



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelado de la relación entre variables ambientales y el índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) en el departamento del Cauca, Colombia

Laura Viviana Cabezas Pinzón

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, D.C., Colombia

2021

Modelado de la relación entre variables ambientales y el índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) en el departamento del Cauca, Colombia

Laura Viviana Cabezas Pinzón

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al
título de:

Magister en Geomática

Director (a):

Ph.D. Aquiles Darghan

Codirector (a):

Ph.D. Jesús Efrén Ospina

Línea de Investigación:

Tecnologías Geoespaciales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, D.C., Colombia

2021

Dedicado a mi familia

"La lógica te llevará del punto A al B. La imaginación te llevará a todas partes".

Albert Einstein

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nombre: Laura Viviana Cabezas Pinzón

Fecha: 17/01/2022

Agradecimientos

Al doctor Víctor Alberto Olano del Instituto de Salud y Ambiente de la Universidad El Bosque y al doctor Carlos Andrés Morales de la Secretaría de Salud Departamental del Cauca por todo el apoyo brindado para culminar con mi trabajo de grado.

A los doctores Andrés Peña y Hernán Felipe Silva del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia “Cenicaña” por la información que me facilitaron para complementar el análisis de las variables meteorológicas.

A los doctores Aquiles Darghan Contreras y Jesús Efrén Ospina por su dirección, compromiso y apoyo durante el proceso.

A Wilson Cabanzo, Edwin Grisales, Lorena Orellana, a los docentes Jesús David Ramos, Ligia Moncada y Rigaud Sanabria por todo el apoyo brindado.

A mi familia por el apoyo y la comprensión recibida en esta etapa de mi vida.

Resumen

El aumento en la diseminación-abundancia de vectores y en la incidencia de enfermedades transmitidas por estos, se ve directamente influenciado por las alteraciones en las variables ambientales (temperatura, precipitación y humedad relativa). Dichas variaciones en el clima, se relacionan con el aumento de la temperatura superficial media de la tierra producto del calentamiento global. Para el caso del mosquito *Aedes aegypti*, vector transmisor de enfermedades de importancia en salud pública, aumentaría la expansión geográfica en la medida que aumente la temperatura global. El objetivo del estudio fue analizar la distribución espacial del mosquito *Aedes aegypti*, a partir de la transformación del índice entomológico pupa/persona y su relación con variables climáticas principales y derivadas (temperatura, humedad relativa, precipitación, índice de Lang) y geográficas (altitud latitud y longitud) en tres periodos de rezago temporal definidos de acuerdo con el ciclo de vida del mosquito (sin rezago temporal, rezago de cinco días y de siete días). La vigilancia de la Secretaría de Salud Departamental del Cauca, se realiza en 34 de los 42 municipios en total, los ocho municipios restantes hasta la fecha del 2017 se encontraron negativos: Almaguer, Jambaló, La Vega, Puracé, San Sebastián, Silvia, Sotará y Totoró. En los 34 municipios, se ubicaron geográficamente 394 puntos entre los cuales se encuentran barrios, veredas, corregimientos y un resguardo indígena. La información climática diaria (precipitación, temperatura mínima y máxima) se obtuvo del Sistema de Monitoreo de Inundaciones y Sequías de América Latina y el Caribe de la Universidad de Princeton. El cálculo de la temperatura media y del porcentaje de humedad relativa se realizó según la metodología de Allen *et al* 2006. Se realizó la clasificación climática del área de estudio a través del diagrama Ombrotérmico o índice de Gausson y el índice Lang. El modelo de regresión lineal múltiple incluyó a la georreferenciación de los puntos de muestreo dentro del conjunto de variables explicativas y a la nueva variable transformada del índice pupa/persona que se caracteriza por oscilar entre cero y 0,49. Las variables explicativas que según el modelo explican de mejor manera el índice pupa/persona fueron: la latitud, el índice Lang, la altitud, las temperaturas sin rezago temporal y con rezago temporal de cinco días: temperatura máxima, mínima y media.

Adicionalmente, se realizó una regresión lineal simple (R^2 de 0,97) entre los valores de las temperaturas sin rezago temporal (máxima, media y mínima) que fueron significativas en el modelo y los registros de la altitud de los 394 puntos geográficos, y con el fin de predecir los valores de las temperaturas sin rezago temporal (máxima, media y mínima), incluyendo el incremento del +2,15°C, que se espera aumente en la región del pacífico para finales del siglo según el Escenario Ensemble Promedio (2071-2100) de cambio climático del IDEAM, para el Modelo Digital de Elevación (MDE) del área de estudio. Finalmente, tomando como base el rango de la temperatura promedio que caracteriza a las regiones de Colombia donde se presenta transmisión endémica de dengue se clasificaron los valores de la temperatura promedio obtenidos de la siguiente forma: temperaturas inferiores a los 15,90°C (bajo riesgo), como riesgo moderado al rango definido entre los 15,90°C - 17,9°C, y el rango comprendido entre los 17,90°C y los 26,60°C fue clasificado con un alto riesgo. Con estos niveles se clasificaron las regiones geográficas para las superficies de interpolación de la temperatura del año 2017 y de su respectivo incremento de 2,15°C. Encontrándose, que el nivel de riesgo clasificado como bajo corresponde en su mayoría a la región geográfica que representa la Cordillera Central de los Andes, zona donde se encuentran parte de los municipios negativos para el año 2017 (Silvia, Totoró, La Vega, Almaguer, Jambaló, San Sebastián, Sotaró y Puracé), y es allí donde se observa que para final de siglo se presentaría la mayor disminución del área clasificada sin riesgo y cómo las regiones aledañas a esta Cordillera pasarían a ser consideradas de un riesgo moderado a un riesgo alto. Por tales razones, se sugiere generar protocolos de muestreo y de análisis, donde se incluya el índice de pupas, datos de variables climáticas, meteorológicas, y la distribución espacial del vector para tener una mejor aproximación del nivel de riesgo en regiones geográficas con o sin presencia del vector y de esta manera contribuir en la prevención y el control de las enfermedades que transmiten estos.

Palabras clave: Análisis espacial, salud pública, vectores de enfermedades, Colombia

Abstract

Modeling the relationship between environmental variables and the pupa/person index of the *Aedes aegypti* mosquito (Diptera: Culicidae) in the department of Cauca, Colombia.

The increase in the dissemination-abundance of vectors and in the incidence of vector-borne diseases is directly influenced by changes in environmental variables (temperature, precipitation and relative humidity). These variations in climate are related to the increase in the average surface temperature of the earth as a result of global warming. In the case of the *Aedes aegypti* mosquito, a vector that transmits diseases of public health importance, geographical expansion will increase as global temperature rises. The objective of the study was to analyze the spatial distribution of the *Aedes aegypti* mosquito, based on the transformation of the pupae/person entomological index and its relationship with main and derived climatic variables (temperature, relative humidity, precipitation, Lang index) and geographic variables (altitude, latitude and longitude) in three time lag periods defined according to the mosquito's life cycle (no time lag, five-day lag and seven-day lag). Surveillance by the Secretaría de Salud del Cauca, is conducted in 34 of the 42 municipalities in total, the remaining eight municipalities to date in 2017 were found negative: Almaguer, Jambaló, La Vega, Puracé, San Sebastián, Silvia, Sotaró and Totoró. In the 34 municipalities, 394 points were geographically located among which are neighborhoods, villages, townships and an indigenous reservation. Daily climatic information (precipitation, minimum and maximum temperature) was obtained from the Flood and Drought Monitoring System for Latin America and the Caribbean of Princeton University. The average temperature and relative humidity percentage were calculated according to the methodology of Allen *et al.* 2006. The climatic classification of the study area was carried out using the Ombrothermic diagram or Gaussen index and the Lang index. The multiple linear regression *model* included the georeferencing of the sampling points within the set of explanatory variables and the new transformed variable of the pupae/person index, which is characterized by a range between zero and 0,49. The explanatory variables that, according to the model, best explained the pupae/person index were: latitude, Lang index, altitude, temperatures without time lag and with a time lag of five days: maximum, minimum and mean temperature. In addition, a simple linear regression (R^2 of 0,97) between the values of the temperatures without time lag (maximum, mean and minimum) that were significant in the model and the altitude records of the 394 geographical points, and in order to predict the values of the temperatures without time lag (maximum, mean and minimum), including the increase of +2,15°C, which is expected to increase in the Pacific region by the end of the century according to the Average Ensemble Scenario (2071-2100) of climate change of the IDEAM, for the Digital Elevation Model (DEM) of the study area. Finally, based on the average temperature range that characterizes the regions of Colombia where endemic dengue transmission occurs, the average temperature values obtained were classified as follows: temperatures below 15,90°C (low risk), as moderate risk the range defined between 15,90°C – 17,9°C, and the range between 17,90°C and 26,60°C was classified as high risk. With these levels, the

geographic regions were classified for the interpolation surfaces of the 2017 temperature and its respective 2,15°C increase. It was found that the level of risk classified as low corresponds mostly to the geographical region represented by the Cordillera Central de los Andes, an area where part of the negative municipalities for 2017 are located (Silvia, Totoró, La Vega, Almaguer, Jambaló, San Sebastián, Sotará and Puracé), and it is there where it is observed that by the end of the century there would be the greatest decrease in the area classified without risk and how the regions bordering this mountain range would be considered from moderate to high risk. For these reasons, it is suggested to generate sampling and analysis protocols that include the pupae index, data on climatic and meteorological variables, and the spatial distribution of the vector in order to have a better approximation of the level of risk in geographical regions with or without the presence of the vector and thus contribute to the prevention and control of the diseases transmitted by them.

Keywords: Spatial analysis, public health, disease vectors, Colombia.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVI
Introducción	17
Enfoque de Investigación	26
1.1 Planteamiento del problema.....	26
1.2 Pregunta de investigación	28
1.3 Hipótesis	29
1.4 Objetivos.....	29
Marco teórico y estado del arte	30
1.1 Enfermedades transmitidas por vectores (ETV's).....	30
1.1.1 Control de la transmisión de dengue y Vigilancia Entomológica de <i>Aedes aegypti</i>	32
1.1.2 Índice Entomológico (Pupa/persona).....	33
1.1.3 Ciclo de vida y biológico del mosquito <i>Aedes aegypti</i>	34
1.2 Meteorología, clima y cambio climático	36
1.3 Relación entre las variables climáticas y meteorológicas con el mosquito <i>Aedes aegypti</i>	40
1.4 Modelo Regresión Lineal Múltiple de datos georreferenciados	42
1.5 Aplicación de la geomática en la epidemiología.....	43
Metodología	48
1.6 Área de estudio.....	54
1.6.1 Datos entomológicos	55
1.6.2 Datos geográficos y de relieve.....	55
1.6.3 Datos Meteorológicos.....	57
1.6.4 Análisis complementario de los datos meteorológicos.....	58
1.6.5 Datos meteorológicos rezagados.....	60
1.7 Resultados.....	61
1.7.1 Clasificación climática del área de estudio	61
1.7.2 Ombrotérmico de Gaussen	61
1.7.3 Índice Lang	63
1.7.4 Transformación de la variable respuesta y matriz de correlación de Pearson	65

1.7.5	Resultados y análisis de la regresión lineal múltiple	68
1.7.6	Resultados y análisis de las regiones geográficas con mayor riesgo para la presencia del mosquito <i>Aedes aegypti</i>	68
Discusión, conclusiones y recomendaciones		73
1.8	Discusión	73
1.9	Conclusiones	80
1.10	Recomendaciones.....	82
A.	Clasificación de Caldas	84
B.	Clasificación climática de Lang.....	84
C.	Clasificación de Caldas – Lang	85
D.	Diagramas Ombrotérmico de Gaussen	87
E.	Base de datos del proyecto.....	97
F.	Resultado de la correlación entre el índice pupa/persona transformado y las variables ambientales sin rezago y con rezago temporal de cinco y siete días.....	99
G.	Resultado del modelo de regresión lineal múltiple.....	101
H.	Diferencia geográfica del incremento de la temperatura promedio de 2,15°C en las temperaturas mínima, media y máxima del año 2017 bajo el escenario del cambio climático para final de siglo.....	103
Bibliografía		107

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ciclo de vida del mosquito <i>Aedes aegypti</i> (Fuente: Rossi & Almirón, 2004)	35
Figura 2. Diagrama metodológico.....	53
Figura 3. Área de estudio. Ubicación del departamento del Cauca, Colombia	54
Figura 4. Ubicación geográfica de los municipios negativos para la presencia de <i>Aedes aegypti</i> , puntos de muestreo y Modelo Digital de Elevación (MDE) en el departamento del Cauca.....	56
Figura 5. Definición de los periodos de rezago temporal con base en la duración promedio del ciclo de vida del mosquito <i>Aedes aegypti</i> (Fuente: Rossi & Almirón, 2004)60	60
Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas del IDEAM en el área de estudio62	62
Figura 7. Ombrotérmico de Gaussen o climograma para la estación ubicada en el municipio de Miranda.....	63
Figura 8. Índice de Lang elaborado con los promedios climatológicos del IDEAM (1981-2010)	64
Figura 9. Matriz de correlación Pearson	67
Figura 10. Temperatura media del año 2017 y el incremento de 2,15°C en la temperatura media del año 2017 bajo el escenario de cambio climático proyectado para finales del siglo en el departamento del Cauca.....	70
Figura 11. Regiones geográficas con mayor riesgo para la presencia del mosquito <i>Aedes aegypti</i> generadas a partir de la temperatura media del año 2017 y del incremento de 2,15°C estimado para final de siglo para la temperatura media.....	71

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Descripción de la variable respuesta y de las variables explicativas	49
Tabla 2. Coordenadas geográficas de las estaciones de Cenicaña	58
Tabla 3. Clasificación del nivel de riesgo.....	71
Tabla 4. Correlación entre el índice pupa/persona transformado y las variables ambientales sin rezago y con rezago temporal de cinco y siete días	99
Tabla 5. Coeficientes y nivel de significancia de las variables ambientales (independientes) del modelo de regresión lineal múltiple sin rezago temporal, rezago temporal de cinco y siete días.....	101

Introducción

El aumento de la temperatura atmosférica global se ha evidenciado desde hace aproximadamente 300 años (Reiter, 2001) y en las últimas diez décadas, se ha presentado un incremento de 0,7°C y se estima que aumente entre 1,0°C a 3,5°C adicionales en los próximos 100 años (Yi *et al.*, 2014). Para Colombia, si las emisiones globales de Gases Efecto Invernadero (GEI) aumentan, la temperatura media anual del país podría incrementarse de manera gradual en 2,14°C aproximadamente y en el caso puntual de la región del pacífico se esperaría un cambio en la temperatura promedio de +2,15°C a finales del siglo (IDEAM & PNUD, 2015a). Dentro de las principales consecuencias del incremento paulatino de la temperatura en la salud humana se encuentra el impacto que generaría el cambio y la variabilidad climática en el aumento de la transmisión de las enfermedades transmitidas por vectores (ETV), entre las cuales se encuentran las arbovirosis (virus transmitidas por artrópodos) (Reiter, 2001; Singh, 2014; Wiwanitkit, 2009).

La relación entre el cambio y la variabilidad climática con los arbovirus, se fundamenta en que la abundancia - distribución de vectores y la dinámica de la transmisión de los virus se ven influenciados por diferentes factores climáticos tales como la precipitación, la temperatura y la humedad (Reiter, 2001; Heinisch *et al.*, 2019). Los cambios que se pueden evidenciar en los factores climáticos a nivel global a causa del incremento de la temperatura superficial de la tierra podrían contribuir con el aumento de la distribución geográfica (latitud y altitud) de especies de mosquitos vectores de virus a regiones consideradas de bajo riesgo para transmisión o sin presencia de estos mosquitos y por consiguiente un aumento en la incidencia de casos de enfermedades reemergentes y emergentes tales como el

dengue (DENV) , el chikungunya (CHIKV) y Zika (ZIKV) (Padilla *et al.*, 2012; Ramírez *et al.*, 2013) Las cuales son consideradas un problema de la salud pública en gran parte del territorio colombiano por el número de casos nuevos (incidencia) que se presentan (CDC, 2016; Adin *et al.*, 2018).

El principal vector transmisor de estas arbovirosis es el mosquito *Aedes aegypti* (L.), aunque también el mosquito *Aedes albopictus* (S), es considerado vector de estos virus (Carvajal *et al.*, 2016; Olano, 2016). Estas enfermedades son consideradas de importancia en salud pública no solo en Colombia sino a nivel mundial (CDC, 2016), sin embargo, el dengue hace parte de las enfermedades infecciosas que de acuerdo al análisis de datos históricos y de modelos predictivos, evidencian un incremento en el número de casos y un aumento de regiones geográficas donde se pueden presentar epidemias bajo escenarios de cambio climático (Singh, 2014).

Según estimaciones, la población en riesgo de contraer dengue a nivel mundial se encuentra entre un 30 a 55% y posiblemente la cifra aumente teniendo en cuenta las variaciones climáticas que se han considerado en proyecciones globales (Brady *et al.*, 2012). De acuerdo con esto, algunas proyecciones señalan que para el año 2050 gran parte del sudeste de Estados Unidos y probablemente regiones altas del centro de México, el interior de Australia, ciudades de la costa oriental de China y Japón y América Latina se encuentren en riesgo de transmisión de dengue (Colón-González *et al.*, 2018; Messina *et al.*, 2019).

En Colombia, el dengue es una enfermedad endémica con brotes epidémicos cada cuatro años (Arboleda, Jaramillo-O, & Peterson, 2012), aunque dicha periodicidad se ha visto afectada por el cambio climático y su intervalo regular se ha vuelto más corto (López *et al.*, 2018). Adicional a esto, se considera a la epidemia del año 2010 como la más grande a causa del drástico incremento en el número de casos, pasando de 9745 en el año 1992 a reportarse 151774 y 217 muertes a nivel nacional (Castrillón *et al.*, 2015). Los años 2013 y 2016, también se consideraron

como epidémicos (INS, 2017a). En el 2017, se registraron un total 25284 (casos probables, confirmados por nexo y laboratorio) de dengue, y a diferencia de los años anteriores, el reporte a nivel nacional a lo largo del año según el canal endémico estuvo por debajo de los 1000 casos que corresponde aproximadamente al límite inferior de casos esperados comparado con el comportamiento epidemiológico histórico (2009-2016). El departamento del Cauca hizo parte del grupo de las entidades territoriales que estuvieron por debajo de lo esperado, registrándose un total de 100 casos para este año (INS, 2017b).

La incidencia del dengue desde 1978 hasta el año 2016 ha fluctuado con tendencia al incremento, registrándose 143 casos en el año 1978, 326 en 1998, 657 (2010) y en el 2016, 476 casos por 100000 habitantes (INS, 2017b). Por consiguiente, a pesar de las fluctuaciones que se presentan en la tasa de incidencia desde 1978, (INS, 2017b) esta enfermedad es considerada un tema prioritario de salud pública debido a la tendencia creciente hacia brotes epidémicos frecuentes y severos ocasionados por la reemergencia y transmisión intensa de esta enfermedad (Rico-Mendoza *et al.*, 2019). La enfermedad del dengue es causada por el virus del dengue (DENV) que pertenece al serocomplejo dengue, familia *Flaviviridae*, conformado por cuatro serotipos denominados DENV1, DENV2, DENV3 y DENV4 (OMS, 2020a; Velandia & Castellanos, 2011).

Dentro de los lugares de importancia epidemiológica diferentes al hogar se encuentran los colegios, escuelas, hospitales entre otros, como ambientes de alto riesgo para la transmisión de enfermedades (OMS *et al.*, 2010). Investigaciones realizadas en escuelas del área rural de Cundinamarca señalan la importancia del estudio en estas regiones donde las deficiencias en el abastecimiento de agua y en la recolección de residuos sólidos generan un aumento de criaderos potenciales del mosquito *Aedes aegypti* (Cabezas & Salas, 2012; Olano *et al.*, 2015). Como se puede evidenciar, además de factores climáticos, existen otros factores

socioculturales, económicos que influyen de manera indirecta en el aumento y proliferación del mosquito y de las diferentes enfermedades que transmite este.

Sumado a lo anterior, se encuentran los factores bióticos y abióticos, y como la interacción de estos influyen dentro del hábitat de reproducción de los mosquitos. Estos hábitats se caracterizan por contar con un conjunto diversificado de microbiotas naturales, que interactúa a su vez con las larvas de los mosquitos a través de relaciones de parasitismo, patogenismo, depredación y competencia que influyen en la mortalidad y reducción natural de la abundancia de las larvas (Ranasinghe & Amarasinghe, 2020). En relación con las características abióticas de los sitios de cría, se ha evidenciado que la densidad de las larvas en un hábitat se ve afectada por la vegetación, la temperatura, la turbidez, el pH, entre otros y para el caso de los factores bióticos asociados con los hábitats de los mosquitos, se registran especies de bacterias, hongos, nematodos, entre otros, que influyen en la densidad de las formas inmaduras de los mosquitos (Ranasinghe & Amarasinghe, 2020).

El dengue hace parte del grupo de enfermedades de transmisión vectorial más importantes por el número de personas infectadas y que son sensibles al clima en América del Sur (López *et al.*, 2018). Sumado a esto, también se encuentra la influencia de variables socioeconómicas, demográficas (Mondini & Chiaravalloti-Neto, 2008; Wenbiao Hu *et al.*, 2012), movilidad poblacional y la creciente tendencia de urbanización no planificada (Wenbiao Hu *et al.*, 2012). Para el caso puntual de Colombia, el desplazamiento forzado y deficiencias en el acceso a la educación contribuyen con la incidencia del dengue debido a la movilización constante de las personas (Restrepo *et al.*, 2014).

Hoy en día no existe vacuna conocida para las enfermedades del Chikungunya y Zika, con respecto a la primera vacuna contra el dengue Dengvaxia (R) (CYD-TDV) desarrollada por Sanofi Pasteur y licenciada a finales del año 2015 (Recker *et al.*, 2016), se encontró que debido a la falta de evidencias en cuanto a temas de

seguridad y efectividad, el Grupo Técnico Asesor de Inmunizaciones (GTA) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) no recomienda la introducción de esta vacuna dentro de los programas nacionales de inmunización de los países (OPS & OMS, 2015). Por lo tanto, gran parte de su prevención se concentra en la vigilancia pasiva de los casos clínicos dentro de la vigilancia epidemiológica y en el control y monitoreo del mosquito a través de los tres índices de infestación tradicionales para *Aedes aegypti* de la vigilancia entomológica a partir de la presencia o ausencia de los estadios inmaduros larvas y pupas en sitios de cría del mosquito (Alcalá *et al.*, 2015): i) índice de depósitos, que relaciona los recipientes positivos con el total de recipientes inspeccionados, ii) el índice de viviendas que tiene en cuenta las casas positivas y el total de casas inspeccionadas y el iii) índice de Breteau que relaciona el número de recipientes por cada 100 viviendas inspeccionadas (OPS, 1995). Es importante resaltar que los estadios inmaduros no necesariamente llegan a ser adultos debido a la mortalidad que se presenta en cada estadio.

Cada programa de vigilancia presenta falencias; en relación a la vigilancia entomológica no se tienen en cuenta lugares diferentes a la vivienda (colegios, hospitales) que son de importancia para la transmisión de enfermedades y en relación con los índices de infestación tradicionales se ha encontrado que estos no reflejan consistentemente el riesgo de la enfermedad dada la escasa evidencia de asociaciones cuantificables entre la densidad del vector y la transmisión del dengue (Bowman *et al.*, 2014; OMS, 2000). Cabe resaltar que el índice de adultos actualmente no se tiene en cuenta dentro de la vigilancia siendo este una medida más directa de la exposición a la transmisión del dengue (Bowman *et al.*, 2014; Focks *et al.*, 2004). También se encuentra el índice pupa/persona que se calcula a partir de la cantidad de pupas encontradas en las viviendas con respecto al número de habitantes en las mismas (Alcalá *et al.*, 2015). Aunque, este índice a diferencia

de los tradicionales, da una mejor estimación de la población adulta (CDC, 2016), no ha sido incluido en todos los sistemas de vigilancia entomológica del país.

Dentro de la vigilancia epidemiológica actualmente se están dejando de lado las posibles infecciones asintomáticas o con síntomas atípicos y por tanto no se cuenta con el número real de casos de dengue (Bowman *et al.*, 2014). Es importante resaltar que aproximadamente, tres cuartas partes de las infecciones por dengue son asintomáticas lo que contribuye con la carga de la enfermedad del dengue y por lo tanto su importancia (Chatchen *et al.*, 2017). La infección asintomática hace referencia a infecciones recientes en pacientes que no presentan los síntomas clínicos de la enfermedad del dengue y los síntomas atípicos se conocen como síntomas que no corresponden a la clasificación clínica con la que se cuenta para infección reciente (Hoyos-Rivera *et al.*, 2012). La infección sintomática se puede establecer clínicamente y confirmarse posteriormente con el diagnóstico por laboratorio, para el caso de la infección asintomática no existe un cuadro clínico para esta y por lo tanto es necesario que su detección se realice con el diagnóstico por laboratorio (Chatchen *et al.*, 2017).

Finalmente, en ninguno de los sistemas de vigilancia (entomológica y epidemiológica) para la prevención y el control de las enfermedades virales transmitidas por el mosquito se incluye la ubicación geográfica de las viviendas muestreadas con o sin presencia del mosquito, ni tampoco la ubicación de donde se presentan los casos de estas enfermedades. La importancia de incluir la ubicación geográfica tanto de lugares con presencia o no de los mosquitos y de los casos de las enfermedades virales transmitidas por estos recae en que a partir del análisis espacial dentro de la epidemiología se genera una mejor aproximación de las posibles causas o determinantes de las enfermedades en general (Pfeiffer *et al.*, 2008).

Por tales razones, dentro de la vigilancia entomológica se sugiere generar protocolos de muestreo en donde se considere el índice de pupas, de formas

adultas, datos de variables climáticas y la distribución geográfica del vector para tener una mejor aproximación al nivel de riesgo de la población expuesta (Bowman *et al.*, 2014) y con base en esto, desarrollar estrategias de prevención y control adecuadas dentro de la vigilancia epidemiológica tanto del mosquito como de las enfermedades que transmite este.

De acuerdo con esta importancia, el presente estudio además de conocer la distribución del mosquito a través de la transformación del índice pupa/persona [T (pupa/persona)]; buscó estimar la relación que puede existir entre este mismo índice y las variables geográficas (altitud, latitud y longitud) y climáticas principales y derivadas como la precipitación, porcentaje de humedad relativa, temperatura media, máxima y mínima, y el índice Lang en el departamento del Cauca. La información corresponde al muestreo del año 2017 realizado por la Secretaría de Salud Departamental del Cauca, y se resalta que en este año, el departamento comenzó a implementar el índice pupa/persona dentro de su sistema de vigilancia. A nivel nacional dentro del sistema de vigilancia hasta la fecha en que se realizó el muestreo del año 2017 no se ha incluido la ubicación geográfica como variable de interés.

Para cumplir con este objetivo se utilizó la transformación del índice pupa/persona calculado a partir de información entomológica recolectada en 34 municipios por la Secretaría de Salud Departamental del Cauca, cabe aclarar que el departamento cuenta con 42 municipios en total, es decir; que en el momento de realizar el muestreo, los ocho municipios restantes para el año 2017, se encontraban negativos para la presencia del mosquito *Aedes aegypti* y fueron los municipios de Almaguer, Jambaló, La Vega, Puracé, San Sebastián, Silvia, Sotará y Totoró. Se ubicaron geográficamente un total de 394 puntos, entre los cuales se encuentran barrios, veredas, corregimientos y un resguardo indígena. La altitud de cada punto geográfico se obtuvo a partir del

modelo digital de elevación de 12,5 metros. La información climática diaria (precipitación, temperatura mínima y máxima) se obtuvo del Sistema de Monitoreo de Inundaciones y Sequías de América Latina y el Caribe de la Universidad de Princeton. El cálculo de la temperatura media y del porcentaje de humedad relativa se realizó según la metodología de Allen *et al* 2006. Con esta información se calcularon tres periodos de rezago temporal (sin rezago temporal, rezago de cinco días y de siete días, de acuerdo con la duración del ciclo de vida del mosquito. La definición de estos rezagos temporales se hizo con el fin de contar con la influencia de las variables meteorológicas (acumulado de la precipitación y el promedio de las temperaturas y la humedad de días atrás en el ciclo de vida del mosquito.

Para estimar la relación entre las variables de interés en los respectivos rezagos temporales, se exploraron los modelos de regresión espacial de la estadística paramétrica, siguiendo la metodología descrita por Arbia en el año 2014, y se ajustaron inicialmente los modelos: Spatial Autoregressive Model with Autoregressive Disturbances of Order (1,1) [SARAR(1,1)], Spatial Error Model (SEM), Spatial Lag Model (SLM) y Pure Spatial Autoregressive Model. Posteriormente, tomando como referencia la metodología descrita por Brunson del año 1996 y Charlton & Fotheringham del 2008, se exploró la técnica de regresión espacial no paramétrica denominada regresión ponderada geográficamente (siglas en inglés GWR). Sin embargo, en ninguno de los modelos mencionados se cumplió con el supuesto de distribución normal en los residuales. Por tal razón, se optó por transformar la variable respuesta (índice pupa/persona) con la transformación para modelos lineales denominada “Yeo Johnson” y la estimación del parámetro óptimo se realizó con el método de máxima verosimilitud de la librería Trafo (Medina *et al.*, 2018). Finalmente, a partir de un estudio realizado en el año 2013 por Yang *et al*, se ajustó el modelo de regresión lineal múltiple donde se incluyeron las coordenadas en el conjunto de las variables independientes (Yang *et al*, 2013). Se obtuvieron como variables significativas la altitud, latitud, el índice Lang y las temperaturas (máxima, mínima y media) en el rezago temporal de cinco

días y sin rezago. La definición de los criterios para incluir los rezagos temporales en el análisis se realizó tomando como base los siete días que toma en promedio el desarrollo desde el huevo hasta la pupa del mosquito y teniendo en cuenta la necesidad de incluir la influencia de las variables meteorológicas registradas los cinco y siete días antes del muestreo en la supervivencia hasta el estadio de pupa del mosquito *Aedes aegypti* (López *et al.*, 2018). Las salidas gráficas de los mapas resultantes se realizaron con el programa ArcMap 10.8.1 (Esri Inc, 2020a).

Enfoque de Investigación

1.1 Planteamiento del problema

La incidencia de enfermedades transmitidas por mosquitos, incluido el dengue han tenido un incremento durante el trienio 2008-2010, y para el año 2010 la incidencia de esta enfermedad presentó un aumento en 510,3 casos por cada 10.000 habitantes y una letalidad de 2,26 muertes por cada 100 personas diagnosticadas (MinSalud, 2013). Dentro del Plan Decenal de Salud Pública se espera que para el presente año 2021 la letalidad por dengue grave sea menor al 2% y por tanto dentro de los objetivos definidos para cumplir con dicha meta se encuentra la reducción de la carga y la discapacidad que generan las ETV en la población colombiana a través de la implementación, monitoreo, evaluación y seguimiento de la estrategia de gestión integral para las ETV (MinSalud, 2013). Es importante resaltar que para el mes de febrero del año 2021, a raíz de la pandemia por COVID-19, no se encontró información en cuanto al seguimiento y resultados del Plan Decenal. También se resalta que durante los años 2014 y 2015 se reportó el ingreso al país de los nuevos virus Chikungunya y Zika y rápidamente se declararon como epidemias de interés internacional dada la asociación del virus del Chikungunya con la artritis (Pineda *et al.*, 2016) y del virus del Zika con microcefalia y el síndrome de Guillain-Barré (Cayla *et al.*, 2016).

Actualmente existen los índices entomológicos (índice de Breteau, de depósitos y de vivienda) que son los indicadores de infestación del vector y con estos se

monitorea la densidad del vector y las actividades de control de la enfermedad (Morales-Pérez, *et al.*, 2020); este seguimiento entomológico se basa en el supuesto de que una mayor abundancia de mosquitos aumenta el riesgo de transmisión de enfermedades y por tanto una menor exposición conlleva a una disminución del riesgo de infección (Cromwell *et al.*, 2017).

Sin embargo, algunos estudios señalan que estos indicadores no reflejan el riesgo real de transmisión de la enfermedad dado la multicausalidad de esta (Arboleda *et al.*, 2012, Bowman *et al.*, 2014, Regis *et al.*, 2009) y tampoco se ha establecido el valor de estos índices como predictores de la enfermedad del dengue (Morales-Pérez, *et al.*, 2020). Actualmente, se resalta la medición de la productividad de *Aedes aegypti* a través del índice de pupas como herramienta útil para el control del vector, debido a que el estadio de la pupa presenta una baja mortalidad, no se alimenta y es el último estadio que se presenta antes de convertirse en adulto y por lo tanto se relaciona directamente la densidad de mosquitos que transmiten virus (Focks *et al.*, 2004; Tibayrenc, 2007; Alcalá *et al.*, 2015). Con el enfoque de análisis espacial, dicho índice o alguna transformación de esta variable contribuyen a una mejor interpretación de la dinámica espacial de esta enfermedad al aportar a la toma de decisiones basadas en la evidencia y la formulación de políticas para la prevención y control de estas enfermedades (Singh, 2014).

El incluir la ubicación geográfica dentro de la epidemiología permite desarrollar metodologías de utilidad como la geocodificación, movilidad residencial, agrupación espacial y espacio-temporal (Kirby *et al.*, 2017). A partir de dichas metodologías se busca encontrar posibles explicaciones y predicciones tanto de indicadores como de enfermedades de importancia en salud pública como lo es el dengue (Eisen & Lozano-Fuentes, 2009; Nunes and Taylor, 2016). Dentro de la utilidad que se encuentra se resalta el uso de tecnologías SIG y de técnicas de análisis estadístico espacial a los programas de control vectorial y específicamente del dengue, con el fin de establecer áreas prioritarias y épocas de mayor riesgo

para enfocar las estrategias de control de vectores y a la vez explorar posibles asociaciones socioeconómicas con el riesgo de dengue (Eisen & Lozano-Fuentes, 2009).

Dada la influencia directa o indirecta de diferentes factores climáticos, socioculturales, geográficos y económicos en las enfermedades transmitidas por vectores y que se han evidenciado en estudios; resulta necesario el uso de metodologías que permitan contemplar dicha influencia y que alimenten la construcción de modelos que generen una mejor representación de la realidad. Sumado a esto, se resalta la importancia de explorar diferentes alternativas para modelar dichas relaciones, donde se incluyan tanto variables geográficas como a variables climáticas, dado que se puede conocer de manera espacial qué regiones y épocas en el año pueden representar un mayor riesgo y con base en esto establecer estrategias de priorización para dichas áreas y periodos de tiempo. A través de la metodología la regresión lineal múltiple para datos georreferenciados, se pretende relacionar la influencia o dependencia que existe entre el índice pupa/persona con las variables geográficas (latitud, longitud, altitud), climáticas principales como: precipitación, humedad relativa y la temperatura (máxima, mínima y media) y la variable climática derivada del índice Lang, en el departamento del Cauca para el muestreo que se realizó en el año 2017.

1.2 Pregunta de investigación

De acuerdo con lo expuesto, para el desarrollo del presente estudio, se definió la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál asociación se puede establecer entre el índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) con variables ambientales, mediante el modelado de regresión lineal múltiple de datos georreferenciados?

1.3 Hipótesis

Ho: No existe asociación entre las variables climáticas principales y derivadas (precipitación, humedad relativa, temperatura media, máxima y mínima, índice de Lang) y las variables geográficas (altitud, longitud y latitud) con el índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* o con la transformación del mismo.

1.4 Objetivos

▪ General

- Analizar la distribución espacial del mosquito *Aedes aegypti*, a partir de la transformación del índice entomológico (pupa/persona) y su relación con variables geográficas (altitud latitud y longitud) y climáticas principales y derivadas (temperatura, humedad relativa, precipitación, índice de Lang), para el año 2017 en el departamento del Cauca.

▪ Específicos

- Estimar un modelo con la transformación del índice pupa/persona y su relación con variables geográficas y climáticas principales y derivadas (altitud, latitud, longitud, temperatura media, máxima y mínima, porcentaje de humedad relativa, precipitación, índice Lang) del departamento del Cauca.
- Delimitar zonas de riesgo con base en los factores climáticos y geográficos que se encuentran asociados en el modelo generado con la transformación del índice pupa/persona.

Marco teórico y estado del arte

1.1 Enfermedades transmitidas por vectores (ETV's)

Dentro de las enfermedades infecciosas se encuentran las enfermedades transmitidas por artrópodos como insectos, arañas y crustáceos. Según la clasificación taxonómica, los mosquitos hacen parte de la Clase Insecta, Orden Díptera y Familia Culicidae y son vectores de un gran número de microorganismos que causan enfermedades en el ser humano como lo son bacterias, virus, protozoos, entre otros (Lerner, 2008). Las enfermedades transmitidas por artrópodos se caracterizan por generar en los seres humanos desde síntomas que incluyen la gripe hasta la muerte y en algunos casos puede ocasionar secuelas crónicas o incapacitantes en las personas que sobreviven a estas enfermedades (Hay *et al.*, 2006; Lerner, 2008; OMS, 2020a; OMS, 2020b). Los países tropicales, muchos de ellos considerados en vía de desarrollo, son los más afectados aunque estas enfermedades son consideradas como un problema de gran importancia a nivel internacional (Lerner, 2008).

El dengue es una enfermedad viral transmitida por mosquitos, endémica en más de 100 países y según la Organización Mundial de la Salud (OMS) alrededor de la mitad de la población del mundo se encuentra en riesgo y se estima que cada año se presentan entre 100 y 400 millones de infecciones (WHO, 2020a). El virus del dengue (DENV) es un arbovirus del género *Flavivirus* de la familia *Flaviviridae*; existen cuatro serotipos DENV1, DENV2, DENV3 y DENV4 (Tibayrenc, 2007; Velandia & Castellanos, 2011; OMS, 2020a) y en algunos países como Bolivia,

Birmania, Indonesia, incluyendo a Colombia, se ha evidenciado la transmisión de este virus del mosquito hembra infectado a su progenie (Khin & Than, 1983; Kow *et al.*, 2001; Tibayrenc, 2007; Velandia-Romero *et al.*, 2017; Rúa-Uribe *et al.*, 2020) y la circulación simultánea de los cuatro serotipos en áreas rurales y urbanas del país (Alcalá *et al.*, 2015; Pérez-Castro *et al.*, 2016).

La infección por cualquiera de los cuatro serotipos del dengue, después que un mosquito infectado pica a un ser humano, y luego de un periodo de incubación de entre cinco y siete días, los pacientes pueden desarrollar síntomas como dolor de articulaciones, fiebre, dolor de cabeza, entre otros. Para el caso del dengue grave se presentan de forma adicional hemorragias y como se mencionó anteriormente, puede causar la muerte si no se dispone de los cuidados necesarios (Hay *et al.*, 2006; Tibayrenc, 2007; Lerner, 2008).

En relación con el mosquito *Aedes aegypti*, este es vector de los virus del Zika, Chikungunya, Mayaro y Oropuche (CDC, 2016; Adin *et al.*, 2018), no obstante, es conocido como el vector principal de la fiebre amarilla urbana y del dengue. Los mosquito machos se alimentan de sustancias azucaradas a diferencia de la hembra que se alimenta de sangre (hematofagia) para el desarrollo de los huevos y la transmisión de los virus se da cuando la hembra pica a una persona infectada y posteriormente transmite el virus a otras personas (Rossi & Almirón, 2004; Hay *et al.*, 2006; Tibayrenc, 2007; Lerner, 2008). Este artrópodo se encuentra presente en la región del trópico y se caracteriza por estar estrechamente relacionado con asentamientos urbanos debido a que se reproduce en recipientes de agua limpia y de diversos tamaños (frascos, macetas, latas, neumáticos, entre otros) y el aumento de la densidad poblacional en ciudades contribuye a su vez con los criaderos potenciales (recipientes de agua limpia) como uno de los principales factores.

Asimismo, las deficiencias que se presentan en áreas urbanas y rurales de Colombia en cuanto al abastecimiento de agua para consumo y la recolección de

los residuos sólidos han obligado a las comunidades a almacenar el agua en diferentes contenedores y a disponer o quemar a cielo abierto los residuos que a su vez pueden almacenar agua lluvia y por lo tanto se está contribuyendo con el aumento de los criaderos potenciales del mosquito en estas regiones del país (Cabezas & Salas, 2012; Olano *et al.*, 2015).

1.1.1 Control de la transmisión de dengue y Vigilancia Entomológica de *Aedes aegypti*

La Estrategia de Gestión Integrada (EGI) para la prevención y control del dengue se generó con el fin de abordar de manera integral la compleja situación epidemiológica y que a la vez garantizara una adecuada prevención y control de la transmisión del dengue al considerar los siguientes aspectos característicos: i) los cuatro serotipos del virus del dengue y posibilidad de una persona de contraer la enfermedad cuatro veces en su vida; ii) el no contar con un tratamiento farmacológico ni vacuna eficaz; iii) limitación en cuanto al uso de métodos diagnósticos por serología debido a la reacción cruzada entre los anticuerpos IgM/IgG de los virus del dengue y del Zika, lo que dificulta la vigilancia epidemiológica y la confirmación por laboratorio; iv) la amplia distribución geográfica y adaptación del mosquito *Aedes aegypti* a la vida doméstica y finalmente, v) estudios han evidenciado que la proliferación del mosquito se ve influenciada por el cambio climático, la globalización, la pobreza, la urbanización desorganizada, deficiencias en los servicios de recolección de residuos sólidos y en los sistemas de abastecimiento de agua (OPS, 2017).

Dentro de los productos de la estrategia que se generaron para mejorar integralmente la vigilancia y la atención médica se encuentran: el protocolo de vigilancia integral epidemiológica para dengue y el documento “Dengue: Guía de atención para enfermos en la Región de las Américas” (OPS & OMS, 2016). El enfoque integrado y multidisciplinario de la Estrategia de Gestión Integrada (EGI)

para la prevención y control del dengue ha resultado ser de gran utilidad en la gestión para la prevención y organización de la respuesta frente a brotes, epidemias y en periodos interepidémicos (San Martín & Brathwaite, 2007). Específicamente, la EGI realiza la debida gestión de la vigilancia en salud pública a través del seguimiento epidemiológico, y por laboratorio (viroológica, serológica y entomológica); atención a pacientes; control integrado de vectores; promoción y prevención (INS & OPS, 2012).

Dentro la vigilancia entomológica del vector se establece la cantidad de mosquitos que existen en un lugar y tiempo determinado y se capturan para su posterior identificación (INS & OPS, 2012). Dentro de los métodos que existen para determinar la abundancia de *A. aegypti*, se encuentran los índices larvarios (viviendas, recipientes, Breteau), estimaciones de densidad absoluta (aspiración de mosquitos adultos, muestreos de pupas, entre otras), densidad relativa (trampas de oviposición y para mosquitos adultos, etc). A pesar de que existen diferentes indicadores entomológicos, la evaluación del control del mosquito se ha visto limitada porque algunos indicadores no son prácticos y confiables (Barrera, 2016).

1.1.2 Índice Entomológico (Pupa/persona)

Dentro de la vigilancia entomológica del mosquito *Aedes aegypti*, se encuentran los índices de infestación que incluyen el índice de pupa/persona y a diferencia de los índices tradicionales, además de determinar la infestación del vector a partir de la presencia o ausencia de pupas en sitios de cría del mosquito, se busca relacionar dicha infestación con los habitantes (Alcalá *et al.*, 2015). Este índice puede calcularse por casa, por persona y por hectárea, para el primer caso, este índice se obtiene a partir de la cantidad de pupas encontradas en las viviendas con respecto al número de habitantes en las mismas y el índice de pupas por hectárea hace referencia a la densidad del vector por unidad de área de un espacio público

(Alcalá *et al.*, 2015). Dicho índice provee una mejor estimación de la población adulta que los índices tradicionales (índice de Breteau, índice de depósitos y el índice de vivienda) (CDC, 2016) y también permite la definición de zonas que presentan un mayor riesgo de transmisión de dengue (Alcalá *et al.*, 2015). En relación con la definición de estas zonas se resalta la influencia de la densidad del vector en espacios públicos con las viviendas aledañas si se tiene en cuenta que el rango de vuelo aproximado del mosquito es de 100 metros (OPS, 1995), Los índices tradicionales, presentan limitaciones en su capacidad para reflejar la densidad aproximada de mosquitos adultos (Focks & Chadee, 1997; Nagao *et al.*, 2012). Teniendo en cuenta que las pupas no se alimentan y tienen una mortalidad baja antes de convertirse en adultos (Tibayrenc, 2007; Alcalá *et al.*, 2015), este índice permite evaluar las contribuciones relativas y absolutas de los distintos tipos de contenedores (Focks *et al.*, 2004) y por tal razón, el índice pupa/persona resulta ser más apropiado para evaluar el riesgo y orientar las estrategias de prevención y control (Focks & Chadee, 1997).

La definición de los umbrales de transmisión de los virus dengue (DENV), Chikungunya (CHIKV) y Zika (ZIKV) a partir de los índices larvales deben ser determinados por cada programa de control vectorial local, debido a la variación que puede existir entre las regiones (CDC, 2016). En relación al umbral para la transmisión de DENV, algunos modelos señalan que se necesita entre 0,5 y 1,5 mosquitos de *Aedes aegypti* (pupa por persona) y actualmente no hay información de los umbrales para transmisión para CHIKV y ZIKV (Arboleda *et al.*, 2012).

1.1.3 Ciclo de vida y biológico del mosquito *Aedes aegypti*

El ciclo de vida del mosquito vector se divide en la fase acuática que toma entre siete y trece días; en esta fase se desarrollan tres estados del ciclo biológico (huevo, larva y pupa) y la fase aérea se da cuando el mosquito emerge de su último

estado (pupa) a su forma adulta (figura 1) (Rossi & Almirón, 2004). El estado de la pupa se conoce como un periodo de transición, en la cual el insecto no se alimenta (Rossi & Almirón, 2004). Los adultos machos se alimentan de sustancias azucaradas y las hembras necesitan alimentarse de sangre (hematofagia) para desarrollar sus huevos. El mosquito *Aedes. Aegypti*, es una especie doméstica y antropófila porque prefiere picar al ser humano para alimentarse (Rossi & Almirón, 2004), no obstante, se ha encontrado que el néctar de las plantas es una fuente de alimento de las hembras (Barredo & DeGennaro, 2020). Dentro de los tipos de criaderos además de los naturales como plantas y árboles se encuentran depósitos artificiales de agua asociados al hombre como lo son las albercas o lavaderos, tanques, llantas, floreros, residuos sólidos, entre otros.

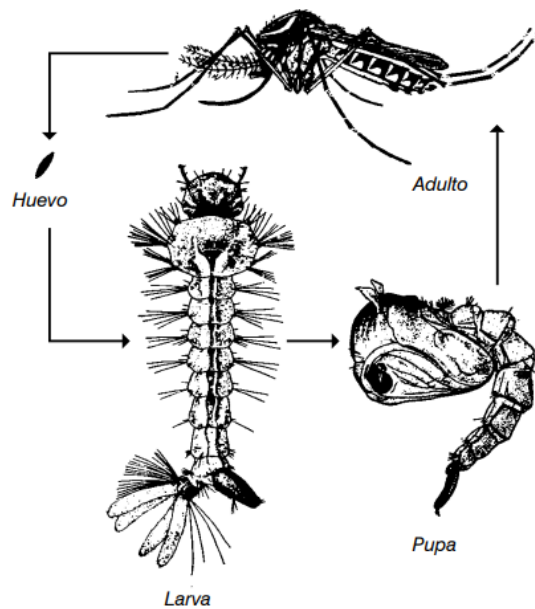


Figura 1. Ciclo de vida del mosquito *Aedes aegypti* (Fuente: Rossi & Almirón, 2004)

1.2 Meteorología, clima y cambio climático

A través de la meteorología y la climatología se estudian las causas y efectos de los fenómenos que ocurren en la atmósfera y se diferencian entre sí por la escala temporal de ocurrencia de los fenómenos; para el caso de la meteorología esta se encarga de estudiar fenómenos que duran días u horas y la climatología trata los promedios de las variables meteorológicas durante largos periodos de tiempo. El clima de un determinado lugar se puede definir como una descripción estadística del estado atmosférico durante un periodo de tiempo y se resalta que del clima dependen el tipo de suelo, la vegetación y la fauna, de ahí, la importancia de este para el ser humano (Zúñiga López & Crespo del Arco, 2010).

Dentro de las clasificaciones que se han definido para caracterizar el clima de una determinada región, se resalta la combinación de la temperatura y la precipitación a través de índices como el de Gausson mediante el cual se pueden definir los meses secos y lluviosos (Zúñiga López & Crespo del Arco, 2010). Con este índice se puede construir un climograma y obtener de manera gráfica la información climatológica anual de un área determinada (Zúñiga López & Crespo del Arco, 2010).

Para los países que se encuentran ubicados en la franja tropical, Francisco José de Caldas en 1802, generó una nueva clasificación del clima (Clasificación de Caldas) y a los rangos resultantes los denominó pisos térmicos. Esta clasificación se fundamenta en un factor térmico que relaciona la variación de la temperatura con la altura, en total se establecieron cinco pisos térmicos como se especifica en el anexo A (IDEAM, 2007; CVC, s.f).

Los índices climáticos en la bioclimatología buscan relacionar el clima con los seres vivos, para establecer dicha relación se usa principalmente la precipitación y la temperatura, dado que estos factores influyen en las condiciones de vida de los seres vivos y en la distribución de los ecosistemas (Zúñiga López & Crespo del

Arco, 2010). Dentro de estos índices se encuentra el índice Lang o pluviométrico que se conoce como el cociente entre la precipitación anual con la temperatura media (P/T). Con un valor entre cero y 20, según el índice Lang, el clima se clasifica en desiertos, de 20 a 40, son áreas áridas, entre 40 y 60, el clima es semiárido, semihúmedo (60-100), húmedo (100-160) y el clima superhúmedo corresponden a un índice de Lang mayor a 160 (Anexo B) (IDEAM, 2007; CVC, s.f).

En el año 1962, Schaufelberguer (IDEAM 2007), consolidó la clasificación de Caldas con la clasificación de Lang, generando 25 rangos de clima que incluye la altitud, la temperatura media anual y la precipitación total media anual (Anexo C) (IDEAM, 2007; CVC, s.f).

El cambio climático según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), se conoce como aquella modificación del balance climático a nivel global, ocasionado por la alteración en la composición atmosférica y que se asocia con la variabilidad natural o como resultado de las actividades humanas. Como ejemplo de las consecuencias de las actividades humanas se encuentra el calentamiento global que ha generado el aumento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Es importante resaltar que los GEI se encuentran de manera natural en la atmósfera y una de sus características es incrementar la temperatura global de la tierra para que se cuente con las condiciones óptimas para la vida en el planeta, dentro de los GEI se encuentran principalmente el dióxido de carbono (CO₂) y el vapor de agua, entre otros (IDEAM, 2014).

Con base en la problemática expuesta, el objetivo principal de la CMNUCC es que los países vinculados en la Convención, puedan estabilizar las concentraciones de los GEI en la atmósfera, y esto incluye aquellas acciones que se realicen para mitigar, adaptar, educar, entre otras, que contribuyan con la disminución de los GEI (IDEAM, 2017). Para lograr lo anterior, se crearon los Escenarios de Cambio

Climático mediante los cuales se busca generar representaciones del clima para diferentes épocas futuras basándose en el aumento esperado de las concentraciones de GEI, y aerosoles en la atmósfera (IDEAM & PNUD, 2015b).

En el año 2017, Colombia presentó sus Escenarios de Cambio Climático (RCP-AR5) realizados a partir de un Ensemble Promedio de Fiabilidad Conjunta (“Reliability Ensemble Averaging”, REA Method, por sus siglas en inglés), tomando como insumo 16 modelos globales que representan el clima del periodo de tiempo entre 1976 y 2005 como referencia, y que modelan la temperatura y precipitación hasta el año 2100 (IDEAM & PNUD, 2015b). Sumado a esto, se realizaron ensambles multimodelo y multiescenario, que permitieron promediar las respuestas de los cuatro RCP para cada uno de los tres periodos de tiempo considerados (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100), y finalmente, mediante el proceso de downscaling estadístico se obtuvo los resultados de manera regional (IDEAM & PNUD, 2015b).

Los resultados que se obtuvieron señalan que bajo el escenario de cambio climático en el que se contemplen acciones para la mitigación de GEI, se espera que para el año 2100, la temperatura a nivel global podría incrementarse aproximadamente en dos grados, cifra que podría aumentar si no se disminuye la producción de GEI (IDEAM & PNUD, 2015a).

Para el caso de Colombia, a finales del año 2100, si las emisiones globales de GEI aumentan, la temperatura media anual del país podría incrementarse de manera gradual en 2,14°C aproximadamente, y este aumento podría contribuir con el aumento del nivel del mar perjudicando las fronteras y las poblaciones que viven en estas, se afectarían también el abastecimiento de los acueductos de agua del país al reducirse el área de nevados, glaciares y páramos, se reduciría la productividad agropecuaria, aumentarían los fenómenos climáticos extremos y los efectos ocasionados por los fenómenos de variabilidad climática El Niño y La Niña

podrían tener un mayor impacto en algunos sectores de Colombia (IDEAM & PNUD, 2015a).

Tomando como base el periodo de referencia (1976-2005), en la región del pacífico donde se encuentra ubicado el departamento del Cauca bajo el Escenario Ensemble Promedio (2071-2100), se presentaría un cambio de la temperatura promedio de +2,15°C, incremento que afectaría principalmente la biodiversidad y los sistemas agrícolas de la región pacífica. Por otro lado, el porcentaje de cambio de la precipitación que se evidenciaría sería de +18,40%, afectando principalmente la región nororiente del Cauca, al contribuir con el aumento de la probabilidad de la ocurrencia de deslizamientos, la afectación de infraestructuras de servicios domiciliarios, oleoductos y viales, finalmente se podría presentar el desplazamiento de vectores donde se evidencie un aumento de temperatura y humedad (IDEAM & PNUD, 2015a).

Basados en lo anterior, el cambio que se presentaría a finales del siglo (2071-2100) para el departamento del Cauca se clasifica como un valor alto para la temperatura (+2,1°C), y como un exceso en la precipitación (+18,40%) para el porcentaje de cambio (IDEAM & PNUD, 2015b). Siendo la región suroccidente del departamento, donde se encuentran ubicados los municipios de López de Micay, Timbiquí y Guapi, la más afectada dado que la temperatura podrá aumentar hasta 2,6°C, al igual que la región suroriental del municipio de Piamonte donde aumentaría aproximadamente 2,5°C (IDEAM & PNUD, 2015b).

Para el caso de la precipitación, el departamento en general, como se mencionó anteriormente, podrá aumentar hasta en un 18,4% y específicamente la región nororiental del departamento (Padilla, Miranda, Corinto, Guachené, Caloto, Toribío, Jambaló, Caldono y Santander de Quilichao) podrían aumentar las precipitaciones hasta un 30% (IDEAM & PNUD, 2015b).

1.3 Relación entre las variables climáticas y meteorológicas con el mosquito *Aedes aegypti*

La mayoría de los mosquitos transmisores de enfermedades son sensibles al clima debido a que presentan un patrón estacional característico (López *et al.*, 2018). El desarrollo, comportamiento y supervivencia del mosquito *Aedes aegypti* depende de la temperatura y humedad relativa (Eastin *et al.*, 2014). La supervivencia del vector requiere de una temperatura ambiente entre los 5°C y 40°C, aunque la temperatura óptima en la que se evidencia una mayor densidad de mosquitos se presenta cuando se mantiene la temperatura ambiente entre los 15°C y 32°C (Eastin *et al.*, 2014).

La mortalidad de mosquitos adultos aumenta en la medida en que la temperatura media supera los 35°C (Ding *et al.*, 2018). Por encima de los 18°C, los mosquitos adultos se alimentan, sin embargo si la temperatura media desciende por debajo de los 18°C es posible que disminuya la transmisión del virus del dengue debido a que se afectaría la densidad de las poblaciones de vectores y el desarrollo del virus (Eastin *et al.*, 2014). De manera general, las regiones donde se presenta transmisión endémica de dengue en Colombia, se caracterizan por contar con una precipitación variable, una humedad entre moderada y alta y una temperatura promedio de 27°C que varía entre los 15°C y 40°C (Padilla, *et al.*, 2012).

La temperatura, también está relacionada con las variables geográficas (latitud y altitud) (López *et al.*, 2018) y se ha evidenciado el desplazamiento de las enfermedades transmitidas por vectores hacia mayores latitudes y altitudes y una mayor duración de los periodos de transmisión a lo largo del año (López *et al.*, 2018; Ruiz-López *et al.*, 2016). Esta situación no es ajena para Colombia, debido

a que el mosquito *Aedes aegypti* se encuentra en más del 90% del territorio nacional (Padilla *et al.*, 2012) y se ha evidenciado un desplazamiento en la distribución altitudinal debido a que en el año 1981 se registró a los 2200 msnm en el municipio de Málaga, Santander (Suárez & Nelson, 1981), y para el año 2016, se encontró a los 2302 msnm en área rural del municipio de Bello, Antioquia (Ruiz-López *et al.*, 2016).

Adicionalmente, la precipitación regional se considera como un factor climático influyente no solo por la acumulación, la frecuencia e intensidad de esta, sino también en que durante y después de la época lluviosa se incrementa la densidad de mosquitos por el aumento de los sitios de reproducción en épocas secas, especialmente en lugares donde exista escasez o cuando el suministro de agua es intermitente, al evidenciarse un aumento con diversos contenedores para el almacenamiento de agua (Eastin *et al.*, 2014; Restrepo *et al.*, 2014; Singh, 2014).

En algunos estudios se ha evidenciado que las condiciones climáticas pueden promover o no la enfermedad del dengue dependiendo de la época del año y esto se debe a que tanto el clima a corto plazo, como la biología y comportamiento del mosquito puede variar de una estación a otra. Por lo tanto, es necesario que se realicen análisis que comprendan periodos de tiempo cortos que incluyan la influencia de regímenes climáticos anteriores, con el fin de determinar el impacto de las variables climáticas de periodos específicos (López *et al.*, 2018). Bajo este escenario, es necesario identificar no solo las zonas en que se produzcan las epidemias, sino también resulta relevante detectar las variables climáticas que las causaron (López *et al.*, 2018). Adicionalmente, con el modelamiento de estas variables se contribuye con la predicción tanto del inicio como de la gravedad de las epidemias (Wenbiao Hu *et al.*, 2012). En relación con esto, cada vez son más publicaciones las que han aportado en los efectos que causa la variabilidad climática en las enfermedades transmitidas por vectores, sin embargo, algunas

regiones y enfermedades no se encuentran representadas de manera uniforme y dichas publicaciones son escasas en algunos países (López *et al.*, 2018).

1.4 Modelo Regresión Lineal Múltiple de datos georreferenciados

El análisis de regresión se conoce como una técnica estadística usada para analizar datos donde se hace uso de una ecuación para definir la relación que existe entre una variable de interés (respuesta) y un determinado conjunto de variables; donde se incluyen además de la dependencia que se pueda presentar entre una variable respuesta y variables regresoras (Hernández-Lalinde *et al.*, 2019). Su uso se extiende en diferentes campos de la ingeniería, estadística, matemáticas, entre otros (Montgomery *et al.*, 2006). El modelo de regresión se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

Ecuación 1. Modelo de regresión lineal múltiple

donde; y es la variable respuesta, β_k son los coeficientes de la regresión; $X_1, X_2 \dots \dots X_k$, son las variables independientes (Montgomery *et al.*, 2006).

El diagnóstico de la regresión lineal múltiple se realiza al validar que los ε son independientes e idénticamente distribuidos a una variable normal con media cero y varianza constante. El coeficiente de determinación múltiple (R^2) es una medida descriptiva usada para estimar la varianza explicada del modelo (Montgomery *et al.*, 2006).

Un modelo de regresión lineal múltiple para datos georreferenciados fue usado en un estudio realizado en el Himalaya Chino del año 2013. A partir de este modelo

se encontró cómo se comportaba la distribución espacial de las tendencias anuales de la temperatura del aire al incluir las coordenadas geográficas (latitud y longitud) como variables independientes del modelo. Dentro de los resultados se evidenció que existió una alta tendencia a incrementarse la temperatura con la latitud de sur a norte y con la altitud o elevación en la dirección de este a oeste (Yang *et al.*, 2013).

El uso de transformaciones para la variable respuesta se realiza generalmente cuando no se cumple con los supuestos de normalidad y varianza no constante dentro de un modelo de regresión lineal (Montgomery, *et al.*, 2006). A diferencia de otras librerías, en la librería “Trafo” (Medina *et al.*, 2018) del programa estadístico R 3.6.1 (R Core Team, 2013), se encuentra un conjunto de familias de transformaciones dentro de las cuales se encuentra la transformación Yeo-Johnson que se caracteriza por hacer uso de un enfoque de máxima verosimilitud para la estimación del parámetro de transformación, dentro de esta librería se encuentra también diferentes métodos para la estimación del parámetro óptimo, como el método de máxima verosimilitud entre otros de la librería Trafo (Medina *et al.*, 2018).

1.5 Aplicación de la geomática en la epidemiología

El término de la geomática surgió en el año 1988, cuando la Asociación Canadiense de Inspección Aérea incluyó dentro de sus temas de interés otras disciplinas como lo son la cartografía, la geodesia satelital y los sistemas de información geográfica y paso a llamarse como la Asociación de la Industria Geomática de Canadá (Pinto, 2012). Según el Instituto Canadiense de Geomática, la geomática es un campo de actividades que integra los medios necesarios para la recolección y el manejo de los datos espaciales de diferentes áreas incluyendo el área de la salud (Pinto,

2012). A su vez, este concepto consolida a las tecnologías de la teledetección, la geodesia satelital, la topografía y a la informática (Pinto, 2012).

Los Sistemas de Información Geográfica y otras herramientas de la geomática son empleados dentro de organizaciones relacionadas con la salud con el objetivo de informar la distribución de una determinada enfermedad; en profesiones relacionadas con la administración son de utilidad para monitorear y controlar epidemias y también son de utilidad a investigadores ya que permiten o contribuyen en la comprensión de la distribución de las enfermedades (Baghdadi *et al.*, 2020).

Por otro lado, la epidemiología estudia los factores o causas que se relacionan con una determinada enfermedad y también incluye la comprensión de factores de riesgo o los efectos de intervenciones sobre esta (Pfeiffer *et al.*, 2008). Para el caso de las enfermedades transmitidas por vectores, la epidemiología de estas, está influenciada por la probabilidad de contacto entre los vectores, la población humana y, por factores sociales, económicos y ambientales (Singh, 2014).

En consecuencia, el análisis de datos en epidemiología y en salud pública se basa principalmente en el riesgo o probabilidad de contraer una determinada enfermedad por tal razón; las probabilidades demandan la necesidad de usar métodos estadísticos para el análisis de información e igualmente se requiere el uso de la geomática, en especial de los métodos estadísticos espaciales para evaluar: i) tasas observadas en diferentes regiones geográficas; ii) separar el patrón del ruido; iii) identificar conglomerados de enfermedades y iv) evaluar la importancia de posibles exposiciones. Adicional a esto, es posible cuantificar el nivel de incertidumbre de las estimaciones, predicciones y mapas que se realicen a través de estos métodos y a la vez hacen parte de la inferencia estadística con datos espaciales dado que los métodos estadísticos espaciales se basan en métodos de la estadística clásica como lo es la regresión (Waller *et al.*, 2004). De acuerdo con esto, tanto los mapas como el análisis espacial son utilizados cada día

en el área de la salud y su importancia recae en la información adicional que se obtienen desde la perspectiva geográfica (Baghdadi *et al.*, 2020).

La georreferenciación del evento de interés (punto o áreas), el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) y el uso de las bases de datos, permite describir patrones espaciales, identificar agrupaciones de enfermedades y la explicación o predicción del riesgo de enfermedad, a través del análisis espacial dentro de la epidemiología (Pfeiffer *et al.*, 2008; Waller *et al.*, 2004).

Dentro de la epidemiología espacial se encuentran tres grupos de métodos analíticos (visualización, exploración y modelización): a través de la visualización se generan y describen patrones espaciales, en la fase de exploración se examina la dimensión espacial del evento de interés y con el uso de métodos estadísticos se explora si los patrones observados son aleatorios en el espacio. Finalmente, con la modelización se busca incluir relaciones de causa o efecto, donde se hace uso de datos espaciales o no espaciales para explicar o predecir patrones espaciales (Pfeiffer *et al.*, 2008).

La importancia de los SIG, los sensores remotos y el análisis espacial son considerados de gran utilidad para combatir las enfermedades, va más allá de ubicar espacialmente eventos de interés y generar mapas de riesgo en la epidemiología (Graham *et al.*, 2004; Dhewantara *et al.*, 2019). A través de estas técnicas de análisis espacial para diferentes tipos de datos espaciales (área, punto y datos continuos) dentro de la epidemiología es posible tener una mejor comprensión de los posibles determinantes que definen los patrones espaciales de las enfermedades objeto de estudio (Graham *et al.*, 2004).

La aplicación del análisis espacial o de la geomática en la epidemiología tiene su comienzo en el año 1854, en la ciudad de Londres, donde el mapeo de casos de cólera con fuentes de agua permitió identificar las bombas de agua contaminadas como fuente de infección (Pfeiffer *et al.*, 2008; Waller *et al.*, 2004). Por tal razón, las enfermedades infecciosas se convierten en un ejemplo de aplicación de la

primera ley de la geográfica o del principio básico de la dependencia espacial (Tobler, 1970), debido a que es más probable que la transmisión de estas enfermedades se produzca si los individuos de riesgo están más próximos entre sí (Pfeiffer *et al.*, 2008; Waller *et al.*, 2004).

Retomando ejemplos actuales, se resalta que en el año 2006, se realizó un estudio que buscaba evaluar el desempeño, la cobertura y los costos de la educación asociados con el riesgo de las minas antipersonas en Afganistán, haciendo uso de mapas ráster ponderados por la población. Como resultados se obtuvo que dichos mapas ponderados ofrecen un modelo de los efectos que ocasionan los riesgos de las minas terrestres y la educación sobre estos riesgos en la población. En esta misma investigación se desarrolló el término de la geomática epidemiológica, haciendo referencia a un enfoque que pretende ir más allá de la visualización de sobreposiciones de capas de información al incluir las interacciones modeladas que informan los modelos predictivos basados en población (Andersson & Mitchell, 2006).

En este estudio, la importancia visual que aporta la geomática epidemiológica se resume en: la ponderación de la población de datos específicos de un lugar en una muestra representativa; en la generación de indicadores de nivel superior que van más allá de la descripción de relaciones y finalmente, a través de la epidemiología es posible descartar otras explicaciones en causalidad. En lugar de reflejar la ubicación únicamente, la geomática epidemiológica mapea las relaciones de ocurrencia o las circunstancias que se requieren para cambiar el riesgo y la resiliencia (Andersson & Mitchell, 2006).

Sumado a lo anterior, dentro del análisis espacial se considera al clima como un factor significativo que afecta la distribución de las enfermedades infecciosas, como ejemplos se encuentran la relación de condiciones climáticas con la epidemia de meningitis, la asociación que se encontró con el aumento del riesgo de cólera en

Bangladesh y de paludismo en Asia con El Niño-Oscilaciones del Sur (ENOS) (Graham *et al.*, 2004).

A través de la teledetección, se han realizado mapas de variables climáticas como la temperatura, humedad y la cobertura vegetal para generar predicciones espaciales para la distribución de los vectores del paludismo en África y hoy en día, estos datos climáticos son empleados en los sistemas de alerta temprana de las epidemias de paludismo (Graham *et al.*, 2004).

Teniendo en cuenta que la epidemiología de las enfermedades cuenta con una dimensión espacial que puede estar relacionada con el clima a una escala espacial gruesa. Los cambios en el clima estacional o a largo plazo, van a influir en las tendencias del riesgo de transmisión de diferentes formas y por tal razón, los sensores remotos, los sistemas de información geográfica constituyen una excelente herramienta como fuente de datos, almacenamiento y análisis espacial para finalmente poder mapear y vigilar estas tendencias (Graham *et al.*, 2004).

Los estudios generalmente resaltan la necesidad de generar mapas de riesgo con el fin de vigilar cambios espaciales y temporales, igualmente reconocen la importancia o la necesidad que las personas responsables de la toma de decisiones conozcan la variación espacio temporal de enfermedades de interés dentro de la epidemiología (Graham *et al.*, 2004).

Metodología

El tipo de estudio de la presente investigación es correlacional dado que se busca establecer si existe una relación entre el índice Pupa/Persona o una transformación del mismo y variables ambientales y geográficas en el departamento del Cauca.

Para el desarrollo del proyecto se tomó la base de datos suministrada por la Secretaría de Salud Departamental del Cauca, la ubicación geográfica y con base a estudios etiológicos se seleccionaron las siguientes variables independientes:

- **Variable respuesta:** Índice pupa/persona.
- **Variables explicativas:** Precipitación, temperatura mínima, máxima y media, porcentaje de humedad relativa, altitud, índice Lang, latitud y longitud (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de la variable respuesta y de las variables explicativas

Variable de estudio		Expresión	Tipo de variable	Descripción	Unidad de análisis	Temporalidad	Fuente de información	Uso
Entomológica	índice Pupa/Persona	$IPP = \frac{(\# \text{ Pupas})}{\text{Hab}} \times \frac{1}{2}$	Cuantitativa	Hace referencia a la cantidad de pupas en cada vivienda con respecto al número de habitantes (Consolidado por cada barrio, corregimiento y resguardos indígenas)	Barrios, veredas, corregimientos y un resguardo indígena	Día del muestreo o día del último muestreo en el año 2017	Secretaría de Salud del departamento del Cauca	Nueva metodología implementada por la Secretaría de Salud del Cauca. Permite estimar el riesgo de transmisión de dengue
Climáticas	Precipitación	Precipitación total	Cuantitativa	Acumulada		Día	Interfaz web del Sistema de Monitoreo de Inundaciones y Sequías de América Latina y el Caribe	Contexto climático del área de estudio
	Temperatura	Temperatura Máxima	Cuantitativa	Máxima		Día		
	Temperatura	Temperatura Mínima	Cuantitativa	Mínima		Día		
	Temperatura media	Temperatura promedio	Cuantitativa	Promedio		**	$\frac{(T. \text{máx} + T. \text{mín})}{2}$	
	Humedad Relativa	Humedad relativa	Cuantitativa	Porcentaje		**	Cálculo metodología (Allen <i>et al.</i> , 2006)	
	índice Lang	(Precipitación/Temperatura)	Cuantitativa	índice Bioclimático		(1981-2010)	Cálculo	
Geográficas	Coordenadas geográficas de los barrios	Latitud/Longitud	Cuantitativa	Ubicación (x,y)		**	Open Street Map, Secretaría de Salud del departamento del Cauca	Análisis espacial
	Altitud	Metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m)	Cuantitativa	Unidad		**	DEM (ALOS PARSAR)	Análisis geográfico

El enfoque de este estudio es cuantitativo dado que se busca hacer uso y análisis a partir de los registros numéricos de las variables entomológicas, climáticas y geográficas del departamento del Cauca para el año 2017, de las siguientes fuentes de información: Secretaría de Salud del departamento, el Marco Geoestadístico Nacional (MGN) del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el proyecto colaborativo OpenStreetMap (OSM), el modelo digital de elevación del satélite ALOS-PALSAR, el Sistema de Monitoreo de Inundaciones y Sequías de América Latina y el Caribe (LAFDM por sus siglas en inglés), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia “Cenicaña”.

El procesamiento de la información incluyó: la consolidación de la base de datos espacial con la información suministrada por la Secretaría de Salud Departamental, la georreferenciación de los barrios, veredas, corregimientos y un resguardo indígena, la generación de una superficie de interpolación con base en los valores obtenidos del índice Lang con el método de ponderación de la distancia inversa (IDW por sus siglas en inglés) y con base en 3) la ubicación geográfica de los puntos de muestreo definidos (barrios, veredas, etc), se extrajeron los respectivos valores de la altitud a partir del modelo digital de elevación y de la superficie de interpolación generada del índice Lang. Sumado a esto, y con el fin de determinar los meses secos y lluviosos de la región; a partir de 27 estaciones meteorológicas se generaron los respectivos climogramas tomando como base los promedios climáticos del periodo comprendido 1981 al 2010 del IDEAM.

De las capas de información con resolución espacial de 0,25 grados de la interfaz web de LAFDM, se obtuvo la información diaria del año 2017 para la precipitación y la temperatura máxima y mínima, a partir de las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo. Posteriormente se calcularon las demás variables (temperatura media y porcentaje de humedad relativa). De forma adicional se calcularon rezagos temporales de cada una de las variables climáticas con el fin de conocer la influencia de los valores de estas variables de días anteriores sobre el índice pupa/persona y se realizó la clasificación climática de Caldas, Lang y Caldas

Lang del área de estudio. El análisis de la información incluyó análisis descriptivos y debido a que no se cumplió con el supuesto de distribución normal en los residuales de los modelos de regresión espacial (Arbia, 2014) y en la regresión ponderada geográficamente (GWR por sus siglas en inglés) (Charlton & Fotheringham 2008); el análisis correlacional de las variables de interés se realizó a través de un modelo de regresión lineal múltiple que incluyó como variables

independientes la transformación de la variable pupa/persona y a las coordenadas geográficas (latitud y longitud) (Yang *et al.*, 2013).

A continuación, se describe el diagrama metodológico empleado para la recolección, procesamiento y análisis empleados para dar cumplimiento a los objetivos planteados.

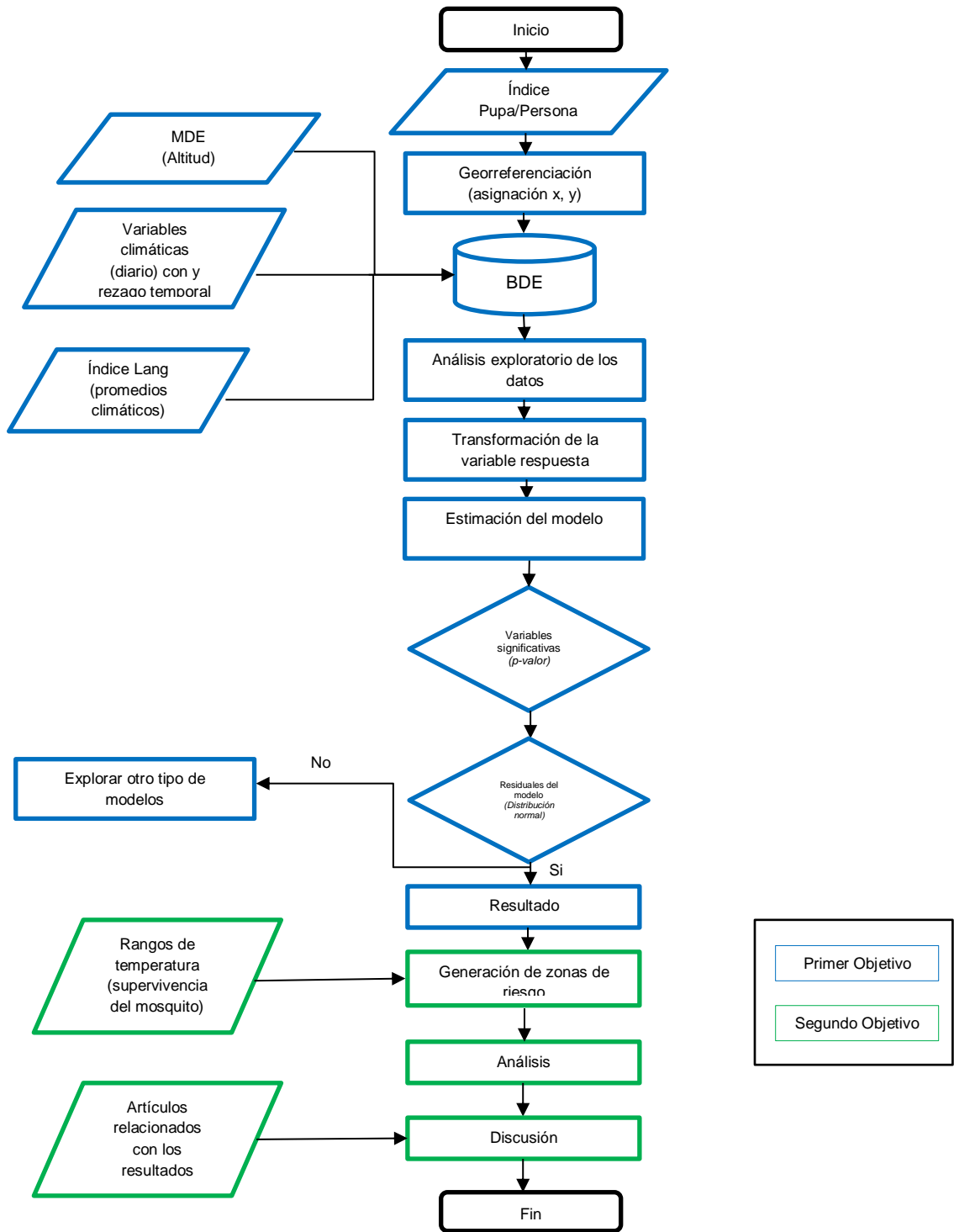


Figura 2. Diagrama metodológico

1.6 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el departamento del Cauca, Colombia (Figura 3). Ubicado en la región sur-occidental de Colombia con coordenadas (00°58'54" y 03°19'04" de latitud norte y 75°47'36" y 77°57'05" de longitud oeste). Cuenta con una superficie de 29.308 km² (Gobernación del Cauca, 2020a). El departamento está dividido en 42 municipios y su capital es la ciudad de Popayán. Para el año 2016 la población era de 1.391.836 personas. Dicha población se encuentra distribuida en el área urbana con el 39,85% y en el área rural con el 60,15% (Gobernación del Cauca, 2020b).

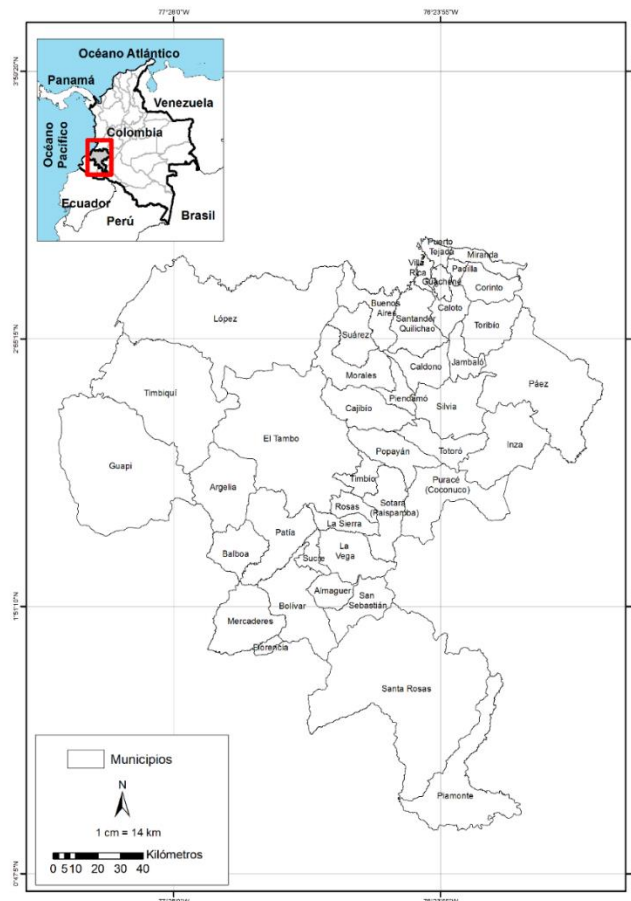


Figura 3. Área de estudio. Ubicación del departamento del Cauca, Colombia

1.6.1 Datos entomológicos

A partir del año 2017 la Secretaría de Salud Departamental del Cauca dentro de la vigilancia entomológica que realiza, comenzó a implementar el índice pupa/persona. La vigilancia se realiza en 34 de los 42 municipios en total. Los ocho municipios restantes hasta el año 2017 se encontraban negativos y por tal razón no se les realizó seguimiento: Almaguer, Jambaló, La Vega, Puracé, San Sebastián, Silvia, Sotará y Totoró. En cada municipio se escogió una muestra representativa de barrios y a su vez se seleccionó una muestra de viviendas para el respectivo muestreo. Adicionalmente, se muestrearon veredas, corregimientos y un resguardo indígena. En cada vivienda se realizó la inspección entomológica y el total de personas que viven en la vivienda para el cálculo del índice pupa/persona. En algunos municipios se contaba con más de una medición en el año, sin embargo, para el presente ejercicio se dejó el registro que presentaba el mayor valor para el índice pupa/persona por cada barrio en el año con el fin de analizar únicamente el componente espacial (figura 3). Del total de los 34 municipios que cuentan con vigilancia entomológica, seis municipios se encontraron negativos (color verde) para la presencia del mosquito *Aedes aegypti* al momento del muestreo. En la figura 4, se puede apreciar que fueron los municipios: Cajibío, Florencia, La Sierra, Morales, Santa Rosa y Toribío.

1.6.2 Datos geográficos y de relieve

Se ubicaron geográficamente 394 puntos entre los cuales se encuentran barrios, veredas, corregimientos y un resguardo indígena. La asignación de coordenadas (x,y) para los barrios muestreados dentro de la vigilancia entomológica de cada municipio se realizó con la información disponible dentro Marco Geoestadístico

Nacional (MGN), versión 2017 del Geoportal del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2017). Adicionalmente se consultó la información del proyecto colaborativo OpenStreetMap (OSM) a través del programa de ArcGIS PRO (Esri Inc, 2020b) y finalmente, se complementó la georeferenciación de los barrios a través de cartografía de la Secretaría de Salud Departamental y de los diarios de campo del muestreo (Figura 4). A partir del modelo digital de elevación (12,5 metros de resolución espacial) del satélite ALOS y el sensor PALSAR (GeoSpatial, 2013), se generaron las curvas de nivel del área de estudio con la herramienta de análisis 3D y con la función “extraer valores a puntos” del programa ArcMap 10.8.1 1 (Esri Inc, 2020a) se obtuvieron los valores de la altitud del MDE para cada punto de muestreo (Figura 4).

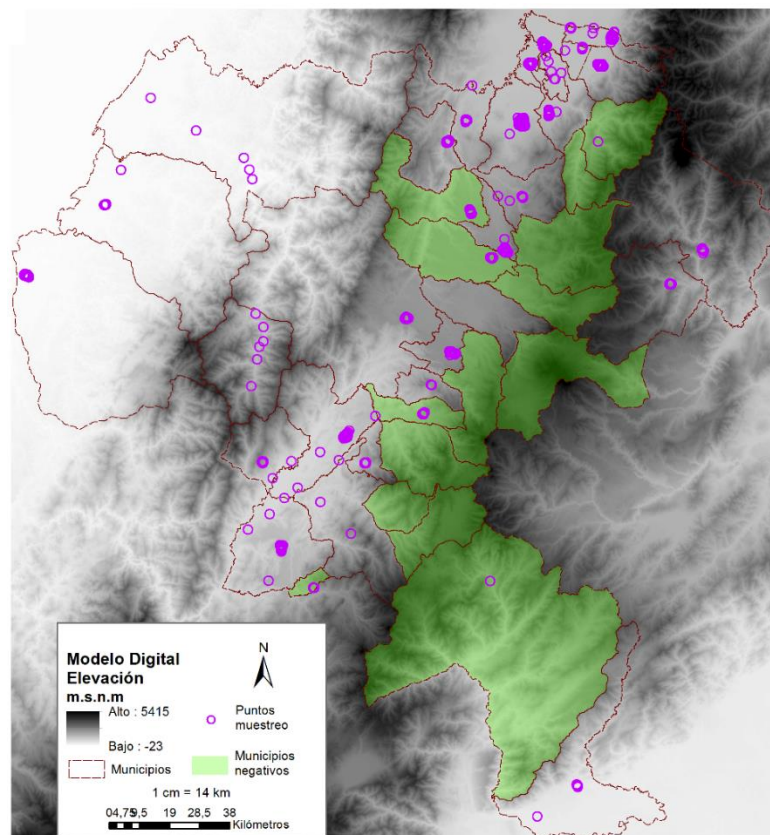


Figura 4. Ubicación geográfica de los municipios negativos para la presencia de *Aedes aegypti*, puntos de muestreo y Modelo Digital de Elevación (MDE) en el departamento del Cauca.

1.6.3 Datos Meteorológicos

Debido a la falta de información de las variables climáticas para el área y año de estudio, dentro de la red de monitoreo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se optó por explorar y descargar la información climática de la interfaz web del Sistema de Monitoreo de Inundaciones y Sequías de América Latina y el Caribe (LAFDM por sus siglas en inglés). Este proyecto fue desarrollado en el año 2014 por el Grupo de Investigación en Hidrología Terrestre de la Universidad de Princeton, con el apoyo del Centro Internacional para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos y el Centro del Agua para Zonas Áridas en América Latina y el Caribe (The University of Arizona s.f.). La información se encuentra disponible para la precipitación y las temperaturas máximas y mínimas con resolución espacial de 0,25 grados (Princeton Climate Analytics 2019). Con las coordenadas geográficas de los puntos de muestreos obtenidos previamente se descargaron las variables climáticas con resolución temporal diaria.

El cálculo de la temperatura media y del porcentaje de humedad relativa se realizó según la metodología de Allen *et al* 2006. Para el caso de la temperatura media, se convirtió de grados kelvin a grados centígrados y se promedió la temperatura máxima y mínima obtenida anteriormente, con esta información se calculó la humedad relativa a partir de la presión real de vapor [KPa] (e_a) a una temperatura específica y la presión media de vapor de saturación (e_s) a la misma temperatura del aire [KPa]. A continuación se encuentran las ecuaciones que se usaron para el cálculo de la humedad relativa (HR):

$$HR = \frac{e_a}{e_s} * 100$$

Ecuación 2. Humedad Relativa HR

donde; e_a es presión real de vapor [KPa]; e_s es la presión de saturación de vapor [KPa].

La presión real de vapor e_a se calcula con la siguiente ecuación asumiendo que $T_{min} \approx T_r$:

$$e_a = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T_{min}}{T_{min} + 237,3} \right]$$

Ecuación 3. Presión real de vapor e_a

La presión media de vapor de saturación e_s se estimó con la siguiente ecuación:

$$e_s = \frac{[e^o(T_{m\acute{a}x}) + e^o(T_{m\acute{i}n})]}{2}$$

Ecuación 4. Presión media de vapor de saturación e_s

donde;

$$e^o(T_{m\acute{a}x}) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T_{m\acute{a}x}}{T_{m\acute{a}x} + 237,3} \right]; e^o(T_{m\acute{i}n}) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T_{m\acute{i}n}}{T_{m\acute{i}n} + 237,3} \right]$$

1.6.4 Análisis complementario de los datos meteorológicos

Teniendo en cuenta la importancia de validar los datos obtenidos anteriormente y dada la falta de información para las variables registradas en el año 2017 de estaciones meteorológicas del IDEAM en el área de estudio; se solicitó información diaria para la precipitación, humedad relativa, temperatura media, máxima y mínima del año 2017 al Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia “Cenicaña”. Esta información corresponde a cinco estaciones que se encuentran en el límite que comparte el departamento del Valle del Cauca con el Cauca. Las estaciones de Cenicaña son Ortigal, Miranda, Naranjo, Guachinte y Santander de Quilichao.

Tabla 2. Coordenadas geográficas de las estaciones de Cenicaña

Longitud	Latitud	Estación
-76,34868	3,270072	Ortigal

-76,28398	3,258058	Miranda
-76,39828	3,180975	El Naranjo
-76,56018	3,166228	Guachinte
-76,47366	3,062928	Santander de Quilichao

Con el fin de establecer si existe una relación o tendencia de manera gráfica entre los datos obtenidos del Sistema de Monitoreo de Inundaciones y Sequías de América Latina y el Caribe con los datos de las estaciones de Cenicaña, se calculó la función de autocorrelación cruzada (covarianza) entre las series de tiempo del sistema de monitoreo y Cenicaña para cada una de las variables meteorológicas del año 2017 con la función “ccf” del programa R 3.6.1 (R Core Team, 2013). Esta función calcula la correlación entre las observaciones de dos series temporales en determinados retrasos y adelantos (Osagie & Ogheneofejiro, 2016).

Con la función de autocorrelación cruzada se encontró que existe correlación positiva para la temperatura (mínima, media y máxima) y para el porcentaje de humedad relativa en algunos retrasos y adelantos. Para el caso de la precipitación se encontró igualmente una correlación positiva y fuerte, registrada únicamente para el retraso cero. De acuerdo con esto, se resalta que existe un desfase en las observaciones de las variables climáticas para las dos series de tiempo (Cenicaña y LAFDM); situación que es de esperarse debido a que se están comparando mediciones diarias de las estaciones de Cenicaña con datos obtenido de modelos de estimación del tiempo. Se concluye que existe una relación entre ambas series de tiempo por tal razón, se considera adecuado realizar el modelo de regresión de datos georeferenciados con las variables predictoras obtenidas del Sistema de Monitoreo de Inundaciones y Sequías de América Latina y el Caribe.

1.6.5 Datos meteorológicos rezagados

Con el fin de determinar la influencia de las variables climáticas (precipitación, porcentaje de humedad, temperatura media, máxima y mínima) de días anteriores en la eclosión de las pupas del mosquito, se incluyeron tres periodos de rezago temporal teniendo en cuenta la duración del ciclo de vida del mosquito. En promedio un huevo se demora entre siete a diez días en convertirse en adulto (CDC, 2020). De los cuales, la larva del mosquito demora cinco días para convertirse en pupa y entre dos o tres días en convertirse en adulto. En relación con lo anterior, el primer periodo (sin retraso) se definió con la fecha en que se realizó o finalizó el muestreo, en el segundo momento se incluyó el promedio de las variables de temperatura y humedad y el acumulado de la precipitación de cinco días anteriores al muestreo. El tercer y último periodo se definió para las mismas variables climáticas (promedio de temperatura y humedad y el acumulado de la precipitación) pero teniendo en cuenta siete días atrás (figura 5). Es importante aclarar que existen factores bióticos y abióticos relacionados directamente con el hábitat del mosquito que influyen en que el mosquito llegue a su fase adulta (Ranasinghe & Amarasinghe, 2020). Sin embargo, se establecieron estos periodos de rezagos temporales con el fin de buscar si se presenta alguna tipo de influencia de las variables meteorológicas (acumulado de la precipitación y el promedio de las temperaturas y la humedad) de días atrás en el ciclo de vida del mosquito.

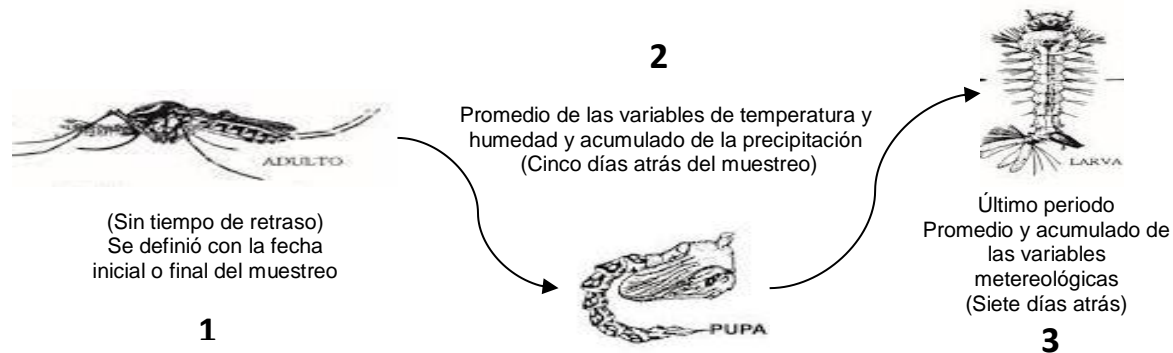


Figura 5. Definición de los periodos de rezago temporal con base en la duración promedio del ciclo de vida del mosquito *Aedes aegypti* (Fuente: Rossi & Almirón, 2004)

1.7 Resultados

1.7.1 Clasificación climática del área de estudio

A continuación se encuentran la clasificación climática realizada con el diagrama Ombrotérmico de Gausson y el Índice Lang.

1.7.2 Ombrotérmico de Gausson

Como se mencionó anteriormente, a través de un ombrotérmico es posible obtener una descripción del clima de manera gráfica a partir de los valores de la precipitación y de la temperatura media de cada mes y para cada estación meteorológica de un lugar en específico. Estos diagramas se construyen a partir de promedios climáticos para la temperatura y precipitación y para el presente ejercicio se empleó el promedio del periodo de tiempo comprendido entre 1981 al 2010 del IDEAM de 20 estaciones meteorológicas del departamento del Cauca y con siete estaciones de los departamentos del Putumayo y del Caquetá, (figura 6). En total, se generaron 27 diagramas para las estaciones mencionadas (Anexo D).

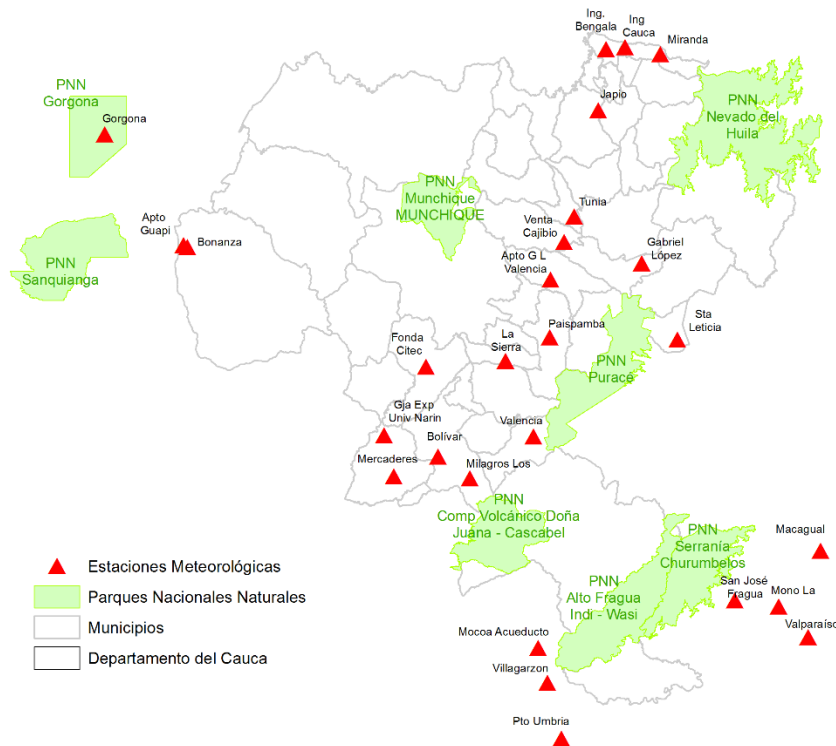


Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas del IDEAM en el área de estudio

La siguiente gráfica es un ejemplo de los diagramas de ombrotérmico realizados con base en el promedio climático entre los años 1981 y 2010 (figura 7), esta se realizó con los datos de la estación ubicada en el municipio de Miranda y los demás ombrotérmicos se encuentran consolidados en el anexo D. Esta gráfica está compuesta por dos ejes verticales donde se representan la temperatura media en grados centígrados (°C) y la precipitación total en milímetros (mm). A partir de la gráfica es posible identificar los meses que se caracterizan por presentar sequía o excedencias hídricas (época de lluvia). En el ejemplo de la figura 7, se encuentra que los meses que presentan sequía son julio y agosto, de forma adicional, en la región se presenta un régimen bimodal, caracterizado por presentar dos épocas de lluvia (excedencias) entre los meses de enero a junio y de septiembre a diciembre.

Con base en los diagramas obtenidos se encontró que en el área de estudio se presenta tanto el régimen de lluvia monomodal como el bimodal.

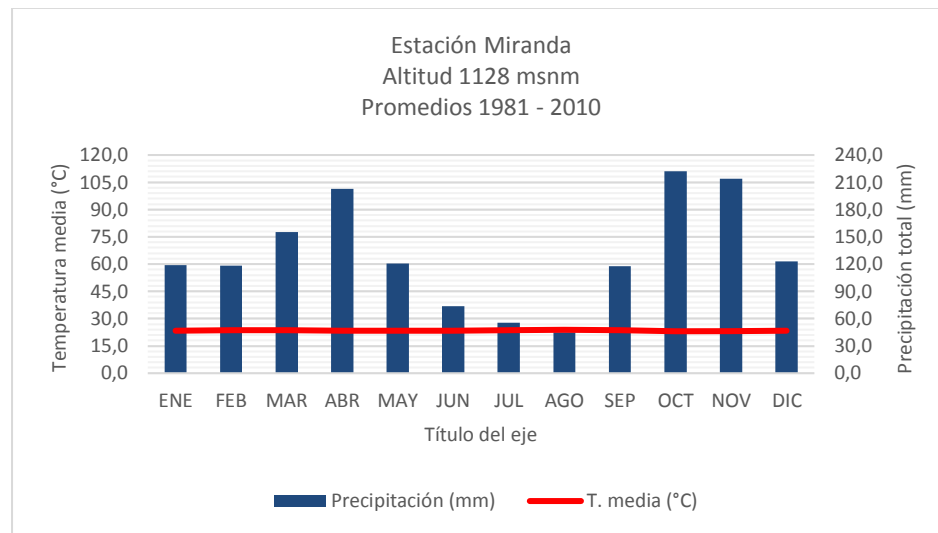


Figura 7. Ombrotérmico de Gausson o climograma para la estación ubicada en el municipio de Miranda.

1.7.3 Índice Lang

De forma adicional, con base en los promedios climáticos del periodo de tiempo comprendido entre 1981 al 2010 del IDEAM, se calculó el Índice de Lang para 108 estaciones meteorológicas, de las cuales 103 se encuentran ubicadas en el departamento del Cauca. En la región sur del departamento, en el límite que comparte el departamento de Cauca con los departamentos del Putumayo y del Caquetá, se seleccionaron tres y cuatro estaciones respectivamente. Del total de estaciones, sólo 27 estaciones contaban con mediciones de temperatura media anual. Con el fin de realizar imputación de datos para las demás estaciones, se realizó la regresión simple entre la temperatura media y la elevación con un R^2 de 0,94, a partir de esta ecuación se estimaron los valores de la temperatura media para el total de estaciones (108), incluyendo las 27 estaciones (figura 8).

Finalmente, por interpolación de la Distancia Inversa Ponderada (IDW, siglas en inglés) se generó la respectiva superficie del índice de Lang para toda el área de estudio y a través de la unión espacial del programa ArcGIS 10.8.1 (Esri Inc, 2020a) se asociaron los valores generados en la superficie de interpolación del índice para cada una de las 394 ubicaciones geográficas.

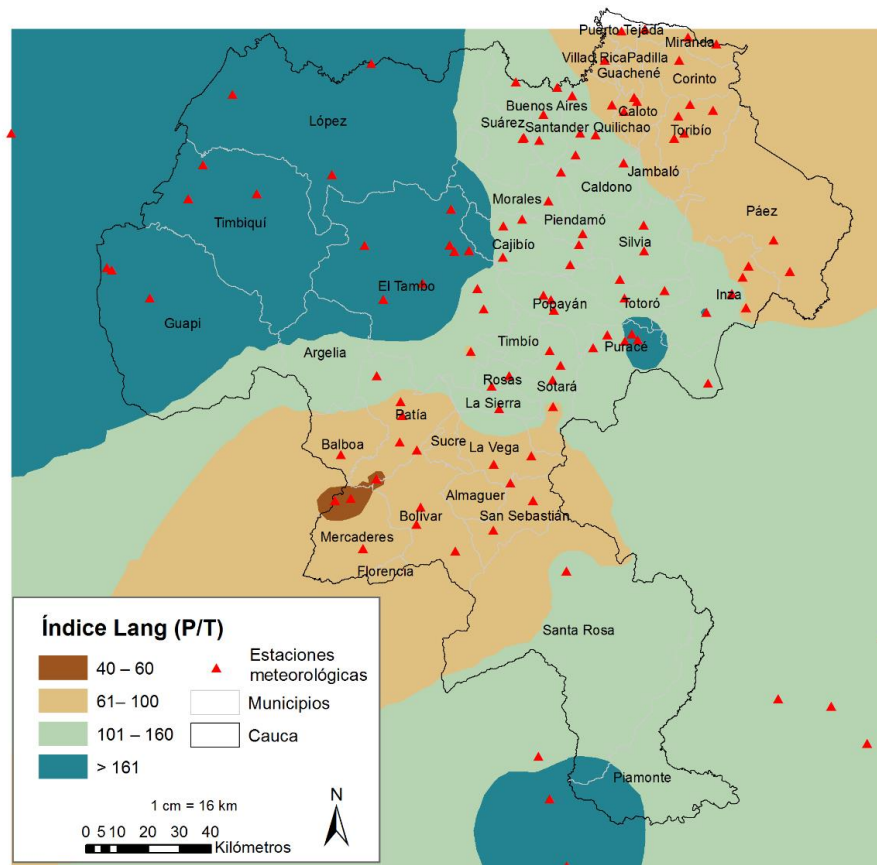


Figura 8. Índice de Lang elaborado con los promedios climatológicos del IDEAM (1981-2010)

Según la clasificación climática de Caldas Lang, el área de estudio se caracteriza principalmente por ser una región con climas cálidos, templados y fríos, principalmente húmeda que varía entre superhúmedo (>160), húmedo (100-160) y semihúmedo (60-100). Excluyendo la región donde se encuentran parte de los

municipios de Balboa, Mercaderes y Patía donde el clima es cálido semiárido (40-60).

El Índice de Lang (figura 8) y los diagramas de ombrotérmico (anexo D) hechos para las regiones occidental (Guapi, Timbiquí, López, El Tambo), y parte de los municipios de Santa Rosa y Piamonte (sur-oriental) del departamento, indican que se presenta un clima entre superhúmedo (>160), y húmedo (100-160). Según los diagramas, en estos municipios el régimen de lluvia se caracteriza por ser monomodal (Anexo D).

En la región central (Argelia, Morales, Cajibío, Totoró, Silvia, Popayán, Cajibío, Piendamó, Timbío, Sotará, Buenos Aires, Santander de Quilichao, Caldon, Rosas) y parte de los municipios de Santa Rosa y Piamonte (sur-oriental) (figura 8), se caracterizan por contar con un clima húmedo (100-160). En la región norte, donde se encuentran ubicados los municipios de Puerto Tejada, Miranda, Villa Rica, Padilla, Corinto y Caloto, y en la región sur (Mercaderes, Bolívar, Almaguer, Sucre, Balboa, Patía, San Sebastián), los diagramas resultantes y el índice Lang, indican que el clima de la región se caracteriza por ser húmedo (100-160) o semihúmedo (60-100). El régimen de lluvias se caracteriza por ser bimodal y la temporada seca se presenta entre los meses de julio y agosto (anexo D).

1.7.4 Transformación de la variable respuesta y matriz de correlación de Pearson

En el anexo E, se encuentra la base de datos del proyecto y contiene la información consolidada de la ubicación geográfica (latitud y longitud), datos entomológicos, geográficos, de relieve y meteorológicos con y sin rezagos temporales del área de estudio.

En aplicaciones prácticas del modelo de regresión lineal donde se busca relacionar dos o más variables no siempre se cumple con los supuestos que demanda el uso de esta metodología y que son: distribución normal de los datos y en término del error, los supuestos de linealidad y homocedasticidad (Medina *et al.*, 2018). Este problema generalmente es solucionado al transformar los datos para normalizar y estandarizar la varianza de estos y poder realizar el respectivo análisis estadístico (Guerrero & López, 2015). Se resalta la existencia de otros métodos de regresión más complejos que no demandan el uso de los mismos supuestos, sin embargo, las transformaciones se presentan como un enfoque más sencillo mediante el cual es posible corregir las violaciones de los supuestos y de esta manera, poder continuar con el análisis, haciendo uso de un modelo de regresión lineal (Medina *et al.*, 2018). Dentro de las transformaciones más usadas se encuentran las que pertenecen a la familia de transformación logarítmica o de Box-Cox (Medina *et al.*, 2018).

Es importante resaltar que en las metodologías aplicadas de los modelos de regresión espacial (paramétricos) y en la regresión ponderada geográficamente (no paramétrico), no se cumplió con el supuesto de normalidad en los residuos. Por tanto se optó por realizar una regresión lineal múltiple que incluyera a las coordenadas geográficas dentro del conjunto de las variables explicativas y dada la naturaleza del índice pupa/persona fue necesario transformar a la variable pupa/persona.

Para el presente estudio, se aplicó la transformación “Yeo Johnson” a la variable pupa/persona, dado que con esta transformación se obtuvo el mejor ajuste del modelo y además, esta transformación permite transformar los registros originales del índice pupa/persona con valores en cero. La variable transformada se caracterizó por no contar con los datos atípicos que contribuyen con el no cumplimiento de los supuestos de la variable original del índice pupa/persona y

pasó de presentarse un registro máximo de 75,82 del índice pupa/persona original a normalizarse el valor máximo en 0,49 del índice pupa/persona transformado.

Con la variable transformada se calculó la correlación con el método de Pearson; con el fin de encontrar aquellas variables que se encontraran relacionadas con el índice pupa/persona y la transformación del índice (anexo F, tabla 4, figura 9). En la figura 9, al comparar el índice pupa/persona (pp) con la transformación del índice (tpp) se aprecia cómo aumenta el valor de la correlación a nivel general. Adicional a esto se aprecia que existe una ligera correlación negativa (-0,4) entre la altitud (msnm) y la transformación del índice (tpp). Se evidencia también una ligera correlación positiva (0,3) entre este índice y la latitud y las temperaturas (mínima, media y máxima) con sus respectivos rezagos temporales de cinco y siete días.

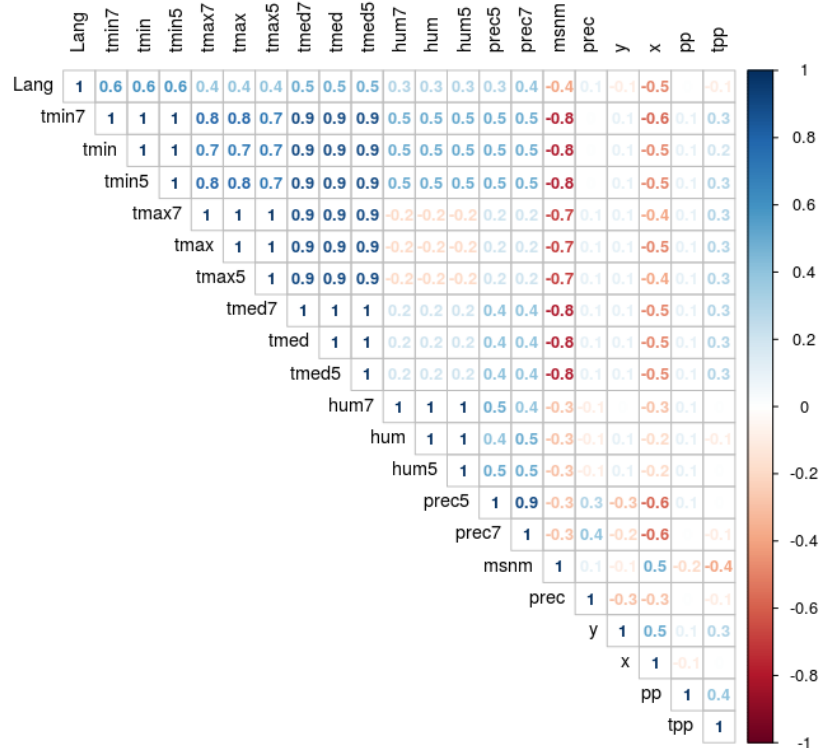


Figura 9. Matriz de correlación Pearson

1.7.5 Resultados y análisis de la regresión lineal múltiple

Tomando como referencia el estudio realizado por Yang *et al*, en el Himalaya Chino del año 2013, donde se ajusta un modelo de regresión lineal múltiple, que incluyó las coordenadas de estaciones meteorológicas dentro del conjunto de las variables explicativas; en el presente estudio se realizó una regresión lineal múltiple que incluyó a la georreferenciación de los puntos de muestreo dentro del conjunto de variables explicativas y a la nueva variable transformada del índice pupa/persona que se caracteriza por oscilar entre cero y 0,49. Dentro de los resultados del modelo se encontró que las variables que según el modelo explican de mejor manera el índice pupa/persona fueron: la latitud ($p \text{ valor} = 6,1567e - 09$), el Índice Lang ($p \text{ valor} = 0,0044437$), la altitud ($p \text{ valor} = 1,8416e - 06$) y las temperatura sin rezago temporal: la temperatura máxima ($p \text{ valor} = 0.0439181$), la temperatura mínima ($p \text{ valor} = 0,0390977$) y la temperatura media ($p \text{ valor} = 0,0408439$) y las variables de temperatura con rezago temporal de cinco días: temperatura máxima ($p \text{ valor} = 0,0170189$), la temperatura mínima ($p \text{ valor} = 0,0154322$) y la temperatura media ($p \text{ valor} = 0,0160830$) (anexo G y tabla 5). Con respecto a la validación se encontró que estos son independientes y normales ($p \text{ valor} = 0,405$) de acuerdo a la prueba de normalidad “Spiegelhalter” de la librería “normtest” (Gavrilov & Pusev, 2014).

1.7.6 Resultados y análisis de las regiones geográficas con mayor riesgo para la presencia del mosquito *Aedes aegypti*

Adicionalmente, se realizó una regresión lineal simple (R^2 de 0,97) entre los valores de las temperaturas sin rezago temporal (máxima, media y mínima) que fueron significativas en el modelo y los registros de la altitud de los 394 puntos geográficos. Con el fin de predecir los valores de las temperaturas sin rezago temporal (máxima,

media y mínima), incluyendo el incremento del +2,15°C, que se espera aumente en la región del pacífico para finales del siglo según el Escenario Ensamble Promedio (2071-2100) de cambio climático del IDEAM, para el modelo digital de elevación del área de estudio.

En la figura 10 se aprecia cómo el área del rango inferior (color azul) disminuye considerablemente bajo el escenario de cambio climático para final de siglo y como aumenta el área (color rojo) que representa el rango de temperatura por encima de los 23°C. Además llama la atención que parte de los municipios que resultaron ser negativos en el muestreo del año 2017 (Almaguer, Jambaló, La Vega, Puracé, San Sebastián, Silvia, Sotaró y Totoró) pasan de registrar una temperatura media para el año 2017 entre los 12,26°C y 15,8°C a situarse en el rango entre los 15,84°C y los 19,4°C. Situación que llama la atención dado que según un estudio del año 2014, se encontró que la mayor producción de mosquitos se presenta cuando se mantiene la temperatura ambiente en el rango entre los 15°C y 32°C (Eastin *et al.*, 2014). Es decir que para final de siglo, nuevas regiones geográficas podrían contar con las condiciones propicias de temperatura para la presencia del mosquito *Aedes aegypti*. En el anexo H, se encuentran las gráficas generadas para las demás temperaturas (mínima y máxima).

De acuerdo con los resultados obtenidos para la temperatura máxima, media y mínima, se encuentra que los municipios ubicados en la costa pacífica (Guapi, Timbiquí, López de Micay y parte del Tambo) tendrían el principal aumento y a la vez se corrobora con los resultados del documento de los nuevos escenarios de cambio climático para Colombia (2011-2100), donde se menciona que en las zonas más cercanas a la costa pacífica es donde se evidenciarían los principales aumentos de la temperatura para fin de siglo (IDEAM & PNUD, 2015b). Sin embargo, es importante resaltar que según la figura obtenida, además de los municipios ubicados en la costa, los municipios de la región norte (Puerto Tejada, Villa Rica, Padilla, Guachené), en la región central (Mercaderes, Patía) y parte del

municipio de Santa Rosa y el municipio de Piamonte en el sur, también presentarían un incremento significativo.

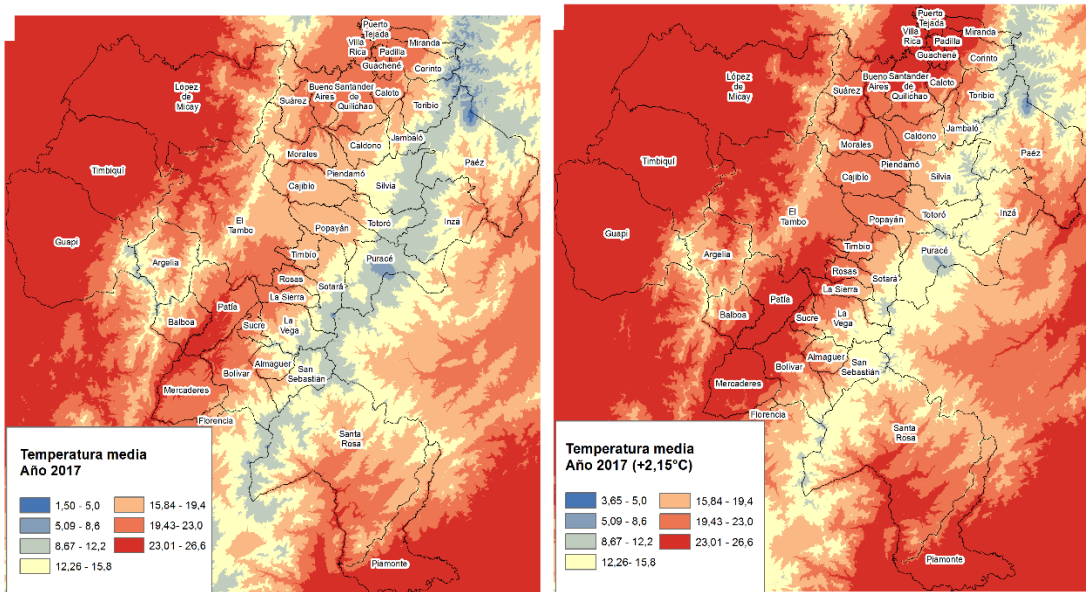


Figura 10. Temperatura media del año 2017 y el incremento de 2,15°C en la temperatura media del año 2017 bajo el escenario de cambio climático proyectado para finales del siglo en el departamento del Cauca

De acuerdo con los resultados obtenidos en la figura 10, y con el fin de conocer que nuevas regiones geográficas del departamento pasarían a contar con las condiciones adecuadas de temperatura media para la presencia del mosquito de acuerdo con el incremento (2,15°C) que se estima para final de siglo; se clasificó el área de estudio de acuerdo con el nivel de riesgo teniendo en cuenta el rango óptimo de la temperatura ambiente para la supervivencia y transmisión del virus del dengue. A pesar que existen diferentes referencias en cuanto a los rangos óptimos de temperatura ambiental para la supervivencia del mosquito y transmisión de virus se tomó como base la referencia donde se señala que para Colombia, las regiones donde se presenta transmisión endémica de dengue, cuentan con una temperatura de ambiente en promedio de 27°C y varían entre los 15°C y 40°C (Padilla, *et al.*, 2012). Tomando como insumo esto, se clasificaron los rangos de temperatura como alto riesgo a los valores por encima de los 17,90°C, como moderado riesgo

a los valores entre 15,90°C y 17,90°C y como bajo riesgo a los valores inferiores de los 15,9°C (tabla 3).

Tabla 3. Clasificación del nivel de riesgo

Rango de temperatura (°C)	Nivel de riesgo
1,50 - 15,9	Bajo
15,90 - 17,9	Moderado
17,90 - 26,60	Alto

A partir de la clasificación del nivel de riesgo se delimitaron las regiones con mayor riesgo para la presencia del mosquito *Aedes aegypti* teniendo en cuenta la temperatura media del año 2017 y su incremento del 2,15°C, como se muestra a continuación:

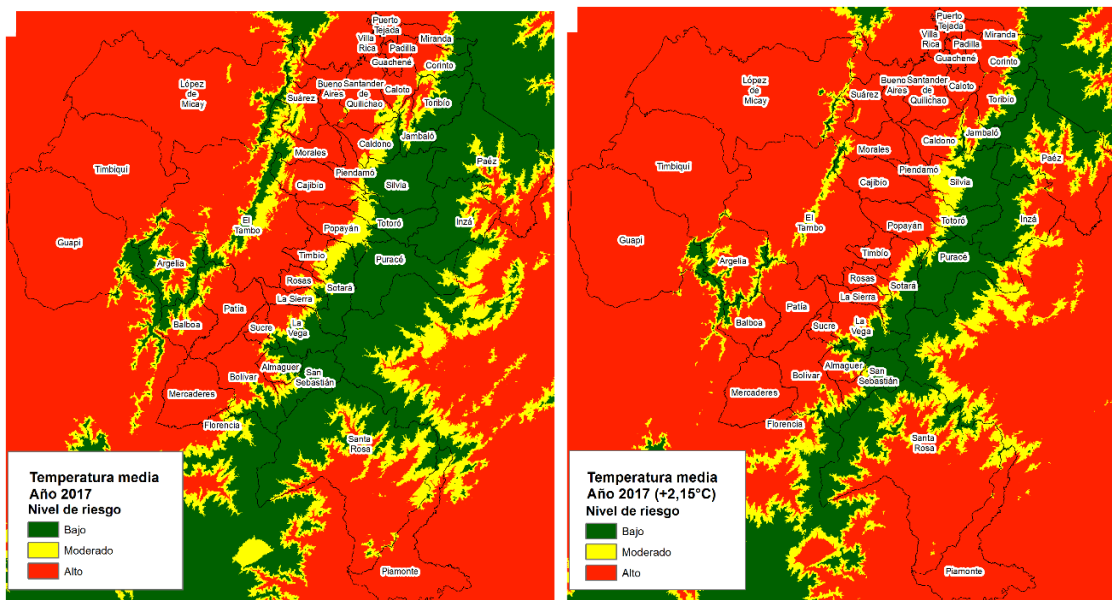


Figura 11. Regiones geográficas con mayor riesgo para la presencia del mosquito *Aedes aegypti* generadas a partir de la temperatura media del año 2017 y del incremento de 2,15°C estimado para final de siglo para la temperatura media

De manera general, en la figura 11 se aprecia también que el nivel de riesgo clasificado como bajo corresponde en su mayoría a la región geográfica que representa la Cordillera Central de los Andes, zona donde se encuentran parte de los municipios que no contaron con un muestreo entomológico para el año 2017 y por consiguiente fueron clasificados como negativos para la presencia del mosquito *Aedes aegypti* (Silvia, Totoró, La Vega, Almaguer, Jambaló, San Sebastián, Sotará y Puracé), y es allí donde se observa que para final de siglo se presentaría la mayor disminución del área clasificada con riesgo bajo y como las regiones aledañas a esta Cordillera pasarían a ser consideradas de un riesgo moderado a un riesgo alto. Con base en lo anterior y considerando únicamente la variable de la temperatura media del año 2017 y el incremento de 2,15°C sobre esta, se evidencia que el departamento del Cauca presenta un riesgo alto en la gran mayoría de su territorio y para el año 2100 podría extenderse a regiones que se encuentren cercanas a los 2000 msnm y que corresponden geográficamente a los municipios mencionados anteriormente. Es importante resaltar que la presencia del vector en estos municipios para finales de siglo depende también de la influencia de otras variables adicionales (socioeconómicas, demográficas, la movilidad de la población entre otras) por lo tanto, la distribución geográfica que se presenta en este análisis puede cambiar.

Discusión, conclusiones y recomendaciones

1.8 Discusión

Existe evidencia científica que sustenta la influencia del cambio climático, la globalización y los viajes internacionales en las enfermedades transmitidas por mosquitos, y se espera que particularmente debido al cambio climático y a la variabilidad climática aumenten estas enfermedades (Singh, 2014). Esto se debe a que se ha asociado la variabilidad y el cambio climático con los cambios temporales y espaciales que presentan las variables temperatura, humedad y precipitación con los cambios en la biología y ecología de los vectores; y por consiguiente en el riesgo de transmisión de enfermedades (Brady *et al.*, 2014; Colón-González *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Messina *et al.*, 2019; Singh, 2014, Githeko *et al.*, 2000).

Con base en lo anterior, además de realizar la debida vigilancia entomológica a partir de los índices entomológicos en especial con aquellos índices que estudios han demostrado tener una mejor aproximación del riesgo real de transmisión, como lo son el índice pupa/persona y de adultos; existe la necesidad de monitorear las variables climáticas asociadas con la ubicación geográfica de lugares que presentan o no la presencia del mosquito *Aedes aegypti*; esto con el fin de contar con una mejor aproximación de las posibles causas o determinantes de las enfermedades transmitidas por los vectores. Por lo tanto, a partir de información meteorológica y climática de la región y 394 ubicaciones geográficas que consolidaron la información entomológica recolectada durante el año 2017 en barrios del área urbana, veredas, corregimientos y un resguardo indígena del departamento del Cauca; el

presente estudio buscó relacionar la influencia de estas variables con la presencia del mosquito.

Es importante resaltar que para cumplir con el anterior objetivo, se exploraron diferentes metodologías tanto paramétricas como no paramétricas y finalmente, con base en los resultados, se encontró que existe una correlación leve (0,3) a través del método de Pearson entre el índice pupa/persona con la altitud, la latitud y las temperaturas máxima, media y mínima con los rezagos temporales de cinco y siete días y sin rezago. Adicional a esto, la relación evaluada con la regresión lineal múltiple entre la variable pupa/persona transformada y las variables de interés fue significativa para las variables explicativas: altitud, índice Lang, latitud y las temperaturas: máxima, media y mínima con rezago temporal de cinco días y sin rezago.

Con los diagramas del Ombrotérmico de Gaussen generados y el cálculo de los índices bioclimáticos de Lang, Caldas y Caldas-Lang, se encontró que en la región del departamento donde llueve gran parte del año y donde se encuentran ubicados los municipios de Guapi, Timbiquí, López, El Tambo, Morales, Suárez, Buenos Aires, Cajibío, Piendamó, Totoró, Puracé, Piamonte, Sotará, Rosas y la Sierra, según el índice de Lang se clasifica entre una zona perhúmeda con prados y tundras y una zona húmeda de grandes bosques (figura 7). A diferencia de la región anterior, los demás municipios ubicados en la región nororiental y suroccidental se caracterizan por ser regiones húmedas de bosques claros y zonas húmedas de estepa y sabana. En estas regiones se presenta una época seca entre los meses de julio y agosto (anexo D).

Para el año 2100 se estima que la temperatura media mundial aumente entre 1 y 3,5 grados centígrados; y este aumento traerá consigo un aumento en la probabilidad de las ETV hacia nuevas regiones geográficas (Githeko *et al.*, 2000; Yi *et al.*, 2014), afectando principalmente los extremos del rango de las temperaturas en que se genera la transmisión. Cabe resaltar que el riesgo en la

salud humana asociado al impacto del cambio climático en las ETV, variará según determinantes sociales y ambientales que incluyen a la pobreza, la infraestructura sanitaria deficiente, migraciones no controladas, entre otros (OPS, 2017). Con base en esto, y de acuerdo a lo que se mencionó anteriormente, bajo las proyecciones de cambio climático del modelo Escenario Ensamble Promedio (2071-2100), para la región del pacífico se estima un cambio de la temperatura promedio de +2,15°C y un porcentaje de cambio en la precipitación de +18,40% (IDEAM & PNUD, 2015a), estos incrementos y factores adicionales podrían condicionar a que la distribución del mosquito aumente probablemente a nuevas regiones geográficas (Githeko *et al.*, 2000; Yi *et al.*, 2014), que en este caso podrían ser aquellas regiones que se encuentren por encima de los 2000 msnm, y que corresponden a la ubicación de los municipios que para el año 2017 no contaban con vigilancia entomológica ya que no existía registro de la presencia del vector, como lo son los municipios de Almaguer, Jambaló, La Vega, Puracé, San Sebastián, Silvia, Sotará y Totoró. Asimismo, llama la atención que dos de los municipios negativos para la presencia del mosquito *Aedes aegypti* en el año 2017 (Silvia, Totoró), se encuentran geográficamente cercanos de Piendamó, municipio donde se encontró el mayor registro altitudinal para la presencia del mosquito (1904 msnm en este estudio).

Con el gradiente de temperatura se definen los pisos térmicos que conforman la clasificación de Caldas (IDEAM, 2007; CVC, s.f). Este gradiente permite relacionar la variación de la temperatura a medida que aumenta o disminuye la altitud. En este estudio, la temperatura, la altitud y el índice Lang, hacen parte del conjunto de variables significativas del modelo realizado y de acuerdo con esta clasificación los pisos térmicos que se presentan en el departamento del Cauca varían entre el piso térmico cálido y páramo alto, este último se presenta teniendo en cuenta el mayor registro altitudinal (5415 msnm) reportado, y que corresponde al Parque Nacional Natural Nevado del Huila. Para el caso de los municipios positivos para la presencia

del mosquito, estos se encuentran clasificados como regiones cálidas y templadas donde la temperatura varía entre los 17,5°C y los 24°C o más. Sumado a esto y con base a las clasificaciones climáticas de Lang y de Caldas-Lang, la región en general se caracteriza por presentar un factor de humedad entre semihúmedo y súperhúmedo.

De acuerdo con la caracterización realizada en el año 2012 por Padilla *et al*, donde se señala que las regiones en Colombia que presentan transmisión endémica de dengue se caracterizan por contar con una humedad entre moderada y alta, con un promedio de temperatura de 27°C, que varía entre los 15°C y los 40°C y una pluviosidad variable. Con base en lo anterior y con las clasificaciones climáticas realizadas en este estudio se encontró que algunas regiones del departamento Cauca son aptas para la transmisión de dengue. Situación que se corrobora con el reporte de casos de dengue en la región por parte del Instituto Nacional de Salud.

A pesar que la variable de la humedad no fue significativa dentro del modelo es importante mencionar que esta se encuentra directamente relacionada con el comportamiento de los mosquitos. La humedad al estar relacionada con la temperatura y la precipitación, influye específicamente con el aumento de las picaduras de la especie *A. albopictus* pasando de 19 a 60 picaduras / (persona * hora) de la época seca a la época húmeda (Almeida *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2018).

Para el caso de la temperatura, un estudio realizado en China evidenció que las actividades de picaduras de los mosquitos se limita a un rango de temperatura entre los 15°C y 35°C, siendo el rango entre los 25°C y 30°C como el más óptimo (Li *et al.*, 2018). En relación con el virus del dengue, se ha encontrado en Colombia que los brotes significativos de esta enfermedad se presentan en períodos cálidos y secos con un rango óptimo de temperatura para el desarrollo del mosquito y la transmisión del virus entre los 18°C y 32°C (Eastin *et al.*, 2014). En otro estudio se encontró que el rango de temperatura en el que se produce la transmisión de enfermedades transmitidas por mosquitos, incluyendo al dengue se encuentra

entre 14°C y 18°C en el límite inferior y en el límite superior oscila entre 35°C y 40°C (Githeko *et al.*, 2000). Un aumento de la temperatura en el límite inferior trae consigo un impacto significativo y no lineal en el periodo de incubación extrínseco; conocido como el periodo de incubación del virus dentro del mosquito y por consiguiente en la transmisión de la enfermedad (Githeko *et al.*, 2000). En un estudio adicional se encontró que las variaciones de temperatura en la eficiencia vectorial del mosquito pueden ser un determinante de importancia en el patrón cíclico anual de las epidemias del dengue en Bangkok, debido a que en un experimento de laboratorio realizado con monos en Tailandia evidenció que el periodo de incubación extrínseco para el virus DEN-2, disminuyó a siete días, en mosquitos incubados a 32°C y 35°C, a diferencia del segundo grupo donde se encontró que el periodo de incubación extrínseco fue de 12 días en mosquitos incubados a 30°C (Watts *et al.*, 1987).

Lo anterior, llama la atención dado que, de acuerdo con los resultados obtenidos, el aumento principal de la temperatura que se evidenció con el incremento del 2,15°C para el año 2100, se encuentra en el límite inferior de la temperatura media y por tal razón, no solo para final de siglo se espera que el mosquito se encuentre en nuevas regiones geográficas del Cauca, sino también el hecho que al incrementarse la temperatura en el límite inferior podría traer consigo el impacto significativo que se menciona con respecto al periodo de incubación extrínseco. A diferencia del incremento en el límite inferior, la transmisión de las ETV podría disminuir si se aumenta la temperatura en el límite superior (Githeko *et al.*, 2000). Con respecto al límite superior de las temperaturas encontrado en el presente estudio este no superó los 33,5°C, es decir, que la temperatura en el límite superior se encuentra todavía dentro del rango clasificado como óptimo para la supervivencia del mosquito.

Durante el periodo de transmisión podría aumentarse la producción de mosquitos, si se presenta un aumento en la temperatura del agua, dado que se disminuiría el

tiempo de desarrollo de las formas inmaduras del mosquito (Githeko *et al.*, 2000). También, se ha demostrado que la supervivencia hasta la etapa adulta en el mosquito *Aedes aegypti* es mayor a una temperatura de 20°C (92%) y tan solo del 3% a una temperatura de 15°C (Rueda *et al.*, 1990).

Al igual que la humedad, la precipitación no fue significativa debido a que no aportó en la relación con la transformación del índice pupa/persona dentro del presente modelo. Sin embargo, se ha evidenciado que el mosquito puede desarrollarse de manera independiente de esta (Singh, 2014), debido a que el almacenamiento de agua de forma inadecuada en épocas secas contribuye con los criaderos de los mosquitos (Olano *et al.*, 2015). Sin embargo, un estudio realizado en Malasia, encontró una asociación cuantitativa entre la precipitación y el número de casos de dengue durante la época lluviosa al evidenciarse un aumento de 120% de los casos de dengue cuando se presentaron precipitaciones mayores o iguales a 300 mm (Foo *et al.*, 1985). Esto sugiere la importancia de esta variable y de su relación con los brotes de dengue y por lo tanto la necesidad de la vigilancia y seguimiento de esta variable (Foo *et al.*, 1985).

En relación con el uso de rezagos temporales, se ha encontrado también que la temperatura mínima que se ha registrado en un tiempo pasado (rezago de dos meses), al igual que la temperatura máxima como la humedad relativa sin rezago afecta significativamente la incidencia del dengue (Tuladhar *et al.*, 2019). Para el presente estudio se encontró que tanto las temperaturas (máxima, media y mínima) con rezago temporal de cinco días y sin rezago, resultaron ser significativas dentro del modelo. Es decir que existe influencia del promedio de estas variables de días atrás no solo en la forma inmadura de la pupa sino existe influencia en las formas inmaduras anteriores a la pupa (larva y huevo).

Complementando la importancia de incluir los rezagos temporales en estudios epidemiológicos que incluyan la aplicación de la geomática, se encuentra la

necesidad de realizar estudios longitudinales dada la experiencia que se documentó en un estudio en Perú del año 2017, donde se evidenciaron asociaciones entre las mediciones de las cohortes longitudinales de algunos índices entomológicos incluido el índice de adultos y evidencia serológica de infección por la enfermedad del dengue y no en las mediciones transversales y la infección por este mismo virus (Cromwell *et al.*, 2017). Por tal razón, no solo es importante contemplar la influencia de las variables climáticas de días anteriores sino también la importancia de realizar muestreos longitudinales y no transversales. Dado que habitualmente los índices entomológicos son calculados a partir de una vigilancia transversal, esta presenta una utilidad limitada para la salud pública a la hora de definir regiones con un mayor riesgo de infección por el virus del dengue (Cromwell *et al.*, 2017). Adicional a esto, el análisis de estos muestreos longitudinales deben realizarse de manera general y de manera segmentada (periodos cortos) dado que se debe contemplar la posible influencia de regímenes climáticos anteriores teniendo en cuenta que el clima a corto plazo y la biología y comportamiento del vector puede ser diferente de una estación a otra (López *et al.*, 2018).

De forma adicional, en un estudio que buscaba relacionar la temperatura del aire con las coordenadas geográficas a partir de una regresión lineal múltiple para datos georreferenciados, evidenció la existencia de tendencias significativas en el incremento de la temperatura anual del aire que aumentan en la dirección de sur a norte (latitud) y con la altitud en la dirección de este a oeste (Yang *et al.*, 2013). En el presente estudio, tanto la longitud (coordenada x), como la latitud (coordenada y) se encuentra relacionada con la temperatura (López *et al.*, 2018), y esta última coordenada geográfica (latitud) resultó ser significativa dentro del modelo. Estudios han demostrado que un aumento en la temperatura puede ocasionar que aumente la probabilidad que se presente casos de ETV en nuevas regiones geográficas y específicamente se ha

evidenciado un desplazamiento de las ETV hacia mayores latitudes y altitudes con una mayor duración de los periodos de transmisión en el año (López *et al.*, 2018; Ruiz-López *et al.*, 2016). Esto podría significar que cambios asociados geográficamente en la dirección de la latitud, estarían relacionados con la presencia del mosquito a través del índice pupa/persona. Tanto la latitud como la altitud y la temperatura (máxima, media y mínima) fueron significativas dentro del modelo y a su vez estas se encuentran relacionadas entre sí como se ha demostrado previamente.

Con base en la literatura revisada y a los resultados de este estudio, los valores para las variables geográficas (altitud y latitud) y las variables meteorológicas de la temperatura, precipitación, incluyendo, el índice bioclimático (Lang), calculado a partir de los promedios climáticos para el área de estudio, se encuentran dentro de las condiciones óptimas para la supervivencia, desarrollo y la reproducción de los mosquitos (Brady *et al.*, 2014; Colón-González *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Messina *et al.*, 2019). Por tanto, se resalta la necesidad de incluir estas variables dentro los sistemas de vigilancia entomológicos e igualmente la necesidad de realizar estudios longitudinales dada la experiencia que se documentó en estudio en Perú del año 2017 (Cromwell *et al.*, 2017).

1.9 Conclusiones

A través del presente trabajo se exploraron diferentes metodologías para modelar la asociación entre la variable respuesta y el conjunto de variables explicativas. Dentro de las cuales se encuentran la descrita por Arbia en el año 2014, ajustándose inicialmente los modelos: Spatial Autoregressive Model with Autoregressive Disturbances of Order (1,1) [SARAR(1,1)], Spatial Error Model (SEM), Spatial Lag Model (SLM) y Pure Spatial Autoregressive Model. Luego,

haciendo uso de la metodología descrita por Brunsdon del año 1996 y Charlton & Fotheringham del 2008, se exploró la técnica de regresión ponderada geográficamente. Sin embargo, como se mencionó anteriormente en ninguno de los modelos mencionados se cumplió con el supuesto distribucional en los residuales y por esta razón, se optó por transformar la variable respuesta (índice pupa/persona) y siguiendo la metodología de Yang *et al*, se ajustó el modelo de regresión lineal múltiple donde se incluyeron las coordenadas en el conjunto de las variables independientes.

Se encontró que las variables que según el modelo explican de mejor manera el índice pupa/persona fueron: la latitud, la altitud, el índice Lang, las temperaturas sin rezago y con rezago temporal de cinco días (máxima, mínima y media). Lo cual es corroborado con la literatura encontrada y que expone la relación que existe entre las variables ambientales con las ETV y los vectores que las transmiten.

A partir de la temperatura media (variable representativa en el modelo) se delimitaron las áreas geográficas que se encontraron con un bajo y alto riesgo tomando como base los valores del año 2017 y el incremento de 2,15°C que se espera aumente en la región del pacífico para finales del siglo. Se obtuvo como resultado que el principal cambio evidenciado con respecto al cambio del nivel de riesgo de bajo a moderado se encuentra en los municipios que se encuentran ubicados en la Cordillera Central de los Andes. Igualmente, en las regiones aledañas a la Cordillera se evidenció un cambio de moderado a alto con respecto al nivel de riesgo.

Asimismo, se destaca la necesidad de incluir dentro del mapeo de la distribución espacial de enfermedades, factores de riesgo asociados a estas, como lo son las variables meteorológicas y climáticas. Para lograr lo anterior, igualmente, se resalta la importancia de la recopilación, gestión y análisis eficiente de la información a través de los sistemas de información geográfica.

Finalmente, se buscó hacer énfasis en la necesidad de incluir: 1) el registro de la ubicación geográfica de los muestreos entomológicos y epidemiológicos; 2) el cambio y variabilidad climática; y 3) las condiciones meteorológicas locales con el fin de contribuir en la vigilancia y el monitoreo de futuros brotes de enfermedades.

1.10 Recomendaciones

Dentro de los sistemas de vigilancia no solo de enfermedades transmitidas por vector sino también de otras enfermedades se ha evidenciado la importancia de incluir el registro de la dirección, la ubicación geográfica de las viviendas incluyendo atributos como número de habitantes y de depósitos con agua, información relacionada con el abastecimiento de agua y la recolección de residuos sólidos, debido a que el insumo principal del análisis espacial en diferentes áreas del conocimiento demanda la ubicación geográfica, por tal razón; se recomienda que se mejore el sistema de geocodificación del área urbana y rural del país. Igualmente, dada la evidencia científica que existe en cuanto a la asociación tanto de los vectores como de los virus que estos transmiten a los seres humanos, y más aún por los cambios que se están presentando y que se pronostican a futuro de las variables climáticas.

Se resalta adicionalmente, la necesidad de incluir muestreos de tipo espacial y realizar estudios longitudinales dentro de la vigilancia entomológica que se realiza en el país y de esta manera poder obtener hallazgos representativos a la hora de realizar modelos de regresión espacial tanto paramétricos como no paramétricos. Igualmente, se recomienda que en estudios que se realicen a futuro se exploren modelos que incluyan otras variables que se ha demostrado tienen influencia en

las ETV, como lo pueden ser las variables socioeconómicas, demográficas y relacionadas con la movilidad poblacional.

Dentro de las limitaciones que se encontraron dentro del presente estudio se encuentra la falta de información de las variables climáticas para el año de interés; tema que finalmente fue solucionado al considerar información climática que es consolidada a través del monitoreo de la tierra con satélites y que a la vez, son una fuente confiable de información a pesar del desfase que se pueda presentar si se relacionan con observaciones de estaciones meteorológicas.

Dentro de las fortalezas del presente estudio, se encuentra que para el cumplimiento de los objetivos propuestos se participó en cursos de la universidad relacionados con temas de análisis espacial, de meteorología y clima, estadísticos y de modelamiento.

A. Clasificación de Caldas

Piso Térmico	Rango de elevación	Rango de temperaturas	Variación de altitud por condiciones climáticas
Cálido	0 - 1000	$T \geq 24^{\circ}\text{C}$	LS \pm 400
Templado	1001 a 2000	$24^{\circ}\text{C} > T > 17.5^{\circ}\text{C}$	LS \pm 500
Frío	2001 a 3000	$17.5^{\circ}\text{C} > T > 12^{\circ}\text{C}$	LS \pm 500
Páramo bajo	3001 a 3700	$12^{\circ}\text{C} > T > 7^{\circ}\text{C}$	LS \pm 400
Páramo alto	3701 a 4200	$T < 7^{\circ}\text{C}$	LI \pm 400

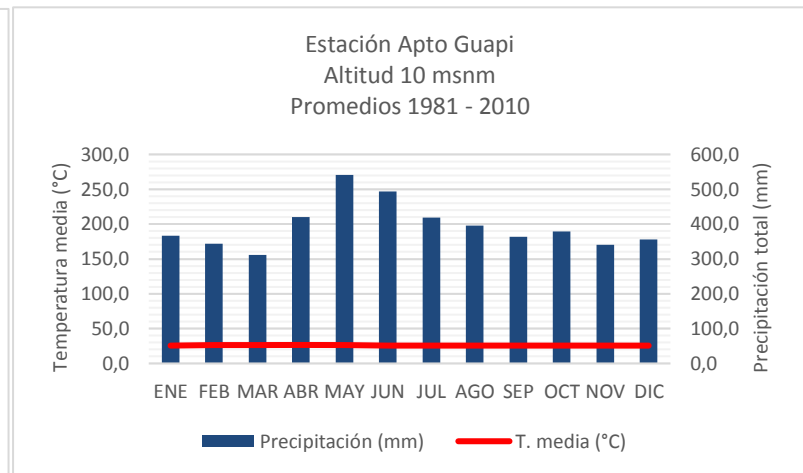
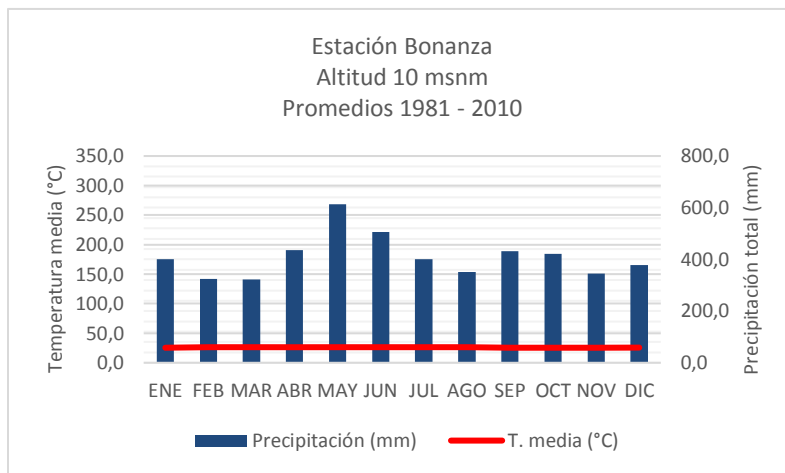
B. Clasificación climática de Lang

Factor de Humedad	Factor de Lang (P/T)	Símbolo
Desértico	0 a 20	D
Árido	20.1 a 40.0	A
Semiárido	40.1 a 60.0	Sa
Semihúmedo	60.1 a 100	Sh
Húmedo	100.1 a 160	H
Superhúmedo	> 160	SHu

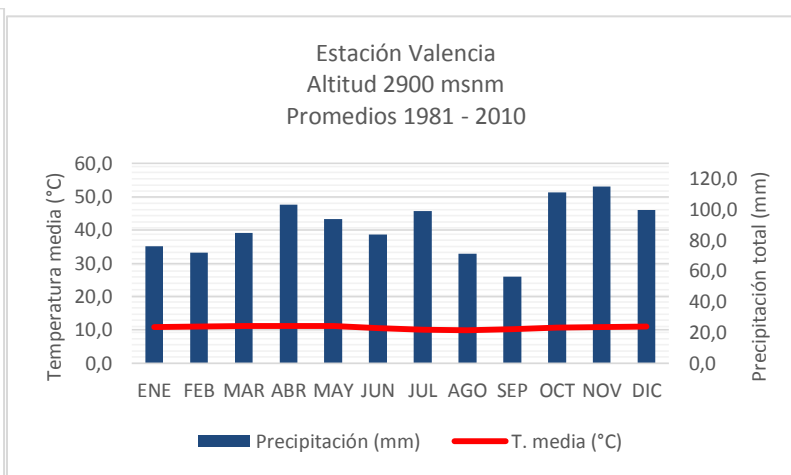
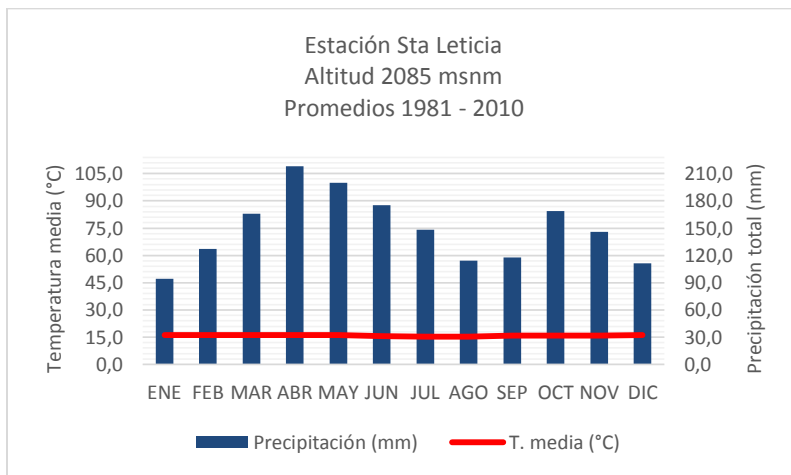
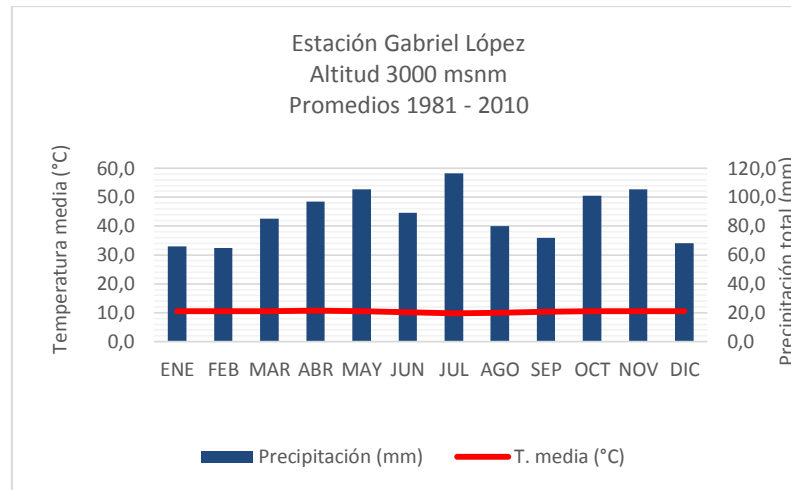
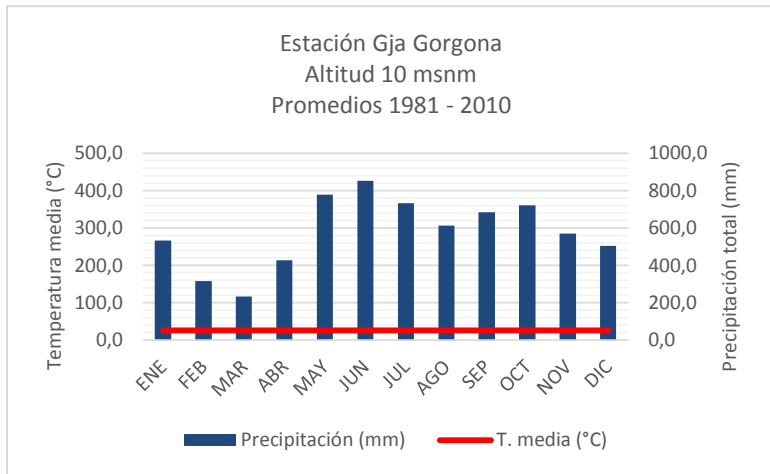
C. Clasificación de Caldas – Lang

Tipo climático	Símbolo
Cálido superhúmedo	CSHu
Cálido húmedo	CH
Cálido semihúmedo	CsH
Cálido semiárido	Csa
Cálido árido	CA
Cálido desértico	CD
Templado superhúmedo	TSHu
Templado húmedo	TH
Templado semihúmedo	Tsh
Templado semiárido	Tsa
Templado árido	TA
Templado desértico	TD
Frío superhúmedo	FSHu
Frío húmedo	FH
Frío semihúmedo	Fsh
Frío semiárido	Fsa
Frío árido	FA
Frío desértico	FD
Páramo bajo superhúmedo	PBSHu
Páramo bajo húmedo	PBH
Páramo bajo semihúmedo	PBsh
Páramo bajo semiárido	Pbsa
Páramo alto superhúmedo	PASHu
Páramo alto húmedo	PAH
Nieves perpetuas	NP

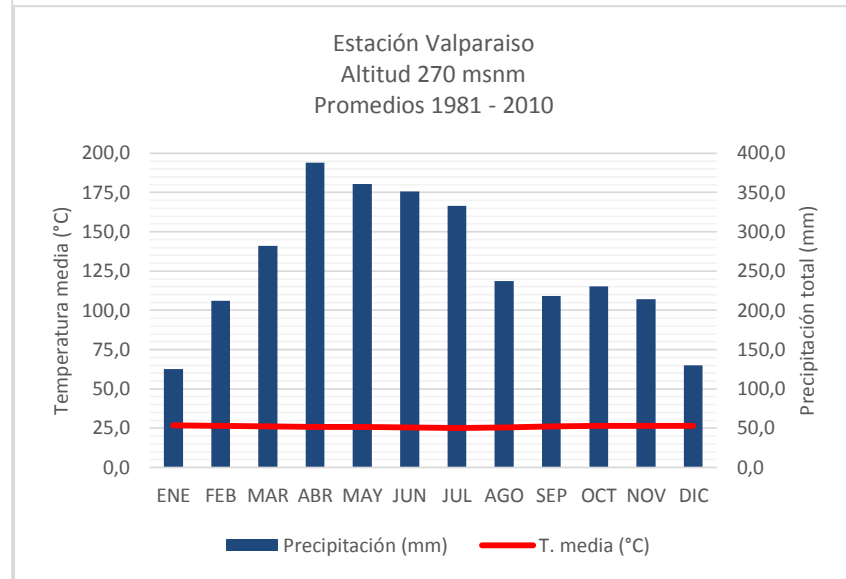
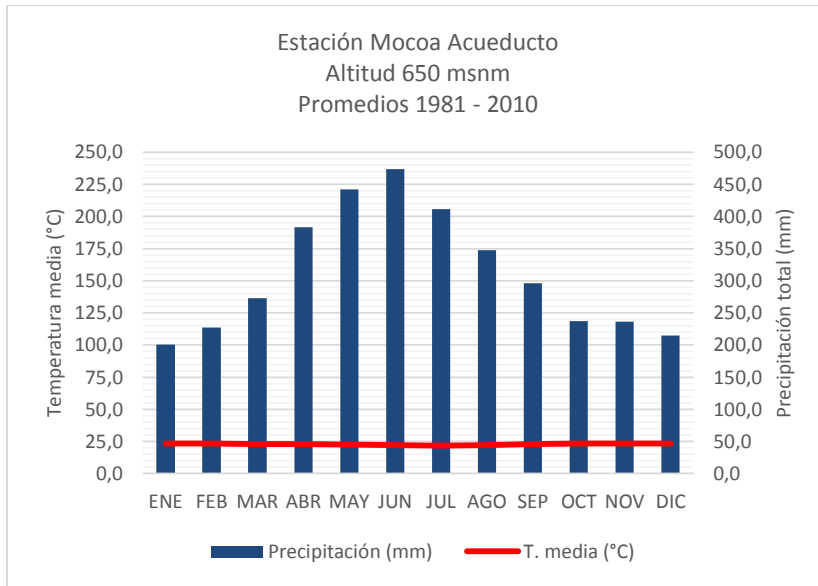
D. Diagramas Ombrotérmico de Gausse

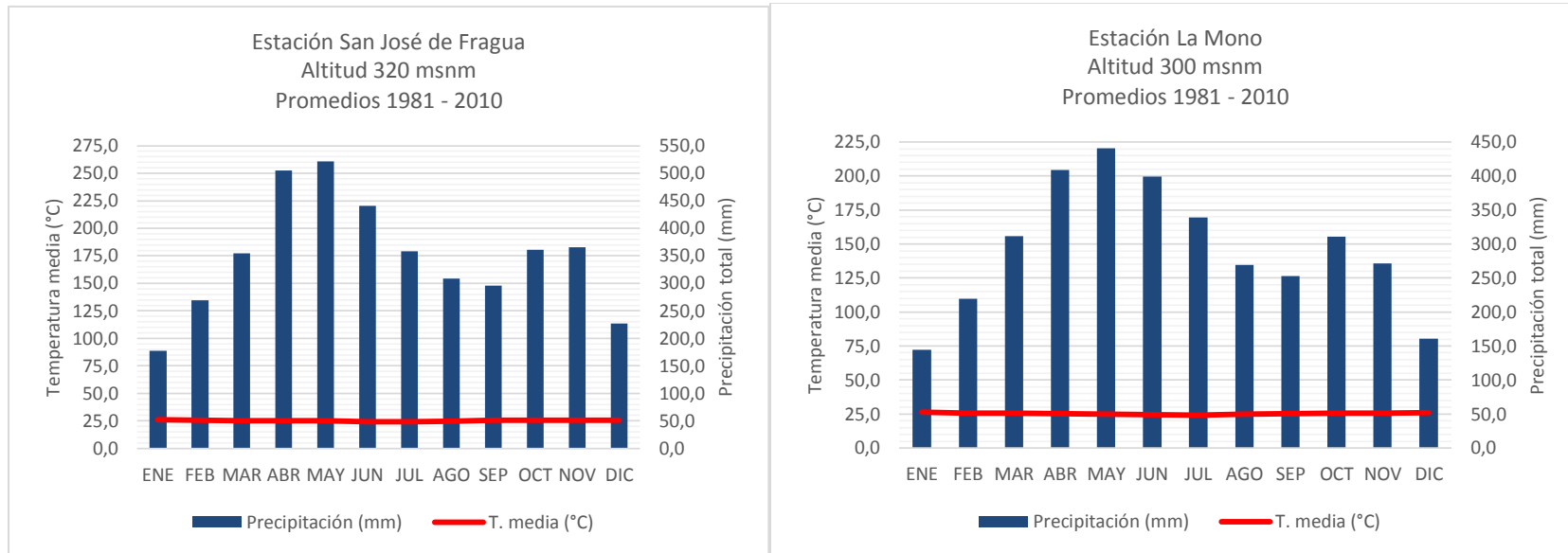


88 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia

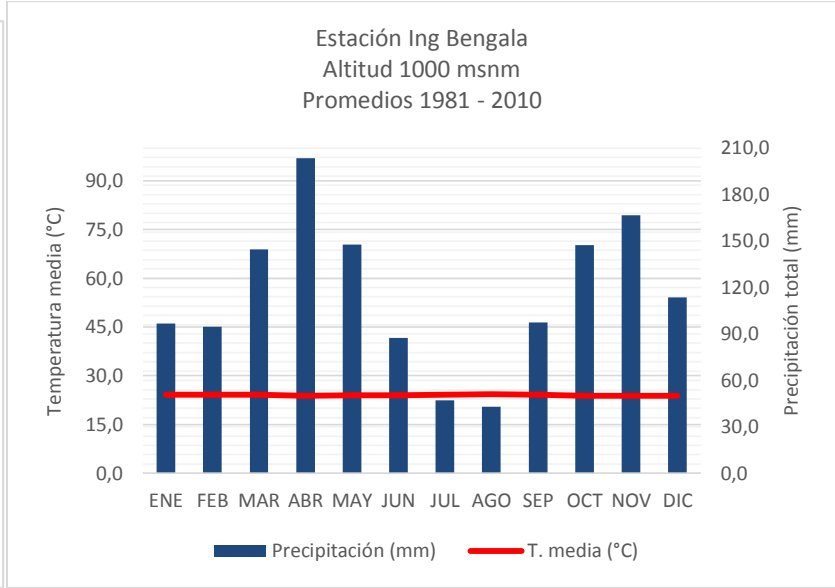
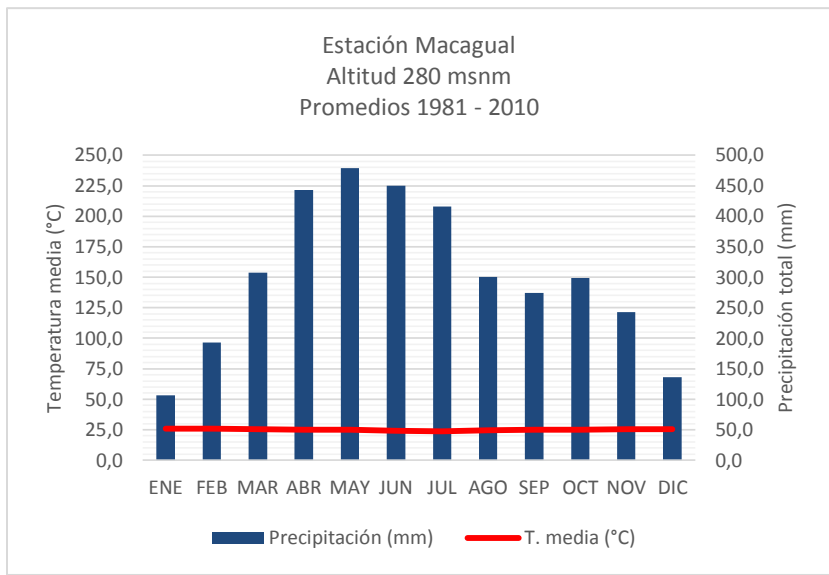


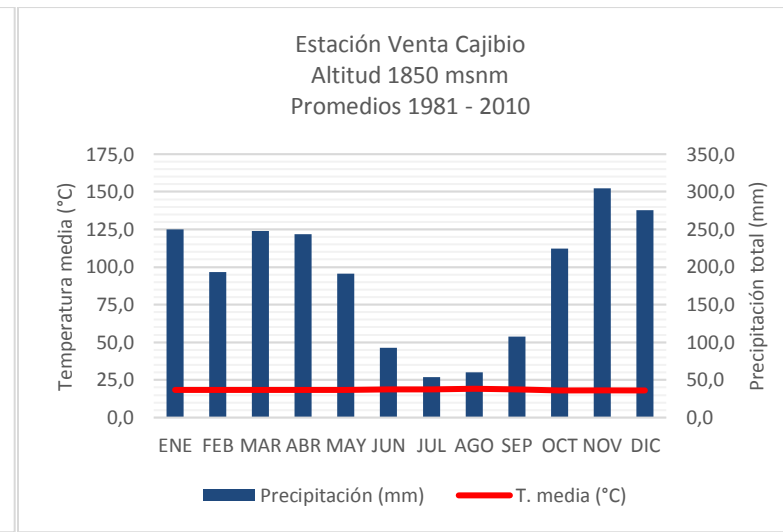
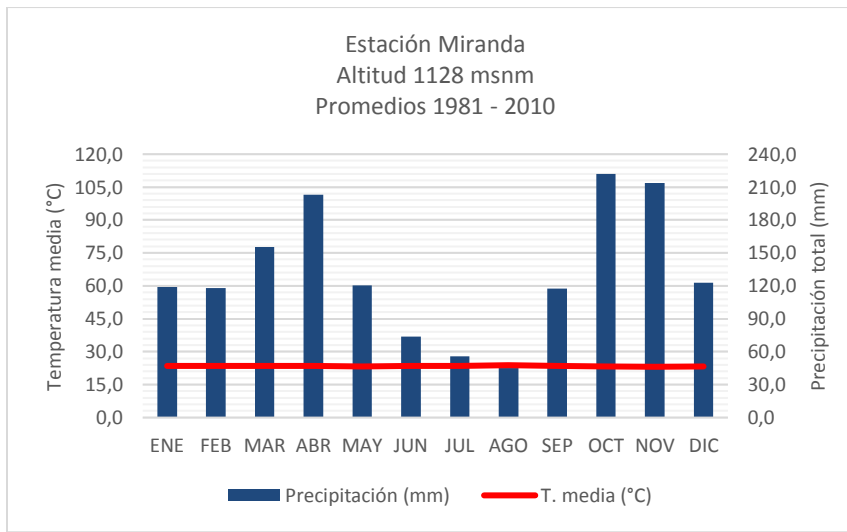
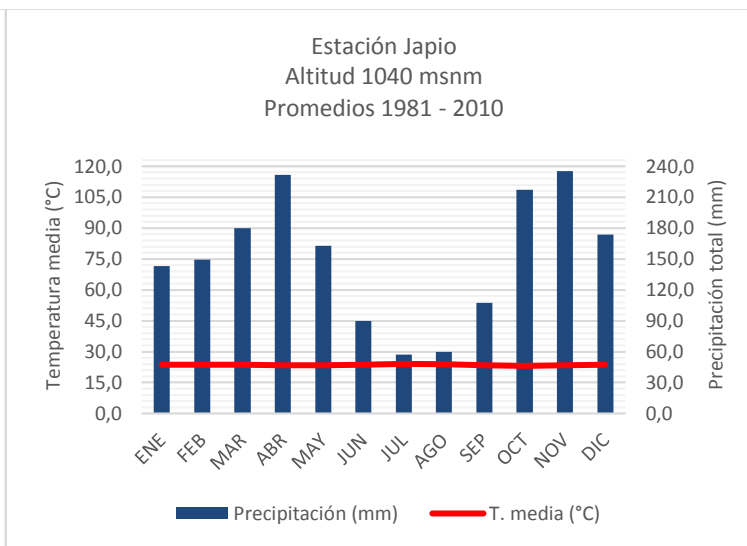
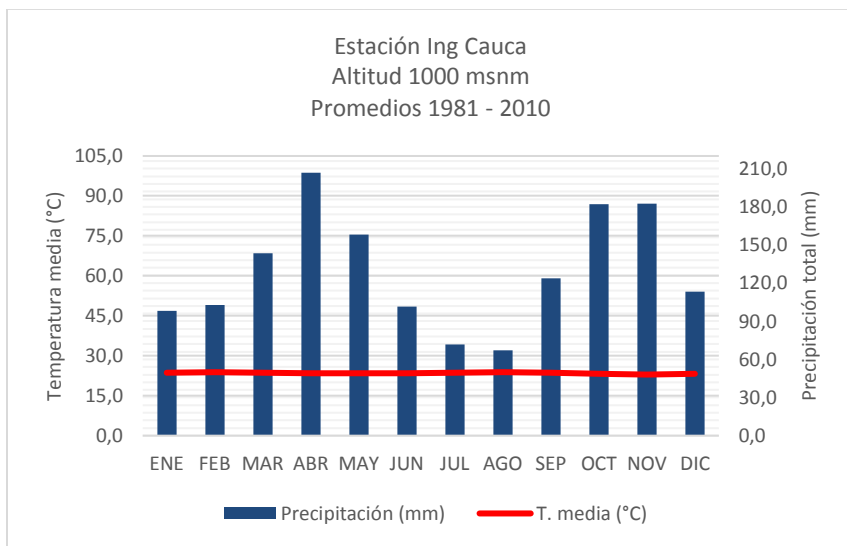
90 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia



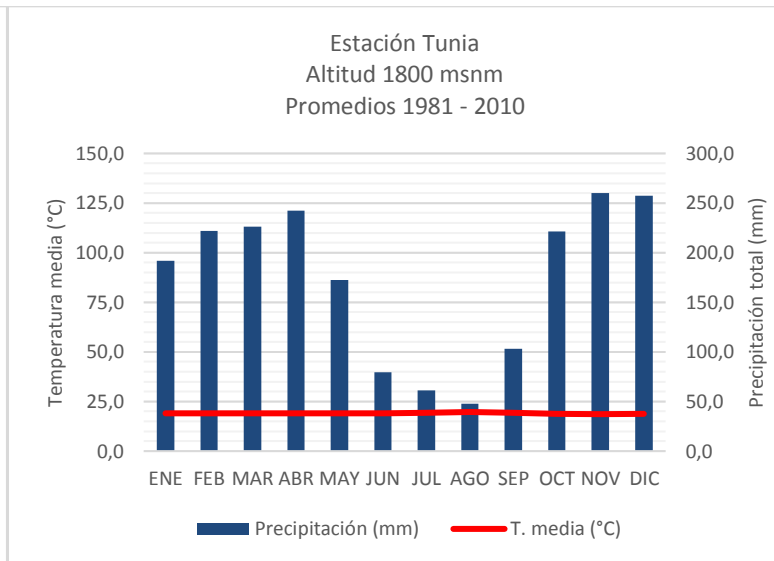
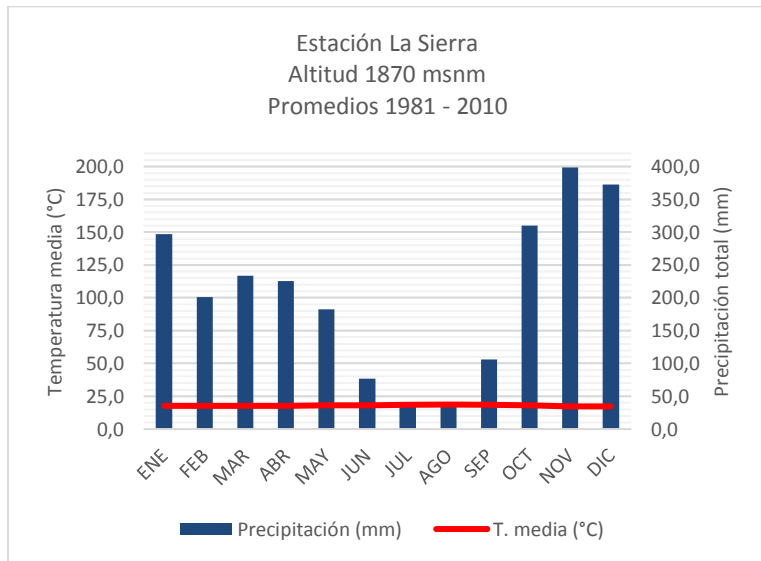
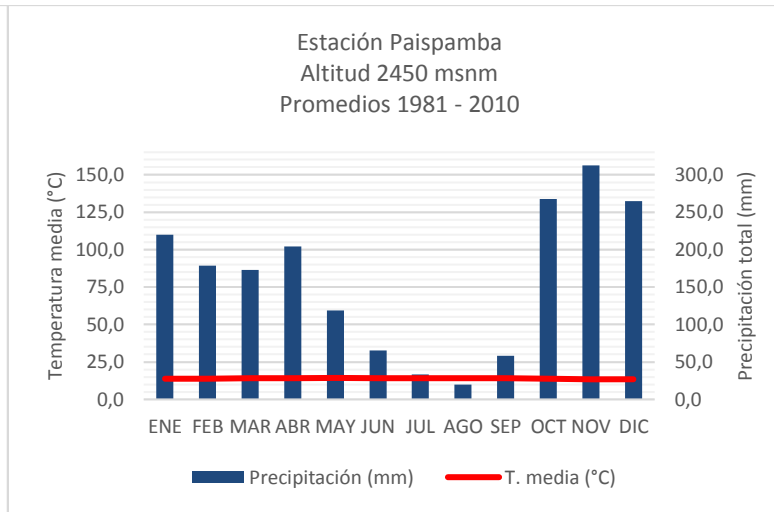
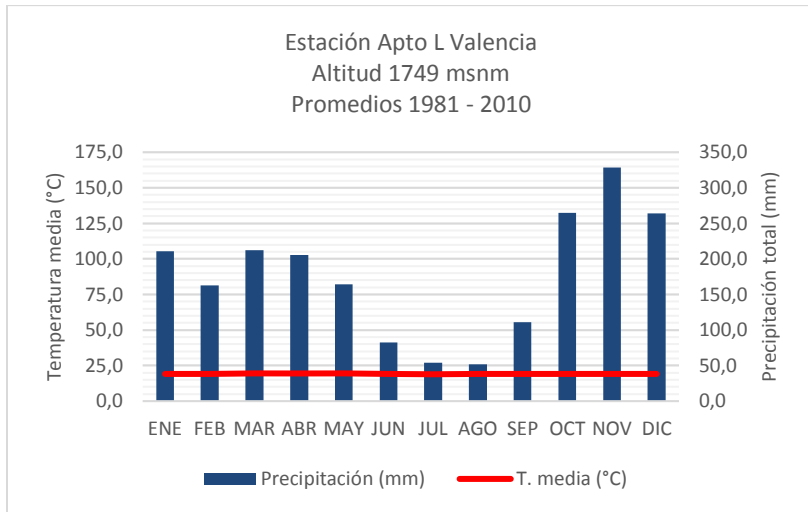


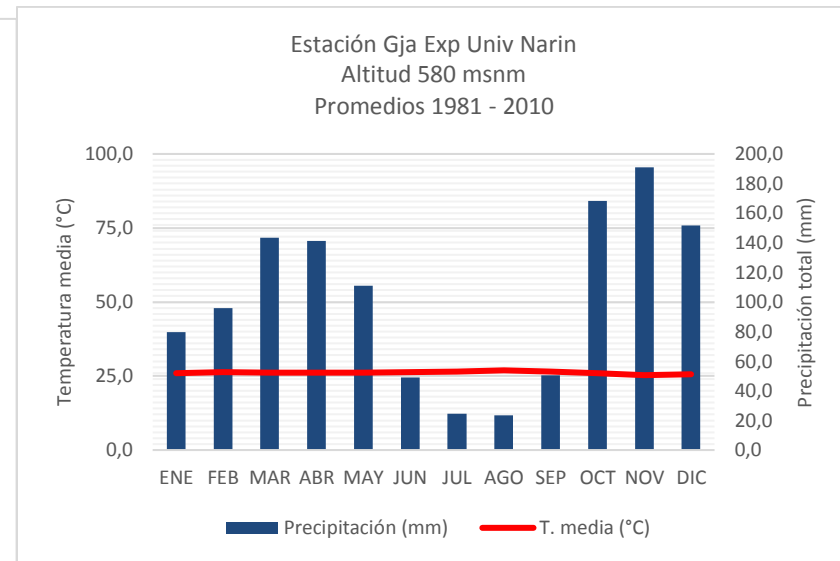
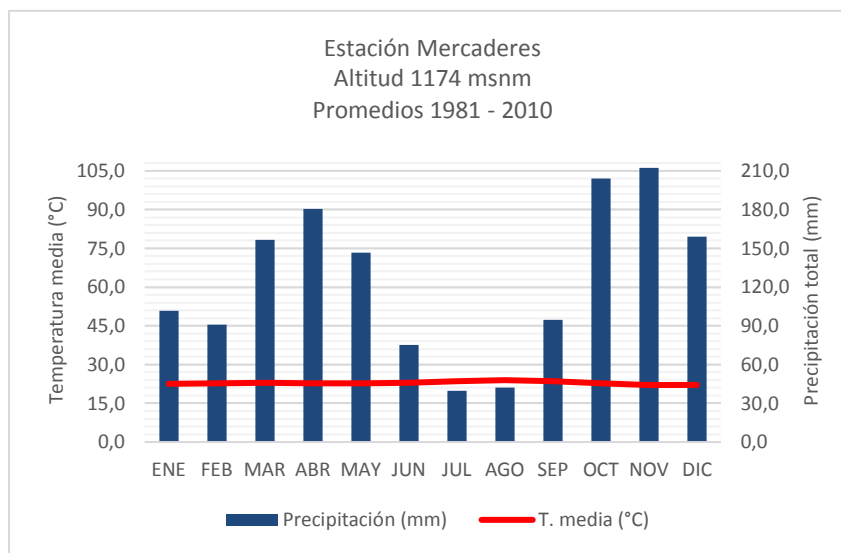
92 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia



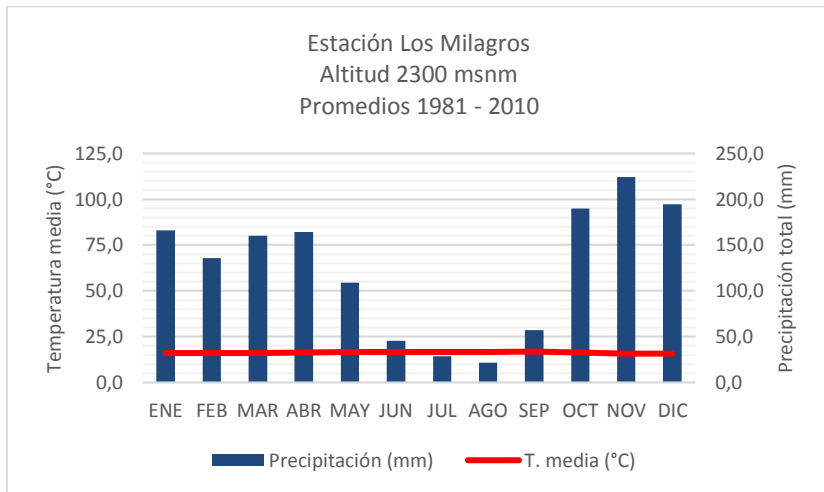
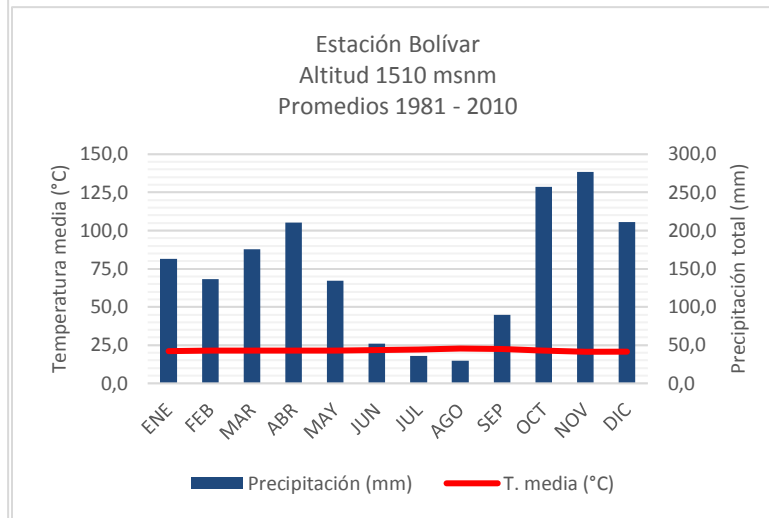
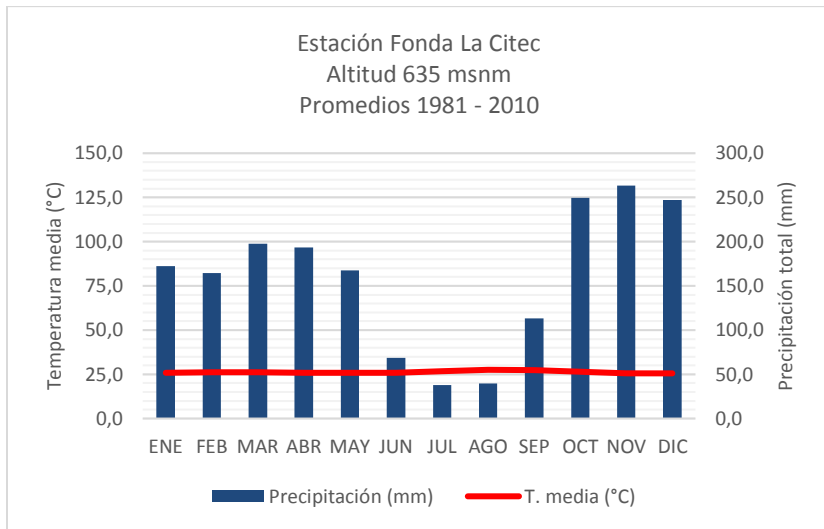


94 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia





96 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia



E. Base de datos del proyecto

Por favor remitirse al archivo de Excel adjunto.

F. Resultado de la correlación entre el índice pupa/persona transformado y las variables ambientales sin rezago y con rezago temporal de cinco y siete días

Tabla 4. Correlación entre el índice pupa/persona transformado y las variables ambientales sin rezago y con rezago temporal de cinco y siete días

		Rezago temporal																			
Rezago temporal	No aplica					Sin rezago					Cinco días					Siete días					
	Variab les	Longit ud (x)	Latitu d (y)	Pupa/p ersona (trans)	msnm	Índice Lang	T. Máx (°C)	T. Mín (°C)	T. Med (°C)	Precipi tación (mm)	Hume dad Relati va (%)	T. Máx (°C)	T. Mín (°C)	T. Med (°C)	Precipi tación (mm)	Hume dad Relati va (%)	T. Máx (°C)	T. Mín (°C)	Hume dad Relati va (%)	T. Med (°C)	Precipi tación (mm)
No aplic a	Longit ud (x)	1	0,4785 80539	0,0139 02363	0,4787 92731	- 0,5308 6596	- 0,4691 85032	- 0,5365 74877	- 0,5392 10606	- 0,2790 73426	- 0,1834 82657	- 0,4486 6744	- 0,5456 40379	- 0,5344 45734	- 0,6270 22018	- 0,2242 96413	- 0,4368 3992	- 0,5524 97593	- 0,2573 53423	- 0,5291 49367	- 0,5776 54285
	Latitud (y)	0,4785 80539	1	0,2991 52354	- 0,1127 16232	- 0,0518 05708	0,0834 30281	0,1431 98627	0,1221 30376	- 0,2561 70848	0,1037 20281	0,0880 73282	0,1235 44872	0,1139 52084	- 0,2538 86042	0,0675 95562	0,1147 53435	0,1182 46593	0,0264 51847	0,1242 52336	- 0,2248 57493
	Pupa/p ersona (trans)	0,0139 02363	0,2991 52354	1	- 0,3704 75317	- 0,0769 38628	0,3219 20447	0,2396 45061	0,2993 20549	- 0,0936 21082	- 0,0622 42634	0,3281 17081	0,2529 67052	0,3103 29129	- 0,0071 55198	- 0,0486 99189	0,3189 63168	0,2563 32143	- 0,0341 74327	0,3057 89967	- 0,0769 4021
	Índice Lang	- 0,5308 6596	- 0,0518 05708	- 0,0769 38628	- 0,4067 1718	1	0,4035 526	0,5668 4075	0,5216 67421	0,1474 41165	0,3140 00669	0,3892 77968	0,5611 92518	0,5120 66149	0,3349 15624	0,3235 73449	0,3870 44355	0,5620 60013	0,3389 35705	0,5085 50153	0,3960 40903

10 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona
 0 del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia

	msnm	0,4787 92731	0,1127 16232	0,3704 75317	1	0,4067 1718	0,7016 15964	0,8022 95374	0,8062 50946	0,1259 43225	0,2757 47004	0,6957 8941	0,8102 65809	0,8089 92958	0,3135 98319	0,2950 13952	0,7074 8851	0,8117 21852	0,2907 79801	0,8114 51475	0,3042 07206
Sin reza go	T. Máx (°C)	0,4691 85032	0,0834 30281	0,3219 20447	0,7016 15964	0,4035 526	1	0,7458 45456	0,9305 60006	0,0815 47662	0,1894 774	0,9969 65438	0,7583 11478	0,9372 2108	0,2240 21807	0,1613 6522	0,9898 93285	0,7613 31251	0,1559 48748	0,9302 75933	0,2271 30085
	T. Mín (°C)	0,5365 74877	0,1431 98627	0,2396 45061	0,8022 95374	0,5668 4075	0,7458 45456	1	0,9379 46379	0,0175 38577	0,5126 41592	0,7276 6721	0,9984 04927	0,9292 95791	0,4951 29811	0,5317 46296	0,7495 15949	0,9974 06003	0,5191 91348	0,9349 52907	0,5060 22891
	T. Med (°C)	0,5392 10606	0,1221 30376	0,2993 20549	0,8062 50946	0,5216 67421	0,9305 60006	0,9379 46379	1	0,0520 91878	0,1831 37163	0,9189 87328	0,9435 61209	0,9987 13304	0,3887 73893	0,2082 77431	0,9273 11548	0,9445 84861	0,2042 01924	0,9982 05737	0,3963 73529
	Precipi tación (mm)	0,2790 73426	0,2561 70848	0,0936 21082	0,1259 43225	0,1474 41165	0,0815 47662	0,0175 38577	0,0520 91878	1	0,0794 19087	0,0943 07402	0,0215 77576	0,0610 09678	0,3415 81987	0,0887 63058	0,0817 51493	0,0234 00736	0,0728 68724	0,0552 04536	0,4325 53206
	Humed ad Relativ a (%)	0,1834 82657	0,1037 20281	0,0622 42634	0,2757 47004	0,3140 00669	0,1894 774	0,5126 41592	0,1831 37163	0,0794 19087	1	0,2121 20442	0,4939 77255	0,1617 90894	0,4416 8813	0,9912 30136	0,1700 98116	0,4885 13039	0,9646 36073	0,1793 90775	0,4551 93765
Cinc o días	T. Máx (°C)	0,4486 6744	0,0880 73282	0,3281 17081	0,6957 8941	0,3892 77968	0,9969 65438	0,7276 6721	0,9189 87328	0,0943 07402	0,2121 20442	1	0,7401 05761	0,9287 67155	0,2090 74218	0,1916 77304	0,9939 57964	0,7429 0443	0,1890 96423	0,9222 90282	0,2202 11057
	T. Mín (°C)	0,5456 40379	0,1235 44872	0,2529 67052	0,8102 65809	0,5611 92518	0,7583 11478	0,9984 04927	0,9435 61209	0,0215 77576	0,4939 77255	0,7401 05761	1	0,9366 53725	0,4964 27562	0,5180 8399	0,7580 29301	0,9997 8797	0,5113 97853	0,9406 72181	0,4999 6563
	T. Med (°C)	0,5344 45734	0,1139 52084	0,3103 29129	0,8089 92958	0,5120 66149	0,9372 2108	0,9292 95791	0,9987 13304	0,0610 09678	0,1617 90894	0,9287 67155	0,9366 53725	1	0,3825 12059	0,1857 25713	0,9355 00597	0,9379 94546	0,1833 83066	0,9988 42177	0,3902 63405
	Precipi tación (mm)	0,6270 22018	0,2538 86042	0,0071 55198	0,3135 98319	0,3349 15624	0,2240 21807	0,4951 29811	0,3887 73893	0,3415 81987	0,4416 8813	0,2090 74218	0,4964 27562	0,3825 12059	1	0,4605 72815	0,2165 17647	0,5014 73152	0,4747 48199	0,3869 42989	0,9128 14854
	Humed ad Relativ a (%)	0,2242 96413	0,0675 95562	0,0486 99189	0,2950 13952	0,3235 73449	0,1613 6522	0,5317 46296	0,2082 77431	0,0887 63058	0,9912 30136	0,1916 77304	0,5180 8399	0,1857 25713	0,4605 72815	1	0,1574 77076	0,5141 7916	0,9864 31856	0,1999 93721	0,4518 97511
Siet e días	T. Máx (°C)	0,4368 3992	0,1147 53435	0,3189 63168	0,7074 8851	0,3870 44355	0,9898 93285	0,7495 15949	0,9273 11548	0,0817 51493	0,1700 98116	0,9939 57964	0,7580 29301	0,9355 00597	0,2165 17647	0,1574 77076	1	0,7590 0837	0,1724 11107	0,9342 44922	0,2462 66029
	T. Mín (°C)	0,5524 97593	0,1182 46593	0,2563 32143	0,8117 21852	0,5620 60013	0,7613 31251	0,9974 06003	0,9445 84861	0,0234 00736	0,4885 13039	0,7429 0443	0,9997 8797	0,9379 94546	0,5014 73152	0,5141 7916	0,7590 0837	1	0,5103 93794	0,9412 96021	0,4998 65193
	Humed ad Relativ a (%)	0,2573 53423	0,0264 51847	0,0341 74327	0,2907 79801	0,3389 35705	0,1559 48748	0,5191 91348	0,2042 01924	0,0728 68724	0,9646 36073	0,1890 96423	0,5113 97853	0,1833 83066	0,4747 48199	0,9864 31856	0,1724 11107	0,5103 93794	1	0,1901 76006	0,4332 85473
	T. Med (°C)	0,5291 49367	0,1242 52336	0,3057 89967	0,8114 51475	0,5085 50153	0,9302 75933	0,9349 52907	0,9982 05737	0,0552 04536	0,1793 90775	0,9222 90282	0,9406 72181	0,9988 42177	0,3869 42989	0,1999 93721	0,9342 44922	0,9412 96021	0,1901 76006	1	0,4014 88244
	Precipi tación (mm)	0,5776 54285	0,2248 57493	0,0769 4021	0,3042 07206	0,3960 40903	0,2271 30085	0,5060 22891	0,3963 73529	0,4325 53206	0,4551 93765	0,2202 11057	0,4999 6563	0,3902 63405	0,9128 14854	0,4518 97511	0,2462 66029	0,4998 65193	0,4332 85473	0,4014 88244	1

G. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple

Tabla 5. Coeficientes y nivel de significancia de las variables ambientales (independientes) del modelo de regresión lineal múltiple sin rezago temporal, rezago temporal de cinco y siete días.

			<i>Estimación</i>	<i>Error estándar</i>	<i>Valor t</i>	<i>p-valor</i>	
<i>Rezago temporal</i>		Intercepto	-1,778969e+01	7,658962e+00	-2,32273	0,0207297	*
	No aplica	Longitud (x)	-1,537615e-07	2,970885e-07	-0,51756	0,605070	
		Latitud (y)	1,089414e-06	1,830843e-07	5,95034	6,1567e-09	***
		Índice Lang	-5,118971e-04	1,788471e-04	-2,86221	0,0044437	***
		msnm	-1,262389e-04	2,604544e-05	-4,84687	1,8416e-06	***
	Sin rezago	T. Máx (°C)	4,798957e+01	2,373713e+01	2,02171	0,0439181	*
		T. Mín (°C)	4,928666e+01	2,380502e+01	2,07043	0,0390977	*
		T. Med (°C)	-9,747620e+01	4,749793e+01	2,05222	0,0408439	*

10 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona
 2 del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia

	Precipitación (mm)	1,621919e-03	9,781441e-04	1,65816	0,0981237	.
	Humedad Relativa (%)	-2,745361e-01	4,063958e-01	-0,67554	0,4997511	.
Cinco días	T. Máx (°C)	-2,922000e+02	1,219012e+02	-2,39702	0,0170189	*
	T. Mín (°C)	-2,930815e+02	1,204490e+02	-2,43324	0,0154322	*
	T. Med (°C)	0,0154322	2,423336e+02	2,41801	0,0160830	*
	Precipitación (mm)	1,116877e-03	1,063327e-03	1,05036	0,2942301	.
	Humedad Relativa (%)	2,464497e-01	1,300196e+00	0,18955	0,8497661	.
Siete días	T. Máx (°C)	2,190651e+02	1,178428e+02	1,85896	0,0638180	.
	T. Mín (°C)	2,176312e+02	1,164196e+02	1,86937	0,0623527	.
	Humedad Relativa (%)	2,148986e-01	1,167715e+00	0,18403	0,8540869	.
	T. Med (°C)	-4,372179e+02	2,342419e+02	1,86652	0,0627506	.
	Precipitación (mm)	-1,138807e-03	7,454386e-04	-1,52770	0,1274321	.

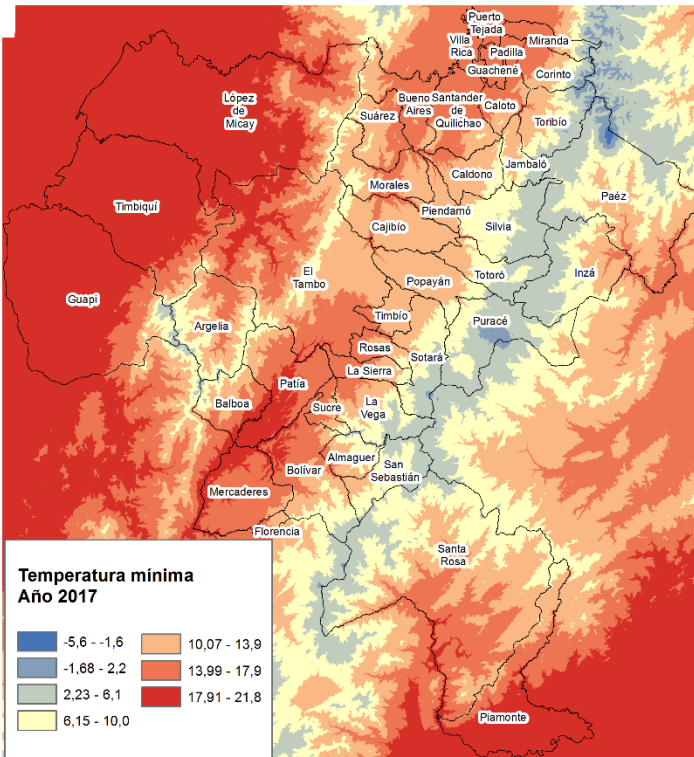
R^2 0,3705849 Adj. R^2 0,3386093 Num. obs. 394

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; $p < 0,1$

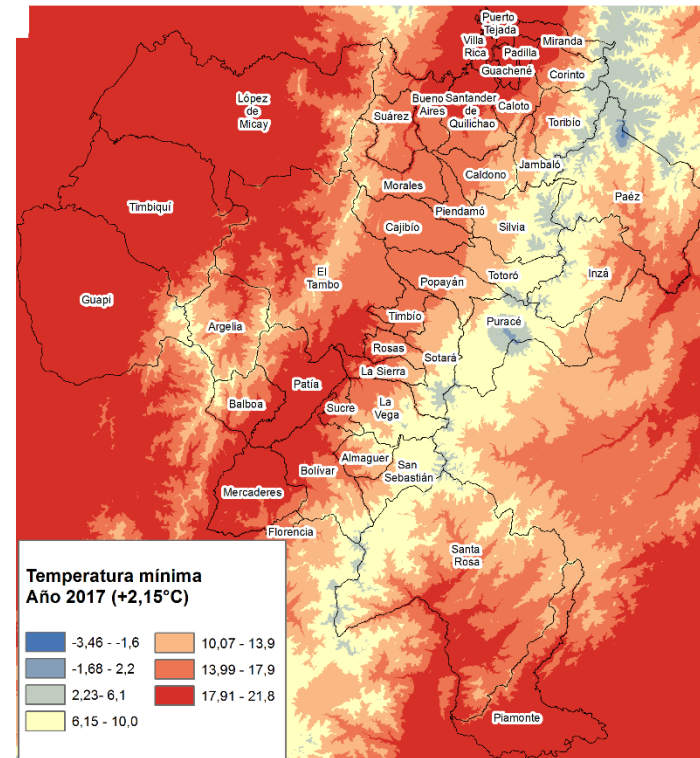
H. Diferencia geográfica del incremento de la temperatura promedio de 2,15°C en las temperaturas mínima, media y máxima del año 2017 bajo el escenario del cambio climático para final de siglo

10 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona
 4 del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia

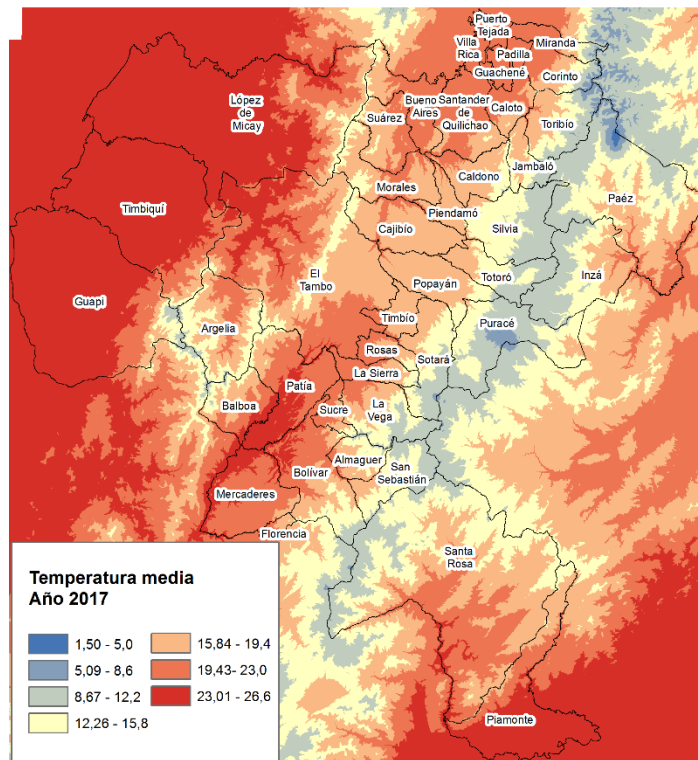
Temperatura mínima del año 2017



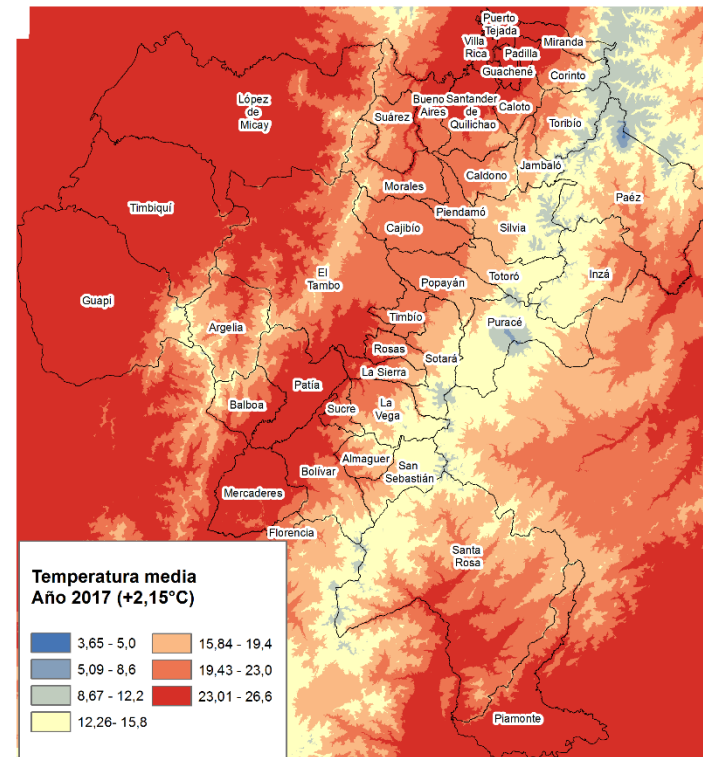
Temperatura mínima del año 2017 con el incremento de 2,15°C



Temperatura media del año 2017

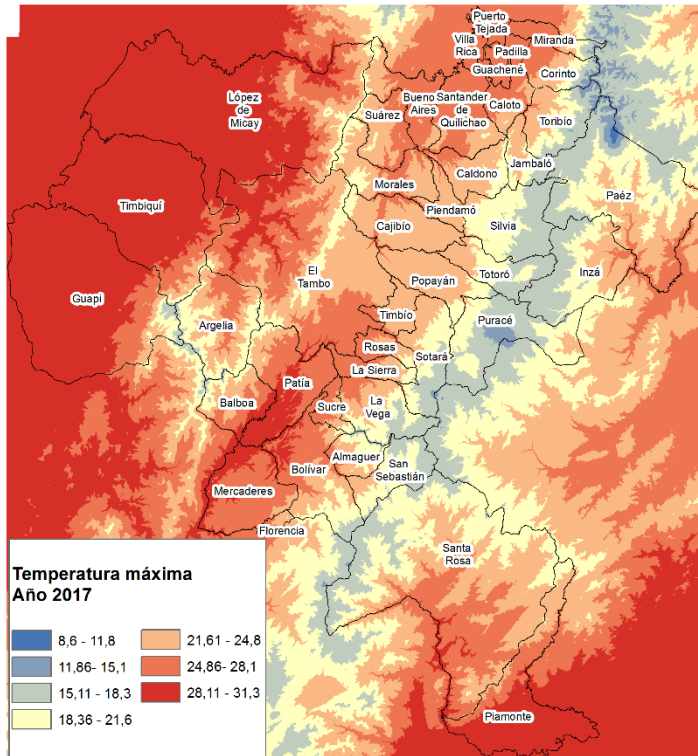


Temperatura media del año 2017 con el incremento de 2,15°C

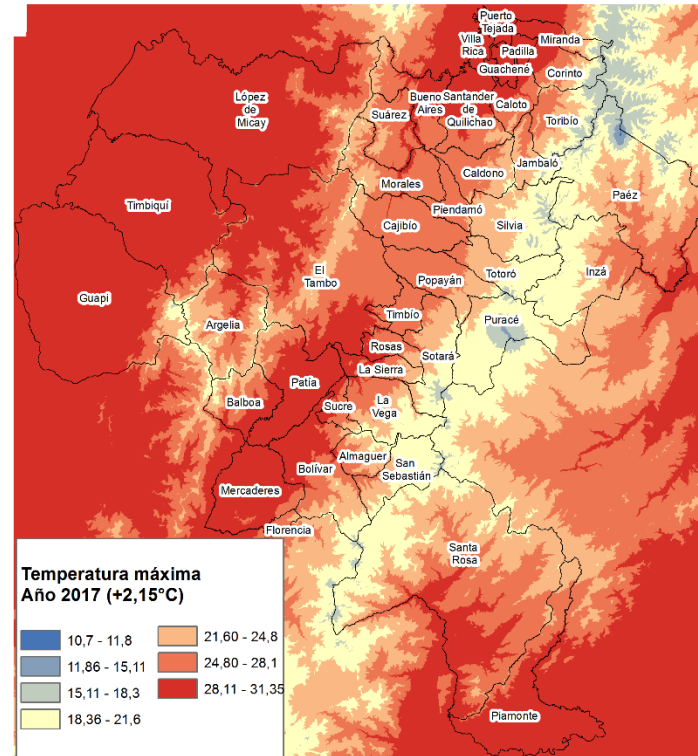


10 Modelado de la relación entre variables ambientales y el Índice pupa/persona
 6 del mosquito *Aedes aegypti* en el departamento del Cauca, Colombia

Temperatura máxima del año 2017



Temperatura máxima del año 2017 con el incremento de 2,15°C



Bibliografía

1. **Adin, A., Martínez-Bello, D. A., López-Quílez, A., & Ugarte, M. D.** (2018). Two-level resolution of relative risk of dengue disease in a hyperendemic city of Colombia. *PloS One*, 13(9), e0203382. doi:10.1371/journal.pone.0203382
2. **Alcalá, L., Quintero, J., González-Uribe, C., & Brochero, H.** (2015). Productividad de *Aedes aegypti* (L.) (diptera: Culicidae) en viviendas y espacios públicos en una ciudad endémica para dengue en Colombia. *Biomédica*, 35(2), 258-68. Retrieved from <http://www.revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/2567>
3. **Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M.** (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
4. **Almeida, A. P. G., Baptista, Susana S. S. G., Sousa, Carla A. G. C. C., Novo, M. Teresa L. M., Ramos, H. C., Panella, N. A., . . . Ribeiro, H.** (2005). Bioecology and vectorial capacity of *Aedes albopictus* (diptera: Culicidae) in macao, china, in relation to dengue virus transmission. *Journal of Medical Entomology*, 42(3), 419-428. doi:10.1093/jmedent/42.3.419
5. **Andersson, N., & Mitchell, S.** (2006). Epidemiological geomatics in evaluation of mine risk education in Afghanistan: Introducing population weighted raster maps. *International Journal of Health Geographics*, 5(1), 1. doi:10.1186/1476-072X-5-1
6. **Arbia, G.** (2014). *A primer for spatial econometrics - with applications in R*. Palgrave texts in Econometrics. Retrieved from <http://www.palgrave.com/la/book/9780230360389>

7. **Arboleda, S., Jaramillo-O, N., & Peterson, A. T.** (2012). Spatial and temporal dynamics of *Aedes aegypti* larval sites in Bello, Colombia. *Journal of Vector Ecology: Journal of the Society for Vector Ecology*, 37(1), 37-48. doi:10.1111/j.1948-7134.2012.00198.x
8. **Baghdadi, N., Mallet, C., & Zribi, M.** (2020). *QGIS y las herramientas genéricas* Retrieved from <https://hal.inrae.fr/hal-02922961>
9. **Barredo, E., & DeGennaro, M.** (2020). Not just from blood: Mosquito nutrient acquisition from nectar sources. *Trends in Parasitology*, 36(5), 473-484. doi:10.1016/j.pt.2020.02.003
10. **Barrera, R.** (2016). Recomendaciones para la vigilancia de *Aedes aegypti*. 36, 454-62. doi:<http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v36i3.2892>
11. **Bowman, L. R., Runge-Ranzinger, S., & McCall, P. J.** (2014). Assessing the relationship between vector indices and dengue transmission: A systematic review of the evidence. *PLOS Negl Trop Dis*, 8(5), e2848. doi:10.1371/journal.pntd.0002848
12. **Brady, O. J., Gething, P. W., Bhatt, S., Messina, J. P., Brownstein, J. S., Hoen, A. G., et al.** (2012). Refining the global spatial limits of dengue virus transmission by evidence-based consensus. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 6(8), e1760. doi:10.1371/journal.pntd.0001760
13. **Brady, O. J., Golding, N., Pigott, D. M., Kraemer, M. U. G., Messina, J. P., Reiner, J., Robert C, et al.** (2014). Global temperature constraints on *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus* persistence and competence for dengue virus transmission. *Parasites & Vectors*, 7(1), 338. doi:10.1186/1756-3305-7-338
14. **Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. E.** (1996). Geographically weighted regression: A method for exploring spatial

- nonstationarity. *Geographical Analysis*, 28(4), 281-298.
doi:<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1996.tb00936.x>
15. **Cabezas, L., & Salas, S.** (2012). Residuos Sólidos como criaderos potenciales de *Aedes aegypti* en Escuelas y Viviendas aledañas en el municipio de Apulo. Universidad El Bosque. Bogotá, D.C. Colombia.
16. **Carvajal, J. J., Honorio, N. A., Díaz, S. P., Ruiz, E. R., Asprilla, J., Ardila, S., et al.** (2016). Detección de *Aedes albopictus (skuse)* (diptera: Culicidae) en el municipio de Istmina, Chocó, Colombia. *Biomédica*, 36(3), 438-446. doi:10.7705/biomedica.v36i3.2805
17. **Castrillón, J. C., Castaño, J. C., & Urcuqui, S.** (2015). Dengue en Colombia: Diez años de evolución. *Revista Chilena De Infectología*, 32(2), 142-149. doi:10.4067/S0716-10182015000300002
18. **Cayla JA, Dominguez A, Rodriguez Valin E, de Ory F, Vazquez A, Fortuny C.** (2016). Zika virus infection: a new public health emergency with great media impact. *Gac Sanit*, 30(6):468-471.
19. **Centers for Disease Control and Prevention (CDC).** (2016). *Surveillance and control of Aedes aegypti and Aedes albopictus in the United States*.<https://www.cdc.gov/chikungunya/pdfs/Surveillance-and-Control-of-Aedes-aegypti-and-Aedes-albopictus-US.pdf>
20. **Centers for Disease Control and Prevention (CDC).** (2020). *Ciclo de vida del mosquito Aedes aegypti*.<https://www.cdc.gov/zika/pdfs/spanish/MosquitoLifecycle-sp.pdf>
21. **Chatchen, S., Sabchareon, A., & Sirivichayakul, C.** (2017). Serodiagnosis of asymptomatic dengue infection. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 10(1), 11-14. doi:10.1016/j.apjtm.2016.12.002

22. **Colón-González, F. J., Harris, I., Osborn, T. J., Steiner São Bernardo, C., Peres, C. A., Hunter, P. R., et al.** (2018). Limiting global-mean temperature increase to 1.5–2 °C could reduce the incidence and spatial spread of dengue fever in latin America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(24), 6243-6248.
23. **Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).** (s.f). Estudio de las variables climatológicas en la cuenca del río la vieja. Retrieved Dec 14, 2020, from https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La%20Vieja%20-%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/3_Capitulo_Diagnostico_Clima.pdf
24. **Charlton, M., & Fotheringham, A.** (2008). Geographically weighted regression. A tutorial on using GWR in ArcGIS 9.3. https://www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/fcl/gwr/gwr_arcgis/GWR_Tutorial.pdf
25. **Cromwell, E. A., Stoddard, S. T., Barker, C. M., Van Rie, A., Messer, W. B., Meshnick, S. R., et al.** (2017). The relationship between entomological indicators of *Aedes aegypti* abundance and dengue virus infection. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 11(3), e0005429. doi:10.1371/journal.pntd.0005429
26. **Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).** (2017). Geoportal DANE - Marco Geoestadístico Nacional (MGN). Retrieved Apr 29, 2019, from <https://geoportal.dane.gov.co/v3>
27. **Dhewantara PW, Marina R, Puspita T, Ariati Y, Purwanto E, Hananto M, Hu W, Soares Magalhaes RJ.** (2019). Spatial and temporal variation of dengue incidence in the island of Bali, Indonesia: An ecological study. *Travel*

Med Infect Dis. 2019 Jul 27:101437. doi: 10.1016/j.tmaid.2019.06.008. Epub ahead of print. PMID: 31362115.

28. **Ding, F., Fu, J., Jiang, D., Hao, M., & Lin, G.** (2018). Mapping the spatial distribution of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Acta Tropica*, 178, 155-162. doi:10.1016/j.actatropica.2017.11.020
29. **Eastin, M. D., Delmelle, E., Casas, I., Wexler, J., & Self, C.** (2014). Intra- and interseasonal autoregressive prediction of dengue outbreaks using local weather and regional climate for a tropical environment in Colombia. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 91(3), 598-610. doi:10.4269/ajtmh.13-0303
30. **Eisen, L., & Lozano-Fuentes, S.** (2009). Use of mapping and spatial and space-time modeling approaches in operational control of *Aedes aegypti* and dengue. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 3(4) doi:10.1371/journal.pntd.0000411
31. **Environmental Systems Research Institute. (Esri Inc).** (2020a). ArcMap (versión 10.5.1) [computer software]. Redlands, CA:
32. **Environmental Systems Research Institute. (Esri Inc).** (2020b). *ArcGIS pro | 2D and 3D GIS mapping software*. Retrieved Dec 3, 2020, from <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
33. **Focks, D. A., & Chadee, D. D.** (1997). Pupal survey: An epidemiologically significant surveillance method for *Aedes aegypti*: An example using data from Trinidad. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 56(2), 159-167. doi:10.4269/ajtmh.1997.56.159
34. **Focks, D. A., & UNDP/World Bank/WHO Special Programme for Research and Training in Tropical Diseases.** (2004). *A review of*

entomological sampling methods and indicators for dengue vectors Geneva: World Health Organization.

35. **Foo, L. C., Lim, T. W., Lee, H. L., & Fang, R.** (1985). Rainfall, abundance of *Aedes aegypti* and dengue infection in Selangor, Malaysia. *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine & Public Health*, 16(4), 560-568. Retrieved from Entomology Abstracts database. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/14445674>
36. **Gavrilov, I., & Pusev, R.** (2014). normtest: Tests for normality
37. **GeoSpatial.** (2013). *Alos palsar*. Retrieved Dec 3, 2020, from <http://www.geospatial.com.co/imagenes-de-satelite/alos-palsar.html>
38. **Githeko, A. K., Lindsay, S. W., Confalonieri, U. E., & Patz, J. A.** (2000). *Climate change and vector-borne diseases: A regional analysis*. Bulletin of the World Health Organization, 78(9), 1136-1147. doi:10.1590/S0042-96862000000900009
39. **Gobernación del Cauca.** (2020a). *Datos generales | cauca para inversionistas*. Retrieved 04, 2017, from <http://investincauca.com/datos-generales>
40. **Gobernación del Cauca.** (2020b). Plan de Desarrollo 2016-2019 Cauca Territorio de Paz.pdf. Available at: https://drive.google.com/file/d/0B88B9ZZJsmHkMzVoTHRJX2hhQTA/view?usp=sharing&usp=embed_facebook. Accessed Apr 22, 2017.

41. **Graham, A. J., Atkinson, P. M., & Danson, F. M.** (2004). Spatial analysis for epidemiology. *Acta Tropica*, 91(3), 219-225. doi:10.1016/j.actatropica.2004.05.001
42. **Guerrero Esneyder, López Luis.** (2015). Modelos de regresión HD para datos de conteo: Dispersión Variable y análisis de residuales. XXV Simposio Internacional de Estadística 2015; 5-8 de agosto de 2015; Quindío, Colombia.
43. **Hay, S. I., Graham, A., & Rogers, D. J.** (2006). Global mapping of infectious diseases. Amsterdam: Elsevier Science & Technology. Retrieved from [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=270174](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=270174)
44. **Heinisch, M. R. S., Diaz-Quijano, F. A., Chiaravalloti-Neto, F., Menezes Pancetti, F. G., Rocha Coelho, R., dos Santos Andrade, P., et al.** (2019). Seasonal and spatial distribution of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* in a municipal urban park in são paulo, SP, brazil. *Acta Tropica*, 189, 104-113. doi:10.1016/j.actatropica.2018.09.011
45. **Hernández-Lalinde, Juan., Espinosa-Castro, Jhon-Franklin., García Álvarez, Diego & Bermúdez-Pirela, Valmore.** (2019). Sobre el uso adecuado de la regresión lineal: conceptualización básica mediante un ejemplo aplicado a las ciencias de la salud. *Archivos venezolanos de farmacología y terapéutica*, 38(5), 608-614. Retrieved from Research Library Prep database. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/2354380955>
46. **Hoyos-Rivera, A., Pérez-Rodríguez, A., & Hernández-Meléndrez, E.** (2012). Espectro clínico del dengue. *Rev Cubana Med*, 51(1), 61-68.

Retrieved

from http://www.bvs.sld.cu/revistas/med/vol51_1_12/med07112.htm

47. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

(2007). Clasificación de los climas. Retrieved Dec 12, 2020,
from <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-text.pdf>

48. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

(2014). *Cambio climático*. Retrieved Nov 30, 2020,
from <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>

49. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

& Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

(2015a). *Nuevos escenario de cambio climático para Colombia 2011-2100. Nivel Nacional-Regional*. Colombia:

50. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

& Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

(2015b). *Nuevos escenario de cambio climático para Colombia 2011-2100. Nivel Nacional-Departamental*. Colombia:

51. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

(2017). ¿Qué es la tercera comunicación nacional de cambio climático y qué contiene? Retrieved Jan 6, 2021,
from <http://www.cambioclimatico.gov.co/3ra-comunicacion-cambio-climatico>

52. Instituto Nacional de Salud (INS) & Organización Panamericana de la

Salud (OPS). (2012). *Gestión para la vigilancia entomológica y control de la transmisión* de

dengue. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/gestion-vigilancia-entomologica-dengue.pdf>

53. **Instituto Nacional de Salud (INS)**. (2017a). *Protocolo de vigilancia en salud pública*. Retrieved Dec 12, 2020, from <https://www.ins.gov.co/Noticias/Dengue/7.%20Dengue%20PROTOCOLO.pdf>
54. **Instituto Nacional de Salud (INS)**. (2017b). *Dengue. Colombia 2017. Informe del evento*. Retrieved oct, 2020, from <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Informesdeevento/DENGUE%202017.pdf>
55. **Khin, M.M., Than K.A.** (1983). Transovarial transmission of dengue-2 virus by *Aedes aegypti* innature. *American Journal of Tropical Medicine Hygiene*32: 590-594.
56. **Kirby, R. S., Delmelle, E., & Eberth, J. M.** (2017). Advances in spatial epidemiology and geographic information systems. *Annals of Epidemiology*, 27(1), 1-9. doi:10.1016/j.annepidem.2016.12.001
57. **Kow, C. Y., Koon, L. L., & Yin, P. F.** (2001). Detection of dengue viruses in field caught male *Aedes aegypti* and *aedes albopictus* (diptera: Culicidae) in Singapore by type-specific PCR. *Journal of Medical Entomology*, 38(4), 475-479.
58. **Li, C., Lu, Y., Liu, J., & Wu, X.** (2018). Climate change and dengue fever transmission in china: Evidences and challenges. *The Science of the Total Environment*, 622-623, 493-501. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.326
59. **Lerner, B. W.** (2008). *Infectious diseases*. Detroit [u.a.]: Gale.

60. **López, M., Müller, G., & Sione, W.** (2018). Analysis of the spatial distribution of scientific publications regarding vector-borne diseases related to climate variability in South America. *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 26, 35-93. doi:10.1016/j.sste.2018.04.003
61. **Medina, L., Castro, P., Kreutzmann, A., & Rojas-Perilla, N.** (2018). *Trafo: Estimation, comparison and selection of transformations*
62. **Messina, J. P., Brady, O. J., Golding, N., Kraemer, M. U. G., Wint, G. R. W., Ray, S. E., et al.** (2019). The current and future global distribution and population at risk of dengue. *Nature Microbiology*, 4(9), 1508-1515. doi:10.1038/s41564-019-0476-8
63. **Ministerio de Salud y Protección Social. MinSalud.** (2013). *Plan decenal de salud pública 2012-2021*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/PSP/PDSP.pdf>
64. **Mondini, A., & Chiaravalloti-Neto, F.** (2008). Spatial correlation of incidence of dengue with socioeconomic, demographic and environmental variables in a Brazilian city. *The Science of the Total Environment*, 393(2-3), 241-8.
65. **Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G.** (2006). *Introducción al análisis de regresión lineal*. México: John Wiley & Sons.
66. **Morales-Pérez, A., Nava-Aguilera, E., Hernández-Alvarez, C., Alvarado-Castro, V. M., Arosteguí, J., Legorreta-Soberanis, J., et al.** (2020). Utility of entomological indices for predicting transmission of dengue virus: Secondary analysis of data from the Camino Verde trial in México and Nicaragua. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 14(10) doi:10.1371/journal.pntd.0008768

67. **Nagao, Y., Tawatsin, A., Thammapalo, S., & Thavara, U.** (2012). Geographical gradient of mean age of dengue haemorrhagic fever patients in northern Thailand. *Epidemiology & Infection*, 140(3), 479-490. doi:10.1017/S0950268811000653
68. **Nunes, C., & Taylor, B. M.** (2016). Modelling the time to detection of urban tuberculosis in two big cities in Portugal: A spatial survival analysis. *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 20(9), 1219-1225. doi:10.5588/ijtld.15.0822
69. **Olano VA, Matiz MI, Lenhart A, Cabezas, L, Vargas SD, Jaramillo JF, Sarmiento D, Alexander N, Stenström TA, Overgaard HJ.** (2015). Schools as potential risk sites for vector-borne disease transmission: Mosquito vectors in rural schools in two municipalities in Colombia. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 31(3)
70. **Olano, V. A.** (2016). *Aedes aegypti* en el área rural: Implicaciones en salud pública. *Biomédica*, 36(2), 169-173. doi:10.7705/biomedica.v36i2.3374
71. **Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud, UNICEF, Sims Jackie, Chartier, Y., Bartram, J., et al.** (2010). Normas sobre agua, saneamiento e higiene para escuelas en contextos de escasos recursos. Panamá:
72. **Organización Mundial de la Salud. (OMS). Communicable Disease Control, Prevention, and Eradication.** (2000). *Strengthening implementation of the global strategy for dengue fever/dengue haemorrhagic fever prevention and control: Report of the informal consultation, 18-20 October 1999, WHO HQ, Geneva: World Health Organization.*

73. **Organización Mundial de la Salud. (OMS).** (2020a). Dengue y dengue grave. Retrieved 2020, from <https://apps.who.int/mediacentre/factsheets/fs117/en/index.html>
74. **Organización Mundial de la Salud. (OMS).** (2020b). Vector-borne diseases Retrieved from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases>
75. **Organización Panamericana de la Salud (OPS).** (1995). Dengue y Dengue hemorrágico en las Américas. Guías para su prevención y control.
76. **Organización Panamericana de la Salud (OPS) & Organización Mundial de la Salud (OMS).** (2015). Dengue. Retrieved Nov 7, 2021, from <https://www.paho.org/es/temas/dengue>
77. **Organización Panamericana de la Salud (OPS) & Organización Mundial de la Salud (OMS).** (2016). *Dengue: Guías para la atención de enfermos en la región de las Américas*. Retrieved Dec 3, 2020, from <http://www.paho.org/es/documentos/dengue-quias-para-atencion-enfermos-region-americas-2a-edicion>
78. **Organización Panamericana de la Salud (OPS).** (2017). *Estrategia de gestión integrada para la prevención y control del dengue en la región de las Américas*. Washington, DC: OPS.
79. **Osagie, A. M., & Ogheneofejiro, E. P.** (2016). Cross correlation analysis on the relationship between maximum temperature and relative humidity in bida, niger state. *International Journal of Agricultural Economics*, 1(3), 62. doi:10.11648/j.ijae.20160103.12

80. **Padilla, J. C., Rojas, D. P., & Gómez, R. S.** (2012). *Dengue en Colombia: Epidemiología de la reemergencia a la hiperendemia* (Guías de Impresión Ltda ed.). Bogotá, Colombia:
81. **Pfeiffer, D., Robinson, T., Stevenson, M., Stevens, K., Rogers, D., & Clements, A.** (2008). **Spatial analysis in epidemiology.** Oxford University Press; 2008. **Pineda, C., Muñoz-Louis, R., Caballero-Uribe, C. V., & Viasus, D.** (2016). Chikungunya in the region of the Americas. A challenge for rheumatologists and health care systems. *Clinical Rheumatology*, 35(10), 2381-2385. doi:10.1007/s10067-016-3390-y
82. **Pérez-Castro, R., Castellanos, J., Olano, V., Matiz, M., Jaramillo, J., Vargas, S., et al.** (2016). Detección del virus dengue en larvas y pupas de *Aedes aegypti* recolectadas en áreas rurales del municipio de Anapoima, Cundinamarca. Colombia. *Biomédica*, 37(0), 193-200. Retrieved from <https://www.revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/3584>
83. **Pineda C, Munoz-Louis R, Caballero-Uribe CV, Viasus D.** (2016). Chikungunya in the region of the Americas. A challenge for rheumatologists and health care systems. *Clin Rheumatol*, 35(10):2381-2385.
84. **Pinto-R, Félix.** (2012). *Geomática tecnologías de punta*: 1 edición Palibrio. Retrieved from <http://www.vlebooks.com/vleweb/product/openreader?id=none&isbn=9781463343941>
85. **Princeton Climate Analytics.** (2019). *Latin american flood and drought monitor*. Retrieved oct, 2020, from https://platform.princetonclimate.com/PCA_Platform/lafdmLanding.html

86. **Ranasinghe, H. A. K., & Amarasinghe, L. D.** (2020). Naturally occurring microbiota associated with mosquito breeding habitats and their effects on mosquito larvae. *BioMed Research International*, 2020, 4065315. doi:10.1155/2020/4065315
87. **Ramírez, A., Torres, P., Fabro, G., Tosolini, L., & Ferreira, M.** (2013). *Epidemias y salud pública (Primera edición ed.)*. Argentina:
88. **R Core Team.** (2013). R: A language and environment for statistical computing [computer software]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: Retrieved from <http://www.R-project.org/>.
89. **Recker, M., Vannice, K., Hombach, J., Jit, M., & Simmons, C. P.** (2016). Assessing dengue vaccination impact: Model challenges and future directions. *Vaccine*, 34(38), 4461-4465. doi:10.1016/j.vaccine.2016.06.082
90. **Regis L, Souza WV, Furtado AF, Fonseca CD, Jr S, C J, et al.** (2009). An entomological surveillance system based on open spatial information for participative dengue control. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 12/;81(4):655-662.
91. **Reiter, P.** (2001). Climate change and mosquito-borne disease. *Environmental Health Perspectives*, 109(Suppl 1), 141-161. Retrieved from https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____267::2b9ecc506bbd8294f99356497b5217f5

92. **Restrepo, A. C., Baker, P., & Clements, A. C. A.** (2014). National spatial and temporal patterns of notified dengue cases, Colombia 2007-2010. *Tropical Medicine & International Health: TM & IH*, 19(7), 863-871. doi:10.1111/tmi.12325
93. **Rico-Mendoza, A., Alexandra, P., Chang, A., Encinales, L., & Lynch, R.** (2019). Co-circulation of dengue, chikungunya, and zika viruses in Colombia from 2008 to 2018. *Revista Panamericana De Salud Publica = Pan American Journal of Public Health*, 43, e49. doi:10.26633/RPSP.2019.49
94. **Rossi, G., Almirón, W.** (2004). Clave ilustrada para la identificación de larvas de mosquitos de interés sanitario encontradas en criaderos artificiales en la Argentina. Fundación Mundo Sano. Serie Enfermedades Transmisibles. Buenos Aires, Argentina.
95. **Rúa-Uribe, G. L., Giraldo-Jaramillo, T. M., Triana-Chávez, O., Rojo, R., Henao, E., Pérez-Pérez, J., et al.** (2020). Transmisión vertical de virus dengue en *Aedes* spp. (Diptera: Culicidae) en Medellín, Colombia. *Revista Colombiana De Entomología*, 46(1) doi:10.25100/socolen.v46i1.e6973
96. **Rueda, L. M., Patel, K. J., Axtell, R. C., & Stinner, R. E.** (1990). Temperature-dependent development and survival rates of *Culex quinquefasciatus* and *Aedes aegypti* (diptera : Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 27(5), 892-898.
97. **Ruiz-López, F., González-Mazo, A., Vélez-Mira, A., Gómez, G. F., Zuleta, L., Uribe, S., et al.** (2016). Presencia de *Aedes (stegomyia) aegypti* (linnaeus, 1762) y su infección natural con el virus dengue en alturas no registradas para Colombia. *Biomédica*, 36(2) doi:10.7705/biomedica.v36i2.3301

98. **San Martín, J. L., & Brathwaite-Dick, O.** (2007). La estrategia de gestión integrada para la prevención y el control del dengue en la región de las Américas. *Revista Panamericana De Salud Pública*, 21(1), 55-63. doi:10.1590/S1020-49892007000100011
99. **Singh, S. K.** (2014). *Viral infections and global change* (1st ed. ed.). US: Wiley-Blackwell. Retrieved from <http://portal.igpublish.com/iglibrary/search/WILEYB0016427.html>
100. **Suarez, Nelson** (1981). Registro de altitud del *Aedes Aegypti* en Colombia. *Biomédica*, 12;1(4).
101. **Tobler, WR** (1970). A Computer Model Simulation of Urban Growth in the Detroit Region, *Economic Geography* 46 (2).
102. **Tibayrenc, M.** (2007). *Encyclopedia of infectious diseases* (1. Aufl. ed.). Hoboken: Wiley
103. **The University of Arizona.** *Latin American and Caribbean Flood and Drought Monitor | CLIMAS*. Retrieved Oct 1, 2020, from <https://climas.arizona.edu/rgbo/rio-grande-bravo-outlook-november-2015/latin-american-and-caribbean-flood-and-drought-monitor>
104. **Tuladhar, R., Singh, A., Varma, A., & Choudhary, D. K.** (2019). Climatic factors influencing dengue incidence in an epidemic area of Nepal. *BMC Research Notes*, 12(1), 131. doi:10.1186/s13104-019-4185-4
105. **Velandia, M. L., & Castellanos, J. E.** (2011). Dengue virus: Structure and viral cycle. *Infectio*, 15(1), 33-43. Retrieved

from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-93922011000100006&lng=en&nrm=iso&tlng=es

106. **Velandia-Romero, M. L., Olano, V. A., Coronel-Ruiz, C., Cabezas, L., Calderón-Peláez, M. A., Castellanos, J. E., and Matiz, M. I.** (2017). Detección del virus dengue en larvas y pupas de *Aedes aegypti* recolectadas en áreas rurales del municipio de Anapoima, Cundinamarca. Colombia. *Biomédica*, 37(0):193-200
107. **Waller, L. A., & Gotway, C. A.** (2004). *Applied spatial statistics for public health data*. Hoboken: WILEY. Retrieved from <http://portal.igpublish.com/iglibrary/search/WILEYB0004423.html>
108. **Watts, D. M., Burke, D. S., Harrison, B. A., Whitmire, R. E., & Nisalak, A.** (1987). Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for dengue 2 virus. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 36(1), 143-152. doi:10.4269/ajtmh.1987.36.143
109. **Wenbiao Hu, Archie Clements, Gail Williams, Shilu Tong, & Kerrie Mengersen.** (2012). Spatial patterns and socioecological drivers of dengue fever transmission in Queensland, Australia. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 260-266. doi:10.1289/ehp.1003270
110. **Wiwanitkit, V.** (2009). *Focus on arbovirus infections*. New York: Nova Science Publishers, Incorporated. Retrieved from [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=3019136](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=3019136)

111. **Yang, J., Tan, C., & Zhang, T.** (2013). Spatial and temporal variations in air temperature and precipitation in the Chinese Himalayas during the 1971–2007. *International Journal of Climatology*, 33(12), 2622-2632. doi:10.1002/joc.3609
112. **Yi, H., Devkota, B. R., Yu, J., Oh, K., Kim, J., & Kim, H.** (2014). Effects of global warming on mosquitoes & mosquito-borne diseases and the new strategies for mosquito control. *Entomological Research*, 44(6), 215-235. doi:10.1111/1748-5967.12084
113. **Zúñiga López, I., & Crespo del Arco, E.** (2010). *Meteorología y climatología*. ES: UNED. Retrieved from <https://libroselectronicos.ujaen.es/Record/Xebook1-531>