa aún a nivel local) entró en operación posteriormente a finales del año 1998, y ha permitido, hasta la fecha, recolectar los registros de casos positivos de malaria para cada semana epidemiológica. A pesar de que estos cambios bruscos en las series de tiempo fueron detectados, los registros únicamente fueron verificados por lógica en sus rangos de valores.

Identificación de datos faltantes.

El municipio de El Bagre tiene disponible las series de casos positivos de malaria, por ambos tipos de infección, para el período 01/Enero/1990-31/Diciembre/2004, correspondiente al horizonte 01 EP/1990-13 EP/2004 (ventana de 5479 días). Los registros para el período 01 EP/1990-13 EP/2000 fueron suministrados por la Dirección Seccional de Salud de Antioquia; los registros de 01 EP/2000-13 EP/2004 fueron procesados del Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública. Para esta

área piloto tan sólo faltan los registros de casos positivos del período 10 EP/1997-13 EP/1997 (08/Sep/1997-28/Dic/1997), aunque se evidencia que algunas semanas epidemiológicas, en la información del SIVIGILA, no cuentan con registros.

Para el caso del municipio de Nuquí la serie epidemiológica está disponible a una escala temporal mensual y para el período continuo (sin registros faltantes) enero/1994-junio/2005 (138 meses ó 4199 días). Los casos positivos en esta área piloto son reportados para trece (13) sitios: los siete corregimientos (Jurubidá, Tribugá, Panguí, Coquí, Jobí, Partadó y Arusí), una vereda (Termales), la cabecera municipal (Nuquí), y las comunidades asentadas en el Río Panguí, el Río Nuquí, Chorí y Miácora. En el documento se presentan los casos positivos como un consolidado de todos los registros de las comunidades mencionadas.

Registros de casos positivos.

A continuación se presenta gráficamente el número total de casos positivos de la enfermedad, para ambos tipos de infección, en los municipios de El Bagre y Nuquí (véanse **FIGURAS 8.5 Y 8.6**).

Registros climáticos

El análisis de registros climáticos incluyó, inicialmente, la identificación de estaciones hidrometeorológicas ubicadas en las respectivas áreas piloto, la cual permitió el levantamiento de información hidrológica cercana. Adicionalmente, se ejecutó el análisis de datos faltantes, así como las pruebas de detección de datos espúreos, los análisis de homogeneidad exploratorio y confirmatorio, y la estimación de las distribuciones intra-anales. A continuación se presentan los principales resultados de las actividades desarrolladas.

Levantamiento de información hidrometeorológica.

Se procedió a ubicar, sobre modelos digitales de elevación, las principales localidades de las áreas de influencia y las estaciones climatológicas que operan en las zonas de interés (véanse **FIGURAS 8.7 Y 8.8**).

Los registros climáticos incluyeron, principalmente, las series hidrológicas históricas de valores diarios de temperaturas mínima, media y máxima (si están disponibles), valores totales diarios de precipitación y valores diarios de humedad relativa. A partir de estos registros, se calcularon los respectivos valores medios o totales mensuales y anuales. Otros registros incluyeron valores totales diarios de evaporación, totales diarios de brillo solar, medios diarios de velocidad y dirección del viento, y totales diarios de recorrido del viento.

Pruebas de detección de datos espúreos.

Para la detección de datos espúreos en las series hidrológicas históricas, se utilizó únicamente la Prueba de Grubbs de Outliers (Grubbs, 1969; Stefansky, 1972), la cual

se basa en la suposición de normalidad de la muestra. Esta prueba fue efectuada de dos maneras: (a) mediante su programación en Excel y calculando el valor crítico de la distribución t de Student con (N-2) grados de libertad y para un nivel de significancia de α/N [$t(\alpha/N, N-2)$], valor que fue obtenido a partir de los registros de la página Web JavaStat (<http://members.aol.com/johnp71/pdfs.html>). Y (b) utilizando el software on-line de la página Web de GraphPad Software (<http://graphpad.com/quickcalcs/grubbs2.cfm>). En ambos casos los resultados fueron coincidentes. Para el municipio de Nuquí, se utilizó la serie de temperaturas medias diarias disponibles para el período 2002-2003. (**TABLA 8.6**).

Para un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$), la prueba de Grubbs no reportó outliers o datos espúreos para la serie analizada del Municipio de Nuquí.

Análisis de homogeneidad exploratorio.

Los análisis de homogeneidad se ejecutaron con el objetivo de determinar posibles tendencias significativas, así como cambios bruscos en la media o la varianza, de las series hidrológicas históricas seleccionadas. El primer paso, de dos ejecutados, consistió en detectar posibles no homogeneidades en los registros a partir de, únicamente, gráficos simples de las series de tiempo.

Para el municipio de El Bagre se observa, en primera instancia, un significativo cambio en la media de temperaturas promedio mensuales en el mes de mayo de 1992 (**TABLA 8.9**). A pesar de que no se estudió la bitácora de la estación para detectar cualquier intervención, se sospecha que el cambio es de origen antrópico (problemas de calibración, cambios de ubicación de la estación, intervención de sensores, entre otros), lo que implicaría que la serie de tiempo se debe considerar homogénea a partir del registro del mes de julio de ese año. En segunda instancia se observan significativos incrementos en las temperaturas promedio mensuales (aumentos de aproximadamente 1.0-1.5°C en la temperatura media anual estimada de 28°C) durante los períodos de ocurrencia del evento El Niño, en particular, 1994-1995, 1997-1998 y 2002-2003 (**FIGURA 8.10**). Estos cambios responden a un comportamiento natural observado normalmente en el país durante la fase cálida del fenómeno ENSO.

Para el caso del Municipio de Nuquí, se observa que la serie es homogénea (sin cambios de origen antrópico) en todo el horizonte de tiempo disponible. Al igual que el caso anterior, se notan además, incrementos significativos en las temperaturas promedio mensuales durante los eventos El Niño 1997-1998 y 2002-2003 (**FIGURA 8.11**).

Distribuciones intranuales.

El análisis de distribuciones intranuales incluyó el procesamiento de los registros mensuales o por período epidemiológico de temperatura, precipitación, humedad

relativa e incidencia, considerando tanto condiciones promedio (para todo el horizonte de tiempo disponible), como condiciones normales y períodos de ocurrencia de los eventos cálido y frío del fenómeno ENSO.

Como se mencionó, en el Municipio de El Bagre la serie de registros climáticos disponibles abarca el período 1990-2004. Los años considerados de «condiciones normales» incluyen 1990, 1993, 2000, 2001 y 2004; los años El Niño, 1991, 1992, 1994, 1995, 1997, 1998, 2002 y 2003; y finalmente, los años La Niña 1996 y 1999. Este primer análisis permitió la discretización por años, independiente de si el mes es considerado de condiciones normales o de eventos climáticos extremos.

El análisis de los registros de precipitación total mensual para todo el período mencionado indica que, bajo condiciones promedio, los patrones de precipitación en la región del municipio de El Bagre exhiben un ciclo intranual unimodal (véase **FIGURA 8.11**). El período de alta pluviosidad ocurre normalmente durante el trimestre Julio-Agosto-Septiembre, período en el cual la precipitación alcanza los 450-500 mm mensuales. El período de lluvias cortas o baja pluviosidad se presenta típicamente durante el trimestre Enero-Febrero-Marzo, con una disminución en la precipitación a valores inferiores a 100 mm mensuales. El análisis de temperaturas medias mensuales para el mismo período (y bajo condiciones promedio) muestra, por su parte, que un período muy cálido ocurre en el trimestre Enero-Febrero-Marzo (valores de temperatura media mensual cercanos a 28°C), y un período de bajas temperaturas ocurre, normalmente, en Septiembre-Octubre-Noviembre, con valores que alcanzan los 27.5°C (véase **FIGURA 8.11**). La distribución intranual de la humedad relativa muestra que, como era de esperarse, los valores mínimos se registran en el trimestre Enero-Febrero-Marzo, cuando esta variable climática se reduce a valores cercanos al 78%, comparados con un valor medio anual que asciende al 82%.

La incidencia por período epidemiológico de malaria por *P. falciparum*, bajo condiciones promedio y durante el período 1990-2004, exhibió una distribución unimodal con un solo pico en la transmisión en los períodos epidemiológicos 05, 06 y 07, correspondientes, aproximadamente, a los meses de mayo, junio y julio. Este máximo ocurre luego del período de altas temperaturas y cuando las primeras lluvias importantes (valores superiores a 100 mm mensuales) ocurren en la zona.

Dado que en estudios previos se ha encontrado una importante asociación entre la ocurrencia del evento El Niño y los brotes epidémicos de malaria, los análisis se concentraron en torno a comparar los ciclos intranuales bajo condiciones «normales» y condiciones durante la fase cálida del ENSO. El análisis de los registros de precipitación total mensual para el período mencionado indica que, bajo condiciones El Niño, se presenta una importante disminución en la precipitación en el trimestre Enero-Febrero-Marzo (véase **FIGURA 8.12**). La temperatura, por su parte, muestra que, además del incremento de 0.5°C en la temperatura media

anual (aumento desde aproximadamente 27.5°C bajo condiciones normales, hasta 28.0°C bajo condiciones El Niño), manifestado como un ascenso en la vertical de todo el ciclo intranual, los registros de temperatura media mensual alcanzan valores significativamente mayores en el trimestre Enero-Febrero-Marzo. Valores registrados en el mes de febrero de los años El Niño muestran que las temperaturas promedio mensuales llegan a alcanzar valores cercanos a 29°C, comparados con valores promedio, bajo condiciones normales, de 28°C (véase barras de error en la **FIGURA 8.12**). Finalmente, y sin llegar a ser totalmente concluyente, se observa que el ciclo intranual de humedad relativa desciende aproximadamente un 2% durante los años considerados El Niño, comparado con el ciclo observado bajo condiciones normales.

La señal en la incidencia de malaria es la más evidente. Como se mencionó, el ciclo intranual exhibe un pico en la transmisión en los meses de mayo, junio y julio, el cual alcanza, en los años normales, un 3 al 5% de la población en riesgo (incidencias de 0.030-0.050). Durante años El Niño, la distribución intranual no se altera ni en su característica unimodal ni en el período epidemiológico de ocurrencia del pico de transmisión. Sin embargo, el orden de magnitud en la incidencia mensual aumenta significativamente, tal como se observa para el caso del pico máximo, el cual alcanza valores cercanos al 5-8% de la población en riesgo.

En el Municipio de Nuquí la serie de registros climáticos disponibles abarca el período 1997-2003. A diferencia del análisis presentado para el Municipio de El Bagre, la selección de períodos bajo condiciones normales y en eventos climáticos anómalos se llevó a cabo a nivel mensual, considerando los episodios cálidos y fríos propuestos por la NOAA a partir de las anomalías en temperaturas superficiales del Océano Pacífico Tropical.

El análisis de los registros de precipitación total mensual para todo el período mencionado indica que, bajo condiciones promedio, los patrones de precipitación en la zona sur del Golfo de Tribugá exhiben un ciclo intranual unimodal (véase **FIGURA 8.13**). El período de alta pluviosidad ocurre normalmente durante el trimestre Agosto-Septiembre-Octubre, con registros mensuales que alcanzan los 1000-1200 mm. El período de lluvias cortas o baja pluviosidad se presenta típicamente durante el trimestre Febrero-Marzo-Abril, con valores inferiores a 400 mm mensuales. El análisis de temperaturas medias mensuales para el mismo horizonte (y bajo condiciones promedio) muestra, que el período de altas temperaturas ocurre en el trimestre Marzo-Abril-Mayo (valores de temperatura media mensual cercanos a 25.5-26.0°C), y un período de bajas temperaturas ocurre, normalmente, en Septiembre-Octubre-Noviembre, con valores que descienden a 25.0°C (véase **FIGURA 8.13**). La distribución intranual de la humedad relativa muestra que los valores mínimos se registran en el trimestre Febrero-Marzo-Abril, cuando esta variable climática se reduce a valores cercanos al 92%, comparados con un valor medio anual que asciende al

93%. La incidencia mensual de malaria por *P. falciparum*, bajo condiciones promedio y durante el período 1997-2003, exhibió una distribución unimodal con un solo pico en la transmisión en los meses de mayo y junio. Este máximo, al igual que para el Municipio de El Bagre, ocurre luego del período de altas temperaturas y cuando las primeras lluvias importantes (valores superiores a 400 mm mensuales) ocurren en la zona.

El análisis de los registros de precipitación total mensual para el período mencionado indica que, bajo condiciones El Niño, al sur del Golfo de Tribugá se presenta una importante disminución en la precipitación en los meses de diciembre y enero (véase **FIGURA 8.14**). La pluviosidad desciende a valores cercanos a 200 mm mensuales, comparados con registros promedio que, bajo condiciones normales, alcanzan más del doble del total registrado durante eventos El Niño. La temperatura, por su parte, muestra que además del incremento de 0.7°C en la temperatura media anual (aumento desde aproximadamente 25.3°C bajo condiciones normales, hasta 26.0°C bajo condiciones El Niño), los registros promedio mensuales alcanzan valores significativamente mayores en el trimestre Diciembre-Enero-Febrero. Las registros de los meses de diciembre y enero, por ejemplo, muestran que en los eventos El Niño esta variable climática puede alcanzar valores cercanos a 26.5°C, comparados con valores promedio, bajo condiciones normales, de 25°C. Para el caso de la humedad relativa, se observa que el ciclo intranual desciende aproximadamente 2%, desde un 93.5% bajo condiciones normales hasta un 91.5% bajo eventos El Niño.

Al igual que en el Municipio de El Bagre, la incidencia de malaria por Plasmodium falciparum, en la localidad seleccionada del Pacífico Colombiano, muestra un aumento significativo. El ciclo intranual, bajo condiciones normales, exhibe un pico en los meses de mayo y junio, que alcanza un 2% de la población total en riesgo (incidencia de 0.02; véase **FIGURA 8.15**). Durante los años El Niño, la distribución intranual permanece unimodal, con el pico de transmisión en el mismo período, pero con un aumento significativo en el número total de casos positivos. Según los valores observados para el período de información epidemiológica disponible, la incidencia puede alcanzar una media del 8% de la población en riesgo, y los valores máximos pueden ascender a más del 12%.

7.2 Simulación de la dinámica de transmisión en las Áreas Piloto

La discusión que se presenta a continuación incluye el horizonte de simulación seleccionado, el intervalo de tiempo definido para el desarrollo de la simulación, las condiciones iniciales de ejecución de las herramientas, los principales resultados bajo escenarios base, algunos resultados de escenarios alternos de simulación (incrementos y disminuciones en la temperatura y la precipitación), así como análisis preliminares de inestabilidad debido a cambios repentinos en variables exógenas de los modelos, y análisis preliminares de sensibilidad para la determinación de parámetros que provocan variaciones apreciables en los resultados.

7.2.1 Horizonte de simulación y condiciones iniciales

Municipio de El Bagre. Como se describió anteriormente, para esta área piloto se tienen disponibles las series de casos positivos de malaria, por ambos tipos de infección, para el período 01/Enero/1990-31/Diciembre/2004, correspondiente al horizonte de tiempo 01 EP/1990-13 EP/2004. Los registros presentan significativas no-homogeneidades debido a los cambios en los organismos encargados de la recolección de información: el Servicio de Erradicación de Malaria (entre 1990 y 1993), el Servicio Seccional de Salud de Antioquia (1993-1998) y el Sistema de Vigilancia en Salud Pública (1998-2004). Aunque las transiciones son todas totalmente evidentes, se asume que el cambio más brusco en la media se presenta a finales del año 1993, lo que orientaría a pensar que la serie epidemiológica es «homogénea» desde el año 1994 a la fecha.

Las series climatológicas están disponibles a partir del segundo semestre de 1990 (con un importante vacío en los meses de octubre y noviembre de ese año) y hasta el 31/Dic/2003 (excepto para precipitación, que se extiende hasta el 30/Jul/2004). La serie de valores medios mensuales de temperatura (considerada, a priori, la variable hidrológica clave de la dinámica de transmisión) posee, sin embargo, datos faltantes en los meses de mayo/1991 y junio/1992, y evidencia un cambio significativo en la media en el mes de mayo de 1992. La serie de valores totales mensuales de precipitación (clave para el entendimiento de la disponibilidad y productividad de criaderos naturales) posee, por su parte, datos faltantes en los meses de mayo/1991, junio/1992, Ene-Mar/1993 y todo el año 2003. De esta manera, se podría asumir que las series hidrológicas son «completas y confiables» a partir del segundo semestre del año 1992 y hasta el mes de diciembre de 2002.

Para representar la transmisión de la malaria por *Plasmodium falciparum* en esta área piloto, se propuso entonces el horizonte de simulación 03/Enero/1994-28/Diciembre/2002, correspondiente al período 01 EP/1994-13 EP/2002. Este horizonte

corresponde a un ejercicio de simulación de 3282 días ó 108 meses ó 9 años (véase **FIGURA 8.16**).

Dado que el intervalo de tiempo seleccionado para la ejecución del modelo es $\Delta t = 1$ día, los registros diarios de temperatura y humedad relativa faltantes se estimaron asumiendo los valores promedio mensuales del mes respectivo. Para el caso de los registros totales diarios de pluviosidad, se asumió un valor nulo de precipitación en los días faltantes.

Para el cálculo de la evapotranspiración, al interior del módulo de disponibilidad de criaderos, se utilizaron las ecuaciones de Turc (1945) (EVR, en mm/año), Coutagne (1974) (EVR o EVP, en m/año), Cenicafé (1997) (EVP, en mm/año), Thornthwaite (1948) (EVP, en mm/mes), García y López (EVP, en mm/día), y Penman-Monteith (EVR, en mm/día). Dado que esta última ecuación propuesta requiere del cálculo de la presión atmosférica y la temperatura a punto de rocío, se estimaron los órdenes de magnitud de estas variables a partir de la altura sobre el nivel del mar del sitio de interés, la cual, para este caso, se asumió equivalente a la altura de instalación de la estación climatológica Caserí (400 msnm). La velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie, se asumió constante para todo el horizonte de simulación e igual a 2.0 m/s. La radiación neta, al igual que la variable anterior, se asumió constante y equivalente a 200 W/m², según la información del Atlas Hidrológico del Departamento de Antioquia. La rugosidad de la superficie y la altura media del cultivo se asumieron, por su parte, iguales a 10 m y 0.1 m, respectivamente. Los resultados de estos análisis se muestran en la **FIGURA 8.17**.

La población total en riesgo al inicio de la simulación se asumió igual a 15862 individuos, equivalente al número total de personas que vivían en zona rural del Municipio de El Bagre en el año 1994. No se consideraron patrones de migración para los escenarios base y alterno de simulación, dada la limitación en la disponibilidad de información demográfica. El número de individuos en estado infeccioso al inicio de la simulación HUF(0) se asumió igual a 326 personas, equivalente al número total de casos positivos de malaria por *P. falciparum* reportados en el décimo-tercer período epidemiológico del año 1993 (13 EP/1993). El número total de individuos infectados al inicio de la simulación HUI(0) se propuso igual a 261 personas, equivalente al número total de casos positivos de la enfermedad por esta infección en el primer período epidemiológico del año 1994 (01 EP/1994). El número total de individuos en estado inmune HUM(0) se asumió igual a 453 individuos, equivalente al número de casos de malaria por *P. falciparum* reportados en el décimo-segundo período epidemiológico del año 1993 (12 EP/1993). Se asume que esta población permaneció en estado infeccioso durante un corto período de tiempo (mayor pero cercano al tiempo de duración del tratamiento) y estuvo sometida a la reinfección. El número de individuos susceptibles al inicio de la simulación se obtuvo por diferencia entre la población total en riesgo y el número de individuos en los estados infectado,

infeccioso e inmune ($HUS(0)=14822$ pobladores).

Municipio de Nuquí. Como se describió anteriormente, para esta área piloto se tienen disponibles las series de casos positivos de malaria, por ambos tipos de infección, a una escala temporal mensual y para el período sin registros faltantes enero/1994-junio/2005. Las series climatológicas, por su parte, están disponibles para el período 01/Nov/1997-31/Dic/2003, excepto para los valores totales diarios de precipitación que se extienden hasta el 30/Abr/2003. Las series carecen, sin embargo, de registros en los meses de junio y julio de 2002. Dado que tanto las series epidemiológicas como climatológicas se consideran homogéneas en los períodos de registro disponibles, se propuso representar la dinámica de transmisión de la malaria por *Plasmodium falciparum* para el horizonte de simulación 01/Nov/1997-31/Dic/2003, correspondiente a un ejercicio de simulación de 2252 días ó 74 meses o, aproximadamente, 6 años. (Véase **FIGURA 8.18**).

Al igual que en el Municipio de El Bagre, se seleccionó un intervalo de tiempo para ejecución del modelo de $\Delta t = 1$ día, estimando los registros diarios de temperatura y humedad relativa faltantes a partir de los valores promedio mensuales del mes respectivo. Para el caso de los registros totales diarios de pluviosidad, se asumió un valor nulo de precipitación en los días faltantes.

La presión atmosférica y la temperatura a punto de rocío se estimaron a partir de la altura sobre el nivel del mar del sitio de interés, la cual se asumió igual a la altura de instalación de la estación climatológica Amargal (30 msnm). La velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie se asumió constante para todo el horizonte de simulación e igual a 0.03 m/s. La radiación neta, al igual que la variable anterior, se asumió constante y equivalente a 160 W/m^2 , según la información del Atlas Hidrológico del Departamento de Antioquia.

La población total en riesgo al inicio de la simulación se asumió igual a 2835 individuos, equivalente al número total de personas que vivían en zona rural del Municipio de Nuquí en el año 1997. No se consideraron patrones de migración para los escenarios base y alterno de simulación, dada la limitación en la disponibilidad de información demográfica. El número de individuos en estado infeccioso al inicio de la simulación $HUF(0)$ se asumió igual a 377 personas, equivalente al número total de casos positivos de malaria por *P. falciparum* reportados en el mes de octubre del año 1997. El número total de individuos infectados al inicio de la simulación $HUI(0)$ se propuso igual a 234 personas, equivalente al número total de casos positivos de la enfermedad por esta infección en el mes de noviembre del año 1997. El número total de individuos en estado inmune $HUM(0)$ se asumió igual a 326 individuos, equivalente al número de casos de malaria por *P. falciparum* reportados en el mes de septiembre del año 1997. Al igual que en el Municipio de El Bagre, se asumió que esta población permaneció en estado infeccioso durante un corto período de tiempo

(mayor pero cercano al tiempo de duración del tratamiento) y estuvo sometida a la reinfección. El número de individuos susceptibles al inicio de la simulación se obtuvo por diferencia entre la población total en riesgo y el número de individuos en los estados infectado, infeccioso e inmune [$HUS(0)=1898$ pobladores].

7.2.2 Escenario base

Para la simulación del escenario base, se consideró el modelo de Capacidad Vectorial para una densidad de vectores constante (10 y 14 mosquitos/hospedero, para los municipios de El Bagre y Nuquí, respectivamente, de acuerdo con la posible disponibilidad de criaderos naturales en las zonas de interés) y con las variables entomológicas reportadas en la literatura. Dado que no se considera corrección de las variables climatológicas para representar las condiciones ambientales al interior de las viviendas (suponiendo características exofílicas de los vectores transmisores), se asumieron estas variables iguales a los valores medios diarios de temperatura, medios diarios de humedad relativa y totales diarios de precipitación, registrados por las estaciones climatológicas cercanas.

Los principales resultados de las variables entomológicas relevantes de las dinámicas de transmisión se presentan en la siguiente figura para el caso de valores observados de temperatura, en el Municipio de El Bagre y durante el horizonte de simulación. La Capacidad Vectorial incluye, en este caso, un factor de corrección por interacción entre las poblaciones de humanos y mosquitos, variable que se estima a partir de la relación entre los valores totales mensuales de precipitación registrados y los valores promedio mensuales de pluviosidad en la zona.

Finalmente, los resultados de ejecución del modelo SIMULMAL para la representación de la dinámica de transmisión de malaria por *P. falciparum* en los municipios de El Bagre y Nuquí, durante los horizontes de tiempo propuestos, se muestran en las **FIGURAS 8.19, 8.20 y 8.21**.

A pesar de ser un escenario base de simulación, en el cual se utilizan funciones matemáticas propuestas por la comunidad académica internacional para la cuantificación del potencial epidémico en las áreas de interés, el modelo SIMULMAL muestra su capacidad de representar las fluctuaciones intranuales de la incidencia de la enfermedad por *P. falciparum* y los significativos incrementos de la misma durante la ocurrencia del evento El Niño. Los resultados de simulación muestran además, como en el caso del Municipio de Nuquí, que la prevalencia se acerca significativamente a los registros de la enfermedad durante considerables períodos de tiempo. Mejor aún, si se estiman los valores de las variables entomológicas para la especie del vector considerado primario de transmisión en la zona de interés (de acuerdo con las particularidades de cada entorno, en este caso Municipio de

Nuquí), los resultados se ajustan considerablemente (véanse las **FIGURAS 8.22, 8.23 Y 8.24**).

Como se observa en la figura derecha, la capacidad vectorial se ajusta significativamente durante todo el horizonte de simulación cuando las variables entomológicas de la misma se calculan para el vector primario transmisor de la enfermedad en el Municipio de Nuquí. En este sentido, el primer brote epidémico y el período que se extiende hasta aproximadamente el día 1500 de simulación, permanecen ajustados a los eventos observados, tal como se había representado utilizando la capacidad vectorial propuesta por la comunidad internacional. Sin embargo, para el segundo brote epidémico (dos picos de transmisión entre los días 1500 y 2252 de simulación), la capacidad vectorial se reduce significativamente, ajustándose aún más a la incidencia observada, contrario a lo mostrado por la VC de la comunidad internacional, la cual sobreestima los casos positivos de la enfermedad.

7.2.3 Escenarios alternos de simulación

Se asumieron incrementos en las temperaturas promedio diarias del aire, observadas en el Municipio de El Bagre durante el horizonte de simulación 03/Enero/1994–28/Diciembre/2002, de 1.0°C, 1.°C, 1.9°C y 2.8°C, de acuerdo con posibles cambios que se observarían en el año 2050 (con respecto al promedio 1961-1990) y bajo diversos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero contemplados en el Special Report on Emission Scenarios (según Hulme y Sheard, 1999). Véase **FIGURA 8.25**.

A pesar de que este ejercicio no constituye un análisis exhaustivo de la posible respuesta de la enfermedad ante escenarios epidemiológicos, entomológicos y climatológicos futuros, brinda una idea básica de cual sería el comportamiento de la misma, en una población con similares características demográficas, que está sometida a la amenaza por la presencia del vector primario de transmisión actual y cuya dinámica es controlada por los patrones climáticos actuales, ante un forzamiento por cambio climático (representado en este caso, únicamente, por aumento en la temperatura del aire).

Los resultados de simulación muestran que, bajo el escenario B1-bajo, la incidencia de malaria por *Plasmodium falciparum* alcanzaría un valor promedio, en todo el horizonte de simulación, del 7% de la población total en riesgo, con picos en la transmisión que ascenderían a 14 y 11% durante eventos El Niño severo y moderado. Bajo el escenario A2-alto, la malaria por esta infección afectaría a cerca del 9% de la población actual en riesgo.

7.2.4 Análisis preliminares de inestabilidad

En una primera aproximación al proceso de evaluación-validación-análisis, se consideraron posibles situaciones de inestabilidad generadas debido a cambios repentinos en algunas variables exógenas (véase figura 8.26). Se analizaron dentro de este conjunto de variables, fundamentalmente, la densidad vectorial, el índice de sangre humana, el número de grados-día requeridos para el desarrollo del parásito dentro del vector, y el período infeccioso promedio del ser humano. Los análisis se llevaron a cabo únicamente para el caso del Municipio de El Bagre, dada la longitud de su horizonte de simulación.

La primera variable mencionada se incrementó en 2 mosquitos/hospedero vertebrado (de 10 a 12 mosquitos/ser humano), asumiendo que, debido al calentamiento atmosférico, se aumenten las tasas de desarrollo del vector transmisor. El Índice de Sangre Humana se incrementó de 0.41 a 0.50, asumiendo que el incremento en la población de la zona bajo riesgo de transmisión generará que el vector cambie su preferencia y se alimente fundamentalmente de sangre humana. El período infeccioso promedio del hospedero vertebrado se aumentó de 1.0 a 1.1 años, asumiendo que las poblaciones en riesgo permanecerán mayor tiempo en estado infeccioso debido a la falta de tratamiento. Todas estas suposiciones, dadas las relaciones funcionales asumidas en la dinámica de transmisión, generarían incrementos en incidencia de la enfermedad bajo similares escenarios climáticos.

El escenario de posible disminución en la incidencia de la enfermedad se presentaría por un aumento en el número de grados-día requeridos para el desarrollo del parásito dentro del vector (de 111 a 115°C-día), que por su parte se traduciría en un aumento de la duración del ciclo esporogónico.

Los resultados de simulación de las posibles situaciones de inestabilidad muestran que, si se presentaran aumentos en la densidad vectorial, la incidencia de malaria por *Plasmodium falciparum* en el Municipio de El Bagre podría incrementarse a un valor medio del 9% de la población en riesgo, con picos en las épocas de mayor transmisión que alcanzarían el 16% de la misma. El cambio en la preferencia de la población vector se reflejaría, por su parte, en incrementos en la incidencia de la enfermedad la cual alcanzaría el 14% de la población, bajo condiciones promedio, y con picos que ascenderían al 21% de la misma. El incremento en el período infeccioso promedio del ser humano se traduciría en incidencias cercanas al 9% y 17% para, respectivamente, condiciones promedio y de alta transmisión. Finalmente, el aumento en el número de grados-día requeridos para el desarrollo del parásito dentro del vector (una forma de ver, de manera inversa, los efectos del calentamiento atmosférico), generaría una importante disminución en el número de casos positivos de la enfermedad, tanto bajo condiciones normales como durante eventos climáticos extremos.

7.2.5 Análisis preliminares de sensibilidad

Como último paso y de manera preliminar, se llevaron a cabo análisis de sensibilidad con el fin de detectar aquellas variables que provocan variaciones apreciables en los resultados. Para tal efecto, se consideraron tres posibles escenarios: en el S1 se asumió una probabilidad diaria de supervivencia del mosquito vector constante, mientras que los ciclos gonotrófico y esporogónico se asumieron dependientes de los valores medios diarios de temperatura, según las funciones matemáticas comúnmente utilizadas por la comunidad internacional. En el escenario S2 se consideró el intervalo entre alimentaciones sanguíneas constante, mientras que la probabilidad de supervivencia diaria y el período de incubación del parásito dentro del vector se asumieron dependientes de la temperatura. Finalmente, en el escenario S3 se consideró el ciclo esporogónico constante, mientras que la supervivencia diaria y la frecuencia de alimentación sanguínea se asumieron funciones de la temperatura. Los principales resultados se muestran en la **FIGURA 8.27**.

Los resultados de simulación de los análisis preliminares de sensibilidad muestran que, teniendo como base el escenario S1, la probabilidad de supervivencia diaria del mosquito no pesa significativamente en la dinámica de transmisión. Aunque su valor se asuma constante, no se generan modificaciones importantes en los resultados de la prevalencia. Esta observación, sin embargo, deberá ser soportada en trabajos de campo, de laboratorio y de análisis de series de tiempo más robustos. Los ciclos gonotróficos y esporogónico, por su parte, si son asumidos constantes provocan variaciones apreciables en los resultados. Lo que se puede conceptuar, sin ser totalmente concluyente, es que la alteración que la temperatura genera en estas dos importantes variables entomológicas (en conjunto), puede ser la explicación de los significativos incrementos en la incidencia de la enfermedad, principalmente durante la ocurrencia de la fase cálida del fenómeno ENSO.

7.3 Aportes Finales

Para la cuantificación de la vulnerabilidad física-espacial ante epidemias de malaria por ambos tipos de infección (y el futuro entendimiento de la distribución espacial de la misma), se han adelantado algunas actividades para determinar la distribución de criaderos y el control que el clima puede generar sobre los vectores adultos (véase **FIGURA 8.28**).

Adicionalmente, se adelantaron algunos análisis tendientes a entender la distribución de edades y su papel en la dinámica de transmisión de las enfermedades. Resultados específicos pueden ser consultados en la figura 8.29. Se observa que las mayores incidencias de ambas enfermedades se presentan en individuos entre los 15 y los 44 años.

El trabajo de investigación futuro estará orientado al desarrollo de las siguientes actividades:

- Consideración de la fase secundaria (esquizogonía exo-eritrocítica secundaria) para la simulación de la incidencia de malaria por *P.vivax*.
- Profundización en aspectos relacionados con la inmunidad de hospederos y aplicación para las condiciones del entorno.
- Caracterización espacial de hábitats de reproducción.
- Implicación de políticas.
- Inclusión de restricciones de calidad del recurso en los nichos larvarios del modelo de disponibilidad de criaderos, tanto para la población de mosquitos en sus estados preimaginales como para la población de sus predadores naturales.
- Implementación del modelo matemático en diferentes regiones del territorio colombiano con el fin de analizar su capacidad de representación de diferentes escenarios epidemiológicos, entomológicos y climáticos.
- Simulación para horizontes de tiempo más extensos.
- Consideración del escalamiento de edades.



Capítulo VIII: Impacto de la Variabilidad Climática sobre los Elementos Entomológicos de la Transmisión de Malaria

8.1. Introducción

Colombia es un país mega diverso en condiciones climáticas y en ecosistemas (IGAC, 1977). El 85 % del territorio Nacional presenta las características ecológicas, climáticas y epidemiológicas aptas que posibilitan la transmisión de malaria, además cuenta con varias especies de vectores que pueden cohabitar una misma región en particular (IQEN, 2004). Estas características hacen que en el país se presenten anualmente un promedio de 5 casos de malaria por cada 1000 personas que viven en las zonas de riesgo (IQEN, 2000-2004). Sin embargo, el número de casos de la enfermedad incrementa notablemente durante la fase cálida del evento climático El Niño/ Oscilación del Sur (ENOS) (Poveda y Rojas, 1997; Bouma et al., 1997).

El evento ENOS es el principal mecanismo modulador de la variabilidad climática global y nacional, a escala de tiempo interanual (Poveda, 2004). Este evento climático altera los patrones normales de circulación del océano y de la atmósfera, modificando las condiciones meteorológicas del planeta (Allan, 2000). ENOS se presenta a intervalos de dos a siete años, y posee dos componentes, el oceánico, el cual se asocia con cambios en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el Océano Pacífico Tropical, y el componente atmosférico (Oscilación del Sur), el cual está relacionado con una fluctuación en la presión atmosférica que ocurre entre el occidente y oriente del Océano Pacífico Tropical (Wang et al., 1999.).

El componente oceánico se caracteriza porque posee dos fases, una cálida y una fría. La fase cálida, El Niño, se asocia con la aparición de corrientes oceánicas cálidas en las costas del Océano Pacífico en América del Sur. La fase fría, La Niña, sobreviene normalmente a continuación del evento cálido, exhibe características opuestas a El Niño, presentando una reducción en la TSM (Suplee, 1999).

En Colombia, el evento ENOS, se caracteriza por un incremento en la temperatura atmosférica y una disminución en el régimen de precipitación (Poveda y Rojas, 1997).

En diferentes países tropicales y subtropicales se ha estimado que el evento ENOS altera la incidencia y distribución de las enfermedades transmitidas por vectores (Patz et al., 2002; Patz y Kovats, 2002). Se ha sugerido que estas enfermedades son afectadas por el cambio en las condiciones del clima, debido a que los mosquitos transmisores y el parásito causante de la enfermedad, son particularmente sensibles a cambios en la temperatura ambiental (Lindsay y Birley, 1996; Epstein, 1995). Se considera entonces que las modificaciones en las condiciones ambientales pueden alterar la dinámica poblacional de parásitos y mosquitos vectores de malaria, afectando la capacidad vectorial de los Anopheles y potenciando la transmisión de la enfermedad (Patz et al., 1996; Epstein, 1997).

Para Colombia se ha registrado que epidemias periódicas de malaria se encuentran asociadas con la fase cálida del evento ENOS (Poveda y Rojas, 1997; Bouma et al., 1997; Poveda et al., 2000). En estos estudios se ha relacionado la temperatura superficial del Océano Pacífico, un indicador de la ocurrencia del evento ENOS, con la evolución temporal de la Incidencia de malaria entre 1959 y 1994. Con base en los resultados los investigadores sugieren que en el incremento de la transmisión de malaria, son el aumento en la temperatura y la disminución de la precipitación que se presenta en Colombia durante el evento El Niño, los principales mecanismos que afectan el tiempo de desarrollo del parásito y la dinámica poblacional de los vectores, potenciando la incidencia de la enfermedad. Estudios posteriores han precisado que la incidencia de malaria se encuentra notablemente afectada por incrementos en la temperatura ambiental, y no por los cambios en la precipitación (Poveda, 2001; Rúa et al., 2003).

Se ha observado además, en un estudio entomológico longitudinal realizado en la Costa Pacífica Colombiana, región de alta transmisión de malaria para el país, que la dinámica de transmisión de la enfermedad, no se asoció con la densidad o paridad del vector (Rúa et al., 2003). Sin embargo, se requiere realizar estudios de mayor duración, para precisar el papel de la variabilidad climática sobre los elementos entomológicos de la transmisión de malaria y sobre la incidencia de la enfermedad. La asociación entre la transmisión de malaria y el evento ENOS que se registra en Colombia, también se ha observado en otros países de Sur América. Por ejemplo, en Venezuela Bouma y Dye (1997) estimaron la relación entre epidemias de Malaria y el evento ENOS, observando que de cinco epidemias de malaria ocurridas entre 1910 y 1935, cuatro fueron precedidas del fenómeno ENOS. Determinaron que la precipitación que precede al evento El Niño, fomentó el incremento en la transmisión de malaria. Sugieren que en la interacción ENOS-malaria, los cambios en los factores climáticos afectan la dinámica de población del vector, potenciando el mayor número de casos de la enfermedad. Igualmente en Perú y Guyana se detectó una relación estadística entre la incidencia de malaria y la fase cálida del evento El Niño, indicando que el incremento en la temperatura fue el principal elemento causante de las epidemias de la enfermedad (Gagnon et al., 2002). También en países como Sri Lanka (Bouma y Van der Kaay, 1996), Pakistán (Bouma et al., 1996), Ruanda (Loevinsohn, 1994) y Uganda (Kilian et al., 1999) se ha registrado que epidemias de malaria se asocian con la ocurrencia del evento ENOS. Sin embargo, al igual que en Sur América, se ha observado que en algunos países, es el aumento en la temperatura ambiental quien se asocia con el incremento en la transmisión de la malaria, mientras que para otras regiones, es el cambio en la precipitación el mecanismo generador de las epidemias. Sin importar cual haya sido el elemento climático asociado con el cambio en la incidencia de la enfermedad, en cada uno de los casos se sugiere que la variabilidad climática afecta la dinámica de población de vectores y parásitos, incrementando la transmisión de la enfermedad.

A pesar de la amplia aceptación y veracidad de los diferentes estudios que establecen el efecto de la variabilidad climática sobre la transmisión de malaria en Colombia, no son claros los mecanismos por los cuales se presenta un incremento en la incidencia de la enfermedad durante la ocurrencia del evento El Niño. Se sugiere que los principales mecanismos entomológicos que vinculan la interacción entre la variabilidad climática y los incrementos en la incidencia de malaria están relacionados con: 1. cambios en las densidades relativas de los mosquitos vectores (Epstein, 1997, 2000), 2. alteraciones en las tasas de supervivencia del vector (Martens, 1997), 3. modificación en la cantidad y calidad de los sitios de reproducción del vector (Epstein, 1997), 4. efectos sobre la frecuencia de picadura como consecuencia de una reducción en la duración del ciclo gonotrófico (Lindsay y Birley, 1996), y 5. reducción en el tiempo de desarrollo del parásito dentro del vector, incrementando el tiempo de vida infectiva del mosquito (Lindsay y Birley, 1996).

Los mecanismos entomológicos sugeridos en la asociación entre la variabilidad climática y la incidencia de malaria, hacen parte del modelo de capacidad vectorial. La capacidad vectorial es un índice comparativo, que expresa el número esperado de nuevas inoculaciones por caso infectivo por día que realiza una población de mosquitos (Garrett-Jones, 1964). Este modelo ha sido empleado para evaluar el impacto de la aplicación de insecticidas sobre la incidencia de malaria (Garrett-Jones y Grab, 1964) y para estimar diferencias en la capacidad de transmisión entre varias especies de vectores (Rubio-Palis, 1994). Sin embargo, las características que presenta el modelo de capacidad vectorial, lo convierten en una excelente herramienta para ser empleada en la evaluación del impacto de los elementos del clima sobre los factores entomológicos de la transmisión de malaria.

La capacidad vectorial se expresa mediante la ecuación:

$$CV = ma^2 p^n (1/ - \ln p) \text{ (Ecuación 9.1)}$$

En donde m es la densidad del vector, a es el hábito de picadura dada por la relación entre el grado de antropofilia (Índice de Sangre Humana) y la frecuencia con que se alimentan los vectores (ciclo gonotrófico), p^n es la probabilidad de supervivencia del mosquito durante el período esporogónico (n), y $1/ - \ln p$ representa la esperanza de vida de la población del vector.

Con la aplicación de modelos matemáticos al estudio de la incidencia de la malaria se ha incrementado la comprensión en la dinámica de transmisión de la enfermedad. Además, estos modelos posibilitan examinar los mecanismos por los cuales durante alteraciones climáticas, como las ocasionadas por eventos climáticos, incrementa la transmisión de malaria.

Existen varias asunciones para la aplicación del modelo de capacidad vectorial, las principales consideraciones que se deben tener son: i. la probabilidad de supervivencia es constante con relación al tiempo y a la edad del vector, ii. los Anopheles pican un número fijo de veces, sin importar la abundancia de hospederos y iii. los vectores se alimentan sobre el hombre de manera aleatoria (Dye, 1986). No obstante lo anterior, el modelo de capacidad vectorial permite determinar las consecuencias epidemiológicas de los esfuerzos que se realizan en los programas de control de malaria (Garrett-Jones y Grab, 1964).

Las características propias del vector y el impacto que tiene el clima sobre la dinámica de población del mosquito, afectan en magnitud algunos componentes del modelo de capacidad vectorial. Los componentes de este modelo matemático y la asociación con la especie de vector y con la variación climática se presentan en la **TABLA 9.1**.

8.2. Densidad de la población del vector

La densidad del vector en una determinada región es parcialmente dependiente de la generación de mosquitos adultos provenientes de los sitios de cría (Lindsay y Birley, 1966). Se ha reportado que pequeños incrementos en la temperatura en los sitios de cría reducen el tiempo de desarrollo de los estados acuáticos de algunas especies de Anopheles (Muirhead-Thomson, 1951). Sin embargo, el costo de un rápido desarrollo de los estados inmaduros a elevadas temperaturas, es originar adultos más pequeños y menos fecundos (Clements, 1992). Mosquitos adultos con mayor talla corporal presentan mayor tasa de paridad y supervivencia, y se asocian con mayor probabilidad de transmisión de la enfermedad (Nasci, 1986a, 1986b, 1987).

El principal factor limitante en el número de mosquitos en cualquier área es generalmente la disponibilidad de sitios de cría (Lindsay y Birley, 1996). La precipitación juega un papel importante en la producción de adultos y para la epidemiología de la malaria (Molineaux, 1988). Sin embargo, el papel de la precipitación con relación a la densidad del vector es complejo, una asociación universal y predecible entre densidad de mosquitos y precipitación es imposible calcular. El incremento de las lluvias puede generar medios favorables para la cría y desarrollo de los estados acuáticos de algunos Anopheles, pero un exceso en las lluvias puede tener un efecto opuesto, inundando pequeños sitios de cría y originando deriva y pérdida de los estados inmaduros de los mosquitos (Fox, 1957). Por el contrario, un déficit en la precipitación puede hacer que sequen sitios de cría de diferentes especies de Anopheles, afectando la densidad del vector. Sin embargo, durante condiciones de sequía prolongada, se pueden formar pequeños estanques en las márgenes de los ríos, lo cual aumenta el número de sitios de cría disponibles para algunas especies

de Anopheles (Wijesundera, 1988).

Los estudios realizados por Molineaux y Gramiccia (1980) y por Charlwood y colaboradores (1995) han registrado una asociación directa entre la densidad de Anopheles y el incremento en la precipitación. Sin embargo, para *An. albimanus*, importante vector de malaria para Colombia, no se ha observado correlación estadísticamente entre el número de mosquitos y la precipitación (Olano et al., 1997), reportándose que este vector mantiene igual densidad tanto en el período de lluvias como en tiempo de sequía (Breeland, 1972; Rúa et al., 2003).

Para *An. darlingi* y *An. nuneztovari*, otros importantes vectores de malaria en Colombia, se ha observado que la fluctuación mensual de la densidad es dependiente de la región donde habita el vector (Elliot, 1968), sugiriendo que los cambios en la densidad del vector están más ligados a la bio-ecología del lugar donde habita el Anopheles, que a los cambios en las condiciones climáticas (Elliot, 1972).

Algunas especies de Anopheles vectores pueden utilizar contenedores domésticos o comerciales de agua como sitios de cría (Olano et al., 2001), la importancia de la precipitación sobre la densidad de estos mosquitos puede ser mínima. Bajo estas circunstancias, la carencia de lluvia puede ser un factor que posibilita un contacto más próximo y continuo entre los vectores y el hombre.

Los efectos que presenta la lluvia sobre la densidad de población del vector son muy diversos y dependen principalmente de la ecología de la especie, por lo cual es conveniente realizar estudios de campo que permitan precisar el papel de los sitios de cría en el incremento del número de casos de malaria y su relación con los elementos climáticos, información que permitiría valorar y precisar la utilidad de la aplicación de medidas de control larval en el desarrollo de las estrategias de control de la enfermedad.

Cambios en los elementos del clima ocasionados por alteraciones climáticas, pueden generar que los vectores extiendan su rango de distribución, colonizando zonas de mayor altitud, gracias a la rapidez con que incrementan su número bajo condiciones favorables (Lindsay y Birley, 1996), lo cual puede ocasionar una expansión de la enfermedad a nuevas regiones. La población de aquellas áreas con baja o nula ocurrencia de malaria (y que son sensibles a las variaciones climáticas) carece de protección inmune natural y es propensa a que se presenten brotes epidémicos cuando las condiciones climáticas faciliten la transmisión.

8.3. Hábitos de picadura del vector

El hábito de picadura del vector corresponde a la relación entre el Índice de Sangre Humana (ISH) y la frecuencia de picadura del vector. El ISH se establece a través de la proporción de alimentaciones sanguíneas que toma la población del vector sobre el hombre (Garrett-Jones, 1964). Este índice proporciona una indicación de los hábitos alimenticios del vector, en donde valores elevados sugieren que el vector es antropofílico, mientras valores bajos de ISH revelan que la especie es zoofílica.

El efecto de la variabilidad climática sobre el ISH no ha sido claramente establecido. Este índice varía de acuerdo a la especie de vector, la región geográfica y la disponibilidad de hospederos (Garrett-Jones, 1964; Garrett-Jones et al., 1980).

La frecuencia de picadura del vector está determinada por la duración del ciclo gonotrófico. Este ciclo corresponde al período de desarrollo de los ovarios, comienza con una alimentación sanguínea y termina con la maduración y postura de los huevos (Detinova, 1962). La duración del ciclo gonotrófico determina la ocurrencia del contacto vector-hombre, elemento importante en la epidemiología de la malaria puesto que determina la probabilidad de transmisión de la enfermedad. La frecuencia con la que los vectores se alimentan de sangre humana es afectada por la temperatura ambiental y es dependiente de las fuentes alternativas de alimentación (Lindsay y Birley, 1996). La temperatura en los microhábitats tiene gran importancia en los organismos de «sangre fría» (heterotermos) como los Anopheles. Incrementos en la temperatura ambiental generan una mayor velocidad en las actividades metabólicas (Lindsay y Birley, 1996) como la digestión del alimento sanguíneo y el desarrollo de los ovarios (Detinova, 1962), lo cual afecta la duración del ciclo gonotrófico.

Para una población de vectores, la reducción en la duración del ciclo de gonotrófico por efecto de la temperatura puede ser calculada por medio de la ecuación presentada por Detinova (1962):

$$CG = f / T - g \quad \text{(Ecuación 9.2)}$$

En donde CG es la duración del ciclo gonotrófico, f es la suma termal y representa el número de grados en los cuales la temperatura media de un día, excede el umbral inferior de temperatura para realizar el ciclo gonotrófico, T es la temperatura ambiente y g es el umbral inferior de temperatura por debajo del cual no se realiza el ciclo gonotrófico.

Para una población de Anopheles, la asociación entre ciclo gonotrófico y temperatura puede ser descrita como una curva. Un ejemplo de esta relación es presentado en la **FIGURA 9.1**. En esta figura se observa la sensibilidad del ciclo gonotrófico de algunas

especies de Anopheles a la variación en la temperatura, pequeños incrementos en la temperatura, a bajas temperaturas ambientales, generan un gran cambio en la duración del ciclo gonotrófico.

Para los vectores de malaria en Colombia se desconoce la suma termal y el umbral inferior de temperatura, lo cual no permite calcular la duración del ciclo gonotrófico ante cambios en temperatura ambiente, como los que se presentan durante la fase cálida del evento ENOS. Sin embargo, para que se presente un incremento apreciable en la transmisión de malaria durante este evento climático, asociado a cambios en la duración del ciclo gonotrófico, se requiere que haya una disminución de al menos un día en la duración del ciclo gonotrófico.

8.4. Supervivencia y Esperanza de vida del vector

La longevidad del vector es una de las variables entomológicas más importante en la dinámica de transmisión de la malaria (Garrett-Jones, 1964), el mosquito hembra debe de vivir lo suficiente para la realización del periodo de incubación extrínseco del parásito y para que ocurran los contactos infectivos vector-hombre.

La supervivencia y la esperanza de vida de los vectores son específicas de cada especie de mosquito (debido a factores genéticos) y están determinadas por los elementos del clima, en particular por la temperatura ambiental y la humedad del aire (Molineaux, 1988). Dentro de ciertos umbrales, incrementos de la temperatura reducen la supervivencia de los mosquitos vectores (Macdonald, 1957), mientras que incrementos en la humedad relativa, posibilitan una mayor longevidad. De acuerdo Macdonald (1957), valores de humedad relativa superiores al 60% favorecen la transmisión de malaria.

La precipitación además de afectar la densidad de los mosquitos, puede incrementar la longevidad de los vectores adultos, al actuar sobre la humedad atmosférica, y posibilita un tiempo de vida suficiente del mosquito que permite el desarrollo y transmisión del parásito (Bruce-Chwatt, 1980).

De acuerdo al modelo de capacidad vectorial, la supervivencia de la población de vectores es estimada a través de la ecuación (Davidson, 1954):

$$p = P^{1/CG} \quad \text{(Ecuación 9.3)}$$

En donde p es la probabilidad de supervivencia diaria, P es el índice de paridad, el cual representa la relación entre el número de mosquitos que han ovipositado y el total de la población de hembras colectadas, y CG es la duración del ciclo gonotrófico.

En la **FIGURA 9.2** se presenta la asociación entre el índice de paridad y la tasa de supervivencia, cuando la duración del ciclo gonotrófico es de 3 días. Se observa que incrementos en el índice de paridad se relacionan directamente con la supervivencia. A mayor índice de paridad, mayor es la supervivencia del vector. El índice de paridad es una forma de estimar la longevidad de la población del vector. La longevidad del vector presenta un importante papel en la dinámica de transmisión de la malaria, incrementos en la longevidad del vector, posibilitan un mayor número de contactos vector-hombre.

El efecto de la variabilidad climática sobre el índice de paridad no es claro. En algunos estudios, empleando la paridad como estimador de la longevidad, han reportado que este índice en *An. albimanus* es mayor durante la estación seca (Rachou et al., 1973). Sin embargo, las observaciones de Rachou et al. contrastan con las registradas por Bown y colaboradores (1993), quienes demostraron mediante estudios realizados en el sur de México, que la paridad de *An. albimanus* puede permanecer estable en las estaciones húmeda y seca del año. Se hacen necesarios estudios entomológicos longitudinales con las especies vectoras de Colombia para establecer el impacto que tiene la variabilidad climática sobre la supervivencia y la esperanza de vida del vector.

8.5. Período esporogónico del *Plasmodium*

En el ciclo de vida de los parásitos de malaria, estos deben experimentar una serie de transformaciones en el interior del vector, para alcanzar su desarrollo y ser transferidos nuevamente al hombre (Bruce-Chwatt, 1980). Esta serie de transformaciones que realiza el parásito dentro del vector son conocidas como período de incubación extrínseco o período esporogónico.

Se ha registrado que el tiempo de desarrollo del parásito dentro del vector es afectado por la temperatura ambiental (Macdonald, 1957). Además, el período de incubación sólo se puede realizar dentro de un rango de temperaturas, el cual depende de cada especie de *Plasmodium* (Macdonald, 1957; Detinova, 1962). La temperatura juega entonces un papel importante en la distribución geográfica (latitudinal y altitudinal) de la dinámica de transmisión de malaria (Molineaux, 1988).

La temperatura ambiental mínima por debajo de la cual los parásitos cesan su desarrollo tiene gran importancia epidemiológica (Macdonald, 1957), razón por la cual en muchas regiones, en donde la temperatura es muy baja, el parásito no puede completar su período de incubación en el mosquito vector. Sin embargo, no existe un consenso sobre los valores del umbral mínimo permitido para el período esporogónico. Se ha indicado que la temperatura mínima para el desarrollo de *P. falciparum* se encuentra entre 16 y 19 °C y entre 14.5 y 15 °C para *P. vivax* (Macdonald,

1957; Detinova, 1962).

Se ha observado que incrementos en la temperatura ambiental reducen el tiempo de duración del período esporogónico (Macdonald, 1957). Sin embargo, cuando se sobrepasa el umbral superior de temperatura favorable (32-34°C), la supervivencia del parásito decrece rápidamente (Macdonald, 1957; Detinova, 1962; Lindsay y Birley, 1996). Macdonald (1957) fue el primero en ilustrar la relación entre temperatura ambiental y la duración del período esporogónico, demostrando que el tiempo de desarrollo del parásito es muy sensible a cambios en la temperatura.

Para indicar la relación entre temperatura y duración del período esporogónico, Detinova (1962) empleó una fórmula matemática, la cual es similar a la ecuación del ciclo gonotrófico. Con la valoración de la relación temperatura ambiental-duración del período de incubación extrínseco, es posible evaluar, con mayor precisión, el impacto del Cambio Climático y del evento ENOS sobre la incidencia de malaria. La siguiente es la ecuación de Detinova, diseñada para establecer el efecto del cambio en la temperatura sobre la duración del período esporogónico:

$$n = f / T - g \quad \text{(Ecuación 9.4)}$$

En donde n es el tiempo requerido para el período esporogónico, f es la suma termal, T es la temperatura ambiente y g es temperatura mínima por debajo de la cual el desarrollo del parásito dentro del vector no se realiza.

De acuerdo a esta ecuación, el desarrollo del Plasmodium es altamente sensible a la temperatura ambiental (**FIGURA 9.3**). Pequeños incrementos en la temperatura generan grandes reducciones en el tiempo de desarrollo tanto de *P. falciparum* como de *P. vivax*. Sin embargo, la duración del período esporogónico de *P. vivax*, sin importar la temperatura, siempre es menor que en *P. falciparum* (Figura 9.4). La diferencia en la duración del período de incubación entre estos dos parásitos es debida a que en *P. vivax*, tanto el umbral mínimo de temperatura como la suma termal, presentan valores más bajos (14.5 °C y 105 grados días, respectivamente), que los que se observan para *P. falciparum* (16.0 °C y 111 grados días). Por consiguiente, en la estimación del periodo esporogónico (**ECUACIÓN 9.4**), si el numerador es pequeño y el denominador se hace mayor, el desarrollo del parásito corresponderá a pocos días.

Como ejemplo, para Colombia, en la Costa Pacífica durante el episodio La Niña (1998-1999), la duración del período esporogónico para *P. falciparum* podría corresponder a 12 días, tomando como temperatura ambiental el promedio de 25 °C (registros IDEAM, 1999). Durante el evento El Niño, debido a que el promedio diario de la temperatura ambiental se incrementó en 2 °C, la duración de este ciclo se

acortaría en 2 días. Con una reducción en la duración del período esporogónico, los vectores de malaria tendrían un mayor número de días en estado infectivo, lo cual podría aumentar la frecuencia del contacto infectivo vector-humano (**FIGURA 9.3**). Esto conllevaría a una más eficiente transmisión, asumiendo que no se presentan cambios en la longevidad de la población de vectores.

A través de la evaluación del efecto de la temperatura sobre variables entomológicas de la transmisión de malaria, es posible observar el impacto del cambio en la temperatura sobre capacidad vectorial de los mosquitos transmisores de malaria (**FIGURA 9.4**). En este esquema permanecieron constantes la densidad, el ISH y la tasa de paridad, mientras que la duración del ciclo gonotrófico, el período de incubación del parásito y la tasa de supervivencia variaron con la temperatura de acuerdo a las ecuaciones 9.2, 9.3 y 9.4.

En la **FIGURA 9.4** se observa claramente una relación directa entre temperatura y capacidad vectorial. Aumentos en la temperatura generan incrementos en el potencial de transmisión de *P. falciparum* y *P. vivax*. Sin embargo, la transmisión de malaria por *P. vivax* es más sensible a cambios en la temperatura. El efecto diferencial en el potencial de transmisión, para estas dos especies de parásitos, se debe fundamentalmente a que la duración del período esporogónico de *P. vivax* requiere de menor tiempo (**FIGURA 9.4**). 105 grados días para *P. vivax*.

En la **FIGURA 9.4** se presenta también una comparación de la capacidad vectorial como resultado del cambio de temperatura a bajas temperaturas (de 20 a 25 °C) o a altas temperaturas (de 25 a 30 °C). Se observa que incrementos en la temperatura, cuando las temperaturas son bajas, pueden resultar en mayores aumentos en la intensidad de transmisión. Es decir, cuando la temperatura pasa de 20 a 25 °C, el incremento en la capacidad vectorial es mayor (cerca de dos veces, letra a en la figura), que cuando el cambio de temperatura es de 25 a 30 °C (letra b). Similar efecto se presenta para las relaciones temperatura-ciclo gonotrófico (**FIGURA 9.2**) y temperatura-período esporogónico (**FIGURA 9.4**). Con base en lo anterior se evidencia que el Cambio Climático o la fase cálida del evento ENOS, pueden tener mayor impacto en la frecuencia de picadura, en la duración del período de incubación extrínseco y en la incidencia de malaria en las zonas altas, donde la temperatura ambiental es baja. No obstante, para las regiones donde la malaria es endémica, y con baja altitud sobre el nivel del mar, se ha observado que también es notorio el impacto del Cambio Climático y de El Niño sobre incidencia de malaria (Martens, 1997, Bouma et al., 1997).

Establecer con precisión cuales factores entomológicos de la transmisión de malaria son afectados por la variabilidad climática, generando un incremento en la incidencia de la enfermedad, sería un elemento de gran valor para las entidades encargados del control de la enfermedad, ya que esta información podría ser incorporada a un

Sistema de Alerta Temprana (SAT) en salud y contribuir con el diseño y aplicación de acertadas medidas de prevención y control de la enfermedad, mitigando de esta manera, los incrementos en la transmisión que se presentan con cada ocurrencia del evento El Niño. No obstante, se desconocen cuales factores entomológicos están vinculados con el incremento en la incidencia de malaria durante la ocurrencia de cambios climáticos en Colombia. Razón por la cual, el presente estudio se desarrollo en pro de establecer este tipo de información. La pregunta experimental de la cual parte este trabajo entomológico se fundamentó en determinar cuales son los elementos de los vectores afectados por la variabilidad climática, y que se asocian con cambios en la transmisión de malaria en Colombia.

En el desarrollo del presente estudio, la hipótesis considerada se basó en que los elementos del clima (temperatura, precipitación y humedad relativa) afectan la dinámica de población de parásitos y vectores (período de incubación extrínseca del Plasmodium, densidad, supervivencia, esperanza de vida, tiempo de desarrollo y ciclo gonotrófico del vector), incrementando la incidencia de la enfermedad.

Con el propósito de validar, o no, la hipótesis planteada, se establecieron como objetivos generales: 1. Estimar el efecto de la variabilidad climática sobre los elementos entomológicos de la transmisión de la malaria, 2. Determinar las asociaciones que se presentan entre los casos de malaria y los elementos entomológicos de la transmisión de la enfermedad. 3. Confirmar el impacto de los cambios en las condiciones del clima sobre la incidencia de malaria.

El diseño experimental concebido para alcanzar los objetivos propuestos, comprendió dos fases: la fase de campo, un estudio entomológico longitudinal realizado en regiones endémicas de transmisión de malaria, y la fase experimental de laboratorio, evaluaciones en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. La fase de campo incluye los muestreos entomológicos desde Marzo de 1998 hasta Abril de 2005, y fue realizada en cuatro localidades: Nuquí y Panguí, en el departamento de Chocó, y La Sardina y Los Aguacates en el municipio de El Bagre, en Antioquia. Con el desarrollo de esta fase se pretendió determinar la influencia de las condiciones climáticas sobre la incidencia de malaria, la densidad y la paridad de los vectores. Esta fase de campo comprendió la continuación y ampliación del estudio «Relación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño», lo cual permite tener un mayor horizonte de información entomológica, posibilitando la realización, a futuro, de modelos de predicción y de dinámica de sistemas con mejor capacidad de pronóstico.

La fase experimental de laboratorio comprendió las siguientes evaluaciones:

1. Efecto del incremento en la temperatura sobre la duración del ciclo gonotrófico de *Anopheles albimanus*.

2. Cambios en el tiempo de desarrollo, tasa de supervivencia y esperanza de vida de *Anopheles albimanus* con relación a la temperatura.
3. Impacto de la variabilidad en la temperatura sobre la duración del período esporogónico de *P. falciparum* en *An. stephensi*. Esta última evaluación se realizó en los laboratorios del Programa Malaria en el Navy Medical Research Center en Silver Spring, Maryland-EUA. Las demás evaluaciones de laboratorio se efectuaron en los insectarios del Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales (PECET) de la Universidad de Antioquia.



Capítulo IX: Evaluación del efecto del clima sobre la incidencia de malaria, la densidad y la paridad de los vectores

9.1. Introducción

En Colombia, la malaria es uno de los principales problemas de salud pública. Más de 5 millones de personas viven en áreas endémicas de la enfermedad, y cada año se registran alrededor de 120.000 nuevos casos de malaria (Instituto Nacional de Salud). *Plasmodium falciparum* y *P. vivax* son los parásitos responsables del mayor número de casos y los mosquitos *An. albimanus*, *An. darlingi* y *An. nuneztovari* han sido reconocidos como los vectores más importantes para el país (Herrera et al., 1987).

Entre las causas que generan la persistencia en la transmisión de malaria se encuentran los factores socio-políticos, la dificultad en el suministro de los medicamentos, y la falta de conocimiento en el comportamiento del vector (OPS, 1997). En asocio con los anteriores factores, la incidencia de malaria también está determinada por elementos como el comportamiento humano, las características del vector, la presencia del parásito y los cambios ambientales. Cualquier evento que modifique alguno de estos factores, podría determinar cambios en la incidencia de la enfermedad (Patz et al., 1996). Es así como la variabilidad climática condicionada por cambios ambientales y en asocio con los determinantes biológicos, humanos y ecológicos, influyen en el incremento del número de casos de malaria que se observan durante la ocurrencia del evento El Niño (Epstein, 1997).

En Colombia, y para otros países tropicales y subtropicales, se ha registrado una fuerte asociación entre la ocurrencia del evento climático El Niño y el incremento en la transmisión de malaria (Loevinsohn, 1994; Bouma et al, 1996; Bouma y Van der Kaay, 1996; Poveda y Rojas, 1997; Poveda et al., 2000). El impacto de los eventos climáticos sobre la transmisión de esta enfermedad podría ser debido al efecto que presenta la variabilidad climática sobre: 1. la dinámica de población de los vectores, generando cambios en la densidad, en la cantidad y calidad de los sitios de reproducción y en la tasa de supervivencia del vector (Martens, 1997) y 2. la población del parásito, afectando su tasa de desarrollo (Patz et al, 1996).

A pesar de las evidencias registradas de la asociación entre el evento El Niño y casos de malaria en Colombia, los mecanismos entomológicos por los cuales este evento climático afecta la transmisión de la enfermedad no se han establecido. Se ha indicado que en la dinámica de transmisión de malaria, la densidad y la paridad del vector son elementos de capital importancia (Garrett-Jones, 1964), y se ha registrado que son afectados por cambios en las condiciones climáticas (Molineaux, 1988). Es así como incrementos en la temperatura en los sitios de cría reducen el tiempo de desarrollo de los estados acuáticos de algunas especies de *Anopheles* afectando la densidad (Muirhead-Thomson, 1951). Sin embargo, dentro de ciertos umbrales, los incrementos de la temperatura reducen la supervivencia del vector (Macdonald, 1957). Se ha registrado una asociación directa entre el incremento en la

precipitación y la densidad de *Anopheles* (Molineaux y Gramiccia, 1980; Charlwood et al., 1995), y se ha observado que un aumento en la humedad relativa posibilita una mayor longevidad de los mosquitos vectores (Macdonald, 1957). No obstante, el régimen de precipitación y la humedad relativa disminuyen durante la ocurrencia de El Niño en Colombia (Poveda et al., 2000).

Para Colombia se ha indicado que el aumento en la temperatura y la disminución en la precipitación que se presentan en el país durante El Niño, podrían ser los principales mecanismos que influyen en la dinámica de los sistemas ecológicos de parásitos y vectores, incrementando la incidencia de la enfermedad (Poveda y Rojas, 1997), por lo cual se hace necesario estimar el efecto de la variabilidad climática, con énfasis en el evento El Niño, sobre la densidad y paridad de los vectores, con el fin de precisar los mecanismos físicos que vinculan la relación clima-malaria-vectores. Además, si se considera que el grado de asociación entre las epidemias de malaria y el clima de Colombia ha sido ampliamente mejorado al encontrar una fuerte modulación entre el ciclo interanual asociados al fenómeno El Niño (Poveda et al., 2001), la información obtenida en este estudio podría ser incorporada a sistemas de alerta temprana en salud, posibilitando la predicción de brotes de malaria asociados con el clima, y la mitigación de la enfermedad con el diseño de adecuadas medidas de prevención y control, evitando el incremento en la incidencia de la malaria que se ha observado tradicionalmente con la ocurrencia del evento de El Niño.

En este estudio entomológico longitudinal se evaluó el efecto de las variables climáticas (temperatura ambiental, precipitación, humedad relativa) sobre la incidencia de malaria, la densidad y paridad de los vectores en dos áreas endémicas de malaria en Colombia, Nuquí en la Costa Pacífica Colombiana, y El Bagre en el Magdalena Medio. Los resultados obtenidos proporcionan una valiosa información para el entendimiento de los mecanismos físicos que vinculan la variabilidad climática, con especial referencia al evento El Niño, con la dinámica de población de los vectores y con la transmisión de malaria.

Al evaluar las diferentes variables que pueden influir en la asociación clima-malaria-vectores, generando un modelo matemático que permita crear un SAT, posibilitará la predicción, inicialmente en las zonas de estudio, de brotes de malaria asociados con el clima. Este conocimiento es una herramienta útil para informar a las autoridades competentes (Ministerio de Salud y departamentos Administrativos de Salud), y del cual se podrán desprender las medidas de prevención para evitar el incremento en la prevalencia de la malaria que se ha observado tradicionalmente con el advenimiento de cada uno de los fenómenos de El Niño.

Con el desarrollo de este estudio se posibilitó un mayor entendimiento del efecto de la variabilidad climática, sobre los elementos entomológicos de la transmisión y la incidencia de malaria en Colombia. Este conocimiento permitirá ampliar, validar

y mejorar modelos matemáticos de predicción y contribuirá con el desarrollo de Sistemas de Alerta Temprana en malaria, herramientas de gran utilidad, que permiten a las autoridades de salud, el desarrollo adecuado de medidas necesarias para la prevención y/o mitigación de incrementos en la incidencia de malaria asociados con cambios en las variables climáticas.

9.2. Materiales y Métodos

Áreas de estudio: Se seleccionaron los municipios de Nuquí (Chocó) y El Bagre (Antioquia) con base en que han presentado alta transmisión de malaria. El municipio de Nuquí está ubicado sobre la Costa Pacífica ($5.0^{\circ} 45' N$; $77^{\circ} 20' W$) y El Bagre, Antioquia en el bajo Cauca ($7^{\circ} 36' N$; $75^{\circ} 48' W$). La costa Pacífica del Chocó es una de las regiones con mayor registros de casos de malaria en Colombia, con predominio de *P. falciparum* (OPS 1997; Registros del Ministerio de Salud). En esta área se seleccionó el municipio de Nuquí, evaluado durante la fase I del estudio «Relación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño - Oscilación del Sur», allí se registra la presencia de *An. albimanus* como vector de malaria (Quiñones et al. 1987). Esta zona de vida está clasificada por Holdridge (IGAC 1977) como bosque pluvial tropical (bp - T).

El municipio de El Bagre está localizado en el bajo Cauca, es uno de los municipios de Antioquia con mayor número de casos de malaria y donde los mayores índices de malaria se presentan por *P. vivax* (Secretaría de Salud de Antioquia, comunicación personal). En este municipio se registra la presencia de *An. darlingi* y *An. nuneztovari* (WHO 1989). Esta área pertenece a la zona de vida clasificada por Holdridge como bosque muy húmedo tropical (IGAC 1977).

En cada municipio se seleccionaron dos regiones de estudio. En Nuquí, se eligieron el corregimiento de Panguí y la cabecera municipal del Nuquí. En El Bagre, La Sardina y Los Aguacates. Las cuatro localidades se seleccionaron con base en los registros de transmisión de malaria, la presencia de importantes vectores de esta enfermedad y la facilidad de acceso. En cada una de las regiones de estudio se eligieron cuatro viviendas de la periferia y/o del núcleo de la localidad para capturar los mosquitos. Los criterios para la selección de las viviendas fueron: 1) registros de personas enfermas de malaria en las viviendas, 2) cercanía a sitios de cría. En las cuatro viviendas seleccionadas se realizaron las capturas de mosquitos durante el transcurso del estudio.

En cada localidad se realizó un estudio entomológico longitudinal, efectuando visitas una semana por mes durante la duración del estudio.

Inspección de sitios de cría de *Anopheles*

Identificación de los sitios de cría: En cada localidad, durante el primer mes del estudio, se realizó una inspección de los sitios de cría. A cada hábitat larvario identificado, se le asignó un código. Los sitios de cría se eligieron con base en las siguientes características:

- Presencia de *An. darlingi*, *An. nuneztovari* y/o *An. albimanus*
- Densidad larvaria
- Facilidad de acceso y muestreo
- Ubicación dentro de la localidad

En cada localidad se realizó un seguimiento mensual de cada uno los criaderos, registrando su extinción o aparición y densidad de larvas de *Anopheles*.

Las colectas de larvas se realizaron siguiendo la metodología propuesta por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 1975). La densidad larvaria por criadero se estableció a través del número de larvas de 3º y 4º instar en 100 cucharonadas. Los mismos sitios de cría fueron visitados cada mes. Los resultados se presentan como número de larvas de *Anopheles* / en cien cucharonadas.

Colecta de mosquitos *Anopheles* adultos con atrayente humano: La colecta de adultos se realizó en el intradomiciliario y peridomicilio, entre las 18:00 y 21:00 horas durante cuatro días de visita a la localidad. Para capturar los mosquitos se utilizó el método propuesto por la Organización Mundial de la Salud (WHO 1975), en breve: cada colector con las piernas descubiertas sirve de atrayente para los mosquitos y con un aspirador manual colecta aquellos que lleguen en el transcurso de un período definido. Los mosquitos colectados se mantuvieron vivos hasta el día siguiente cuando se realizó la identificación de especie de acuerdo a la clave de Suárez et al (1988). Las hembras se disecaron y se extrajeron los ovarios para estimar el estado de paridad, siguiendo la metodología de Detinova (1962).

Los valores de densidad se presentan como número de mosquitos/hombre/hora. Los resultados se presentan como número de mosquitos paridos/total de mosquitos colectados.

Obtención del registro de casos de malaria y de las series de datos climáticos: La información de los casos de malaria fue obtenida del Centro de Salud San Pedro Claver del municipio de Nuquí y de la Secretaría de Salud del municipio de El Bagre. La información se procesó en sistemas de manejo de base de datos. Para el análisis de la información los datos de malaria se expresaron como: 1. número de casos de malaria por *P. falciparum*, 2. número de casos por *P. vivax* y 3. número total de casos de malaria (casos por *P. falciparum* más casos por *P. vivax*)

Para la obtención de los valores promedios de temperatura, humedad relativa y precipitación, se seleccionaron las estaciones climatológicas Amargal (municipio de Arusí, Costa Pacífica Colombiana, 05°36'N, 77°30'W, 30 msnm, registros disponibles para el período Marzo de 1998 - Abril de 2005) y Caserí (municipio de Caucasia, Bajo Cauca Antioqueño, 07°49' N, 74°55' W, 400 msnm, registros disponibles para el período Agosto de 2001 - Diciembre de 2004), instaladas por el IDEAM en municipios cercanos a Nuquí y El Bagre. Además, se obtuvieron los registros de datos climáticos, de las estaciones climatológicas (Davis Weather Stations) instaladas en las localidades de estudio durante el desarrollo de la Fase I del estudio «Relación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur». Con base en la información de estas estaciones, se realizó una reconstrucción de las series climática empleando el método Move 2, en el cual se utilizan las medias y las varianzas de las series climáticas de la estación pivote (que para nuestro caso fueron las estaciones del IDEAM) y de las estaciones instaladas en las áreas de estudio.

La ecuación Move 2 para la reconstrucción de los series es la siguiente (Poveda, 1983):

$$\hat{y}(i) = \bar{y} + \frac{\hat{S}(y)}{\hat{S}(x)} [x(i) - \bar{x}] \quad (\text{Ecuación 10.5})$$

Donde:

- $\hat{y}(i)$: Valor reconstruido en la fecha i
- \bar{y} : Valor medio de los valores existentes de la estación a reconstruir
- $\hat{S}(y)$: Desviación estándar de la estación a reconstruir
- $\hat{S}(x)$: Desviación estándar de la estación pivote
- $x(i)$: Valor en la estación pivote en la fecha i
- \bar{x} : Valor medio en la estación pivote

Análisis de datos: Para reducir las grandes diferencias que se presentan entre los registros de una serie de datos, se aplicó el método de estandarización. Este procedimiento consistió en:

- 1°. organizar los registros a escala mensual.
- 2°. obtener la media y la desviación estándar por cada mes, es decir estimar la media y la desviación estándar de los registros de enero, de febrero, etc.
- 3°. restarle a cada registro mensual el valor de la media correspondiente a ese mes y dividirlo por la desviación estándar del mes. La búsqueda de asociaciones entre las series históricas de variables climatológicas, entomológicas y epidemiológicas disponibles en períodos comunes de registro, se realizó empleando análisis de regresión múltiple, correlación cruzada y correlaciones de Pearson y Spearman. Se

empleó la prueba ANOVA para determinar la relación estadística entre las variables.

9.3 Resultados

Con el fin de tener una mayor extensión de los datos climáticos, entomológicos y epidemiológicos, y darle una mayor robustez al análisis del efecto de la variabilidad climática sobre la dinámica de población del vector y sobre la incidencia de la enfermedad, se empleó la información registrada desde 1998 para las localidades de la Costa Pacífica Colombiana y desde el año 2001 para las del Bajo Cauca Antioqueño.

Asociación entre variables climáticas e incidencia de malaria: La fluctuación en las variables climáticas y la distribución de casos de malaria para las localidades de Chocó se presenta en las **FIGURAS 10.1** (Nuquí) y **10.2** (Panguí).

Para las dos localidades de la Costa Pacífica se observó que la mayor transmisión de malaria se presentó entre marzo y julio de 1998, y coincidió con la ocurrencia del fuerte evento El Niño de 1997/1998. Para este mismo período (marzo a julio de 1998) se observaron los mayores valores en la temperatura ambiental ocasionados por el evento climático El Niño. El análisis de regresión múltiple indicó que los cambios en la incidencia de malaria se relacionaron con las variables evaluadas (F_{Nuquí} = 11.93, $p < 0001$; F_{Panguí} = 13.11, $p < 0.001$). En particular, se observó asociación estadísticamente significativa entre la temperatura ambiental y el número de casos de malaria, pero no entre estos y la precipitación o la humedad relativa (**TABLA 10.1**).

En la **FIGURA 10.3** se presenta la relación entre los valores estandarizados de la temperatura media ambiental y la incidencia de malaria para las localidades de Chocó. Se observó una relación, de tipo no lineal, entre ambas variables. El valor del R², el cual define el ajuste entre la línea de tendencia y la nube de puntos y permite explicar el grado de variación de la variable dependiente en función de la variable independiente, indicó que los cambios en la temperatura ambiental ayudarían a explicar el 46.3 y el 27.8 % de la variación en la incidencia de malaria en Nuquí y en Panguí, respectivamente.

Los análisis de correlación cruzada entre temperatura ambiental e incidencia de malaria indicaron, que hasta con cinco meses de rezago, los cambios en la temperatura se asociaron estadísticamente con la fluctuación en los casos de la enfermedad (**FIGURA 10.4**). Este resultado sugiere que es posible, para las localidades de la Costa Pacífica Colombiana, suponer, con hasta cinco meses de antelación, aumentos en la incidencia de malaria asociados a incrementos en la temperatura ambiental.

Para las localidades del Bajo Cauca Antioqueño, el análisis de regresión múltiple indicó que la incidencia en la enfermedad en localidad La Sardina se relacionó con las variables evaluadas (FLa Sardina = 3.28, $p < 0.05$), mientras que para Los Aguacates, el número de casos de malaria fue muy bajo y no permitió realizar comparaciones con las variables climáticas o entomológicas.

Diferente a lo observado para las localidades de Chocó, la incidencia de malaria en La Sardina no se relacionó con la temperatura, pero sí con la variación en la humedad relativa, y de forma inversamente proporcional (**FIGURA 10.5**). El valor del R² de la asociación malaria-humedad relativa indicó que los cambios en la humedad del ambiente pueden explicar el 36.1 % de la variación en la incidencia de malaria. La fluctuación en los valores de precipitación no se asoció con cambios en la incidencia de la enfermedad la localidad La Sardina (**TABLA 10.2**).

Asociación entre elementos entomológicos de la transmisión de malaria e incidencia de la enfermedad: De los 8473 mosquitos colectados en las localidades de la Costa Pacífica Colombiana, el 99.8 % correspondió a *An. albimanus*, el porcentaje restante correspondió a *An. neivai*. Los resultados que se presentan a continuación se realizaron con la especie dominante.

La fluctuación mensual de la densidad y la paridad de *An. albimanus* junto con la distribución del número de casos de malaria se presentan en la **FIGURAS 10.6** (Nuquí) y **10.7** (Panguí). El análisis estadístico indicó que el incremento en la transmisión de malaria en las localidades de la Costa Pacífica no mostró una asociación significativa con la densidad del vector (**FIGURA 10.8**), incluso cuando se buscó asociación entre la incidencia de la enfermedad con la tasa de picadura del vector del mes anterior (**TABLA 10.3**).

La relación entre el índice de paridad de *An. albimanus* y el número de casos de malaria se presenta en la **FIGURA 10.9**. Se observó una relación estadísticamente significativa entre la paridad del vector y la incidencia de malaria en la localidad de Panguí. En Nuquí, a pesar de estar ubicado a tan sólo 10 kilómetros de Panguí, y de presentar el mismo vector de malaria, no se observó que relación fuera estadísticamente significativa (**TABLA 10.2**).

Las colectas de mosquitos en las localidades del Bajo Cauca Antioqueño fueron muy bajas, especialmente en la localidad Los Aguacates. De los 671 *Anopheles* colectados, los mayores porcentajes correspondieron a *An. darlingi* (68.9 %) y a *An. rangeli* (18.8 %). Otros mosquitos colectados fueron *An. braziliensis*, *An. argyritarsis*, *An. pseudopunctipennis* y *An. nuneztovari*. A pesar de que *An. nuneztovari* es considerado vector de malaria para Colombia, los análisis se centraron sobre *An. darlingi* de la localidad La Sardina, otro importante vector de malaria, y que representó un gran porcentaje de las colecciones.

En la **FIGURA 10.10** se presenta la distribución mensual del número de casos de malaria y de la densidad y paridad de *An. darlingi* para la localidad La Sardina. Los análisis de correlación para las series comunes de tiempo entre incidencia de malaria y los elementos entomológicos indicaron que el número de casos de la enfermedad no se relacionaron con la densidad o paridad de *An. darlingi* (**TABLA 10.2**), incluso cuando se buscó asociación entre los elementos entomológicos y la incidencia de malaria del mes siguiente (**TABLA 10.3**).

Asociación entre variables climáticas y los elementos entomológicos de la transmisión de malaria: Tanto en la localidad de Nuquí como en Panguí, la densidad del mosquito adulto no se observó asociada con la variabilidad en la temperatura, la precipitación o la humedad relativa (**TABLA 10.2**), incluso cuando se busco asociación con los registros climáticos del mes anterior (**TABLA 10.3**).

El efecto de la temperatura ambiental sobre la paridad de *An. albimanus* no fue claro. Sólo para Nuquí se observó que la paridad del vector se asoció estadísticamente con la temperatura (**FIGURA 10.11**). De acuerdo a la Figura, la relación entre la temperatura y la paridad de *An. albimanus* es de tipo no lineal. La ecuación que mejor describe esta asociación es polinomial de tercer orden. El valor del R² de la asociación temperatura/paridad indicó que los cambios en la temperatura ambiental ayudarían a explicar el 19.0 % de la variación en la tasa de paridad de *An. albimanus*. Para la precipitación y la humedad relativa, en ninguna de las localidades de la Costa Pacifica se registró relación de estas variables climáticas con la paridad del vector (**TABLA 10.2**), incluso cuando se estimaron asociaciones con los registros de pluviosidad y humedad del mes anterior (**TABLA 10.3**).

La densidad larval de *An. albimanus* presentó fluctuaciones durante el período de estudio. Para Panguí se observó que solo la temperatura ambiental se asoció significativa e inversamente proporcional con la densidad de larvas (**FIGURA 10.12**). Mientras que para Nuquí fue la precipitación la que presentó una asociación directa y estadísticamente significativa con la densidad de larvas del vector (**FIGURA 10.13**). Se observó que tanto la relación temperatura/densidad larval como la relación precipitación/densidad larval fueron de tipo no lineal. Las ecuaciones polinomiales de segundo orden fueron las que mejor describieron estas asociaciones. Para Panguí, el valor R² observado indica que el 23.4 % de la variación en la densidad larval podría ser explicado por efecto de la temperatura, mientras que para Nuquí, el 10, 4 % de la variación en la densidad larval se explicaría por los cambios en la precipitación.

Para la localidad La Sardina, no se observaron relaciones estadísticamente significativas entre las variables climáticas y los elementos entomológicos evaluados (**TABLA 10.2**), incluso cuando se buscaron asociaciones de la paridad y la densidad larval y de mosquitos adultos con los registros climáticos del mes anterior (**TABLA**

10.3). En la localidad Los Aguacates, el número de colectas de mosquitos fue muy bajo y no permitió realizar las asociaciones estadísticas con las variables climáticas.

9.4. Discusión

En este estudio se observó que la incidencia de malaria se encontró afectada por la variabilidad climática. Para las localidades de la Costa Pacífica, la transmisión de malaria se asoció con incrementos en la temperatura ambiental, mientras que en La Sardina, localidad del Bajo Cauca Antioqueño, la incidencia de la enfermedad se relacionó con reducciones de la humedad relativa. Estos resultados apoyan las evidencias registradas para Colombia de la asociación entre la transmisión de malaria y la ocurrencia del evento El Niño (Poveda y Rojas, 1997; Bouma et al., 1997), fenómeno climático que en Colombia se caracteriza por incrementos en la temperatura y disminución en el régimen de precipitación (Poveda et al., 2000). Incrementos en la incidencia de malaria asociados con la ocurrencia de El Niño y con aumento en la temperatura ambiental, también han sido registrados en países como Perú, Guyana (Gagnon, et al., 2002), Zimbabwe (Freeman y Bradley, 1996) y Rwanda (Loevinsohn, 1994)

Tanto en las localidades de Chocó como en La Sardina, no se observó asociación entre la transmisión de malaria y los cambios en la precipitación, diferente a lo registrado para otros países de Centro América, en donde *An. albimanus* es el principal vector de malaria (PAHO, 1996) o para *An. gambiae* s. l. en la región sur de África, en donde la lluvia es uno de los principales factores que genera epidemias en las zonas áridas y próximas al desierto (Grover-Kopec et al., 2005). Desde el enfoque entomológico, el papel de la precipitación en la transmisión de malaria puede deberse, tanto al impacto que tiene la pluviosidad sobre los sitios de cría, como a la asociación que tiene la lluvia con la humedad atmosférica, la cual afecta directamente la longevidad del vector (Jetten et al. 1996). Para nuestras áreas de estudio, los sitios de cría fueron permanentes, y la humedad relativa permaneció por encima del 70 %, posibles razones por las cuales no se observó el efecto de la precipitación sobre la transmisión de malaria. Las mejores condiciones para la transmisión de la enfermedad son cuando la humedad relativa es superior al 60 %, y la temperatura se encuentra dentro en el rango de 20 a 30 °C (Bruce-Chwatt, 1980), características que fueron constantes durante todo el período de estudio.

A pesar de la asociación significativa entre la incidencia de malaria y la variabilidad climática, la relación entre la transmisión de la enfermedad y la densidad del vector no fue evidente. Similares resultados han sido registrados para *An. albimanus* en Centro América (PAHO, 1996, Bown et al, 1991) y para *An. melas* en La Gambia (Thomson et al., 1994). Es probable que para nuestras especies vectoras, la densidad no sea uno de los factores más determinantes en la transmisión de malaria. En el

éxito de *An. albimanus* como vector, su elevada densidad juega un papel importante (Belkin et al., 1970, Ramsey, 1987), esto probablemente debido a su tendencia zoofílica (Breeland, 1972); mientras que para *An. darlingi*, es su marcada antropofilia lo que lo ha caracterizado como un eficiente vector de malaria en algunos países de Sur América (Faran y Linthicum, 1981). Sin embargo, en la incidencia de malaria, además de la densidad y del grado de antropofilia, es la longevidad del vector quien juega un papel crucial en la dinámica de transmisión de la enfermedad, tal como se evidencia en el modelo de capacidad vectorial (Garrett-Jones, 1964).

En el presente estudio se observó que incrementos en la tasa de paridad se asociaron con un mayor número de casos de malaria en Panguí. Esta asociación no fue registrada para las localidades de Nuquí y La Sardina. Es probable que incrementos en la longevidad puedan explicar el aumento en la transmisión de malaria en Colombia durante el evento El Niño. Sin embargo, es posible que el índice de paridad no sea un estimador tan fino, que permita detectar cambios en la longevidad debidos a incrementos en uno o dos grados centígrados, como consecuencia de la variabilidad climática. Sería deseable poder contar con métodos más sensibles que permitan detectar cambios leves en la longevidad de los mosquitos. El método actualmente disponible es la observación de la dilatación de las ovarias, el cual permite determinar la edad de las poblaciones con más certeza (PAHO, 1996), sin embargo esta metodología es poco práctica (Tyndale-Biscoe, 1984; Lehane, 1985; Hoc, 1996). Una posible alternativa es la evaluación, en condiciones de laboratorio, del efecto de la temperatura sobre los atributos de las tablas de vida de los mosquitos vectores (Mahmood, 1997).

El impacto de la variabilidad climática no afectó la tasa de picadura de los vectores *An. albimanus* y *An. darlingi*. En la dinámica de población del vector, un incremento en la temperatura ambiental en asociación con una reducción en el régimen de precipitación, podría generar una reducción en la densidad del vector, debido a que se secarían muchos de los criaderos naturales (Bown et al. 1991), además, temperaturas elevadas podrían también afectar la supervivencia del vector (Thomson et al., 1996). Sin embargo, es importante considerar que los mosquitos pueden tener una flexibilidad ecológica tal, que les permite resistir los efectos en la variación normal del clima, buscando hábitat que le ofrezcan protección contra temperaturas extremas y sitios alternativos de cría (Lindsay y Birley, 1996). Tal como se ha observado con *An. aquasalis* en Río de Janeiro, Brasil, en donde las mayores densidades del vector se presentan en los períodos de poca lluvia (Flores-Mendoza C y Lourenco-de-Oliveira, 1996), o con *An. albimanus* en Panamá, en donde los cambios en la precipitación no afectaron las densidades del vector (PAHO, 1996), y como se observó en el presente estudio, en donde los adultos de *An. albimanus* y de *An. darlingi* se encontraron durante todo el año, incluso en las épocas de mayor sequía.

El efecto de la variabilidad climática sobre la longevidad del vector es complejo.

Entre ciertos umbrales, la supervivencia del vector decrece con los incrementos en la temperatura (Wernsdorfer y McGregor, 1988), y humedad relativa superior al 60% favorece la supervivencia del vector (Bruce-Chwatt, 1980). En El Salvador, Rachou (1973) indicó que el índice de paridad de *An. albimanus* es mayor en la estación seca, lo cual podría explicar el incremento en la transmisión durante los años de sequía del evento El Niño. Sin embargo, las observaciones de Rachou contrastan con las registradas por Bown y coinvestigadores (1993), quienes demostraron mediante estudios realizados en el sur de México, que la paridad de *An. albimanus* puede permanecer estable en ambas estaciones del año. En nuestro estudio, la asociación entre las variables climáticas y el índice de paridad no fue consistente, sólo se registró una relación estadísticamente significativa con la temperatura ambiental en Nuquí, localidad en donde se registró el mayor número de casos de malaria.

Para las localidades de la Costa Pacífica Colombiana la variabilidad climática afectó la densidad larvaria, sin embargo, su impacto no fue consistente. En Nuquí, los cambios en la densidad larvaria se asociaron con incrementos en la precipitación, mientras que en Panguí, la densidad larvaria se relacionó con una reducción en la temperatura ambiental. Similares resultados han sido presentados por Bailey y coinvestigadores (1980) para *An. albimanus* en El Salvador, en donde la densidad de larvas alcanzan su máximo en la estación seca del año, cuando se presentaron aumentos en la temperatura ambiental y disminución en la precipitación. Una asociación universal y predecible entre precipitación y densidad larval es imposible de calcular, debido principalmente a la gran variación entre localidades y en la bionomía de las especies vectoras.

En nuestro estudio, la relación entre densidad larval y densidad de mosquitos adultos no fue evidente, al igual que la relación entre densidad y paridad de vectores. El índice de paridad puede ser afectado por la cantidad de hembras recién emergidas que ingresen a la población y por la tasa de mortalidad de hembras nulíparas y paridas. Una disminución en el índice de paridad a causa de un mayor ingreso de hembras nulíparas a la población, podría incrementar la densidad total del vector. Sin embargo, para algunos países de Centroamérica se ha registrado que la paridad y la densidad de *An. albimanus* se asocian directamente, aumentando durante la estación de lluvias y disminuyendo durante el período de sequía (PAHO, 1996).

En la dinámica de transmisión de malaria se presentan otras variables, además de longevidad y densidad de los vectores, sensibles a cambios en la temperatura como son la duración del período esporogónico (Macdonald 1957) y del ciclo gonotrófico (Detinova 1962). Incrementos en la temperatura ambiental como los que se presentan en Colombia durante el evento El Niño, podrían generar una reducción tanto del período esporogónico como del ciclo gonotrófico, posibilitando un mayor número de mosquitos con capacidad de transmitir el parásito, y haciendo que los vectores piquen con mayor frecuencia.

Los resultados de este estudio evidenciaron que la variabilidad climática afectó la transmisión de malaria, que la densidad del vector no se relacionó con un incremento en el número de casos de la enfermedad, y que el papel de las variables climáticas sobre los elementos entomológicos de la transmisión de malaria depende de la localidad estudiada. Debe considerarse que además de la densidad y paridad del vector, otras variables como la duración del período esporogónico y del ciclo gonotrófico influyen en la incidencia de la enfermedad. Incluir la evaluación de estas variables en estudios de la asociación clima-malaria-vectores, ayudaría a explicar el incremento en la transmisión de malaria que se presenta en Colombia durante la ocurrencia del evento El Niño.

9.5. Conclusiones

La variabilidad climática afectó la incidencia de malaria. Incrementos en la temperatura ambiental se asociaron con aumentos en la transmisión de malaria en las localidades de Chocó, mientras que una reducción en la humedad relativa se relacionó con mayor número de casos de la enfermedad en la localidad La Sardina, Bajo Cauca Antioqueño.

Cambios en el régimen de precipitación en las localidades de estudio no afectaron la incidencia de malaria, la densidad de mosquitos adultos, ni la tasa de paridad de los vectores.

A pesar de que tanto la densidad de *An. albimamus* como la de *An. darlingi* fluctuaron durante el período de estudio, esta no se relacionó con cambios en la incidencia de la enfermedad.

El efecto de la paridad del vector sobre la incidencia de malaria no fue consistente. Sólo en Nuquí, la localidad con mayor transmisión de la enfermedad, incrementos en la tasa de paridad de *An. albimamus* se relacionaron con aumentos en el número de casos de malaria.

El papel de la variabilidad climática sobre los elementos entomológicos de la transmisión de malaria fue dependiente de la localidad de estudio. En Nuquí, incrementos en la temperatura ambiental y en la precipitación se asociaron con mayor tasa de paridad y mayor densidad larval de *An. albimamus*, respectivamente. En Panguí, la densidad larval se asoció con reducciones en la temperatura. En la localidad La Sardina, cambios en las variables climáticas no se relacionaron con la densidad ni la paridad de *An. darlingi*.



Capítulo X: Estimación del efecto de la temperatura sobre la duración del Ciclo Gonotrófico de Anopheles Albimanus

10.1. Introducción

Las evidencias indican que los aumentos en la incidencia de malaria no necesariamente obedecen a incrementos en la densidad de los vectores (PAHO, 1996; Bown et al., 1991; Rúa et al., 2003), mientras que otras variables como la disminución en la duración del ciclo gonotrófico, la reducción en el período de incubación extrínseco del parásito, así como el incremento en la longevidad del vector, sí están relacionados generalmente con un incremento en la incidencia de la enfermedad (Macdonald, 1957; Detinova, 1962; Bruce-Chwatt, 1980; Molineaux, 1988). Estas variables entomológicas son especialmente sensibles a cambios en la temperatura ambiental (Lindsay y Birley, 1996; Martens, 1997; Martens et al., 1999).

En la dinámica de transmisión de la malaria, tanto la velocidad del desarrollo de los oocitos, proceso de maduración de ovarios, como la duración del ciclo gonotrófico del vector, que se define como el lapso comprendido entre la ingesta sanguínea y la postura de huevos, influyen en la frecuencia del contacto vector-hombre: una reducción en la duración del ciclo gonotrófico haría que los vectores piquen con mayor frecuencia, generando un incremento en la probabilidad de transmisión de la enfermedad.

Anopheles albimanus es considerado uno de los principales vectores de malaria en el Neotrópico (Breeland, 1972; Frederickson, 1993), en donde se ha encontrado naturalmente infectado con *Plasmodium falciparum* o con *P. vivax* (Warren et al., 1975; Ramsey et al., 1986). Este es un mosquito con concordancia gonotrófica (cada ovipostura se relaciona con una ingesta sanguínea), de hábitos zoofílicos y se alimenta principalmente sobre ganado vacuno, equinos y otros animales domésticos (Fleming, 1986). Sin embargo, para diferentes regiones de Colombia, esta especie es la responsable de mantener la transmisión de malaria humana (Herrera et al., 1987).

Anopheles albimanus se encuentra ampliamente distribuido en los departamentos de las regiones costeras del Océano Pacífico como Chocó, Valle del Cauca y Nariño (Quiñones et al., 1987), se reporta también para los departamentos de la costa Atlántida y para Antioquia (Zuluaga, 1996), en donde ha sido capturado en elevaciones de hasta 1940 metros sobre el nivel del mar, pero normalmente se encuentra por debajo de los 400 metros (Fleming, 1986).

Para Colombia existe muy poca información publicada sobre *An. albimanus*. La mayoría de las investigaciones tratan sobre la distribución espacial y temporal (Quiñones et al., 1987; Zuluaga, 1996), tasas de infectividad (Herrera et al., 1987), y algunos aspectos bionómicos como el comportamiento diario de picada y las tasas de picada intradomiciliaria o peridomiciliaria (Quiñones et al., 1987). Pero se desconoce información sobre la capacidad vectorial, y sólo se cuenta con estimativos

de los hábitos de picadura mosquito-hombre. Otros elementos de la eficiencia vectorial como tasas de supervivencia, esperanza de vida, índice de sangre humana y duración del ciclo gonotrófico no han sido estudiados.

El hábito de picadura humano-vector, es decir la frecuencia con que los mosquitos se alimentan sobre el hombre, se relaciona con el grado de antropofilia y con la duración del ciclo gonadotrófico. El conocer los hábitos de picadura de la población de *An. albimanus* es importante en la epidemiología de la malaria, ya que dicha preferencia influye en el contacto humano-vector y en la frecuencia con que se alimentan sobre el hombre. El hábito de picadura es un elemento de gran importancia cuando se desea establecer la capacidad vectorial de los *Anopheles* (Garrett-Jones, 1969).

El ciclo gonotrófico de los vectores de malaria representa un aspecto importante de la dinámica de transmisión, debido a que su duración determina la frecuencia con que se puede alimentar el mosquito y por consiguiente influye en la probabilidad de la transmisión de la enfermedad.

La duración del ciclo gonotrófico se puede determinar mediante la técnica de Marcaje, Liberación y Recaptura de las hembras. Sin embargo, esta metodología es ampliamente demandante debido a que requiere de la liberación de varios miles de mosquitos marcados con pigmentos fluorescentes y a que los porcentajes de recaptura son normalmente bajos (Reisen y Milby, 1986).

Otra forma de establecer la duración del ciclo gonotrófico es bajo condiciones experimentales de laboratorio, en donde se simulen las condiciones ambientales en cuanto a temperatura ambiental y humedad relativa. Esta metodología tiene la ventaja de que se puede estimar con precisión el momento de la oviposturas.

Se presenta en este estudio el efecto de la temperatura sobre el tiempo de desarrollo de los oocitos y la duración del ciclo gonotrófico de *An. albimanus*, en condiciones controladas de laboratorio. Estas observaciones son discutidas con relación a su implicación en la transmisión de malaria durante la ocurrencia del evento El Niño.

10.2. Objetivos

Objetivo general

- Determinar, en condiciones controladas de laboratorio, el efecto de la temperatura (24, 25.5, 27, 28.5 y 30 °C) sobre el tiempo de desarrollo de los oocitos y la duración del ciclo gonotrófico de *An. albimanus*.

Objetivos específicos

- Estimar el efecto de la temperatura sobre el tiempo de desarrollo de oocitos de *An. albimanus*, en condiciones controladas de laboratorio.

- Estimar el efecto de la temperatura sobre la duración del ciclo gonotrófico de *An. albimanus*, en condiciones controladas de laboratorio.

10.3. Materiales y Métodos

Mantenimiento de mosquitos:

Se empleó la cepa Cartagena de *An. albimanus* para determinar el tiempo de duración del ciclo gonotrófico y del desarrollo de los oocitos. Estos mosquitos se encuentran bien adaptados a las condiciones de laboratorio y fácilmente se obtienen apareamientos y varias oviposturas por generación (Carrillo et al., 1981). Para realizar los experimentos se utilizaron dos cámara climatizada (WTB Binder KBF 115 y A&Co) que mantienen constantes la temperatura y la humedad relativa (± 0.5 °C y ± 5 % HR). Se evaluaron cinco condiciones de temperatura: 24, 25.5, 27, 28.5 y 30 °C. Los experimentos a 24, 27 y 30 °C se realizaron con la cámara WTB Binder. Las temperaturas evaluadas fueron seleccionadas teniendo en cuenta que cubren un amplio rango de temperaturas registradas en las áreas endémicas de Colombia durante periodos El Niño y en condiciones climáticas normales. La humedad relativa se mantuvo constante durante todo el experimento (90 % \pm 5%), así como fotoperíodos sucesivos de 12 horas de luz y oscuridad. La estimación del tiempo de duración del ciclo gonotrófico y del desarrollo de los oocitos se realizó sobre la segunda ovipostura, debido a que la duración del ciclo gonotrófico de hembras nulíparas de *An. albimanus* es muy variado y se ha indicado que requieren de más de una alimentación sanguínea para completar el primer ciclo gonotrófico (Briegel y Hörler, 1993).

Los mosquitos adultos se obtuvieron colocando pupas dentro de una jaula de mantenimiento (28.0 x 28.0 x 29.5 cm). Una vez emergieron los mosquitos adultos, se les suministró una solución de glucosa al 10 % (p/v). Una nueva solución de glucosa fue suministrada al segundo y cuarto día. A los mosquitos hembra recién emergidas, se les permitió que se alimentaran hasta repleción con sangre de ratón (*Mus musculus*) por 30 minutos durante el primer día. Esto se repitió durante el

segundo y tercer día. Los mosquitos fueron mantenidos a 27 °C desde el estado larval hasta que se realizó la primera ovipostura, momento a partir del cual cada lote de mosquitos fue colocado a cada una de las temperaturas seleccionadas.

Metodología de oviposición:

Al día siguiente después de la última alimentación sanguínea, todas las hembras llenas de sangre fueron removidas de la jaula con un aspirador bucal, y cada una fue colocada en una caja de oviposición individual, la cual consistió en un cilindro plástico de 5.4 cm de diámetro y 9.2 cm de alto, con una malla a manera de tapa y en la base un círculo de papel filtro sobre algodón húmedo como sustrato para facilitar la oviposición. Una vez que los mosquitos pusieron los huevos, fueron colocados individualmente en una nueva caja de oviposición, en donde se alimentaron por una sola vez (hasta repleción) con sangre de uno de los experimentadores que colocaba sus dedos sobre la malla de la caja. Luego de la alimentación, las cajas de oviposición se colocaron en el interior de la cámara climatizada a una de las temperaturas establecidas. Al igual que para la primera oviposición, los mosquitos que no se alimentaron fueron eliminados del estudio.

Desarrollo de Oocitos:

El desarrollo de los oocitos fue evaluado cada 12 horas desde el momento de la alimentación sanguínea. El seguimiento del desarrollo de los oocitos se realizó por 5 días, tiempo que se ha observado ser suficiente para la realización de la segunda ovipostura de *An. albimanus* (Rodríguez et al., 1992). La maduración de los oocitos fue establecida con base en la observación de la apariencia abdominal y del proceso de digestión sanguínea (etapas de Sella) y por la disección e identificación de las estadios ováricos descritos por Christophers (Christophers, 1911, WHO, 1975), para lo cual cada par de ovarios fueron colocados en una lámina porta-objetos y se determinó su desarrollo en un lote de 20 ovariolas por ovario.

Duración del ciclo gonotrófico:

La duración del ciclo gonotrófico correspondió al período de tiempo comprendido entre la alimentación sanguínea y la ovipostura de los primeros huevos, para lo cual se observó cada 12 horas la presencia de huevos en las cajas de oviposición individual. La observación de la ocurrencia de oviposturas comenzó desde el momento en que se observó, por apariencia abdominal, la etapa SG de Sella (hembras semi-grávidas), o por disección, el estadio IV de Christophers. Para facilitar la oviposición, todos los días se humedecían con agua los sitios de oviposición.

Ritmo circadiano de oviposición:

Para determinar si el momento de la ingesta sanguínea influye en la duración del ciclo gonotrófico, los mosquitos fueron alimentados al comienzo de la noche (18:00-19:00) o en la mañana (07:00-10:00) y se registró para cada grupo el momento en que ocurrió la oviposición.

Análisis estadístico:

Se realizaron pruebas estadísticas de Kruskal-Wallis para determinar si la duración del ciclo gonotrófico es afectada por la temperatura. Se empleó Chi cuadrado para establecer si existe diferencia entre los momentos de alimentación y ovipostura.

10.4. Resultados

Desarrollo de Oocitos: Para estimar la variación en la duración del desarrollo de los oocitos de *An. albimanus* a diferentes temperaturas se observaron y disectaron 308 mosquitos. La relación entre temperatura y el proceso de maduración de los oocitos de *An. albimanus* de acuerdo a los estadios de Christophers, se presenta en la **TABLA 11.1**. Allí se observa que el tiempo requerido para el desarrollo de los ovarios fue inversamente proporcional a la temperatura. Para 30 °C, a las 24-36 horas post alimentación, se registraron los primeros individuos que alcanzaron el estado final de desarrollo de los oocitos, caracterizado por la presencia de flotadores completamente formados (estadio V de Christophers), mientras que para 27 °C y 24 °C, los primeros individuos con el estadio V de Christophers se observaron a las 36-48 y 48-60 horas, respectivamente.

Se observó que la maduración de los oocitos de *An. albimanus* no es un proceso sincrónico. Por ejemplo para 24 °C a las 84-96 horas post alimentación se observaron individuos tanto en el estado V de Christophers como en los estados III y IV. En forma similar, para 27°C, se observaron mosquitos en los estados II y III luego de 108-120 horas post alimentación (**TABLA 11.1**).

El tiempo promedio de desarrollo de oocitos de acuerdo a Christophers con respecto a la temperatura se presenta en la **FIGURA 11.1**. Se observó una diferencia significativa entre las temperaturas. A 24 °C fue mayor el tiempo requerido para el desarrollo de los oocitos comparado con 27 y 30 °C. De acuerdo al límite inferior del intervalo de confianza, el estadio V de Christophers, para 27 y 30 °C se alcanzó en menor tiempo, mientras que para 24°C comenzó cerca de 24 horas después (**FIGURA 11.2**).

Se observó una diferencia significativa en la duración del tiempo promedio de desarrollo de oocitos de acuerdo a Christophers con respecto a la temperatura. A 24 °C fue mayor el tiempo requerido para el desarrollo de los oocitos comparado con 27 y 30 °C (**FIGURA 11.1**). De acuerdo al límite inferior del intervalo de confianza, el estadio V de Christophers, para 27 y 30 °C se alcanzó en menor tiempo, mientras que para 24°C comenzó cerca de 24 horas después (**FIGURA 11.1**).

Similar a lo observado para los estadios de Christophers, en las etapas de Sella

también se observó una la relación inversa entre la temperatura y el tiempo de desarrollo, y en el proceso no sincrónico de maduración de los oocitos. Tanto para 24 como para 27 y 30 °C, se observaron individuos con diferentes etapas de desarrollo de oocitos un día post ingesta sanguínea. Sin embargo, para 30 y 27 °C, los primeros individuos en la etapa de gravidez (etapa G, último estado de desarrollo de los oocitos) se registraron a las 24 horas, y 12 horas más tarde para 24 °C (**TABLA 11.1**).

Se observó que la duración del tiempo de desarrollo de oocitos de acuerdo a Sella presentó diferencia significativa entre las temperaturas evaluadas. El tiempo promedio requerido para la maduración de los oocitos a 24 °C fue mayor que para 27 y 30 °C (**FIGURA 11.2**). De acuerdo al límite inferior del intervalo de confianza, la última etapa de desarrollo de oocitos se realizó en menor tiempo para 27 y 30 °C en comparación con 24°C, la cual comenzó alrededor de un día después (**FIGURA 11.2**). Esta diferencia en un día en el inicio de la etapa final de desarrollo de los oocitos de *An. albimanus* fue similar a la observada para el estadio V de Christophers.

Duración del Ciclo Gonotrófico: La duración del ciclo gonotrófico de *An. albimanus* con relación a la temperatura se registró sobre 152 mosquitos individuales. Se observó una relación inversa entre temperatura y la duración de este ciclo. Para 24 °C se registró el mayor tiempo de duración del ciclo gonotrófico de *An. albimanus*, diferente estadísticamente con relación a 27, 28.5 y 30 °C. No se observó diferencia significativa entre estas tres últimas temperaturas (**FIGURA 11.3**). Al comparar el tiempo de duración del ciclo gonotrófico de *An. albimanus* entre 24 y 30 °C, se registró una diferencia media de 19.3 horas. Pero cuando se compararon los intervalos de confianza, se observó que la mínima diferencia para estas dos temperaturas (diferencia entre el límite inferior del IC a 24 °C y el límite superior del IC a 30 °C) fue de 8.3 horas, y la máxima diferencia (diferencia entre el límite superior del IC a 24 °C y el límite inferior del IC a 30 °C) fue de 30.3 horas. Si se asume que este mismo comportamiento se presenta en la naturaleza, esta disminución en el tiempo de duración del ciclo gonotrófico del vector de malaria *An. albimanus*, podría corresponder a una reducción en aproximadamente un día.

Ritmo circadiano de oviposición: Se observó que más del 96 % de las oviposiciones se presentaron en las horas de la noche, sin importar el momento de la ingesta sanguínea (**FIGURA 11.4**). Sólo dos mosquitos ovipositaron durante el día (pasado el amanecer o cerca del crepúsculo).

De forma similar, la mayoría de los mosquitos pusieron sus huevos a la tercera noche post ingesta sanguínea, no importando el momento de alimentación.

Al igual que en el proceso de maduración de oocitos, la oviposición de la población de los mosquitos no fue sincrónica, realizándose durante diferentes noches,

comenzando en la segunda noche y finalizando en la quinta

Para las tres temperaturas evaluadas, la primera oviposición fue realizada en un menor tiempo para los mosquitos que fueron alimentados al comienzo de la noche, siendo esta de 48-60 horas post ingestión (**Figura 11.4A**), mientras que para los mosquitos que se alimentaron durante el día, la primera oviposición fue observada a 60-72 horas post alimentación (**Figura 11.4B**).

10.5. Discusión

Los resultados de este estudio muestran la asociación entre incrementos en la temperatura y la disminución del tiempo de desarrollo de los oocitos y del ciclo gonotrófico de *An. albimanus*. Sin embargo, esta asociación no es lineal. Con un aumento en 3 °C, de 24 a 27 °C, se observó una reducción el ciclo gonotrófico de 13 horas, pero entre 27 y 30 °C no se presentó una diferencia estadísticamente significativa en la duración del ciclo.

La reducción observada en el tiempo de desarrollo de los oocitos y en la duración del ciclo gonotrófico de *An. albimanus* asociada a incrementos en la temperatura, también ha sido registrada para *An. culicifacies*, *An. stephensi* (Mahmood y Reisen, 1981) y *An. maculipennis* (Detinova, 1962). Detinova (1962) expresó la relación entre temperatura y duración del ciclo gonotrófico de los vectores de malaria mediante una expresión matemática, altamente dependiente de la temperatura, basada en la temperatura mínima del desarrollo del ciclo gonotrófico y en la suma termal, la cual representa el número de grados en los cuales la temperatura media de un día excede el umbral inferior de temperatura del ciclo gonotrófico. Para los vectores de malaria en Colombia se desconocen los valores de suma termal y del umbral inferior de temperatura, lo cual no permite calcular la duración del ciclo gonotrófico ante cambios en temperatura ambiente, como los que se presentan durante la ocurrencia del evento El Niño.

Estudios previos realizados con *An. albimanus* bajo condiciones de laboratorio, han empleado una temperatura relativamente constante para estimar la duración del ciclo gonotrófico. Se ha reportado que para 25 °C el tiempo promedio de duración del ciclo fue de 4.5 días (Ramsey et al., 1988), mientras que para 28 °C, la duración del ciclo del ciclo de oviposición fue de 4 días, información que empleó Rubio-Palis (1994) para calcular la capacidad vectorial de *An. albimanus*. Estos registros contrastan con lo observado en este estudio, en donde la duración del ciclo gonotrófico a 24, 27 y 30 °C fue respectivamente 88.4 horas (3.7 días), 75.0 horas (3.1 días) y 69.1 horas (2.8 días).

En este estudio se observó que no todos los individuos hacen sus oviposiciones

en forma simultánea. Similares observaciones han sido registradas por Chadee y coinvestigadores (1993) al indicar que, bajo condiciones de laboratorio (26 ± 2 °C), *An. albimanus* presenta un ritmo bimodal de oviposición, crepuscular (18:00-20:00) y nocturno (04:00-06:00).

De acuerdo con Haddow y Ssenkubuge (1962), los anofelinos generalmente ovipositan durante la noche, tal como fue observado para *An. albimanus* en el presente estudio. Para otras especies de *Anopheles* también se ha registrado un patrón similar nocturno de oviposición (Chadee, 1995; 1999, Chadee et al., 1998). El proceso de oviposición de *An. albimanus*, al parecer se encuentra bajo el control de un ritmo circadiano exógeno causado por la transición día-noche, como ha sido observado por Chadee y coinvestigadores (1993) y reportado también para otros vectores de malaria (Reisen y Mahmood, 1979). Por consiguiente, a pesar de que se reduzca el tiempo de duración del desarrollo de los oocitos por efecto de la temperatura, es probable que se requiera de un estímulo externo (cambio luz a oscuridad) para que ocurra la oviposición. Si este mismo comportamiento se presenta en la naturaleza, la reducción en unas pocas horas en la duración del desarrollo de los oocitos de *An. albimanus* no tendrá efecto importante en el período de oviposición, debido a que es el estímulo del cambio luz-oscuridad quien determinaría el momento de oviposición y por lo tanto el tiempo total de duración del ciclo gonotrófico. Sin embargo, una reducción en la duración del ciclo gonotrófico de cerca de un día, tendrá un efecto importante en la frecuencia del contacto vector-hombre. En términos de transmisión de malaria, se podría esperar que una reducción en la duración del ciclo de gonotrófico pueda incrementar la transmisión de la enfermedad, al aumentar la frecuencia del contacto vector-hombre, y como fue observado en este estudio, incrementos en la temperatura reducen la duración del tiempo de desarrollo de oocitos y del ciclo gonotrófico del vector *An. albimanus*.

Se ha observado que la temperatura influye en el desarrollo embrionario de algunas especies de *Anopheles* (Cardozo et al., 2002). Sin embargo, el proceso de maduración de oocitos de *An. albimanus* fue variable, incluso cuando los mosquitos se encontraban a una misma temperatura. Estudios sobre desarrollo de ovarios y de requerimientos de sangre para la maduración de huevos han sido pobremente estudiados en anofelinos del neotrópico. En el presente estudio se registró que pasados 4 días post alimentación, algunos mosquitos tenían sus oocitos aún en etapas tempranas de desarrollo, diferente a lo registrado por Lu y Hagedorn (1986) quienes observaron que a 27.5 °C, los huevos de *An. albimanus* se encontraban en el máximo estadio de desarrollo a las 36 horas post alimentación. Es probable que para desarrollar completamente los oocitos durante el segundo ciclo de oviposición, algunos individuos requieran de más de una alimentación sanguínea, como ocurre para el primer ciclo gonotrófico. Se ha documentado múltiples alimentaciones sanguíneas dentro de un mismo ciclo de oviposición en colonias de *An. albimanus* mantenidos en laboratorio (Briegel, 1990; Briegel y Hörler, 1993; Klöwen y Briegel,

1994) y para Lounibos y coinvestigadores (1998) las pequeñas ingestas sanguíneas predisponen a las hembras de *An. albimanus* en requerir múltiples tomas sanguíneas para la maduración de sus huevos. Para el presente estudio, es probable que los mosquitos que no desarrollaron completamente sus oocitos en el lapso de 5 días, sea debido a que requieran de más de una ingesta sanguínea o a que los mosquitos hembras no recibieron durante la cópula algunas sustancias necesarias para la maduración ovárica, las cuales provienen de glándulas accesorias de los machos, como se ha observado en algunas especies de *Nyssorhynchus*, tal como *An. albimanus* (Lounibos, 1994). El requerimiento del apareo para el completar el desarrollo de los huevos se ha reportado desde décadas atrás para *An. subpictus* de la India (Roy, 1940).

Durante la ocurrencia de eventos climáticos como el calentamiento global o el fenómeno El Niño, se generan variaciones en la temperatura ambiental (IPCC, 1996; Wigley y Raper, 1992). Estos cambios en la temperatura afectan la duración del ciclo gonotrófico de los vectores de malaria, como se observó en éste estudio. En la duración del ciclo gonotrófico pueden intervenir otras variables como tipo de fuente sanguínea (Ramsey et al., 1988), disponibilidad de hospederos (Lindsay y Birley, 1996), número de ciclos anteriores (Briegel y Hörler, 1993), retención de huevos (Chadee et al., 1993) o variabilidad en el tiempo de desarrollo de los huevos; sin embargo, la duración de este ciclo es fundamentalmente dependiente de cambios en la temperatura (Detinova, 1962; Mahmood y Reisen, 1981; Lindsay y Birley, 1996; Martens, 1997).

Es necesario realizar observaciones de campo durante periodos de El Niño para disponer de evidencia de estos cambios en poblaciones naturales en la duración del ciclo gonotrófico. Si el incremento en la temperatura de los microhábitats acelera la velocidad de digestión del alimento sanguíneo y el desarrollo de los oocitos, generando una reducción en la duración del ciclo gonotrófico, el intervalo entre alimentaciones se reduciría. Una reducción en este intervalo de un día, por efecto de incrementos en la temperatura durante El Niño, afectaría la dinámica del contacto vector-hombre, potenciando la transmisión de malaria, lo cual explicaría el aumento en el número de casos de malaria en Colombia durante la ocurrencia del evento El Niño.

10.6. Conclusiones

El desarrollo de los oocitos y la duración del ciclo gonotrófico de una población de *An. albimanus* son eventos no sincrónicos. Sin embargo, ambos sucesos son dependientes de los cambios en la temperatura.

Incrementos en la temperatura redujeron tanto la duración del desarrollo de los oocitos como la del ciclo gonotrófico de *An. albimanus*. La relación de estos eventos con la temperatura fue de tipo no lineal. Sugiriendo que, al interior del rango de temperaturas evaluadas, se presenta un valor de temperatura a la cual se desarrollan los oocitos y se realiza el ciclo gonotrófico en un menor tiempo. El rango de temperatura a la cual puede presentarse el ciclo gonotrófico de *An. albimanus* en un menor tiempo se encuentra comprendido entre 25.5 y 27 °C. El momento de la ingesta sanguínea (mañana o noche) que realizó *An. albimanus*, no se relacionó con el período de la oviposición. Tanto los mosquitos que se alimentaron durante el día como aquellos que lo hicieron en las horas nocturnas, realizaron sus ovipositas en la noche. Sin embargo, la duración del ciclo gonotrófico fue más corta para los mosquitos que fueron alimentados en la noche.

Si se considera que la relación entre incrementos en la temperatura y la reducción en la duración del ciclo gonotrófico se presenta en condiciones naturales, un aumento en la temperatura ambiental aceleraría el metabolismo de la digestión del alimento sanguíneo, generando una reducción en el tiempo de desarrollo de los oocitos y en la duración del ciclo gonotrófico, lo cual podría aumentar la frecuencia del contacto humano-vector. Sin embargo, es necesario que se presente una reducción de al menos en un día en el momento de ovipostura de *An. albimanus* para que el efecto de la temperatura sobre el ciclo gonotrófico influya en la dinámica de la transmisión de malaria



Capítulo XI: Efecto de la variación en la temperatura sobre la duración del Período Esporogónico de *P. Falciparum* en *An. Stephensi*

11.1. Introducción

En la transmisión de malaria, el mosquito vector debe ingerir gametocitos (micro y macrogametocitos) a través de una picadura infectante sobre una persona infectada, permitir la incubación extrínseca del desarrollo del parásito y sobrevivir el tiempo suficiente para transmitir, en una segunda picadura, el parásito a otra persona (Molineaux, 1988). El período necesario para el desarrollo del Plasmodium dentro del Anopheles, desde la fertilización del gameto femenino por el gameto masculino, pasando por los estados de ooquinate, ooquiste y finalmente la ubicación de esporozoitos en glándulas salivales, recibe el nombre de periodo esporogónico o periodo de incubación extrínseca del parásito (Bruce-Chwatt, 1980). En la **FIGURA 12.1** se presenta el ciclo de transmisión de malaria, con los períodos esporogónico (ciclo en el mosquito) y esquizogónico (ciclo en el hombre).

En la dinámica de transmisión de la malaria, además de la duración del ciclo gonotrófico y del tiempo de desarrollo del vector, otras variables como la duración del período esporogónico son afectadas por incrementos en la temperatura (Macdonald, 1957; Detinova, 1962). La relación temperatura-período esporogónico fue inicialmente presentada por Macdonald (1957), pero fue Detinova (1962) quien diseñó un modelo matemático para presentar dicha asociación. La ecuación de Detinova se presentó en la Introducción.

De acuerdo a la ecuación de Detinova (1962), para cada especie de parásito de malaria existen dos parámetros cruciales: la suma termal y el umbral inferior de temperatura. En la **TABLA 12.1** se muestran estos valores para tres especies de Plasmodium de malaria humana. Como se puede observar en la **TABLA 12.1**, no existe precisión en cuanto al valor del umbral inferior de temperatura para el desarrollo de *P. vivax* y *P. falciparum*, lo cual genera inexactitud en el cálculo de la duración del periodo esporogónico. La **TABLA 12.2** presenta la variación en la duración del período esporogónico para *P. vivax* y *P. falciparum*, basándose en los dos valores del umbral inferior de temperatura, y empleando la ecuación de Detinova (1962).

Como se observa en la **TABLA 12.2**, la variación en el umbral inferior de temperatura genera diferencias en la duración del período esporogónico, estas diferencias son mayores para *P. falciparum*, en donde el umbral inferior de temperatura varía en 3 °C. Se requiere de cálculos más exactos del período esporogónico, dado que este es un componente importante del modelo de capacidad vectorial (**ECUACIÓN 9.1**).

La duración período esporogónico es una variable crucial en la transmisión de malaria (Garrett-Jones, 1964), ya que el tiempo que tarda el parásito en desarrollarse dentro del vector determina la proporción de la población del mosquito capaz de transmitir el parásito. Una reducción en el periodo esporogónico por efecto de incrementos en la temperatura ambiental, como los que se presentan en Colombia durante el

evento El Niño, podría generar una mayor cantidad de mosquitos infectantes, con capacidad de transmitir el parásito. Esto conllevaría a una más eficiente transmisión de malaria, asumiendo que no se presentan cambios importantes en la longevidad de la población de vectores.

Estudios anteriores han definido que el límite superior de temperatura para el desarrollo extrínseco de los parásitos de la malaria humana se encuentra alrededor de los 32 °C (Macdonald, 1957; Garnham, 1964). Se ha registrado que cuando mosquitos infectados con *P. falciparum* son mantenidos a estas elevadas temperaturas, el ooquinete experimenta “muerte termal”, lo que ocasiona anomalías en su desarrollo e impide la formación de esporozoitos (Noden et al., 1995). Evaluar el efecto de la temperatura sobre la duración del período esporogónico y sobre la capacidad invasiva de esporozoitos a células hepáticas, permitiría estimar que rango de temperaturas podrían considerarse óptimas para el desarrollo e infectividad del parásito.

A pesar de que *An. stephensi* no es un vector de malaria en el Neotrópico, se asume que el efecto que tiene la temperatura sobre la duración del período esporogónico en la asociación vector-*P. falciparum*, es similar que en otro vector.

11.2 Objetivos

Objetivo general

Determinar, en condiciones controladas de laboratorio, el efecto de la temperatura sobre el tiempo de duración del período esporogónico de *P. falciparum* en *An. stephensi*, y evaluar la capacidad invasiva de los esporozoitos obtenidos a diferentes temperaturas sobre cultivos celulares de hepatocitos humanos.

Objetivos específicos

1. Estimar el efecto de la temperatura (24, 26, 28 y 30 °C) sobre el tiempo de formación de ooquistes y de aparición esporozoitos en glándulas salivales durante el período de incubación de *P. falciparum* en *An. stephensi*, en condiciones controladas de laboratorio.
2. Evaluar la capacidad invasiva de los esporozoitos obtenidos a diferentes temperaturas de desarrollo extrínseco de *P. falciparum* en *An. stephensi* a (24, 26, 28 y 30 °C) sobre cultivos celulares de hepatocitos humanos.

11.3 Materiales y Métodos

Mosquito vector: Se emplearon hembras de *An. stephensi* de 2 a 4 días de edad, obtenidas del insectario del Biomedical Research Institute (BRI), Maryland, Estados Unidos. Las condiciones de mantenimiento de la colonia fueron 27 °C (\pm 2 °C), 80 % (\pm 5 %) de humedad relativa y 12:12 horas luz; oscuridad de fotoperíodo.

Para realizar los experimentos se utilizó una cámara climatizada que mantiene constantes la temperatura y la humedad relativa. Se evaluaron cuatro condiciones de temperatura: 24, 26, 28 y 30 °C. Por cada temperatura se evaluaron tres lotes de mosquitos. Cada lote consistió en aproximadamente 200 mosquitos hembras, las cuales fueron depositadas en contenedores de cartón (18 cm de diámetro x 22 cm de alto), tapado con tela de toldillo en la parte superior.

Infección de mosquitos: Los mosquitos se infectaron con cultivos in Vitro de *P. falciparum*, cepa NF 54. Los parásitos se mantuvieron en cultivo continuo siguiendo la metodología descrita por Trager y Jensen (1976). Para infectar los mosquitos se empleó la técnica de alimentación por membrana (Ponnudurai et al., 1982; 1989), en la cual 50 ml de cultivos de *P. falciparum*, de 16 días de mantenimiento, se centrifugaron a 2250 rpm durante 13 minutos. El pellet obtenido se resuspendió en 2.5 ml y se adicionó 1.0 ml de glóbulos rojos tipo O+. La solución resultante se depositó en una cámara alimenticia sellada con Parafilm «M» ®, y que se encontraba conectada a un sistema de alimentación artificial. Bajo la cámara alimenticia se colocó el contenedor con los mosquitos y se permitió que estos se alimentaran sobre la fuente sanguínea infectante por un lapso de 45 minutos. Los mosquitos que no se alimentaron fueron retirados del contenedor empleando un aspirador conectado a bomba de vacío. El contenedor con los mosquitos fue colocado en el interior de la cámara climatizada a una de las temperaturas seleccionadas, dentro del insectario de alta seguridad.

Para determinar la calidad como fuente sanguínea infectante de la solución preparada, se colocó una gota de dicha solución sobre una lámina portaobjetos, se cubrió con una laminilla y pasados 15 minutos se contó, a través del microscopio (con objetivo de 40X) en 50 campos, el número de parásitos que exflagelan.

Estimación de la duración del período esporogónico: Diariamente, a partir del día 4 post alimentación, se disectaron un total 30 mosquitos (10 por lote) por cada temperatura evaluada. Inicialmente se disectaron los estómagos de mosquitos para determinar el día de formación de ooquistes, y a partir de día 7 post infección, se disectaron las glándulas salivares para determinar la presencia de esporozoitos. Los tiempos promedio de formación de ooquistes y de aparición de esporozoitos se calcularon en función de la ecuación modificada a partir de Reisen y Siddiqui (1979): $D = [\sum (E \times X)] / N$, donde D es la duración promedio del estado de desarrollo del parásito (formación de ooquistes o aparición de esporozoitos), E es el número de mosquitos con ooquistes o esporozoitos, X es el día en que se observaron los mosquitos infectados con ooquistes o esporozoitos, y N es el número total de mosquitos infectados.

Evaluación de la capacidad invasiva de los esporozoitos: La capacidad invasiva de los esporozoitos obtenidos a diferentes temperaturas fue determinada experimentalmente usando una línea celular derivada de un hepatoma Hep G2 A16

en una variación del ensayo de inhibición de invasión por esporozoitos (Hollingdale et al., 1984). Aproximadamente 50.000 células Hep G2 A 16 fueron sembradas en cada pozo de las laminas LabTek de 8 pozos (Labtek chamber slides Nunc No. 177402). Las celdas se mantuvieron en cultivo por 3 días a 37 °C y 5 % CO₂, hasta formar una monocapa de aproximadamente 100.000 células/pozo. Los esporozoitos para los ensayos de invasión se obtuvieron por disección de las glándulas salivares y paso a través de una jeringa de tuberculina 1 ml., aguja 27. Se determinó la densidad de esporozoitos empleando un hemocitómetro y se adicionaron aproximadamente 20.000 esporozoitos a cada uno de los pozos de la lámina de cultivo de hepatocitos. Luego de incubar por tres horas, las láminas se lavaron con PBS, se fijaron con metanol y se dejaron toda la noche a 4 °C. Los parásitos fueron visualizados por un método inmunohistoquímico usando un anticuerpo monoclonal contra la proteína circumesporozoito (CSP) NFS1 como anticuerpo primario y un antisuero contra las inmunoglobulinas murinas conjugado a peroxidasa como anticuerpo secundario (KPL No.074-1809). El color de la reacción fue desarrollado usando DAB (DAB Reagent Set KPL No.541000). Los pozos plásticos se removieron, las láminas se dejaron secar y se cubrieron con laminillas usando Permount. Se utilizó un microscopio de fase para evaluar el grado de invasión. Cada ensayo de invasión se hizo por triplicado.

Análisis estadístico: Se empleó la prueba Kruskal-Wallis para determinar diferencias estadísticas entre las temperaturas a las cuales fueron observados los tiempos de formación de ooquistes y presencia de esporozoitos en glándulas salivares. Debido al bajo número de ensayos de invasión, los resultados obtenidos fueron analizados únicamente mediante métodos descriptivos.

11.4. Resultados

Tiempo de formación de ooquistes: Para estimar el efecto de la temperatura sobre el tiempo formación de ooquistes de *P. falciparum* en *An. stephensi* se disectaron 370 mosquitos. La relación temperatura-formación de ooquistes se presenta en la Figura 12.2. Allí se observa que el tiempo requerido para el desarrollo del parásito hasta la formación de ooquistes fue inversamente proporcional a la temperatura. Para 30 °C, el tiempo promedio para la observación de ooquistes fue 5 días post alimentación, siendo esta la temperatura a la cual los ooquistes requirieron de un menor tiempo para su formación. Mientras que para 26 y 24 °C, la formación de ooquistes necesitó de una cantidad de tiempo similar, pero mayor, en cerca de 1.5 días, que el requerido para 28 °C, la cual fue de 5.6 días post alimentación. Se observaron diferencias estadísticamente significativas en el tiempo de formación de ooquistes para las diferentes temperaturas, pero no entre 24 y 26 °C.

Presencia de esporozoitos en las glándulas salivares: Para determinar el tiempo aparición de esporozoitos de *P. falciparum* en las glándulas salivales de *An.*

stephensi se disectaron en promedio 150 mosquitos por cada temperatura evaluada. Similar a lo observado para la formación de ooquistes, el tiempo requerido para la detección de esporozoitos en glándulas salivales fue inversamente proporcional a la temperatura (**FIGURA 12.3**). Para 28 y 30 °C se observó el menor tiempo promedio de aparición de esporozoitos en glándulas salivales, el cual fue en 9.4 y 9.3 días post alimentación, respectivamente. Un día después de registrados los esporozoitos a 30 °C, fueron detectados a 26 °C. Para 24 °C, los esporozoitos requirieron de 14 días post alimentación para ser observados en las glándulas salivales. El análisis estadístico indicó diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas a las cuales se determinó el tiempo de aparición de esporozoitos en glándulas salivales, pero no entre 28 y 30 °C.

An. stephensi a diferentes temperaturas (24, 26, 28 y 30 °C), en condiciones de laboratorio.

La marcada asociación temperatura-duración del período esporogónico observada en el presente estudio y registrada por Rastogi y coinvestigadores (1987) y Noden et al. (1995), podría explicarse por el efecto que tiene la temperatura sobre el intrincado proceso de desarrollo, en donde incrementos en la temperatura aceleran las reacciones enzimáticas, aumentando el metabolismo celular, y haciendo que en lapsos más cortos de tiempo, se alcancen dentro del mosquito las diferentes etapas del ciclo vital. Se ha evidenciado además la presencia de un complejo sistema de termorregulación del parásito, funcionando durante el cambio de temperatura que se presenta con el paso del hospedero humano al mosquito vector (Fang y McCutchan, 2002).

Se calculó el tiempo requerido para la conversión de ooquistes a esporozoitos en glándulas salivales a través de la diferencia entre el tiempo de aparición de esporozoitos y el tiempo de formación de ooquistes. Se observó que para 26 y 28 °C la duración del período de conversión ooquistes-esporozoitos fue muy similar, siendo de 3.6 y 3.8 días respectivamente, mientras que para 30 y 24 °C tal diferencia fue mayor, 4.3 días para 30 °C y 7.1 días para 24 °C (**FIGURA 12.4**). La diferencia observada en esta etapa del período esporogónico no se encontró relacionada con los cambios en la temperatura.

A pesar de que la relación entre la temperatura y la formación de ooquistes o la presencia de esporozoitos en las glándulas salivales fue inversamente proporcional, esta relación no fue de tipo lineal. Tanto para la formación de ooquistes como para la presencia de esporozoitos, se observó un valor de temperatura que fue más favorable para el desarrollo del parásito. De acuerdo a los resultados obtenidos, la temperatura óptima para la formación de ooquistes estuvo, alrededor de los 30 °C, pero para la presencia de esporozoitos en glándulas salivales, que es finalmente la etapa que determina la duración del período esporogónico, la temperatura óptima fue reportada

entre 26 y 28 °C. Esta observación también es respaldada por el cálculo del período de conversión ooquistes-esporozoitos, en donde el menor tiempo requerido para la aparición de esporozoitos a partir de ooquistes fue registrado entre 26 y 28 °C.

Invasión de esporozoitos en cultivos celulares de hepatocitos: Se realizaron 5 ensayos independientes de invasión. La evaluación de la capacidad invasiva de los esporozoitos obtenidos a diferentes temperaturas y con diferente tiempo de maduración de esporozoitos se presenta en la Tabla 12.3. Se observó que los mayores promedios de invasión a hepatocitos se registraron para 26 y 24 °C, mientras que los menores valores fueron observados para 30 °C. Para esta última temperatura sólo fue posible evaluar los esporozoitos que recién aparecieron en glándulas salivales, es decir esporozoitos de menos de 1 día de maduración (mosquitos con 10 días post alimentación). Sin embargo, se podría esperar que para 30 °C, esporozoitos con mayor tiempo de maduración, tuvieran mejor capacidad invasiva, tal como se observa en la Tabla 12.3, en donde el tiempo de maduración de los esporozoitos se relacionó directamente proporcional con la capacidad de invasión a hepatocitos.

En la Tabla 12.3 también se observa que el promedio de esporozoitos por mosquito no se asoció con la temperatura, pero si presentó una relación inversa con el tiempo de maduración de los esporozoitos, en donde a mayor tiempo transcurrido desde la alimentación hasta la disección de los mosquitos, menor fue el promedio de esporozoitos observados por mosquito.

No se observó relación entre el promedio de esporozoitos por mosquitos y el promedio de células que pueden invadir. Para una misma temperatura y días postalimentación, los esporozoitos obtenidos varían en capacidad invasiva a hepatocitos.

11.5. Discusión

En el presente estudio se observó como incrementos en la temperatura redujeron tanto el periodo de formación de ooquistes como el tiempo de aparición de esporozoitos de *P. falciparum* en glándulas salivales de *An. stephensi*. Estos resultados concuerdan con los datos presentados por Macdonald (1957), quien observó que aumentos en la temperatura disminuyen el período de incubación extrínseca del parásito, tanto para *P. falciparum* como para *P. vivax*. Además se ha sugerido que las mejores condiciones para el desarrollo de Plasmodium en el mosquito vector y para la transmisión de malaria, se presentan cuando la temperatura ambiental se encuentra entre 20 y 30 °C (Bruce Chwatt, 1980). A pesar de que los datos presentados por Macdonald (1957) se basaron en diversas fuentes y a que fueron diferentes los vectores empleados para estimar la duración del período esporogónico, tanto en el estudio de Macdonald como en el presente, se observó que aumentos en la temperatura disminuyeron el tiempo de duración del período esporogónico del parásito.

Los valores de tiempo de duración del período esporogónico obtenida a diferentes temperaturas registrados en este estudio, son similares a aquellos que se consiguen empleando la ecuación de Detinova (1962), siempre y cuando se emplee a 16 °C como temperatura del umbral inferior. En el presente estudio la duración promedio del período de incubación extrínseca del parásito fue 14.0, 10.3, 9.4 y 9.3 días para 24, 26, 28 y 30 °C respectivamente, mientras que con la ecuación de Detinova, la duración del período esporogónico para estas temperaturas es 13.9, 11.1, 9.3 y 7.9 días. Como puede observarse la mayor diferencia se presenta para 30 °C. Esta diferencia podría ser debida a que, como fue observado en la Figura 12.3, la velocidad metabólica del parásito parece presentar una temperatura óptima a la cual las actividades fisiológicas se realizan en menor tiempo, y a partir de este valor, incrementos en la temperatura no alteran la velocidad enzimática. Diferente a lo que se presenta con la ecuación de Detinova, en donde la temperatura optima para el desarrollo del parásito tendría un valor tan elevado, que generaría una extraordinaria velocidad metabólica, haciendo que el parásito se desarrollara en muy pocos días. Así por ejemplo a temperaturas de 35 °C, la velocidad del desarrollo del parásito debe ser tan rápida, que en tan solo 5 días, se debería completar el período de incubación.

La duración del período esporogónico de *P. falciparum* también se ha estimado en otros vectores como *An. maculipennis* (Shute y Maryon 1952), *An. freeborni* (Coatney et al., 1971) y *An. gambiae* (Vaughan et al., 1992). Sin embargo, en estos estudios la temperatura permaneció constante, encontrándose que a 25 °C el período de incubación en *An. maculipennis* fue entre 11 y 12 días, en *An. freeborni* fue 12 días y en *An. gambiae*, a 24 °C, fue 13 días. A pesar de que en el presente estudio no se registro la duración del período esporogónico a 25 °C, los resultados para *An. maculipennis*, *An. freeborni* y *An. gambiae* son similares a los que se reportan en este estudio para *An. stephensi*.

Reducciones en el período de incubación de *P. falciparum* en *An. stephensi* por efecto de incrementos en la temperatura también fueron observadas por Noden y coinvestigadores (1995), quienes evaluaron el impacto de la temperatura sobre las etapas iniciales del desarrollo del parásito, desde la unión de los gametos hasta la formación de ooquistes, observando que los tiempos requeridos para detectar ooquistes para 30, 27 y 24 °C fueron respectivamente 7, 9 y 11 días post alimentación. Estos valores fueron superiores a los registrados en el presente estudio, en donde los ooquistes se visualizaron a los 5.0, 5.6, 6.7 y 6.9 días post alimentación para 30, 28, 26 y 24 °C. Tal diferencia es debida a que para Noden y coinvestigadores el tiempo de formación de ooquistes fue reportada cuando fue máxima la densidad de ooquistes por mosquito, mientras que en el presente estudio el tiempo de formación de ooquistes se determinó cuando se observaron por primera vez los ooquistes en el estómago del vector.

La fuerte asociación entre la temperatura y el periodo esporogónico de *P. falciparum* y *P. vivax* también ha sido demostrada en otros parásitos de la malaria como *P. berghei* (Rastogi et al., 1987). Estos investigadores observaron que además de la reducción en el tiempo de desarrollo del parásito dentro del vector por efecto de incrementos en la temperatura, las altas temperaturas tienen un efecto deletéreo sobre la infectividad de los esporozoitos, tal como fue observado en el presente estudio cuando se evaluó la capacidad invasiva de esporozoitos obtenidos a 30 °C sobre hepatocitos de cultivo celular. Sin embargo, se ha indicado que el número de esporozoitos inoculados durante una picadura infectiva es muy bajo, llegando a ser menos de 100 esporozoitos (Ponnudurai et al., 1991; Beier et al., 1991).

En el efecto desfavorable que presentan las altas temperaturas sobre el período esporogónico debe considerarse la influencia que presenta la temperatura sobre la actividad proteolítica de las enzimas digestivas secretadas por el tracto estomacal del mosquito, ya que tal actividad interfiere con el proceso de desarrollo del parásito (Gass y Yeates, 1979). Lo anterior podría ayudar a explicar la reducción en la capacidad invasiva de los esporozoitos que se registró en el presente estudio cuando los mosquitos fueron mantenidos a 30 °C. Se ha observado que para temperaturas elevadas (30 y 32 °C), tanto el desarrollo como la densidad de ooquinetes, parecen ser afectados por las enzimas estomacales del mosquito (Vaughan et al., 1994; Noden et al., 1995), perjudicando el paso del ooquinate por la membrana peritrófica, matriz quitinosa secretada por las células epiteliales del intestino del mosquito y que envuelve el bolo alimenticio (Ghosh et al., 2000). La pro-quitinasa del parásito requiere ser activada por la tripsina del mosquito (Billingsley y Sinden, 1997; Shahabuddin et al., 1993), la cual es secretada por el tracto estomacal para facilitar la digestión de la ingesta sanguínea (Briegel y Lea, 1975).

Similar a lo registrado por Noden y coinvestigadores (1995) y a lo observado en el presente estudio, Rastogi y coinvestigadores (1987) evidenciaron el efecto deletéreo de las altas temperaturas sobre las etapas de desarrollo del periodo esporogónico de *P. berghei* cuando *An. stephensi* fue mantenido a 26 °C, reportando que no fue posible obtener esporozoitos a partir de ooquistes debido a que estos presentaron signos de degeneración. En el presente estudio, a pesar que se obtuvieron esporozoitos de *P. falciparum* en los mosquitos mantenidos a 30 °C, los parásitos presentaron una capacidad reducida de infectividad, la cual podría ser debida al desarrollo anormal en alguna de las etapas del ciclo de vida.

En el presente estudio se evidenció una relación no lineal entre incrementos en la temperatura y la reducción en la duración del período esporogónico. Si se considera que el umbral superior de temperatura reportado para el desarrollo de *P. falciparum* es de 32 °C (Macdonald, 1957) y el efecto deletéreo de 30 °C observado sobre la capacidad infectiva de los esporozoitos, es posible esperar que el rango de temperaturas óptimas para el desarrollo del parásito se encuentre entre 26 y 28 °C.

Si el efecto de la temperatura sobre el periodo esporogónico se presenta también en condiciones naturales, un incremento en la temperatura ambiental, como los que se presentan durante el evento El Niño, acortaría en 2 o 3 días la duración del período de incubación del parásito, haciendo que un mayor número de mosquitos vectores presenten la capacidad de transmitir, lo cual conllevaría una más eficiente transmisión de la enfermedad, contribuyendo de esta manera a explicar el incremento en la incidencia de malaria que se presenta en Colombia durante la ocurrencia del evento El Niño.

11.6 Conclusiones

La temperatura afectó la duración del período esporogónico de *P. falciparum* en *An. stephensi*, su efecto se observó tanto en la formación de ooquistes como en el desarrollo de los esporozoitos. Incrementos en 2 °C (24 a 26 °C) redujeron en 3 días el tiempo requerido para que los esporozoitos invadan las glándulas salivales del mosquito vector. Cuando el cambio en la temperatura fue de 28 a 30 °C, fue similar la duración promedio del período de incubación del parásito.

La capacidad invasiva de esporozoitos a células hepáticas de cultivo celular fue fuertemente reducida cuando los mosquitos fueron mantenidos a 30 °C. Al parecer los incrementos en las temperaturas generaron efectos deletéreos sobre algunas de las etapas del ciclo vital del parásito. Tales anomalías no impidieron la formación de esporozoitos, pero sí afectaron el potencial de invadir hepatocitos.

Si se considera que la relación entre la temperatura y la duración del período esporogónico fue inversamente proporcional y de tipo no lineal, y que los esporozoitos provenientes de mosquitos mantenidos a 30 °C presentaron reducción en el potencial de infectividad, se espera que el rango de temperaturas más favorables para el desarrollo del parásito se encuentra entre 26 y 28 °C. Asumiendo que este mismo comportamiento se presenta en condiciones naturales, se puede suponer que durante la ocurrencia del evento El Niño, los incrementos en la temperatura ambiental reducirían la duración del período de incubación del parásito, generando un mayor número de mosquitos infectantes, capacitados para transmitir la enfermedad.



Capítulo XII: Efecto de la temperatura sobre el tiempo de desarrollo, la supervivencia y la esperanza de vida de *Anopheles Albimanus*

12.1 Introducción

Se ha observado que altas densidades de *An. albimanus*, no siempre se asocian con incrementos en la transmisión de malaria (Bown et al., 1991; PAHO, 1996; Rúa et al., 2003). Las evidencias indican que los cambios en la incidencia de la enfermedad pueden estar relacionados con otros factores entomológicos como: incrementos en la supervivencia del vector (Garrett-Jones, 1964), reducciones en la duración del período de incubación extrínseca del parásito (Macdonald, 1957), o incrementos en la frecuencia de picadura de los vectores, por efecto de una reducción en la duración del ciclo gonotrófico (Detinova, 1962; Molineaux, 1988). Se ha establecido que estas variables entomológicas son especialmente sensibles a cambios en la temperatura ambiental (Macdonald, 1957; Detinova, 1962; Lindsay y Birley, 1996).

En la dinámica de transmisión de malaria, la supervivencia de las poblaciones de vectores es un factor de notable importancia (Dye, 1986), se asocia tanto con la proporción de la población que es potencialmente apta para transmitir el parásito, como con la duración promedio de la vida infectiva de los vectores (Macdonald, 1957). Estos dos elementos son cruciales en el modelo de capacidad vectorial. Este modelo permite tener una aproximación al número esperado de casos de malaria generados a partir de un caso, por una población de mosquitos (Garrett-Jones, 1964). Además, se ha determinado que la producción total de huevos y la estabilidad de la población, también dependen de la tasa de supervivencia de los mosquitos adultos (Reisen y Milby, 1986).

Para la estimación de la supervivencia en las poblaciones de campo se han empleado, principalmente, la tasa de paridad y ensayos de Marcaje-Liberación y Recaptura (Bruce-Chwatt, 1980). Para evaluar la supervivencia utilizando la tasa de paridad se requiere conocer la duración del ciclo gonotrófico (Davidson, 1954), la cual es frecuentemente desconocida (Reisen y Milby, 1986). Ensayos de Marcaje, Liberación y Recaptura demandan la liberación de un amplio número de mosquitos, debido a que los porcentajes de recaptura son usualmente bajos (Reisen y Milby, 1986), con valores incluso de 2.5 % mosquitos recapturados (Dos Santos et al., 2002).

En este estudio se determinó, en condiciones controladas de laboratorio, el efecto de la temperatura sobre el tiempo de desarrollo, la supervivencia y la esperanza de vida de *An. albimanus*, principal vector de malaria en la Costa Pacífica Colombiana (Quiñones et al., 1987). Estas observaciones proporcionan una valiosa información a los modelos predictivos de carácter biológico, que busquen establecer el riesgo de transmisión de malaria por efecto del incremento en la temperatura ambiental. Además, con la información obtenida se pretende explicar el incremento en la transmisión de malaria que se presenta en Colombia durante la ocurrencia de eventos El Niño (Poveda y Rojas, 1997; Bouma et al., 1997; Poveda et al., 2001).

12.2. Objetivos

Objetivo general

Determinar, en condiciones controladas de laboratorio, el efecto de la variación en la temperatura (24, 25.5, 27, 30 y 33 °C) sobre el tiempo de desarrollo, la supervivencia y la esperanza de vida del vector de malaria *An. albimanus*.

Objetivos específicos

- Estimar el efecto de la temperatura sobre el tiempo de desarrollo de pupación (desde larva de primer estadio hasta pupa) y de emergencia (desde larva de primer estadio hasta adulto) del vector *An. albimanus*, en condiciones controladas de laboratorio.
- Estimar el efecto de la temperatura sobre la tasa de supervivencia de la población total (desde larva de primer estadio hasta la muerte del último individuo) y de la población de hembras del vector *An. albimanus*, en condiciones controladas de laboratorio.
- Estimar el efecto de la temperatura sobre la esperanza de vida de la población total (desde larva de primer estadio hasta la muerte del último individuo) y de la población de hembras del vector *An. albimanus*, en condiciones controladas de laboratorio.

12.3 Materiales y Métodos

Mantenimiento de mosquitos: Se emplearon *An. albimanus* de la cepa Cartagena, los cuales se encuentran bien adaptados a las condiciones de laboratorio y fácilmente se obtienen apareamientos y varias oviposuras por generación (Carrillo et al. 1981). Para realizar los experimentos se utilizó una cámara climatizada (WTB Binder KBF 115) que mantiene constantes la temperatura y la humedad relativa (± 0.5 °C y ± 5 % HR). Se evaluaron cinco condiciones de temperatura: 24, 25.5, 27, 30 y 33 °C. Estas temperaturas fueron seleccionadas teniendo en cuenta que cubren un amplio rango de temperaturas registradas en las áreas endémicas de malaria en Colombia, durante periodos El Niño y en condiciones climáticas normales. Además, se ha registrado que la temperatura en los habitats de cría de *An. albimanus* pueden alcanzar temperaturas superiores a 30 °C (Vázquez-Martínez et al., 2002). La humedad relativa (90 % ± 5 %) y el fotoperíodo (12L:12O) se mantuvieron constantes durante todo el estudio.

Los experimentos se iniciaron con larvas de primer instar, las cuales se obtuvieron a partir de huevos que no tuvieron más de 12 horas de haber sido puestos. Se colocaron 100 larvas de primer instar por bandeja de mantenimiento (15 x 27 x 7 cm), para un densidad de 0.25 larvas/cm² por superficie de agua. Las bandejas se colocaron en el interior de la cámara climatizada a las condiciones de temperatura establecida, y se

evaluaron cuatro cohortes de larvas por cada temperatura. Diariamente se registró el número de larvas muertas y se adicionó agua sin cloro a la bandeja hasta ajustar el volumen inicial de 800 ml.

Las larvas se alimentaron con alimento para peces (ColorBits®) en forma similar al esquema de alimentación establecido en «Manual for mosquito rearing and experimental techniques» del American Mosquito Control Association (AMCA, 1970). El esquema de alimentación se presenta en la **TABLA 13.1**.

Diariamente se registró el número de pupas formadas, y se transfirieron a vasos para emergencia, ubicados en el interior de las jaulas de mantenimiento de adultos (20 x 20 x 20 cm). Las pupas de cada día fueron colocadas en un mismo vaso. En cada vaso se anotó la fecha y el número de pupas adicionadas. Se registró cada día el número y sexo de los mosquitos emergidos.

A los mosquitos emergidos se les suministró una solución de glucosa al 10 % (p/v), la cual fue reemplazada cada dos días. Los mosquitos hembra fueron alimentados con sangre de ratón (*Mus musculus*), el cual se colocó diariamente en la jaula de mantenimiento por 30 minutos. Cada día se registró el número y sexo de los mosquitos muertos.

Duración del tiempo de desarrollo: Se evaluó el efecto de la temperatura sobre el tiempo de pupación y de emergencia del mosquito adulto. El tiempo de pupación correspondió al lapso de tiempo desde larva de primer instar hasta la formación de la pupa, y el tiempo de emergencia representó el lapso desde larva de primer instar hasta la obtención del mosquito adulto.

Los tiempos promedio de pupación y de emergencia se calcularon en función de la siguiente ecuación, empleada por Reisen y Siddiqui (1979): $D = [\sum (E \times X)] / N$, donde D es la duración promedio del estado de desarrollo (pupación o emergencia), E es el número de pupas o mosquitos adultos, X es el día en que se observaron las pupas o adultos, y N es el número total de pupas o adultos.

Supervivencia de la población del vector: Se estimó la supervivencia total de la población de mosquitos (desde larva de primer instar hasta la muerte del último mosquito adulto de la cohorte) empleando la ecuación $lx = yx/y_0$; en donde lx es la tasa de supervivencia del vector, yx es el número de mosquitos (larvas, pupas o adultos) vivos cada día, obtenidos por la diferencia entre el número inicial de ejemplares y el número de mosquitos muertos, y y0 representa el número de larvas iniciales.

Relación de las variables evaluadas con la transmisión de malaria: Se estimó el efecto del cambio en la temperatura sobre la supervivencia y la esperanza de vida

de la población de hembras de *An. albimanus*. La supervivencia se evaluó por medio de la ecuación anteriormente planteada, y la esperanza de vida fue calculada por la ecuación $ex = Tx/Lx$, en donde ex es la esperanza de vida, Tx es la sumatoria de Lx y Lx es el número total de días que le restan de vida a los sobrevivientes que han alcanzado la edad x .

Las ecuaciones para estimar la supervivencia y la esperanza de vida, así como la construcción de las curvas respectivas, se basaron en los métodos descritos por Rabinovich (1980) y Service (1993).

Análisis estadístico: Se empleó la prueba Kruskal-Wallis para determinar diferencias estadísticas entre las temperaturas a las cuales fueron evaluados los tiempos de desarrollo de los mosquitos y la esperanza de vida de la población de mosquitos hembras. Se realizaron pruebas de Logrank y Wilcoxon para estimar diferencias en las tasas de supervivencia. Se empleó un análisis de Varianza para estimar diferencias entre las probabilidades de supervivencia de los estados acuáticos de los mosquitos.

12.4. Resultados

Duración del tiempo de desarrollo: El efecto de la temperatura sobre los tiempos de pupación y de emergencia de *An. albimanus* se evaluó en 2004 mosquitos. La relación entre temperatura y los tiempos de desarrollo de los mosquitos se presenta en la Figura 13.1. Se observó una relación directa entre los incrementos en la temperatura, y la disminución el tiempo de desarrollo de *An. albimanus*. Para 24 °C, los tiempos de desarrollo larval y de pupas tuvieron la mayor duración, pero fueron muy similares a los registrados a 25.5 °C. Se registró que el tiempo de pupación y de emergencia del vector a 27 °C fue respectivamente, 10.7 y 11.7 días, los cuales fueron 3 y 4 días menores que los observados para 24 °C. Para 30 y 33 °C el tiempo de pupación fue 9.1 y 8.7 días, respectivamente, mientras que el tiempo de la emergencia del mosquito adulto fue 10.1 y 9.6 días. Se observó diferencia estadísticamente significativa en el tiempo de desarrollo del vector para las diferentes temperaturas evaluadas. Los resultados observados indican que la relación entre la temperatura y el tiempo de desarrollo de *An. albimanus* es de tipo no lineal.

Se calculó el tiempo de duración del estado de pupa a través de la diferencia entre el tiempo de emergencia y el tiempo de pupación. Se observaron diferencias estadísticamente significativas en la duración del estado de pupa para las diferentes temperaturas. Para 24 °C, el estado de pupa tuvo una duración media de 2 días, mientras que para 25.5 °C el estado de pupa tuvo una duración media de 1.2 días. Para las demás temperaturas evaluadas, las pupas necesitaron de tan solo 1 día para pasar al estado de adulto (**FIGURA 13.2**).

Supervivencia de la población del vector: En la **FIGURA 13.3** se presenta el efecto de la temperatura sobre la supervivencia de la población de *An. albimanus*, desde larva de primer estadio hasta la muerte del último mosquito adulto (macho o hembra). Se observó que incrementos en la temperatura disminuyeron el tiempo de supervivencia de la población del vector. La diferencia en las curvas de supervivencia de la población de *An. albimanus* fue estadísticamente significativa. Para 24 °C, la población de *An. albimanus* tuvo una duración máxima de 42 días, 4 y 5 días más que para 25.5 y 27 °C, respectivamente. Para 30 y 33 °C la supervivencia de los mosquitos fue 31 y 20 días, respectivamente.

El efecto de la temperatura sobre el porcentaje de supervivencia por estado de desarrollo se presenta en la **FIGURA 13.4**. Los máximos porcentajes de supervivencia se observaron para 27 °C, con valores de 96.8 % para la pupación y 93.5 % para la emergencia del mosquito adulto. Para 25.5 y 30 °C, fue muy similar el porcentaje de supervivencia por estado de desarrollo, pero diferente a los valores registrados para 24 y 33 °C, temperaturas a las cuales se registraron los mínimos valores del porcentaje de supervivencia para la pupación y la emergencia de *An. albimanus*. El análisis estadístico indicó diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas a las cuales se estimó el porcentaje de supervivencia de los estados acuáticos.

Sobrevivencia y Longevidad de las hembras de *An. albimanus*: Para evaluar el efecto de la temperatura sobre la supervivencia de las hembras de *An. albimanus* se emplearon 669 mosquitos. Las curvas de supervivencia se presenta en la **FIGURA 13.5**. Para 27 °C se observó el máximo tiempo de supervivencia de la población de hembras de *An. albimanus*, el cual fue de 28 días. Para 25.5 y 24 °C, los mosquitos hembra sobrevivieron hasta el día 26, mientras que para 30 y 33 °C la supervivencia fue 22 y 13 días, respectivamente. El análisis de las curvas de supervivencia indicó diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas evaluadas, pero no entre 25.5 y 27 °C. A pesar que a 27 °C las hembras de *An. albimanus* tuvieron un mayor tiempo de vida como adultos, los mosquitos hembra mantenidos a 24 °C presentaron mayor probabilidad de supervivencia que a las demás temperaturas evaluadas. Para 30 y 33 °C se registraron los menores valores de supervivencia.

Se observó que la esperanza de vida de las hembras de *An. albimanus* fue afectada por cambios en la temperatura y fluctuó a través del tiempo (**FIGURA 13.6**). Las curvas de esperanza de vida indicaron que al momento de la emergencia de los mosquitos adultos, las hembras de *An. albimanus*, mantenidas a 24 °C, presentaron una esperanza de vida de 11.5 días, 2 días más que para 25.5 y 27 °C. Mientras que para 30 y 33 °C, la esperanza de vida fue 7.5 y 4.1 días respectivamente. Sin embargo, para el día 15 post emergencia, se observó que las hembras mantenidas a 25.5 °C presentaron mayor esperanza de vida, la cual fue de 7.5 días, mientras que para los *An. albimanus* mantenidos a 24 y 27 °C, la esperanza de vida fue 2 días

menor. Para 30 y 33 °C, la esperanza de vida continuó siendo la que menores valores mostró. A pesar que a 27 °C las hembras de *An. albimanus* mostraron una mayor longevidad, presentando una edad máxima de 28 días, el análisis estadístico indicó que los mosquitos hembra mantenidos a 24 y 25.5 °C presentaron mayores valores promedios de esperanza de vida.

Si el desarrollo de *P. falciparum* es afectado por la temperatura (Macdonald, 1957) y la primera alimentación ocurre en el segundo o tercer día luego de la emergencia (Lounibos et al., 1998), para que se presente transmisión de malaria se requiere que el vector sobreviva al menos 17 días a 24 °C, mientras que a 25.5, 27, 30 y 33 °C el mosquito debe sobrevivir 15, 13, 11 y 10 días respectivamente. Con base en estas consideraciones y en los resultados obtenidos, se puede observar que los mosquitos mantenidos a 27 °C presentaron el mayor potencial de transmisión de la enfermedad, debido a que presentaron mayor tiempo de supervivencia como mosquitos adultos. Los mosquitos mantenidos a 25.5 y 30 °C presentaron similar potencial de transmisión, pero menor que el observado para 27 °C. Para 33 °C, las hembras de *An. albimanus* presentaron la menor capacidad de transmisión.

12.5. Discusión

Los resultados de este estudio muestran el efecto del incremento en la temperatura sobre la disminución en el tiempo del desarrollo de *An. albimanus*. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Maharaj (2004), en donde se estimó, en condiciones simuladas de las estaciones, el efecto de la temperatura sobre las características de la tabla de vida de *An. arabiensis*. Maharaj observó, que con un incremento en cerca de 3 °C (de 23.2 a 26.1 °C), se reducen los tiempos de desarrollo del vector en 7 días. A pesar que las temperaturas evaluadas por Maharaj y las empleadas en este estudio son diferentes, y a que los vectores con los que se trabajó también difieren, en ambos estudios se observó que aumentos en la temperatura disminuyeron los tiempos de pupación y de emergencia.

Resultados similares también han sido registrados por Delgado (1998) y Reisen y coinvestigadores (1982) para *An. aquasalis* y *An. culicifacies*, respectivamente. En ambos estudios se demostró que incrementos en la temperatura generan un rápido desarrollo de los estadios acuáticos. La acentuada relación entre la temperatura y el tiempo de desarrollo observada en el presente estudio y evidenciada por Reisen y coinvestigadores (1982), Delgado (1998) y Maharaj (2004), podría explicarse por el efecto que tiene la temperatura sobre el complejo proceso de la metamorfosis, en donde incrementos en la temperatura aceleran las funciones metabólicas, generando mayor velocidad en la reproducción celular, y originando, en un menor tiempo, la formación de pupas y adultos (Lassiter et al., 1995). Se ha reportado además que incrementos en la temperatura reducen el tiempo de desarrollo embrionario de de

mosquitos como *An. albicans* y *An. aquasalis* (Cardozo Gonçalves et al., 2002).

Los resultados de este estudio indicaron que 27 °C fue la temperatura óptima para la supervivencia de los estadios acuáticos de *An. albicans*. Estos resultados son semejantes a los reportados Reisen y coinvestigadores (1982), en donde estimó el efecto de la temperatura (18, 28 y 34 °C) sobre el tiempo de pupación y emergencia de *An. culicifacies*, observando que a 28 °C se obtuvo la mayor supervivencia de los mosquitos adultos. Sin embargo, los porcentajes de supervivencia reportados por Reisen y coinvestigadores son inferiores a los registrados en el presente estudio. Tal diferencia podría ser explicada con base en que los experimentos fueron realizados con especies diferentes, lo que genera que el porcentaje de supervivencia de los estadios acuáticos también sea diferente.

En la **TABLA 13.2** se presenta la supervivencia de los estadios acuáticos para diferentes especies de vectores de malaria. Se puede observar que *An. albicans* presenta porcentajes de supervivencia superiores al 90 %, tal como fue registrado en este estudio y presentado por Mahmood (1997). Para otras especies de vectores de malaria, el porcentaje de supervivencia de pupación y emergencia fue inferior a los reportados para *An. albicans*. Los bajos valores de supervivencia de las etapas acuáticas de *An. culicifacies* (Reisen et al., 1982), *An. stephensi* (Reisen y Mahmood, 1980) y *An. gambiae* (Edillo et al., 2004), comparados con los registrados para *An. albicans*, con la consecuente mayor generación de mosquitos adultos, sugieren que en la dinámica de transmisión de malaria por *An. albicans*, las altas densidades de este vector podrían jugar un papel más importante que para otros mosquitos vectores. Lo anterior se encuentra de acuerdo con lo propuesto por Faran (1980), quien sugiere que en la transmisión de malaria por *An. albicans* se requiere de altas densidades del vector. Además, se ha reportado que la supervivencia de los estados inmaduros determina la cantidad de mosquitos adultos en una determinada región (Bayon y Lindsay, 2004).

Si se comparan los valores de supervivencia de los estadios acuáticos de *An. albicans* presentados por Grieco y coinvestigadores (2003) (**TABLA 13.2**), con los obtenidos en el presente estudio para 27 °C, se puede observar que en ambos estudios, los porcentajes de supervivencia son semejantes. Sin embargo, si la comparación se realiza con los datos obtenidos a 30 °C, se observa diferencia en la supervivencia, siendo mayores los valores obtenidos por Grieco y coinvestigadores (2003). Esta diferencia podría ser debida a que en el presente estudio fueron realizados a una temperatura constante de 30 °C, mientras que en los experimentos de Grieco y coinvestigadores la temperatura fluctuó entre 28 y 32 °C. Si estos resultados se presentan en la naturaleza, se debe tener en cuenta que en las condiciones climáticas de la cálida región tropical, temperaturas de 30 °C o superiores, se presentan en los sitios de cría por un corto lapso de tiempo, por lo cual, es crucial que las larvas que ocupan estos hábitats, expuestas a la intensa radiación solar, puedan sobrevivir a

la exposición de temperaturas extremas. Se ha documentado que los principales mecanismos empleados por las larvas para evitar las altas temperaturas son el desplazamiento a zonas con sombra (Foley et al., 2002) o a partes inferiores de la columna de agua (Haufe y Burgess, 1956).

En este estudio se observó que las curvas de supervivencia de la población de *An. albimanus*, desde larvas hasta la muerte del último adulto, fueron afectadas por la temperatura. Resultados similares han sido documentados para el vector *An. arabiensis* (Maharaj, 2004), el cual a 23 y 26 °C, logró sobrevivir hasta el día 54 y 52 respectivamente. Estos valores son superiores a los registrados para la población de *An. albimanus*, en la cual se observaron valores de supervivencia de 42, 38 y 37 días para 24, 25.5 y 27 °C, respectivamente.

En forma similar a lo observado para la población total de *An. albimanus*, la supervivencia de las hembras fue afectada por la temperatura. Sin embargo, los valores reportados en este estudio difieren de los presentados por Mahmood (1997) y Grieco y coinvestigadores (2003). En ambas investigaciones, la supervivencia de las hembras de *An. albimanus* fue superior a la registrada en el presente estudio. Tal diferencia podría explicarse por diferentes razones como: el empleo de cepas diferentes, distintos esquemas de alimentación, diferencia en el tiempo de colonización de los mosquitos o el empleo de temperaturas fluctuantes en los estudios de Mahmood (1997) y de Grieco y coinvestigadores (2003).

La esperanza de vida de la población de hembras de *An. albimanus* fue afectada por la temperatura. Similares resultados han sido reportados para *An. arabiensis* (Maharaj, 2004), en donde se observó que las hembras mantenidas a bajas temperaturas (17 °C) presentaron una esperanza de vida de 43 días, la cual fue 22 días mayor que la registrada a 26 °C. La esperanza de vida de las hembras de *An. arabiensis* recién emergidas fue mayor que la observada para *An. albimanus*, tanto en el presente estudio, como en los experimentos realizados por Mahmood (1997) y Grieco y coinvestigadores (2003). La diferencia en la esperanza de vida entre *An. arabiensis* y *An. albimanus* puede ser debida a características propias de cada especie.

Estudios previos realizados con *An. culicifacies* y *An. stephensi* (Reisen y Mahmood, 1980) también han mostrado bajos valores de esperanza de vida de la población de hembras al momento de emerger. Es necesario considerar que la esperanza de vida es fluctuante en el tiempo, que varía en función del tiempo de vida del organismo (Rabinovich, 1978) y que es independiente de la edad del mosquito (Macdonald, 1952). Lo anterior sugiere que a pesar de que la esperanza de vida al momento de emerger es un parámetro importante, no se puede ignorar que el tiempo total de vida que presenta el vector, es un componente primordial en la estimación de las curvas de supervivencia y esperanza de vida. Tal caso es observado en el presente estudio, en donde a 24 °C se observó la mayor esperanza de vida de hembras de *An.*

albimanus recién emergidas, pero fue a 27 °C, la temperatura a la cual se observó el mayor tiempo de vida del vector.

La reducción en el tiempo de desarrollo y en la probabilidad de supervivencia de *An. albimanus* por efecto de un incremento en la temperatura, tal como fue observado en este estudio, es una constante biológica en organismos heterotermos como los mosquitos (Service, 1993). Este efecto podría ser explicado por el aumento en la velocidad enzimática y en la actividad fisiológica, lo cual genera un incremento en la reproducción celular y un acortamiento en el tiempo de vida del organismo. Además, en organismos como los mosquitos, la relación entre la temperatura y algunas características biológicas como la supervivencia y la esperanza de vida, no es de tipo lineal, tal como fue observado en este estudio y registrado también por Bayon y Lindsay (2004), lo que indica la existencia de un valor óptimo de temperatura en la cual se llevan a cabo las funciones metabólicas.

Los máximos valores de supervivencia de los estadios acuáticos, así como la esperanza de vida y supervivencia de la población de hembras de *An. albimanus*, sugieren que el valor óptimo para el desarrollo y supervivencia de esta especie puede estar entre 25.5 y 27 °C. Si se extrapolan estas observaciones a las condiciones de campo, se podría esperar que durante períodos de incremento en la temperatura ambiental, como los que se presentan durante el evento El Niño, los mosquitos que se originen a temperaturas alrededor de 27 °C, tendrían mayor potencial para transmitir la enfermedad. Sin embargo, no se puede desconocer que en la dinámica de transmisión de malaria existen otros factores como la duración del ciclo gonotrófico y del período de incubación extrínseco del parásito, los cuales también son sensibles a incrementos en la temperatura (Macdonald, 1957; Detinova, 1962; Rúa et al., 2005), y que podrían contribuir con el incremento en la incidencia de malaria que se observa en Colombia durante el evento El Niño.

12.6 Conclusiones

La temperatura afectó el tiempo de desarrollo de *An. albimanus*, su efecto se observó tanto en la pupación como en la emergencia de los mosquitos adultos. Incrementos en 3 °C (24 a 27 °C) redujeron en 4 días el tiempo de emergencia, mientras que de 27 a 30 °C y de 30 a 33 °C, la reducción fue 1.5 y 0.5 días, respectivamente. Estos resultados indican que la relación entre el tiempo de desarrollo del vector y la temperatura es de tipo no lineal. Sugiriendo que al interior del rango de temperaturas evaluadas, se presenta un valor de temperatura a la cual el vector alcanza su desarrollo en un menor tiempo. El rango de temperatura a la cual puede presentarse el desarrollo de *An. albimanus* en un menor tiempo se encuentra comprendido entre 27 y 30 °C.

La temperatura afectó el porcentaje de supervivencia por estado de desarrollo. Dentro del rango de temperaturas evaluadas, a 27 °C se observó el mayor porcentaje de supervivencia de pupación y de emergencia de mosquitos adultos, sugiriendo una relación de tipo Gaussiana entre la temperatura y la supervivencia por estado de desarrollo.

Incrementos en la temperatura afectaron la tasa de supervivencia de la población total (desde larva hasta la muerte del último individuo). Sin embargo, cuando se analizó solo la supervivencia de la población de hembras se observó que a 27 °C, los mosquitos hembras tuvieron una mayor supervivencia y esperanza de vida.

Si se considera que el período de incubación extrínseco de los parásitos de malaria es reducido por incrementos en la temperatura (Macdonald, 1957; Capítulo VI del presente documento), y a 27 °C se observó el mayor porcentaje de supervivencia por estado de desarrollo y la mayor longevidad de las hembras de *An. albimanus*, se podría esperar que a temperaturas ambientales de 27 °C, se presentaran las condiciones climáticas más favorables para la dinámica de transmisión de malaria.



Capítulo XIII: Relación entre el tamaño de las alas de *Anopheles Albimanus* y la paridad, supervivencia y temperatura, y su posible asociación con el evento climático “El Niño”

Asociación del tamaño de Anopheles con la transmisión de malaria

En la dinámica de transmisión de malaria se ha propuesto que los mosquitos con mayor talla corporal presentan un mayor potencial de transmisión de la enfermedad. Cuando los mosquitos son de mayor tamaño, pueden realizar ingestas con mayor volumen sanguíneo (Nasci, 1986), proporcionando la posibilidad de ingerir o transmitir un mayor número de parásitos, lo cual los capacita para presentar una mayor competencia vectorial (Lyimo and Koella 1992).

La longitud de las alas de los mosquitos se han utilizado para estimar el tamaño del cuerpo debido a que es un carácter relativamente fijo y fácil de medir (Gleiser, Urrutia, and Gorla, 2000). En *An. quadrimaculatus* la longitud del ala y el peso del cuerpo están relacionados, aunque las relaciones alométricas entre estas variables cambian cuando se emplean diferentes fotoperíodos y temperaturas (Lanciani, 1992; Lanciani and Le, 1995). Igualmente, el tamaño de los mosquitos adultos es una manifestación física de la calidad del hábitat larval (Nasci & Mitchell, 1994). También, se ha encontrado poca variación en el tamaño del cuerpo en *Coquilletidia perturbans* y un débil sesgo, significativamente negativo, en la distribución de la longitud del ala en mosquitos que se crían en hábitats permanentes donde la depredación es el factor principal para controlar el tamaño de la población (Nasci, et al., 1996).

Se ha demostrado que los mosquitos con mayor talla pueden tener una mayor longevidad, aumentando así su capacidad para transmitir la enfermedad. Además, los *Anopheles* con mayor tamaño corporal poseen alas más grandes, lo cual puede facilitar el desplazamiento y la frecuencia de contactos con los humanos, favoreciendo el potencial de transmisión de estos mosquitos. Las asociaciones observadas entre el tamaño corporal y algunas variables entomológicas de la transmisión de malaria, han permitido establecer que el tamaño del vector presenta significancia epidemiológica (Nasci et al., 1996).

El mejor indicador del tamaño corporal del mosquito es el peso seco (Harvey and Pagel, 1991). Sin embargo, el peso de un mosquito adulto varía si ha realizado o no una ingesta sanguínea. Para solucionar este inconveniente y debido a que se ha observado una relación estadísticamente significativa entre el peso corporal y el tamaño del ala (Koella and Lyimo 1996), algunos investigadores han empleado la longitud del ala como un indicador del tamaño del cuerpo.

La longevidad es uno de los parámetros críticos en la capacidad vectorial debido a que hembras más longevas tienen mayor probabilidad de infectarse con el parásito que hembras nulíparas más jóvenes (Detinova, 1962, y Ungureanu, 1974). En diferentes especies de mosquitos se han determinado correlaciones estadísticamente significativas entre la paridad y supervivencia con el tamaño del ala del mosquito

(Haramis, 1983, Hawley 1985, Nasci 1986).

Se han realizado estudios de paridad para describir la estructura de edad y así determinar las tasas de supervivencia de poblaciones de campo. Es así, como poblaciones de *Anopheles* con grandes proporciones de hembras paridas tienen una alta capacidad vectorial (Davidson, 1954; Macdonald, 1957). En *An. crucians*, mosquito que naturalmente se infecta con virus de la encefalitis equina venezolana (Chamberlain et al., 1969), se observó que la tasa de paridad era significativamente mayor en los mosquitos de alas grandes (Nasci, 1987, Hu et al., 1993). Similares resultados se han observado en *An. maculatus*, vector de malaria en Malasia (Kittayapong et al., 1992) y en *An. gambiae* s.l., principal vector de malaria en África (Lyimo and Takken 1993).

Nasci, 1987 reporta que los mosquitos de mayor ala podrían ser buenos indicadores de una mayor tasa de supervivencia o de un mayor éxito en la toma de alimento sanguíneo. De esta forma, el tamaño del ala puede representar una indicación de la capacidad vectorial de las poblaciones de mosquitos.

Se ha registrado que el número de huevos producido por un mosquito hembra está relacionado con su tamaño corporal (Bock and Milbi, 1981). En estudios entomológicos de campo se ha observado que mosquitos con alas grandes o cuerpos pesados presentan un mayor éxito reproductivo que los mosquitos pequeños (Hawley, 1985; Lounibos et al., 1990). Y en condiciones de laboratorio se ha demostrado una correlación positiva entre el tamaño de la hembra de *Anopheles* y su fecundidad (Briegel, 1990) y que hembras pequeñas, pueden requerir de más de una ingesta sanguínea para desarrollar sus huevos (Reisen, 1975). Los anteriores resultados indican que los mosquitos de mayor talla corporal pueden albergar y desarrollar mayor cantidad de huevos, producto de la mayor cantidad de sangre ingerida. Mosquitos con grandes tasas de fecundidad generan una mayor cantidad de mosquitos, lo cual puede influir en la densidad vectorial.

Con base en las relaciones observadas entre el tamaño de ala de los mosquitos y las variables entomológicas de la transmisión de malaria, es posible que durante la ocurrencia del evento El Niño en Colombia, el mayor número de casos observados sea debido a que la población de vectores presente un mejor potencial de transmisión de la enfermedad, probablemente por una mayor longevidad, la que se vería reflejada en un mayor tamaño corporal.

En este estudio se estableció si temperaturas similares a las que se presentan durante el evento climático de El Niño podrían afectar el tamaño de las alas, la supervivencia y la paridad de *An. albimanus* en condiciones de laboratorio y en mosquitos colectados en el campo.

13.2. Hipótesis

Se propone como hipótesis que existe una asociación entre el tamaño de las alas de los mosquitos y su longevidad.

El incremento de temperatura durante el periodo de El Niño, podría favorecer a estos mosquitos más longevos, y por lo tanto, con mayor capacidad de transmitir malaria.

13.3. Objetivos

Objetivo general

Determinar la variación en el tamaño de las alas de *Anopheles albimanus* con relación a paridad, supervivencia y cambios en la temperatura ambiental en condiciones de laboratorio y de campo.

Objetivos específicos

Determinar asociaciones entre el tamaño de alas de *An. albimanus* con paridad y supervivencia.

Determinar el efecto de la temperatura sobre el tamaño de las alas de *An. albimanus* en condiciones controladas de laboratorio.

Determinar el efecto de la temperatura ambiental en el municipio de Nuquí (Costa Pacífica) sobre el tamaño de las alas de *An. albimanus*.

13.4. Materiales y Métodos

13.4.1. Registros de temperatura

Para establecer las asociaciones entre el tamaño de las alas de *An. albimanus* y la temperatura ambiental se obtuvieron los registros diarios de temperatura desde 1997 hasta el 2003 de la estación climática El Amargal, del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), situada a 25 Km. de Nuquí (**FIGURA 14.1**), así como los registros de temperatura superficial del mar (TSM) suministrada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en su página Web (<http://www.noaa.gov>).

El estudio cubrió los dos últimos meses del periodo El Niño del 1997-1998, el cual comprendió el lapso de tiempo transcurrido entre marzo y mayo de 1998; un periodo climático La Niña, el cual se presentó de junio de 1998 a diciembre de 2000; un periodo de condiciones climáticas normales, de enero de 2001 a abril de 2002 y un segundo período climático El Niño, el cual fue muy leve, entre mayo de 2002 a abril de 2003 (**FIGURA 14.2**).

13.4.2. Estimación del efecto de la temperatura ambiental sobre el tamaño de las alas de *An. albimanus* en condiciones de campo.

Se seleccionaron dos localidades para realizar las capturas de *An. albimanus*, la cabecera municipal de Nuquí (Chocó) y su corregimiento Panguí, ubicado a 5 Km. de Nuquí. Las coordenadas geográficas son 5° 42' 25" latitud norte, 77° 15' 57" longitud oeste y 5° 39' 51" latitud norte, 77° 18' 24" longitud oeste. Tanto Nuquí como Panguí están enmarcados entre la Serranía del Baudó y el Océano Pacífico (**FIGURA 14.3**). De acuerdo a la clasificación de Holdridge, estas regiones corresponden a bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (Espinal, 1991). Presentan una precipitación anual entre 5.000 y 7.000 mm, temperatura promedio de 25 a 27 °C y humedad relativa media del 91 % (IDEAM, comunicación personal). A 25 Km. de Nuquí se ubica la estación meteorológica El Amargal, la cual genera para el Instituto de IDEAM la información diaria de temperatura, humedad relativa y precipitación.

Las capturas de mosquitos se realizaron con atrayente humano, con personas nativas de las localidades, a las cuales se les informó del riesgo que presenta este método de captura de mosquitos. Se les presentó los objetivos del estudio y se firmó un consentimiento informado.

Los muestreos entomológicos se realizaron mensualmente desde abril de 1998 hasta abril de 2003. En cada localidad se realizaron capturas durante cuatro días consecutivos cada mes, para lo cual se seleccionaron cuatro viviendas en las que se colectaron los mosquitos. Las viviendas fueron seleccionadas con base en la cercanía a sitios de cría o que en ellas, alguno de sus habitantes, hubieran tenido malaria en el último año. Los mosquitos fueron colectados en el peridomicilio y en el intradomicilio, entre las 18:00 y las 21:00 horas. Durante las horas de captura se realizaron mediciones de la temperatura ambiental y de la humedad relativa. Los mosquitos capturados fueron almacenados teniendo en cuenta la hora y el sitio de colección.

El día siguiente a la captura, se disectaron los mosquitos para estimar el índice de paridad y se almacenaron cabeza y tórax en cajas plásticas con silica gel para medir posteriormente las alas. El índice de paridad es una forma gruesa de estimar la edad fisiológica (longevidad) de la población de mosquitos. La paridad se estableció siguiendo el método de Detinova (1962), que consiste en extraer los ovarios y determinar si las traqueolas que recubren los ovarios se encuentran distendidas o colapsadas. Ovarios con traqueolas colapsadas corresponden a hembras que no han realizado oviposturas (hembras jóvenes o nulíparas), mientras que ovarios con traqueolas distendidas, corresponden a hembras paridas. El índice de paridad se estimó para establecer su asociación con el tamaño de las alas del mosquito.

A los mosquitos colectados en el campo se les retiró el ala derecha, con la ayuda de estiletes y pinzas, teniendo cuidado de no deteriorar la parte basal de las alas. Las alas fueron montadas en láminas portaobjetos y se fijaron a la placa con Colbón® diluido. Posteriormente se cubrieron con una laminilla y se dejaron como placas de montajes permanentes.

Las alas se midieron con la ayuda de un estereomicroscopio Nikon® modelo SMZ-U con zoom de 0.75 a 7.5X, objetivo de 1X y oculares de 10X. A uno de ellos se le acopló una reglilla calibrada con 100 divisiones para hacer las respectivas mediciones. La unidad de medida utilizada fue milímetros y la resolución de 0.01 mm. El ala se midió desde la incisión axilar hasta la margen apical, excluyendo las escamas del borde (Haramis, 1983).

13.4.3. Estimación del efecto de la temperatura sobre el tamaño de las alas de *An. albimanus* en condiciones de laboratorio.

Se utilizó una cámara climatizada (KFB 720) que controla las condiciones de temperatura y humedad relativa. Se emplearon cuatro condiciones de temperatura: 24, 27, 30 y 33 °C para estimar el efecto de la temperatura sobre el tamaño de las alas de *An. albimanus*. Estas temperaturas fueron seleccionadas con base en los registros del IDEAM de la estación climática El Amargal (25 Km. cercana a Nuquí) y en los registros de temperatura en los sitios de cría de *An. albimanus* en Nuquí y Panguí, obtenidos en las salidas entomológicas de campo. Para las diferentes evaluaciones, la humedad relativa fue siempre del 90 % (5 %) y el fotoperíodo 12:12 luz, oscuridad.

Las evaluaciones se realizaron con *An. albimanus* cepa Cartagena, proporcionada por el Instituto Nacional de Salud la que esta adaptada a las condiciones de laboratorio desde 1983. Los experimentos se realizaron en el laboratorio de Entomología del Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales (PECET) de la Universidad de Antioquia ubicado en la ciudad de Medellín.

Para evaluar cada temperatura, se colocaron en el interior de la cámara cuatro cohortes de larvas de primer estadio de *An. albimanus*, cada una con 100 individuos. Las larvas fueron alimentadas con Tetramin® pulverizado y pasado por un cedazo con un ojo de malla de 0.5 mm. siguiendo El esquema de alimentación diario de las larvas fue el siguiente: recién emergidas 0,05 mg/larva, día 1 y 2 = 0.1 mg/larva, día 3 = 0.2 mg/larva, día 4 y 5 = 0,25 mg/larva, día 6 a 10 = 0.4 mg/larva y más de 10 días 0.6 mg/larva (Gerberg, 1970).

Una vez que las larvas adquirieron el estado de pupa, fueron separadas en recipientes

plásticos, los cuales se agruparon de acuerdo al día de pupación. Al emerger el adulto se determinó el sexo y se pasó a cajas plásticas de mantenimiento de 30 x 30 x 30 cm. A los mosquitos adultos se les suministró una solución de glucosa al 10% (p/v), la cual fue cambiada cada dos días. A las hembras de *An. albimanus* se les suministró para su ingesta de sangre un ratón (*Mus musculus*) de laboratorio durante 30 minutos cada dos días; para ello el ratón fue inmovilizado e introducido en la caja de mosquitos para que las hembras tomaran sangre directamente. Diariamente se registró el número y sexo de los mosquitos adultos que se fueron muriendo.

Para cada temperatura establecida, sólo se registró el tamaño de las alas en los mosquitos hembra. Una vez muertas las hembra de *An. albimanus*, se almacenaron en recipientes adecuados para su posterior estudio. Posteriormente, se les retiró el ala derecha, y se determinó el tamaño de las alas empleando la misma metodología que para los mosquitos colectados en el campo.

13.4.4. Análisis de datos

La precisión es la cercanía entre las medidas repetidas del mismo objeto proporcionando información sobre el error experimental ligado a la toma de mediciones, lo cual podría generar falsas diferencias entre los grupos comparados. La medición de precisión se calculó como el promedio de las diferencias absolutas entre cada medición. Entre más cercano esté el promedio de cero, mayor será la precisión. La exactitud es la cercanía de un dato medido en su verdadero valor. No hay regla definida por demostración matemática, pero se sugiere lo siguiente: el número de pasos de unidades desde la más pequeña a la más grande de las medidas debería estar comprendido entre 30 y 300.

Para generar mayor precisión y exactitud en el registro del tamaño de las alas del mosquito, se siguió la metodología propuesta por Dujardin (2000), para lo cual el 5 % de las alas medidas se registró por segunda vez, estableciendo el error experimental en el registro del tamaño de las alas del mosquito.

En todos los grupos de datos se estimó si ellos pertenecían o no a una distribución normal y posteriormente se empleó para el caso de comparación de dos muestra la prueba estadística t Student y para analizar más de dos grupos, la prueba de ANOVA de medidas repetidas para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas evaluadas. El nivel de significación fue del 95.0 % y se utilizó el programa estadístico Prisma®, versión 4.2.

13.5. Resultados

13.5.1. Condiciones de temperatura durante el período de estudio.

La zona El Niño 1+2 con la cual se realizaron los análisis de temperatura se encuentra ubicada más cerca de la plataforma continental de Sur América y los calentamientos del agua en la superficie del mar son los que más influencia tengan en los cambios en temperatura ambiental, precipitación y humedad relativa que se presentan durante los diferentes periodos climáticos ocurridos en el transcurso del estudio.

Se compararon los promedios de la temperatura superficial del mar para los cuatro eventos climáticos que se presentaron durante el periodo de estudio. El análisis mostró que el promedio de temperatura durante El Niño de 97-98 presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.001$) con los otros tres periodos climáticos analizados; no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los promedios de temperatura entre los periodos La Niña (junio de 1998 a diciembre de 2000), el periodo Normales (enero de 2001 a abril de 2002) y el segundo periodo de El Niño (mayo de 2002 a abril de 2003) (**FIGURA 14.4**).

La estación meteorológica de El Amargal posee registros de precipitación desde 1993 y de temperatura y humedad relativa desde noviembre de 1997. Durante el evento El Niño de 1997 a 1998 se observó una disminución en la precipitación (**FIGURA 14.5**).

13.5.2. Medición del tamaño de las alas de *Anopheles albimanus*

En las evaluaciones del tamaño de las alas de *An. albimanus* criado en el laboratorio se estudiaron con 405 individuos que llegaron al estadio adulto. En los experimentos de 24, 27, 30 y 33 °C se midieron 74, 160, 103 y 68 alas, respectivamente.

En el campo se colectaron un total de 5925 mosquitos durante los cinco años de estudio. Del total de mosquitos se montaron en placas permanentes para su medición 5088 (85.87%) alas, 1382 de Nuquí y 3706 de Panguí. Las alas que presentaron algún tipo de mutilación ya fuera apical o basal se descartaron para la medición.

13.5.3. Evaluaciones de laboratorio

Precisión y exactitud

Se midieron por segunda vez 254 alas que correspondían al 5% del total de las alas y se encontró que la precisión fue de 0.00972, precisiones con tendencia a cero es el 100% de precisión siendo la exactitud del 3.12 %.

Tamaños de las alas

Se observó un mayor tamaño medio de las alas en los *An. albimanus* criados en el laboratorio a 24 °C y 27 °C, los cuales presentaron diferencias estadísticamente significativas con respecto a los mosquitos criados a 30 °C y 33 °C. No se encontró una diferencia significativa entre 24 y 27 °C (**FIGURA 14.6**).

Se encontró una correlación significativa entre tamaño de ala y el número de días que sobrevivieron los mosquitos, en los experimentos de laboratorio. Los mosquitos que sobrevivieron un mayor número de días tuvieron alas más grandes que los individuos que murieron pocos días después de la emergencia ($r^2= 0.06719$; $p<0.0472$) (**FIGURA 14.7**).

13.5.4. Capturas de campo

Los mosquitos muestreados mensualmente se reunieron en grupos de acuerdo al periodo climático en el cual fueron capturados: a) El Niño 1997–1998, periodo comprendido entre mayo de 1997 y mayo de 1998, b) La Niña 1998–2000, entre junio de 1998 a diciembre de 2000, c) Normal 2001–2002, entre enero de 2001 a abril de 2002 y d) El Niño 2002–2003 se consideró como un periodo de El Niño leve y comprendió desde mayo de 2002 a abril de 2003 (G. Poveda, comunicación personal).

En la población de *An. albimanus* de Nuquí se observó que los mosquitos colectados durante el periodo El Niño 02–03 presentaron un tamaño medio de ala mayor al de los otros periodos climáticos (**FIGURA 14.8**) observándose diferencias estadísticamente significativas entre los periodos de El Niño 97–98 y Normal 01–02 pero no con el del periodo La Niña 98–00. En el periodo comprendido entre Normal 03–05 se observó que el tamaño promedio del ala de los mosquitos capturados fue de 2.98 ± 0.1707 y no presenta diferencias estadísticamente significativas con respecto a los periodos del El Niño 97–98 y Normal 01–02.

En la población de *An. albimanus* de Panguí se observa un tamaño medio de ala mayor en el periodo El Niño 97–98 y no se observan diferencias estadísticamente del tamaño de las alas entre ninguno de los periodos climáticos estudiados (**FIGURA 14.9**). La variación en el tamaño promedio de las alas en esta población es de 0.02

mm durante el periodo de estudio. En el periodo comprendido entre Normal 03-05 se observó que el tamaño promedio del ala de los mosquitos capturados fue de 2.97 ± 0.1656 y no presenta diferencias estadísticamente significativas con respecto a los diferentes periodos estudiados.

Al analizar el tamaño de las alas de la población de *Anopheles albimanus* capturadas en Nuquí y Panguí, se observó una diferencia estadísticamente significativas ($p < 0.0001$) entre las dos poblaciones de mosquitos, presentado un tamaño medio de ala menor en Panguí (**FIGURA 14.10**). Al hacer el análisis del tamaño del ala para los mosquitos capturados en el periodo de Normal 03-05 se observó que el tamaño del ala de los mosquitos capturado en Nuquí no presenta diferencias estadísticamente significativas a diferencia de los periodos anteriores en los que si se observaron diferencias.

El mayor tamaño del ala se observó en agosto de 2004 (3.04 ± 0.168) en la localidad de Panguí y para Nuquí el mayor tamaño de ala se presentó en el mes de septiembre de 2004 (3.11 ± 0.154).

13.5.5. Paridad vs tamaño de alas

Del 9 de junio al 5 de julio de 2003 se realizaron capturas diarias de *An. albimanus* con el fin de establecer si había algún tipo de asociación entre el tamaño de las alas y el estado de paridad. Durante este período se colectaron un total de 846 mosquitos y de estos 769 (90.89%) fueron montados en placas permanentes para la medición de las alas. Del total de *An. albimanus* disectados se encontró que 399 (51.88%) eran hembras nulíparas y 370 (48.11%) paridas.

Al analizar los datos mediante una prueba T Student no pareada, se encontró una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.0148$) entre el tamaño de las alas de las hembras nulíparas y las paridas (**FIGURA 14.11**).

En el periodo Normal 03-05 se estudiaron durante 5 meses que relación existía entre el tamaño del ala y la paridad y se observó que no había una correlación entre el tamaño del ala y el estado de paridad, es decir el tamaño de las hembras paridas no presenta diferencias estadísticamente significativas con el tamaño del ala de las hembras nulíparas. Esto es diferente a lo estudiado en julio de 2003 donde se encontró que si existía diferencias entre el tamaño del ala de las hembras paridas comparado con las nulíparas.

13.6. Discusión

En este trabajo se planteó la hipótesis que la existencia de una asociación entre tamaño de las alas y la longevidad de los mosquitos, y que el incremento de temperatura durante El Niño, podría favorecer estos mosquitos más longevos, y por lo tanto con mayor capacidad de transmitir malaria. Desde el punto de vista entomológico la validación de esta hipótesis podría ayudar a explicar el incremento de la transmisión de malaria durante El Niño. Algunos resultados obtenidos en este trabajo sustentan la hipótesis, mientras que otros resultados no la apoyan.

Los resultados a favor de la hipótesis muestran que las hembras paridas colectadas en el campo tuvieron un mayor tamaño promedio de las alas. Esta diferencia entre tamaño de alas de las hembras nulíparas y paridas se puede explicar por selección de las hembras pequeñas. Al parecer, hembras de mayor tamaño tienen mayor posibilidad de buscar un huésped y tomar una ingesta de sangre suficiente para producir y llevar a término los huevos, ocurriendo lo contrario para las hembras de alas pequeñas. Igualmente, los mosquitos criados en el laboratorio que presentaron mayor tamaño promedio de las alas fueron más longevos. Hallazgos similares fueron reportados por Nasci et al., 1996, Hu et al., 1993 y Kitthawee et al., 1992, los que encontraron que hembras paridas colectadas en el campo fueron de mayor tamaño que las nulíparas; igualmente, observaron una correlación entre paridad y longevidad en *Anopheles dirus*, *Anopheles atropos*, *Anopheles crucians* y *Culex tarsalis*.

No hay un consenso sobre como influye la temperatura en el tamaño de las alas de los mosquitos. Alto y Steven (2001) no encontraron diferencias significativas entre el tamaño de las alas de *Aedes albopictus* criado a 22, 24 y 26°C; Tun-Lin et al., (2000) evaluaron el tamaño de las alas de *Ae. aegypti* criado a 10, 15, 20, 25, 30 y 35 °C y encontraron que a menor temperatura se desarrollaron mosquitos con alas de mayor tamaño estableciendo que el rango óptimo de supervivencia de esta especie estaba entre 20 y 30 °C. Hribar, (1997) encontró que *An. albimanus* criado a 22 y 30 °C presentaba mayor tamaño de las alas a 22 °C, pero sin evaluar las temperaturas intermedias que pudieran dar mayor información. Aunque hay una tendencia a encontrar insectos y en general organismos más grandes a bajas temperaturas, ello no se cumple para todas las especies.

El tamaño promedio de las alas de los mosquitos capturados en el campo no presentó ningún tipo de asociación con las temperatura de los diferentes periodos climáticos. Estos resultados no confirman la hipótesis planteada en este trabajo, de la presencia de mosquitos *An. albimanus* de mayor tamaño durante El Niño. Es posible que la relación entre temperatura y tamaño de las alas en condiciones de campo no se haya observado debido al tamaño de la muestra tomada, puesto que el estudio se inició en abril de 1998, razón por la cual solamente se colectaron ejemplares de *An. albimanus* durante los dos últimos meses del evento El Niño 97-

98. El número de mosquitos colectados en este periodo fue solo en 3.9 % del total colectado durante el estudio. Igualmente, se esperaba que el evento climático que se dio entre mayo de 2002 a abril de 2003 hubiera sido un evento de El Niño fuerte, pero éste no alcanzó la magnitud esperada.

La diferencia en tamaño de las alas encontrada entre las poblaciones de Nuquí y Panguí presentó diferencias estadísticamente significativas. En condiciones naturales el tamaño de un individuo está determinado por caracteres genéticos y ambientales. Es poco probable que la variación en el tamaño de las alas de estas poblaciones se deba a factores genéticos, puesto que no hay barreras geográficas ni espaciales para que estas dos poblaciones se consideren aisladas. Es más probable que la diferencia se deba a causas ambientales. Nasci (1986) sugiere que factores ambientales afectan diferentemente el desarrollo de los mosquitos, produciendo adultos de diferentes tamaños. Esta variabilidad posiblemente podría ser explicada por la diferencia en el tipo de criaderos encontrados en cada localidad. En Panguí la mayoría de los criaderos son permanentes, es decir, que presentan agua y estadios inmaduros de *An. albimanus* durante todo el año. En contraste, en Nuquí la mayoría de los criaderos son temporales, es decir tienen un periodo de permanencia no superior a 2 meses. La dinámica de las poblaciones en criaderos temporales podría ser diferente permitiendo el desarrollo de una amplia variedad de fenotipos. En los criaderos permanentes pudiera presentarse una mayor variedad de interrelaciones entre las poblaciones, permitiendo la supervivencia de solo aquellos individuos con características específicas, lo que limitaría así la variación intraespecífica.

Cabe preguntarse cuál puede ser el efecto de El Niño con el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación, sobre las variables bióticas y abióticas de los criaderos. Se ha estudiado cómo influyen las variables fisicoquímicas del agua, la presencia de plantas, el tamaño del criadero, el tipo de sustrato del piso del criadero, la profundidad, la radiación solar sobre la presencia o ausencia de larvas de mosquito (Savage, et al., 1990; Rodriguez, et al., 1993; Minakawa, et al., 1999; Oo, et al., 2002; Berti, et al., 1993). Sin embargo, es necesario realizar más estudios encaminados a conocer cómo se está afectado no solo la dinámica de las poblaciones de estos hábitats sino también las características morfométricas de los mosquitos con la presencia o ausencia de depredadores.

Con los resultados observados en este trabajo, no se encontró evidencia de una asociación entre tamaño de los mosquitos con cambios en la temperatura ambiental durante El Niño, pero sí se logró evidenciar la asociación entre tamaño de ala de *Anopheles albimanus* con paridad y supervivencia.

Como trabajos futuros se plantea la realización de observaciones en el campo para estimar el tamaño de las alas de mosquitos procedentes de criaderos temporales y permanentes y determinar qué tipo de criadero favorece los mosquitos de mayor

tamaño. Igualmente, continuar evaluando el tamaño de las alas a través del tiempo y medir su tamaño en el próximo evento El Niño. Asimismo, evaluar la asociación entre paridad y tamaño de las alas por periodos más prolongados.

13.7. Conclusiones Generales

Los resultados de este proyecto han permitido por una parte, el desarrollo de herramientas a ser utilizadas por las autoridades responsables de la prevención y control de malaria en Colombia, como ayuda para prevenir epidemias, y de otro lado, se ha mejorado la comprensión de las relaciones entre la variabilidad climática y la transmisión de la malaria, precisando la magnitud de los cambios en las variables de los vectores y el parásito, debidas a cambios en la temperatura, que permiten tanto explicar las epidemias como determinar algunos parámetros a ser usados para su vigilancia y prevención.

Las herramientas desarrolladas, así como el conocimiento adquirido con la realización de este proyecto, deben usarse e integrarse al sistema nacional de vigilancia, prevención y control de malaria, a cargo de las autoridades de salud.

El Sistema de Información Geográfica de Malaria en Colombia SIGMA, es un programa diseñado para visualizar, en un sistema de información georeferenciado y de manera interactiva, la base de datos de malaria del Ministerio de Salud de Colombia, su relación con las principales variables climáticas a escala municipal, departamental y nacional. Dicha base de datos cuenta con información a escala municipal de variables entomológicas, como los tipos de vectores de la malaria presente; climática, como temperatura y precipitación; de población rural y urbana y clínicas que se refieren al número de casos de malaria registrados en cada municipio. Esta aplicación se desarrolló en cooperación con el Ministerio de la Protección Social.

Se resaltan algunas ventajas de esta herramienta: El módulo de visualización de series de tiempo, permite al usuario visualizar simultáneamente, de acuerdo con la información almacenada en la base de datos, los índices maláricos de los municipios con información mensual, las variables macro-climáticas y variables hidroclimáticas del municipio, y permite estimar el coeficiente de correlación lineal entre estas variables. La interfaz permite visualizar los datos reales y las anomalías estandarizadas de los índices macroclimáticos, asociadas principalmente al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. Con respecto a la información malárica, el usuario del sistema puede elegir entre desplegar el número de casos o las incidencias anuales de cada uno de los parásitos causantes de malaria (*P. vivax*, *P. falciparum*, malaria mixta), discretizada para todos los municipios en los cuales se cuenta con información mensual. Además, se le brinda al usuario la posibilidad de identificar la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña sobre las series de tiempo desplegadas en la interfaz.

Para la visualización de esta información se utilizaron las librerías JFree-Chart [3], las cuales son de licencia GPL. Un mapa de Colombia, con su división municipal, permite al usuario visualizar de manera fácil e interactiva, con un solo clic, las series de tiempo de las incidencias o el número de casos de malaria del municipio seleccionado. Además, el sistema despliega la información referente al municipio y el departamento al cual pertenece y los tipos de mosquitos vectores transmisores de la malaria (Anopheles) presentes.

Se desarrolló un modelo matemático para representar las interacciones entomológicas y climáticas de la transmisión de malaria por *Plasmodium falciparum* en regiones endémicas Colombia, particularmente aplicado al periodo Enero 1994-Diciembre 1998 (Ruiz et al., 2004). Se trata de un modelo de dinámica de sistemas que incorpora aspectos climáticos, entomológicos y epidemiológicos para representar la transmisión de la malaria a nivel diario sobre un horizonte amplio de tiempo. Los estimativos de las variables exógenas se basan en datos obtenidos a través de las campañas de campo desarrolladas durante esta investigación, así como mediante experimentos de laboratorio (Rua et al., 2005). El modelo considera diversos escenarios, explora análisis de sensibilidad y casos de inestabilidad. La validación del modelo permitió estimar un coeficiente de correlación y un error medio cuadrático de 0.649 y 0.0010, respectivamente entre los casos simulados y observados en de malaria en la localidad de El Bagre, en el bajo Cauca Antioqueño. Se determinó que la temperatura media es el factor climático más relevante para determinar la incidencia de malaria en tal región. Los resultados de simulación con el modelo empleado muestran que la estacionalidad de la densidad del vector también es un parámetro importante, pero esto se debe investigar con mayor profundidad, lo que indica que la variabilidad climática a escalas intra-anual e inter-anual de la lluvia y la temperatura es importante para explicar la dinámica de la transmisión de malaria en las regiones endémicas de Colombia. Ver detalles en Ruiz et al (2004).

Se encontró buena coherencia entre la vegetación en el trópico de Sur América (Colombia, Venezuela, Guyana y la cuenca del río Amazonas) y el fenómeno del ENSO. De acuerdo a lo anterior, se llegó a la conclusión que las series del SOI (Índice de Oscilación del Sur) y de la NAO (Oscilación del Atlántico Norte) tienen influencia en algunas regiones sobre el comportamiento de la vegetación. Partiendo de esta conclusión se realizó una regresión lineal múltiple, en donde los datos del SOI y del NAO se usaron como variables para predecir la variable dependiente del NDVI (Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación). Para realizar está regresión en cada píxel del mapa se estandarizaron las series del SOI, NAO y NDVI. Se correlacionaron los datos del NDVI con los registros de malaria en Colombia, en busca de algún umbral característico. Se concluye que es necesario tener un valor de NDVI mayor que 0,35 para que se presenten más del 10% de los casos de malaria del año en un mes dado. Este umbral permitió construir un mapa de riesgo malárico en el cual se muestra para cada punto de Colombia el número de meses en los cuales se

presenta un valor del NDVI mayor que 0,35.

Se identificaron variables asociadas al incremento en el número de casos de malaria. La variable climática clave fue la temperatura. Asociada a la temperatura, se evaluaron variables de los vectores, con énfasis en *Anopheles albimanus*, vector principal de malaria y responsable de la transmisión en la Costa Pacífica colombiana. De las variables entomológicas se encontró que, con incrementos lineales en la temperatura, se afectan las poblaciones de vectores y parásito, de forma no-lineal. Tomando como región indicador a la costa pacífica, el incremento en la temperatura durante la ocurrencia de El Niño comparado con períodos «normales», es aproximadamente de 25°C a 27°C. Con esta magnitud de incremento en la temperatura se incrementan la capacidad vectorial por una disminución en la duración del ciclo gonotrófico en aproximadamente 10 horas, disminución en aproximadamente 2 días en la duración del ciclo esporogónico, y la longevidad encuentra su óptimo a esta temperatura (27°C). Estas variables en conjunto explican el incremento en la transmisión de malaria al aumentar la temperatura ambiental. Variables como la densidad, tanto de adultos como de sus estadios inmaduros, no se asociaron a variables climáticas o a transmisión de malaria. Se propone incorporar la vigilancia de la longevidad de las poblaciones en un sistema rutinario de vigilancia en los servicios de salud. El tamaño de los mosquitos, evaluado por el tamaño del ala, se encontró asociado a supervivencia tanto en laboratorio como en las observaciones de campo. Este indicador muestra potencial para poderse incorporar en estos sistemas de vigilancia, siendo un parámetro de fácil medición. Se requiere, sin embargo, evaluar su utilidad en diferentes localidades, y profundizar más a nivel local sobre posibles variables de confusión, principalmente con relación a la dinámica de los criaderos de los mosquitos.

Para la Costa Pacífica destacamos la necesidad de considerar las especies pequeñas de peces nativos, como control biológico de los anofelinos. Debido a que sus ciclos de reproducción son más simples que en los insectos depredadores y además con ellos no se estaría introduciendo agentes biológicos extraños a los ecosistemas. Esta conclusión debe tenerse en cuenta para todas las zonas endémicas de malaria en Colombia. Durante esta investigación se develó el vacío sobre taxonomía de la macrofauna dulceacuícola. Por lo tanto se requiere resolver la identidad y desempeño de las especies que ocupan los ecosistemas acuáticos en donde interactúan las poblaciones humanas. Esta información facilitaría las investigaciones sobre dinámica de criaderos. También es importante esclarecer las categorías de la temporalidad de los criaderos de anofelinos, con el fin de facilitar los diseños metodológicos para implementar en los proyectos sobre este tipo de ecosistemas.

El Análisis de Correspondencia Canónica debe implementarse en estudios posteriores de criaderos, puesto que permite conocer la tendencia de cada especie, por ejemplo *Anopheles* sp., frente a las variables ambientales, como temperatura,

y relacionarla con la respuesta de otras especies ante la misma variable, entre ellas los depredadores.



Referencias

- Allan R.** 2000. ENSO and Climatic Variability in the past 150 years. En: El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale variability and global and regional impacts.
- Almirón, W. R.** 2003. Mosquitos de interés médico y veterinario en Argentina. Temas de Ciencia y Tecnología. Vol. II, No. 4. Dic 2003.
- Álvarez, N. J., López, M. R.** 2004. Alergia a picaduras de mosquitos. Alergomurcia. AMCA (American Mosquito Control Association). 1970. Manual for mosquito rearing en experimental techniques. Bulletin N° 5. 112 p.
- Antunes P.C.A.** 1937. Informe sobre una investigación entomológica realizada en Colombia. Rev Fac Med Bogota. 6: 365- 87.
- Barco, O. J. y Cuartas, L. A.** 1998. Estimación de la evaporación en Colombia. Trabajo de Grado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 136 p.
- Barreto P, Lee V. H.** 1969. Artrópodos hematófagos del río Raposo, Valle, Colombia II. Culicidae. Caldasia. 10: 407-40.
- Bates M.** 1943. Mosquitoes as vectors of Dermatobia in eastern Colombia. Ann Entomol Soc Am. 36: 21-4.
- Bayon M.N., Lindsay S.W.** 2004. Temperature-related duration of aquatic stages of the Afrotropical malaria vector mosquito *Anopheles gambiae* in the laboratory. Medical and Veterinary Entomology. 18: 174-179.
- Begon, M., Harper, J. L., Towsend, C. R.** 1996. Ecology: Individuals, Populations, and Communities, 3rd edition. Blackwell Science Ltd., Cambridge, MA.
- Beier J.C., Onyango F.K., Koros J.K., Ramadhan M., Ogwang R., Wirtz R.A., Koech D.K., Roberts C.R.** 1991. Quantitation of malaria sporozoites transmitted in vitro during salivation by wild Afrotropical *Anopheles*. Medical and Veterinary Entomology. 5: 71-79.
- Bejarano, E.** 2003. Occurrence of the Malaria Vector *Anopheles albimanus* Wiedeman 1820 (Diptera: Culicidae) in Isla Fuerte, Colombia. Neotropical Entomology 32(3):517-518 (2003)
- Billingsley P.F., Sinden R.E.** 1997. Determinants of malaria-mosquito specificity. Parasitology Today. 13: 297-301.
- Bouma M.J., Dye C.** 1997. Cycles of malaria associated with El Niño in Venezuela. Journal of the American Medical Association. 278: 1772-1774.
- Bouma M.J., Poveda G., Rojas W., Chavasse D., Quiñones M.L, Cox J., Patz J.** 1997. Predicting high-risk years for malaria in Colombia using parameters of El Niño Southern Oscillation. Tropical Medicine and International Health. 2: 1122-1127.
- Bouma M.J., Van Der Kaay H.J.** 1996. The El Niño Southern Oscillation and Historic Malaria Epidemics on the Indian subcontinent and Sri Lanka: an Early Warning System for Future Epidemics?. Tropical Medicine and International Health. 1: 86-89.
- Bown D.N., Rodríguez M.H., Arredondo-Jimenez J.I., Loyola E.G., Rodríguez M.C.** 1991. Age structure and abundance levels in the entomological evaluation of an insecticide used in the control of *Anopheles albimanus* in Southern Mexico. J

Am Mosq Control Assoc. 7: 180-187.

Bown D.N., Rodriguez M.H., Loyola E.G., Arredondo-Jimenez J.I., Rodriguez M.C. 1993. Intradomiciliary behaviour of *Anopheles albimanus* on the coastal plain of southern Mexico. Implications for malaria control. Journal of the American Mosquito Control Association. 9: 321-324.

Boyd M.F. 1949. Epidemiology: factors related to the definitive host. In Boyd M.F. 1949. Malariology. Saunders W.B. Philadelphia (EUA).

Bras, R. L. y Rodríguez-Iturbe, I. 1985. Random functions and hydrology. Addison-Wesley Publishing Company, USA, p. 385-404.

Breeland S. 1972. Studies on the ecology of *Anopheles albimanus*. Am. J. Trop. Med. Hyg. 21: 751-754.

Briegel H. 1990. Fecundity, metabolism and body size in *Anopheles* (Diptera: Culicidae), vectors of malaria. Journal Medical Entomology. 27: 839-850.

Briegel H., Horler E. 1993. Multiple blood meals as a reproductive strategy in *Anopheles*. Journal Medical Entomology. 30: 975-985.

Briegel H., Lea A.O. 1975. Relationship between protein and proteolytic activity in the midgut of mosquitoes. Journal of Insect Physiology. 21: 1597-1604.

Bruce-Chwatt L. 1980. Essential Malariology. William Heinemann Medical Books Ltd. London. 354 p.

Ter Braak, C.J.F. 1986. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. Ecology 67: 1167-1179.

Caceres F. R., González B.R., Koldenkova I. 1988. Capacidad depredadora de *Poecilia (Lebistes) reticulara* Peters, 1895 (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) sobre larvas de *Culex quinquefasciatus* Say, 1823 y *Aedes aegypti* Linneo, 1762 (Diptera: Culicidae) en condiciones de laboratorio. Revista Cubana de Medicina Tropical. 40(1) 54-60.

Cardozo Gonçalves de C.S., Martins Junior A. de J., Pereira Lima J.B., Valle D. 2002. Temperature influence on embryonic development of *Anopheles albimanus* and *Anopheles aquasalis*. Memórias do Instituto Oswaldo Cruz. 97: 1117-1120.

Carrillo M.P., Suarez M.F., Morales A., Espinal C. 1981. Colonización y mantenimiento de una cepa colombiana de *Anopheles albimanus* Wiedemann, 1820. (Diptera: Culicidae). Biomédica. 1: 64 -66.

Chadee D.D, Beier J.C., Mohammed R.T. 1998. Laboratory studies of diel oviposition, fecundity survival and gonotrophic cycle in *Anopheles humunculus*. Journal American Mosquito Control Association. 14: 153-158.

Chadee D.D. 1995. Diel oviposition patterns of *Anopheles albimanus* in Trinidad, West Indies. Journal American Mosquito Control Association. 11: 103-108.

Chadee D.D. 1999. Laboratory studies of diel oviposition, fecundity survival and gonotrophic cycle of *Anopheles bellator* Dyar and Knab in Trinidad, West Indies. Vector Ecology. 24: 83-90.

Chadee D.D., Mendis C., Beier J.C. 1993. Diel oviposition mosquitos (Diptera: Culicidae) from the Americas: *Anopheles albimanus* Wiedemann and *Anopheles freeborni* Aitken. Annals of Tropical Medicine and Parasitology. 87: 501-507.

- Charlwood J.D., Kihonda J., Sama S., Billingsley P.F., Hadji H., Verhave J.P., Lyimo E., Luttikhuisen P.C., Smith T.** 1995. The rise and fall of *Anopheles arabiensis* (Diptera: Culicidae) in Tanzania village. *Bulletin of Entomological Research*. 85: 37-44.
- Christophers S.R.** 1911. The development of the egg follicle in anophelines. *Paludism*. 2: 73-89.
- Clark-Gill, S., Darsie, R.D.** 1983. The mosquitoes of Guatemala, their identification, distribution and bionomics. *Mosquito Systematics* 15(3): 151-284.
- Clements A.N.** 1992. *The Biology of Mosquitoes*. Vol. I: Development, Nutrition and Reproduction. London: Chapman and Hill. 587 p.
- Coatney G.R., Collins W.E., Warren McW., Contacos P.C.** 1971. *The primate malarias*. US. Government Printing Office. Washington.
- Davidson G.** 1954. Estimation of survival-rate of anopheline mosquitoes in nature. *Nature*: 174: 792-793.
- Delgado N.** 1998. Parámetros demográficos de las fases inmaduras de *Anopheles aquasalis* Curry 1932 (Diptera: Culicidae) en condiciones de laboratorio. *Boletín de Entomología Venezolana*. 13: 27-43.
- Detinova T.S.** 1962. Age-grouping methods in Diptera of medical importance, with special reference to some vectors of malaria. WHO Monograph 47. World Health Organization. Geneva.
- Deymanov, V., Soltani, S., Kanevski, M., Canu, S., Maignan, M., Savelieva, E., Timonin, V. y Pisarenko, V.** 2001. Wavelet analysis residual kriging vs. Neural network residual kriging. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 15, p. 18-32
- Dos Santos R.L.C., Forattini O.P., Burattini M.N.** 2002. Laboratory and field observations on duration of gonotrophic cycle of *Anopheles albittarsis* s.l. (Diptera: Culicidae) in Southeastern Brazil. *Journal of Medical Entomology*. 39: 926-930.
- Dye C.** 1986. Vectorial capacity: must we measure all its components ?. *Parasitology Today*. 2: 203-209.
- Edillo F.E., Touré T., Lanzaro G.C., Dolo G., Taylor C.** 2004. Survivorship and distribution of immature *Anopheles gambiae* s.l. (Diptera: Culicidae) in Banambani Village, Mali. *Journal of Medical Entomology*. 41: 333-339.
- Elliot R.** 1968. Studies on Man-Vector Contact in some areas in Colombia. *Bulletin of the World Health Organization*. 38: 239-253.
- Elliot R.** 1972. The influence of vector behaviour on Malaria transmission. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 21: 755-763.
- Epstein P.R.** 1995. Emerging diseases and ecosystem instability: new threats to Public Health. *American Journal of Public Health*. 85: 168-172.
- Epstein P.R.** 1997. Climate, Ecology and Human Health. Consequences. *The Nature and Implications of Environmental Change*. 3: 3-19.
- Epstein P.R.** 2000. Is Global Warming harmful to health ?. *Scientific American*. 283: 50-57.
- Eslava, J. A.** 1994. *Climatología del Pacífico Colombiano*. Colección Eratóstenes

- (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales), 1, 79 p.
- Eugene P., Odum.** 1985. Ecología. Compañía editorial Continental, S.A. Mexico. Segunda edición pp. 15, 60-73, 43-56, 27-28, 110-125.
- Fang J., McCutchan T.F.** 2002. Thermoregulation in a parasite's life cycle. *Nature*. 418: 742.
- Faran M.E.** 1980. Mosquitos studies (Diptera: Culicidae). XXXIV. A revision of the albimanus section of the subgenus Nyssorhynchus of Anopheles. *Contributions of the American Entomological Institute*. 15: 1-215.
- Fleming G. 1986. *Biología y Ecología de los Vectores de Malaria en las Américas*. Organización Mundial de la Salud. Washington D.C.
- Foley D.H., Torres E.P., Mueller I.** 2002. Stream-bank shade and larval distribution of the Philippine malaria vector *Anopheles flavorostri*. *Medical and Veterinary Entomology*. 46: 347-355.
- Fox R.M.** 1957. *Anopheles gambiae* in Relation to Malaria and filariasis in Coastal Liberia. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 6: 598-620.
- Frederickson, E. C.** 1993. Bionomía y Control de *Anopheles albimanus*. Organización Panamericana de la Salud. Cuaderno Técnico No. 34.
- Gagnon A.S., Smoyer-Tomic K.F., Bush A.B.** 2002. The El Niño Southern Oscillation and malaria epidemics in South America. *International Journal of Biometeorology*. 46: 81-89.
- García Á., Huamán M., Vivar G., Quezada M.** 1996. Insectos acuáticos biorreguladores de larvas de mosquito presentes en los "pantanos de villa", Lima, Perú. *Revista cubana de medicina tropical*. 48(3): 227-228
- García, A. G., Hernández. C. N.** Fauna asociada a varios criaderos del mosquito *Anopheles albimanus*. Instituto Medicina Tropical "IPK". Informe preliminar.
- Garnham P.C.C.** 1964. Factors influencing the development of protozoa in their arthropodan hosts. In *Host-Parasite Relationship in Invertebrate Hosts*, Symposium of the British Society for Parasitology, Vol 2, ed Taylor A.E.R. pp. 33-50. Oxford: Blackwell Scientific.
- Garrett-Jones C.** 1964. The human Blood index of malaria vectors in relation epidemiological assessment. *Bulletin of the World Health Organization*. 30: 241-261.
- Garrett-Jones C., Boreham P.F.L., Pant C.P.** 1980. Feeding habits of anophelines (Diptera: Culicidae) in 1971-1978, with reference to the human blood: a review. *Bulletin of Entomological Research*. 70: 165-185.
- Garrett-Jones C., Grab B.** 1964. The Assessment of Insecticidal impact on the Malaria Mosquito's Vectorial Capacity, from data on the proportion of Parous females. *Bulletin of the World Health Organization*. 31: 71-86.
- Garrett-Jones C., Shidrawi G.** 1969. Malaria vectorial capacity of a population de *Anopheles gambiae* -An exercise in Epidemiological Entomology-. *Boletín de la Organización Mundial de la salud*. 40; 531-45.
- Gass R.F., Yeates R.A.** 1979. In vitro damage of cultured ookinetes of *Plasmodium gallinaceum* by digestive proteinases from susceptible *Aedes aegypti*. *Acta Tropica*. 36: 243-252.

- Ghosh A., Edwards M.J., Jacobs-Lorena M.** 2000. The journey of the malaria parasite in the mosquito: hopes for the new century. *Parasitology Today*. 16: 196-201.
- González, D.** 1984. Distribución mensual y anual de la precipitación en las cuencas hidrográficas del alto Cauca, Anchicayá, Dagua y Calima. Informe CVC No. 85-2.
- Grieco, J.P., Achee, N.L., Briceno, I., King, R., Andre, R., Roberts, D., Rejmankova, E.** 2003. Comparison of life table attributes from newly established colonies of *Anopheles albimanus* and *Anopheles vestitipennis* in northern Belize. *Journal of Vector Ecology*. 28: 200-207.
- Groot H, Morales A, Vidales H.** 1961. Virus isolations from forest mosquitoes in San Vicente de Chucurí, Colombia. *Am J Trop Med Hyg* 10: 397-402.
- Groot H.** 1964. Estudios sobre virus transmitidos por artrópodos en Colombia. *Rev Acad Col Ciencias Exactas Fis Nat.* 12: 197-217.
- Haddow A.J., Ssenkubuge Y.** 1962. Laboratory observations on the oviposition cycle in the mosquito *Anopheles (Cellia) gambiae* Giles. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*. 56: 352- 355.
- Harbach, R.E., Knight, K.L.** 1980. Clave fotográfica para larvas de zancudo (Diptera: Culicidae) presentes en Centroamérica y Panamá. Modificaciones de Harbach, R.E.; K.L. Knight. *Taxonomists' glossary of mosquito anatomy*. New Jersey, Plexus Publishing Inc., 415p.
- Haufe W.O., Burgess L.** 1956. Development of *Aedes* (Diptera: Culicidae) at Ford Churchill, Manitoba, and prediction of dates of emergence. *Ecology*. 37 500-519.
- Herrera S., Suarez M. F., Sánchez G. I., Quiñones M. L., De Herrera M. 1987. Uso de la técnica Inmuno-radiométrica (IRMA) en *Anopheles* de Colombia para la identificación de esporozoitos de *Plasmodium*. *Colombia Médica*. 18 (1): 2-6
- Hibbard, B.** 2002. Visad. Space Science and Engineering Center. Phd Thesis. University of Wisconsin-Madison.
- Hirose, M. J.** 2002. Los Mosquitos. *Montañismo y Exploración*. Dic. 99. http://www.montanismo.org.mx/articulos.php?id_sec=11&id_art=383
- Hollingdale M.R., Nardin E.H., Tharavananij S., Schwartz A.L., Nussenzweig R.S.** 1984. Inhibition of entry of *Plasmodium falciparum* and *P. vivax* sporozoites into cultured cells; an in vitro assay of protective antibodies. *Journal of Immunology* 132: 909-913.
- Hsu, K., Gupta, H. V., Gao, X. y Sorooshian, S.** 1999. Estimation of Physical Variables from Multi-Channel Remotely Sensed Imagery Using a Neural Network: Application to Rainfall Estimation. *Water Resources Research*, 35(5), p. 1605-1618.
- Hsu, K., Gao, X., Sorooshian, S. y Gupta, H. V.** 1997. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, 36, p. 1176-1190.
http://www.alergomurcia.com/pdf/alergia_mosquitos.pdf
- IDEAM** (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 1999.
- IGAC** (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1977. Zonas de Vida o Formaciones

Vegetales de Colombia. Bogotá (Colombia). 238 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Observed climate variability and change. Climate change 1995: The science of climate change. Contribution of working Group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J.J. Houghton, L.G. Meiro Filho, B.A. Callender, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell. Eds. Cambridge University Press, 370-374

Jongman, R.H.G., ter Braak, C.J.F. y van Tongener, O.F.R. 1987. Data Análisis in community and landscape ecology. Pudoc, Wageningen.

Kilian A.H., Langi P., Talisuna A., Kabagambe G. 1999. Rainfall pattern, El Niño and malaria in Uganda. Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene. 93: 22-23.

Klowden M.J., Briegel H. 1994. Mosquito gonotrophic cycle and multiple feeding potential: contrasts between Anopheles and Aedes. Journal Medical Entomology. 31: 618-622.

Koldenkova L., Famyhingoc D., Garcia A. Y. 1989." Alimentación de los alevines del pez larvívoro *Poecilia reticulara* (Cyprinodontiformes: Poecillidae) en un criadero natural de *Culex quinquefasciatus* (Say, 1823). Revista Cubana de Medicina Tropical. 89(1) 40-48.

Kummerov, C. W., Barnes, W., Kosu, T., Shiue, J. y Simpson, J. 1998. The tropical rainfall measurement mission TRMM sensor package. Journal of atmospheric and oceanic technology, 15, p. 809-817.

Lane, J. 1974. Protocolo para el montaje de larvas de culícidos. Documento mimeografiado.

Lanza, L. T., Ramírez, J. A. y Todini, E. 2001. Stochastic rainfall interpolation and downscaling. Hydrology and Earth System Sciences, 5, p. 139-143.

Lassiter M., Apperson C., Roc R. 1995. Juvenile hormone metabolism during the fourth stadium and pupal stage of the southern house mosquito *Culex quinquefasciatus* Say. Journal of Insect Physiology. 41: 869-876.

León, G. E., Zea, J. A. y Eslava, J. A. 2000. Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. Meteorología Colombiana, 1, p. 31-38.

Lestani, E. A., Stein, M., Liotta, D. J. Martínez, H. V. Tonón, S. A. 2002. Estudio preliminar de diversidad de culicifauna en recipientes artificiales de la ciudad de Posadas, Argentina. <http://www.unne.edu.ar/cyt/2002/06-Biologicas/B-063.pdf>

Lindsay S.W., Birley M.H. 1996. Climate Change and Malaria Transmission. Annals of Tropical Medicine and Parasitology. 90: 573-588.

Loevinsohn M.E, 1994. Climatic Warning and Increased Malaria: Incidence in Rwanda. The Lancet. 343: 714-718.

López J. 1997. Ecología de mosquitos (Diptera: Culicidae) em criadouros naturais e artificiais de área rural do norte do Estado do Paraná, Brasil. Rev. Saúde Pública. 31 (4): 370-7.

Lounibos L.P. 1994. Variable egg development among Anopheles (*Nyssorhynchus*): control by mating ?. Physiological Entomology. 19: 51-57.

- Lounibos L.P., Cuoto Lima D., Lourenço-de-Rivera R., Escher R.L., Nishimura N.** 1998. Egg maturation in Neotropical malaria vectors: One blood meal is usually enough. *Journal of Vector Ecology*. 23: 195-201.
- Lu Y.H., Hagedorn H.H.** 1986. Egg development in the mosquito *Anopheles albimanus*. *International Journal of Invertebrate Reproduction and development*. 9: 79-94.
- Macdonald G.** 1952. The analysis of the sporozoite rate. *Tropical Diseases Bulletin*. 49: 569-585.
- Macdonald G.** 1957. *The Epidemiology and Control of malaria*. Oxford University Press. London (United Kingdom). 201 p.
- Machado, C.T.** 1989. Distribución ecológica e identificación de los coleópteros acuáticos en diferentes pisos altitudinales del departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia. 319 pp.
- Maharaj R.** 2004. Life table characteristics of *Anopheles arabiensis* (Diptera: Culicidae) under simulated seasonal conditions. *Journal of Medical Entomology*. 40: 737-742.
- Mahmood F.** 1997. Life-table attributes of *Anopheles albimanus* (Wiedemann) under controlled laboratory conditions. *Journal of Vector Ecology*. 41: 41-50.
- Mahmood F., Reisen W.** 1981. Duration of the gonotrophic cycle of *Anopheles culicifacies* Giles and *Anopheles stephensi* Liston, with relation to observations on reproductive activity and survivorship during winter in Punjab Province, Pakistan. *Mosquito News*. 41: 41-50.
- Marquetti, M. González, D, Aguilera L, Navarro A.** 1999. Abundancia proporcional de culícidos en el ecosistema urbano de Ciudad de La Habana. Instituto de Medicina Tropical "Pedro Kouri". *Rev Cubana Med Trop* 51(3):181-4.
- Martens P.** 1997. Health Impacts of Climate Change and Ozone depletion. *An Eco-epidemiological Modelling Approach*. 157 p.
- Martens P., Kovats R.S., Nijhof S., de Vries P., Livermore M.T.J., Bradley D.J., Cox J., Mcmichael A.J.** 1999. Climate Change and future populations at risk of malaria. *Global Environmental Change*. 9: S89-S107.
- Mejia, J. F., Mesa, O. J., Poveda, G., Vélez, J. I., Hoyos, C., Mantilla, R., Barco, J. A., Cuartas, Montoya, M. y Boter, B.** 1999. Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *Revista DYNA*, 127, p. 7-24.
- Mesa, O. J., Poveda, G. y Carvajal, L. F.** 1997. *Introducción al clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 390 p.
- Molineaux L.** 1988. The epidemiology of Human Malaria as an Explication of its distribution, including some implications for its Control. In Wernsdorfer W.H. y McGregor S.I. 1988. *Malaria, Principles and Practice of Malariology*. Churchill Livingstone. Londres (Inglaterra). 1818 p.
- Molineaux L., Gramiccia G.** 1980. The Gorki project: Research on the epidemiology and control of malaria in the Sudan Savanna of West Africa. World Health Organization.

- Muirhead-Thomson R.C.** 1951. Mosquito behaviour in relation to malaria transmission and control in the Tropics. London: Edwar Arnold.
- MySQL AB.** 2003. Getting Started with MySQL. http://dev.mysql.com/tech-resources/articles/mysql_intro.htm.
- Nasci R.S.** 1986a. Relationship between adult mosquito (Diptera: Culicidae) body size and parity in field populations. *Environmental Entomology*. 15: 874-876.
- Nasci R.S.** 1986b. The size of emerging and hostseeking *Aedes aegypti* and relationship of size to blood-feeding success in the field. *Journal of the American Mosquito Control Association*. 2: 61-62.
- Nasci R.S.** 1987. Adult body size and parity in field populations of the mosquitoes *Anopheles crucians*, *Aedes taeniorhynchus* and *Aedes sollicitans*. *Journal of the American Mosquito Control Association*. 3: 636-637.
- Noden B.H., Kent M.D., Beier J.C.** 1995. The impact of variations in temperature on early *Plasmodium falciparum* development in *Anopheles stephensi*. *Parasitology*. 111: 539-545.
- Olano V, Carasquilla G., Méndez F.** 1997. Transmisión de malaria urbana en Buenaventura, Colombia: aspectos entomológicos. *Revista Panamericana de Salud Pública*. 1: 287-294.
- Olano V., Brochero H., Sáenz, R., Quiñones M. L., Molina J.** 2000. Mapas preliminares de la distribución de especies de *Anopheles* vectores de malaria en Colombia. *Inf Quinc Epidemiol Nac*; 5:339-46.
- Olano V., Brochero H.L., Saézn R., Quiñónes M.L., Molina, J.A.** 2001. Mapas preliminares de la distribución de especies de *Anopheles* vectores de malaria en Colombia. *Biomédica*, 21: 402-408.
- Organización Panamericana De La Salud.** 1997. Boletín Epidemiológico: Situación de la Malaria en las Américas, 1996. 18 (3): 1 – 8.
- Organización Panamericana De La Salud.** 2002. Orientaciones para la Vigilancia, prevención y control del Virus del Nilo Occidental. <http://www.paho.org/Spanish/HCP/HCT/VBD/wnv-info.pdf>
- Ortegón, J. y Quiroz, H.** 1990. Efecto de la cepa GM-10 de *Bacillus thuringiensis* CL 50 en la capacidad depredadora de *Buenoa* sp. (Hemiptera: Notonectidae) sobre larvas de *Culex pipiens quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae). *Folia Entomológica Mexicana* 79: 197-205.
- Oster, R.,** 1979. Las precipitaciones de Colombia. *Colombia Geográfica (IGAC)*, VI (2), 147 p.
- PAHO (Pan American Health Organization).** 1996. Biology and Ecology of *Anopheles albimanus* Wiedemann in Central America. Technical paper No. 43.
- PARH Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos,** 2001. Balances hidrológicos y atlas digital de Antioquia. Medellín, 311 p.
- Patz J.A., Epstein P.R., Burke T.A., Balbus J.M.** 1996. Global Climate Change and Emerging Infectious Diseases. *The Journal of the American Medical Association*. 275: 217-223.
- Patz J.A., Hulme M., Rosenzweig C., Mitchell T.D., Goldberg R.A., Githeko**

- A.K., Lele S., McMichael A.J., Le Sueur D.** 2002 Climate change: Regional warming and malaria resurgence. *Nature*. 420: 627-628.
- Patz J.A., Kovats R.S.** 2002. Hotspots in climate change and human health. *BMJ*. 325: 1094-1098.
- Pérez Viguera I.** 1956. Los ixódidos y culícidos de Cuba. Su historia natural y médica. Universidad de La Habana. 1956.579 pp.
- Periódico El Mundo, 2000. Municipios de mi tierra: el camino para conocer nuestro departamento. Medellín, 328 p.
- Ponnudurai T., Lensen A.H.W., Van Gemert G.J.A., Bensink M.P.E., Bolmer M., Meuwissen J.H.E.T.H.** 1989. Infectivity of cultured *Plasmodium falciparum* gametocytes to mosquitoes. *Parasitology*. 98: 165-173.
- Ponnudurai T., Lensen A.H.W., Van Gemert G.J.A., Bolmer M., Meuwissen J.H.E.T.H.** 1991. Feeding behaviour and sporozoite ejection by infected *Anopheles stephensi*. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*. 85: 175-180.
- Ponnudurai T., Meuwissen J.H.E.T.H., Leeuwenberg A.D.E.M., Verhave J.P., Lensen A.H.W.** 1982. The production of mature gametocytes of *Plasmodium falciparum* in continuous cultures of different isolates infective to mosquitoes. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*. 76: 242-250.
- Pourrut, P.** 1994. L'eau en Équateur. Principaux Caquis en Hydroclimatologie. ORSTOM Editions, Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en coopération. Collection Études et Thèses, Paris, 147 p.
- Poveda G.** 2004. La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala Inter.-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 28: 201-222.
- Poveda G., Graham, N.E., Epstein, P.R., Rojas, W., Quiñones, M.L. Velez, I.D., Martens, W.J.M.** 2000. Climate and ENSO variability associated with vector-borne diseases in Colombia. En: *El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale variability and global and regional impacts*. Diaz H.F. y Markgraf V. Editores. Cambridge University Press. New York (States United of America). 496 p.
- Poveda, G., Rojas, W.** 1997. Evidencias de la Asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y the phenomenon El Niño - Oscillation of the Sur (ENSO). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 21: 421-429.
- Poveda, G., Rojas, W., Velez, I.D, Quiñones, M.L., Mantilla, R.I., Ruiz, D., Zuluaga, J., Rúa, G.L.** 2001. Coupling between Annual and ENSO timescales in the Malaria-Climate association in Colombia. *Environ Health Perspect*. 109, 489-493.
- Poveda, G. y Mesa, O. J.** 1996. Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México*, XI, p. 21-37.
- Poveda, G. y Mesa, O. J.** 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of climate*, 10, p. 2690-2702.

- Poveda, G. y W. Rojas**, 1996. Impacto del Fenómeno El Niño en los brotes epidémicos de malaria en Colombia. En: Memorias XII Congreso Colombiano de Hidrología, Bogotá, p. 647–654.
- Poveda, G. y W. Rojas**, 1997. Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el Fenómeno El Niño – Oscilación del Sur. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, XXI (81), p. 421–429.
- Poveda, G.**, 2004. El clima de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, XXVIII (107), p. 201–222. (<http://www.accefyn.org.co/PubliAcad/Periodicas/Volumen28/107/201-222.pdf>)
- Poveda, G., G. Nicholas, P. Epstein, W. Rojas, I. D. Vélez, M. L. Quiñones y P. Martens**, 1999. Climate and ENSO variability associated to malaria and dengue fever in Colombia. En: Proceedings of the 10th Symposium of global change studies, Dallas, USA. p. 173–176.
- Poveda, G., J. I. Vélez, O. J. Mesa, L. A. Cuartas, O. J. Barco, R. I. Mantilla, J. F. Mejía, C. D. Hoyos, J. M. Ramírez, B. A. Botero, M. I. Mejía, L. I. Ceballos, M. D. Zuluaga, J. D. Giraldo, D. I. Quevedo, A. F. Borja, O. Hernández, y J. A. Urzola**, 2005b. Linking Long-term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia. En evaluación en Journal of Hydrologic Engineering, ASCE.
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G. y Álvarez, J. F.** 2005a. The diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia. Monthly Weather Review, 133, p. 128–140.
- Poveda, G., Rojas, W., Quiñones, M. L., Vélez, I. D., Mantilla, R., Ruiz, D., Zuluaga, J. S. y Rúa, G.** 2001. Coupling between annual ENSO timescales in the malaria-climate association in Colombia. Environmental Health perspectives, 109 (5), p. 1–6.
- Prat, N.** 1997. Retos para la conservación de los ríos. Ecosistemas, 20/21: 42-47.
- Pulwarty, R. S., R. G. Barry, C. M. Hurst, K. Sellinger y H. Mogollón**, 1998. Precipitation in the Venezuelan Andes in the context of regional climate. Meteorology and atmospheric physics, 67, p. 217–237.
- Quiñones M, Suárez, M Y Fleming, A.** 1987. Distribución y Bionomía de los anofelinos de la Costa Pacífica de Colombia. Colombia Médica 18 (1); 19-24
- Quiñones M.L., Suarez, M.F., Fleming, G.A.** 1987. Distribución y Bionomía de los anofelinos de la Costa Pacífica de Colombia. Colombia Médica. 18: 19-24.
- Rachou, R.G., Schinazzi, L.A., Moura-Lima, M.** 1973. An intensive epidemiological study of the causes for failure of residual DDT-spraying to interrupt the transmission of malaria in Atalaya and Falla, two villages of the coastal plain of El Salvador, Central America. Revista Brasileira de Malariologia Doencas Tropical. 15: 1-23.
- Ramsey, J. M., Bown, D. N., Aron, J., Méndez, J.** 1986. Field test in Chiapas, Mexico, of a rapid detection method for malaria in anopheline vectors with low infection rates. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. 35: 234-238.

- Ramsey, J.M., Salinas, E., Lopez, J.R., del Angel, G., Martinez, L., Bown, D.N.** 1988. Laboratory oviposition, fecundity and egg hatching ability of colonized *Anopheles albimanus* from Southwestern Mexico. *Journal of the American Mosquito Control Association*. 4: 509-515.
- Rangel, J. O. y Arellano, P.** 2004. Clima del Chocó biogeográfico. En: Colombia diversidad biótica IV: el Chocó biogeográfico / Costa Pacifica (J. O. Rangel, editor). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, p. 39–82.
- Rastogi, M., Pal, N.L., Sen, A.B.** 1987. Effect of variation in temperature on development of *Plasmodium berghei* (NK 65 strain) in *Anopheles stephensi*. *Folia Parasitologica*. 34: 289-297.
- Ravinovich, J. E.** 1978. Ecología de poblaciones animales. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Asuntos Científicos. OEA. Washington, D.C. 114 p.
- Reisen W. K., Siddiqui ,T.** 1979. Horizontal and vertical estimates of immature survivorship for *Culex tritaeniorhynchus* (Diptera: Culicidae) in Pakistan. *Journal Medical Entomology*. 16: 207-218
- Reisen W.K., Azra, K., Mahmood, F.** 1982. *Anopheles culicifacies* (Diptera: Culicidae): horizontal and vertical estimates of immature development and survivorship in rural Punjab Providence; Pakistan. *Journal Medical Entomology*. 19: 413-422.
- Reisen W.K., Mahmood, F.** 1979. *Anopheles culicifacies* Giles: Some relationships among oviposition, refeeding and survivorship. *Mosquito News*. 39: 374-381.
- Reisen W.K., Mahmood, F.** 1980. Horizontal life table characteristics of the malaria vectors *Anopheles culicifacies* and *Anopheles stephensi*. *Journal Medical Entomology*. 17: 211-217.
- Reisen W.K., Milby, M.M.** 1986. Population dynamics of some Pakistan mosquitoes: changes in adult relative abundance over time and space. *Annal Tropical Medicine and Parasitology*. 80:53-68.
- Reisen W.K., Siddiqui, T.** 1979. Horizontal and vertical estimates of immature survivorship for *Culex tritaeniorhynchus* (Diptera: Culicidae) in Pakistan. *Journal Medical Entomology*. 16: 207-218.
- Rejmankova E., Savage H.M., Rejmanek M., Roberts D.R., Arrendo-Jimenez J.I.** 1991. Multivariate analysis of relations lipo between habitats, environmental factors and ocurrence of anopheline mosquito larvae *Anopheles albimanus* and *A. pseudo punctipennis* is southern Chiapas, Mexico *J. Appl. Ecol.* 28: 827-841.
- Rodríguez, M.H., Bown, D.N., Arredondo-Jimenez, J.I., Villareal, C., Loyola, E.G., Frederikson, C.E.** 1992. Gonotrophic cycle and survivorship of *Anopheles albimanus* (Diptera: Culicidae) in Southern Mexico. *Journal of Medical Entomology*. 29: 395-399.
- Rodríguez, A.D., Rodríguez, M.H., Hernández, J.E., Rejmankova, E., Savage, H.M., Roberts, D.R., Pope, K.O. & Legters, L.** 1993. Dynamics of populations densities and vegetation associations of *Anopheles albimanus* larvae in a coast area of souther Chiapas, México, *J.Amer. Mosq. Cont. Assoc.*, 9: 46 - 57.
- Rojas, E.** 1999. Caracterización de Criaderos de *Anopheles* spp. del Noroccidente

de Venezuela. Ambiente ecológico. Mexico. Ed. 56.

Rojas, P. E. 2001. Efectividad del control de larvas de vectores de Malaria y otras enfermedades metaxénicas con peces larvívoros nativos de San Martín-Perú. Revista peruana de Medicina experimental y salud pública.

Roldán, P. G. 1996. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia. Fondo FEN Colombia; Colciencias; Universidad de Antioquia. 217 pp.

Roy, D.N. 1940. Influence of spermathecal stimulation on the physiological activities of *Anopheles subpictus*. Nature. 145: 747-748.

Rúa, G.L., Quiñones, M.L., Velez, I.D., Zuluaga, J., Rojas, W., Poveda, G., Ruiz D. 2005. Laboratory estimation of the effects of increasing temperatures on the duration of gonotrophic cycle of *Anopheles albimanus* (Diptera: Culicidae) in relation to El Niño event. Memórias do Instituto Oswaldo Cruz. Aceptado.

Rúa, G.L., Quiñones, M.L., Zuluaga, J., Rojas, W., Poveda, G., Velez, I.D., Ruiz ,D., Mantilla, R. 2003. El Niño Southern Oscillation (ENSO) related to malaria transmission, density and parity of *Anopheles albimanus* (Diptera: Culicidae) in Colombia. En: Climate Variability and Change and their health effects in the Caribbean: Information for Adaptation Planning in the health sector. Aron J. L., Corvalán C. F. y Philippeaux H. Editores. World Health Organization. 107 p.

Rúa, G., Quiñones, M. L., Vélez, I. D., Zuluaga, J. S., Rojas, W. y Poveda, G. 2005. Laboratory estimation of the effects of increasing temperature on the duration of gonotrophic cycle of *Anopheles albimanus* (Diptera: Culicidae). En revisión en: Memorias do Instituto Oswaldo Cruz.

Rubio, D. 2004. Data Driven Graphics With JFreeChart. DevChannel. Object Refinery Limited. <http://www.jfree.org/jfreechart/>

Rubio-Palis, J. 1994. Variation of the vectorial capacity of some anophelines in Western Venezuela. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. 50: 420-424.

Sagredo, J. Ecología, Diccionarios Rioduero. Ediciones Rioduero Madrid España, segunda edición.

Santamarina, M. A. y González, B. R. 1986. Los odonatos como biorreguladores de las larvas de mosquitos. Rev Cubana Med Trop.; 38(1): 89-97

Savage, H. M., Rejmankova, E., Arredondo Jiménez, J. I., Roberts, D. R. y Rodríguez, M. H. 1990. Limnological and botanical characterization of larval habitats for 2 primary malarial vectors, *Anopheles albimanus* and *Anopheles pseudopunctipennis*, in coastal areas of Chiapas state, Mexico. Journal of the American Mosquito Control Association 6 (4): 612-620.

Secretaría General de los Estados Americanos, monografía 23.

Senado de la República, 1989. Municipios de Colombia—Índice monográfico de los municipios del país. Presidencia de la república, Bogotá, 482 p,

Service M.W. 1993. Mosquito Ecology. Field Sampling Methods Applied Science Publishers. Segunda Edición. Chapman and Hall. London. 988 p.

Shahabuddin, M., Toyoshima, T., Aikawa, M., Kaslow, D.C. 1993. Transmission-

blocking activity of a chitinase inhibitor and activation of malarial parasite chitinase by mosquito protease. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 90: 4266-4270.

Shute, P.G., Maryon, M. 1952. A study of human malaria oocysts as an aid to species diagnosis. Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene. 46: 275-292.

Snow, J. W., 1976. The climate of Northern South America. En: Climates of Central and South America (W. Schwerdtfeger, editor). Elsevier, Amsterdam, p. 295-403.

Suárez, M.F., Quiñones, M.L., Robayo M.A., Cura, E. 1988. Clave para la determinación de larvas y adultos hembras de los principales anofelinos de Colombia. Bogotá: Ministerio de Salud.

Suplee, C. 1999. El Niño, La Niña. Círculo vicioso de la naturaleza. National Geographic. 4: 72-95.

Tinker, M. E. Documento mimeografiado. Clave práctica para las larvas de Mosquitos Neotropicales en recipientes. 16 p.

Tracy, I. S. Zoología General, Ediciones Omega S.A. Barcelona España. Tercera edición pp. 273 al 312

Trager, W., Jensen, J.B. 1976. Human malaria parasites in continuous cultures. Science 193: 673-675.

Diozhkin, V.V. Acerca de la ecología. Editorial MIR-Moscú-Rusia.

Vargas, V. M. 2003. Uso de peces larvívoros como controladores biológicos de larvas de *Aedes aegypti*: Una participación comunitaria. Departamento de Parasitología, Facultad de Microbiología, Universidad de Costa Rica.

Vaughan, J.A., Noden, B.H., Beier, J.C. 1992. Populations dynamics of *Plasmodium falciparum* sporogony in laboratory-infected *Anopheles gambiae*. Journal Parasitology. 78: 716-724.

Vaughan, J.A., Noden, B.H., Beier, J.C. 1994. Sporogonic development of cultured *Plasmodium falciparum* in six species of laboratory-reared *Anopheles* mosquitoes. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. 51: 233-243.

Vazquez-Martinez, M.G., Rodriguez, M.H., Arredondo-Jimenez, J.I., Mendez-Sanchez, J.D., Bond-Compean, J.G., Cold-Morgan, M. 2002. Cyanobacteria associated with *Anopheles albimanus* (Diptera: Culicidae) larval habitats in southern Mexico. Journal Medical Entomology. 39: 825-832.

Vélez, J. I., Poveda, G. y Mesa, O. J. 2000. Balances hidrológicos de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 150 p.

Wang, H., Zhang, R., Cole, J., Chavez, F. 1999. El Niño and the related phenomenon Southern Oscillation (ENSO): The largest signal in interannual climate variation. Proceedings of the National Academy of Sciences. 96: 11071-11072.

Warren, McW., Mason, J., Hobbs, J. 1975. Natural infections of *Anopheles albimanus* with *Plasmodium* in a small malaria focus. Am. Trop. Med. Hyg. 24: 545-546.

Weisz, P. B. Biología, Ediciones Omega S. A. Barcelona España. Quinta edición. pp. 228 al 236.

- WHO (World Health Organization).** 1975. Manual on Practical Entomology in Malaria. Part II: Methods and Techniques. World Health Organization. Geneva. 191 p.
- Wigley, T.M., Raper, S.C.** 1992. Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios. *Nature*. 357: 293-300.
- Wijesundera, M. de S.** 1988. Malaria Outbreaks in New Foci in Sri Lanka. *Parasitology Today*. 4: 147-150.
- Zuluaga, W.** 1996. Algunos aspectos de la bionomía de especies de Anopheles (Diptera: Culicidae) en dos municipios del Bajo Cauca Antioqueño, 1994-1995. Tesis de grado.

Agradecimientos

Expresamos nuestros agradecimientos al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, «Francisco José de Caldas» – COLCIENCIAS- y al Inter American Institute for Global Change Research (IAI) por el apoyo financiero para la ejecución de este proyecto.

Al Ministerio de la Protección Social y al Instituto Nacional de Salud de Colombia, por facilitar información sobre incidencias de malaria, especialmente a los Doctores Lenis Urquijo y Julio Cesar Padilla por su interés en este proyecto.

A los coordinadores de ETV de Antioquia y Chocó, Doctores Armando Galeano y Zulma Bejarano respectivamente, a la secretaria municipal de Salud de El Bagre, Dra. Patricia Corcho, por su apoyo logístico para la realización de las actividades de campo. A los funcionarios de salud del Bagre: Camilo Pérez y Francisco Naranjo por su colaboración con las capturas de los insectos. A Jorge García y Damian Díaz, por su diligencia en la obtención del material biológico en el municipio de Nuqui – Chocó.

A los Doctores Patricia de la Vega, Daniel Carucchi, Michael O'Hare y Thomas Richie del Department of the Navy Naval Medical Research Center Malaria Program en Silver Spring, MD, por haber recibido al estudiante de Doctorado Guillermo Rúa en su Laboratorio para su pasantía y haberle permitido realizar los estudios de infección de Anopheles con Plasmodium.

Investigadores:

Germán Poveda J.

Profesor Asociado. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Post-Doctorado en Hidro-Ecología, University of Colorado, Boulder, Colorado, EUA. Ph.D. en Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia. Master of Sciences in Engineering. University of California, Davis, EUA. Magíster en Recursos Hidráulicos e Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Miembro Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Coordinador del capítulo Colombiano del Programa Internacional para la Biosfera y la Geosfera (IGBP). Miembro de la American Geophysical Union.

Martha Lucia Quiñones P.

Bióloga de la Universidad de los Andes de Bogotá (1981), MSc en Parasitología Médica de la London School of Higiene & Tropical Medicine (1990-1991) y PhD en Biología y control de Vectores de la misma Universidad (1992 - 1996). Docente e investigador de la Universidad de Antioquia donde coordino la línea de Entomología Médica (1996 – 2005), actualmente vinculado como Profesor Asociado en dedicación exclusiva en la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá.

Iván Darío Vélez B.

Médico de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Especialista en Medicina Tropical, Parasitología y en Leprología de la Universidad de Montpellier, Francia, y MSc en Parasitología de la misma Universidad. Doctor en Enfermedades Infecciosas de la Universidad de Granada, España. Profesor Titular de la Facultad de Medicina Universidad de Antioquia y Director del Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales PECET.

William Rojas M.

Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB). Carrera 72 A N° 78 B – 141. Medellín-Colombia. wrojas@cib.org.co

Guillermo L. Rúa-Uribe

Biólogo de la Universidad de Antioquía. Especialista y Magíster en Entomología Médica. Doctor en Ciencias Básicas Biomédicas. Profesor en Entomología Médica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Antioquia. Investigador Asociado del Grupo de Entomología Médica (GEM). Facultad de Medicina. Universidad de Antioquia. Miembro de la Sociedad Colombiana de Entomología.

Carlos Daniel Ruiz C.

Ingeniero, MSc, PhD Candidato. Investigador asociado del Posgrado de Recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (1997-2002) donde realizó sus estudios de Maestría. Actualmente se desempeña como Profesor de la Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Juan Santiago Zuluaga G.

Biólogo, MSc en Entomología Médica, investigador Corporación de Investigaciones Biológicas CIB, Medellín, Colombia.

Luz Elena Velásquez T.

Bióloga MSc, Investigadora asociada del Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales PECET. Profesora asistente de la Escuela de Bacteriología, Universidad de Antioquia.

Manuel David Zuluaga A.

Investigador asociado de la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Olver Olfrey Hernandez N.

Investigador asociado de la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Investigadores:

Germán Poveda J.

Martha Lucia Quiñones P.

Iván Darío Vélez B.

William Rojas M.

Guillermo L. Rúa-Uribe

Carlos Daniel Ruiz C.

Juan Santiago Zuluaga

www.unia.es

un
i Universidad
Internacional
de Andalucía
A Pr
E de estudios
Iberoamericanos
Grupo La Rábida
mio 1
Área
Científico-Técnica

The logo for Cajasol, featuring the word "Cajasol" in a blue sans-serif font. The letter "a" is stylized with a yellow dot above it, and the letter "o" is yellow.