

Proyecto Final Control de Mosquitos

Dafne Valeria Castellanos Rosas
Diryon Yonith Mora Romero
Fabio Andres Rizo Montoya
Laura Valentina Gonzalez Rodriguez

Prof. Miguel Ángel Pachón Higuera

Ecuaciones Diferenciales
Matemáticas Aplicadas y Ciencias de la Computación
Universidad del Rosario
Mayo 2023

1. Introducción

Los mosquitos son conocidos por ser portadores de enfermedades peligrosas para los seres humanos, como el dengue, la fiebre amarilla y el Zika. Por lo tanto, es importante controlar sus poblaciones para prevenir la propagación de estas enfermedades. El objetivo de este proyecto es controlar la población de mosquitos transmisores de malaria en una determinada área a corto y largo plazo, además de evaluar las distintas soluciones posibles que reduzcan el riesgo de transmisión de enfermedades y el impacto ambiental.

Este proyecto evaluara una combinación de métodos de control de mosquitos, incluyendo el uso de insecticidas, eliminación de criaderos y monitoreo de la población. Se espera que estos métodos sean efectivos en la reducción de las poblaciones de mosquitos y, por lo tanto, en la prevención de la propagación de enfermedades transmitidas por ellos.

La selección del problema de los mosquitos y su control poblacional se debe a la importancia crucial que tiene la prevención de la malaria en Colombia. La malaria es una enfermedad endémica en el país y representa una importante amenaza para la salud pública. Por lo tanto, consideramos que es esencial buscar soluciones efectivas para combatir la propagación de los mosquitos y reducir la transmisión de la malaria. Con este proyecto, esperamos contribuir a la prevención de la malaria y mejorar la calidad de vida de las comunidades afectadas por esta enfermedad en Colombia.

La malaria es una enfermedad causada por un parásito que se transmite a través de la picadura de un mosquito infectado. La enfermedad es especialmente grave en áreas con sistemas de salud deficientes y en poblaciones vulnerables como niños y mujeres embarazadas. Según reporte del Instituto Nacional de Salud (INS), los casos de malaria en el país este año con corte al 1 de abril ascendían a 15.828, lo que representa un aumento respecto a los casos reportados al mismo periodo de 2022 (15.462), lo que representa un grave problema de salud pública. [1]

Sin embargo, en 2021, la Organización Mundial de la Salud (OMS) aprobó una vacuna contra la malaria, lo que representa un gran avance en la lucha contra esta enfermedad. Esta vacuna, conocida como RTS,S/AS01, se ha demostrado que reduce significativamente el riesgo de malaria en niños pequeños y se espera que tenga un gran impacto en la prevención de la enfermedad en áreas endémicas como Colombia. [2]

A pesar de la aprobación de esta vacuna, el control de la población de mosquitos sigue siendo una parte importante de la estrategia general de prevención de la malaria. La combinación de medidas de control de mosquitos y la vacunación puede ser una herramienta poderosa para reducir la carga de la malaria en Colombia y en todo el mundo. Por lo tanto, es importante continuar con la investigación y el desarrollo de nuevas estrategias y herramientas para combatir la propagación de los mosquitos y reducir el impacto de la malaria en las comunidades vulnerables.

Por último, para solucionar la problemática, el proyecto se basará en un problema de valor inicial de una ecuación diferencial para modelar la tasa de cambio de la población de mosquitos, (medida en millones de mosquitos) en el área. Y utilizará el método de Runge-Kutta para evaluar tres escenarios de población de mosquitos y determinar cuál es el más efectivo para el control de la población de mosquitos a largo plazo y corto plazo.

2. Problema a analizar

El control de la población de mosquitos es un tema crucial para la salud pública en muchos lugares del mundo. Actualmente, se dispone de dos enfoques principales para abordar este problema, cada uno con diferentes impactos ambientales y económicos. El primer enfoque consiste en el rociado de insecticidas para matar directamente a los mosquitos. Sin embargo, su efectividad depende de la concentración del insecticida y de la frecuencia del rociado. Además, este método es una solución temporal al problema, pues sus efectos desaparecen al interrumpir el rociado, y su uso prolongado genera un impacto en la salud de las comunidades cercanas y en el medio ambiente de la zona.

El segundo método es la eliminación de los recursos que sostienen a los enjambres de los mosquitos. Esta estrategia implica la destrucción de criaderos y drenajes de agua estancada para disminuir la capacidad de reproducción de los insectos y, por lo tanto, reducir sus números en futuras generaciones. Si bien este método tiene un efecto visible en el futuro, es más costoso en términos de tiempo, recursos y mano de obra que el primer método.

Para determinar la efectividad de estos enfoques, se idearon tres escenarios de control de la población de mosquitos que cambian la prioridad de asignación de recursos a los diferentes enfoques. El escenario A asigna prioridad de recursos al uso de insecticidas, dando un rociado de sustancias concentradas con una alta frecuencia. El escenario B le da prioridad a la destrucción de recursos y criaderos del enjambre asignando la mayor cantidad de financiación y mano de obra a esta iniciativa. El escenario C contempla un presupuesto balanceado entre los dos métodos, dividiendo los recursos y mano de obra disponible entre el rociado de insecticidas y la eliminación de los criaderos de mosquitos.

Considerando diversos estudios sobre el control de mosquitos, se sabe que la tasa de cambio de la población de mosquitos (P) puede modelarse con precisión en función de varios factores, tales como la efectividad de los esfuerzos de rociado de insecticidas (E), la capacidad

de carga local que se ve afectada por los esfuerzos para reducir los criaderos de mosquitos (M) y la constante de crecimiento de la población (k). Supongamos que la población inicial de mosquitos es P_0 , y que el tiempo t se mide en meses. Entonces, la ecuación diferencial que describe la dinámica de la población de mosquitos es la siguiente:

$$\frac{dP}{dt} = kP\left(1 - \frac{P}{M}\right) - EP, P(0) = P_0$$

Para evaluar la efectividad de cada escenario, se analizan los valores de M y E en la tabla adjunta:

	M_a	E_a	M_b	E_b	M_c	E_c
Escenario 1	10.5	0.55	6.0	0.10	9.0	0.40
Escenario 2	10.0	0.60	5.5	0.10	8.5	0.45
Escenario 3	10.5	0.50	6.5	0.10	9.0	0.40

Tabla 1: Valores de M y E

Además, se debe tener en cuenta que el uso excesivo de insecticidas puede tener consecuencias negativas en la salud de las personas y en el medio ambiente, ya que estos productos químicos pueden contaminar el agua y el suelo, afectando la biodiversidad local y la calidad de vida de las comunidades. Por otro lado, la eliminación de criaderos puede ser una tarea difícil y costosa, y en algunos casos puede ser necesario intervenir en propiedades privadas, lo que puede generar conflictos y tensiones con los propietarios.

3. Objetivos

El objetivo general de este proyecto es realizar una evaluación de escenarios de solución para el control de la población de mosquitos mediante el algoritmo Runge-Kutta, considerando su efectividad, impacto económico, medioambiental y a la salud, con el fin de determinar el escenario más viable a corto y largo plazo.

Para lograr este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos. En primer lugar, se realizará un análisis de los escenarios de solución en un corto plazo (6 meses) y en un largo plazo (12 meses) mediante el algoritmo Runge-Kutta. Este es un método numérico utilizado en la resolución de ecuaciones diferenciales que permitirá simular los diferentes escenarios de control de la población de mosquitos en diferentes intervalos de tiempo.

En segundo lugar, se indagará acerca de las falencias de los métodos de control de la población de mosquitos, enfocándose en su impacto económico, medioambiental y a la salud. Este análisis permitirá identificar las principales limitaciones y desafíos que enfrentan las estrategias de control de mosquitos existentes y proponer soluciones más efectivas y sostenibles.

En tercer lugar, se realizará un análisis de cada escenario de solución considerando su efectividad y los efectos colaterales en las áreas mencionadas anteriormente. Este análisis permitirá determinar los pros y contras de cada escenario, así como evaluar su impacto en el medio ambiente, la economía y la salud pública.

Finalmente, se determinará cuál de los escenarios evaluados es el más viable para el control de la población de mosquitos, tomando en cuenta los resultados obtenidos en los análisis previos. Se espera que este estudio contribuya al desarrollo de estrategias más efectivas y sostenibles para el control de la población de mosquitos, lo que a su vez permitirá proteger la salud pública y mejorar la calidad de vida de las personas en las zonas afectadas por la presencia de estos insectos.

4. Implementación

Dado que la ecuación diferencial no es lineal (por el término $kP(1 - \frac{P}{M})$) y como no se dispone de una solución analítica exacta (debido a la complejidad de la ecuación), se requiere de métodos numéricos para aproximar su solución. Estas son técnicas matemáticas que se utilizan para aproximar soluciones a problemas matemáticos complejos o que no tienen una solución analítica exacta. Estos métodos implican el uso de algoritmos computacionales que permiten realizar cálculos numéricos en lugar de manipulaciones algebraicas.

Dentro de estos métodos, el método de Euler es uno de los más sencillos y conocidos. Este consiste en utilizar la información actual de la solución para estimar su valor en el siguiente paso de tiempo, basándose en la tasa de cambio de la función en el punto actual y la longitud del intervalo de tiempo. Basicamente, es una sucesión de rectas tangentes a la curva, donde cada recta es la aproximación para un punto posterior. Sin embargo, como la ecuación diferencial presenta términos no lineales, su aproximación por este método será inexacta y podría no capturar completamente la dinámica de la ecuación.

Por este motivo, se decidió usar el método de Runge-Kutta. Este método utiliza información adicional en los puntos intermedios del intervalo de tiempo para obtener una mejor aproximación de la solución en el siguiente punto. De esta manera, se pueden manejar términos no lineales y no es necesario limitar el tamaño del intervalo de tiempo para obtener una buena aproximación. El método de Runge-Kutta de cuarto orden es uno de los más comunes y se basa en un proceso iterativo para obtener la solución.

$$Y_{k+1} = Y_k + \frac{1}{6}(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)$$

$$Y_0 = y_0$$

$$\begin{aligned}F_1 &= hf(y_n, t_n) \\F_2 &= hf(y_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{h}{2}) \\F_3 &= hf(y_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{h}{2}) \\F_4 &= hf(y_n + k_3, t_n + h)\end{aligned}$$

Donde y_n es la aproximación de la solución en el tiempo t_n , h es el tamaño del paso de tiempo, y $f(y_n, t_n)$ es la derivada de la solución en el tiempo t_n . En cada iteración, se calculan cuatro pendientes (F_1, F_2, F_3, F_4) y se utiliza una combinación ponderada de ellas para calcular la aproximación de la solución en el siguiente paso de tiempo. Este método es de cuarto orden porque la fórmula de actualización de y utiliza cuatro evaluaciones de la función f . Esto significa que el error de truncamiento local del método es del orden de $O(h^5)$ y el error global del método es del orden de $O(h^4)$, lo que significa que el error disminuye rápidamente cuando se disminuye el tamaño del paso.

Con lo cuál, se procede a crear el código de Python encargado de llevar a cabo las pruebas. En la carpeta “*src\solvers*”, se encuentra la implementación de los métodos numéricos. El archivo “*solver.py*” es la base para implementar los diferentes métodos numéricos para aproximar la solución de las ecuaciones diferenciales. El archivo “*euler_solver.py*”, se utiliza principalmente para la gestión de datos, como el tamaño del paso, los límites inferior y superior del intervalo, y las condiciones iniciales, aunque también implementa el método de Euler. Por último, el archivo “*runge_kutta.py*”, implementa el método de Runge-Kutta.

Por otra parte, en la carpeta “*src\scenarios*”, se encuentra la definición de los tres escenarios de poblaciones de mosquitos. Además, en la carpeta “*common*”, se definen algunos tipos y funciones útiles para trabajar con estas poblaciones. El archivo “*scenario.py*” proporciona

la base para definir los escenarios y modelar la población de mosquitos. Este archivo también calcula las poblaciones de mosquitos en diferentes momentos del tiempo. Por su parte, los archivos “*scenario_a.py*”, “*scenario_b.py*” y “*scenario_c.py*” incluyen la información presentada en la Tabla 1. También hay una carpeta llamada “*src\common*” que establece la variable dependiente t y la independiente y .

Además, en la carpeta “*test*”, se encuentra el archivo “*runge_kutta.py*”, encargado de comprobar el funcionamiento del programa. La prueba se lleva a cabo a través de la definición de una instancia de la clase RungeKutta, a la cual se le pasan una función, dos condiciones iniciales, un rango de valores de la variable independiente, y una cantidad de pasos a utilizar para calcular los valores de la variable dependiente. Luego se compara el valor obtenido mediante la ejecución de la función `solve()` con un valor esperado, el cual ha sido previamente calculado o determinado de alguna otra manera.

Finalmente, el archivo principal “*control_mosquitos.ipynb*”, se encarga de realizar las simulaciones de la población de mosquitos a lo largo del tiempo en diferentes escenarios. Define los tres escenarios, junto a sus diferentes condiciones iniciales, para ejecutar el método de Runge-Kutta. Se realizan las gráficas de cada escenario, evidenciando la evolución de la población de mosquitos a lo largo de los doce meses. Esto se realiza para cada una de sus condiciones iniciales y después para el promedio de las condiciones iniciales, para poder tener una clara comparativa entre escenarios. Se adjunta un archivo “*control_mosquitos.html*” que permite visualizar los resultados, sin la necesidad de ejecutar el código.

Por último, se llevó a cabo una investigación exhaustiva de las diferentes metodologías para la erradicación de mosquitos, con el fin de tomar una decisión informada sobre cuál sería el mejor escenario. En esta investigación se revisaron varios artículos científicos que ofrecían conclusiones diversas acerca de los efectos negativos de los insecticidas en la salud, su efectividad y los costos elevados asociados a la eliminación de criaderos.

5. Resultados

5.1. Resultados Matemáticos

Se realizó un estudio para analizar la evolución de la cantidad de mosquitos a lo largo del tiempo, específicamente 12 meses. Se evaluaron los tres escenarios diferentes (A, B y C) y se dividieron las muestras en conjuntos (1, 2, 3). Cada conjunto mostraba dos tipos de crecimiento de mosquitos diferentes, representados por $k \in \{1, 2\}$. A partir de estos datos, se obtuvo la siguiente información:

5.1.1. Escenario A

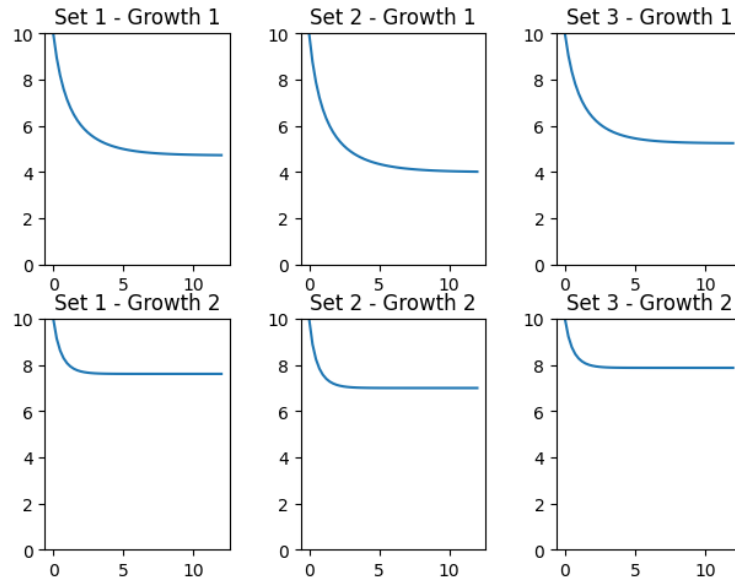


Figura 1: Población de mosquitos (millones) contra el tiempo (meses), según los diferentes valores de la capacidad de carga (M) y la efectividad de los insecticida (E).

En el primer conjunto de condiciones iniciales, set 1 ($M_1 = 10,5$ y $E_1 = 0,55$), tanto para $k=1$ como para $k=2$ la tasa de eliminación es suficiente para controlar el crecimiento

poblacional de mosquitos durante los 4 primeros meses. Después de este tiempo, la tasa de eliminación disminuye y el crecimiento poblacional aumenta, llevando al punto estable donde la población de mosquitos permanece en el mismo número. Lo mismo se aplica para el segundo conjunto de condiciones iniciales, set 2 ($M_2 = 10$ y $E_2 = 0,60$), y para el tercer conjunto de condiciones iniciales, set 3 ($M_3 = 10,5$ y $E_3 = 0,50$). En general, se puede afirmar que para $k=1$, la población de mosquitos fluctúa alrededor de 6 millones después de 2 meses, mientras que para $k=2$, la población fluctúa alrededor de 8 millones después de 3 meses.

5.1.2. Escenario B

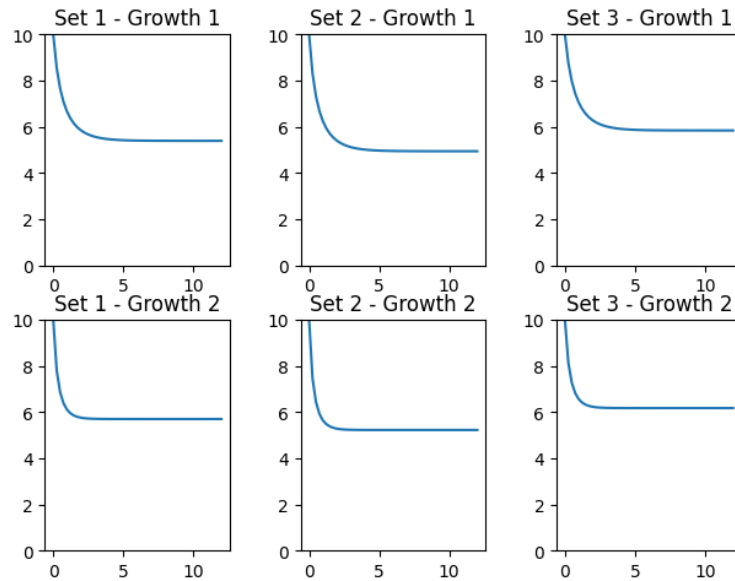


Figura 2: Población de mosquitos (millones) contra el tiempo (meses), según los diferentes valores de la capacidad de carga (M) y la efectividad de los insecticida (E).

En el primer conjunto de condiciones iniciales, identificado como set 1 con $M_1 = 6,0$ y $E_1 = 0,10$, tanto para $k=1$ como para $k=2$ la tasa de eliminación es suficiente para controlar el crecimiento poblacional de mosquitos durante los tres primeros meses. Después de este

tiempo, la tasa de eliminación disminuye y el crecimiento poblacional aumenta, llevando al punto estable donde la población de mosquitos permanece en el mismo número. Estos mismos patrones se repiten en el segundo conjunto de condiciones iniciales set 2 ($M_2 = 5,5$ y $E_2 = 0,10$) y al tercer conjunto de condiciones iniciales set 3 ($M_3 = 6,5$ y $E_3 = 0,10$). En general, para ambas constantes de crecimiento $k=1$ o $k=2$, después de 3 meses la población varía en 6 millones de mosquitos.

5.1.3. Escenario C

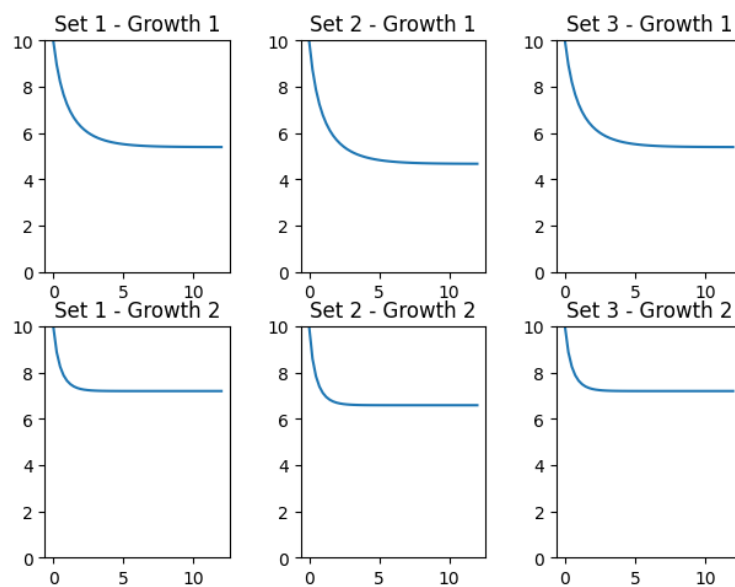


Figura 3: Población de mosquitos (millones) contra el tiempo (meses), según los diferentes valores de la capacidad de carga (M) y la efectividad de los insecticida (E).

En el primer conjunto de condiciones iniciales set 1 con $M_1 = 9,0$ y $E_1 = 0,10$, la tasa de eliminación es suficiente para controlar el crecimiento poblacional de mosquitos durante los tres primeros cuatro. Después de este tiempo, la tasa de eliminación disminuye y el crecimiento poblacional aumenta, llevando al punto estable donde la población de mosquitos

permanece en el mismo número. Lo mismo ocurre para los conjuntos de condiciones iniciales 2 ($M_2 = 8,5$ y $E_2 = 0,45$) y set 3 ($M_3 = 9$ y $E_3 = 0,4$). En general, con $k=1$ después de 3 meses, la población varía entre 6 millones. Mientras que para $k=2$, después de 3 meses, la población cambia al rededor de los 7 millones de mosquitos.

5.1.4. Promedios

Si bien las gráficas anteriores permiten observar detalladamente cada método, su gran cantidad de información dificulta la comparación entre ellos. Por esta razón, se decidió calcular el promedio de cada escenario (1, 2 y 3) para los métodos A, B y C, dado que las variaciones entre escenarios eran menores. Esta información se presenta en las Tablas 2, 3 y 4, y se utilizó para generar la Figura 4, la cual permite un análisis más claro y comparativo entre los métodos.

Mes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k=1	10	7.06	5.95	5.41	5.11	4.94	4.84	4.77	4.73	4.70	4.69	4.68	4.67
k=2	10	7.96	7.52	7.50	7.50	7.50	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49

Tabla 2: Promedio de la población de mosquitos respecto al tiempo para el escenario A.

Mes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k=1	10	6.64	5.84	5.57	5.47	5.43	5.41	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40
k=2	10	6.10	5.75	5.71	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70

Tabla 3: Promedio de la población de mosquitos respecto al tiempo para el escenario B.

Mes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k=1	10	7.06	6.07	5.63	5.41	5.30	5.23	5.20	5.18	5.17	5.16	5.16	5.16
k=2	10	7.45	7.08	7.01	7.00	7.00	6.99	6.99	6.99	6.99	6.99	6.99	6.99

Tabla 4: Promedio de la población de mosquitos respecto al tiempo para el escenario C.

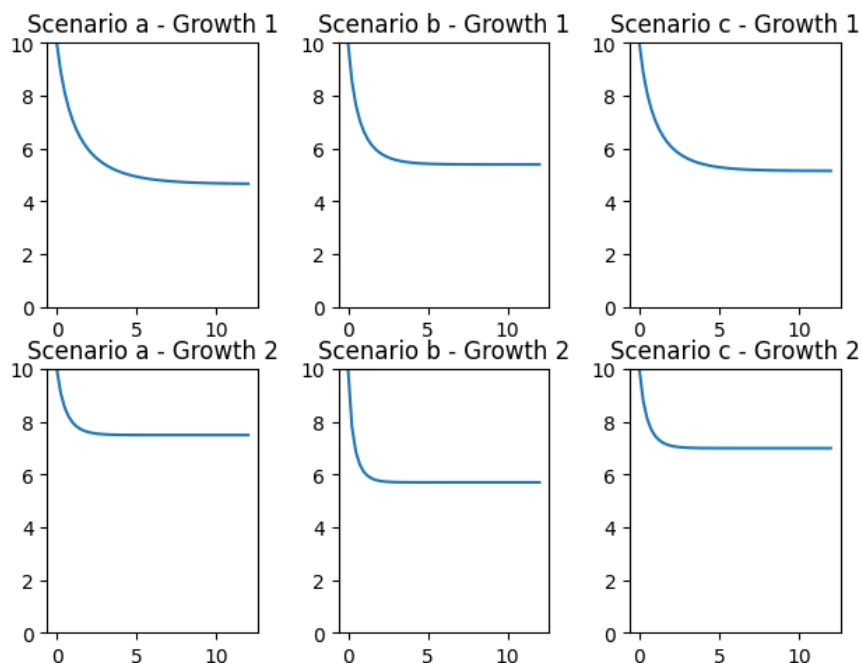


Figura 4: Población de mosquitos (millones) contra el tiempo (meses), según los promedios.

Para el escenario A, se observa que el uso exclusivo de insecticidas para controlar la población de mosquitos pierde efectividad a medida que aumenta la constante de crecimiento poblacional. Cuando la constante de crecimiento es de 1, después de 6 meses solo quedan 4.94 millones de mosquitos, lo que representa una disminución del 50.6 %. Luego de otros 6 meses, la población se ha reducido desde la última vez sólo un 5.5 %. En el caso de una constante de crecimiento de 2, en 6 meses la población se reduce en un 25 %, para acto seguido reducir tan sólo un 1 % en los 6 meses siguientes. Así, es apreciable que este método es efectivo únicamente a corto plazo y para una constante de crecimiento baja.

En el escenario B, el método de eliminación exclusiva de criaderos, vemos que su eficacia no es afectada al aumentar las constantes de crecimiento poblacional. En el caso de una constante de crecimiento de 1, después de 6 meses aún quedan 5.43 millones de mosquitos, lo que representa una reducción del 56 %. Pasados otros 6 meses, la población se ha reducido

menos de 1 %. En el caso de una constante de crecimiento de 2, después de 6 meses la población se reduce en un 43 % a 5.7 millones de mosquitos, luego se establece una tasa menor al 1 % en los meses posteriores. En general, se puede afirmar que el método de eliminación de criaderos de mosquitos es muy efectivo a corto plazo y adicionalmente la constante de crecimiento de los mosquitos no le afecta, no obstante, a largo plazo es muy inefectivo.

En el escenario C, se observa un comportamiento similar al del escenario A: la efectividad del método combinado de eliminación de criaderos e insecticidas disminuye significativamente cuando la tasa de crecimiento de la población de mosquitos es alta. En el caso de una constante de crecimiento de 1, después de 6 meses queda una población de 5.23 millones de mosquitos, lo que representa una reducción del 47.6 %. en los siguientes 6 meses, hubo una reducción de la población de un 1.4 %. En el caso de una constante de crecimiento de 2, después de 6 meses la población se reduce en un 30 % a 7 millones de mosquitos. Este método únicamente es efectivo a corto plazo y con una constante de crecimiento pequeña.

De lo anterior se desprende que el método más efectivo para controlar la población de mosquitos es la eliminación de criaderos, ya que garantiza una reducción significativa independientemente de la tasa de crecimiento. Al aplicar esta técnica, se interrumpe directamente la reproducción y desarrollo de los mosquitos. En cambio, los métodos que utilizan solo insecticidas o una combinación de ellos, generan resultados positivos únicamente con una tasa de crecimiento baja en la población de mosquitos; en dos meses se ve una reducción de la población de mosquitos en prácticamente un 50 % si la constante de crecimiento es equivalente a 1, pero en el caso de una igual a 2, esta reducción es de sólo el 30 %. Por lo tanto, si se consideran únicamente los factores de tiempo y eficacia para eliminar los mosquitos, independientemente de la tasa de reproducción de estos, la mejor opción sería la B: eliminar los criaderos de mosquitos.

5.2. Resultados de investigación

5.2.1. Efectos negativos de los insecticidas en la salud

Los insecticidas son productos químicos ampliamente utilizados en la agricultura y en la industria del control de plagas para eliminar insectos dañinos. Sin embargo, muchos de estos productos químicos tienen efectos nocivos en el medio ambiente y la salud humana. Según un estudio reciente de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a ciertos insecticidas puede aumentar el riesgo de cáncer, trastornos neurológicos y problemas reproductivos en los seres humanos. [3]

Es importante tener en cuenta que la exposición a insecticidas puede tener graves consecuencias para la salud humana. Los síntomas más comunes de la inhalación de estos productos químicos incluyen lagrimeo, tos y dificultades respiratorias, pero también pueden afectar a otros órganos y sistemas del cuerpo. De hecho, la exposición prolongada a los insecticidas puede provocar problemas cardíacos y trastornos del sistema nervioso central, que pueden tener un impacto negativo en la calidad de vida de las personas afectadas. [4]

5.2.2. Efectividad de los insecticidas

La efectividad de los insecticidas para el control de mosquitos puede verse afectada por la resistencia que estos insectos desarrollan a los pesticidas químicos habituales. [5] De acuerdo con un estudio reciente, se ha observado que los mosquitos han aumentado su resistencia a los insecticidas químicos hasta el punto de extender la población inmune a zonas completas. [6] La resistencia a los insecticidas se debe a diversos factores, como el uso excesivo y repetido de los mismos productos químicos y la falta de diversidad en las estrategias de control de plagas. [5]

Además, según una nueva investigación publicada en 2021, en al menos una zona de India, los insecticidas no están controlando los mosquitos, sino que están matando a sus

depredadores, lo que permite que las poblaciones de mosquitos se multipliquen. [7] Esto demuestra la necesidad de utilizar métodos de control de plagas más sostenibles y menos dañinos para el medio ambiente y la salud humana.

5.2.3. Costos de un programa de eliminación de criaderos de mosquitos

La eliminación de criaderos de mosquitos es una estrategia común para controlar la transmisión de enfermedades como el dengue, el zika y la fiebre chikungunya. Sin embargo, estos programas pueden tener un costo muy alto. En el 2016, tres investigadores cuantificaron los costos para un programa de control del vector *Aedes aegypti* en dos municipios de Colombia, Girón y Guadalajara de Buga. Los resultados indicaron que el costo total estimado de los programas fue de USD 146.651 en el municipio de Girón y USD 97.936 en el municipio de Guadalajara de Buga. Lo que actualmente representaría alrededor de unos 667 millones de pesos y 445 millones de pesos respectivamente, una inversión demasiado alta por parte de las entidades del estado para erradicar los mosquitos. [8]

6. Conclusiones

Tras la evaluación de los diferentes escenarios, se ha determinado que el escenario B, que se centra en la eliminación de los criaderos de mosquitos con un mínimo uso de insecticidas, es el más efectivo a largo plazo para controlar la población de mosquitos. Este enfoque se basa en la eliminación física de los lugares donde los mosquitos ponen sus huevos, como recipientes con agua estancada, y previene su crecimiento y propagación. A diferencia del escenario A, que se centra en el uso de insecticidas y presenta una reducción más rápida de la población de mosquitos a corto plazo, el escenario B es más sostenible y efectivo en el control de la población de mosquitos a largo plazo.

El escenario C, que combina la eliminación de criaderos con el uso de insecticidas químicos, resultó ser menos efectivo que el escenario B en términos de control de la población de mosquitos a corto y largo plazo, pero es más eficiente en términos de costos y tiene un menor impacto ambiental y de salud humana que el escenario A. Este enfoque equilibrado puede ser una opción viable en áreas donde la eliminación de criaderos es difícil o costosa. Sin embargo, es importante destacar, que ninguno de los escenarios propuestos puede garantizar un control completo y efectivo de las plagas de mosquitos, ya que cada método de control tiene limitaciones inherentes y no es infalible.

En conclusión, se recomienda la implementación de un enfoque en la eliminación de los criaderos de mosquitos con un uso mínimo de insecticidas químicos, si se dispone de recursos y se trabaja en proximidad a centros de población importantes. Este enfoque es el más efectivo y tiene el menor impacto sobre la salud y el medio ambiente a largo plazo. Si no se dispone de recursos para la ejecución del escenario B, se recomienda la implementación del escenario C, un control integrado de plagas que es más económico, proporciona mejores resultados en el control de la población de mosquitos que el escenario A y tiene un impacto ambiental y de salud no crítico.

Referencias

- [1] F. M. Colombiana, “Leve crecimiento de la malaria en colombia,” Apr. 2023. [Online]. Available: <https://www.federacionmedicacolombiana.com/2023/04/25/leve-crecimiento-de-la-malaria-en-colombia/>
- [2] R. B. N. Mundo, “La histórica aprobación por la oms de la primera vacuna contra la malaria (y por qué ha tardado tanto),” *BBC News Mundo*, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-58824182>
- [3] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Insecticidas,” <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/insecticides>, 2021, accedido el 9 de mayo de 2023.
- [4] Environmental Protection Agency (EPA), “Pesticides and human health,” <https://www.epa.gov/pesticides/pesticides-and-human-health>, 2020, accedido el 9 de mayo de 2023.
- [5] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Control de vectores para prevenir enfermedades transmitidas por mosquitos,” <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases>, 2021, accedido el 9 de mayo de 2023.
- [6] C. Strode, S. Donegan, and P. Garner, “Enzyme induction in insects: a defensive response or a means to enhance xenobiotic clearance?” *Annual Review of Entomology*, vol. 59, DOI 10.1146/annurev-ento-011613-162051, pp. 99–116, 2014.
- [7] E. Pennisi, “Insecticide harms—not helps—mosquito predators,” *Science*, vol. 372, DOI 10.1126/science.372.6543.147, no. 6543, pp. 147–148, 2021.
- [8] M. A. Salinas-López, V. E. Soto-Rojas, and C. B. Ocampo, “Costos de un programa de control del vector aedes aegypti en municipios de colombia: el caso de girón y guadalajara de buga, 2016,” *Cadernos de Saúde pública*, vol. 34, p. e00044518, 2018.