



RIDUNAJ
Repositorio Institucional
Digital UNAJ



Universidad Nacional
ARTURO JAURETCHE

Práctica Profesional Supervisada

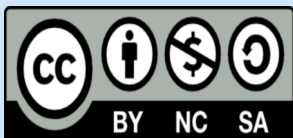
Di Loreto, Ignacio Daniel

Simulación y Estrategias de Control del Dengue

Instituto de Ingeniería y Agronomía

2025

Carrera: Ingeniería en Informática



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons.
Atribución – No comercial – Compartir igual 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Documento descargado de RID - UNAJ Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Arturo Jauretche

Cita recomendada:

Di Loreto, I. D. (2025). *Simulación y Estrategias de Control del Dengue* [Práctica Profesional Supervisada, Universidad Nacional Arturo Jauretche]. <https://rid.unaj.edu.ar/handle/123456789/3609>

Universidad Nacional Arturo Jauretche

Instituto de Ingeniería y Agronomía

Ingeniería en Informática



Proyecto integrador profesionalizante

Informe final

Simulación y Estrategias de Control del Dengue

Di Loreto Ignacio Daniel

Florencio Varela, febrero de 2025

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONALIZANTE (PIP)

Simulación y Estrategias de Control del Dengue

DATOS DEL ESTUDIANTE

Apellido y Nombres: Di Loreto, Ignacio Daniel

DNI: 42.872.551

N.º de Legajo: 55334

Correo electrónico: diloretoignacio@gmail.com

Cantidad de materias aprobadas al comienzo del PIP: 45

PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA enmarcada en el artículo 4 inciso 2 de la Resolución (CS) 123/24

DOCENTE SUPERVISOR

Apellido y Nombres: Bond, Roman Alejandro

Correo electrónico: rbond@unaj.edu.ar

DOCENTE TUTOR DEL TALLER DE APOYO A LA PRODUCCIÓN DE TEXTOS ACADÉMICOS DE LA UNAJ

Apellido y Nombres: N/A

DATOS DE LA ORGANIZACIÓN DONDE SE REALIZÓ EL PIP

Nombre o Razón Social: Universidad Nacional Arturo Jauretche

Dirección: Av. Calchaquí 6200, Florencio Varela, (1888) Buenos Aires, Argentina

Teléfono: +54 11 4275-6100

Sector: Programa Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en aplicaciones de interés social, Instituto de Ingeniería y Agronomía

TUTOR DE LA ORGANIZACIONAL

Apellido y Nombres: Encinas, Diego Omar

Correo electrónico: dencinas@unaj.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo y las mejoras implementadas en un simulador preexistente desarrollado por la Ciudad de Buenos Aires (CABA) para el control del Dengue. El proyecto, titulado "Simulación y Estrategias de Control del Dengue", se enfoca en optimizar la capacidad de simulación para la toma de decisiones estratégicas frente a brotes y la gestión integral de la enfermedad.

Se realizaron significativas mejoras al modelo original. Entre ellas, la incorporación del modelo SIR (Susceptible, Infectado, Recuperado) para una representación más precisa de la dinámica de la enfermedad, la integración de un agente climático que simula las condiciones ambientales variables que influyen en la propagación del Dengue, y la diferenciación entre mosquitos macho y hembra, reconociendo sus roles distintos en el ciclo de vida y la transmisión del virus. Adicionalmente, se habilitó la simulación con diferentes serotipos de Dengue, lo que permite evaluar estrategias de control específicas para cada variante; se amplió la duración de la simulación a un año completo, capturando la estacionalidad de la enfermedad; y se incorporó la distribución de repelente por parte del estado como una estrategia de control adicional.

La simulación se centra en el Parque Ranelagh, un espacio público con alta concurrencia, especialmente en épocas de calor, lo que lo convierte en un potencial foco de contagios si no se implementan medidas de control adecuadas. La elección de esta ubicación se debe, en parte, a su proximidad a la Universidad Nacional Arturo Jauretche, donde se desarrolla esta Práctica Profesional Supervisada.

Estas mejoras permiten simular escenarios realistas y evaluar el impacto de diversas intervenciones, como la optimización de la distribución de repelente durante picos de contagio. El objetivo final es proporcionar una herramienta robusta y adaptable para la planificación y ejecución de estrategias de control del Dengue más efectivas no solo a nivel regional, sino también nacional y/o mundial.

Este trabajo se enmarca en el Proyecto **SimHPC** (Simulación y Computación Avanzada para la eficiencia de aplicaciones sociales, Código: 80020230100048UJ), dirigido por Diego Encinas, el cual contribuye al programa "Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en aplicaciones de interés social – TICAPPS" de la UNAJ, liderado por Martín Morales. Dentro de sus líneas de investigación, el proyecto aborda el campo del modelado epidemiológico y las capacidades de respuesta ante futuros brotes. Este tema se considera de gran relevancia e interés para la comunidad científica y los responsables de políticas de salud pública.

ABSTRACT

This report details the development and improvements implemented in a pre-existing simulation of the City of Buenos Aires (CABA) for the control of Dengue. The project, entitled "Simulation and Strategies for the Control of Dengue", focuses on optimizing the simulation capacity for strategic decision-making in the face of outbreaks and the comprehensive management of the disease.

Significant improvements were made to the original model. These include the incorporation of the SIR (Susceptible, Infected, Recovered) model for a more accurate representation of the dynamics of the disease, the integration of a climatic agent that simulates the variable environmental conditions that influence the spread of Dengue, and the differentiation between male and female mosquitoes, recognizing their distinct roles in the life cycle and transmission of the virus. Additionally, the simulation with different Dengue serotypes was enabled, allowing the evaluation of specific control strategies for each variant; the duration of the simulation was extended to a full year, capturing the seasonality of the disease; and the distribution of repellent by the state was incorporated as an additional control strategy.

The simulation focuses on Ranelagh Park, a public space with high attendance, especially during hot weather, which makes it a potential focus of contagion if adequate control measures are not implemented. The choice of this location is due, in part, to its proximity to the Arturo Jauretche National University, where this Supervised Professional Practice is carried out.

These improvements allow simulating realistic scenarios and evaluating the impact of various interventions, such as optimizing the distribution of repellent during contagion peaks. The final objective is to provide a robust and adaptable tool for the planning and execution of more effective Dengue control strategies not only at a regional level, but also national and/or global level.

This work is part of the SimHPC Project (Simulation and Advanced Computing for the efficiency of social applications, Code: 80020230100048UJ), led by Diego Encinas, who contributes to the program "Information and Communication Technologies (ICT) in applications of social interest – TICAPPS" of UNAJ, led by Martín Morales. Within its lines of research, the project addresses the field of epidemiological modeling and response capacities to future outbreaks. This topic is considered of great relevance and interest to the scientific community and those responsible for public health policies.

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este proyecto y a la culminación de esta etapa en mi formación profesional.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis tutores, Román Bond y Diego Encinas, por su invaluable guía, apoyo constante y dedicación durante el desarrollo de esta Práctica Profesional Supervisada. Su experiencia y orientación fueron fundamentales para superar los desafíos y alcanzar los objetivos propuestos.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a Martín Morales, coordinador de la carrera de Ingeniería en Informática de la Universidad Nacional Arturo Jauretche, por su respaldo y compromiso con los estudiantes, así como por facilitar el desarrollo de proyectos que contribuyen al avance del conocimiento en nuestra área.

Agradezco también a los profesores de la carrera, quienes, con su dedicación y conocimiento, sentaron las bases de mi formación profesional.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mi familia y amigos, cuyo apoyo incondicional fue un pilar fundamental durante todo el proceso. Su aliento y comprensión me impulsaron a perseverar y alcanzar esta meta.

A todos, muchas gracias.

CONTENIDO

Resumen	2
Abstract	3
Dedicatorias y agradecimientos	5
Figuras.....	8
Introducción	8
El Dengue: Generalidades.....	10
Agente etiológico y transmisión.....	10
Impacto en la salud pública.....	10
Modelos de Simulación de Enfermedades.....	11
Modelo SIR: Fundamentos y Aplicaciones.....	11
Modelos basados en agentes (ABM).....	12
Agentes Climáticos y su Influencia.....	13
Estrategias de Control del Dengue.....	14
Descripción de la simulación base	16
Herramientas utilizadas.....	17
Netlogo.....	17
Características Generales.....	18
Agentes y sus Propiedades:.....	18
Variables Globales y Entorno:.....	24
Parámetros Ajustables:.....	25
Restricciones del Modelo Original.....	25
Metodología y desarrollo	26
Metodología de trabajo.....	26
Desarrollo del modelo.....	27
Implementación del Modelo SIR.....	27
Integración del Agente Climático.....	29
Hibernación de los mosquitos.....	32
Incorporación de Temperaturas Inusuales e Impacto en la Hibernación.....	34
Diferenciación entre Mosquitos Macho y Hembra.....	35
Simulación con Diferentes Serotipos de Dengue.....	38
Ampliación de la Duración de la Simulación.....	39
Incorporación de Variación de la Población Según el Clima.....	40
Incorporación de la distribución de repelente.....	41
Escenarios, resultados y discusión	44
Escenarios de Simulación.....	44
Herramientas de análisis de resultados.....	46
Power BI.....	46
Análisis de resultados.....	48
Limitaciones de la Simulación.....	55
Conclusiones.....	56
Trabajo a futuro.....	57
Bibliografía.....	57

FIGURAS

Figura 01: Ecuaciones modelo SIR	11
Figura 02: Ciclo de vida del mosquito	12
Figura 03: Interfaz gráfica de la simulación base	15
Figura 04: Diagrama de clases de la simulación base	19
Figura 05: Máquina de estados del agente persona	20
Figura 06: Máquina de estados del agente mosquito	21
Figura 07: Máquina de estados del agente cacharro	22
Figura 08: Máquina de estados del agente pesticida	23
Figura 09: Parámetros ajustables de la simulación base	24
Figura 10: Diagrama de clases de la mejora SIR	27
Figura 11: Máquina de estados de la mejora agente persona	28
Figura 12: Diagrama de clases del agente Clima	30
Figura 13: Máquina de estados del agente Clima	31
Figura 14: Diagrama de clases de la mejora hibernación	32
Figura 15: Máquina de estados de la mejora hibernación	33
Figura 16: Diagrama de clases de la mejora sexo	36
Figura 17: Máquina de estados de la mejora sexo	37
Figura 18: diagrama de clase de la mejora repelente	42
Figura 19: Máquina de estados de la mejora repelente	43
Figura 20: Máquina de estados de la mejora persona	43
Figura 21: Archivo .csv generado por la simulación para su posterior análisis	46
Figura 22: Dashboard hoja resumen	48
Figura 23: Dashboard hoja resumen filtrada por verano	48
Figura 24: Dashboard hoja resumen filtrada por primavera	49
Figura 25: Dashboard hoja clima	49
Figura 26: Dashboard hoja personas	50
Figura 27: Dashboard hoja mosquitos	50
Figura 28: Dashboard hoja CASO 01 y 02 gráfico	51
Figura 29: Dashboard hoja CASO 01 y 02 resultados por cada 1000 habitantes	52
Figura 30: Dashboard hoja CASO 03 y 04 gráfico	53
Figura 31: Dashboard hoja CASO 03 y 04 resultados por cada 1000 habitantes	53

INTRODUCCIÓN

El Dengue es una enfermedad viral transmitida por mosquitos del género *Aedes*, que representa un importante problema de salud pública a nivel mundial y, en particular, en la región de las Américas [1]. Las grandes ciudades no son ajenas a esta problemática, la ciudad de Buenos Aires (CABA) ha implementado diversas estrategias de control y prevención para mitigar el impacto de la enfermedad en su población.

En este contexto, el presente trabajo del Proyecto Integrador Profesionalizante (PIP) se centra en la mejora de una simulación preexistente para el control del Dengue. Reconociendo la importancia de contar con herramientas robustas para la toma de decisiones estratégicas, este proyecto se enfoca en optimizar la capacidad de simulación, permitiendo a las autoridades sanitarias evaluar el impacto de diferentes intervenciones y diseñar estrategias de control más efectivas.

A diferencia de la simulación original, este trabajo incorpora elementos clave para una representación más realista de la dinámica de la enfermedad, como la diferenciación entre mosquitos macho y hembra, la simulación con diferentes serotipos de Dengue y la consideración de la estacionalidad a lo largo de un año completo. La simulación se aplica al Parque Ranelagh, un espacio público con alta concurrencia, lo que lo convierte en un área de interés para el estudio de la propagación del Dengue y la evaluación de estrategias de control focalizadas.

El presente informe detalla la justificación de las mejoras implementadas, la metodología utilizada en el desarrollo de la simulación y los resultados obtenidos. Se exploran las posibles aplicaciones de esta herramienta para la planificación y ejecución de estrategias de control del Dengue, con el objetivo de contribuir a la protección de la salud pública y el bienestar de la comunidad.

MARCO TEÓRICO

EL DENGUE: GENERALIDADES

El Dengue es una enfermedad infecciosa de gran relevancia en salud pública, especialmente en regiones de clima cálido y húmedo, donde las condiciones favorecen la proliferación de los mosquitos vectores. Su propagación está estrechamente vinculada a la presencia del *Aedes aegypti*, principal transmisor del virus, cuya reproducción ocurre en entornos urbanos y periurbanos con acumulaciones de agua estancada [1]. La creciente incidencia de esta enfermedad ha llevado a la implementación de diversas estrategias de prevención y control para mitigar su impacto en la población, el cual se manifiesta en términos de morbilidad, mortalidad y costos económicos asociados a la atención médica y las medidas de control.

AGENTE ETIOLÓGICO Y TRANSMISIÓN

El agente etiológico del Dengue es un virus ARN perteneciente al género *Flavivirus*, familia *Flaviviridae*. Existen cuatro serotipos distintos (DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4) [1], lo que implica que una persona puede contraer Dengue hasta cuatro veces a lo largo de su vida, cada vez por un serotipo diferente. La infección por un serotipo proporciona inmunidad de por vida contra ese serotipo específico, pero no contra los demás.

La principal vía de transmisión del Dengue es a través de la picadura de mosquitos *Aedes aegypti* y, en menor medida, *Aedes albopictus*, infectados con el virus. Estos mosquitos se reproducen en recipientes con agua estancada, tanto en áreas urbanas como rurales, lo que favorece su proliferación y la transmisión del virus. La transmisión ocurre cuando una hembra de mosquito *Aedes* pica a una persona infectada con el virus del Dengue y, posteriormente, pica a una persona sana.

IMPACTO EN LA SALUD PÚBLICA

El Dengue representa un desafío significativo para los sistemas de salud pública, tanto en términos de diagnóstico y tratamiento de los casos como en la implementación de medidas de prevención y control. La enfermedad puede manifestarse de forma asintomática o presentar síntomas leves, como fiebre, dolor de cabeza, dolor muscular y erupción cutánea. Sin embargo, en algunos casos, el Dengue puede evolucionar hacia

formas graves, como el Dengue hemorrágico y el síndrome de choque por Dengue, que pueden ser fatales.

El control del Dengue requiere un enfoque integral que involucre la vigilancia epidemiológica, el control vectorial, la promoción de la salud y la participación comunitaria. La detección temprana de los casos, el manejo clínico adecuado y la implementación de medidas de control efectivas son fundamentales para reducir el impacto de la enfermedad en la salud pública.

MODELOS DE SIMULACIÓN DE ENFERMEDADES

La simulación de enfermedades infecciosas se ha consolidado como una herramienta esencial en la epidemiología moderna [2]. Permite comprender la dinámica de la propagación de enfermedades, evaluar el impacto de diversas intervenciones y predecir escenarios futuros. Estos modelos, al integrar datos biológicos, ambientales y sociales, ofrecen una visión comprensiva de los factores que influyen en la transmisión de enfermedades. En el caso del Dengue, la simulación se vuelve crucial debido a la complejidad de su transmisión.

MODELO SIR: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

El modelo SIR (Susceptible - Infectado - Recuperado) [3] es un modelo compartimental fundamental en la epidemiología matemática. Divide a la población en tres grupos mutuamente excluyentes:

- Susceptibles (S): Individuos que no están infectados pero son susceptibles a la enfermedad.
- Infectados (I): Individuos que están infectados y son capaces de transmitir la enfermedad a los susceptibles.
- Recuperados (R): Individuos que se han recuperado de la infección y, por lo tanto, son inmunes a la enfermedad (al menos temporalmente).

El modelo SIR describe la dinámica de la enfermedad mediante un sistema de ecuaciones diferenciales (Figura 01) que modelan las tasas de transición entre estos compartimentos. La tasa de infección (β) representa la probabilidad de que un individuo susceptible se infecte al entrar en contacto con un individuo infectado, mientras que la tasa de recuperación (γ) representa la velocidad a la que los individuos infectados se recuperan y se vuelven inmunes.

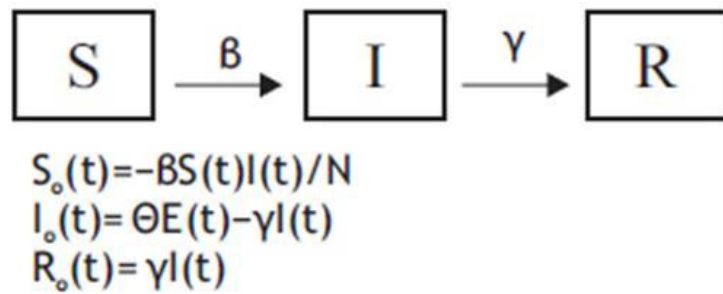


Figura 01: Ecuaciones modelo SIR

Nota. Tomado de "Pandemia de Covid-19 y efecto de medidas de contención en población peruana: un modelamiento matemático SIR", por Augusto Racchumi-Vela, 2020, Revista Científica, 20(2), p.111.

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-47312020000200001.

Copyright 2020 por SciELO Perú.

A pesar de su simplicidad, el modelo SIR es útil para comprender la dinámica básica de una epidemia y para estimar parámetros epidemiológicos clave, como el número de reproducción básico (R_0), que indica el número promedio de casos secundarios que genera un caso primario en una población susceptible.

MODELOS BASADOS EN AGENTES (ABM)

Los modelos basados en agentes (ABM, por sus siglas en inglés) representan un enfoque más sofisticado para la simulación de enfermedades infecciosas. En lugar de dividir a la población en compartimentos homogéneos, los ABM modelan a cada individuo como un agente autónomo con características y comportamientos específicos [4].

Estos agentes interactúan entre sí y con el entorno, siguiendo reglas predefinidas que pueden reflejar factores biológicos, sociales y espaciales. En el caso del Dengue, los ABM pueden utilizarse para simular el movimiento de los mosquitos, las interacciones entre mosquitos y humanos, la distribución espacial de los criaderos y el impacto de las intervenciones de control a nivel individual y comunitario.

Los ABM permiten capturar la heterogeneidad individual y espacial, lo que puede ser crucial para comprender la dinámica de la transmisión del Dengue en entornos complejos.

AGENTES CLIMÁTICOS Y SU INFLUENCIA

El clima desempeña un papel fundamental en la epidemiología del Dengue, afectando la biología, el comportamiento y la distribución de los mosquitos vectores, así como la transmisión del virus. La temperatura, la humedad, la precipitación y otros factores climáticos pueden influir en diversos aspectos del ciclo de vida del mosquito (Figura 02) y la dinámica de la enfermedad.

En primer lugar, la temperatura afecta la tasa de desarrollo de los mosquitos, la duración de su ciclo de vida, su tasa de picadura y la velocidad de replicación del virus en su interior. En general, las temperaturas más cálidas aceleran el desarrollo de los mosquitos y la replicación del virus, lo que puede aumentar la transmisión del Dengue. Sin embargo, las temperaturas extremas (demasiado altas o demasiado bajas) pueden ser letales para los mosquitos. En segundo lugar, la precipitación puede tener efectos tanto positivos como negativos en la población de mosquitos. Por un lado, la lluvia puede crear nuevos criaderos de mosquitos al llenar recipientes con agua. Por otro lado, la lluvia intensa puede eliminar los criaderos existentes y reducir la población de mosquitos.

Para simular el impacto de los factores climáticos en la transmisión del Dengue, es necesario integrar datos climáticos en los modelos de simulación. Estos datos pueden provenir de estaciones meteorológicas, modelos climáticos globales o regionales, o sensores remotos. Al incorporar datos climáticos en la simulación, se puede obtener una representación más realista de la dinámica de la enfermedad y evaluar el impacto del cambio climático en su propagación.

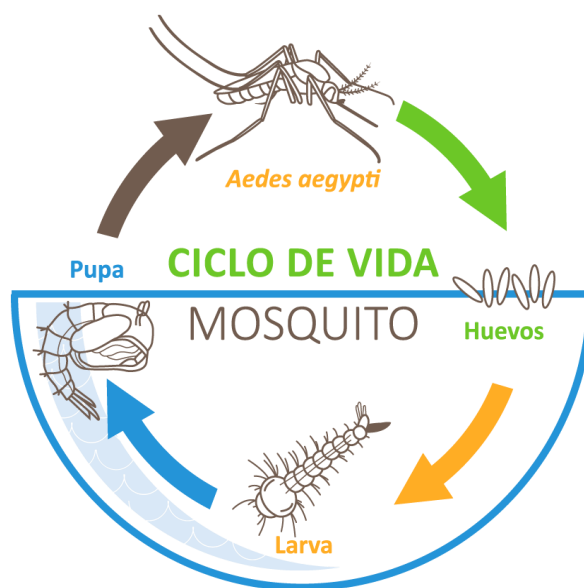


Figura 02: Ciclo de vida del mosquito

Nota. Tomado de “Ciclo de vida del mosquito Aedes aegypti”, por PR Vector Control, Aprende y Protégete, <https://prvectorcontrol.org/aprende-protegete/>. Copyright s.f. por PR Vector Control.

ESTRATEGIAS DE CONTROL DEL DENGUE

El control del Dengue es un desafío complejo que requiere un enfoque integral y multifacético, combinando medidas de control vectorial, prevención personal, vigilancia epidemiológica y participación comunitaria [1]. Las estrategias de control se centran principalmente en la prevención de la transmisión del virus.

- **Control Vectorial:** El control vectorial es una de las estrategias más importantes para reducir la población de mosquitos Aedes aegypti, los principales vectores del Dengue. Incluye las siguientes acciones:
 - **Eliminación y manejo de criaderos:** Consiste en identificar y eliminar recipientes que acumulen agua y puedan servir como criaderos de mosquitos; como neumáticos, macetas, botellas, latas, bebederos de animales y otros objetos. Cuando no es posible eliminar los recipientes, se deben cubrir, vaciar y limpiar periódicamente para evitar la proliferación de mosquitos.
 - **Tratamiento químico de criaderos:** Se utilizan insecticidas y larvicidas para tratar el agua de los recipientes que no se pueden eliminar o cubrir. Estos insecticidas pueden ser de origen químico (como el temefos) o biológico (como el Bacillus thuringiensis israelensis). Es importante utilizar los insecticidas de manera responsable y siguiendo las recomendaciones de las autoridades sanitarias para evitar la aparición de resistencia en los mosquitos.
 - **Control de mosquitos adultos:** Se utilizan insecticidas adulticidas para reducir la población de mosquitos adultos, especialmente durante brotes de Dengue. La fumigación es una técnica común para aplicar adulticidas, pero su eficacia es limitada y puede tener efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana. Por lo tanto, se debe utilizar de manera selectiva y complementaria a otras estrategias de control.
- **Prevención Personal:** La prevención personal se basa en la adopción de medidas para evitar las picaduras de mosquitos y protegerse de la infección por el virus del Dengue. Incluye las siguientes recomendaciones:

- Uso de repelentes: Aplicar repelentes de mosquitos que contengan DEET, icaridina o aceite de eucalipto de limón en la piel expuesta y la ropa, siguiendo las instrucciones del fabricante.
- Uso de ropa protectora: Usar ropa de manga larga, pantalones largos y calcetines para cubrir la mayor parte del cuerpo posible, especialmente durante las horas de mayor actividad de los mosquitos (amanecer y atardecer).
- Uso de mosquiteros: Dormir o descansar en áreas protegidas por mosquiteros, especialmente si se vive en una zona de alta transmisión de Dengue. Los mosquiteros tratados con insecticida ofrecen una protección adicional.
- Evitar áreas de alta infestación de mosquitos: Evitar visitar o permanecer en áreas donde haya una alta densidad de mosquitos, como zonas con agua estancada, vegetación densa o falta de higiene.
- Vigilancia Epidemiológica: La vigilancia epidemiológica es fundamental para detectar tempranamente los casos de Dengue, monitorear la evolución de la enfermedad y evaluar la eficacia de las medidas de control. Incluye las siguientes actividades:
 - Notificación de casos: Los profesionales de la salud deben notificar de manera obligatoria los casos sospechosos y confirmados de Dengue a las autoridades sanitarias.
 - Diagnóstico de laboratorio: Se deben realizar pruebas de laboratorio para confirmar el diagnóstico de Dengue y determinar el serotipo del virus.
 - Análisis de datos: Se deben analizar los datos epidemiológicos para identificar patrones de transmisión, factores de riesgo y áreas de mayor incidencia de Dengue.
 - Investigación de brotes: Se deben investigar los brotes de Dengue para identificar las causas, implementar medidas de control y prevenir la propagación de la enfermedad.
- Participación Comunitaria: La participación comunitaria es esencial para el éxito de las estrategias de control del Dengue. La comunidad debe estar informada sobre los riesgos de la enfermedad, las medidas de prevención y la importancia de eliminar los criaderos de mosquitos. Se deben promover campañas de sensibilización, educación y movilización social para fomentar la participación activa de la comunidad en las actividades de control del Dengue.

DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN BASE

Teniendo en cuenta todo lo mencionado, en el año 2017 la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, mediante un grupo de investigadores, realizó una simulación del dengue utilizando NetLogo [5]. Si bien este simulador inicialmente presentaba limitaciones en cuanto a la complejidad de los factores considerados y la duración de la simulación, representó un primer avance importante hacia la implementación de modelos de simulación en controles epidemiológicos reales.

El presente trabajo se basa en esta simulación inicial de CABA, buscando superar sus limitaciones y desarrollar un modelo más completo y realista que permita explorar diferentes escenarios y evaluar el impacto de diversas estrategias de control del dengue.

La simulación base se encuentra disponible públicamente (Figura 03) y permite probar diferentes parámetros y ejecutar casos de prueba (Ciencias con TIC, s.f. [6]).

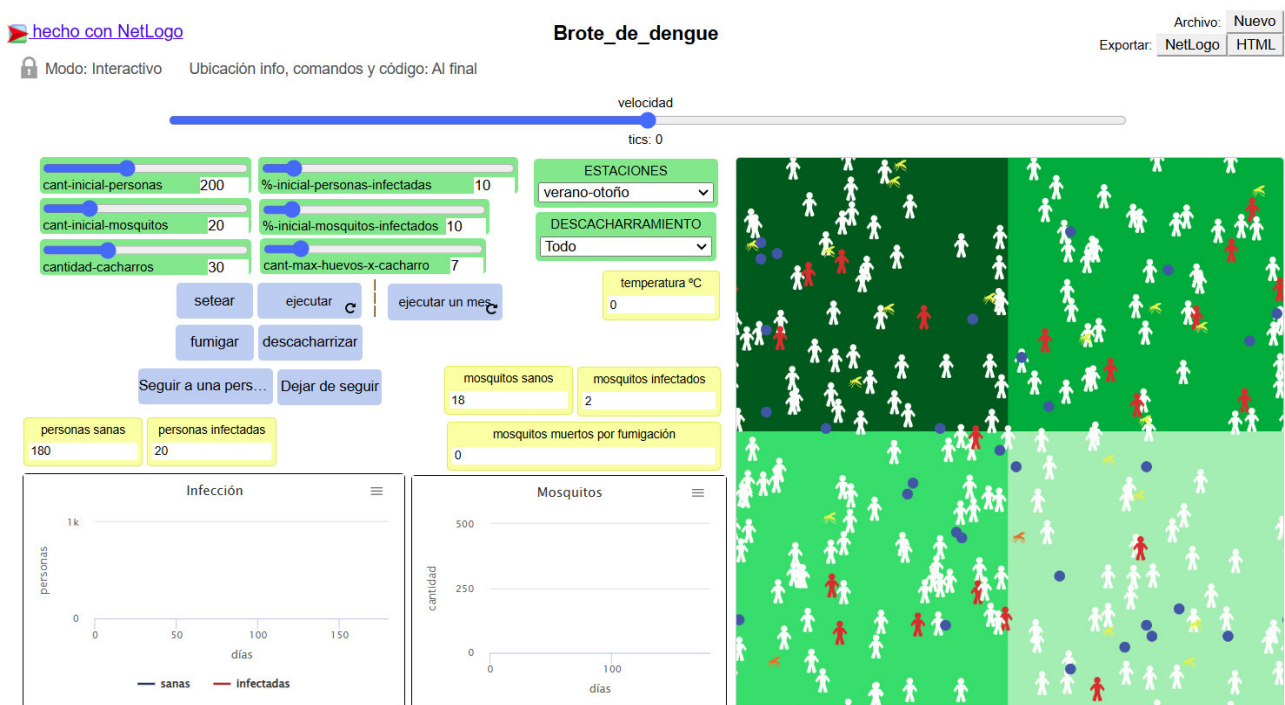


Figura 03: Interfaz gráfica de la simulación base

HERRAMIENTAS UTILIZADAS

NETLOGO

La simulación base del modelo de dengue se implementó utilizando NetLogo, un entorno de modelado basado en agentes ampliamente reconocido en la comunidad científica por

su capacidad para simular sistemas complejos. NetLogo proporciona una plataforma intuitiva y flexible para la creación de modelos computacionales donde múltiples agentes autónomos interactúan entre sí y con su entorno, lo que lo convierte en una herramienta ideal para modelar la dinámica de la transmisión del dengue.

NetLogo se basa en un lenguaje de programación simple y potente que permite a los investigadores definir las características y comportamientos de los agentes (personas, mosquitos, cacharros, etc.) y las reglas que gobiernan sus interacciones. El entorno ofrece una interfaz visual que facilita la observación y el análisis del comportamiento del modelo a lo largo del tiempo, mediante gráficos, mapas y otras representaciones visuales. La capacidad de NetLogo para manejar grandes poblaciones de agentes y simular procesos estocásticos (aleatorios) lo convierte en una herramienta valiosa para explorar diferentes escenarios y evaluar el impacto de diversas estrategias de control del dengue.

Definición de conceptos:

- **Tick:** es la unidad básica de tiempo en una simulación. Es una abstracción temporal que no tiene una duración fija en el tiempo real, pero dentro del modelo representa un avance en la lógica de los procesos que se simulan.
- **Mundo:** está compuesto por una cuadrícula de celdas. Cada celda tiene un tamaño de 1 unidad en el sistema de coordenadas del modelo. Cuando un mosquito se mueve 1 unidad en cualquier dirección (X o Y), está desplazándose 1 celda.
- **Agente:** Unidad autónoma dentro de la simulación que actúa e interactúa con su entorno y con otros elementos del modelo. Su comportamiento está definido por reglas específicas y puede representar seres vivos u objetos
- **Patch:** Cada celda fija en la cuadrícula del mundo. No se mueve y puede almacenar información como temperatura o presencia de agua.
- **Link:** Conexión entre agentes que permite representar relaciones o interacciones, como comunicación o movimiento en red.
- **Breed:** Clasificación utilizada para diferenciar grupos de entidades dentro de la simulación. Permite definir distintos tipos con comportamientos, atributos y reglas propias, facilitando la organización y gestión de los elementos del modelo,

CARACTERÍSTICAS GENERALES

El modelo base simula la dinámica de transmisión del virus del dengue en un entorno urbano simplificado, específicamente un barrio compuesto por cuatro manzanas. La

simulación se ejecuta durante un período de sólo **180 días**, discretizados en 540 ticks, donde cada tick representa un lapso de 8 horas (3 ticks por día).

El modelo considera factores ambientales como la temperatura, así como intervenciones de control como la fumigación y la descacharrización, para evaluar su impacto en la propagación del virus y la población de mosquitos.

AGENTES Y SUS PROPIEDADES:

El modelo base incluye cuatro tipos de agentes: Personas, Mosquitos, Cacharros y Pesticidas, cada uno con propiedades y comportamientos específicos:

- **Personas:**
 - Propiedades:
 - **infectada?:** Variable booleana que indica si la persona está infectada con el virus del dengue.
 - **seguida?:** Variable booleana que determina si la persona está siendo rastreada en la simulación para propósitos de análisis.
 - Comportamientos:
 - **Movimiento Aleatorio:** Las personas se desplazan de manera aleatoria a través de las manzanas del barrio. Este movimiento es fundamental para simular la interacción con mosquitos y la propagación del virus.
 - **Infección:** Las personas pueden contraer el dengue al ser picadas por mosquitos infectados. La probabilidad de infección es del 80%. [7]
 - **Representación Visual:** Las personas se representan visualmente en la simulación como agentes de color blanco (sanas) o rojo (infectadas).
- **Mosquitos:**
 - Propiedades:
 - **infectado?:** Variable booleana que indica si el mosquito está infectado con el virus del dengue.
 - **larva? y adulto?:** Variables booleanas que indican la etapa de desarrollo del mosquito. Sin embargo, en el modelo base, los mosquitos nacen directamente como adultos, simplificando el ciclo de vida.
 - **picaduras:** Número de picaduras realizadas por el mosquito a lo largo de su vida. Este valor está limitado a un máximo de 6 (este valor se encuentra seteado directamente en el código).
 - **vida-media:** Tiempo de vida del mosquito

- **foco-x y foco-y:** Coordenadas de la ubicación de nacimiento del mosquito.
- Comportamientos:
 - Movimiento Limitado: Los mosquitos se mueven en un radio limitado alrededor de su lugar de nacimiento, específicamente en un rango de -10 a +10 unidades en ambas direcciones (X e Y), lo que equivale a un área de 20x20 celdas.
 - Infección:
 - Si un mosquito sano pica a una persona infectada, se infecta con una probabilidad del 100%. [7]
 - Si un mosquito infectado pica a una persona sana, la infecta con una probabilidad del 80%. [7]
 - Reproducción: Los mosquitos una vez que pican depositan sus huevos en cacharros de forma aleatoria. Los huevos tardan 10 días en convertirse en adultos, siempre que la temperatura sea superior a 15°C.
 - Envejecimiento: Los mosquitos mueren al alcanzar su vida media.
 - Fumigación: Los mosquitos pueden morir al entrar en contacto con áreas fumigadas. La probabilidad de muerte por contacto con el pesticida es del 10% (este valor puede verificarse en el código). [6]
- Representación Visual: Los mosquitos se representan visualmente como agentes de color amarillo (sanos) o naranja (infectados).
- **Cacharros:**
 - Propiedades:
 - **agua?**: Variable booleana que indica si el cacharro contiene agua, lo que lo convierte en un potencial criadero de mosquitos.
 - **huevos**: Cantidad de huevos presentes en el cacharro (este valor puede verificarse en el código).
 - **tiempo-adultez**: Tiempo restante para que los huevos en el cacharro se conviertan en mosquitos adultos (este valor puede verificarse en el código).
 - Comportamientos:
 - Eclosión: Los huevos eclosionan y se convierten en larvas después de 10 días, siempre que la temperatura sea superior a 15°C.
 - Descacharrización: Los cacharros pueden ser eliminados de forma aleatoria durante las campañas de descacharrización.
- **Pesticidas:**

- Propiedades:
 - **Tiempo de acción limitado:** El pesticida tiene un tiempo de acción limitado de una semana (21 ticks).
- Comportamientos:
 - **Mata:** El pesticida mata a los mosquitos al contacto con una probabilidad del 10% (este valor puede verificarse en el código). [7]

En la Figura 04 mediante un drama de clases se puede observar gráficamente los comportamientos y las características mencionadas. Además, en las Figuras 05, 06, 07 y 08 se indican las máquinas de estados correspondientes a cada agente

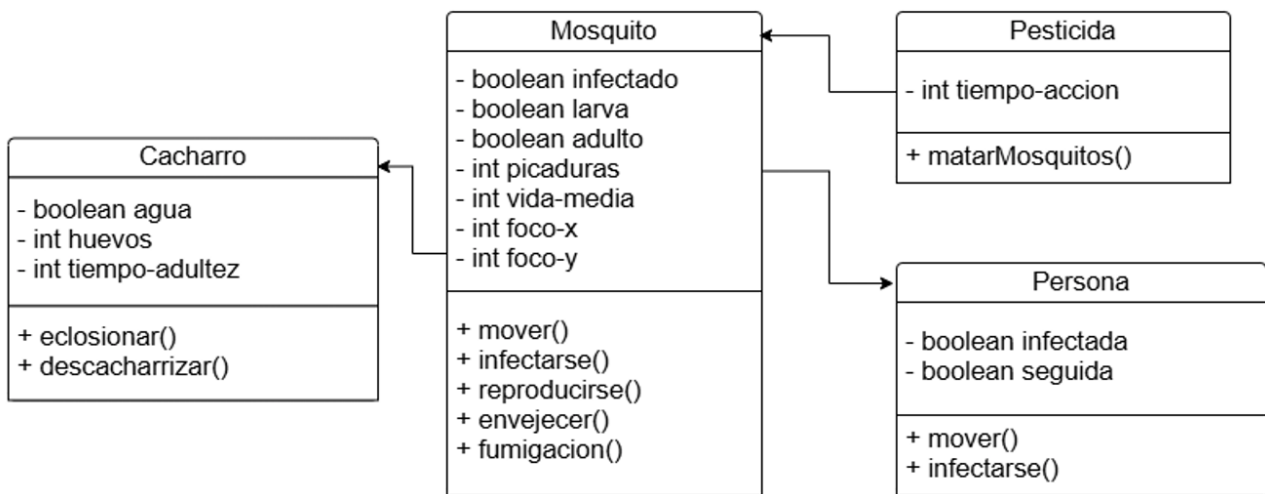


Figura 04: Diagrama de clases de la simulación base

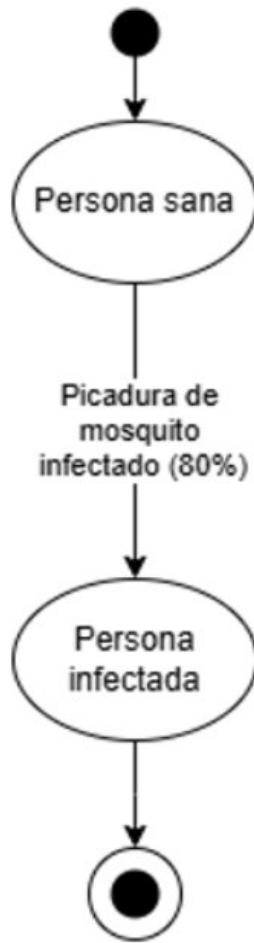


Figura 05: Máquina de estados del agente persona

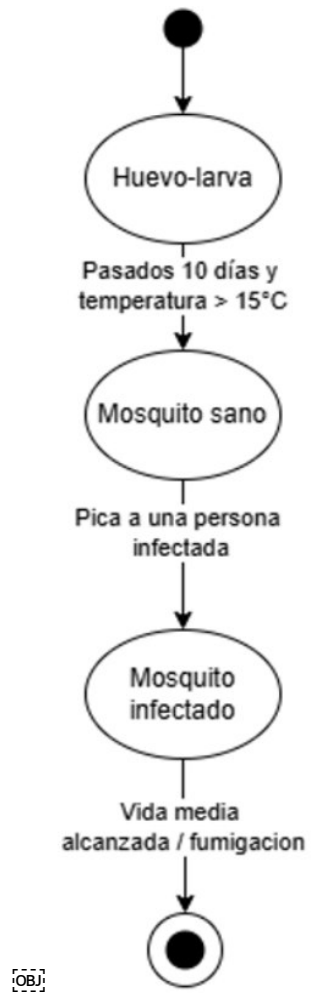


Figura 06: Máquina de estados del agente mosquito



Figura 07: Máquina de estados del agente cacharro



Figura 08: Máquina de estados del agente pesticida

VARIABLES GLOBALES Y ENTORNO:

La temperatura no se modela como un agente individual, sino como una variable global que influye en el comportamiento de otros agentes. La temperatura diaria se genera de forma aleatoria entre un valor mínimo (T_{min}) y un valor máximo (T_{max}), que varían según el período del año configurado en la simulación. La temperatura afecta la reproducción de los mosquitos (sólo se reproducen si la temperatura es superior a 15°C) y la velocidad de eclosión de los huevos en los cacharros.

En cuanto al tiempo, cada día en la simulación se divide en 3 ticks, representando un lapso de 8 horas por tick. Esto permite modelar la dinámica diaria de la transmisión del dengue.

Interacciones Clave:

- **Transmisión del Dengue:** La transmisión del dengue ocurre cuando un mosquito infectado pica a una persona sana o cuando un mosquito sano pica a una persona infectada. Las probabilidades de transmisión varían según el serotipo del dengue y el estado de infección del mosquito y la persona.
- **Reproducción de Mosquitos:** Los mosquitos se reproducen al depositar sus huevos en cacharros con agua. La eclosión de los huevos depende de la temperatura.

- Impacto de las Intervenciones: La fumigación reduce la población de mosquitos al matarlos al contacto con el pesticida. La descacharrización elimina los criaderos de mosquitos, reduciendo su reproducción.

PARÁMETROS AJUSTABLES:

El modelo base permite ajustar varios parámetros antes de iniciar la simulación (Figura 09), lo que permite explorar diferentes escenarios y evaluar el impacto de diferentes intervenciones:

- Cantidad inicial de personas, mosquitos y cacharros.
- Porcentaje inicial de personas y mosquitos infectados.
- Período del año, para ajustar las temperaturas diarias según registros históricos.

The interface shows the following adjustable parameters:

- cant-inicial-personas:** 200
- %-inicial-personas-infectadas:** 10
- cant-inicial-mosquitos:** 20
- %-inicial-mosquitos-infectados:** 10
- cantidad-cacharros:** 30
- cant-max-huevos-x-cacharro:** 7
- ESTACIONES:** verano-otoño
- DESCACHARRAMIENTO:** Todo
- temperatura °C:** 0

Control buttons: setear, ejecutar, ejecutar un mes.

Figura 09: Parámetros ajustables de la simulación base

RESTRICCIONES DEL MODELO ORIGINAL

El modelo original presenta varias restricciones conceptuales que afectan su capacidad de representación epidemiológica. En primer lugar, carece de un mecanismo de recuperación para las personas infectadas, lo que implica que los individuos permanecen en estado infectado de manera permanente durante toda la simulación, alterando la dinámica realista de la progresión de la enfermedad. Asimismo, simplifica excesivamente el ciclo biológico del vector al omitir las etapas inmaduras (huevo, larva y pupa), asumiendo que los mosquitos emergen directamente como adultos funcionales. Otro aspecto relevante es la ausencia de un agente climático autónomo, ya que la temperatura se modela como una variable global estática en lugar de un sistema dinámico que simule patrones meteorológicos complejos.

Adicionalmente, el modelo no diferencia los roles biológicos entre mosquitos hembra y macho, aspecto crítico dado que solo las hembras participan en la hematofagia y transmisión viral. Tampoco incorpora la variabilidad serotípica del virus del Dengue, utilizando en su lugar una probabilidad de contagio homogénea y fija codificada

paramétricamente. Desde la perspectiva entomológica, se omite el mecanismo de hibernación de los mosquitos, característica esencial en su ecología temporal. Finalmente, la población humana se mantiene estática numéricamente durante toda la simulación, sin considerar fluctuaciones demográficas estacionales ni movilidad poblacional, factores clave en la epidemiología real del Dengue.

METODOLOGÍA Y DESARROLLO

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo utilizada en el desarrollo de este proyecto se estructuró en base a un plan preliminar presentado y aprobado antes de iniciar las actividades. Dicho plan, con una duración estimada de cuatro meses, fue diseñado para abordar de manera sistemática y organizada las distintas etapas del proyecto. La metodología adoptada se caracterizó por un enfoque iterativo y colaborativo, con revisiones y discusiones periódicas con los docentes tutores para garantizar la calidad y pertinencia de los resultados.

En una primera etapa, se llevó a cabo una investigación exhaustiva sobre la enfermedad del dengue, incluyendo su epidemiología, los factores que influyen en su transmisión y las estrategias de control existentes. Paralelamente, se realizó un análisis detallado del modelo base desarrollado en la CABA, identificando sus fortalezas y limitaciones.

A partir de esta investigación inicial, se avanzó en el desarrollo de mejoras al modelo original, incorporando elementos clave como la implementación del modelo SIR, la inclusión de un Agente Climático, la diferenciación entre mosquitos macho y hembra, la simulación con diferentes serotipos del virus y la distribución de repelente por parte del Estado. Estas modificaciones se realizaron siguiendo los lineamientos establecidos en el informe inicial y buscando optimizar la capacidad de simulación.

Finalmente, en la última etapa del proyecto, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas sobre el modelo mejorado con el objetivo de evaluar su rendimiento, validar los resultados obtenidos y comparar distintos escenarios de simulación. Para ello, se aplicó el Teorema de Tchebycheff con el fin de determinar el número mínimo de ejecuciones necesarias para obtener resultados estadísticamente representativos.

Este enfoque de trabajo permitió garantizar la calidad y la rigurosidad de los resultados, asegurando el cumplimiento de los objetivos planteados en el plan de trabajo preliminar y

proporcionando una herramienta más precisa y realista para la simulación y control del dengue.

DESARROLLO DEL MODELO

A continuación se detalla de qué forma se ha realizado cada uno de los ítems que se han propuesto como mejora al modelo inicial

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SIR

El modelo base original carecía de la capacidad de simular la recuperación de individuos infectados, lo que limitaba su realismo y capacidad predictiva. Para superar esta limitación, se implementó el modelo SIR (Susceptible, Infectado, Recuperado), un marco epidemiológico fundamental que divide a la población en tres compartimentos según su estado de salud:

- **Susceptibles (S):** Individuos que pueden contraer la enfermedad.
- **Infectados (I):** Individuos actualmente infectados y capaces de transmitir la enfermedad.
- **Recuperados (R):** Individuos que se han recuperado de la enfermedad y son inmunes a futuras infecciones.

La implementación del modelo SIR en NetLogo requirió la modificación del agente "Persona" para incluir el estado de "Recuperado" y la definición de reglas para la transición entre los diferentes estados. Los pasos clave fueron:

- Se agregó una variable booleana llamada **recuperado?** al agente "Persona". Esta variable indica si la persona se ha recuperado del dengue o no. Inicialmente, todas las personas son susceptibles (**recuperado? = false**) a menos que estén infectadas al inicio de la simulación.
- Lógica de recuperación: las personas se recuperan de la enfermedad luego de un periodo de 7 días, que es lo que indican estudios nacionales e internacionales [1].
- Inmunidad: Una vez que una persona se recupera (**recuperado? = true**), se vuelve inmune al dengue y no puede volver a infectarse. Esto se implementó modificando la lógica de infección para que solo las personas susceptibles puedan ser infectadas por mosquitos infectados.

Impacto en la Simulación

La implementación del modelo SIR tiene un impacto significativo en la simulación:

- Realismo: El modelo se vuelve más realista al simular la recuperación de los individuos infectados, lo que permite observar la dinámica completa de la enfermedad.
- Análisis: Permite analizar el impacto de diferentes tasas de recuperación en la propagación del dengue y evaluar la efectividad de las intervenciones de control.
- Predicción: El modelo SIR proporciona una base más sólida para predecir el curso de la epidemia y anticipar los picos de contagio.

La implementación mencionada se puede observar gráficamente en las figuras 10 y 11

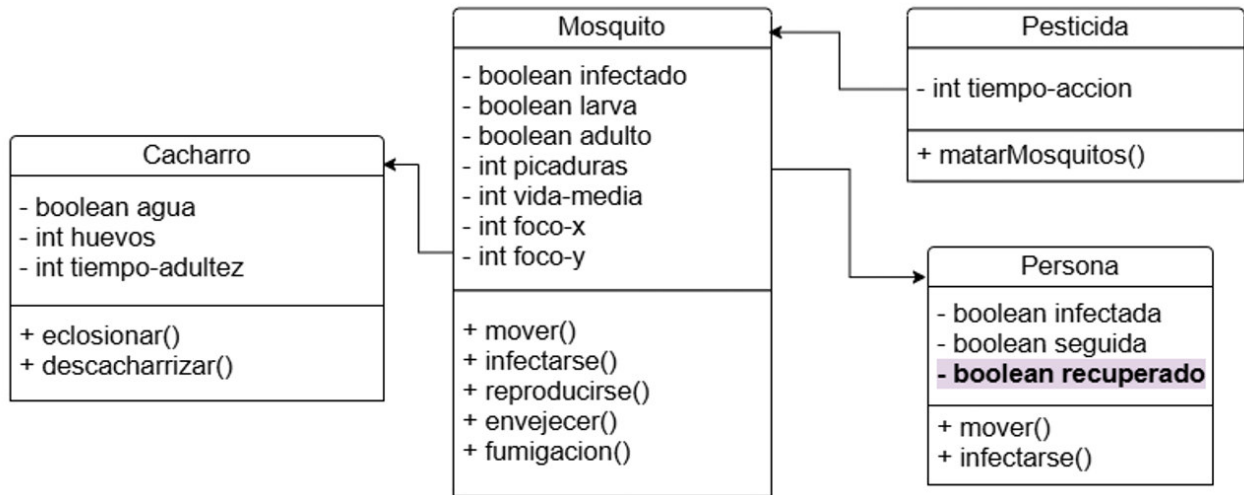


Figura 10: Diagrama de clases de la mejora SIR



Figura 11: Máquina de estados de la mejora agente persona

INTEGRACIÓN DEL AGENTE CLIMÁTICO

El modelo base original utilizaba una variable global de temperatura que variaba aleatoriamente entre un mínimo y un máximo diario. Si bien esto permitía simular las variaciones de temperatura a lo largo del año, carecía de la capacidad de modelar patrones climáticos más complejos, como la lluvia y las estaciones. Para superar esta limitación, se implementó un Agente Climático que gestiona la temperatura, la lluvia y las estaciones del año, permitiendo además ser flexible frente a futuras mejoras.

Implementación en NetLogo:

La implementación del Agente Climático requirió la creación de un nuevo tipo de agente llamado "Clima" y la modificación de la lógica de otros agentes para interactuar con él (Figura 12 y 13). Los pasos clave fueron:

- Creación del Agente Clima: Se creó un nuevo tipo de agente llamado "Clima" con las siguientes propiedades:
 - **estación**: Variable que indica la estación del año (verano, otoño, invierno, primavera).
 - **lluvia?**: Variable booleana que indica si está lloviendo (verdadero) o no (falso).
 - **probabilidad-lluvia**: Variable que controla la probabilidad de que llueva durante una estación.
 - **temperatura-mínima**: Variable que indica la temperatura mínima promedio para la estación actual.
 - **temperatura-máxima**: Variable que indica la temperatura máxima promedio para la estación actual.
 - **temperatura-actual**: Variable que almacena la temperatura actual del día, generada aleatoriamente entre temperatura-mínima y temperatura-máxima.
- Comportamiento del Agente Clima: Se definió el comportamiento del Agente Clima para actualizar periódicamente sus propiedades:
 - Cambio de estación: La estación cambia automáticamente después de un número determinado de ticks (273 ticks, que equivalen a 91 días).
 - Generación de lluvia: La lluvia ocurre con una probabilidad asignada según la estación. En cada tick, se genera un número aleatorio entre 0 y 100. Si este número es menor que **probabilidad-lluvia**, entonces **lluvia?** se establece en verdadero. De lo contrario, se establece en falso.
 - Generación de temperatura: La temperatura actual se genera aleatoriamente entre la temperatura mínima y máxima de la estación actual.
- Interacciones con Otros Agentes: Se modificó la lógica de otros agentes para interactuar con el Agente Clima:
 - Cacharros: Cuando la variable **lluvia?** es verdadera, los cacharros que no tengan agua se llenan. Esto se implementa verificando la propiedad **agua?** de cada cacharro.
 - Mosquitos: La reproducción de los mosquitos y la velocidad de eclosión de los huevos en los cacharros dependen de la temperatura actual. Esto se implementa consultando la propiedad temperatura-actual del Agente Clima.
- Parámetros Ajustables: Se agregaron nuevos parámetros ajustables para controlar el comportamiento del Agente Climático:
 - probabilidad-lluvia-verano.
 - probabilidad-lluvia-otoño.

- probabilidad-lluvia-invierno.
- probabilidad-lluvia-primavera.
- temperatura-mínima-verano.
- temperatura-máxima-verano.

La implementación del Agente Climático tiene un impacto significativo en la simulación. En primer lugar, el modelo se vuelve más realista al simular patrones climáticos más complejos, como la lluvia y las estaciones. Además, permite analizar el impacto del clima en la propagación del dengue y evaluar la efectividad de las intervenciones de control en diferentes condiciones climáticas. Por último, el Agente Climático proporciona una base más sólida para predecir el curso de la epidemia y anticipar los picos de contagio en función de las condiciones climáticas.

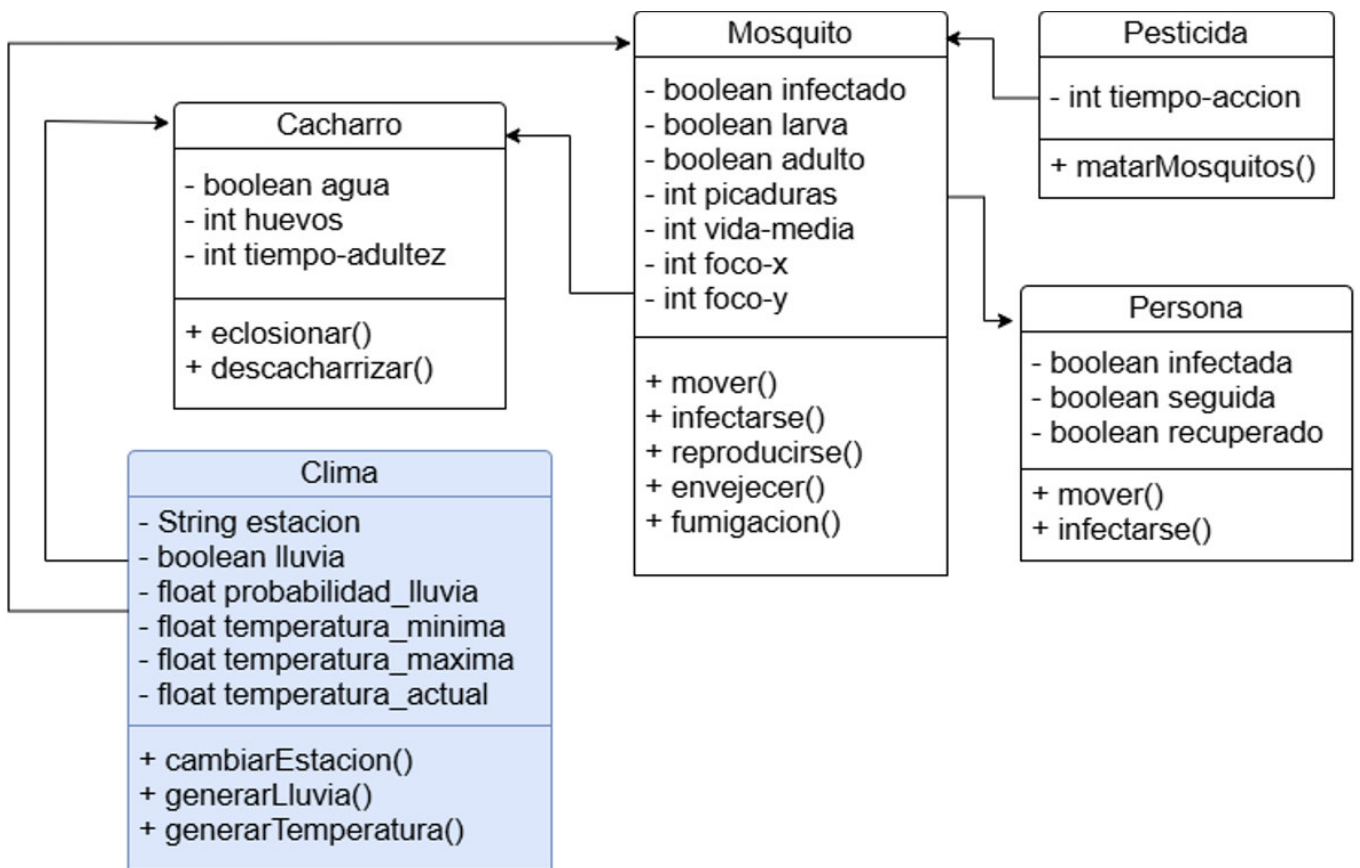


Figura 12: Diagrama de clases del agente Clima

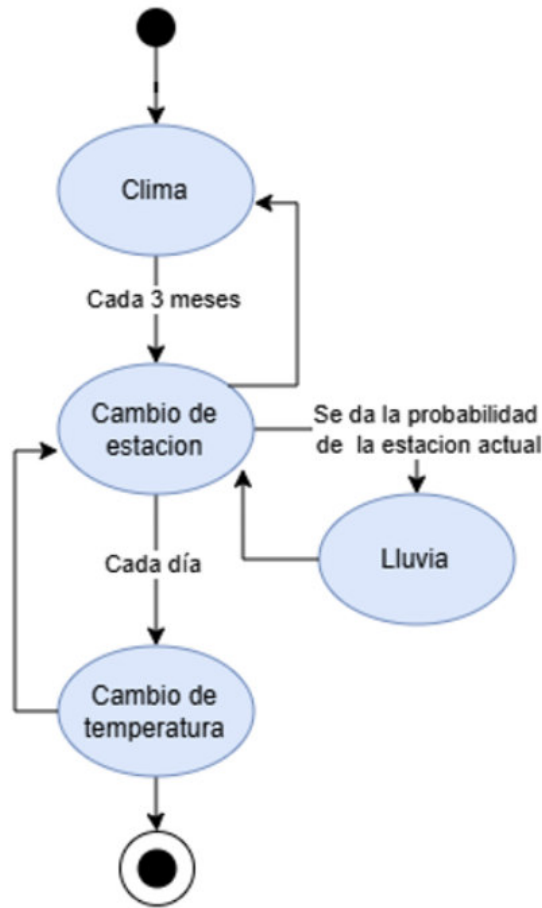


Figura 13: Máquina de estados del agente Clima

HIBERNACIÓN DE LOS MOSQUITOS

Para aumentar el realismo del modelo y reflejar de manera más precisa la dinámica poblacional de los mosquitos *Aedes aegypti*, se incorporó la capacidad de hibernación a una fracción de la población de mosquitos. La hibernación es un mecanismo de supervivencia que permite a algunos mosquitos adultos resistir las bajas temperaturas del invierno, entrando en un estado de inactividad metabólica que reduce su necesidad de alimentarse y prolonga su vida útil hasta que las condiciones ambientales vuelvan a ser favorables para su actividad y reproducción.

Implementación en NetLogo:

La implementación de la hibernación de mosquitos requirió la modificación del agente "Mosquito" para incluir propiedades relacionadas con la hibernación y la adaptación de la lógica de reproducción y envejecimiento (Figura 14 y 15). Los pasos clave fueron:

- Se agregó una variable llamada **puede-hibernar?** al agente "Mosquito". Esta variable booleana indica si el mosquito tiene la capacidad de hibernar o no. Al crear un nuevo mosquito, se le asigna aleatoriamente la capacidad de hibernar con una probabilidad definida por el parámetro **probabilidad-hibernacion**.

- Comportamiento de Hibernación: Se modificó la lógica de envejecimiento de los mosquitos para que, durante los meses de invierno (definidos por el Agente Climático), los mosquitos con la capacidad de hibernar (puede-hibernar? = true) entren en un estado de inactividad. En este estado, su lógica de envejecimiento se suspende, prolongando su vida útil hasta que la temperatura supere un umbral mínimo
- Reactivación de la Actividad: Se modificó la lógica de la simulación para que, cuando la temperatura supere el umbral mínimo al final del invierno, los mosquitos que hibernaron se reactiven y vuelvan a su estado normal de actividad (movimiento, picaduras, reproducción, etc.).

Impacto en la Simulación:

La incorporación de la capacidad de los mosquitos para sobrevivir al invierno hace que el modelo sea más realista, ya que permite capturar la dinámica poblacional de la especie a lo largo de todo el año. Además, posibilita analizar el impacto de las condiciones climáticas invernales tanto en la población de mosquitos como en la propagación del dengue. Finalmente, esta característica proporciona una base más sólida para predecir el curso de la epidemia y anticipar los picos de contagio en función de las condiciones climáticas y la capacidad de hibernación de los mosquitos.

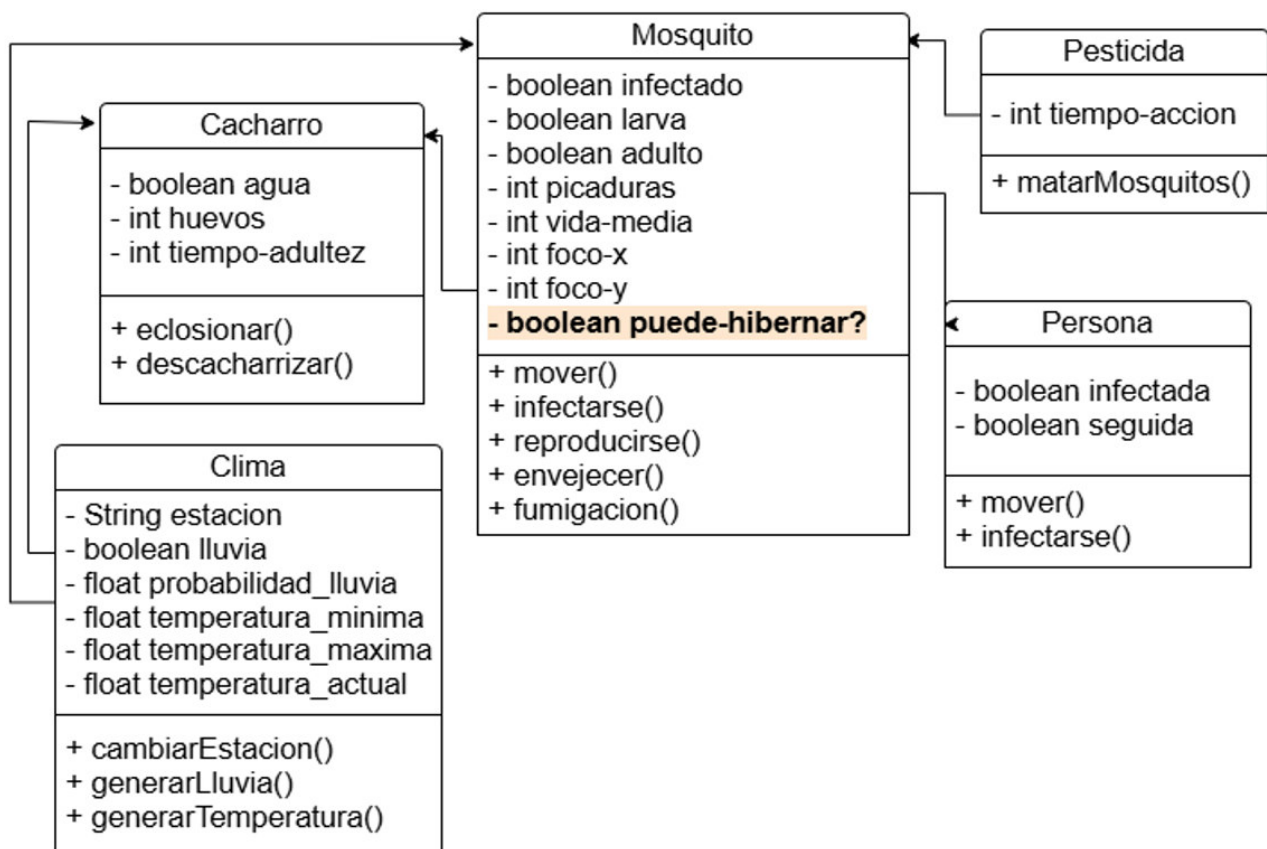


Figura 14: Diagrama de clases de la mejora hibernación

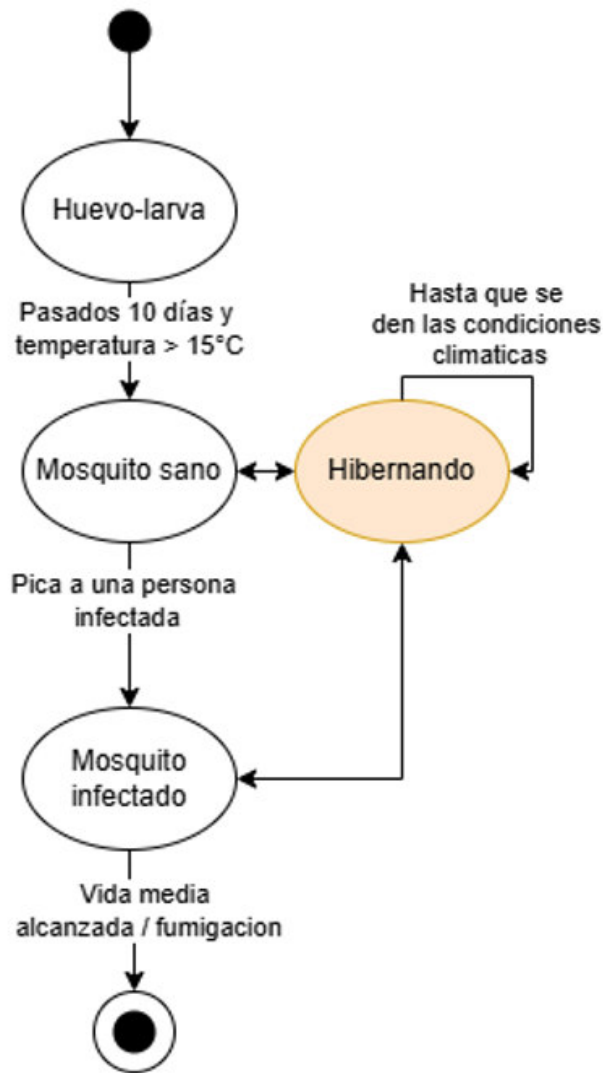


Figura 15: Máquina de estados de la mejora hibernación

INCORPORACIÓN DE TEMPERATURAS INUSUALES E IMPACTO EN LA HIBERNACIÓN

Reconociendo el creciente impacto del cambio climático en los patrones climáticos estacionales, se incorporó al modelo la posibilidad de simular temperaturas inusuales fuera de la temporada típica. Este fenómeno, cada vez más frecuente, puede tener un impacto significativo en el ciclo de vida de los mosquitos *Aedes aegypti*, particularmente en su capacidad de hibernación.

Investigaciones recientes han demostrado que las fluctuaciones de temperatura fuera de temporada pueden interrumpir el estado de diapausa (hibernación) en insectos, incluyendo mosquitos. Los períodos de calor inusual durante el invierno pueden activar temporalmente a los mosquitos que se encuentran en estado de hibernación, lo que les permite alimentarse y reproducirse antes de que las temperaturas vuelvan a descender.

Esto puede tener consecuencias importantes para la dinámica poblacional de los mosquitos y para la transmisión de enfermedades como el dengue. [7]

Implementación en NetLogo:

La implementación de temperaturas inusuales y su impacto en la hibernación requirió la modificación del Agente Climático y la adaptación de la lógica de hibernación de los mosquitos. Los pasos clave fueron:

- Modificación del Agente Climático: Se modificó el Agente Climático para que, además de simular las temperaturas promedio de cada estación, genere ocasionalmente temperaturas inusuales fuera de temporada. Esto se implementó utilizando una probabilidad del 20% [8]. Cuando se genera una temperatura inusual, se aumenta (o disminuye dependiendo de la estación actual) temporalmente la temperatura en un rango definido por el parámetro **rango-temperatura-inusual**.
- Impacto en la Hibernación: Se modificó la lógica de hibernación de los mosquitos para que, cuando se produzca un período de temperatura inusual durante el invierno, los mosquitos que hibernan se reactiven temporalmente y vuelvan a su estado normal de actividad (movimiento, picaduras y reproducción). Una vez que la temperatura vuelve a la normalidad, los mosquitos vuelven a entrar en estado de hibernación.

Impacto en la Simulación:

La implementación de temperaturas inusuales y su impacto en la hibernación tiene un impacto significativo en la simulación:

- Realismo: El modelo se vuelve más realista al simular la influencia del cambio climático en la dinámica poblacional de los mosquitos.
- Análisis: Permite analizar el impacto de los períodos de calor inusual durante el invierno en la supervivencia de los mosquitos y en la propagación del dengue.
- Predicción: Proporciona una base más sólida para predecir el curso de la epidemia y anticipar los picos de contagio en función de las condiciones climáticas cambiantes.

DIFERENCIACIÓN ENTRE MOSQUITOS MACHO Y HEMBRA

Metodología y desarrollo: Diferenciación entre Mosquitos Macho y Hembra.

El modelo base original no distinguía entre mosquitos macho y hembra, lo cual era una simplificación significativa, ya que solo las hembras son capaces de transmitir el dengue.

Para mejorar el realismo del modelo, se implementó la diferenciación entre mosquitos macho y hembra, asignando roles y comportamientos específicos a cada sexo.

Implementación en NetLogo:

La implementación de la diferenciación entre mosquitos macho y hembra requirió la modificación del agente "Mosquito" para incluir una propiedad de sexo y la adaptación de la lógica de reproducción e infección (Figura 16 y 17). Los pasos clave fueron:

- Se agregó una variable llamada **sexo** al agente "Mosquito". Esta variable puede tomar dos valores: "macho" o "hembra". Al crear un nuevo mosquito, se le asigna aleatoriamente un sexo con una probabilidad del 50% para cada uno.
- Modificación de la Reproducción: Se modificó la lógica de reproducción para que solo las hembras puedan depositar huevos en los cacharros. Los mosquitos macho no participan en la reproducción.
- Modificación de la Infección: Se modificó la lógica de infección para que solo las hembras puedan picar a las personas y transmitir el dengue. Los mosquitos macho no pican a las personas.

Impacto en la Simulación:

La implementación de la diferenciación entre mosquitos macho y hembra tiene un impacto significativo en la simulación:

- Realismo: El modelo se vuelve más realista al simular el rol específico de las hembras en la transmisión del dengue.
- Análisis: Permite analizar el impacto de diferentes proporciones de mosquitos macho y hembra en la propagación del dengue.
- Estrategias de Control: Permite evaluar la efectividad de las estrategias de control que se enfocan en la eliminación de las hembras, como la liberación de mosquitos machos estériles.

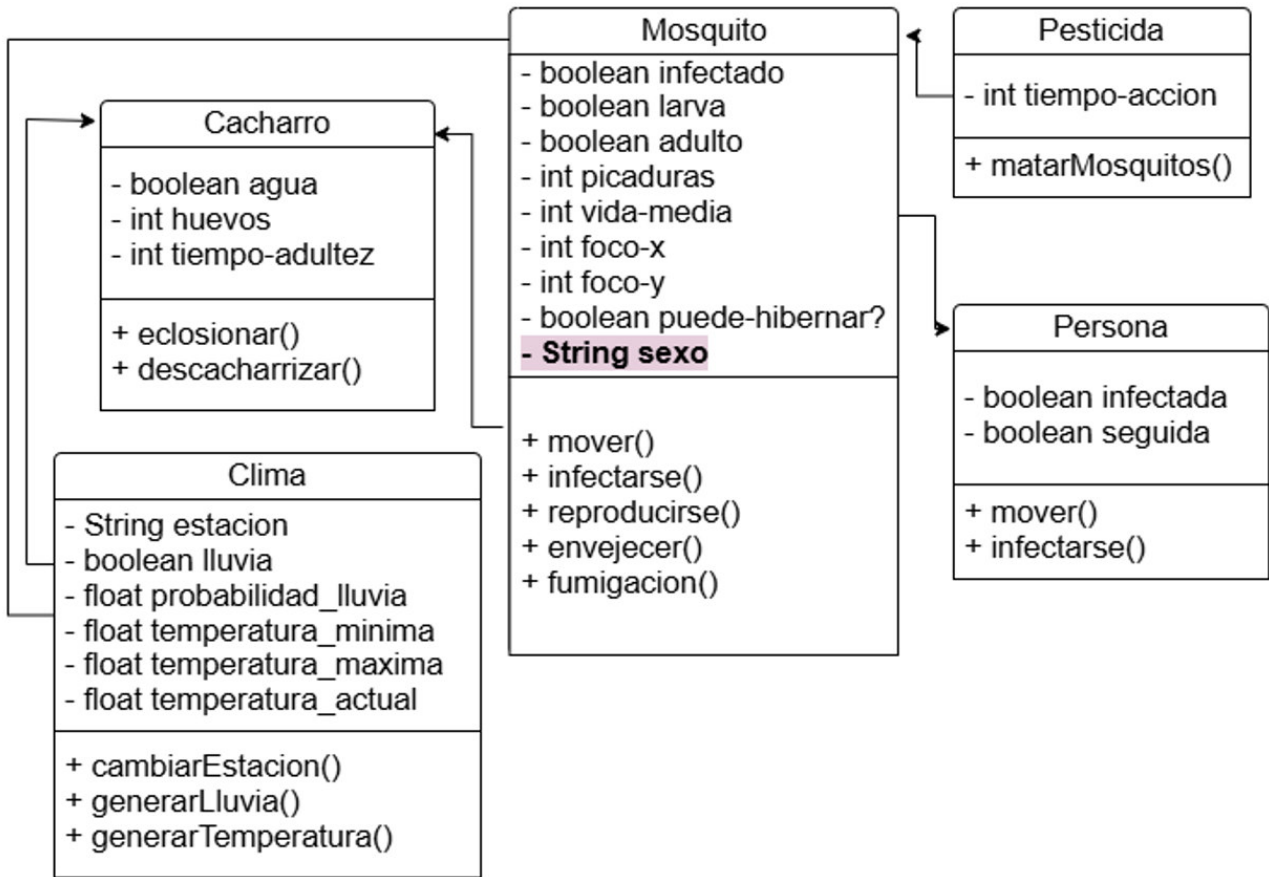


Figura 16: Diagrama de clases de la mejora sexo



Figura 17: Máquina de estados de la mejora sexo

SIMULACIÓN CON DIFERENTES SEROTIPOS DE DENGUE

El modelo base original no simula la dinámica individual de los diferentes serotipos de dengue (DEN-1, DEN-2, DEN-3 y DEN-4) ni la posibilidad de coinfección o inmunidad cruzada. Para mejorar el realismo y la capacidad de análisis del modelo, se implementó la capacidad para el usuario de seleccionar con qué serotipo se ejecutará la simulación, permitiendo estudiar la propagación del serotipo seleccionado con su probabilidad de contagio específica.

Implementación en NetLogo:

La implementación de la simulación con diferentes serotipos de dengue requirió la modificación de la interfaz de usuario para permitir la selección del serotipo y la adaptación de la lógica de infección para utilizar la probabilidad de contagio correspondiente al serotipo seleccionado. Los pasos clave fueron:

- Interfaz de Usuario: Se agregó un selector (dropdown menu) en la interfaz de usuario para permitir al usuario elegir el serotipo con el que desea ejecutar la simulación. Las opciones son "DEN-1", "DEN-2", "DEN-3" y "DEN-4".
- Variable Global tipo-dengue: Se agregó una variable global llamada **tipo-dengue** que almacena el serotipo seleccionado por el usuario en la interfaz.
- Probabilidades de Contagio: Se definieron variables globales para almacenar las probabilidades de contagio de cada serotipo:
 - probabilidad-contagio-den1
 - probabilidad-contagio-den2
 - probabilidad-contagio-den3
 - probabilidad-contagio-den4
- Modificación de la Infección: Se modificó la lógica de infección para utilizar la probabilidad de contagio correspondiente al serotipo seleccionado por el usuario.

Impacto en la Simulación:

La implementación de la simulación con diferentes serotipos de dengue tiene un impacto significativo en la simulación:

- Flexibilidad: Permite al usuario explorar la propagación de diferentes serotipos de dengue y comparar sus efectos.
- Análisis: Facilita el análisis del impacto de la probabilidad de contagio en la propagación de la enfermedad.
- Experimentación: Permite experimentar con diferentes escenarios epidemiológicos y evaluar la efectividad de las estrategias de control en cada caso.

AMPLIACIÓN DE LA DURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

El modelo base original simulaba la transmisión del dengue durante un período de 180 días, lo cual era insuficiente para capturar la dinámica estacional completa de la enfermedad y evaluar el impacto a largo plazo de las estrategias de control. Para abordar esta limitación, se amplió la duración de la simulación a un año completo (365 días), permitiendo observar la evolución de la epidemia a lo largo de las diferentes estaciones y evaluar la sostenibilidad de las intervenciones.

Implementación en NetLogo:

La ampliación de la duración de la simulación requirió principalmente modificar el número de ticks que se ejecutan en la simulación. Los pasos clave fueron:

- Modificación del Número de Ticks: Se incrementó el número total de ticks que se ejecutan en la simulación para representar un año completo. Dado que cada día

está compuesto por 3 ticks, el número total de ticks para un año es 365 días * 3 ticks/día = 1095 ticks.

- **Adaptación de la Lógica Estacional:** Se adaptó la lógica del Agente Climático para simular las cuatro estaciones del año de manera realista a lo largo de los 1095 ticks. Esto implicó ajustar las fechas de inicio y fin de cada estación, así como las probabilidades de lluvia y las temperaturas promedio correspondientes.
- **Consideraciones Técnicas:** Se tuvieron en cuenta algunas consideraciones técnicas para garantizar la estabilidad y el rendimiento de la simulación a largo plazo:
 - **Optimización del Código:** Se realizaron ajustes en la estructura del código para reducir el consumo de recursos. Se optimizaron los bucles y las condiciones lógicas para minimizar cálculos innecesarios, y se reorganizaron procedimientos para mejorar la eficiencia de ejecución. Además, se redujo el uso excesivo de agentes cuando no era necesario, evitando sobrecargar la simulación.
 - **Almacenamiento de Datos:** Se incorporó un mecanismo para registrar los datos generados en intervalos regulares, permitiendo su posterior análisis. Los resultados se exportan en formato CSV, facilitando la interpretación en herramientas externas como Excel o Power BI. Esta estructura de almacenamiento permite evaluar tendencias y comparar distintos escenarios de simulación.

Impacto en la Simulación:

La ampliación de la duración de la simulación tiene un impacto significativo en la simulación:

- **Realismo:** El modelo se vuelve más realista al simular la dinámica estacional completa del dengue.
- **Análisis:** Permite analizar el impacto a largo plazo de las estrategias de control y evaluar su sostenibilidad.
- **Predicción:** Proporciona una base más sólida para predecir el curso de la epidemia y anticipar los picos de contagio a lo largo del año.

INCORPORACIÓN DE VARIACIÓN DE LA POBLACIÓN SEGÚN EL CLIMA

Para reflejar con mayor precisión la dinámica real del parque Ranelagh, lugar de análisis de este estudio, se incorporó al modelo la variación de la población humana según el clima. Se ha observado que la afluencia de personas al parque varía significativamente a

lo largo del año, con una mayor concentración durante los meses cálidos (primavera y verano) y una menor presencia durante los meses fríos (otoño e invierno).

La variación de la población humana según el clima es un factor importante a considerar en la modelización de enfermedades transmitidas por vectores, ya que influye directamente en la probabilidad de interacción entre humanos y mosquitos. En lugares como parques y espacios públicos al aire libre, la densidad de población puede aumentar significativamente durante los meses cálidos, lo que aumenta el riesgo de transmisión de enfermedades como el dengue.

Implementación en NetLogo:

La implementación de la variación de la población según el clima requirió la modificación de la lógica de creación y eliminación de agentes "Persona" en la simulación. Los pasos clave fueron:

- **Función de Variación de la Población:** Se definió una función que relaciona la estación del año (determinada por el Agente Climático) con la cantidad de agentes "Persona" presentes en la simulación. Esta función puede ser lineal, exponencial o seguir cualquier otro patrón que refleje la dinámica real de la población en el parque Ranelagh.
- **Actualización Periódica:** Se programó la ejecución periódica de la función de variación de la población en cada tick de la simulación, lo que garantiza que la cantidad de agentes "Persona" se ajuste constantemente a las condiciones climáticas.
- **Parámetros Ajustables:** Se agregaron parámetros ajustables para controlar la relación entre la estación del año y la cantidad de agentes "Persona", lo que permite simular diferentes escenarios y evaluar el impacto de la variación de la población en la propagación del dengue.

INCORPORACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE REPELENTE

Para simular una estrategia de prevención sanitaria, se implementó la distribución de repelente por parte del estado a la población, buscando reducir las interacciones entre mosquitos y personas y, por lo tanto, disminuir la probabilidad de transmisión del virus.

Implementación en NetLogo:

La implementación de la distribución de repelente requirió la modificación del agente "Persona" para incluir propiedades relacionadas con el repelente y la creación de un

mecanismo para simular la distribución estatal (Figuras 18, 19 y 20). Los pasos clave fueron:

- Propiedades del Repelente en Personas: Se agregaron dos propiedades al agente "Persona":
 - **repelente?**: Variable booleana que indica si la persona tiene repelente aplicado (verdadero) o no (falso).
 - **tiempo-repelente**: Variable numérica que indica el tiempo restante de efectividad del repelente en días simulados. Inicialmente, se establece en 0 (sin repelente).
- Distribución de Repelente por el Estado: Se implementó un procedimiento para simular la distribución de repelente por parte del estado. Este procedimiento se puede activar en momentos específicos de la simulación o mantenerse constante durante un período definido.
- Reducción de la Probabilidad de Picadura: Se modificó la lógica de picadura de los mosquitos para reducir la probabilidad de picar a personas con repelente. Se implementó una efectividad fija del 80% para el repelente [7], lo que significa que la probabilidad de picadura se reduce en un 80% si la persona tiene repelente aplicado.
- Expiración del Repelente: Se implementó una lógica para simular la expiración del repelente con el tiempo. En cada tick, se reduce el **tiempo-repelente** de las personas que tienen repelente aplicado. Cuando la variable **tiempo-repelente** llega a 0, la persona pierde la protección del repelente.

Impacto en la Simulación:

La implementación de la distribución de repelente tiene un impacto significativo en la simulación:

- Reducción de la Transmisión: El uso de repelente reduce la probabilidad de picadura y, por lo tanto, disminuye la transmisión del virus del dengue.
- Evaluación de Estrategias: Permite evaluar la efectividad de diferentes estrategias de distribución de repelente, como la cobertura poblacional y la frecuencia de aplicación.
- Planificación Sanitaria: Proporciona información valiosa para la planificación de intervenciones sanitarias y la asignación de recursos.

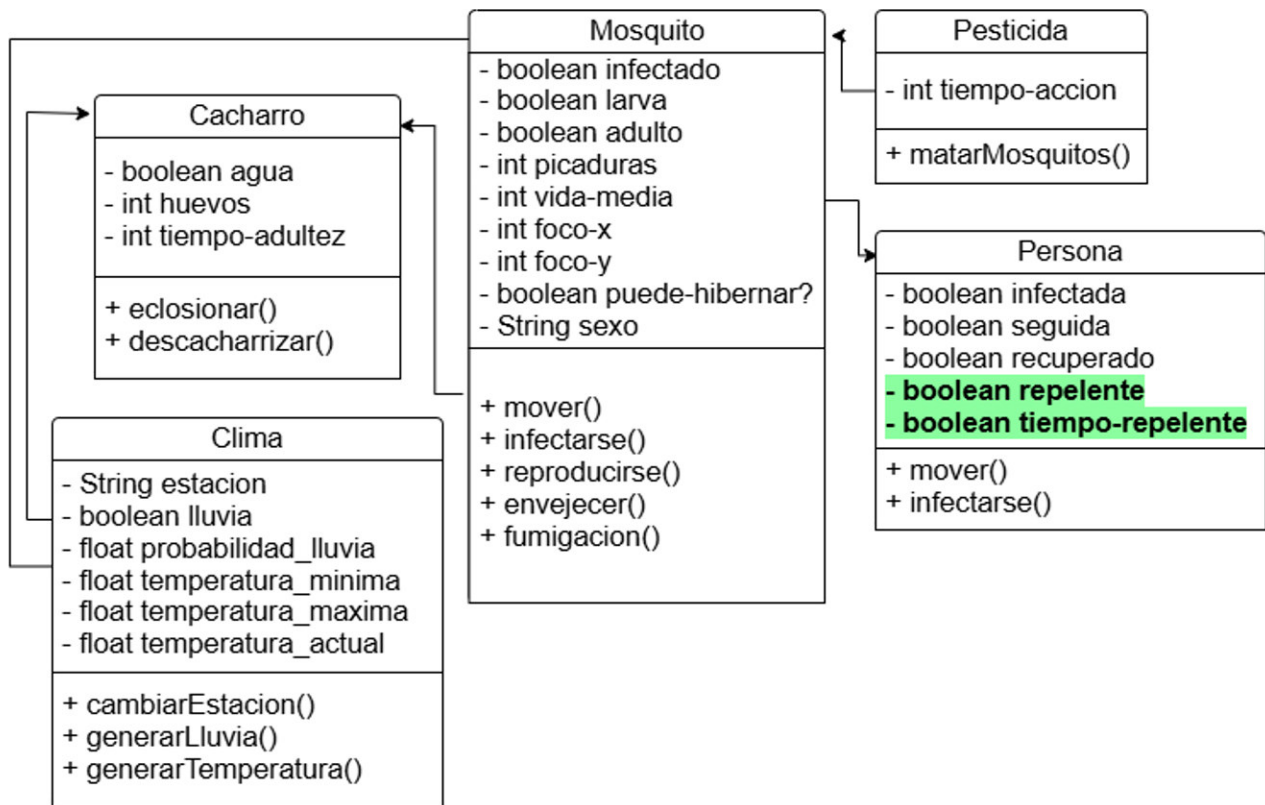


Figura 18: diagrama de clase de la mejora repelente

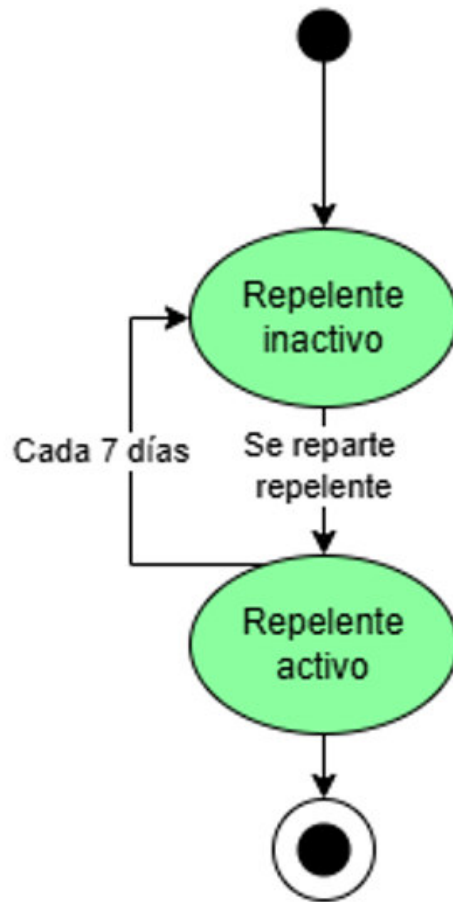


Figura 19: Máquina de estados de la mejora repelente

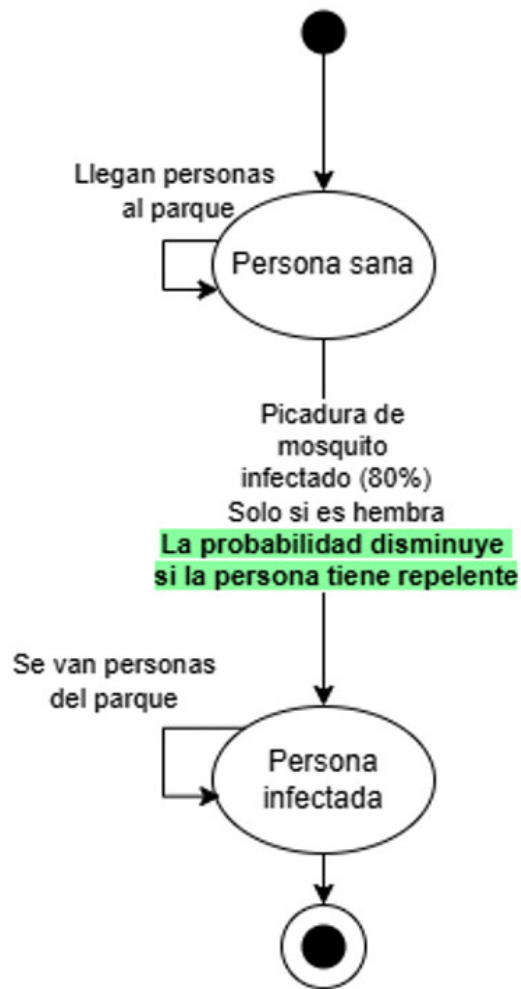


Figura 20: Máquina de estados de la mejora persona

ESCENARIOS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Para evaluar el rendimiento del modelo mejorado y su capacidad para simular diferentes situaciones epidemiológicas, se definieron cuatro escenarios de simulación específicos, basados en combinaciones de condiciones climáticas inusuales, cantidad de cacharros y la presencia o ausencia de distribución de repelente por parte del estado.

Escenarios de Simulación:

- **CASO 01: Temperaturas Inusuales y Sin Repelente del Estado:** Este escenario simula una situación donde se experimentan temperaturas atípicas para la época del año, favoreciendo la proliferación de mosquitos, y no se realiza ninguna distribución de repelente por parte del estado.

- **CASO 02: Temperaturas Inusuales y Con Repelente del Estado:** Similar al CASO 01, este escenario simula temperaturas inusuales, pero con la adición de una campaña de distribución de repelente por parte del estado para mitigar el impacto del aumento de mosquitos.
- **CASO 03: Cantidad Elevada de Cucharros y Sin Repelente del estado:** Este escenario, considerado como "Caso Crítico", simula una situación con una alta densidad de criaderos de mosquitos (el doble que el caso 01 y caso 02) y la ausencia de distribución de repelente por parte del estado, representando un ambiente propicio para la rápida propagación del dengue.
- **CASO 04: Cantidad Elevada de Cucharros y Con Repelente:** Similar al CASO 03, este escenario simula una alta densidad de cucharros (también el doble que el CASO 01 y CASO 02), pero con la implementación de una campaña de distribución de repelente por parte del estado para reducir la probabilidad de contagio.

Variable de Análisis:

Para evaluar la efectividad de cada escenario, se utilizó la tasa de contagio por cada 1000 habitantes como variable de análisis principal. Esta tasa se calcula dividiendo el número total de casos de dengue al final de la simulación por la población total, y multiplicando el resultado por 1000.

Número de Ejecuciones y Teorema de Tchebycheff:

Debido a la naturaleza estocástica del modelo (es decir, la presencia de elementos aleatorios en la simulación), los resultados pueden variar ligeramente de una ejecución a otra. Para obtener resultados robustos y representativos, es necesario ejecutar la simulación varias veces para cada escenario y calcular el promedio de la tasa de contagio.

Para determinar el número mínimo de ejecuciones necesarias para garantizar una precisión razonable en los resultados, se aplicó el Teorema de Tchebycheff [9]. Este teorema establece que, para cualquier distribución de datos, al menos $1 - \frac{1}{k^2}$ de los datos estarán dentro de k desviaciones estándar de la media.

En este caso, se buscó garantizar que al menos el 95% de los resultados estuvieran dentro de un margen de error aceptable. Aplicando el Teorema de Tchebycheff, se determinó que era necesario ejecutar la simulación al menos 16 veces para cada escenario.

La propuesta ha sido:

- Se elige un nivel de confianza de 95%, por lo que $\alpha = 0.05$
- $z_{\alpha/2} = 1,96$
- se toma $d = 0,5\sigma$

$$n = \frac{(\sigma \cdot z_{\alpha/2})^2}{d^2} = \frac{(\sigma)^2 (z_{\alpha/2})^2}{(0,5)^2 (\sigma)^2} = \frac{(z_{\alpha/2})^2}{(0,5)^2} = 4(1,96)^2 = 15,36$$

HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

POWER BI

Para analizar y visualizar los resultados de la simulación, se utilizó Power BI [10] como herramienta de visualización de datos. Power BI es una plataforma de inteligencia empresarial que permite crear informes interactivos y paneles de control (dashboards) a partir de datos provenientes de diversas fuentes.

Se eligió Power BI por varias razones clave:

- Capacidad de Integración con Diferentes Fuentes de Datos: Power BI permite importar datos desde archivos CSV, bases de datos y otras fuentes, lo que facilita la integración con los resultados exportados desde NetLogo.
- Interactividad y Personalización: Los dashboards creados en Power BI son altamente interactivos, permitiendo a los usuarios explorar los datos de manera dinámica y personalizar las visualizaciones según sus necesidades.
- Facilidad de Uso: A pesar de su potencia, Power BI es relativamente fácil de usar, incluso para usuarios sin experiencia previa en análisis de datos.
- Capacidad de Actualización Automática: Los informes en Power BI se pueden configurar para actualizarse automáticamente cuando se actualizan los datos subyacentes, lo que facilita el seguimiento continuo de los resultados.

Proceso de creación del dashboard:

El proceso se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Exportación de Datos desde NetLogo: Los resultados de la simulación se exportaron en archivos CSV desde NetLogo. Esto permitió capturar todos los datos

relevantes generados por el modelo, incluyendo las tasas de contagio, la población infectada y otros indicadores clave.

- Importación de Datos en Power BI: Los archivos CSV exportados se importaron en Power BI, donde se crearon tablas y relaciones para estructurar los datos de manera coherente.
- Creación del Dashboard: Se diseñó un dashboard interactivo que incluye gráficos de barras, líneas, mapas y otros elementos visuales para presentar los resultados de manera clara y concisa. El dashboard permite a los usuarios explorar los datos por diferentes escenarios, fechas y variables, facilitando el análisis comparativo y la identificación de tendencias.

Independencia y Adaptabilidad del Dashboard: Uno de los aspectos más destacados de la implementación es que el dashboard es independiente de los resultados específicos. Esto significa que, aunque los archivos CSV varían según los resultados de cada simulación, el dashboard se adapta automáticamente a los nuevos datos sin requerir modificaciones adicionales. Esta capacidad de adaptación es crucial para mantener la eficiencia en el análisis y la presentación de los resultados.

En la Figura 21 se muestra un ejemplo de un archivo .csv generado por Netlogo para luego ser importado en Power Bi

ticks	poblacion	poblacion-sana	poblacion-infectada	cantidad-mosquitos	cantidad-cacharros	temperatura	estacion	lluvia	dia	virulencia	tipo-dengue	mosquitos-pueden-hibernar	mosquitos-hibernando	cant-mosquitos	mosquitos-sanos
1	122	57	65	53	11.26.76	verano	false	1	80 DEN-2			12	0	53	49
2	122	12	110	53	11.26.76	verano	true	1	80 DEN-2			12	0	53	35
3	125	4	121	53	11.26.33	verano	false	1	80 DEN-2			12	0	53	20
4	125	1	124	53	11.26.33	verano	false	2	80 DEN-2			12	0	53	13
5	125	1	124	53	11.26.33	verano	true	2	80 DEN-2			12	0	53	11
6	134	10	124	53	11	18 verano	false	2	80 DEN-2			12	0	53	6
7	134	55	79	53	11	18 verano	false	3	80 DEN-2			12	0	53	6
8	134	67	67	53	11	18 verano	false	3	80 DEN-2			12	0	53	6
9	133	111	22	53	11	18 verano	false	3	80 DEN-2			12	0	53	6
10	133	117	16	53	11	18 verano	false	4	80 DEN-2			12	0	53	6
11	133	120	13	53	11	18 verano	false	4	80 DEN-2			12	0	53	6
12	137	124	13	53	11	19 verano	false	4	80 DEN-2			12	0	53	6
13	137	109	28	53	11	19 verano	false	5	80 DEN-2			12	0	53	5
14	137	116	21	53	11	19 verano	false	5	80 DEN-2			12	0	53	5
15	133	112	21	53	11	19 verano	false	5	80 DEN-2			12	0	53	5
16	133	106	27	53	11	19 verano	false	6	80 DEN-2			12	0	53	5
17	133	110	23	53	11	19 verano	false	6	80 DEN-2			12	0	53	5
18	144	121	23	53	11	19 verano	false	6	80 DEN-2			12	0	53	5
19	144	109	35	53	11	19 verano	false	7	80 DEN-2			12	0	53	5
20	144	104	20	53	11	19 verano	false	7	80 DEN-2			12	0	53	5
21	142	123	19	53	11	19 verano	false	7	80 DEN-2			12	0	53	5
22	142	111	31	53	11	19 verano	false	8	80 DEN-2			12	0	53	5
23	142	117	25	53	11	19 verano	false	8	80 DEN-2			12	0	53	5
24	143	119	24	53	11	19 verano	false	8	80 DEN-2			12	0	53	5
25	143	104	39	53	11	19 verano	false	9	80 DEN-2			12	0	53	5
26	143	116	27	53	11	19 verano	false	9	80 DEN-2			12	0	53	4
27	157	130	27	53	11.25.99	verano	false	9	80 DEN-2			12	0	53	3
28	157	116	41	53	11.25.99	verano	false	10	80 DEN-2			12	0	53	2
29	157	128	29	53	11.25.99	verano	false	10	80 DEN-2			12	0	53	1
30	149	120	29	53	11.23.1	verano	false	10	80 DEN-2			12	0	53	1
31	149	109	40	53	11.23.1	verano	true	11	80 DEN-2			12	0	53	1
32	149	124	25	53	11.23.1	verano	true	11	80 DEN-2			12	0	53	1
33	148	123	25	53	11.27.79	verano	false	11	80 DEN-2			12	0	53	0
34	148	121	27	53	11.27.79	verano	false	12	80 DEN-2			12	0	53	0
35	148	135	13	53	11.27.79	verano	false	12	80 DEN-2			12	0	53	0
36	142	129	13	53	11.37.91	verano	false	12	80 DEN-2			12	0	53	0
37	142	118	24	53	11.37.91	verano	false	13	80 DEN-2			12	0	53	0

Figura 21: Archivo .csv generado por la simulación para su posterior análisis

En dicho archivo se exportan los valores en que tienen las variables en ese instante de tiempo. Algunos de los campos que se exportan son:

- **ticks:** Representa la unidad de tiempo actual en la simulación.

- **poblacion:** Indica el número total de individuos simulados en ese instante. Permite observar la dinámica general de la población a lo largo del tiempo.
- **poblacion-sana:** Cantidad de individuos susceptibles a contraer la enfermedad.
- **poblacion-infectada:** Cantidad de individuos que están infectados con Dengue.
- **temperatura:** Representa la temperatura ambiente en el entorno simulado.
- **lluvia:** Indica si en ese momento se encuentra lloviendo o no.
- **cant-repelente:** Indica la cantidad de personas que actualmente se encuentran utilizando repelente.
- **estación:** Indica la estación del año en el momento actual de la simulación.
- **virulencia:** Representa el nivel de virulencia del serotipo de Dengue simulado.
- **tipo-dengue:** Identifica el serotipo de Dengue presente en la simulación.
- **mosquitos-pueden-hibernar:** Variable booleana que indica la cantidad de mosquitos en la simulación que tienen la capacidad de hibernar.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se adjunta el dashboard finalizado para un caso de simulación ejecutado con las siguientes características:

- Sin repelente por parte del estado
- Con temperaturas inusuales

Hoja Nro 1 (Figura 22)

Muestra un resumen de toda la simulación, indicando:

- Población total que se ha generado
- Cuántas personas han resultado infectadas.
- Serotipo de dengue utilizado
- Gráfico que muestra cómo ha variado la tasa de contagio por cada 1.000 personas a lo largo de toda la simulación
- Cantidad de mosquitos totales y cuantos infectados

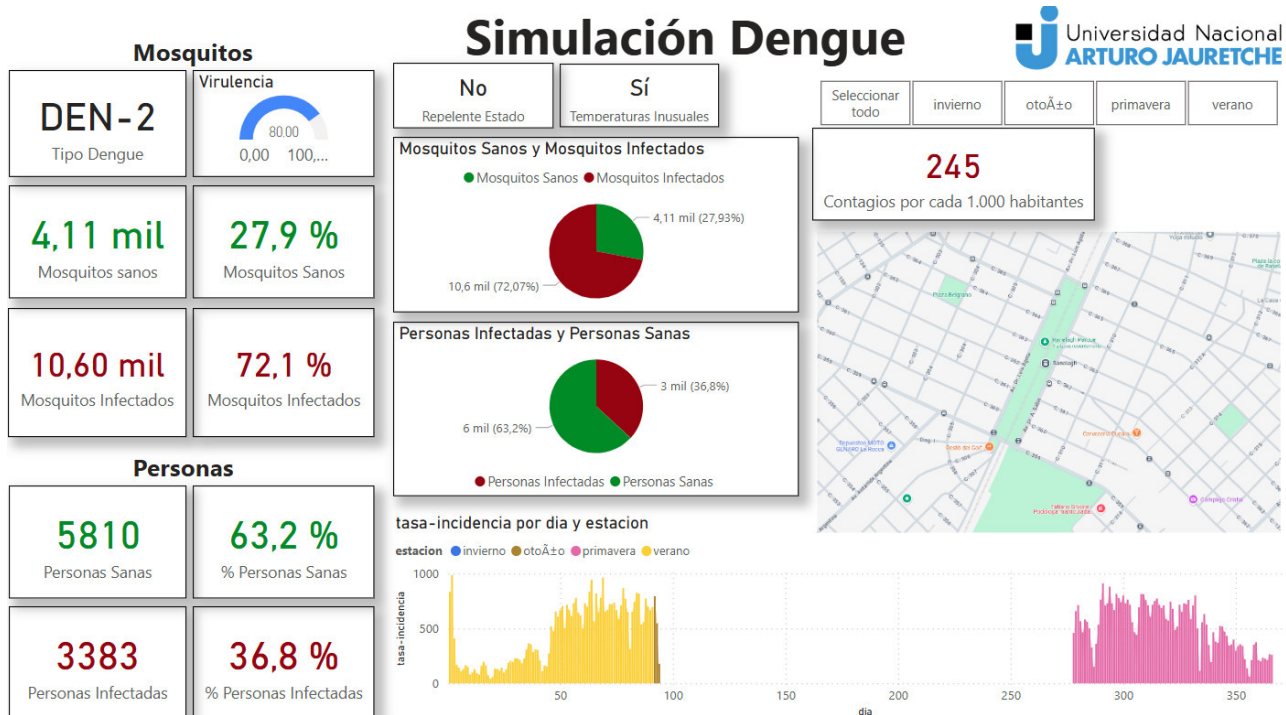


Figura 22: Dashboard hoja resumen

Todo puede ser filtrado según la estación del año que se desee, por ejemplo se ha seleccionado Verano en la Figura 23

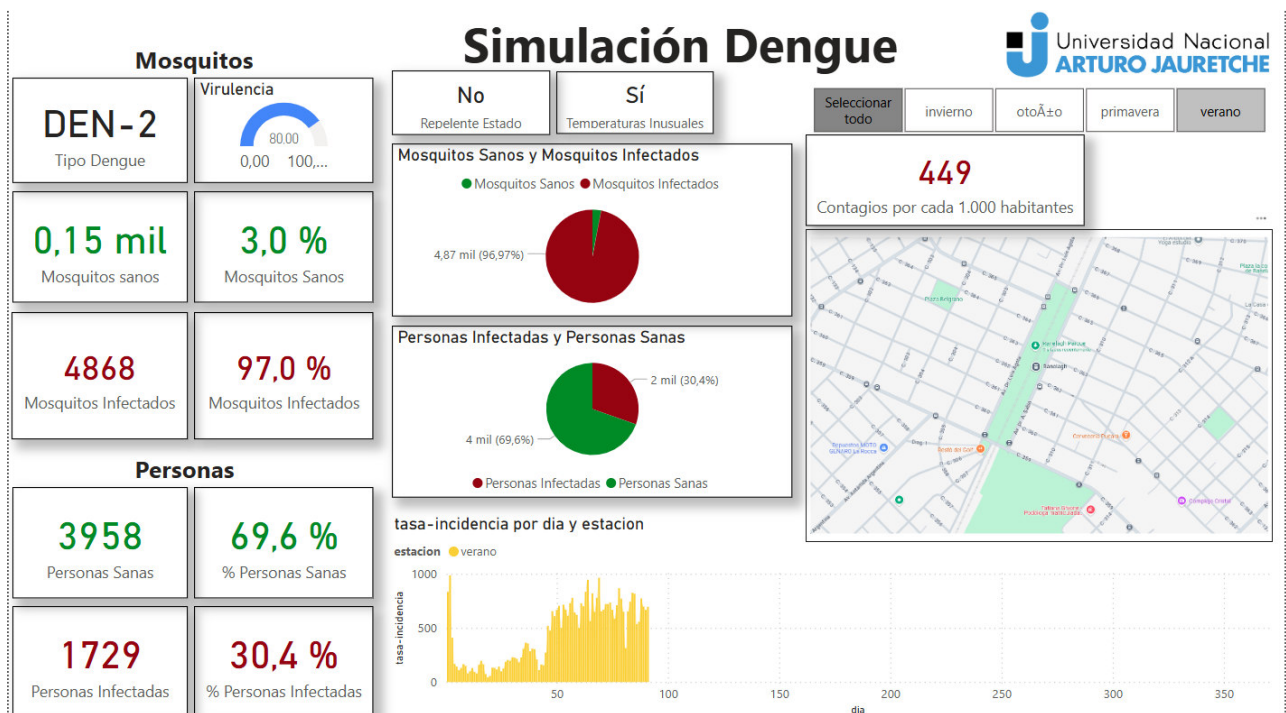


Figura 23: Dashboard hoja resumen filtrada por verano

O primavera (Figura 24)...

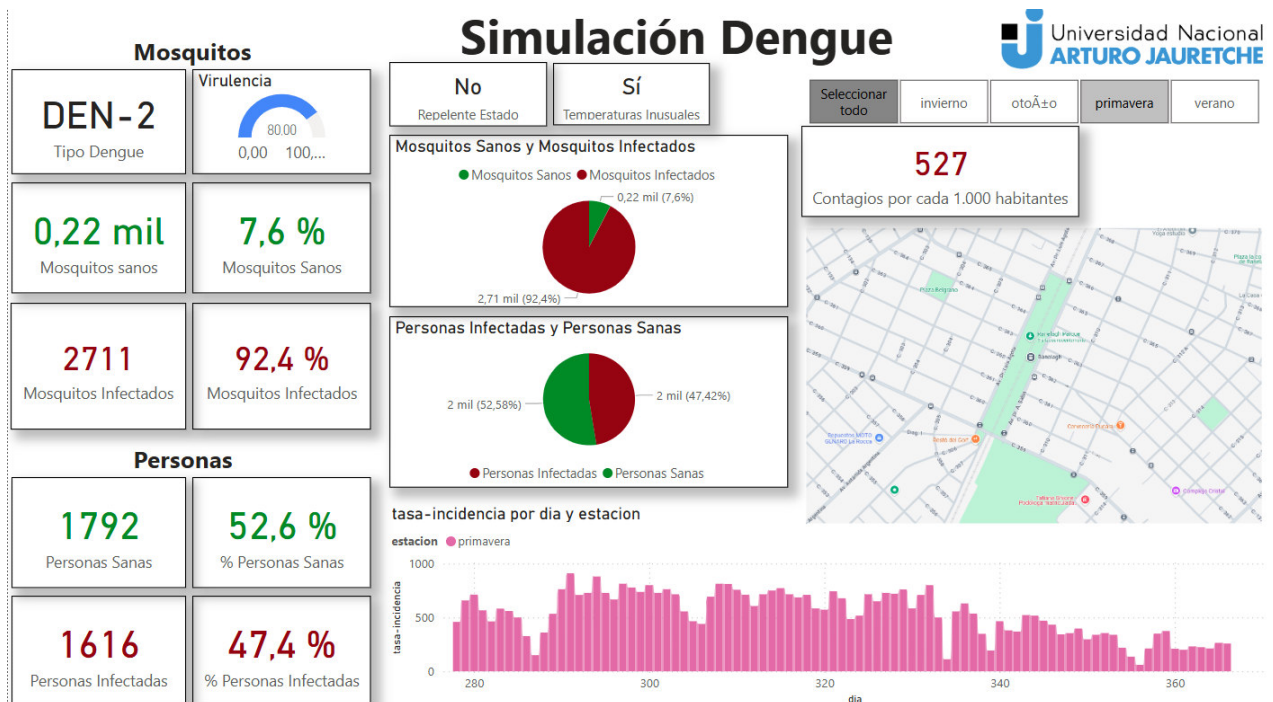


Figura 24: Dashboard hoja resumen filtrada por primavera

Hoja Nro 2 (Figura 25)

Muestra mediante gráficos el comportamiento del clima durante toda la simulación. Indicando datos de interés como maximos o minimos tambien segun cada estación

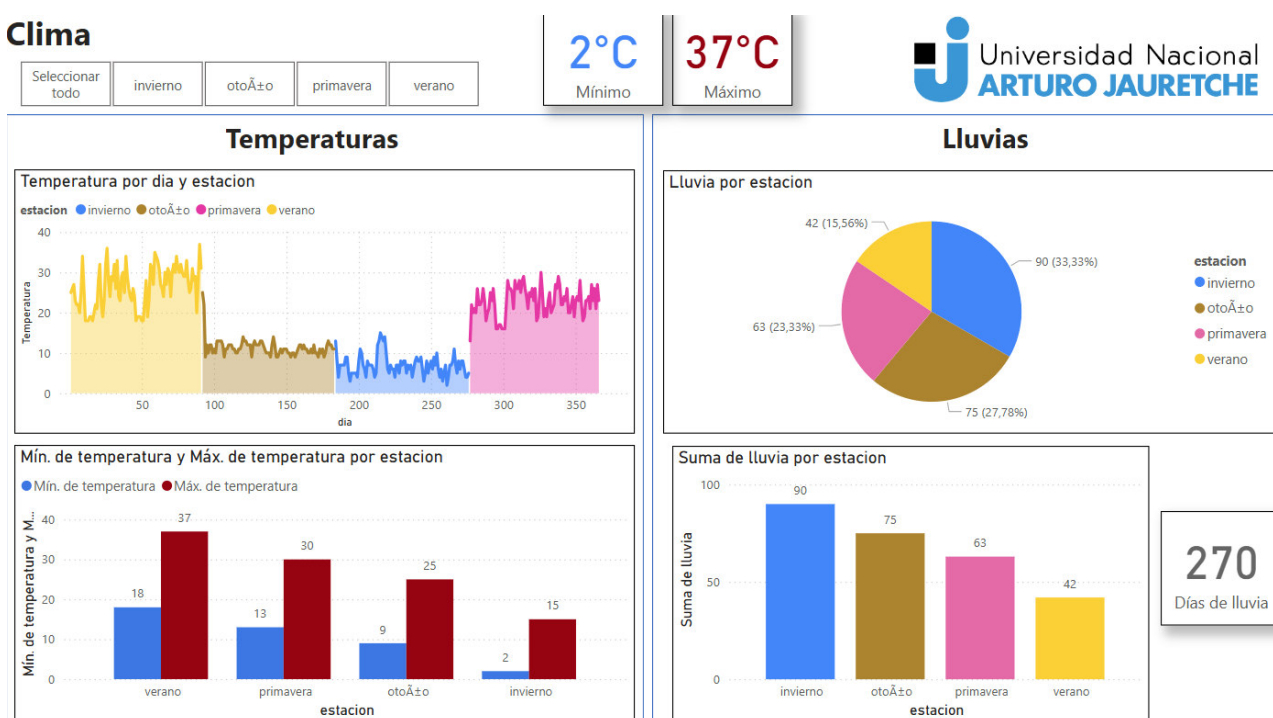


Figura 25: Dashboard hoja clima

Hoja Nro 3 (Figura 26)

Muestra el comportamiento de las personas durante toda la simulación. Se puede observar mayor presencia de las mismas durante los meses cálidos, tal como sucede en la realidad

Personas

5810
 Personas Sanas

3383
 Personas Infectadas

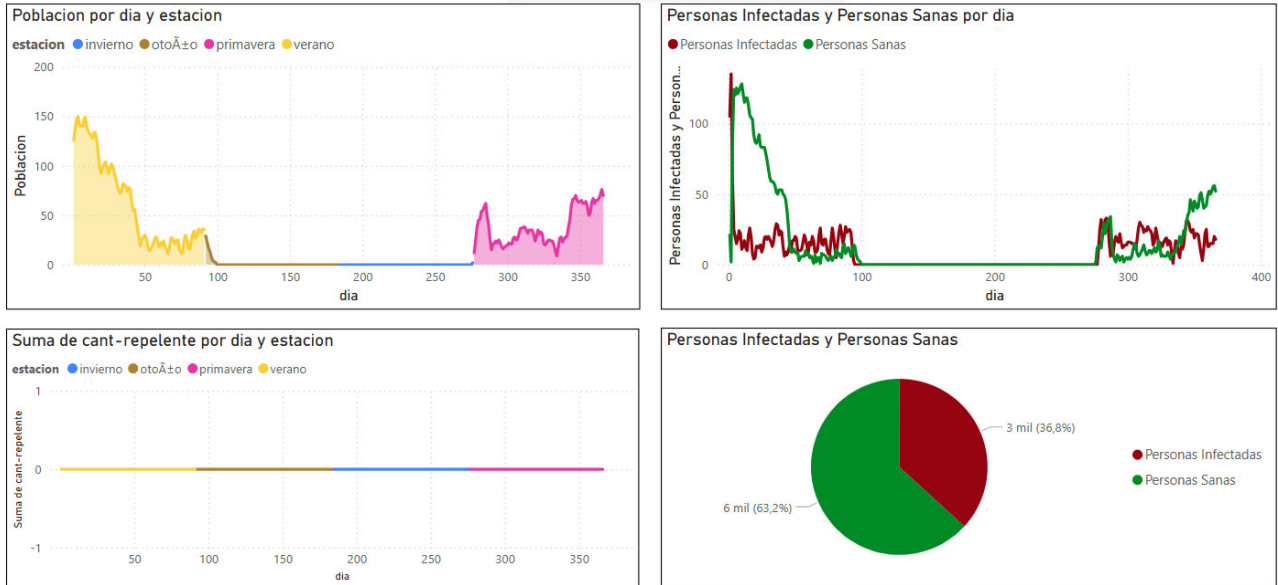


Figura 26: Dashboard hoja personas

Hoja Nro 4 (Figura 27)

Muestra el comportamiento de los mosquitos durante el periodo analizado. Se puede ver claramente como en invierno cuando hubo una temperatura inusual por algunos días, los mosquitos dejaron de hibernar y comenzaron a reproducirse para luego volver a su estado diapausa hasta el comienzo de la primavera

Mosquitos

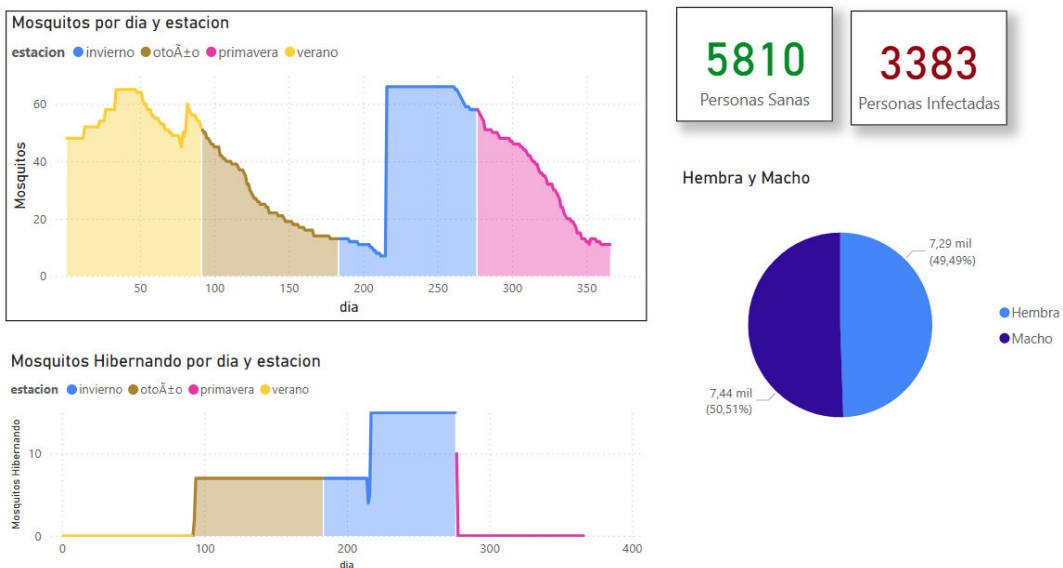
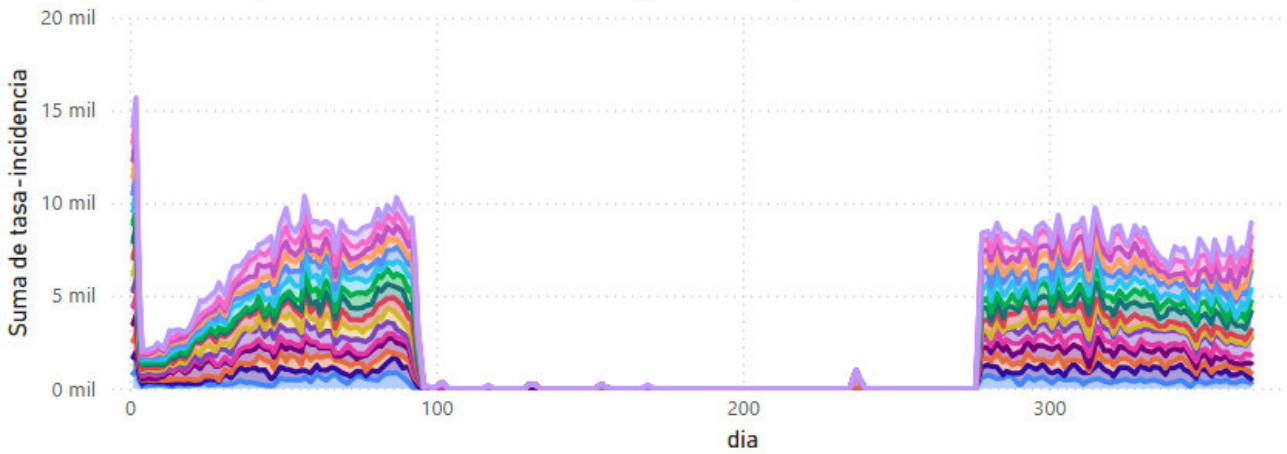


Figura 27: Dashboard hoja mosquitos

Resultados Obtenidos:

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada escenario, mostrando la tasa de contagio promedio por cada 1000 habitantes (Figuras 28, 29, 30 y 31):

Caso 01: Temperaturas inusuales y SIN repelente del estado



Caso 02: Temperaturas inusuales y CON repelente del estado

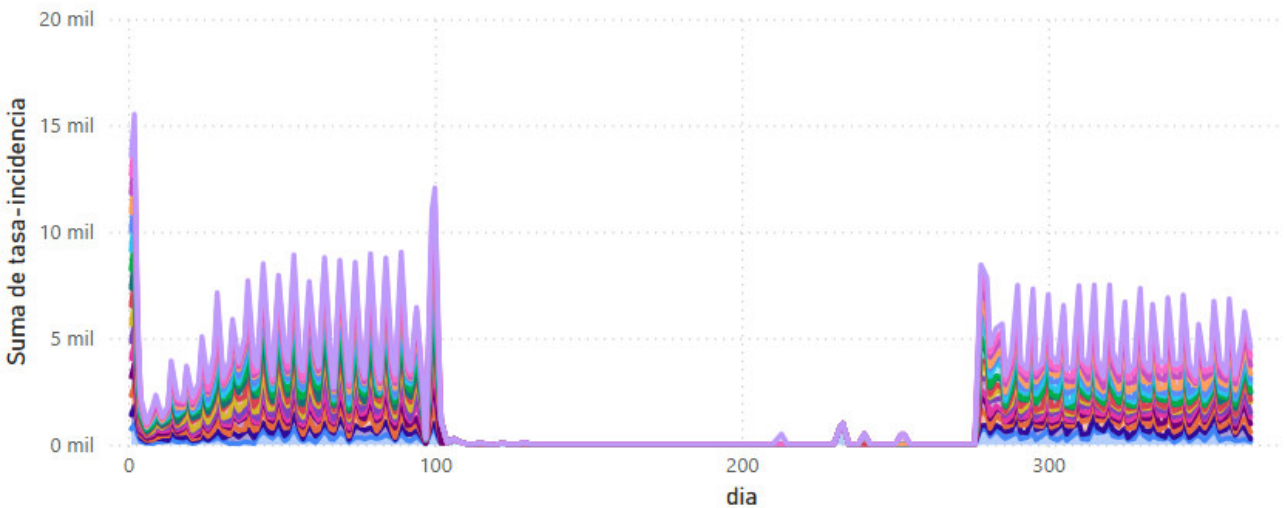


Figura 28: Dashboard hoja CASO 01 y 02 gráfico

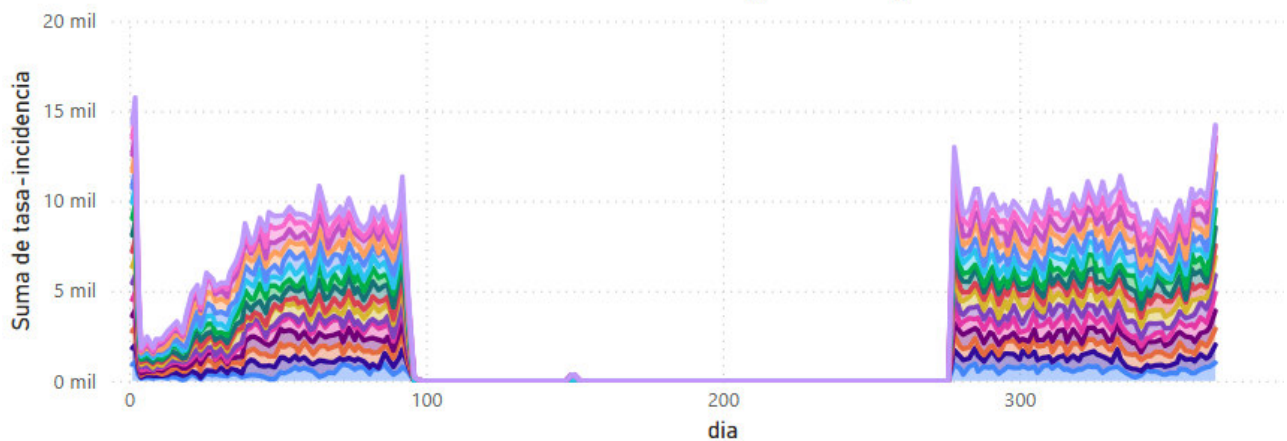
Valores de referencia por cada 1.000 habitantes



Figura 29: Dashboard hoja CASO 01 y 02 resultados por cada 1000 habitantes

CASO 03 y CASO 04

Caso 03: Cantidad elevada de cacharros y SIN repelente del estado



Caso 04: Cantidad elevada de cacharros y CON repelente del estado

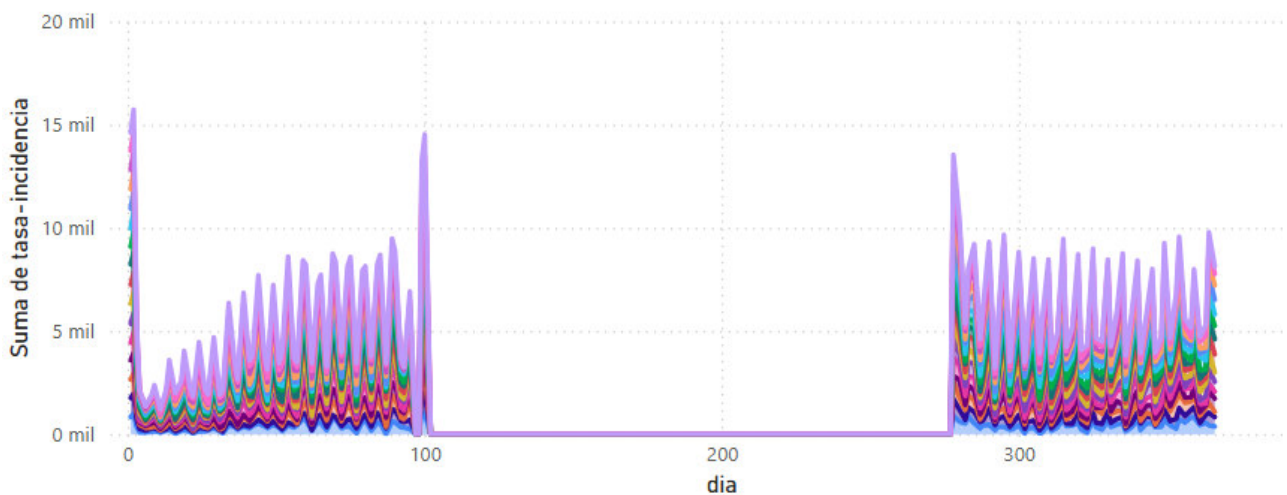


Figura 30: Dashboard hoja CASO 03 y 04 gráfico

Valores de referencia por cada 1.000 habitantes



Figura 31: Dashboard hoja CASO 03 y 04 resultados por cada 1000 habitantes

Análisis de los Resultados:

Los resultados muestran que el CASO 03 (Cantidad Elevada de Cacharros y Sin Repelente) presenta la tasa de contagio más alta, confirmando su condición de escenario crítico (Figura 30 y 31). Esto subraya la importancia de controlar los criaderos de mosquitos para prevenir la propagación del dengue.

La comparación entre el CASO 01 (Temperaturas Inusuales y Sin Repelente) y el CASO 02 (Temperaturas Inusuales y Con Repelente) revela el impacto positivo de la distribución de repelente en la reducción de la tasa de contagio, incluso en condiciones climáticas desfavorables (Figura 28 y 29).

De manera similar, la comparación entre el CASO 03 (Cantidad Elevada de Cacharros y Sin Repelente) y el CASO 04 (Cantidad Elevada de Cacharros y Con Repelente) demuestra la efectividad del repelente en mitigar el riesgo de contagio en situaciones de alta densidad de criaderos de mosquitos (Figura 30 y 31).

Discusión:

Estos resultados sugieren que la distribución de repelente por parte del estado puede ser una estrategia efectiva para reducir la propagación del dengue, especialmente en situaciones de riesgo como temperaturas inusuales o alta densidad de criaderos de mosquitos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la efectividad del repelente puede depender de factores como la cobertura poblacional, la frecuencia de aplicación y la adherencia de la población a las recomendaciones sanitarias.

Además, es importante destacar que el modelo de simulación tiene algunas limitaciones y que los resultados deben interpretarse con precaución. Sin embargo, el modelo proporciona una herramienta valiosa para explorar diferentes escenarios y evaluar el impacto de diferentes estrategias de control del dengue.

LIMITACIONES DE LA SIMULACIÓN

Es importante reconocer las limitaciones del modelo de simulación y tener en cuenta que los resultados deben interpretarse con precaución. Algunas de las principales limitaciones son:

- Simplificaciones: El modelo simplifica algunos aspectos de la realidad, como la movilidad de las personas, la distribución espacial de los criaderos de mosquitos y la complejidad de las interacciones entre los agentes.
- Parámetros: Algunos parámetros del modelo se basan en estimaciones o datos limitados, lo que puede afectar la precisión de los resultados.
- Aspectos Económicos: No se han considerado los costos asociados a cada intervención, lo cual es crucial para la toma de decisiones en salud pública.
- Parque Ranelagh: Si bien los resultados aplican al parque, idealmente se debería ejecutar sobre toda la ciudad y no sobre un barrio.

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido el desarrollo y la optimización de un modelo de simulación para el estudio de la propagación del dengue, integrando mejoras significativas en la representación de la dinámica de transmisión de la enfermedad y en la evaluación de estrategias de control. A través de la implementación de un modelo basado en agentes en NetLogo, se han incorporado variables clave como la diferenciación entre mosquitos macho y hembra, la hibernación de los vectores en respuesta a condiciones climáticas y la simulación de la distribución de repelente por parte del Estado.

Los resultados obtenidos evidencian la relevancia de los factores ambientales y de intervención en la evolución de los brotes de dengue. En particular, el análisis de distintos escenarios ha permitido demostrar que la aplicación sistemática de medidas de control, como la eliminación de criaderos y la distribución de repelente, puede reducir de manera significativa la tasa de contagio en la población. Asimismo, la simulación de temperaturas inusuales ha puesto de manifiesto la influencia del cambio climático en la propagación de la enfermedad, resaltando la necesidad de adaptar las estrategias de prevención a nuevas condiciones epidemiológicas.

Desde una perspectiva metodológica, la integración de herramientas de visualización de datos mediante Power BI ha permitido analizar de manera más efectiva los resultados obtenidos, facilitando la identificación de tendencias y patrones en la propagación del virus. Este enfoque no solo ha contribuido a validar la utilidad del modelo desarrollado, sino que también ha abierto nuevas oportunidades para su aplicación en la toma de decisiones en salud pública.

No obstante, es importante reconocer las limitaciones del modelo propuesto. La simulación se ha centrado en un área geográfica específica y ha simplificado ciertas variables, como la movilidad humana y la heterogeneidad socioeconómica de la población. Además, algunos parámetros han sido ajustados en función de estimaciones, lo que sugiere la necesidad de una validación más exhaustiva con datos reales para mejorar la precisión de las predicciones.

TRABAJO A FUTURO

Si bien el modelo de simulación desarrollado representa un avance significativo en la comprensión y simulación de la dinámica de transmisión del dengue, existen varias áreas en las que se podría mejorar y expandir el modelo en futuras investigaciones.

1. Modelado de la Coinfección y la Inmunidad Cruzada: El modelo podría extenderse para simular la coinfección con diferentes serotipos de dengue y la inmunidad cruzada entre los serotipos. Esto permitiría comprender mejor la dinámica de la enfermedad y evaluar el impacto de las vacunas y otras estrategias de inmunización.
2. Análisis Costo-Efectividad de las Intervenciones: El modelo podría utilizarse para realizar análisis costo-efectividad de las diferentes estrategias de control del dengue, teniendo en cuenta los costos asociados a cada intervención y su impacto en la reducción de la propagación de la enfermedad. Esto permitiría identificar las estrategias más eficientes para asignar los recursos de manera óptima.
3. Georreferenciación (GIS): Integrar un Sistema de Información Geográfica (GIS) para modelar la distribución espacial de los agentes y los criaderos de mosquitos. Aunque se considera que GIS agregaría un desarrollo costoso en tiempo, permitiría simular la dinámica del dengue con mayor realismo y precisión, considerando la distribución espacial de la población, los criaderos de mosquitos y los recursos disponibles para el control de la enfermedad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS). «Emergencias sanitarias: brotes de enfermedades» [Sitio web]. Disponible en: <https://www.who.int/es/emergencies/disease-outbreak-news/item/2023-DON498> [Último acceso: 2025]
- [2] López, D., Gómez, M., & Rodríguez, P. «Análisis epidemiológico del dengue en Colombia» [Artículo en línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-00642013000500007 [Último acceso: 2025]
- [3] A. Gache, M. J. Bianco, P. D. Cruz y A. D. Fraquelli, «Modelo epidemiológico SIR: Una aplicación de las ecuaciones diferenciales al SARS-CoV-2 (COVID-19)», Revista de Investigación en Modelos Matemáticos aplicados a la Gestión y la Economía, vol. 7, n.º 1, pp. 16-38, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2016/04/Gache-Andrea-.pdf> [Último acceso: abril de 2025]
- [4] FasterCapital. «Modelado basado en agentes: exploración de sistemas complejos» [En línea]. Disponible en: <https://fastercapital.com/es/contenido/Modelado-basado-en-agentes--exploracion-de-sistemas-complejos-con-simulacion-de-modelos-basados---en-agentes.html> [Último acceso: 2025]
- [5] Sancho, F. «Fundamentos de NetLogo» [Blog]. Universidad de Sevilla. Disponible en: https://www.cs.us.es/~fsancho/Blog/posts/NetLogo_Fundamentos.md.html [Último acceso: 2025]
- [6] Ciencias con TIC. «Simulación del dengue v14 en NetLogo 5» [Sitio web]. Disponible en: <https://cienciascontic.github.io/simuladores/dengue-v14-NL5.html> [Último acceso: 2025]
- [7] Vélez, S., Núñez, C. P., & Ruiz, D. (2006). Hacia la construcción de un modelo de simulación de la transmisión del dengue en Colombia. Revista EIA, (5), 23-43. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149216902002.pdf> [Último acceso: 2025]
- [8] University of Florida IFAS. «As climates change, prepare for more mosquitoes in winter, new study shows» [Sitio web]. Disponible en: <https://blogs.ifas.ufl.edu/news/2021/06/10/as-climates-change-prepare-for-more-mosquitoes-in-winter-new-study-shows/> [Último acceso: 2025]

- [9] I. Hernández Noriega, «La desigualdad de Chebyshev: aplicaciones y resultados relacionados», Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://lic.mat.uson.mx/tesis/120TesisIsmael.PDF> [Último acceso: abril de 2025]
- [10] Microsoft. «Introducción a Power BI» [Sitio web]. Disponible en: <https://learn.microsoft.com/es-es/power-bi/fundamentals/power-bi-overview> [Último acceso: 2025]
- [11] Argentina.gob.ar. «¿Qué es el dengue?» [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/salud/mosquitos/queesdengue> [Último acceso: 2025]
- [12] Organización Panamericana de la Salud. «Dengue» [En línea]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/dengue> [Último acceso: 2025]
- [13] Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. «Plan dengue y otras enfermedades transmitidas por mosquitos Aedes aegypti» [En línea]. Disponible en: <https://buenosaires.gob.ar/salud/plan-dengue-y-otras-enfermedades-transmitidas-por-mosquitos-aedes-aegypti/que-es-el-dengue> [Último acceso: 2025]
- [14] Argentina.gob.ar. «Dengue» [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/salud/dengue> [Último acceso: 2025]
- [15] Organización Mundial de la Salud. «Dengue y dengue grave» [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue> [Último acceso: 2025]
- [16] Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC). «Acerca del dengue» [En línea]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/dengue/es/about/acerca-del-dengue.html> [Último acceso: 2025]
- [17] MedlinePlus. «Dengue» [En línea]. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/dengue.html> [Último acceso: 2025]
- [18] Hospital Alemán. «Prevención: Dengue, lo que hay que saber» [En línea]. Disponible en: <https://www.hospitalaleman.org.ar/prevencion/dengue-lo-saber/> [Último acceso: 2025]
- [19] MedlinePlus. «Dengue» [En línea]. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/001374.htm#:~:text=Es%20una%20enfermedad%20causada%20por,sangrando%20interno%2C%20y%20la%20muerte> [Último acceso: 2025]
- [20] Universidad Católica de Salta. «La importancia del dengue en la salud pública: un enfoque desde la epidemiología» [En línea]. Disponible en: <https://revistas.ucasal.edu.ar/index.php/CI/article/view/37> [Último acceso: 2025]

- [21] Wikipedia. «Modelo basado en agente» [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_basado_en_agente [Último acceso: 2025]
- [22] Ivorra, M. «Modelos basados en agentes y su aplicación en epidemiología» [PDF]. Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <https://www.mat.ucm.es/~ivorra/papers/tfg-maria.pdf> [Último acceso: 2025]
- [23] Wikipedia. «Modelos compartimentales en epidemiología» [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Modelos_compartimentales_en_epidemiolog%C3%ADa [Último acceso: 2025]
- [24] Northwestern University Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. «¿Qué es NetLogo?» [PDF]. Disponible en: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/resources/Que%20es%20NetLogo.pdf> [Último acceso: 2025]
- [25] Wikipedia. «NetLogo» [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/NetLogo> [Último acceso: 2025]
- [26] Northwestern University Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. «Guía de programación de NetLogo» [PDF]. Disponible en: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/resources/Guia%20de%20programacion%20de%20NetLogo.pdf> [Último acceso: 2025]
- [27] Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). «Introducción a NetLogo» [PDF]. Disponible en: https://www.saree.com.mx/unam/sites/default/files/LECCION_2_INTRO_NETLOGO.pdf [Último acceso: 2025]