

Atributos de Agentes y Ambiente en el Modelo ABM de Transmisión del Dengue (Versión Adaptada sin GIS)

Basado en Jindal & Rao (2017)
Adaptado por Yeison Adrián Cáceres Torres

2025

1. Introducción

Este documento presenta la descripción estructurada de los **atributos de los agentes y del entorno** empleados en el modelo de simulación basado en agentes para representar la transmisión del dengue. Las definiciones se basan en el trabajo de Jindal & Rao (2017), pero han sido **adaptadas a un entorno sintético**, es decir, un espacio simulado de tipo cuadrícula sin dependencia de datos geográficos reales (GIS).

ragged2e

2. Parámetros y Valores (extraídos / usados en el paper base)

Fuente principal: Jindal & Rao (2017), Agent-Based Modeling and Simulation of Mosquito-Borne Disease Transmission.

2.1. Mosquito Agent

Atributo	Símbolo	Descripción	Valor seteado	Fuente / Referencia
Flying speed	Fs	Velocidad de vuelo promedio del mosquito	0.0–1.0 km/h	Jindal & Rao (2017), tomado de ref. [5].
Maximum distance	Fr	Distancia máxima de desplazamiento diario	350 m	Jindal & Rao (2017), ref. [45].
Active start / end period	As, Ae	Horas activas diarias del mosquito	07:00–18:00	Paper base, ref. [8].
Maximum meals per day	Mm	Máx. picaduras diarias	1 (fijo)	Ajustado por calibración (trained).
Mortality rate	Mr	Probabilidad diaria de muerte natural	0.05 /día	Ajustado, referencia [45].
Probability of mating	Pm	Prob. de reproducción exitosa	0.2	Ajustado por calibración.
Ovipositioning characteristic	Oc	Deposita huevos en uno o varios sitios	1 (múltiples)	Paper base, ref. [8].
Sex ratio	Pf	Proporción de hembras	0.5	Fijado, calibrado.
Sensory range	Sr	Radio de detección de humanos	3 m	Ajustado, sensibilidad óptima.
Temperature		Temperatura ambiental local	variable (°C)	Clima diario simulado.
Egg maturation time		Tiempo de maduración de huevos	$\tau = 3 + \frac{ \theta - 21 }{5}$ días	Fórmula en Jindal & Rao (2017).
Egg-to-adult time		Tiempo de desarrollo huevo→adulto	$\mu = 8 + \theta - 25 $ días	Derivado del paper base.

Meals count	—	Picaduras realizadas en el día	dinámico	Estado interno del agente.
Age	—	Edad del mosquito	dinámico	Interno del modelo.
Carrying eggs	—	Indica si porta huevos	booleano	Determinado por Pm.
Infection state	—	Estado epidemiológico (S/I)	categorico	Ciclo SI del paper.

2.2. Human Agent

Atributo	Símbolo	Descripción	Valor seteado	Fuente / Referencia
Infection state	—	Estado epidemiológico del humano	S, E, I, R (SEIR)	Jindal & Rao (2017).
Days in state	—	Días transcurridos en el estado actual	dinámico	Implementación SEIR.
Exposure duration	Ne	Duración del estado Expuesto	2–6 días	Ref. [9].
Infection duration	Ni	Duración del estado Infectado	4–7 días	Ref. [9].
Chronic infection prob.	Pirc	Prob. de infección crónica	0.95	Ref. [9].
Recovered→Susceptible prob.	Prc	Prob. de volver a ser susceptible	0	Ref. [48].
Agent type	—	Tipo de agente según movilidad o edad	1–4	Definido en modelo.
Daily mobility pattern	—	Patrón hogar–trabajo–parque	lista / secuencia	Determinístico o aleatorio.
Prob. visit park (Type 1)	Pp1	Probabilidad de visitar parque	0.5	Ajustado (trained).
Prob. visit park (Type 2)	Pp2	Probabilidad de visitar parque	0.1	Ajustado (trained).
Position	—	Posición en la cuadrícula	(x, y)	Dinámico.
Destination	—	Próxima celda destino	(x, y)	Dinámico.
Interaction count	—	Número de picaduras recibidas	entero	Dinámico.

2.3. Environment (Entorno Simulado)

Atributo	Variable	Descripción	Valor seteado / Ejemplo	Fuente / Referencia
Grid size	—	Dimensiones de la cuadrícula	configurable	Paper base (GIS → cuadrícula simulada).
Temperature	T(t)	Temperatura diaria	serie diaria (°C)	Ref. [38], datos meteorológicos.
Precipitation	P(t)	Precipitación diaria	serie diaria (mm)	Ref. [38].
Water sources	—	Celdas con criaderos disponibles	derivados de lluvia	Descrito en el paper.
Temporary puddles	—	Criaderos temporales	duran <7 días	Jindal & Rao (2017).
Permanent breeding sites	—	Criaderos permanentes	fijos	Paper base.
Human population	Nh	Número inicial de humanos	500–1000	Paper base, sección de resultados.
Mosquito population	Nm	Número inicial de mosquitos	500–2000	Paper base.
Mosquito eggs	Ne	Número inicial de huevos	500	Paper base.
Time step	—	Duración del ciclo de simulación	1 día	Fijo.
Intervention coverage	—	Cobertura de control vectorial	configurable (0–1)	Escenarios de control.
Cell type	—	Tipo de celda (urbana, agua, parque)	categorico	Definido en el modelo.

2.4. Interacciones de Transmisión

Evento	De → Hacia	Valor / Probabilidad	Fuente / Referencia
Infección mosquito → humano	Mosquito (I) → Humano (S)	$\alpha = 0,6$	Ref. [17], paper base.
Infección humano → mosquito	Humano (I) → Mosquito (S)	$\beta = 0,275$	Ref. [17].
Infección vertical (huevos)	Mosquito (I) → Huevos	implícita	Descrito en sección 2.1.4.
Reproducción (puesta)	Mosquito + Pm	100 huevos / puesta, Pm=0.2	Paper base, sección 2.1.3.
Inicial infectados humanos	—	2 humanos infectados	Caso de estudio (ref. [47]).

3. Diagrama UML del Modelo ABM del Dengue (Versión sin GIS)

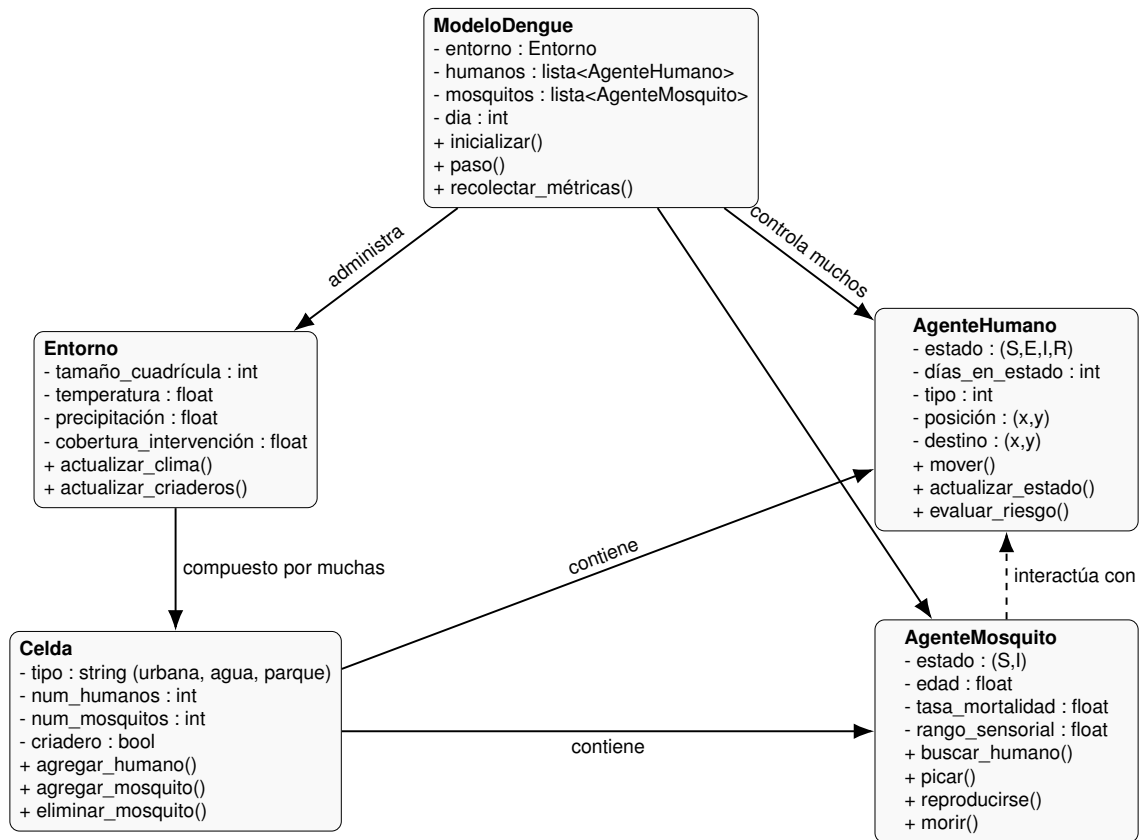


Figura 1: Diagrama UML del modelo ABM del dengue (ajustado a página).

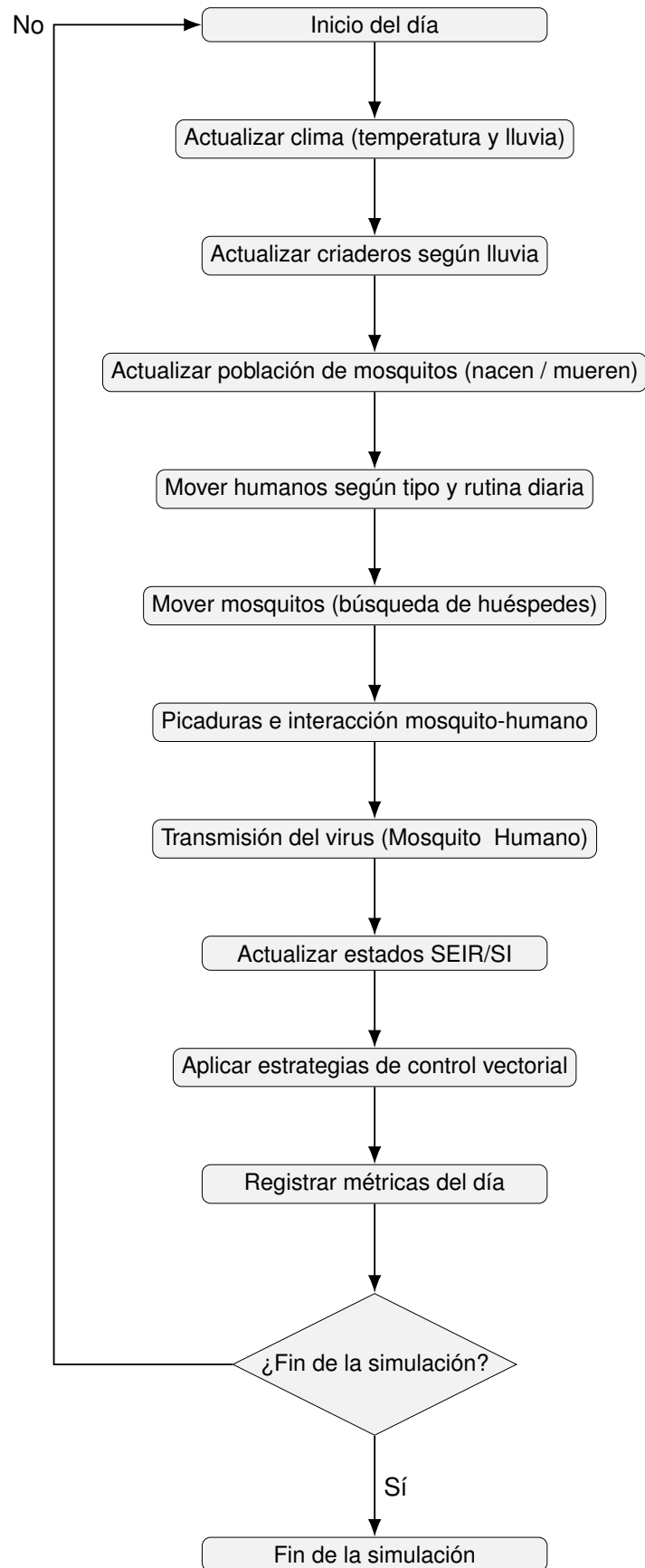


Figura 2: Flujo diario del ciclo de simulación en el modelo ABM del dengue.

4. Modelo SEIR en la Simulación Basada en Agentes

El modelo epidemiológico **SEIR** (Susceptible–Expuesto–Infectado–Recuperado) constituye la base conceptual del proceso de infección empleado en nuestra simulación. Siguiendo el enfoque presentado por Jindal y Rao (2017), el modelo no se implementa mediante ecuaciones diferenciales continuas, sino como una **máquina de estados** integrada dentro de un modelo basado en agentes (ABM), en el cual cada agente humano y vector (mosquito) transita entre estados discretos de salud conforme a probabilidades y tiempos promedio definidos empíricamente.

En el contexto de nuestra simulación, el modelo SEIR se utiliza para representar la dinámica de transmisión de enfermedades vectoriales, donde el contagio ocurre por la interacción entre *agentes humanos* y *agentes mosquitos*. El proceso se desarrolla a nivel individual y espacial, permitiendo capturar la evolución de la epidemia a microescala y su dependencia de factores ambientales como temperatura y precipitación.

4.1. Estados y Transiciones en Humanos

El modelo distingue cuatro estados epidemiológicos en los agentes humanos:

- **Susceptible (S):** Individuo vulnerable a la infección, puede ser contagiado al ser picado por un mosquito infectado con una probabilidad α .
- **Expuesto (E):** Individuo infectado pero aún no contagioso. Este estado representa el período de incubación intrínseco del patógeno dentro del huésped humano.
- **Infectado (I):** Individuo sintomático y contagioso. Durante este estado puede transmitir la infección a un mosquito susceptible que lo pique, con una probabilidad β .
- **Recuperado (R):** Individuo que ha superado la infección. Dependiendo de la enfermedad, puede adquirir inmunidad permanente o retornar al estado susceptible.

Cada transición entre estados está gobernada por probabilidades y tiempos medios de permanencia: N_e días en el estado expuesto y N_i días en el estado infectado, de acuerdo con datos epidemiológicos. Adicionalmente, se considera un estado **crónicamente recuperado**, que representa individuos no contagiosos pero con síntomas persistentes, como se ha observado en enfermedades como chikungunya.

4.2. Estados y Transiciones en Mosquitos

El ciclo de infección en los mosquitos sigue una lógica similar pero adaptada a la biología vectorial:

- Los mosquitos susceptibles se infectan al picar a un humano infectado con probabilidad β .
- Luego atraviesan un **período de incubación extrínseco**, durante el cual el patógeno se multiplica dentro del vector hasta alcanzar un nivel infeccioso.

- Una vez infectado, el mosquito puede transmitir la enfermedad a un humano susceptible con probabilidad α al picarlo.
- A diferencia de los humanos, los mosquitos no se recuperan: permanecen infecciosos hasta morir.

4.3. Modelo de Infección

Las enfermedades transmitidas por mosquitos se dan en el sentido **humano->mosquito** y **mosquito->humano**.

Los síntomas varían pero generalmente se clasifican en dos etapas:

1. Período intrínseco de incubación: El mosquito infectó un humano y el patógeno ha comenzado a multiplicarse dentro del cuerpo del huésped (host). Dependiendo de la enfermedad, la persona puede o no puede ser contagiosa durante esta etapa.
2. Estado de infección: Es cuando el patógeno ya se ha multiplicado y alcanzado cierto umbral y el humano posiblemente comenzó a mostrar síntomas. La probabilidad de transmisión es MUY ALTA durante este periodo.

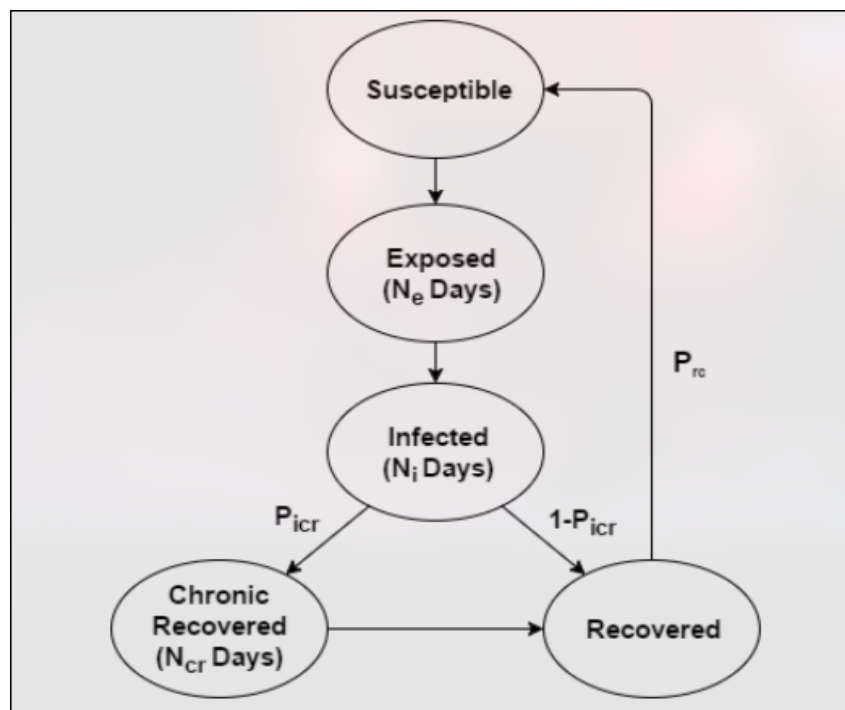


Figura 3: Diagrama del modelo SEIR de Infección

Chronic recovered es un estado en donde la persona se ha recuperado de la infección y ya no es contagiosa, sin embargo, sigue teniendo los síntomas de la enfermedad.

La infección de los **mosquitos** sigue un ciclo similar, a excepción de su recuperación ya que ellos no se recuperan una vez que son infectados.

5. Funcionamiento y Parámetros del Agente Mosquito

El agente **mosquito** constituye el principal vector en la transmisión de la enfermedad dentro del modelo basado en agentes (ABM). Su comportamiento está inspirado en la especie *Aedes aegypti*, y se modela a partir de reglas empíricas y probabilísticas, siguiendo el enfoque descrito por Jindal y Rao (2017). El modelo se calibró en la plataforma GAMA utilizando datos observacionales del brote de chikungunya en el Caribe (2013–2014), con el fin de validar la dinámica de transmisión y ajustar los parámetros biológicos del vector.

5.1. Movimiento del Mosquito

En el momento del estudio, no existían modelos matemáticos concluyentes para describir el desplazamiento de los mosquitos de manera determinista. La evidencia experimental, proveniente de estudios de campo de marcaje y recaptura, sugiere que las **caminatas aleatorias** ofrecen una aproximación adecuada a los patrones de movimiento reales [?].

En esta simulación, el desplazamiento de los mosquitos se modela como una caminata aleatoria dentro de un radio máximo de vuelo diario F_r , con una probabilidad de supervivencia $(1 - M_r)$, siendo M_r la tasa de mortalidad. El valor de M_r se fijó en 0,05 por día, inferior al promedio reportado en literatura (0,2/día), para compensar la baja relación mosquito/humano implementada por razones computacionales.

Durante su período activo, cada mosquito se mueve de manera aleatoria hasta que un agente humano entra dentro de su **rango sensorial** S_r . En ese momento, el mosquito cambia a un movimiento **dirigido** hacia el objetivo para intentar alimentarse. El parámetro S_r fue identificado como uno de los más sensibles del modelo y se ajustó a 3 m, lo que permitió obtener la mejor concordancia con los datos epidemiológicos simulados.

5.2. Alimentación e Infección

La transmisión del patógeno entre agentes humanos y mosquitos ocurre únicamente durante la etapa de alimentación. Cada evento de picadura se considera una interacción bidireccional de contagio, definida mediante dos parámetros de probabilidad:

- Si un mosquito **susceptible** pica a un humano infectado, adquiere la infección con una probabilidad $\beta = 0,275$.
- Si un mosquito **infectado** pica a un humano susceptible, transmite la infección con una probabilidad $\alpha = 0,6$.

Una vez alcanzado su límite de comidas diarias M_m , el mosquito entra en un estado de reposo. Este parámetro se fijó en $M_m = 1$ para minimizar errores en la simulación.

Además, el modelo considera que la infección no altera el comportamiento de alimentación del mosquito, en coherencia con observaciones experimentales reportadas en estudios sobre dengue y chikungunya.

5.3. Reproducción y Ciclo de Vida

Cada mosquito hembra tiene una probabilidad diaria P_m de lograr un apareamiento exitoso y pasar al estado **portando huevos**. Luego requiere al menos una comida de sangre para que los huevos puedan madurar, dado que el desarrollo de los ovocitos depende de proteínas obtenidas en la sangre del huésped.

El tiempo de maduración de los huevos τ depende de la temperatura ambiental θ (en °C) y se calcula según:

$$\tau = 3 + \frac{|\theta - 21|}{5} \quad (1)$$

donde el valor base (3 días) corresponde a la temperatura óptima de 21 °C. Una vez maduros, los huevos se depositan en uno o varios sitios de oviposición según el parámetro O_c . Cada mosquito deposita aproximadamente 100 huevos por evento.

Para simplificar el modelo, las tres fases acuáticas (huevo, larva y pupa) se agrupan en una sola etapa denominada “huevos”. El tiempo que tardan en desarrollarse hasta la etapa adulta (μ) también depende de la temperatura y se define por:

$$\mu = 8 + |\theta - 25| \quad (2)$$

Ambas ecuaciones fueron derivadas bajo el supuesto de que no ocurren variaciones de temperatura mayores a $\pm 5^\circ\text{C}$ entre días consecutivos. Los huevos pueden morir si la fuente de agua se seca, y al eclosionar, se convierten en mosquitos hembras con probabilidad P_f (proporción de sexos). Los machos se descartan del modelo, ya que no participan en la transmisión.

Adicionalmente, el modelo incorpora la **transmisión vertical del patógeno**: los mosquitos infectados ponen huevos que se desarrollan en adultos ya infectados, fenómeno documentado en virus como dengue y chikungunya [?].

5.4. Factores Ambientales y Calibración

El modelo incorpora la dependencia de variables ambientales, como la temperatura y la humedad, sobre la supervivencia y reproducción del mosquito. Estas condiciones modifican indirectamente la duración de los ciclos τ y μ , y la tasa de mortalidad M_r .

Dado que muchos parámetros carecen de medición empírica directa, se procedió a su **calibración mediante entrenamiento**, ajustando los valores para reproducir las curvas de incidencia observadas en el brote de 2013–2014. Entre los parámetros calibrados se incluyen:

- Rango sensorial $S_r = 3 \text{ m}$.
- Tasa de mortalidad $M_r = 0,05/\text{día}$.
- Número máximo de comidas $M_m = 1/\text{día}$.
- Probabilidad de ser hembra $P_f = 0,5$.
- Probabilidad de apareamiento $P_m = 0,6$.
- Probabilidades de transmisión $\alpha = 0,6$, $\beta = 0,275$.

Estos valores permitieron una correspondencia aceptable entre los resultados simulados y los datos reales del brote. La sensibilidad del modelo indicó que pequeños cambios en S_r o M_r pueden alterar significativamente la tasa de infección, mientras que variaciones moderadas en P_m o P_f tienen un impacto menor.

5.5. Resumen de Parámetros Clave

Parámetro	Símbolo	Valor usado
Tasa de mortalidad	M_r	0,05/día
Rango sensorial	S_r	3 m
Comidas máximas por día	M_m	1
Probabilidad de ser hembra	P_f	0,5
Probabilidad de apareamiento	P_m	0,6
Probabilidad infección (mosquito→humano)	α	0,6
Probabilidad infección (humano→mosquito)	β	0,275
Maduración de huevos	τ	$3 + \frac{ \theta - 21 }{5}$
Desarrollo huevo→adulto	μ	$8 + \theta - 25 $

Cuadro 5: Parámetros calibrados del agente mosquito según Jindal & Rao (2017).

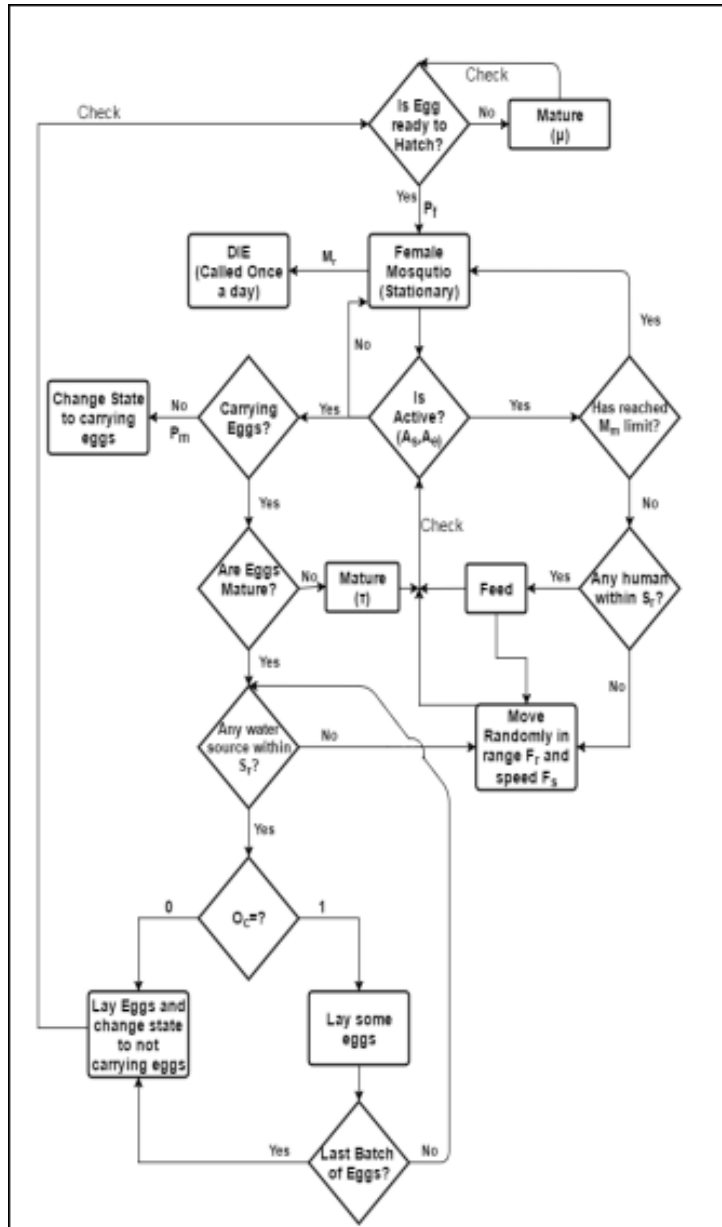


Figura 4: Movement, feeding and reproduction behaviors of a mosquito

6. Agente Humano: Comportamiento, Movilidad y Dinámica Epidemiológica

El **agente humano** representa el huésped susceptible e infeccioso dentro del modelo de simulación basado en agentes. Su inclusión es fundamental para capturar el componente espacial de la transmisión, dado que los mosquitos poseen un rango de vuelo limitado (usualmente menor a 200 metros). En consecuencia, la propagación a larga distancia del virus ocurre principalmente a través del desplazamiento de los humanos dentro del entorno urbano [?].

El modelo busca reproducir de manera realista la rutina diaria promedio de los individuos en la ciudad, incorporando patrones de movilidad, interacción con el entorno, y estados epidemiológicos según el modelo SEIR.

6.1. Categorías de Movilidad

Durante la inicialización del modelo, cada agente humano es asignado a una categoría de movilidad que define su rutina diaria. Esta clasificación, basada en los datos censales de edad y ocupación, determina las rutas y horarios de desplazamiento, así como la exposición a sitios de cría de mosquitos (parques, lagos, áreas verdes).

- **Tipo 1 — Estudiantes:** Se desplazan desde su vivienda hacia la escuela a las 7:00 a.m., con un tiempo máximo de viaje de 30 minutos. Permanecen en el aula hasta las 3:00 p.m., tras lo cual regresan a casa. Con una probabilidad P_{p1} , visitan un parque entre las 4:00 p.m. y 7:00 p.m.
- **Tipo 2 — Trabajadores:** Poseen una rutina similar, pero su destino principal es una oficina o centro de trabajo. La probabilidad de visitar un parque (P_{p2}) es menor que la de los estudiantes ($P_{p2} < P_{p1}$).
- **Tipo 3 — Móviles continuos:** Representan individuos que permanecen en movimiento durante la jornada laboral. Salen a las 7:00 a.m. y cambian de ubicación cada dos horas, regresando a sus hogares a las 7:00 p.m.
- **Tipo 4 — Estacionarios:** Permanecen en su vivienda o edificio todo el día, representando a individuos con baja movilidad (por ejemplo, adultos mayores o personas dedicadas al hogar).

Los agentes se desplazan por la red vial urbana siguiendo rutas más cortas hacia sus destinos, lo que permite modelar las interacciones espacio-temporales entre humanos y mosquitos en ubicaciones específicas (hogares, parques, escuelas y oficinas).

6.2. Modelo Epidemiológico SEIR

Cada agente humano posee un atributo de estado `state` que define su condición epidemiológica dentro del modelo SEIR: **Susceptible (S)**, **Expuesto (E)**, **Infectado (I)** o **Recuperado (R)**.

- **Susceptible (S):** individuos sanos que pueden infectarse al ser picados por un mosquito infectado con probabilidad α .
- **Expuesto (E):** individuos infectados pero no contagiosos; continúan su rutina diaria normal y son responsables del desplazamiento espacial de la infección.
- **Infectado (I):** individuos que presentan síntomas clínicos y permanecen en casa durante su período infeccioso.
- **Recuperado (R):** individuos que han adquirido inmunidad temporal o permanente, según el patógeno simulado.

Las transiciones entre estados se modelan de forma discreta con paso de tiempo $\Delta t = 1$ día. El período de incubación promedio es $N_e = 5$ días, y el período infeccioso $N_i = 6$ días, de acuerdo con los valores clínicos para el virus del chikungunya.

6.3. Transmisión y Propagación Espacial

La infección se transmite únicamente durante las picaduras de mosquitos. El modelo utiliza dos parámetros principales para representar la probabilidad de transmisión:

- Mosquito infectado → Humano susceptible: $\alpha = 0,6$.
- Humano infectado → Mosquito susceptible: $\beta = 0,275$.

El desplazamiento de los humanos en estado **Expuesto (E)** es el principal responsable de la propagación espacial de la enfermedad entre diferentes zonas de la ciudad. Por el contrario, los humanos en estado **Infectado (I)** reducen su movilidad o permanecen en casa, limitando la transmisión local.

6.4. Calibración de Parámetros

Los parámetros epidemiológicos fueron calibrados a partir del brote de chikungunya ocurrido en el Caribe (2013–2014), optimizando la correspondencia entre los datos simulados y la curva de casos observados.

Parámetro	Símbolo	Valor usado
Probabilidad infección (mosquito→humano)	α	0,6
Probabilidad infección (humano→mosquito)	β	0,275
Período de incubación	N_e	5 días
Período infeccioso	N_i	6 días
Probabilidad visita a parque (estudiantes)	P_{p1}	0,3 (calibrable)
Probabilidad visita a parque (trabajadores)	P_{p2}	0,1 (calibrable)

Cuadro 6: Parámetros epidemiológicos y de movilidad del agente humano.

6.5. Posibles Mejoras y Actualizaciones del Modelo

Aspecto del Modelo	Posible Mejora o Actualización
Categorías de movilidad (Tipos 1–4)	Incorporar patrones de movilidad reales derivados de datos de telefonía, transporte público o geolocalización para mejorar la representación del comportamiento urbano.
Modelo SEIR determinista	Implementar distribuciones estadísticas (p. ej., log-normal o gamma) para los períodos de incubación e infección, en lugar de valores fijos.
Comportamiento de los infectados	Introducir una probabilidad de aislamiento variable según la gravedad de los síntomas o el nivel socioeconómico del agente.
Interacciones espaciales	Incorporar eventos masivos o reuniones sociales como nodos temporales de alta densidad de contacto.
Inmunidad	Modelar inmunidad parcial o por serotipo (como en el caso del dengue) y permitir reinfecciones tras un periodo prolongado.
Parámetros epidemiológicos	Actualizar α y β según nuevos estudios o datos empíricos locales del patógeno y vector de interés.
Escala urbana	Integrar datos geográficos reales (GIS) y mapas satelitales para representar la distribución espacial de viviendas, parques y criaderos de mosquitos.
Comportamiento social	Añadir heterogeneidad en las rutinas (fines de semana, eventos especiales, horarios laborales flexibles).

Cuadro 7: Propuestas de mejoras y actualizaciones para el agente humano.

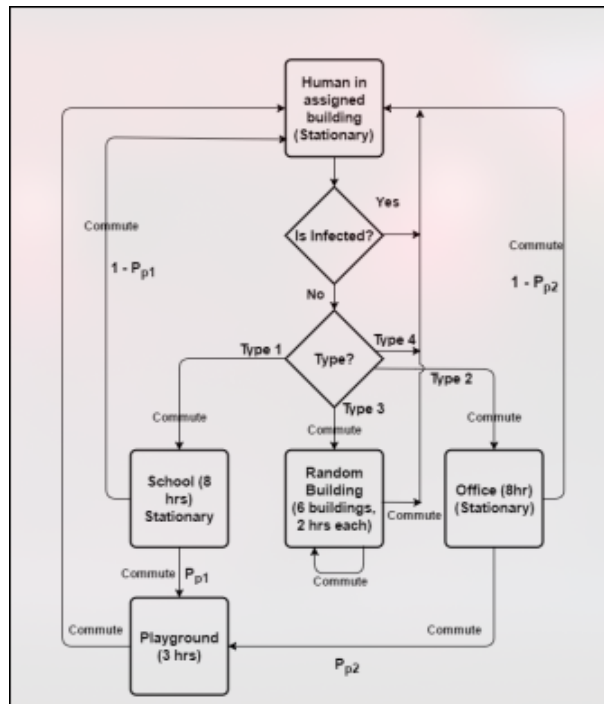


Figura 5: Human agent behavior

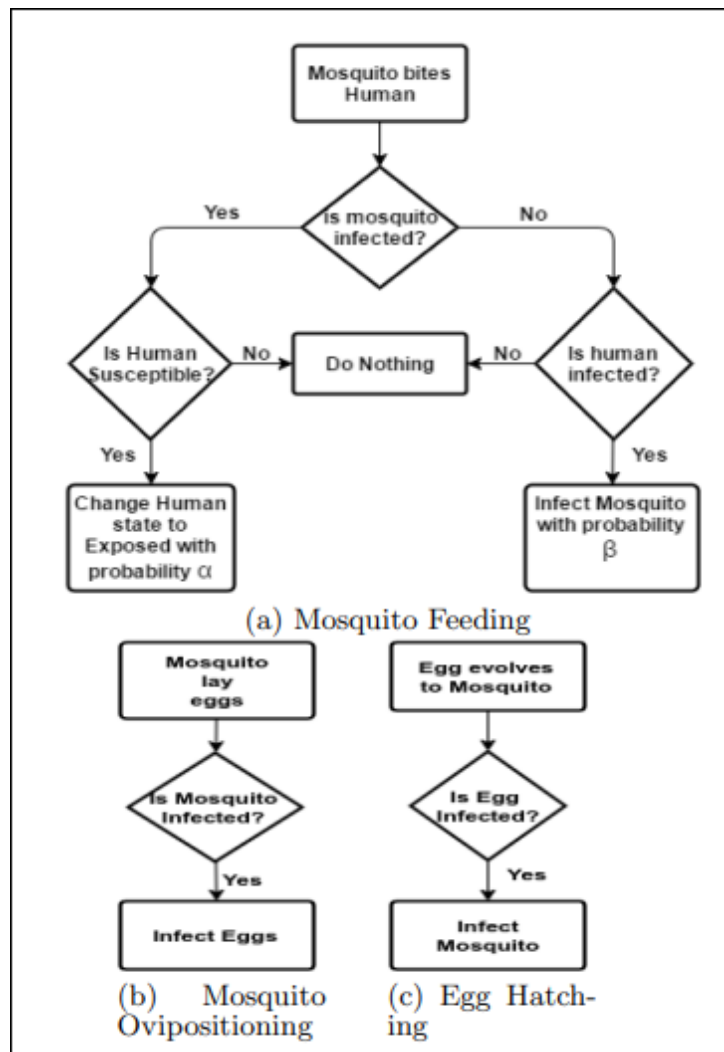


Figura 6: Disease Transmission Cycle

7. Entorno del Modelo

El **entorno** constituye la capa espacial y ambiental sobre la cual interactúan los agentes humanos y mosquitos. En este modelo, el entorno urbano se representa utilizando datos geoespaciales (GIS) y variables climáticas que influyen directamente en los procesos biológicos del vector y en los patrones de movilidad de los humanos. El enfoque reproduce la estructura de la ciudad y las condiciones ambientales que determinan la supervivencia, reproducción y dispersión de los mosquitos, así como la propagación espacial de la enfermedad.

7.1. Estructura Espacial del Entorno

El modelo se construye sobre una base de datos **GIS de dos capas**:

- **Primera capa — Estructura urbana:** Contiene los elementos fijos del entorno: edificios residenciales, oficinas, escuelas, parques y cuerpos de agua (lagos o estanques). Estas entidades representan los nodos principales de interacción

entre humanos y mosquitos, siendo los cuerpos de agua esenciales para el ciclo reproductivo del vector.

- **Segunda capa — Red vial:** Describe el sistema de carreteras y caminos que conectan los distintos edificios. Los agentes humanos se desplazan por esta red utilizando las rutas más cortas entre sus puntos de origen y destino (hogar, escuela, oficina o parque), lo que permite capturar el componente espacial del contagio y la movilidad.

En la inicialización del modelo, los edificios se distribuyen aleatoriamente sobre la cuadrícula urbana, asignando una fracción de ellos como escuelas u oficinas. Además, se incluye al menos un parque con lago o estanque, el cual funciona como **sitio de cría principal** para los mosquitos.

7.2. Integración con Factores Ambientales

El entorno incorpora datos meteorológicos diarios, principalmente **temperatura** y **precipitación**, que son determinantes para los procesos de desarrollo del vector y del patógeno.

- La **temperatura** controla la tasa de maduración de huevos y el desarrollo viral dentro del mosquito (período de incubación extrínseco).
- La **precipitación** genera cuerpos de agua temporales (*puddles*) que sirven como criaderos. Su número depende de la intensidad de la lluvia: pequeñas acumulaciones desaparecen en menos de una semana si no llueve nuevamente, mientras que grandes cuerpos de agua pueden persistir durante meses.

El modelo asume que cada evento de lluvia crea nuevos sitios de cría, actualizando dinámicamente el número de mosquitos que pueden emerger. Este mecanismo reproduce de manera simplificada el vínculo entre clima y dinámica vectorial, ampliamente documentado en la literatura reciente.

7.3. Escalado y Configuración Inicial

El entorno fue parametrizado originalmente utilizando datos geográficos de la comuna de *Luneray* (Haute-Normandie, Francia), adaptada como ejemplo genérico de entorno urbano. La simulación se inicializó con los siguientes valores:

- Población humana: 1000 agentes.
- Población de mosquitos adultos: 2000 individuos.
- Huevos de mosquito iniciales: 500 unidades.

Este bajo cociente mosquito/humano se empleó para mantener la simulación computacionalmente manejable. La tasa de mortalidad del vector (M_r) fue ajustada para compensar este escalamiento.

Posteriormente, el modelo fue adaptado a estudios de caso específicos, recalibrando la densidad poblacional y los parámetros climáticos según los datos censales y meteorológicos de cada localidad. La simulación se ejecuta en la plataforma **GA-MA**, la cual permite visualizar en tiempo real la dinámica espacial de los agentes y su evolución temporal.

7.4. Procesos de Infección y Retroalimentación Ambiental

El entorno también sirve como interfaz entre el vector y las condiciones ambientales. Cuando un mosquito infectado deposita huevos, estos pueden nacer ya infectados, reproduciendo la **transmisión vertical del virus**, observada empíricamente en casos de dengue y chikungunya. De esta manera, el entorno no es solo un espacio físico, sino también un medio que regula la retroalimentación biológica entre clima, ciclo de vida y dinámica de infección.

7.5. Posibles Mejoras y Actualizaciones del Entorno

Aspecto del Entorno	Propuesta de Mejora o Actualización
Datos GIS estáticos	Integrar mapas urbanos actuales mediante plataformas abiertas como OpenStreetMap o datos satelitales (Sentinel, Google Earth Engine) para representar estructuras reales.
Red vial simplificada	Incorporar modelos de tráfico y transporte público para capturar patrones reales de movilidad y congestión.
Sitios de cría	Modelar la generación de criaderos como función espacial dependiente del drenaje, altitud y uso del suelo, en lugar de depender únicamente de la precipitación.
Datos climáticos diarios	Sustituir registros fijos por datos climáticos históricos o proyectados (p. ej., ERA5 o Copernicus) para simular escenarios de cambio climático.
Resolución espacial	Aumentar la resolución de celdas en áreas críticas (por ejemplo, zonas densamente pobladas o con alta humedad).
Interacción mano–ambiente	hu- Incluir cambios estacionales en la frecuencia de actividades al aire libre y uso de parques.
Visualización	Mejorar la representación visual en GAMA o plataformas de código abierto (p. ej., Mesa–Geo o AnyLogic GIS) con mapas de calor dinámicos.
Calibración climática	Ajustar las tasas de desarrollo vectorial mediante funciones no lineales de temperatura y humedad validadas experimentalmente.

Cuadro 8: Posibles mejoras y actualizaciones del entorno del modelo.