



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO - FACULTAD  
DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**OPTIMIZACIÓN BAJO INCERTIDUMBRE DE POLÍTICAS  
DE CONTROL POR ENFERMEDADES TRANSMITIDAS  
POR VECTORES**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**I.Q. ANGEL ALFARO BERNARDINO**

**ASESOR:**

**Dr. FABRICIO NÁPOLES RIVERA**

**MORELIA, MICHOACÁN, FEBRERO DEL 2022**

## RESUMEN

---

En este trabajo se presenta un modelo matemático estocástico para la planificación, dosificación y calendarización estratégica de fumigación para reducir las enfermedades causadas por mosquitos en una ubicación geográfica. Se generan múltiples escenarios para considerar la incertidumbre en la población de mosquitos existentes con base en una distribución normal de la población de personas, siendo esta un parámetro muy importante en el modelo matemático estocástico. Además, se considera la salud ocupacional de la ubicación geográfica seleccionada tomando en cuenta los límites permisibles de cada uno de los insecticidas a aplicar. En este modelo matemático estocástico se utilizará la metodología de solución de Pareto tomando un enfoque CVaR. Dando como resultados los escenarios más probables que sucedan en una gráfica de probabilidad acumulada, de estos escenarios se selecciona uno para el análisis de la planificación, dosificación y calendarización estratégica de fumigación, además, este escenario da una solución de equilibrio entre personas infectadas y costo total mínimo para este problema. Y por último se hace una comparación de los resultados obtenidos con los sucedidos en esa ubicación geográfica.

Palabras clave: ***modelo matemático estocástico, enfoque CVaR, población de mosquitos, probabilidad acumulada, estratégica de fumigación.***

## ABSTRACT

---

In this work, a stochastic mathematical model is presented for the strategic planning, dosing and scheduling of fumigation to reduce diseases caused by mosquitoes in a specific geographic location. Multiple scenarios are generated to consider the uncertainty in the existing mosquito population based on a normal distribution, this being a very important parameter in the stochastic mathematical model. In addition, the occupational health of the selected geographic location will be considered, taking into account the permissible limits of each of the insecticides to be applied. In this stochastic mathematical model, the Pareto solution methodology will be used, taking a CVaR approach. Giving as results the most probable scenarios that occur in a cumulative probability graph, one of these scenarios is selected for the analysis of the planning, dosage and strategic scheduling of fumigation, in addition, this scenario provides a balanced solution between infected people and minimum total cost for this problem. And finally, a comparison is made of the results obtained with those that occurred in that geographical location.

Keywords: ***stochastic mathematical model, CVaR approach, mosquito population, cumulative probability, fumigation strategy.***

## DEDICATORIA

---

A la gran matriz de pensamientos que me inspira a adentra en ella.

## AGRADECIMIENTOS

---

Agradecer a consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACyT) por el apoyo económico dado en el transcurso de mis estudios

Agradecer a la Facultad de Ingeniería Química a la división de posgrado por darme un espacio en sus instalaciones.

Agradecer a mis sinodales, Dr. José María Ponce Ortega, Dr. Luis Fernando Lira Barragán, Dr. Agustín Jaime Castro Montoya y Dr. Rafael Huirache Acuña por el apoyo que me ofrecieron en este transcurso de mi vida académica.

Agradecer a mi asesor de tesis Dr. Fabricio, por todo este apoyo, que, aunque yo fallaba varios días, él nunca perdía la confianza en mí.

Agradecer a mis tíos, Alfonso Franco Rosales, Francisco Javier Magadan Franco y Julio Cesar Magadan Franco por enseñarme diferentes puntos de vista en cuanto a la vida.

Agradecer a mis padres, María Guadalupe Martina Bernardino Lomelí y Ángel Alfaro Franco por el apoyo que me han dado en este transcurso de mi vida escolar y seguir creyendo en mí. Creer en una persona es lo mas importante para continuar en el camino.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	II
ABSTRACT .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABLAS.....	IX
NOMENCLATURA .....	X
CAPÍTULO 1 .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.2. ANTECEDENTES .....	6
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	7
1.4. HIPÓTESIS.....	7
1.5. OBJETIVO GENERAL.....	8
1.6. OBJETIVOS PARTICULARES .....	8
CAPÍTULO 2 .....	9
2.1. FORMULACIÓN DEL MODELO .....	10
2.2. DESARROLLO DEL MODELO MULTIESCENARIO DE ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR VECTORES.....	10
2.2.1. Balance para mosquitos no infectados e infectados .....	10
2.2.2. Los mosquitos nacidos .....	12
2.2.3. Entrada de mosquitos a una CAGEB $i$ determinada .....	12
2.2.4. La muerte natural de los mosquitos .....	13
2.2.5. Migración de mosquitos desde la ubicación $i$ a ubicaciones vecinas.....	13
2.2.6. Muerte química de los mosquitos.....	14
2.2.7. Balance de personas infectadas en el lugar $i$ .....	16
2.2.8. Costo total de los productos químicos usados.....	17
2.2.9. Función objetivo.....	17
2.2.10. Restricción salud ocupacional .....	18
2.3. RELACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR MOSQUITOS CON LA INGENIERÍA QUÍMICA .....	18
2.4. SOLUCIÓN DE ESTRATEGIA MULTIESCENARIO.....	20
CAPÍTULO 3 .....	26

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	27
3.2. CASO DE ESTUDIO .....	27
3.3. Metodología .....	34
CAPÍTULO 4 .....	37
4.1. RESULTADOS .....	38
CONCLUSIONES .....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	48

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>FIGURA 1. Distribución de soluciones optimas de los escenarios .....</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 2. Municipio de Morelia.....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 3. División de AGEB's de la localidad de Morelia .....</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 4. División de CAGEB's de la localidad de Morelia.....</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 5. Variables objetivo baja el efecto de incertidumbre en modelo matemático de enfermedades trasmitidas por mosquitos. ....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 6. Probabilidad acumulativa de las variables objetivo baja el efecto de incertidumbre en modelo matemático de enfermedades trasmitidas por mosquitos. ....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 7. Cantidad de insecticida en su presentación comercial en la calendarización de su aplicación .....</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 8. Cantidad de insecticida en su presentación comercial en la aplicación de las CAGEB's .....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 9. Cantidad de insecticida propoxur comercial aplicado a cada CAGEB ....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 10. Cantidad de insecticida clorpirifos comercial aplicado a cada CAGEB</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 11. Cantidad de insecticida clorpirifos comercial aplicado a cada CAGEB</b>	<b>45</b>



## LISTA DE TABLAS

---

TABLA 1. El número de habitantes y el área urbana de cada CAGEB .....	28
TABLA 2A. Distancias entre la CAGEB $i$ y $i'$ (km) .....	29
TABLA 3. Datos De Insecticidas .....	32
TABLA 4. Cantidad máxima de insecticida por CAGEB (kg totales de i.a.) .....	34

## NOMENCLATURA

---

$\alpha$  Parámetro  $\in [1,0]$

$\alpha_{i,t}^{born}(T)$  Probabilidad de supervivencia

$\alpha_{i,i',t}^{in}$  Factor de eficiencia de mosquitos saludables

$\alpha_i^{in,i}$  Factor de eficiencia de mosquitos infectados

$\alpha_{i,t}^{Ndeath}$  Factor de longevidad, condiciones climáticas adversas o depredadores que causan la muerte de los mosquitos

$\alpha_{i,i',t}^{leaving,H}$  Probabilidad de migración de los mosquitos que viven en una CAGEB  $i$  hacia otra CAGEB vecina  $i'$

$\alpha_{i,t}^{Cdeath}$  Factor de esperanza de vida para mosquitos en la etapa adulta

$\alpha_{i,t}^{infected}$  Factor que depende del número de mosquitos infectados

$A_i$  Área de la CAGEB  $i$

$\beta_c^{Cdeath}$  Eficiencia del tipo de químico  $c$

$c$  Conjunto de tipos de insecticidas

$\gamma_s^P$  Variable normaliza para el total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$

$\gamma_s^C$  Variable normaliza para el costo total  $T_{C_s}$

$\gamma^{CI,P}$  Condición de igualdad para del total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$

$\gamma^{CI,C}$  Condición de igualdad para el costo total  $T_{C_s}$

$\delta_s$  Criterio de brecha

$F_{c,i,t,s}^{chemical}$  Flujo del químico aplico  $c$  en la CAGEB  $i$  durante el mes  $t$  y en el escenario  $s$

$\eta$  Efectividad de una reacción cinética

$\theta_{i,t}^{Cdeath}$  Factor químico de muerte de mosquitos

$i$  Conjunto de CAGEB's

$K_1$  Constante de una reacción cinética

$M$  Parámetro con un valor muy grande

$M_{i,t,s}^{living,H}$  Número de mosquitos no infectados en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t-1,s}^{living,H}$  Número de mosquitos no infectados que vivieron en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t - 1$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{born}$  Número de mosquitos no infectados que nacieron en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{in,H}$  Número de mosquitos no infectados que migraron desde otro lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{Ndeath,H}$  Número de mosquitos no infectados muertos por causas naturales en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{out,H}$  Número de mosquitos no infectados que migraron a otro lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{Cdeath,H}$  Número de mosquitos no infectados muertos por el uso de productos químicos en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,s}^{existing,H}$  Número de mosquitos no infectados que viven en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t = 1$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{living,I}$  Número de mosquitos infectados en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{in,I}$  Número de mosquitos infectados que migraron desde otro lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{Ndeath,I}$  Número de mosquitos infectados muertos por causas naturales en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{out,I}$  Número de mosquitos infectados que migraron a otro lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{Cdeath,I}$  Número de mosquitos infectados muertos por el uso de productos químicos en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,t,s}^{htom}$  Número de mosquitos infectados al picar a una persona infectada en el lugar  $i$ , en el tiempo  $t$  y escenario  $s$

$M_{i,i',t,s}^{leaving,H}$  Número total de mosquitos no infectados que salen de la ubicación  $i$

$M_{i,t,s}^{mosquito,H}$  Densidad de mosquitos por metros cuadrado en una CAGEB  $i$

$N$  Número de funciones objetivas totales

$P_{i,t,s}^{infected}$  Personas infectadas en una CAGEB  $i$  durante un mes  $t$  en el escenario  $s$

$P_{c,i,t}^{OH}$  Cantidades máximas de insecticidas que se pueden aplicar

$s$  Conjunto de escenarios

$t$  Conjunto de meses

$T_{P_s}^{infected}$  Total de personas infectadas

$T_{i,t}$  Temperatura de la CAGEB  $i$  en el mes  $t$

$\varphi_c^{Ifactor}$  Cantidad requerida de químico  $c$

$\psi_{i,t}^{oviposition}(T)$  Número de ovoposición

$U_{c,i,t}^{chemical}$  Costo unitario del producto químico

$v$  Variable artificial

$y_{c,i,t,s}$  Variable binaria que indica el uso del insecticida  $c$  en la CAGEB  $i$  en el mes  $t$  y escenario

# CAPÍTULO 1

---

En este capítulo se dará una introducción del tema dando una descripción de las enfermedades transmitidas por mosquitos, modelos matemáticos relacionados a estas enfermedades, como segundo apartado se dan los antecedentes que ha implicado las poblaciones de los mosquitos en la transmisión de enfermedades a la humanidad, el tercer apartado se habla de la justificación del tema y la hipótesis planteada en este trabajo, por último, se dará el objetivo general y los objetivos particulares.

## 1.1. INTRODUCCIÓN

---

La humanidad depende del agua para diferentes actividades, como lo son el consumo para su hidratación, gastronomía y agricultura. Pero no solo la humanidad se ha beneficiado de este líquido, sino también diferentes organismos vivos que son portadores de diferentes patógenos infecciosos, estos organismos también denominados vectores. La gran mayoría de los vectores son insectos hematófagos que ingieren los microorganismos patógenos junto con la sangre de un portador infectado (OMS, Enfermedades transmitidas por vectores, 2020) y estos pueden transmitir de animal a persona o entre personas enfermedades infecciosas como chikungunya, dengue, fiebre amarilla, virus del zika, filariasis linfática, fiebre del valle del rift, paludismo, encefalitis japonesa, fiebre del Nilo Occidental, etc. Las enfermedades transmitidas por vectores registran más de 700,000 muertes anuales, además, representan un porcentaje considerable de todas las enfermedades infecciosas reportadas mundialmente con un 17%. (Enfermedades transmitidas por vectores, 2020). Una de estas enfermedades infecciosas es el dengue, del cual se ha registrado un aumento considerable en el número de casos en los últimos años, en el año 2000 se notificaron alrededor de 505,430 casos a la organización mundial de la salud (OMS), mientras que, en los años 2010 y 2019 se registraron 2.4 millones y 4.2 millones de casos, respectivamente. (OMS, Dengue y dengue grave, 2020). El dengue se ha encontrado en más de 125 países en todo el mundo (Bhatt, S. y col., 2013 y Messina, J. P. y col., 2015). Las zonas tropicales y subtropicales son las más afectadas por las enfermedades transmitidas por mosquitos. (Li, Y. y col., 2017). Siendo zonas con temperaturas templadas y cálidas, superando los 18°C en el transcurso del año. (M. C. Peel y col., 2007). El género de mosquitos Aedes posee una influencia por la temperatura en la tasa de desarrollo y supervivencia. (Márquez Benítez Y. y col., 2019). La temperatura es una variable importante en la infección de las poblaciones de mosquitos, mientras que, a mayor es la temperatura esta infección disminuye, en el caso contrario, en temperaturas entre 25 a 28°C hace que aumente. (Peña-García VH y col., 2016). Como sucedió en dos ciudades en Kenia

que presentaron diferentes tasas de infección lo cual fue correlacionado muy fuertemente con la temperatura de ambas ciudades. (Chepkorir E y col., 2014 y Márquez Benítez Y. y col., 2019). La temperatura no ha sido la única variable que se ha analizado en cuanto a las enfermedades transmitidas por mosquitos. En un estudio, se analizó que las condiciones potenciales para un brote son la temperatura y la precipitación, identificando los picos de las condiciones climáticas con los brotes de las enfermedades transmitidas por mosquitos en el sur y sudeste de Asia. (Servadio, J. L y col., 2018). La precipitación también es un factor importante en el aumento de la proliferación de vectores como es el caso del efecto de la lluvia en las poblaciones de algunos mosquitos del género Culex que es el principal vector de la encefalitis japonesa, la filariasis linfática y la fiebre del Nilo Occidental. (Valdez, L. D y col., 2017). Siendo que las zonas tropicales y subtropicales son las más favorables para proliferación de los vectores, a su vez, el aumento de las enfermedades transmitidas por mosquitos, originó la presentación de un panorama de la distribución del dengue en el mundo (Bhatt, S. y col., 2013). También, se proyecta que alrededor de 5 mil millones de personas vivirán en áreas urbanas y casi la mitad de la población residirá en zonas urbanas del trópico en el año 2030, por lo tanto, se encontró un problema serio debió a que el mosquito del género Aedes aegypti es el principal vector del dengue, chikungunya y zika en áreas urbanas peri-domésticas, por ello, la necesidad de modelos matemáticos para predecir la distribución global del dengue. (Messina, J. P. y col., 2015). También se han realizado modelos matemáticos dependientes de la temperatura, uno de ellos, predecía la probabilidad del riesgo de infección por chikungunya esto correlacionado a las condiciones climáticas. (Kakarla, S. G y col., 2019). Como se ha observado, las enfermedades transmitidas por mosquitos ha sido caso de estudio debido a la problemática mundial que genera este tema, por ello, se han realizado varios esfuerzos para evaluar, predecir y estimar diferentes aspectos de estas enfermedades, hacia la generación de políticas de salud pública que puedan ayudar a reducir la carga de las enfermedades transmitidas por mosquitos. Una de esas políticas es la prevención y el control de las enfermedades transmitidas por mosquitos, que se han convertido en el principal interés de las agencias de salud

pública de todo el mundo. (Fabricio Napoles-Rivera y col., 2019). Hay diversas formas de reducir las enfermedades transmitidas por mosquitos, una de ellas, es la reducción de la población de mosquitos. En este sentido, las principales estrategias son pesticidas sintéticos o microbianos, mosquiteros tratados con insecticida, repelentes, agentes de control biológico, técnica de insectos estériles y técnica de insectos estériles potenciados. (Benelli, G. y col., 2017 y Fabricio Napoles-Rivera y col., 2019). Todos los métodos tienen sus ventajas y desventajas y el número de ellos varía ampliamente. Sin embargo, la aplicación en cada país puede ser diferente, en el caso de países en desarrollo la práctica común es el uso de insecticidas en grandes áreas urbanas para disminuir la población de mosquitos; (Fabricio Napoles-Rivera y col., 2019). Sin embargo, la selección arbitraria del tipo de plaguicida, la dosificación y los lugares de aplicación, podrían reducir el impacto de las acciones tomadas y de esta manera aumentar el riesgo de infección en áreas vulnerables; Esto da la oportunidad de tomar acción en el problema de planificación y programación. Como es el caso de programación matemática para la selección óptima del tipo y la dosis de insecticida, en un lugar determinado para el control de las enfermedades transmitidas por mosquitos. (Fabricio Napoles-Rivera y col., 2019). En la industria química, en el área de ingeniería de sistemas de procesos han sido estudiado ampliamente los problemas de planificación y programación, como, la programación óptima de planificación y mantenimiento de instalaciones industriales térmicamente integradas. (Fabricio Napoles-Rivera y col., 2013). También, en la industria química y petrolera la planificación de las operaciones de los oleoductos es una parte crucial de la gestión logística en estas industrias. (Kirschstein, T., 2018). Además, las redes de oleoductos son la principal opción para transportar grandes volúmenes de producto, por ello, se realizó la planificación agregada y detallada para el transporte de derivados del petróleo desde refinerías de petróleo hasta terminales de distribución. (Cafaro, V. G. y col., 2015). Como se observó, la planificación y programación óptimas se pueden aplicar a cualquier proceso, sea el caso, de la industria química y como la selección de un tipo y dosis de insecticida. Tomando en cuenta este último caso, los modelos de las enfermedades transmitidas por mosquitos son modelos deterministas, con ello,



existe diferentes factores que pueden afectar los resultados dado por el modelo. Otros modelos matemáticos presentados en la literatura están basados en ecuaciones diferenciales, los cuales, son complejos y solo predicen aspectos específicos de las enfermedades transmitidas por mosquitos. (Mann Manyombe, M. L y col., 2017, Lutambi, A. M. y col., 2013, Fruh, L y col., 2018 y Masud, M. A. y col., 2017). Por ende, en este trabajo se aplicará los efectos de la incertidumbre en un modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos por medio de escenarios inciertos. Esto nos dará políticas de control optimas en el tipo de insecticida, la dosificación y la selección de la programación de la localidad determinada. Como se observó, en este modelo matemático se hace uso de insecticidas para reducir la probabilidad de brotes de enfermedades transmitidas por mosquitos, esto permite tomar decisiones a las políticas de salud pública. (Fabricio Napoles-Rivera y col., 2019). Sin embargo, los insecticidas tienen efectos indeseables como lo son, vectores desarrollan resistencia a los insecticidas, resurgimiento y brotes de plagas secundarias, efectos adversos a organismos no objetivo y peligro directo para usuarios. (Ascough, J. C. y col., 2008 y Morand, S y col., 2018). También, los plaguicidas están asociados al riesgo de la biodiversidad y salud humana. (Mahmood, I y col., 2016). Sin embargo, se ha encontrado más efectos adversos para la salud humana como dolor de cabeza, irritación de nariz y garganta, mareos, diarrea, náuseas y vómitos y efectos crónicos en el sistema inmunológico, hígado, pulmones y otros órganos. (Mahmood, I y col., 2016, Casida, J. E. y col., 2013 y Quansah, R y col., 2016). Y sumado a esto, las malas prácticas en el uso de plaguicidas, como el exceso de producto químico, insecticidas de baja efectividad, plaguicidas prohibidos, etc. (Fabricio Napoles-Rivera y col., 2019). Aunado a esto, la necesidad de un modelo matemático estocástico para dar una planificación de las políticas de fumigación, el tipo, la dosificación y el lugar de aplicación son de suma importancia y podrían reducir algunos de estos riesgos.

## 1.2. ANTECEDENTES

---

Algunas enfermedades infecciosas (arbovirales) son transmitidas por organismos vivos llamados vectores, estas enfermedades se pueden transmitir por el vector, entre personas, o animales a personas. Las enfermedades por vectores representan más del 17% de todas las enfermedades infecciosas, y provocan cada año más de 700,000 defunciones. (OMS, Enfermedades transmitidas por vectores, 2020). El mayor número de casos reportado es localizado en zonas tropicales y subtropicales, estos climas presentan temperaturas mayores a los 20°C, favoreciendo la proliferación de los vectores en la maduración sexual, la cópula y la oviposición. Siendo el rango de temperatura de 26 a 28°C más favorable para la cinética del desarrollo y supervivencia del mosquito, unos de los vectores más conocidos, destacando entre las garrapatas, piojos, ácaros, mosquitos, etc. En la transmisión de enfermedades infecciosas tales como dengue, leishmaniasis, fiebre amarilla, chikungunya, zika, virus del Nilo Occidental, etc. (Márquez Benítez Y. y col., 2019). Brasil fue el primero país que notificó un gran brote del virus de Zika en marzo del 2015. En julio del mismo año se descubrió el síndrome de Guillain-Barré, pronto después, en este mismo país, se descubrió la relación del virus Zika y la microcefalia. La enfermedad del virus zika fue extendiéndose en la región de las Américas, África y otras regiones apareciendo brotes y pruebas de la transmisión de este virus. (OMS, Enfermedad por el virus de zika, 2018). La leishmaniasis afecta a las poblaciones más pobres del planeta, está asociada a la malnutrición, los desplazamientos de población, las malas condiciones de vivienda, la debilidad del sistema inmunitario y falta de recursos. Se estima que cada año se producen entre 700,000 y un millón de nuevos casos y entre 26,000 y 65,000 defunciones. (Leishmaniasis, 2018). En las regiones de África, Europa, el Oriente Medio, América del Norte y Asia occidental se encuentra más comúnmente el virus del Nilo Occidental perteneciente al género flavivirus y al complejo antigénico de la encefalitis japonesa, familia Flaviviridae. Causando una enfermedad mortal del sistema nervioso, transmitida principalmente por la picadura de mosquitos infectados. (OMS, Infección por el virus del Nilo occidental, 2017). La fiebre amarilla

es una enfermedad vírica aguda, hemorrágica, transmitida por mosquitos infectados. Una pequeña proporción de pacientes infectados presentan síntomas graves, y aproximadamente la mitad de estos casos fallecen en un plazo de 7 a 10 días. Los síntomas de la fiebre amarilla son: fiebre, cefaleas, ictericias, dolores musculares, náuseas, vómitos y cansancio. Es un virus endémico de las zonas tropicales de África, América central y Sudamérica. (OMS, Fiebre amarilla, 2019). En el 2015 hubo un gran brote de Chinkungunya que afecto a varios países de la región de las Américas, debido a un factor de riesgo importante, siendo la proximidad de las viviendas a lugares de cría de mosquitos. Esta enfermedad no tiene cura, el tratamiento consiste en el alivio de los síntomas de esta. (OMS, Chinkungunya, 2020).

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

---

En la aplicación de cualquier modelo matemático determinista de transmisión de enfermedades por vectores existe diferentes factores que pueden afectar los resultados dado por el modelo. Debido a que las variables son inciertas en el futuro, por ello, la necesidad de que los modelos matemáticos de transmisión de enfermedades por vectores sean más exactos. Por ende, este trabajo se aplicará los efectos de la incertidumbre en las variables de un modelo matemático de transmisión de enfermedades por vectores por medio de escenarios inciertos, además se agregará parámetros de salud ocupacional con un enfoque social-ambienta.

### **1.4. HIPÓTESIS**

---

Considerar la incertidumbre en un modelo matemático para la planificación óptima para la reducción de enfermedades transmitidas por vectores, nos dará políticas de

control optimas en el tipo de insecticida, la dosificación y la selección de la programación de localidad de Morelia.

## **1.5. OBJETIVO GENERAL**

---

Considerar incertidumbre y parámetros de salud ocupacional en el modelo matemático enfocado en las enfermedades transmitidas por los mosquitos (ETM) para obtener un modelo matemático con enfoque socio-ambiental que genere políticas de control optimas del tipo de insecticida, la dosificación, la selección de la CAGEB y la calendarización de aplicación del insecticida.

## **1.6. OBJETIVOS PARTICULARES**

---

- Se obtendrá información geoestadística de cada una de las AGEB's para alimentar el modelo.
- Reducir la dimensión de los datos mediante la agrupación de AGEB's en CAGEB's para reducir la cantidad de cálculos.
- Generación de escenarios inciertos que permitan capturar el comportamiento estocástico del problema.
- Determinar las probabilidades de movilidad de mosquitos para predecir las áreas de mayor riesgo.
- Obtener un modelo que incluya aspectos sociales mediante parámetros de salud ocupacional
- Realizar la codificación del modelo matemático con los datos recabados en el software de GAMS para obtener resultados.
- Obtener políticas de fumigación óptimas aplicando la estrategia CVaR para análisis el escenario más probable a suceder.

## CAPÍTULO 2

---

En este capítulo se abordará el desarrollo del modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos multiescenario, así como el desarrollo de ecuaciones en el modelo matemático, en el segundo apartado se dará un enfoque del modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos hacia la ingeniería de reactores, por último, se plantea la solución del modelo matemático multiescenario con una metodología de solución de Pareto tomando un enfoque CVaR

## 2.1. FORMULACIÓN DEL MODELO

---

El modelo propuesto se basó en el modelo matemático de (Fabricio Nápoles-Rivera, col, 2019), se cambiará el lugar de incidencia de los mosquitos de municipios a CAGEB's, también se explicará el desarrollo de los escenarios en el modelo matemático, así como la estrategia de solución del modelo matemático multiescenario.

## 2.2. DESARROLLO DEL MODELO MULTIESCENARIO DE ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR VECTORES

---

### 2.2.1. Balance para mosquitos no infectados e infectados

Para el balance del número de mosquitos no infectados  $M_{i,t,s}^{living,H}$  en una CAGEB  $i$ , en un mes  $t$  y en un escenario  $s$ ; es la suma de los mosquitos no infectados que vivieron en el mes anterior,  $M_{i,t-1,s}^{living,H}$ , los mosquitos que nacieron en la misma CAGEB,  $M_{i,t,s}^{born}$  y los mosquitos que migraron desde otras CAGEB's,  $M_{i,t,s}^{in,H}$ , menos la suma de los mosquitos que migraron a otra CAGEB,  $M_{i,t,s}^{out,H}$ , los mosquitos muertos por causas naturales,  $M_{i,t,s}^{Ndeath,H}$  y los mosquitos muertos por el uso de productos químicos,  $M_{i,t,s}^{Cdeath,H}$ , como se muestra en la ecuación (2.1)

$$\begin{aligned} (M_{i,t,s}^{living,H}) &= (M_{i,t-1,s}^{living,H}) + (M_{i,t,s}^{born}) + (M_{i,t,s}^{in,H}) - (M_{i,t,s}^{Ndeath,H}) - (M_{i,t,s}^{out,H}) \\ &\quad - (M_{i,t,s}^{Cdeath,H}) \quad (2.1) \end{aligned}$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Para el primer mes el número de mosquitos no infectados se da en la siguiente ecuación

$$(M_{i,t=1,s}^{living,H}) = (M_{i,s}^{existing,H}) - (M_{i,t=1,s}^{Cdeath,H}) \quad (2.2)$$

$$\forall i, \forall s$$

La variable  $M_{i,s}^{existing,H}$  incluye todos los términos de la ecuación (2.1) que no están incluidos en la ecuación (2.2), esta variable también, da una estimación de la población de mosquitos no infectados en el primer mes. Por lo tanto, el termino  $M_{i,s}^{existing,H}$  es la población de mosquitos no infectados que viven en la CAGEB  $i$  determinado en el mes  $t = 1$  y del escenario  $s$ . Para el caso, del balance de los mosquitos infectados se presenta en la ecuación (2.3)

$$(M_{i,t,s}^{living,I}) = (M_{i,t-1,s}^{living,I}) + (M_{i,t,s}^{htom}) + (M_{i,t,s}^{in,I}) - (M_{i,t,s}^{Ndeath,I}) - (M_{i,t,s}^{out,I}) - (M_{i,t,s}^{Cdeath,I}) \quad (2.3)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Los mosquitos infectados durante el mes  $t$  en la CAGEB  $i$  en el escenario  $s$  es representado por la variable  $M_{i,t,s}^{living,I}$ , mientras que, para los mosquitos infectados que migran desde otras CAGEB's,  $M_{i,t,s}^{in,I}$ , los mosquitos infectados muertos por casusas naturales,  $M_{i,t,s}^{Ndeath,I}$ , los mosquitos infectados que migran a otra CAGEB,  $M_{i,t,s}^{out,I}$ , los mosquitos muertos con productos químicos,  $M_{i,t,s}^{Cdeath,I}$ , los mosquitos infectados que vivieron en el mes anterior,  $M_{i,t-1,s}^{living,I}$ , los mosquitos sanos infectados al picar a un humano infectado,  $M_{i,t,s}^{htom}$ . La ecuación (2.4) es el primer mes el número de mosquitos infectados

$$(M_{i,t=1,s}^{living,I}) = (M_{i,s}^{existing,I}) - (M_{i,t=1,s}^{Cdeath,I}) \quad (2.4)$$

$$\forall i, \forall s$$

### 2.2.2. Los mosquitos nacidos

$$(M_{i,t,s}^{born}) = (0.5)(150)(M_{i,t,s}^{living,H})(\psi_{i,t}^{oviposition})(\alpha_{i,t}^{born}) \quad (2.5)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

$M_{i,t,s}^{born}$  es el número de mosquitos nacidos en el mes  $t$ , de la CAGEB  $i$ , en el escenario  $s$ . El valor de 0.5 y 150 es la suposición de que la mitad de la población de mosquitos son hembras y la cantidad de huevos por oviposición que puede poner la hembra, respectivamente. (Cailly, P. y col., 2012).  $\psi_{i,t}^{oviposition}(T)$  es el número de oviposición por mosquito hembra que depende de las condiciones ambientales y variando en el transcurso del año.  $\alpha_{i,t}^{born}(T)$  es la probabilidad de supervivencia del mosquito dependiente de la temperatura. (Fabricio Nápoles-Rivera, col, 2019).

### 2.2.3. Entrada de mosquitos a una CAGEB $i$ determinada

$M_{i,t,s}^{in,H}$  son los mosquitos no infectados que migran desde otras CAGEB's dependiendo de la ubicación geográfica, las condiciones ambientales y la cantidad de mosquitos que migran desde las ubicaciones vecinas. (Fabricio Nápoles-Rivera, col, 2019).  $\alpha_{i,i',t}^{in}$  es el factor de eficiencia, basado en la probabilidad de que un mosquito migre a otra CAGEB considerando condiciones climáticas y geográficas.

$$(M_{i,t,s}^{in,H}) = \sum_{i'} (\alpha_{i,i',t}^{in}) (M_{i',t,s}^{leaving,H}) \quad (2.6)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Se considera que la cantidad de mosquitos infectados que migran a otras CAGEB's es una fracción de los mosquitos no infectados que ingresan a la CAGEB

$$(M_{i,t,s}^{in,i}) = (\alpha_i^{in,i})(M_{i,t,s}^{in,H}) \quad (2.7)$$



$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

#### 2.2.4. La muerte natural de los mosquitos

$\alpha_{i,t}^{Ndeath}$  es el factor que modela el límite de longevidad, condiciones climáticas adversas o depredadores que causan la muerte de los mosquitos. Este factor también incluye a los mosquitos que nacieron y los que llegaron de otras CAGEB's. Entonces para el balance de la muerte natural de los mosquitos no infectados  $M_{i,t,s}^{Ndeath,H}$ , se expresa como

$$(M_{i,t,s}^{Ndeath,H}) = (M_{i,t-1,s}^{living,H}) + (\alpha_{i,t}^{Ndeath})[(M_{i,t,s}^{born}) + (M_{i,t,s}^{in,H})] \quad (2.8)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Para la muerte natural de los mosquitos infectados  $M_{i,t,s}^{Ndeath,I}$  es

$$(M_{i,t,s}^{Ndeath,I}) = (M_{i,t-1,s}^{living,I}) + (\alpha_{i,t}^{Ndeath})(M_{i,t,s}^{in,I}) \quad (2.9)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

#### 2.2.5. Migración de mosquitos desde la ubicación $i$ a ubicaciones vecinas

$\alpha_{i,i',t}^{leaving,H}$  es la probabilidad de migración de los mosquitos que viven en una CAGEB  $i$  hacia otra CAGEB vecina  $i'$  considerando las condiciones climáticas y la distancia entre la CAGEB  $i$  e  $i'$ . Por ejemplo, la actividad de los mosquitos disminuye a bajas temperaturas, lo que no les permite volar largas distancias; así, durante el invierno, la probabilidad de migración disminuye, mientras que durante el verano aumenta. (Fabricio Nápoles-Rivera, col, 2019). Entonces para los mosquitos no infectados que migran a CAGEB's vecinas  $i'$

$$\left(M_{i,i',t,s}^{leaving,H}\right) = \left(\alpha_{i,i',t}^{leaving,H}\right)\left(M_{i,t-1,s}^{living,H}\right) \quad (2.10)$$

$$\forall i, \forall i', \forall s, \quad t > 1$$

Se supone que los mosquitos que salen de la CAGEB  $i$  ya no regresan a esta. Por tanto, la sumatoria de los mosquitos no infectados que migran a CAGEB's vecinas  $i'$ ,  $M_{i,i',t,s}^{leaving,H}$ , es igual a el número total de mosquitos no infectados que salen de la ubicación  $i$

$$\left(M_{i,t,s}^{out,H}\right) = \sum_{i'} M_{i,i',t,s}^{leaving,H} \quad (2.11)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Los mosquitos infectados que migran a otras CAGEB's vecinas  $i'$ ,  $M_{i,t,s}^{out,I}$ , se toma como una fracción de los mosquitos no infectados que migran,  $M_{i,t,s}^{out,H}$ ,

$$\left(M_{i,t,s}^{out,I}\right) = \left(\alpha_{i,t}^{out,I}\right)\left(M_{i,t,s}^{out,H}\right) \quad (2.12)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

## 2.2.6. Muerte química de los mosquitos

$$\left(M_{i,t,s}^{Cdeath,H}\right) = \left(\theta_{i,t}^{Cdeath}\right)\left(M_{i,t,s}^{mosquito,H}\right) \quad (2.13)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

$\theta_{i,t}^{Cdeath}$  es un factor de muerte química de los mosquitos, la multiplicación de este por,  $M_{i,t,s}^{mosquito,H}$  la densidad de mosquitos por metros cuadrado en una CAGEB  $i$  en el mes  $t$  del escenario  $s$  es igual al número de mosquitos muertos por productos químicos  $M_{i,t,s}^{Cdeath,H}$ . Para el caso de la densidad de mosquitos  $M_{i,t,s}^{mosquito,H}$ , es igual al número de mosquitos no infectados  $M_{i,t,s}^{living,H}$  entre el área de la CAGEB  $i$ ,  $A_i$ ,

$$(M_{i,t,s}^{mosquito,H}) = \frac{(M_{i,t,s}^{living,H})}{(A_i)} \quad (2.14)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Para el factor de químico de muerte  $\theta_{i,t}^{Cdeath}$ , depende de,  $F_{c,i,t,s}^{chemical}$  el flujo del químico aplico  $c$  en la CAGEB  $i$  durante el mes  $t$  y en el escenario  $s$ ,  $\beta_c^{Cdeath}$  la eficiencia del tipo de químico  $c$  y  $\varphi_c^{Ifactor}$  la cantidad requerida de químico  $c$  por metro cuadrado. Los insecticidas tienen una eficiencia máxima durante los primeros tres meses y disminuye gradualmente durante los tres meses posteriores, por ello, el efecto residual de los insecticidas es de seis meses, por tanto, se tiene que,

$$(\theta_{i,t}^{Cdeath}) = (\beta_c^{Cdeath}) \left[ \left( (F_{c,i,t,s}^{chemical}) + (F_{c,i,t-1,s}^{chemical}) + (F_{c,i,t-2,s}^{chemical}) + (0.8)(F_{c,i,t-3,s}^{chemical}) \right. \right. \\ \left. \left. + (0.6)(F_{c,i,t-4,s}^{chemical}) + (0.4)(F_{c,i,t-5,s}^{chemical}) \right) / (\varphi_c^{Ifactor}) \right] \quad (2.15)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Para el caso, de los mosquitos infectados muertos  $M_{i,t,s}^{Cdeath,I}$  por el uso de insecticida es una función de los mosquitos no infectados  $M_{i,t,s}^{Cdeath,H}$

$$(M_{i,t,s}^{Cdeath,I}) = (\alpha_{i,t}^{Cdeath})(M_{i,t,s}^{Cdeath,H}) \quad (2.16)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Para la aplicación de cualquier insecticida en una CAGEB  $i$  es necesario que el efecto residual y la aplicación consecutiva sean mínimos por un cierto periodo de tiempo, es decir, la aplicación de un insecticida  $c$  en una CAGEB  $i$  en el mes  $t$  y escenario  $s$ , debe transcurrir un lapso de cuatro meses para poder aplicar un insecticida  $c$  en la CAGEB  $i$  en el mes  $t$  y escenario  $s$ . Por consiguiente, para modelar esta restricción se tiene

$$(y_{c,i,t,s}) + (y_{c,i,t-1,s}) + (y_{c,i,t-2,s}) + (y_{c,i,t-3,s}) \leq 1 \quad (2.17)$$

$$\forall c, \forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Esta restricción significa que cualquier insecticida  $c$  puede aplicarse solo una vez al transcurrir un periodo de cuatro meses, debido a que el efecto residual comienza a disminuir, esto cuando la variable binaria  $y_{c,i,t,s}$  sea igual a uno. en caso contrario, cuando  $y_{c,i,t,s}$  sea igual a cero, no se aplicará ningún insecticida. Debido a la relación de la variable binaria  $y_{c,i,t,s}$  con el insecticida  $c$ , el flujo de insecticida deberá estar vinculada con ello, por lo tanto, se tiene para el flujo de insecticida

$$(F_{c,i,t,s}^{chemical}) < (My_{c,i,t',s}) \quad (2.18)$$

$$\forall c, \forall i, \forall s, \quad t > 1$$

$$(F_{c,i,t,s}^{chemical}) > -(My_{c,i,t',s}) \quad (2.19)$$

$$\forall c, \forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Por lo tanto, si la variable binaria  $y_{c,i,t,s}$  es igual a uno, la velocidad de flujo debe ser menor que un valor grande y mayor que un valor negativo, siendo  $M$  un parámetro con un valor muy grande. Para el caso contrario,  $y_{c,i,t,s}$  es igual a cero, la velocidad de flujo es nula, y con ello, satisfaciendo las dos restricciones. En este caso, se considera que todos los químicos tienen el mismo efecto residual, y esto se refleja con la ecuación (2.17), con ello, si se aplica en un mes determinado un químico, este y los restantes no podrán aplicarse en los tres meses anteriores.

### 2.2.7. Balance de personas infectadas en el lugar $i$

$$(P_{i,t,s}^{infected}) = (\alpha_{i,t}^{infected})(M_{i,t,s}^{living,i}) \quad (2.20)$$

$$\forall i, \forall s, \quad t > 1$$

Donde  $\alpha_{i,t}^{infected}$  es el factor que depende del número de mosquitos infectados, la tasa de picadura y la probabilidad de infección, con ello, las personas infectadas en una CAGEB  $i$  durante un mes  $t$  en el escenario  $s$ , puede expresarse como  $P_{i,t,s}^{infected}$ , ecuación (2.20). Es importante mencionar que los balances propuestos suponen

que el número de mosquitos son variables continuas; estrictamente estas son variables discretas. Por ello, la variable continua de personas infectas se tiene como objetivo, como se muestra a continuación

$$(T_{P_s}^{infected}) = \sum_i \sum_t P_{i,t,s}^{infected} \quad (2.21)$$

$$\forall s$$

Cabe señalar que, la cantidad de mosquitos son muy grandes, el efecto de redondearlos es insignificante. Sin embargo, si estas variables tienen un valor mayor a cero, en cierto, mes  $t$  y CAGEB  $i$  habrá una probabilidad de infección en ese lugar y tiempo. Por ello, se debe redondear al valor entero más alto y esto se realiza fuera del paso de optimización.

### 2.2.8. Costo total de los productos químicos usados

Para el costo de los productos químicos utilizados es igual al flujo del insecticida  $c$  usado en las CAGEB's  $i$  en el total de meses  $t$  en el escenario  $s$ , multiplicado por el costo unitario del producto químico  $U_{c,i,t}^{chemical}$

$$(T_{C_s}) = \sum_c \sum_i \sum_t (U_{c,i,t}^{chemical})(F_{c,i,t,s}^{chemical}) \quad (2.22)$$

$$\forall s$$

### 2.2.9. Función objetivo

Por consiguiente, las funciones objetivo a minimizar son las siguientes, el total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y el costo total  $T_{C_s}$  utilizado

$$\min\{(T_{P_s}^{infected}), (T_{C_s})\} \quad (2.23)$$

$$\forall s$$

### 2.2.10. Restricción salud ocupacional

Para el caso de la restricción de la salud ocupacional se tiene que el flujo del insecticida  $c$  usado en la CAGEB  $i$  en el mes  $t$  en el escenario  $s$  no puede ser mayor a la dosificación máxima de insecticida  $c$  en la CAGEB  $i$  en el mes  $t$ ; siendo  $P_{c,i,t}^{OH}$  las cantidades máximas de insecticidas que se pueden aplicar (**TABLA 4**)

$$(F_{c,i,t,s}^{chemical}) \leq (P_{c,i,t}^{OH}) \quad (2.24)$$

$$\forall c, \forall i, \forall s, \forall t$$

## 2.3. RELACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR MOSQUITOS CON LA INGENIERÍA QUÍMICA

---

Como un requisito de la materia de ingeniería de reactores, se pidió relacionar el tema de la tesis con esta materia por lo tanto se explicará cómo se relaciona, tomando en cuenta las ecuaciones de los mosquitos libres de enfermedad.

Del modelo a la ecuación de balance general

$$[Acumulación] = [Entradas] + [(Generación) - (Consumo)] - [Salidas] \quad (2.25)$$

Se sabe que de la ecuación (2.1):

$$[Acumulación] = (M_{i,t}^{living,H}) \quad (2.26)$$

Por lo que, el termino  $(M_{i,t-1}^{living,H})$  es la acumulación del tiempo anterior, por lo tanto, se suma con todo lo que pasa en el reactor en el tiempo  $t$ , entonces nos queda:

$$[Acumulación] = [Acumulación]_t - [Acumulación]_{t-1} \quad (2.27)$$

$$[Acumulación] = (M_{i,t}^{living,H}) - (M_{i,t-1}^{living,H}) \quad (2.28)$$

De la ecuación (2.6)

$$[Entradas] = (M_{i,t}^{in,H}) \quad (2.29)$$

De las ecuaciones (2.5, 2.8 y 2.13)

$$(Generación) = (M_{i,t}^{born}) \quad (2.30)$$

$$(Consumo) = (M_{i,t}^{Ndeath,H}) + (M_{i,t}^{Cdeath,H}) \quad (2.31)$$

De la ecuación (2.10)

$$[Salidas] = (M_{i,i',t}^{leaving,H}) \quad (2.32)$$

Sustituyendo ecuaciones (2.28, 2.29, 2.30, 2.31 y 2.32) en ecuación (2.25)

$$\begin{aligned} & (M_{i,t}^{living,H}) - (M_{i,t-1}^{living,H}) \\ &= (M_{i,t}^{in,H}) + [(M_{i,t}^{born}) - ((M_{i,t}^{Ndeath,H}) + (M_{i,t}^{Cdeath,H}))] \\ & - (M_{i,i',t}^{leaving,H}) \quad (2.33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (M_{i,t}^{living,H}) &= (M_{i,t-1}^{living,H}) + (M_{i,t}^{in,H}) + (M_{i,t}^{born}) - (M_{i,t}^{Ndeath,H}) - (M_{i,t}^{Cdeath,H}) \\ & - (M_{i,i',t}^{leaving,H}) \quad (2.34) \end{aligned}$$

Relacionando la ecuación (2.5) con una ecuación cinética

$$(M_{i,t}^{born}) = (0.5)(150)(M_{i,t}^{living,H})(\psi_{i,t}^{oviposition})(\alpha_{i,t}^{born}) \quad (2.35)$$

Considerando la constante  $K_1$  como

$$K_1 = (0.5)(150)(\psi_{i,t}^{oviposition}) \quad (2.36)$$

Obtenemos

$$(M_{i,t}^{born}) = K_1(M_{i,t}^{living,H})(\alpha_{i,t}^{born}) \quad (2.37)$$

Si la probabilidad de supervivencia  $\alpha_{i,t}^{born}$  se considera como una efectividad de la reacción cinética entonces:

$$\eta = \alpha_{i,t}^{born}(T_{i,t}) = 0.004T_{i,t} - 6x10^{-15} \quad (2.38)$$

Entonces nuestra ecuación cinética teórica sería

$$(M_{i,t}^{born}) = \eta K_1 (M_{i,t}^{living,H}) \quad (2.39)$$

Aunque el modelo de la tesis a simple vista no tenga relación con un reactor, estudiando minuciosamente, tiene una gran semejanza, como es el caso de una ecuación cinética, siendo esta la ecuación (2.39) que se podría decir que es exclusiva de las reacciones químicas, pero caso contrario es de un organismo vivo. Se podría concluir que las representaciones microscópicas pueden predecir las representaciones macroscópicas, como es arriba es abajo, solo faltaría indagar más sobre el tema y comprobar a más profundidad lo dicho.

## 2.4. SOLUCIÓN DE ESTRATEGIA MULTIESCENARIO

---

Como se observa en la ecuación (2.23), hay dos funciones objetivo a minimizar el total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y el costo total  $T_{C_s}$ , por lo tanto, la necesidad de aplicar estrategias para el análisis multiescenario. En este trabajo se utilizará la metodología de solución de Pareto tomando un enfoque CVaR. Como menciona (Dowling, A.W. y col., 2016 y Fuentes-Cortés, L.F. y col., 2018). el marco CVaR se puede utilizar como una herramienta analítica para la resolución de conflictos en entornos de toma de decisiones y también permite a las partes interesadas evaluar cuánta importancia le dan a una solución de compromiso. Tomando este enfoque CVaR nos permitirá evaluar los criterios de brecha (GAP) y condiciones de igualdad de las funciones objetivo del total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y el costo total  $T_{C_s}$  adoptan un análisis multiescenario al modelo de enfermedades transmitidas por mosquitos.



El orden de magnitud de las dos funciones objetivo es diferente, para la primera parte mide el gasto en dólares de producto químico utilizado, mientras que para la segunda la cantidad de personas infectadas, esto para, el costo total  $T_{C_s}$  (ecuación 2.22) y el total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  (ecuación 2.21). Debido a esta limitación no es factible la comparación de ambas variables en el orden de magnitud. Por ello, es necesario que los valores de las funciones objetivos tengan el mismo orden de magnitud, en este caso, se aplicará una normalización de las funciones objetivo, así se podrá comparar las funciones objetivos en una sola expresión. (Luis Alberto Díaz-Trujillo y col., 2020).

$$\gamma_s^P = \frac{T_{P_s}^{infected} - T_{P_s}^{infected, LB}}{T_{P_s}^{infected, UB} - T_{P_s}^{infected, LB}} \quad (2.40)$$

$\forall s$

$$\gamma_s^C = \frac{T_{C_s} - T_{C_s}^{LB}}{T_{C_s}^{UB} - T_{C_s}^{LB}} \quad (2.41)$$

$\forall s$

Para las funciones objetivo normalizadas se tiene la variable  $\gamma_s^P$  para el total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y  $\gamma_s^C$  para el caso del costo  $T_{C_s}$  para cada escenario  $s$ . Por lo tanto, los límites inferiores de las funciones objetivo normalizadas (ecuaciones 2.40 y 2.41) están dadas por  $T_{P_s}^{infected, LB}$  y  $T_{C_s}^{LB}$ , mientras que los límites superiores son  $T_{P_s}^{infected, UB}$  y  $T_{C_s}^{UB}$ , para el total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y para el caso del costo  $T_{C_s}$ , para cada escenario  $s$ , respectivamente. Los valores de los límites inferiores y los límites superiores de las funciones objetivo se obtienen resolviendo el problema para cada escenario del total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y el costo total  $T_{C_s}$  de los valores máximos y mínimos (valores extremos). Como resultado de minimizar la función objetivo de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$ , se obtiene el límite inferior del total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$ , que es el valor deseado de la función; y se obtiene el límite superior de la función del costo total  $T_{C_s}$ , que es un valor no deseado. También nos permite abordar el conflicto entre las funciones

objetivo. Como resultado de minimizar el costo total  $T_{C_s}$ , se obtiene el límite inferior de esta función y el límite superior de la función del total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$ . Por tanto, las funciones objetivo normalizadas  $\gamma_s^P$  y  $\gamma_s^C$  (ecuaciones 2.40 y V41) toman valores entre cero y uno. Las funciones objetivo normalizadas  $\gamma_s^P$  y  $\gamma_s^C$  tienden a tomar un valor de uno, si las funciones  $T_{P_s}^{infected}$  y  $T_{C_s}$  tienden hacia su límite superior, en el caso contrario, si las funciones objetivo normalizadas  $\gamma_s^P$  y  $\gamma_s^C$  tienden a tomar un valor de cero, las funciones  $T_{P_s}^{infected}$  y  $T_{C_s}$  tienden hacia su límite inferior. Para obtener un menor gasto en el uso de insecticidas y menor número de personas infectadas, los valores de las funciones objetivo normalizadas  $\gamma_s^P$  y  $\gamma_s^C$  deben ser cero. Si solo se quisiera obtener un menor número de personas infectadas sin importar el costo, los valores de las funciones objetivo normalizadas  $\gamma_s^P$  y  $\gamma_s^C$ , deberían ser cero y uno, respectivamente. Estas ecuaciones también se pueden estructurar de modo que para los valores más deseables  $\gamma_s^P$  y  $\gamma_s^C$  pueda ser uno. Esto dependerá de si la función objetivo final que involucra ambas funciones normalizadas está maximizada o minimizada. (Luis Alberto Díaz-Trujillo y col., 2020). Al normalizar las funciones objetivo  $T_{P_s}^{infected}$  y  $T_{C_s}$ , nos permiten comparar la magnitud estas funciones objetivo en su forma normalizada  $\gamma_s^P$  y  $\gamma_s^C$ , tomando esto último, el modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos de ser un problema multiobjetivo se puede reformular a un modelo uniobjetivo para cada escenario  $s$ . Esto da como resultado que, la solución de Pareto obtenida en este modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos, dé más aproximado al punto de utopía, es decir, a los límites inferiores ( $T_{P_s}^{infected, LB}$  y  $T_{C_s}^{LB}$ ) de las funciones objetivos ( $T_{P_s}^{infected}$  y  $T_{C_s}$ ). (Cao y col., 2017, Fuentes-Cortés y col., 2018; Zavala y Flores-Tlacuahuac, 2012; Luis Alberto Díaz-Trujillo y col., 2020). Los criterios de brecha (GAP)  $\delta_s$  es definido por las sumas de las diferencias entre las funciones objetivo normalizadas  $\gamma_s^P$  y  $\gamma_s^C$  para todos los escenarios  $s$ , donde involucren las funciones objetivo ( $T_{P_s}^{infected}$  y  $T_{C_s}$ ) en la toma de decisión en el proceso.

$$\delta_s = |\gamma^{CI,P} - \gamma_s^P| + |\gamma^{CI,C} - \gamma_s^C| \quad (2.42)$$

$\forall s$

En la toma de decisión del proceso multiescenario todos los escenarios tienen el mismo peso e influencia, esto se logra con las variables de solución de condiciones de igualdad  $\gamma^{CI,P}$  y  $\gamma^{CI,C}$  para las variables del total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y el costo total  $T_{C_s}$ , respectivamente. Con respecto al marco de la estrategia de CVaR se tiene

$$\min v + \frac{1}{(1-\alpha)N} \sum_s [\delta_s - v]_+ \quad (2.43)$$

Donde,  $v$  es una variable artificial,  $N$  es el número de funciones objetivas totales en el proceso de toma de decisión y  $[\delta_s - v]_+$  es la función máxima. Para minimizar el criterio de brecha (GAP) promedio asociado a las soluciones de cada escenario  $s$ , es necesario que  $\alpha$  tienda a cero.

$$\min f = \frac{1}{N} \sum_s \delta_s \quad (2.44)$$

$$s. a. (2.1) a (2.24) \quad (2.45a)$$

Significa que minimizar la suma de las diferencias para todas las funciones de objetivo normalizado debe dar una solución única  $f$  que pueda ayudarlo a alcanzar una solución compensada considerando la distribución generada para la variación de datos utilizada para definir el enfoque multiescenario en los aspectos de las funciones económico y humano en condiciones de calidad. (Luis Alberto Díaz-Trujillo y col., 2020).

Una ventaja en el enfoque CVaR es la discriminación de soluciones para escenarios con valor extremo a la distribución de datos en el problema de multiescenario. Este enfoque multiescenario reduce la brecha (GAP) de todos los escenarios para obtener una solución compensada, al igual como ocurre en un enfoque multicriterio. En el caso de un enfoque multiescenario, la distribución específica de las soluciones multiobjetivo presenta un valor basado en las funciones objetivo. Antes de utilizar un enfoque CVaR es necesario hacer unas consideraciones para llegar a la solución

de compensación para el problema multiescenario, como menciona (Luis Alberto Díaz-Trujillo y col., 2020) se deben considerar estas características para la formulación del problema

1. Considerar que las funciones objetivo sea un conjunto  $\Phi = \{\phi_1(x), \dots, \phi_n(x)\}$ , para un conjunto de escenarios de  $J = \{1, \dots, m\}$ , donde  $j \in J$ . Siendo  $\phi_j^*$  una solución óptima para el escenario  $j$ , que esta determinada por un conjunto de decisiones  $x_j \in R$ . Alcanzando un equilibrio entre las soluciones óptimas de los  $m$  escenarios asociados en el problema multiescenario con la media discreta de brecha  $\delta_j(x)$  que es la diferencia en el valor de la función objetivo.
2. Considere el CVaR de la variable  $\delta$  con parámetro  $\alpha \in [1,0]$ , siendo  $\delta$  una variable aleatoria con probabilidad  $p_j = 1/m$

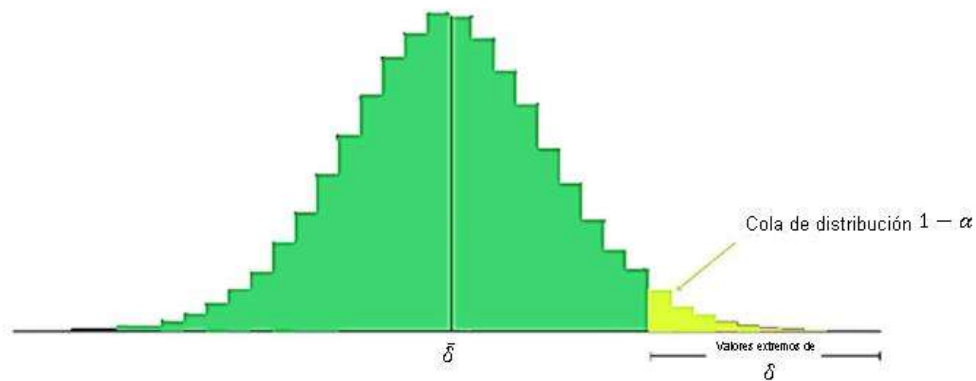
$$CVaR_\alpha(\delta(x)) = \min_{v \in R} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^J \left( v + \frac{1}{1-\alpha} [\delta_s - v]_+ \right) \quad (2.46)$$

Donde  $[v]_+ = \max\{v, 0\}$ .

3. Resolviendo el problema de minimización de CVaR, se minimiza la medida de brecha (GAP) y la solución calculada se define como una solución de compensación entre múltiples escenarios

$$\min CVaR_\alpha(\delta) = \min_{(v,x) \in X \times R} v + \frac{1}{(1-\alpha)m} \sum_{j=1}^J [\delta_s - v]_+ \quad (V47)$$

4. Las soluciones óptimas para cada escenario se pueden interpretar como muestra de una población utilizando un enfoque CVaR. Además, penaliza el gran tamaño de la brecha en la cola  $1 - \alpha$  de la distribución de soluciones óptimas asociadas a cada escenario en el problema multiescenario. Suponiendo una distribución normal de los valores de  $\delta$ . **FIGURA 1.**



**FIGURA 1.** Distribución de soluciones óptimas de los escenarios

5. Calcular el CVaR de la insatisfacción equivale a ordenar los valores de  $J$  en orden creciente, tomar los elementos  $1 - \alpha$  más grandes y promediarlos. Se observa que la solución de CVaR converge a la solución del peor de los casos ( $\alpha \rightarrow 1$ ) y a la solución promedio ( $\alpha \rightarrow 0$ ). Para el análisis que se presenta en este trabajo se utiliza la solución promedio  $\alpha \rightarrow 0$ .
6. Se puede evitar que la solución del peor de los casos sea conservadora extrema con la métrica CVaR. Evita una situación en la que un escenario, que se define por la distribución de soluciones óptimas, domina la solución de compensación y permite explorar si una decisión cambia cuando descartamos ciertos elementos de la población.

Finalmente, el CVaR es una función convexa que puede manejarse mediante algoritmos de optimización estándar. En consecuencia, es posible utilizarlo como una herramienta de análisis multiobjetivo multiescenario en problemas de programación lineal, no lineal y de enteros mixtos.

## CAPÍTULO 3

---

En este capítulo se abordará el planteamiento del problema dando la idea estructura del trabajo que se realizará, como segundo apartado se dará el caso de estudio del trabajo realizando una detallada exposición de los datos recopilados y por último se mostrara la metodología que se aplicó para la resolución del problema.

### 3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

Una población estimada de mosquitos en la ubicación específica de la localidad de Morelia, Michoacán. Se subdivide la localidad en CAGEB (Conjunto de Área Geoestadística Estatal Básica) se procederá a encontrar el tipo óptimo de insecticida, la dosificación, la selección de la programación del sitio para reducir la probabilidad de infecciones al ser humano de las enfermedades transmitidas por mosquitos (ETM). Se tomará en cuentas la cantidad máxima recomendada por la organización mundial de la salud. (WHO. Pesticides and Their Application, 2006). Para evitar riesgo en la salud ocupacional de la localidad de Morelia. Teniendo esto en cuenta se planteará un modelo matemático aplicando incertidumbres múltiples escenarios afectando algunas variables como son el total de mosquitos y el total de mosquitos infectados en el primer periodo de tiempo. Definido en el modelo matemático los conjuntos:  $t$  es el tiempo en meses,  $c$  representa el tipo de insecticida,  $i$  es una ubicación determinada y  $s$  es el escenario de estudio. Siendo el modelo un problema de programación mixta entera no lineal (MINLP).

### 3.2. CASO DE ESTUDIO

---

Como caso de estudio, la localidad de Morelia ubicada en el estado de Michoacán en México. Esta localidad está conformada por extensiones territoriales que corresponden a la subdivisión de las áreas geoestadísticas municipales denominadas como Área Geoestadística Básica (AGEB). (INEGI, 2017). Siendo contabilizadas 320 Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB's) en la localidad de Morelia. Por la gran cantidad de AGEB's obtenidas de la localidad de Morelia se optó en hacer grupos de estas denominados Conjunto de Área Geoestadística Básica (CAGEB), esto con la finalidad de reducir la dimensión de los datos. Se obtuvieron 31 Conjuntos de Áreas Geoestadísticas Básicas (CAGEB's).

La localidad de Morelia fue seleccionada como caso de estudio debido a que forma parte de la cuenca del lago de Cuitzeo, sus principales ríos son el Grande y el Chiquito y las condiciones climáticas calificadas como subtropicales que la hacen apta para la reproducción de mosquitos. Asimismo, se ha reportado la evolución del mosquito *Aedes Aegypti* transmisor del dengue, propició que, de manera atípica, Morelia registrara 410 casos durante 2020, 297 más que en el 2019. También mencionar que Morelia es la ciudad capital del estado y recibe visitantes nacionales e internacionales todos los años.

**TABLA 1. El número de habitantes y el área urbana de cada CAGEB**

<b>CAGEB</b>	<b>Población</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>CAGEB</b>	<b>Población</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>
1	13565	5.56	17	23144	3.03
2	18504	5.78	18	28863	6.07
3	31220	6.44	19	15592	3.11
4	3455	0.83	20	35726	3.67
5	10370	3.70	21	49977	7.64
6	11171	2.18	22	31202	4.90
7	17312	4.70	23	12058	2.82
8	11585	3.20	24	28409	5.51
9	20119	4.57	25	34997	4.80
10	20030	4.43	26	29261	2.70
11	25744	3.40	27	44681	3.68
12	18191	2.70	28	27446	3.50
13	15600	3.17	29	11437	0.86
14	35699	4.19	30	4174	3.07
15	5520	2.67	31	3890	0.23
16	17906	6.59			

El número de habitantes y el área urbana de cada una de las CAGEB's son mostradas en la **TABLA 1**. Se considero que área fumigable es el 100% del área urbana esto debido a que la localidad de Morelia conforma el mayor territorio de la zona metropolitana de Morelia. Esta área fumigable correspondería a espacios públicos, como escuelas, hospitales, calles, parques urbanos y casas. En la **TABLA 2** se muestran las distancias de una CAGEB a otra.



**TABLA 2A. Distancias entre la CAGEB  $i$  y  $i'$  (km)**

<b>CAGEB</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	0	3.53	5.03	4.01	3.13	7.26	5.97	7.23	5.55	7.84
<b>2</b>	3.53	0	2.02	3.30	1.91	5.52	3.72	4.29	2.42	4.58
<b>3</b>	5.03	2.02	0	2.51	2.03	7.13	5.26	5.13	3.49	4.67
<b>4</b>	4.01	3.30	2.51	0	1.49	8.87	7.06	7.39	5.57	7.17
<b>5</b>	3.13	1.91	2.03	1.49	0	7.44	5.66	6.17	4.31	6.19
<b>6</b>	7.26	5.52	7.13	8.87	7.44	0	1.90	2.96	3.73	4.71
<b>7</b>	5.97	3.72	5.26	7.06	5.66	1.90	0	1.80	1.85	3.42
<b>8</b>	7.23	4.29	5.13	7.39	6.17	2.96	1.80	0	1.87	1.76
<b>9</b>	5.55	2.42	3.49	5.57	4.31	3.73	1.85	1.87	0	2.52
<b>10</b>	7.84	4.58	4.67	7.17	6.19	4.71	3.42	1.76	2.52	0
<b>11</b>	12.37	8.84	7.68	10.01	9.70	9.76	8.64	6.91	7.49	5.22
<b>12</b>	10.86	7.29	6.22	8.63	8.24	8.44	7.20	5.53	5.96	3.78
<b>13</b>	9.54	6.11	5.44	7.98	7.34	6.82	5.61	3.91	4.50	2.18
<b>14</b>	9.34	6.00	4.42	6.56	6.45	8.78	7.16	5.86	5.51	4.22
<b>15</b>	15.48	12.54	10.58	11.77	12.34	15.65	14.08	12.69	12.43	10.96
<b>16</b>	12.55	9.82	7.76	8.69	9.37	13.63	11.91	10.76	10.13	9.16
<b>17</b>	10.33	7.36	5.39	6.84	7.22	10.92	9.21	8.06	7.44	6.48
<b>18</b>	11.91	8.65	6.89	8.68	8.86	11.30	9.77	8.34	8.18	6.61
<b>19</b>	11.79	10.14	8.11	7.71	8.92	15.10	13.21	12.58	11.37	11.32
<b>20</b>	10.90	8.59	6.48	6.92	7.81	13.04	11.21	10.35	9.37	8.94
<b>21</b>	9.19	7.08	5.02	5.21	6.16	11.89	10.01	9.36	8.17	8.14
<b>22</b>	8.25	5.54	3.48	4.62	5.11	9.93	8.09	7.32	6.24	6.05
<b>23</b>	4.95	4.35	3.25	1.06	2.52	9.89	8.06	8.29	6.51	7.91
<b>24</b>	5.88	4.34	2.64	1.82	2.92	9.73	7.84	7.76	6.13	7.11
<b>25</b>	6.58	3.50	1.59	3.72	3.58	7.79	5.92	5.31	4.08	4.31
<b>26</b>	7.88	4.64	2.92	5.04	4.94	8.23	6.45	5.48	4.66	4.11
<b>27</b>	8.24	4.76	3.83	6.38	5.76	6.65	5.09	4.16	3.58	2.09
<b>28</b>	6.25	2.71	2.54	4.99	4.03	5.38	3.57	2.86	1.77	2.22
<b>29</b>	18.28	15.30	13.36	14.58	15.14	18.10	16.63	15.14	15.04	13.39
<b>30</b>	8.63	8.15	6.60	5.00	6.46	13.72	11.84	11.85	10.12	11.08
<b>31</b>	4.18	4.42	6.52	7.18	5.75	3.69	3.43	5.22	4.41	6.71

**TABLA 2B. Distancias entre la CAGEB  $i$  y  $i'$  (km)**

<b>CAGEB</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<b>1</b>	12.37	10.86	9.54	9.34	15.48	12.55	10.33	11.91	11.79	10.90
<b>2</b>	8.84	7.29	6.11	6.00	12.54	9.82	7.36	8.65	10.14	8.59
<b>3</b>	7.68	6.22	5.44	4.42	10.58	7.76	5.39	6.89	8.11	6.48
<b>4</b>	10.01	8.63	7.98	6.56	11.77	8.69	6.84	8.68	7.71	6.92
<b>5</b>	9.70	8.24	7.34	6.45	12.34	9.37	7.22	8.86	8.92	7.81
<b>6</b>	9.76	8.44	6.82	8.78	15.65	13.63	10.92	11.30	15.10	13.04
<b>7</b>	8.64	7.20	5.61	7.16	14.08	11.91	9.21	9.77	13.21	11.21
<b>8</b>	6.91	5.53	3.91	5.86	12.69	10.76	8.06	8.34	12.58	10.35
<b>9</b>	7.49	5.96	4.50	5.51	12.43	10.13	7.44	8.18	11.37	9.37
<b>10</b>	5.22	3.78	2.18	4.22	10.96	9.16	6.48	6.61	11.32	8.94
<b>11</b>	0	1.54	3.04	3.55	6.88	6.51	4.80	3.24	10.23	7.55
<b>12</b>	1.54	0	1.64	2.45	7.55	6.51	4.29	3.36	9.79	7.12
<b>13</b>	3.04	1.64	0	2.89	9.05	7.65	5.14	4.74	10.46	7.88
<b>14</b>	3.55	2.45	2.89	0	6.93	4.95	2.30	2.70	7.58	4.99
<b>15</b>	6.88	7.55	9.05	6.93	0	3.17	5.19	4.36	6.82	5.28
<b>16</b>	6.51	6.51	7.65	4.95	3.17	0	2.71	3.28	4.24	2.15
<b>17</b>	4.80	4.29	5.14	2.30	5.19	2.71	0	2.06	5.51	2.83
<b>18</b>	3.24	3.36	4.74	2.70	4.36	3.28	2.06	0	7.10	4.47
<b>19</b>	10.23	9.79	10.46	7.58	6.82	4.24	5.51	7.10	0	2.68
<b>20</b>	7.55	7.12	7.88	4.99	5.28	2.15	2.83	4.47	2.68	0
<b>21</b>	7.83	7.07	7.47	4.68	6.87	3.69	3.10	5.12	3.22	1.71
<b>22</b>	6.26	5.27	5.46	2.82	7.23	4.30	2.23	4.17	5.28	3.13
<b>23</b>	10.29	9.02	8.51	6.77	11.38	8.26	6.71	8.65	6.88	6.34
<b>24</b>	8.99	7.73	7.42	5.45	10.03	6.91	5.27	7.23	6.01	5.10
<b>25</b>	6.29	4.90	4.45	2.89	9.05	6.35	3.85	5.30	7.32	5.32
<b>26</b>	5.01	3.70	3.58	1.53	7.93	5.47	2.81	3.99	7.21	4.87
<b>27</b>	3.91	2.38	1.64	2.14	9.01	7.07	4.39	4.68	9.33	6.88
<b>28</b>	6.21	4.66	3.45	3.80	10.69	8.36	5.68	6.49	9.77	7.66
<b>29</b>	8.79	9.77	11.35	9.54	2.81	5.93	7.97	6.87	9.12	7.97
<b>30</b>	11.93	11.01	11.99	8.53	10.60	7.52	7.31	9.29	4.28	5.38
<b>31</b>	11.87	10.36	8.83	9.82	16.67	14.13	11.54	12.52	14.53	13.00

**TABLA 2C. Distancias entre la CAGEB *i* y *i'* (km)**

<b>CAGEB</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>
<b>1</b>	9.19	8.25	4.95	5.88	6.58	7.88	8.24	6.25	18.28	8.63	4.18
<b>2</b>	7.08	5.54	4.35	4.34	3.50	4.64	4.76	2.71	15.30	8.15	4.42
<b>3</b>	5.02	3.48	3.25	2.64	1.59	2.92	3.83	2.54	13.36	6.60	6.52
<b>4</b>	5.21	4.62	1.06	1.82	3.72	5.04	6.38	4.99	14.58	5.00	7.18
<b>5</b>	6.16	5.11	2.52	2.92	3.58	4.94	5.76	4.03	15.14	6.46	5.75
<b>6</b>	11.89	9.93	9.89	9.73	7.79	8.23	6.65	5.38	18.10	13.72	3.69
<b>7</b>	10.01	8.09	8.06	7.84	5.92	6.45	5.09	3.57	16.63	11.84	3.43
<b>8</b>	9.36	7.32	8.29	7.76	5.31	5.48	4.16	2.86	15.14	11.85	5.22
<b>9</b>	8.17	6.24	6.51	6.13	4.08	4.66	3.58	1.77	15.04	10.12	4.41
<b>10</b>	8.14	6.05	7.91	7.11	4.31	4.11	2.09	2.22	13.39	11.08	6.71
<b>11</b>	7.83	6.26	10.29	8.99	6.29	5.01	3.91	6.21	8.79	11.93	11.87
<b>12</b>	7.07	5.27	9.02	7.73	4.90	3.70	2.38	4.66	9.77	11.01	10.36
<b>13</b>	7.47	5.46	8.51	7.42	4.45	3.58	1.64	3.45	11.35	11.99	8.83
<b>14</b>	4.68	2.82	6.77	5.45	2.89	1.53	2.14	3.80	9.54	8.53	9.82
<b>15</b>	6.87	7.23	11.38	10.03	9.05	7.93	9.01	10.69	2.81	10.60	16.67
<b>16</b>	3.69	4.30	8.26	6.91	6.35	5.47	7.07	8.36	5.93	7.52	14.13
<b>17</b>	3.10	2.23	6.71	5.27	3.85	2.81	4.39	5.68	7.97	7.31	11.54
<b>18</b>	5.12	4.17	8.65	7.23	5.30	3.99	4.68	6.49	6.87	9.29	12.52
<b>19</b>	3.22	5.28	6.88	6.01	7.32	7.21	9.33	9.77	9.12	4.28	14.53
<b>20</b>	1.71	3.13	6.34	5.10	5.32	4.87	6.88	7.66	7.97	5.38	13.00
<b>21</b>	0	2.09	4.62	3.40	4.10	4.05	6.21	6.55	9.62	4.26	11.52
<b>22</b>	2.09	0	4.50	3.06	2.19	1.97	4.13	4.56	10.03	5.73	9.93
<b>23</b>	4.62	4.50	0	1.42	4.09	5.29	6.87	5.71	14.18	4.04	8.24
<b>24</b>	3.40	3.06	1.42	0	2.97	4.02	5.80	4.99	12.83	4.12	8.60
<b>25</b>	4.10	2.19	4.09	2.97	0	1.36	2.83	2.47	11.81	6.79	7.79
<b>26</b>	4.05	1.97	5.29	4.02	1.36	0	2.17	2.90	10.65	7.48	8.75
<b>27</b>	6.21	4.13	6.87	5.80	2.83	2.17	0	2.10	11.54	9.55	7.99
<b>28</b>	6.55	4.56	5.71	4.99	2.47	2.90	2.10	0	13.34	8.97	6.03
<b>29</b>	9.62	10.03	14.18	12.83	11.81	10.65	11.54	13.34	0	13.10	19.35
<b>30</b>	4.26	5.73	4.04	4.12	6.79	7.48	9.55	8.97	13.10	0	12.10
<b>31</b>	11.52	9.93	8.24	8.60	7.79	8.75	7.99	6.03	19.35	12.10	0

Un estudio de insecticidas en México evaluó la susceptibilidad de 12 insecticidas a poblaciones de *Aedes aegypti* aplicando a 30 entidades federativas. (Secretaría de Salud Mexicana, 2018). Seleccionando tres insecticidas para la aplicación en la

localidad de Morelia, siendo estos clorpirifos, malathion y propoxur. En la **TABLA 3** se muestran las características de estos tres insecticidas y las Clases de Peligro de la Organización Mundial de la Salud son II o III para estos insecticidas. (WHO. Pesticides and Their Application, 2006). También hay que mencionar que la mortalidad de estos tres insecticidas es tomada a la media hora de su aplicación. (Secretaria de Salud, 2018).

**TABLA 3. Datos De Insecticidas**

Insecticida	$\beta_c^{death}$ (%) después de 30 min	$\varphi_c^{Ifactor}$ (kg /m <sup>2</sup> )x10 <sup>3</sup>	Costo (\$EUA)/ (kg i. a. de producto)	OMS, Clase Hazard
Malathion	73	2	122	III
Propoxur	100	1	327	II
Clorpirifos	65	0.0011	278	II

Se considera que las condiciones óptimas para la reproducción dependen de la época del año. Así, de acuerdo con el clima en la localidad de Morelia, se considera que los mosquitos hembra pueden tener hasta cuatro oviposiciones en verano y otoño, primavera dos oviposiciones e invierno uno oviposiciones. La probabilidad de supervivencia desde el huevo hasta la etapa adulta se evaluó en función de la temperatura de la siguiente manera (Fabricio Nápoles-Rivera, col, 2019):

$$\alpha_{i,t}^{born}(T_{i,t}) = 0.004T_{i,t} - 6x10^{-15}$$

donde  $T_{i,t}$  es la temperatura máxima mensual en cada CAGEB en un mes dado.  $\alpha_{i,t}^{born}$  se calcula en función de la distancia lineal entre las CAGEB's, la distancia máxima de vuelo de un mosquito durante su vida útil, la temperatura promedio durante el mes y la temperatura óptima para el vuelo del mosquito. En este caso, la distancia entre CAGEB's se muestra en la **TABLA 2**. La distancia de vuelo de un mosquito depende de la especie y las condiciones climáticas. (Verdonschot, P. F. M y col., 2014):

Para *A. aegypti*, se asume como una distancia máxima de 45 km. Por tanto, el factor de probabilidad en función de la distancia se evalúa como  $1 - distancia_{i,i'}/45$ ; por lo tanto, a medida que aumenta la distancia entre la ubicación *i* y *i'*, la probabilidad

se reduce. De la misma manera, la temperatura afecta la capacidad del mosquito para volar; cuando llega a los 45 ° C, las condiciones son óptimas para el mosquito, y esta probabilidad se evalúa como  $T_i/45$  (°C); Estos dos factores se multiplican y normalizan luego para alcanzar la probabilidad de que un mosquito salga de un lugar a otro. La tasa de picaduras y las probabilidades de infección se tomaron de (Sardar, T. y col., 2015). Por lo tanto, el  $\alpha_{i,t}^{born} = 1 \times 0.9$ .

Se asume que la población inicial de mosquitos es similar al número de habitantes de la CAGEB; Para generar los diferentes escenarios aplicados a la estrategia de optimización, se consideró a la variable discreta de mosquitos iniciales distribuida aleatoriamente con una mediana igual al número de habitantes de la CAGEB y una desviación estándar del 20%. Los escenarios se generan con la herramienta informática de Microsoft Excel (2019). Los valores obtenidos se redondean al número entero más alto, y si es menor que cero, se fija a cero. Para el caso de los mosquitos infectados iniciales es un porcentaje del 0.01% de los escenarios generados de los mosquitos iniciales.

Para el caso específico de *A. aegypti*, la Organización Mundial de la Salud (OMS) tiene pautas específicas para las técnicas de aplicación de insecticidas y máximas dosis por metro cuadrado utilizadas según la especie de mosquito. (WHO. Pesticides and Their Application, 2006 y Verdonschot, P. F. M. y col., 2014). En la **TABLA 4** se muestran la cantidad máxima del insecticida que se puede aplicar a cada una de las CAGEB.

**TABLA 4. Cantidad máxima de insecticida por CAGEB (kg totales de i.a.)**

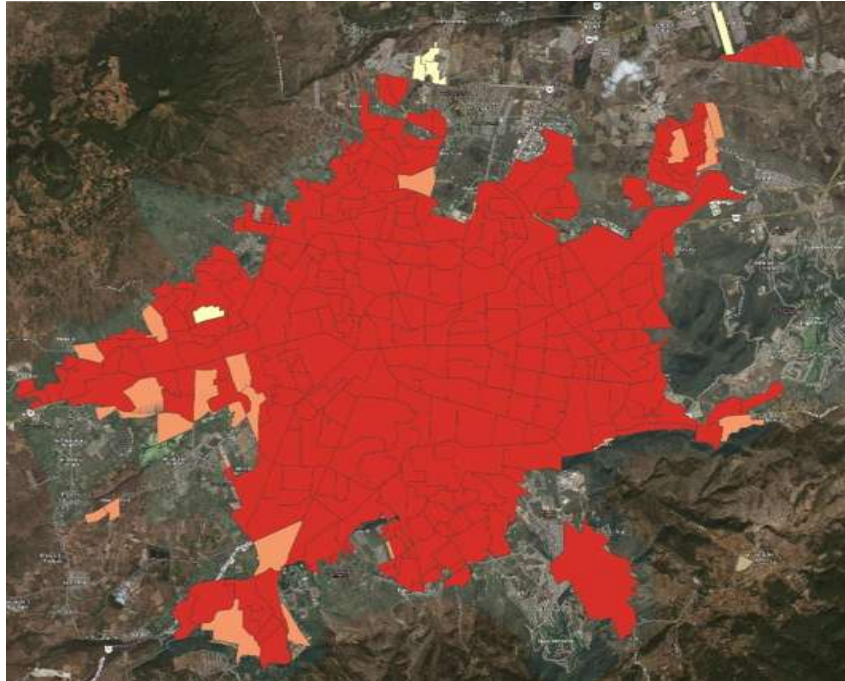
CAGEB	Insecticida			CAGEB	Insecticida		
	Malathion	Propoxur	Clorpirifos		Malathion	Propoxur	Clorpirifos
1	11119	5559	6.12	17	6059	3030	3.33
2	11567	5784	6.36	18	12137	6068	6.68
3	12879	6440	7.08	19	6217	3108	3.42
4	1652	826	0.91	20	7334	3667	4.03
5	7393	3697	4.07	21	15283	7641	8.41
6	4364	2182	2.4	22	9805	4903	5.39
7	9409	4705	5.18	23	5649	2824	3.11
8	6409	3205	3.53	24	11014	5507	6.06
9	9134	4567	5.02	25	9597	4799	5.28
10	8853	4427	4.87	26	5397	2699	2.97
11	6796	3398	3.74	27	7352	3676	4.04
12	5408	2704	2.97	28	6995	3497	3.85
13	6340	3170	3.49	29	1710	855	0.94
14	8378	4189	4.61	30	6147	3074	3.38
15	5334	2667	2.93	31	451	226	0.25
16	13178	6589	7.25				

### 3.3. Metodología

- Identificar el área geográfica donde se aplicará el modelo matemático, en nuestro caso, en la localidad de Morelia, municipio de Morelia, Michoacán.

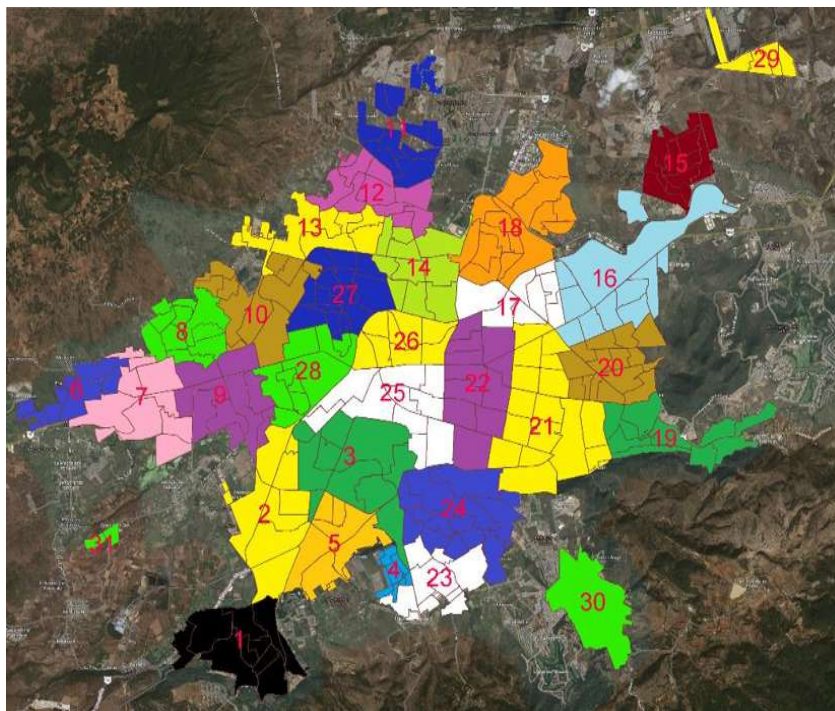


**FIGURA 2. Municipio de Morelia**



**FIGURA 3.** División de AGEB's de la localidad de Morelia

- Agrupar el área geográfica en subáreas (CAGEB's).



**FIGURA 4.** División de CAGEB's de la localidad de Morelia

- Obtener la población total y distancia entre las subáreas (CAGEB's), **TABLA 1** y **TABLA 2**, respectivamente.
- Se generará escenarios inciertos en la población de mosquitos con base en la población de las CAGEB's.
- Calcular la probabilidad de entrada y salida de los mosquitos en el CAGEB's tomando en cuenta la temperatura del lugar y distancia máxima recorrida por el mosquito.
- Se codificará el modelo matemático con los datos recabados y se analizará los resultados con su significado físico.
- Se agregará un parámetro de salud ocupacional.
- Se aplicará la resolución de un problema de programación mixta entera no lineal (MINLP), usando el ambiente de GAMS
- Se analizarán los resultados.
- Se darán conclusiones de los resultados.



## CAPÍTULO 4

---

En este capítulo se hablará de todos los resultados obtenidos en este trabajo como las gráficas de las funciones objetivo bajo incertidumbre, así de probabilidad acumulada, cantidades máximas durante el año de insecticida usado y la calendarización de su aplicación.

## 4.1. RESULTADOS

---

El problema está codificado en el software GAMS. (Brook, A. y col., 1988). El modelo resultante es un modelo de programación mixta entero no lineal (MINLP) donde se utiliza el solucionador CONOPT. Este es un algoritmo de gradiente reducido generalizado (GRG) para resolver programas no lineales a gran escala que involucran restricciones no lineales dispersas. (CONOPT, 1994). Se resolvió utilizando una computadora con un procesador Intel® Core™ i5 a 1.8 GHz con 4 GB de RAM en aproximadamente 6.5 h de tiempo de cómputo.

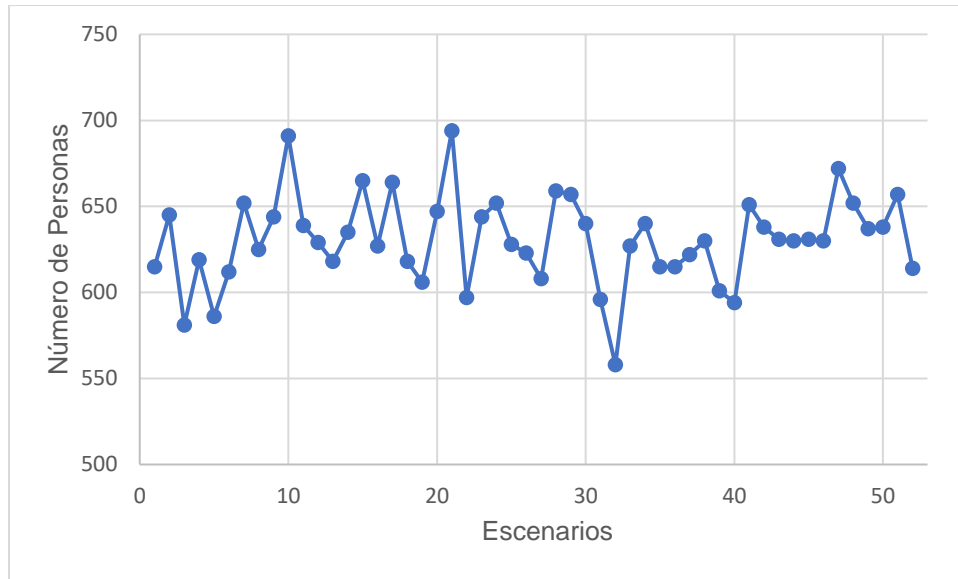
Para el caso de estudio se analizará solo un escenario de los cincuenta y dos escenarios presentados en el modelo matemático de las enfermedades transmitidas por mosquitos, este escenario es obtenido, por medio de graficas de probabilidad acumulada de los parámetros aleatorios dados al resolver el modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos. Este escenario seleccionado deberá tener al menos el 60% de probabilidades de obtener los beneficios de las variables objetivo ( $T_P^{infected}$  y  $T_C$ )\*. Partiendo de este escenario, se obtendrán las gráficas de calendarización de la fumigación, cantidad de producto aplicado a cada CAGEB y mes de cada tipo de insecticida.

Con respecto al enfoque de solución de estrategia multiescenario, los valores de los límites inferiores y límites superiores de las funciones objetivo se obtienen resolviendo el problema para cada escenario con los costos totales y total de personas infectadas máximos y mínimos (valores extremos). A continuación, la estrategia propuesta (Luis Alberto Díaz-Trujillo y col., 2020) en las ecuaciones (24) a (28) se resuelve minimizando simultáneamente el objetivo de costo total y el total de personas infectadas de la ecuación (23), lo que resulta en la minimización de la brecha promedio (GAP) entre las funciones objetivas involucradas de la ecuación (28).

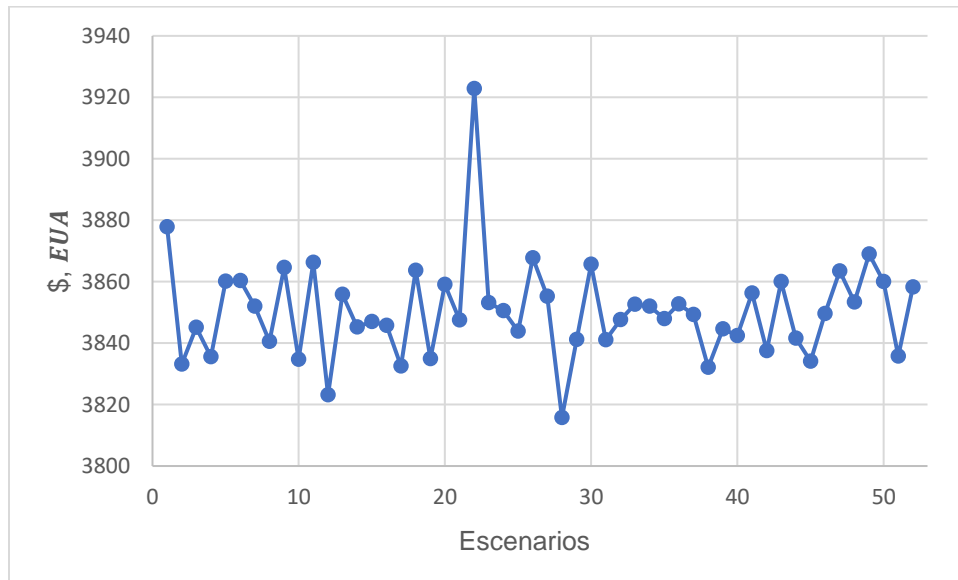
Una vez resuelto el problema se obtiene los efectos de la incertidumbre respecto a las variables objetivo del total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y el costo total  $T_{C_s}$ ,

\*No lleva el subíndice "s" debido a que es un solo escenario y no el conjunto de ellos

mostrados en la **FIGURA 5**. Se observa que para la **FIGURA 5A** la cantidad de personas infectadas se encuentra entre un rango de 550 a 700 personas, sin embargo, la mayoría de los escenarios resueltos en el modelo matemático se encuentran entre un rango de 600 a 650 personas infectadas.



**A. Total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$**



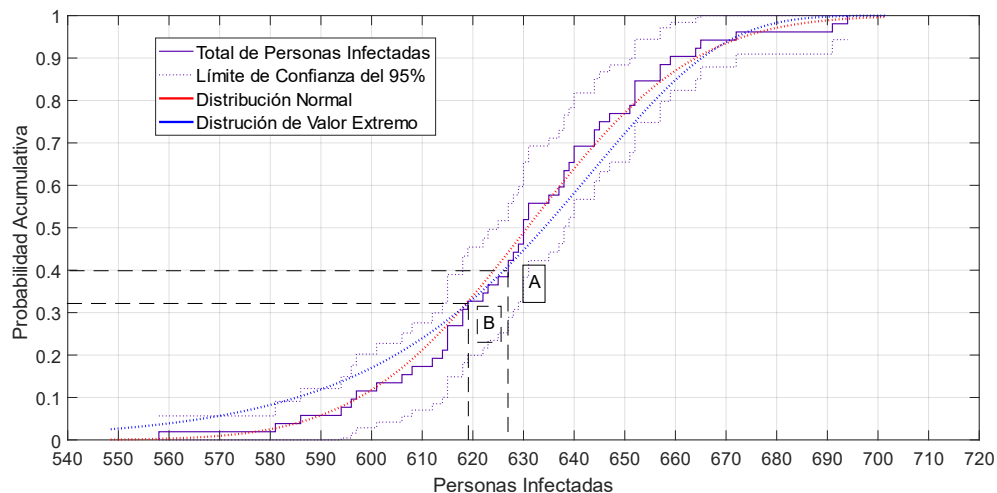
**B. Costo total  $T_{C_s}$**

**FIGURA 5. Variables objetivo bajo el efecto de incertidumbre en modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos.**

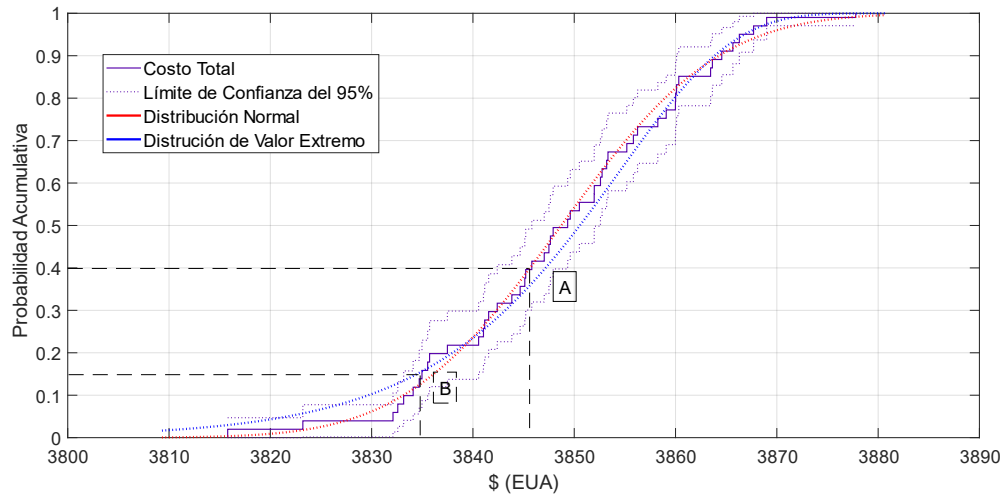
Esto debido, a que las personas infectadas aumentan con la cantidad de mosquitos infectados, estas a su vez aumentan la cantidad de mosquitos infectados debido a

ser portados de la infección. También, esta cantidad de personas infectadas se mantiene en este rango debido a la relación de la fumigación con la cantidad de mosquitos. En la **FIGURA 5B** se observa que el rango del costo total en dólares estadounidenses está entre 3810 a 3930 dólares. Se observa también, que en el escenario número 22 hay un valor atípico respecto a los demás escenarios, esto también se podría observar en el escenario número 28. Pues estos valores no se encuentran entre el rango de 3820 a 3880 dólares, en el cual, se encuentran el restante de los escenarios. Si se indaga un poco más en el rango de mayor incidencia del gasto en el uso de insecticidas nos encontramos entre 3840 a 3860 dólares. Estas variaciones son debidas a la aplicación de los diferentes insecticidas debido a que estos tienen un costo diferente y rango de mortalidad que puede afectar en la decisión de usar determinado insecticida.

En la **FIGURA 6** se muestran las curvas de probabilidad acumulativa de las variables objetivo de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  y el costo total  $T_{C_s}$ , obtenidas del modelo matemático de las enfermedades transmitidas por mosquitos. En la figura anterior se muestran también la comparación de los resultados obtenidos por el modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos con una distribución normal y una distribución de valor extremo. Además de eso, se muestran los límites de confianza de los datos obtenidos por el modelo matemático con una confianza del 95%.



A. Probabilidad acumulativa de Total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$  con una distribución normal

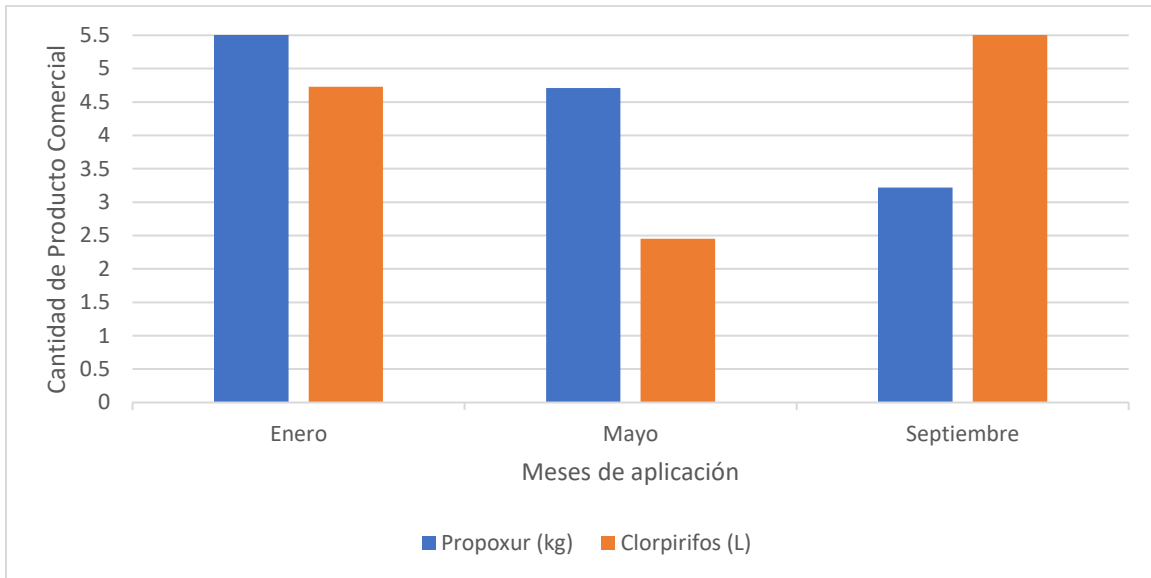


**B. Probabilidad acumulativa del Costo total  $T_{C_s}$  con una distribución normal**

**FIGURA 6.** Probabilidad acumulativa de las variables objetivo bajo el efecto de incertidumbre en modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos.

En la **FIGURA 6A** es la probabilidad acumulativa del total de personas infectadas  $T_{P_s}^{infected}$ , en esta se muestran dos puntos, el primero de ellos con la letra “A”, muestra que, para obtener un total de 627 personas infectadas, la probabilidad de obtener estas personas es de al menos el 60%. Como se menciona anteriormente se seleccionó un escenario que cumpliera con esta condición en ambas variables objetivo ( $T_{P_s}^{infected}$  y  $T_{C_s}$ ), por ello, el segundo punto en la gráfica con la letra “B”, es el escenario seleccionado para el análisis. En este, las personas infectadas son 619 con la probabilidad de al menos obtener estas personas es el 67.27%. En **FIGURA 6B** es la probabilidad acumulativa del costo total  $T_{C_s}$ , para el punto con la letra “A” y “B”, muestra que, para obtener un costo total de 3845 y 3835.5 dólares (EUA), la probabilidad de obtener estos dólares (EUA) es de al menos el 60% y 84.93%, respectivamente.

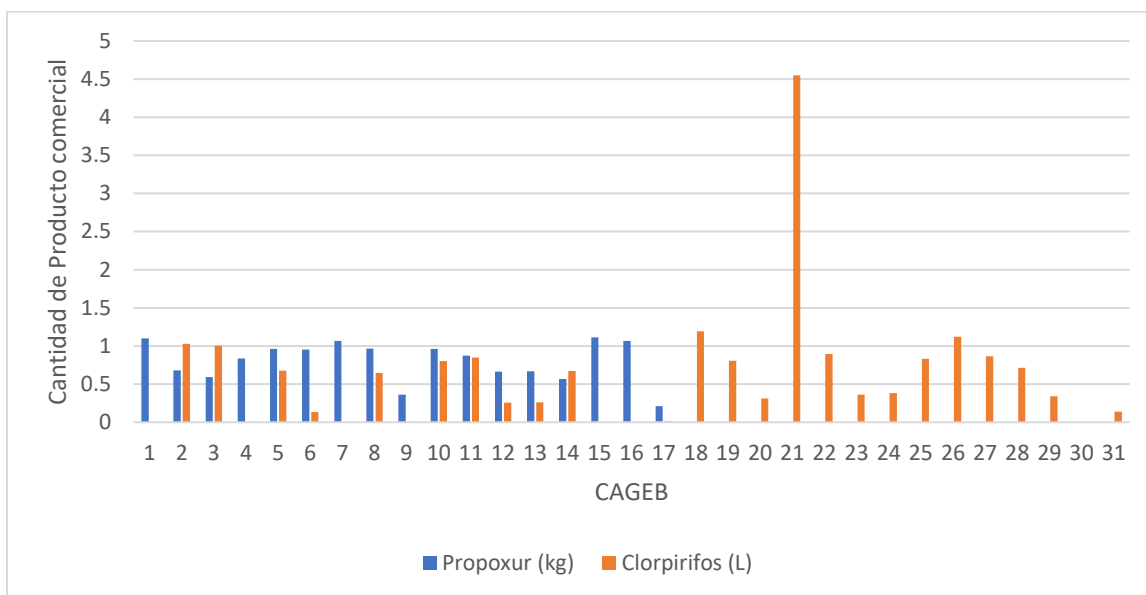
Observado los datos y probabilidades del escenario seleccionado en la **FIGURA 6**, se procederá a dar las estrategias del tipo óptimo de insecticida, la dosificación, la selección de la programación del sitio para reducir la probabilidad de infecciones al ser humano de las enfermedades transmitidas por mosquitos.



**FIGURA 7.** Cantidad de insecticida en su presentación comercial en la calendarización de su aplicación

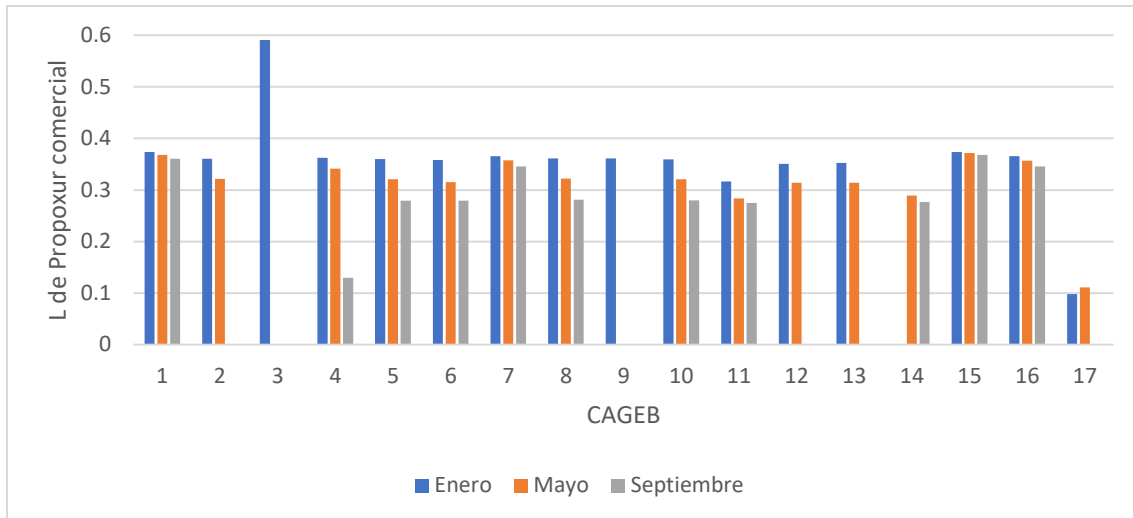
En la **FIGURA 7** se muestra la cantidad de insecticida usado en los resultados desplegados por el software GAMS. (Brook, A. y col., 1988), como se puede observar la selección del insecticida óptimo fue para los insecticidas clorpirifos y propoxur, la aplicación de estos se realizarían en los meses de enero, mayo y septiembre, con una cantidad total anual de 18.85 L y 13.4 kg de producto comercial para clorpirifos y propoxur, respectivamente. Para la cantidad de insecticida de clorpirifos para los meses de enero, mayo y septiembre es 4.73, 2.45 y 11.68 L y para el insecticida propoxur es 5.71, 4.71 y 3.22 kg, respectivamente. Como se observa los insecticidas solo se aplican tres veces al año, esto debido a la restricción del efecto residual de los insecticidas, comentado anteriormente. La **FIGURA 8** muestra la cantidad de insecticida usado durante un año en cada CAGEB, se puede observar que la aplicación del insecticida de propoxur solo se aplica en las primeras diecisiete CAGEB's, mientras que el insecticida de clorpirifos se aplica en casi todas las CAGEB, excepto en la CAGEB número treinta. Las cantidades de los insecticidas tienden a un límite de un kilogramo y litro para propoxur y clorpirifos, respectivamente. sin embargo, en la CAGEB número 21 presenta una alta cantidad de insecticida, esto debido a la cantidad de personas que hay en esta CAGEB, pues

la cantidad de mosquitos totales depende de esta, y la cantidad de mosquitos infectados depende a su vez de los mosquitos totales.



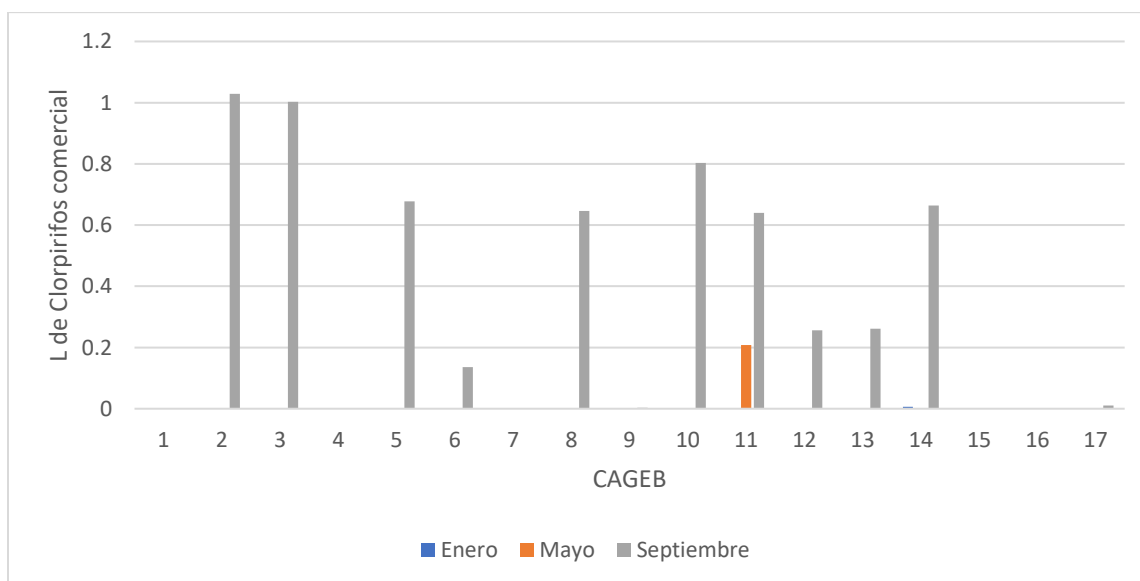
**FIGURA 8. Cantidad de insecticida en su presentación comercial en la aplicación de las CAGEB's**

La **FIGURA 9** muestra la cantidad del insecticida propoxur aplicado en cada una de las CAGEB's con su mes respectivo. Estas cantidades de insecticida de propoxur tienden a un límite de 0.4 kg de producto comercial, excepto en el mes de enero de la CAGEB número 3 que tiende a un valor de 0.6 kg de producto comercial. Esto debido a que solo se aplica una sola vez el insecticida de propoxur durante todo el año en esa CAGEB.



**FIGURA 9.** Cantidad de insecticida propoxur comercial aplicado a cada CAGEB

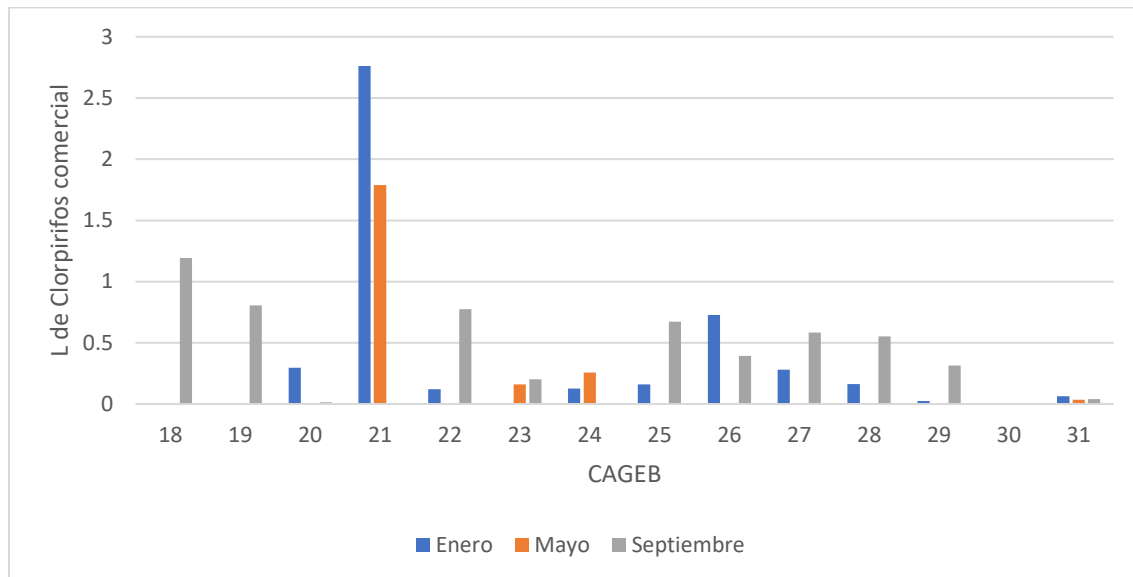
También, resaltar que la CAGEB con menor cantidad de insecticida propoxur es el número diecisiete. Mientras que, en la **FIGURA 10** se observa la cantidad de insecticida clorpirifos comercial aplicado a las CAGEB's uno hasta la diecisiete, la mayoría de las aplicaciones se realizan en el mes de septiembre, y hay una ausencia de aplicación en las CAGEB's número 1, 4, 7, 9, 15, 16 y 17, esto debido a que el insecticida propoxur interviene mayoritariamente en estas CAGEB's.



**FIGURA 10.** Cantidad de insecticida clorpirifos comercial aplicado a cada CAGEB



La **FIGURA 11** muestra la aplicación de insecticida clorpirifos de las últimas CAGEB's, en estas, hay una mayor cantidad de insecticida que en las CAGEB's de la **FIGURA 10**, esto debido, a que el propoxur no se aplica en las últimas CAGEB's. también se observa que la cantidad de cloririfos es muy pequeña en comparación a sus contrapartes de propoxur y malathion. Por ello, las pequeñas dosis en algunos meses de las CAGEB's.



**FIGURA 11.** Cantidad de insecticida clorpirifos comercial aplicado a cada CAGEB

Donde no se aplicó ningún insecticida es la CAGEB número treinta, esto debido y posiblemente a la pequeña cantidad de personas que la habitan. El mes con mayor aplicación de insecticida fue septiembre y el que tuvo menor, fue el mes de mayo.

## CONCLUSIONES

---

En este trabajo se presentó un modelo matemático estocástico con base en la mitigación de la población de mosquitos con una estrategia planificada de fumigación. El modelo propuesto se presentó como objetivo considerar la incertidumbre en la población de mosquitos existentes con base en una distribución normal, siendo esta un parámetro muy importante en el modelo matemático de enfermedades transmitidas por mosquitos, dando una mejor captura en el comportamiento de la migración de los mosquitos, las interacciones entre humano y mosquitos, las condiciones climáticas que afectan la población de mosquitos y la transmisión de enfermedades. Respecto a la cantidad de mosquitos que vive, migran o mueren por causas naturales o químicas no se puede predecir con exactitud, pero estudios recientes han dado una aproximación de la cantidad de mosquitos que viven en cierta zona urbana por medio de trampas de mosquitos (Li, Y. y col., 2020). Cabe señalar que la cantidad de mosquitos que viven en cierta área urbana es afectada por la altura sobre el nivel de mar. Disminuyendo el número de mosquitos a mayor altura sobre el nivel de mar. La consideración en la generación de los escenarios en la población de mosquitos con base en la población personas que viven en las CAGEB's en el sitio de estudio es una aproximación regular tendiente a buena, debido a que la densidad de los mosquitos generada en el área urbana de estudio es mayor que la cantidad reportada en el estudio (Li, Y. y col., 2020) en cierta área de china (teniendo condiciones climáticas y altura similares al área de estudio de este trabajo), pues solo se captura una fracción de los mosquitos totales, esto da a los escenarios generados una buena especificación en cuanto a la cantidad de mosquitos que viven en las CAGEB's. Si el modelo es replicado en otras zonas urbanas es necesario atender los parámetros ya mencionados para un mejor ajuste. Los resultados desplegados por el modelo matemático de personas infectadas no superan las 650 personas en la localidad de morelia (**FIGURA 2**), comparando con los datos dados por la semana epidemiológica, en el municipio de morelia tiene una tasa menor al 1% de incidencia de casos de dengue (y variantes

de este) por cada 100000 habitantes, siendo esta enfermedad la más común en este municipio transmitidas por mosquitos, es decir, que en el momento de obtención del dato de población de la localidad de Morelia eran 656,848 personas, por lo tanto, se estima que habría al menos 657 personas infectadas (Secretaría de Salud Mexicana, 2021). En cuanto a la selección del escenario estudiado entre el resto de los escenarios totales, da una alta probabilidad de que sucediera, debido a que, la cantidad de personas infectadas se encuentra entre un rango de 550 a 700 personas infectadas, sin embargo, la mayoría de los escenarios resueltos en el modelo matemático se encuentran entre un rango de 600 a 650 personas infectadas, mientras, que el escenario seleccionado arroja 619 personas infectadas, esto da que los datos presentados tengan una alta probabilidad de suceder. Finalmente, para el caso de la salud ocupacional es difícil sobre pasar los límites recomendados, aunque la posibilidad está latente en un error humano, no se ha tenido datos si las bajas dosis a largo plazo puedan ser perjudiciales para el ser humano.

## BIBLIOGRAFÍA

---

**Arne Stolbjerg Drud, 1994.** CONOPT. A Large-Scale GRG Code.

**Ascough, J. C.; Fathelrahman, E. M.; McMaster, G. S. 2008.** Insect Pest Models and Insecticide Application. In *Encyclopedia of Ecology*; Jørgensen, S. E., Fath, B. D., Eds.; Academic Press: Oxford, U.K., 2008; pp 1978–1985, DOI: 10.1016/B978-008045405-4.00208-1.

**Benelli, G.; Caselli, A.; Canale, A. 2017.** Nanoparticles for Mosquito Control: Challenges and Constraints. *J. King Saud Univ., Sci.* 2017, 29 (4), 424–435.

**Bhatt, S.; Gething, P. W.; Brady, O. J.; Messina, J. P.; Farlow, A. W.; Moyes, C. L.; Drake J. M.; Brownstein, J. S.; Hoen, A. G.; Sankoh, O.; 2013.** The Global Distribution and Burden of Dengue. *Nature* 2013, 496 (7446), 504–507.

**Brook, A., Kendrick, D., Meeraus, A., 1988.** GAMS, a user's guide. *SIGNUM News* 23, 10–11. doi: 10.1145/58859.58863.

**Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2015).** Optimization model for the detailed scheduling of multi-source pipelines. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 395–409. doi:10.1016/j.cie.2015.07.022.

**Cailly, P.; Tran, A.; Balenghien, T.; L'Ambert, G.; Toty, C.; Ezanno, P. 2012.** A Climate-Driven Abundance Model to Assess Mosquito Control Strategies. *Ecol. Modell.* 2012, 227, 7–17.

**Cao, Y., Fuentes-Cortes, L.F., Chen, S., Zavala, V.M., 2017.** Scalable modeling and solution of stochastic multiobjective optimization problems. *Comput. Chem. Eng.* 99, 185–197. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.01.021.

**Casida, J. E.; Durkin, K. A. 2013.** Neuroactive Insecticides: Targets, Selectivity, Resistance, and Secondary Effects. *Annu. Rev. Entomol.* 2013, 58 (1), 99–117.

**Chepkorir E, Lutomiah J, Mutisya J, Mulwa F, Limbaso K, Orindi B, et al. 2014.** Vector competence of *Aedes aegypti* populations from Kilifi and Nairobi for dengue 2 virus and the influence of temperature. *Parasit Vectors.* 2014;7(1):435.

**Dowling, A.W., Ruiz-Mercado, G., Zavala, V.M., 2016.** A framework for multi-stakeholder decision-making and conflict resolution. *Comput. Chem. Eng.* 90, 136–150. doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.03.034.

**Fabricio Napoles-Rivera, Xate Geraldine Sanchez-Zarco, Lizeth Valencia-Barragan, and Jose María Ponce Ortega. 2019.** MINLP Approach for Mosquito Borne Disease Control through Optimal Fumigation Policies, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019.

**Fruh, L.; Kampen, H.; Kerkow, A.; Schaub, G. A.; Walther, D.; Wieland, R. 2018.** Modelling the Potential Distribution of an Invasive Mosquito Species: Comparative Evaluation of Four Machine Learning Methods and Their Combinations. *Ecol. Modell.* 2018, 388, 136–144.

**Fuentes-Cortés, L.F., Ponce-Ortega, J.M., Zavala, V.M., 2018.** Balancing stakeholder priorities in the operation of combined heat and power systems. *Appl. Therm. Eng.* 128, 480–488. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.052.

**INEGI. 2017.** Statistical and Geographical Yearbook of Michoacan de Ocampo 2017.

**Li, Y.; Liu, X. 2017.** An Impulsive Model for Wolbachia Infection Control of Mosquito-Borne Diseases with General Birth and Death Rate Functions. *Nonlinear Anal.: Real World Appl.* 2017, 37, 412–432.

**Yiji Li, Guofa Zhou, Saifeng Zhong, Xiaoming Wang, Daibin Zhong, Elizabeth Hemming-Schroeder, Guohui Yi, Fengyang Fu, Faxing Fu, Liwang Cui, Guzhen Cui & Guiyun Yan. 2020.** Spatial heterogeneity and temporal dynamics of mosquito population density and community structure in Hainan Island, China. *Parasites & Vectors*, 13(1). doi:10.1186/s13071-020-04326-5

**Luis Alberto Díaz-Trujillo, Luis Fabián Fuentes-Cortés, Fabricio Nápoles-Rivera. 2020.** Economic and environmental optimization for a biogas supply Chain: A CVaR approach applied to uncertainty of biomass and biogas demand. *Computers and Chemical Engineering* 141 (2020) 107018. doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.107018.

**Lutambi, A. M.; Penny, M. A.; Smith, T.; Chitnis, N. 2013.** Mathematical Modelling of Mosquito Dispersal in a Heterogeneous Environment. *Math. Biosci.* 2013, 241 (2), 198–216.

**Kakarla, S. G.; Mopuri, R.; Mutheneni, S. R.; Bhimala, K. R.; Kumaraswamy, S.; Kadiri, M. R.; Gouda, K. C.; Upadhyayula, S. M. 2019.** Temperature Dependent Transmission Potential Model for Chikungunya in India. *Sci. Total Environ.* 2019, 647, 66–74.

**Kirschstein, T. (2018).** Planning of multi-product pipelines by economic lot scheduling models. *European Journal of Operational Research*, 264(1), 327–339. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.014

**Mahmood, I.; Imadi, S. R.; Shazadi, K.; Gul, A.; Hakeem, K. R. 2016.** Effects of Pesticides on Environment. In *Plant, Soil and Microbes: Implications in Crop Science*, Vol. 1; Hakeem, K. R., Akhtar, M. S., Abdullah, S. N. A., Eds.; Springer International: Cham, Switzerland, 2016; pp 253–269, DOI: 10.1007/978-3-319-27455-3\_13.

**Mann Manyombe, M. L.; Tsanou, B.; Mbang, J.; Bowong, S. 2017.** A Metapopulation Model for the Population Dynamics of Anopheles Mosquito. *Appl. Math. Comput.* 2017, 307, 71–91.

**Márquez Benítez Y, Monroy Cortés, KJ, Martínez Montenegro EG, Peña García VH, Monroy Díaz AL. 2019.** Influencia de la temperatura ambiental en el mosquito *Aedes* spp y la transmisión del virus del dengue. *Rev CES Med* 2019; 33(1): 42-50.

**Masud, M. A.; Kim, B. N.; Kim, Y. 2017.** Optimal Control Problems of Mosquito-Borne Disease Subject to Changes in Feeding Behavior of *Aedes* Mosquitoes. *BioSystems* 2017, 156–157, 23–39.

**Messina, J. P.; Brady, O. J.; Pigott, D. M.; Golding, N.; Kraemer, M. U. G.; Scott, T. W.; Wint, G. R. W.; Smith, D. L.; Hay, S. I. 2015.** The Many Projected Futures of Dengue. *Nat. Rev. Microbiol.* 2015, 13, 230.

**Morand, S.; Lajaunie, C. 2018.** Biodiversity Response. *Biodiversity and Health: Linking Life, Ecosystems, Societies*; Elsevier, 2018; Chapter 6, pp 83–102, DOI: 10.1016/B978-1-78548-115-4.50006-8.

**M. C. Peel, B. L. Finlayson y T. A. 2007.** McMahon, Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, 2007.

**Napoles-Rivera, F.; Serna-Gonzalez, M.; Bin-Mahfouz, A.; Jimenez-Gutierrez, A.; El-Halwagi, M. M.; Ponce-Ortega, J. M. 2013.** Simultaneous Optimization of Energy Management, Biocide Dosing and Maintenance Scheduling of Thermally Integrated Facilities. *Energy Convers. Manage.* 2013, 68, 177–192.

**OMS, 2020.** Chinkungunya, Notas descriptivas, Centro de prensa, Acceso, Organización mundial de la salud (OMS), 2020.

**OMS, 2020.** Dengue y dengue grave, Notas descriptivas, Centro de prensa, Acceso, Organización mundial de la salud (OMS), 24 de junio de 2020. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>

**OMS, 2018.** Enfermedad por el virus de zika, Notas descriptivas, Centro de prensa, Acceso, Organización mundial de la salud (OMS), 2018.

**OMS, 2020.** Enfermedades transmitidas por vectores, Notas descriptivas, Centro de prensa, Acceso, Organización mundial de la salud (OMS), 2 de marzo de 2020. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases>

**OMS, 2019.** Fiebre amarilla, Notas descriptivas, Centro de prensa, Acceso, Organización mundial de la salud (OMS), 2019

**OMS, 2017.** Infección por el virus del Nilo occidental, Notas descriptivas, Centro de prensa, Acceso, Organización mundial de la salud (OMS), 2017.

**OMS, 2021.** Leishmaniasis, Notas descriptivas, Centro de prensa, Acceso, Organización mundial de la salud (OMS), 2021.

**Peña-García VH, Triana-Chávez O, Mejía-Jaramillo AM, Díaz FJ, Gómez-Palacio A, Arboleda-Sánchez S. 2016.** Infection Rates by dengue virus in mosquitoes and the influence of temperature may be related to different endemicity patterns in three Colombian cities. *Int J Environ Res Public Health.* 2016;13(5):734.

**Quansah, R.; Bend, J. R.; Abdul-Rahaman, A.; Armah, F. A.; Luginaah, I.; Essumang, D. K.; Iddi, S.; Chevrier, J.; Cobbina, S. J.; Nketiah-Amponsah, E.; et al. 2016.** Associations between Pesticide Use and Respiratory Symptoms: A Cross-Sectional Study in Southern Ghana. *Environ. Res.* 2016, 150, 245–254.

**Sardar, T.; Rana, S.; Bhattacharya, S.; Al-Khaled, K.; Chattopadhyay, J. A. 2015.** Generic Model for a Single Strain Mosquito- Transmitted Disease with Memory on the Host and the Vector. *Math. Biosci.* 2015, 263, 18–36.

**Secretaria de Salud Mexicana. 2018.** Resultados Finales Estudio de Adulticidas 2018. Programa de Enfermedades Transmitidas por Vectores. 2018.

**Secretaria de Salud Mexicana. 2021.** Panorama epidemiológico de dengue, semana epidemiológica 48 del 2021.

**Servadio, J. L.; Rosenthal, S. R.; Carlson, L.; Bauer, C. 2018.** Climate Patterns and Mosquito-Borne Disease Outbreaks in South and Southeast Asia. *J. Infect. Public Health* 2018, 11 (4), 566–571.

**Simoy, M. I.; Simoy, M. V.; Canziani, G. A. 2015.** The Effect of Temperature on the Population Dynamics of *Aedes Aegypti*. *Ecol. Modell.* 2015, 314, 100–110.

**Valdez, L. D.; Sibona, G. J.; Diaz, L. A.; Contigiani, M. S.; Condat, C. A. 2017.** Effects of Rainfall on *Culex* Mosquito Population Dynamics. *J. Theor. Biol.* 2017, 421,28–38.

**Verdonschot, P. F. M.; Besse-Lototskaya, A. A. 2014.** Flight Distance of Mosquitoes (Culicidae): A Metadata Analysis to Support the Management of Barrier Zones around Rewetted and Newly Constructed Wetlands. *Limnologica* 2014, 45, 69–79.

**WHO. 2006.** Pesticides and Their Application: For the Control of Vectors and Pests of Public Health Importance, 6th ed.; World Health Organization (WHO): Geneva, Switzerland, 2006.

**Zavala, V.M., Flores-Tlacuahuac, A., 2012.** Stability of multiobjective predictive control: a utopia-tracking approach. *Automatica* 48, 2627–2632. doi: 10.1016/j.automatica.2012.06.066.