



Coordinación Descentralizada de Satélites: Un Enfoque Basado en Agentes

Autor:
Alejandro Barranco Ledesma

Asignatura:
Síntesis, Verificación y Razonamiento sobre Agentes Inteligentes

Índice general

1. Introducción	2
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Entregables	3
2. Fundamentos teóricos	4
2.1. Proyección y representación en el plano (plate carrée)	4
2.2. Modelo orbital simplificado y supuestos	5
2.3. Criterio de proximidad y colisiones	6
3. Evitación de colisiones	8
3.1. Detección de conflictos	8
3.2. Regla de evitación y autorregulación	8
4. Simulación en NetLogo	10
4.1. Entorno y rejilla espacial	10
4.2. Índice espacial por vecindad de <i>patches</i>	10
4.3. Agentes y variables de estado	11
4.4. Poblaciones <i>red</i> y <i>blue</i>	11
4.5. Controles, métricas y <i>plots</i> en la interfaz	12
4.6. Estrategia temporal y aceleración	13
4.7. Corrección discreta de fase para evitación	13
5. Experimentación	14
5.1. Diseño experimental	14
5.2. Resultados y análisis	14
6. Conclusiones y trabajo futuro	19
6.1. Conclusiones	19
6.2. Limitaciones y mejoras futuras	20
Bibliografía	22

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Las constelaciones de satélites en órbita baja (p. ej., Starlink, OneWeb) han escalado hasta operar con miles de unidades [1, 2]. En estos sistemas, la planificación de trayectorias y la optimización de la configuración de la constelación se realiza típicamente de forma centralizada y *offline*, a partir de modelos globales y decisiones tomadas desde tierra. Sin embargo, este enfoque centralizado presenta limitaciones naturales cuando el sistema crece: la complejidad de coordinar muchos satélites aumenta, la respuesta ante eventos locales (proximidad, reconfiguraciones, congestión orbital) puede ser lenta, y las decisiones globales dependen de una visión completa y continuamente actualizada del estado de la constelación.

Este trabajo explora una alternativa desde el paradigma de sistemas multiagente: estudiar si es posible aproximar una coordinación efectiva sin control central explícito mediante *autoregulación local*. En este planteamiento, cada satélite decide acciones con información limitada (entorno cercano, proximidad, reglas simples), con la expectativa de que la interacción de dichas reglas produzca un comportamiento colectivo deseable. El interés principal es observar fenómenos de *optimización emergente*, donde decisiones locales coordinadas indirectamente conducen a una configuración global más estable y eficiente, minimizando las correcciones en la trayectoria de los satélites.

Para poder estudiar la dinámica del sistema de forma práctica, la simulación se diseña con un *tiempo simulado* independiente del tiempo real, permitiendo acelerar la ejecución y observar la evolución del experimento (y su posible convergencia) en horizontes temporales largos sin necesidad de esperas prolongadas. La implementación se realiza en NetLogo, modelando una constelación sobre un mapa terrestre y evaluando si reglas locales de interacción (en particular, asociadas a proximidad y evitación) inducen estabilidad y auto-organización sin intervención central.

Dado que se trata de un trabajo académico orientado a la práctica (en el marco de una asignatura), no se realiza un estudio sistemático del estado del arte ni se pretende proponer un método competitivo frente a líneas de investigación avanzadas. El objetivo es construir una simulación reproducible que permita validar el enfoque multiagente y explorar su comportamiento bajo distintas configuraciones.

1.2. Objetivos

El objetivo general del trabajo es diseñar e implementar una simulación multiagente de una constelación de satélites y evaluar si una estrategia de autoregulación *puremente local* puede inducir una autoregulación *global* del sistema, con convergencia hacia soluciones cercanas a la óptima bajo las métricas consideradas.

De forma más concreta, los objetivos son:

- Implementar un modelo de movimiento simplificado y una representación espacial adecuada para simular múltiples satélites sobre la superficie terrestre en NetLogo.
- Definir un criterio operativo de *conflicto/proximidad* y métricas cuantitativas evaluadas en función del *tiempo simulado* (p. ej., conflictos instantáneos y acumulados a lo largo de la ejecución).
- Diseñar una estrategia de evitación y ajuste basada en decisiones locales (información de vecindad), sin un planificador central.
- Ejecutar experimentos variando parámetros relevantes (número de satélites, radio de seguridad, intensidad de corrección, etc.) para observar estabilidad, comportamiento emergente y sensibilidad.
- Analizar si el sistema converge hacia configuraciones estables: reducción sostenida de conflictos y evidencia de auto-organización, discutiendo en qué condiciones la dinámica se aproxima a un comportamiento global “óptimo” o quasi-óptimo.

1.3. Entregables

La entrega se realiza mediante un único archivo `.zip` que contiene todos los elementos necesarios para reproducir y evaluar el trabajo. En concreto, incluye:

- **Memoria en PDF:** versión compilada de este documento.
- **Proyecto NetLogo:** el fichero `svai_satellite.nlogo.nlogox`, que contiene el modelo multiagente y la interfaz de simulación.
- **Notebook de visualización:** un cuaderno Jupyter `plots.ipynb` empleado para cargar los resultados experimentales y generar las figuras comparativas incluidas en el análisis.
- **Recursos auxiliares:** archivos necesarios para la correcta ejecución del proyecto, incluyendo el fondo del mundo usado en NetLogo (mapa equirectangular) y cualquier recurso gráfico asociado.
- **Carpeta data:** directorio con los resultados de los experimentos. Para cada experimento se incluye:
 - un fichero `config.txt` con los parámetros utilizados (p. ej., número de satélites, radio de seguridad, altitud, *time-x-factor*, etc.);
 - una captura de la situación gráfica final del experimento (estado visual de la simulación al finalizar la ejecución);
 - ficheros `.csv` por población (RED y BLUE), exportados desde NetLogo al finalizar cada ejecución, que contienen las series temporales de las métricas registradas (p. ej., *time/collisions*) usadas para la generación de *plots*.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Proyección y representación en el plano (plate carrée)

Para simular una constelación a escala planetaria en NetLogo es necesario representar posiciones geográficas (longitud y latitud) en un plano discreto (una rejilla de *patches*). En este trabajo se utiliza la proyección *plate carrée* (también llamada equirectangular) [3], cuya idea básica consiste en mapear directamente los ángulos geográficos a coordenadas cartesianas:

$$x \propto \lambda, \quad y \propto \varphi$$

donde λ es la longitud y φ la latitud.

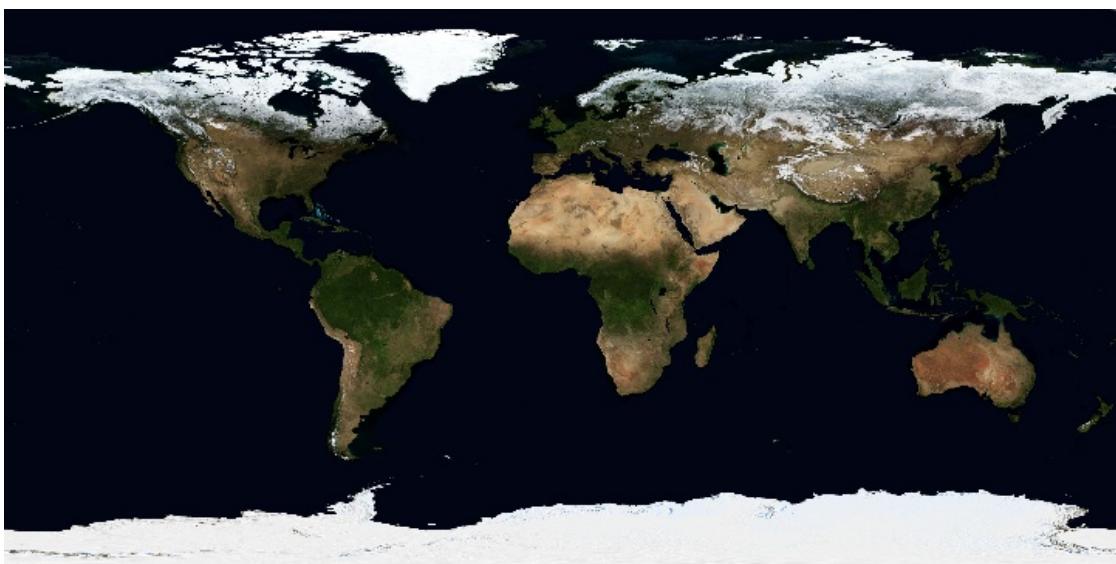


Figura 2.1: Mapa global en proyección equirectangular (plate carrée).

La motivación principal para elegir esta proyección no es cartográfica sino computacional: es una proyección *lineal* en grados. Esto permite una correspondencia directa entre λ/φ y la rejilla del mundo en NetLogo, simplificando de forma considerable tanto la representación como la manipulación de trayectorias. En la práctica, se puede fijar una

resolución constante (por ejemplo, un número de *patches* por grado) y convertir de manera inmediata:

$$x = s_x \lambda, \quad y = s_y \varphi$$

siendo s_x y s_y factores de escala (p. ej., *patches/grado*) que determinan la resolución espacial de la simulación. Esta linealidad hace especialmente cómoda la implementación de:

- movimiento y actualización de estados usando incrementos angulares;
- visualización directa sobre un mapa terrestre equirectangular;
- instrumentación del sistema (trazas, métricas y *plots*) en términos de coordenadas interpretables.

En este trabajo se adopta este marco como un compromiso razonable: se prioriza una representación simple y controlable para experimentar con mecanismos de coordinación local, aceptando las limitaciones métricas inherentes a una proyección.

2.2. Modelo orbital simplificado y supuestos

El objetivo del modelo orbital empleado en este trabajo no es reproducir con alta fidelidad la dinámica completa de un satélite (incluyendo perturbaciones, precesiones o variación de elementos), sino disponer de una descripción cinemática coherente y estable para estudiar patrones de coordinación a escala de constelación.

2.2.1. Parámetros y estado del satélite

Cada satélite se describe con:

- λ_0 : una longitud de referencia fija asociada a su órbita.
- i : la inclinación de la órbita (en grados).
- u : una fase angular que indica la posición del satélite dentro de su órbita (en grados).
- ω : la velocidad angular (en grados por segundo), que determina cómo cambia la fase con el tiempo.

La evolución de la fase se modela como:

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \omega \Delta t \quad (\text{con } u \in [0, 360^\circ])$$

2.2.2. Conversión a latitud y longitud del punto subsatélite

En una órbita circular e inclinada, el punto subsatélite describe una trayectoria periódica en latitud y longitud. La latitud depende de la inclinación y de la fase como:

$$\varphi = \arcsin(\sin i \sin u)$$

lo cual implica que la latitud queda acotada por $|\varphi| \leq i$, como es esperable en una órbita inclinada.

Para la longitud, se utiliza una expresión que captura el desplazamiento longitudinal asociado a la posición angular, sumada a la longitud de referencia:

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda(u, i), \quad \Delta\lambda(u, i) = \text{atan2}(\cos u, \cos i \sin u)$$

donde $\text{atan2}(y, x)$ denota la arctangente de dos argumentos (con cuadrante correcto). Finalmente, λ se normaliza al rango geográfico $[-180^\circ, 180^\circ]$ para mantener continuidad en la representación.

2.2.3. Altitud y conversión angular a distancia

Aunque el estado se representa en coordenadas angulares (λ, φ) , la detección de proximidad requiere comparar separaciones en unidades físicas. Para ello, se adopta una aproximación local donde un incremento angular $\Delta\theta$ se traduce a distancia mediante el radio orbital:

$$R = R_E + h$$

siendo R_E el radio medio terrestre (6371 km) [4] y h la altitud de la órbita. Con esta aproximación, el factor de conversión de grados a kilómetros viene dado por:

$$\text{km/deg} = \frac{\pi}{180} R$$

y, adicionalmente, la componente longitudinal se ajusta por $\cos(\varphi)$, reflejando que un mismo $\Delta\lambda$ representa menos distancia a latitudes altas. Este ajuste permite que el criterio de proximidad sea consistente con la altitud seleccionada en la simulación.

2.2.4. Supuestos adoptados

Para simplificar la implementación y priorizar la eficiencia computacional del modelo, se adoptan las siguientes suposiciones:

- Tierra esférica y estática.
- Órbitas circulares.
- Velocidad angular ω constante.
- Altitud orbital h constante para todos los satélites.
- Sin perturbaciones orbitales (J2, arrastre atmosférico, etc.).

2.3. Criterio de proximidad y colisiones

En el contexto de este trabajo, una “colisión” no se interpreta como un impacto físico real, sino como un evento de proximidad: dos satélites se consideran en conflicto cuando su separación cae por debajo de un radio de seguridad r_s . Este criterio permite cuantificar el nivel de congestión de la constelación y evaluar si las reglas locales de autorregulación reducen de forma sostenida dichos conflictos.

2.3.1. Aproximación local en el plano

Dado que el estado de cada satélite se representa mediante coordenadas geográficas (λ, φ) , la distancia se estima mediante una aproximación local tipo equirectangular [5] alrededor de la latitud φ del satélite de referencia. Se consideran las diferencias angulares:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$

A continuación, se convierten estas diferencias angulares a kilómetros usando el factor km/deg definido por el radio orbital $R = R_E + h$:

$$\Delta y = \text{km/deg } \Delta\varphi, \quad \Delta x = \text{km/deg } \cos(\varphi_1) \Delta\lambda$$

donde el término $\cos(\varphi_1)$ corrige la componente longitudinal, ya que un mismo incremento en longitud representa menos distancia a latitudes altas.

Finalmente, la separación se compara usando la distancia al cuadrado (evitando raíces cuadradas por eficiencia):

$$d^2 \approx \Delta x^2 + \Delta y^2$$

Capítulo 3

Evitación de colisiones

3.1. Detección de conflictos

Sea r_s el radio de seguridad (en km). Dos satélites a y b se consideran en conflicto si:

$$d^2(a, b) \leq r_s^2$$

Este criterio se aplica para cuantificar conflictos entre satélites y permite obtener tanto medidas instantáneas (conflictos presentes en un instante) como medidas acumuladas a lo largo de la ejecución del experimento.

3.2. Regla de evitación y autorregulación

La estrategia de evitación se basa en un ajuste pequeño e inmediato de la fase orbital (*phase kick*). La idea es sencilla: si un satélite detecta que otro está demasiado cerca (dentro del radio de seguridad), modifica su fase ligeramente para separarse. Esta corrección es local (solo usa información de vecinos cercanos), y repetida en el tiempo puede producir una autorregulación global del sistema.

3.2.1. Detección local y selección del conflicto relevante

En cada paso, cada satélite busca posibles conflictos en su vecindad espacial inmediata (candidatos cercanos). De entre los satélites que cumplen la condición de conflicto $d^2 \leq r_s^2$, se elige el más cercano como referencia (el *conflicto dominante*). Esto evita tomar decisiones ambiguas cuando hay varios vecinos dentro del radio.

3.2.2. Intensidad del ajuste

Una vez seleccionado el vecino más cercano, se calcula un factor de intensidad que mide cuán “grave” es el conflicto. Se usa una regla lineal muy simple:

$$\text{strength} = 1 - \frac{d^2}{r_s^2}$$

donde d^2 es la distancia al cuadrado al vecino más cercano. Así:

- si el satélite está justo en el borde ($d^2 \approx r_s^2$), entonces strength ≈ 0 y la corrección es casi nula;
- cuanto más cerca esté (d^2 pequeño), más se acerca strength a 1 y la corrección aumenta.

Si por redondeos saliera un valor negativo (cuando ya no hay conflicto real), se recorta a 0.

3.2.3. Dirección del ajuste

Además de la intensidad, hay que decidir el signo del ajuste: si ambos satélites corrigieran en la misma dirección, podrían no separarse. Para evitarlo, se compara la diferencia de fase con el vecino más cercano:

$$\Delta u = u_{\text{vecino}} - u$$

y se aplica la siguiente regla:

- si $\Delta u > 0$, el satélite se desplaza hacia fases menores;
- si $\Delta u < 0$, el satélite se desplaza hacia fases mayores;
- si $\Delta u \approx 0$, se aplica un desempate determinista para asignar direcciones opuestas.

Intuitivamente: si el vecino está “por delante” en fas, yo retrocedo, si está “por detrás” yo avanzo.

3.2.4. Actualización de fase (phase kick)

La corrección final se aplica actualizando la fase con un desplazamiento máximo configurable $\Delta u_{\text{máx}}$ (parámetro del modelo), escalado por la intensidad:

$$u \leftarrow u + s \cdot \Delta u_{\text{máx}} \cdot \text{strength}, \quad s \in \{-1, +1\}$$

Tras el ajuste, la fase se normaliza para mantenerse dentro del rango $[0, 360^\circ]$. Dado que esta modificación altera el estado del satélite, el efecto es acumulativo: múltiples correcciones pequeñas a lo largo del tiempo pueden producir una redistribución progresiva de la constelación.

3.2.5. Condición de salida (histéresis)

Para evitar que el sistema oscile continuamente entre “activar” y “desactivar” evitación cuando está cerca del umbral, se utiliza histéresis: una vez activada la evitación, no se desactiva hasta que el satélite deje de tener vecinos dentro de un umbral algo mayor que el de entrada. Conceptualmente, esto equivale a usar un radio de salida $r_{\text{exit}} = k r_s$ con $k > 1$, lo que estabiliza el comportamiento y reduce cambios de estado innecesarios.

Capítulo 4

Simulación en NetLogo

4.1. Entorno y rejilla espacial

La simulación se ejecuta sobre un mundo 2D de NetLogo que representa la superficie terrestre mediante una rejilla de *patches*. La base visual es un mapa global en proyección equirectangular (plate carrée), importado como fondo.

- Dominio geográfico: longitud $\lambda \in [-180^\circ, 180^\circ]$ y latitud $\varphi \in [-90^\circ, 90^\circ]$.
- Resolución en longitud: se usa una correspondencia fija de 2 *patches* por grado, lo que permite representar el rango completo de longitud con 720 columnas.
- Escala en latitud: la conversión de φ a coordenadas del mundo se ajusta mediante un factor *y-scale* para adaptar la altura del mundo y mantener una representación consistente.
- Configuración del mundo: en la inicialización se redimensiona explícitamente el mundo y se fija el tamaño de *patch*. Este ajuste evita depender de la configuración por defecto de NetLogo (que puede variar o quedar desalineada con la resolución deseada), garantizando una correspondencia estable entre grados geográficos, rejilla y fondo visual.

4.2. Índice espacial por vecindad de *patches*

Para mantener eficiencia computacional al aumentar el número de satélites, la detección de candidatos cercanos se apoya en una estructura de vecindad simple basada en la rejilla:

- Cada *patch* precalcula su vecindad local 3×3 : el propio *patch* y sus ocho vecinos adyacentes.
- Las búsquedas de proximidad se restringen a satélites que se encuentran en ese conjunto local de *patches*, evitando comparaciones globales entre todos los pares [6].
- Este enfoque actúa como un índice espacial sencillo y adecuado para simulaciones con muchos agentes.

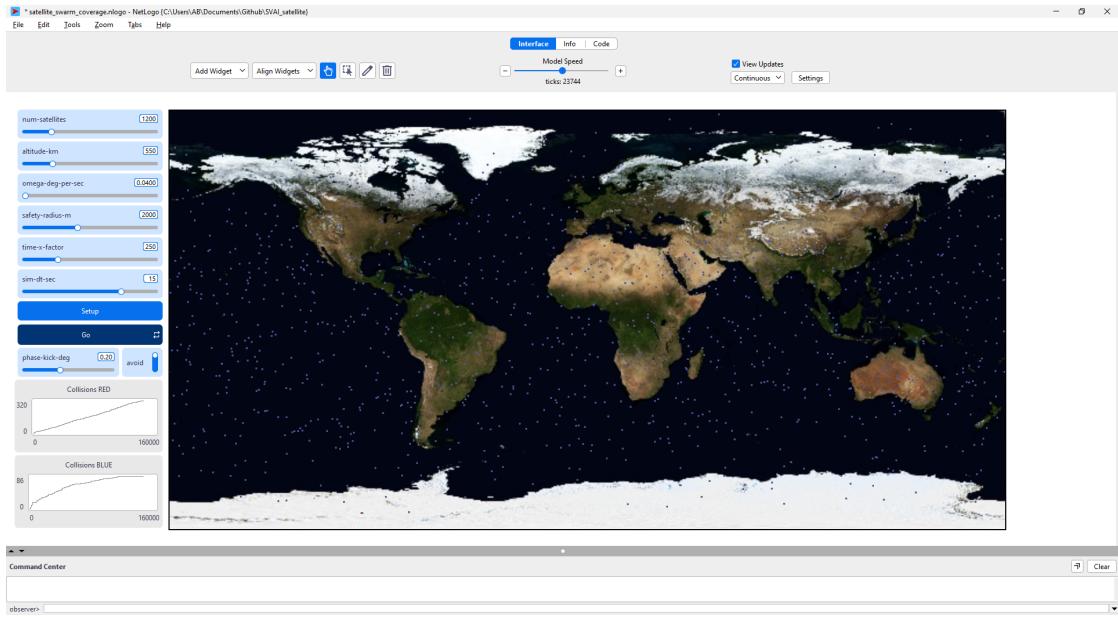


Figura 4.1: Captura de la simulación en ejecución.

4.3. Agentes y variables de estado

Los satélites se modelan como agentes. Su estado se divide en (i) variables de posición y (ii) parámetros de dinámica y autorregulación.

- Posición geográfica: λ (longitud) y φ (latitud).
- Parámetros orbitales simplificados:
 - λ_0 : longitud de referencia asociada a la órbita.
 - i : inclinación (en grados).
 - u : fase orbital (en grados).
 - ω : velocidad angular (en grados por segundo).
- Variables auxiliares:
 - $\cos(\varphi)$: precálculo para acelerar el cálculo de distancias locales.
 - ω nominal y objetivo: referencia interna para mantener/recuperar la dinámica base.
 - Indicador booleano de evitación: marca si el agente se encuentra actualmente en estado de corrección.

4.4. Poblaciones *red* y *blue*

Para evaluar el efecto de la autorregulación de manera controlada, se definen dos poblaciones con condiciones iniciales idénticas:

- RED actúa como baseline (sin corrección).
- BLUE actúa como grupo experimental (con autorregulación activable).

Ambas poblaciones comparten la misma configuración inicial; cualquier divergencia

posterior se atribuye al mecanismo de evitación aplicado a la población blue.

4.5. Controles, métricas y *plots* en la interfaz

La interfaz gráfica permite configurar el escenario y observar la evolución del sistema durante la ejecución. La instrumentación principal del experimento se centra en el conteo de conflictos por proximidad, separado por población, y se complementa con controles para ajustar los parámetros del modelo sin modificar el código.

- Controles de escenario:
 - *num-satellites*: define el número total de agentes generados en la constelación (y, por tanto, la densidad del escenario).
 - *altitude-km*: fija la altitud orbital común de los satélites.
- Controles de dinámica:
 - *omega-deg-per-sec*: establece la velocidad angular base con la que progresan la fase orbital.
 - *sim-dt-sec*: tamaño del paso de integración del modelo (resolución temporal de la simulación).
 - *time-x-factor*: factor de aceleración que escala el avance del tiempo interno respecto al tiempo de ejecución.
- Controles de seguridad y evitación:
 - *safety-radius-m*: radio de seguridad usado para declarar conflictos de proximidad.
 - *phase-kick-deg*: magnitud máxima del ajuste angular aplicado en la regla de evitación.
 - *avoid (switch)*: activa o desactiva el mecanismo de evitación.
- Métricas de conflicto:
 - Medidas instantáneas: número de pares en conflicto en un instante muestreado (paso discreto), calculadas por separado para cada población.
 - Medidas acumuladas: suma a lo largo del tiempo simulado de los conteos instantáneos (exposición agregada a proximidad), útil para observar tendencias globales.
- *Plots*:
 - *Collisions RED*: muestra el conteo acumulado de conflictos dentro de la población RED en función del tiempo simulado.
 - *Collisions BLUE*: muestra el conteo acumulado de conflictos dentro de la población BLUE en función del tiempo simulado.

En ambos casos, el eje *x* corresponde al tiempo simulado y el eje *y* al conteo acumulado de conflictos, permitiendo comparar de forma directa la evolución de ambas poblaciones durante el experimento.

4.6. Estrategia temporal y aceleración

La simulación separa el tiempo de ejecución (tiempo real) del tiempo interno del modelo (tiempo simulado), permitiendo acelerar la dinámica sin depender de la velocidad de refresco de la interfaz.

- En cada iteración se mide el incremento de tiempo real Δt_{real} .
- Ese incremento se escala mediante un factor de aceleración y se acumula en un buffer temporal.
- La evolución del sistema se integra mediante pasos de tamaño fijo, ejecutando tantos pasos como permita el buffer, con un límite máximo por iteración para evitar bloqueos y garantizar responsividad.
- En escenarios donde la carga computacional es alta, la aceleración efectiva queda limitada por la capacidad de la CPU: si no es posible consumir todo el tiempo acumulado en una iteración, el modelo progresará a la máxima tasa sostenible por la máquina manteniendo el paso fijo (sin saltar pasos).
- Las métricas y los gráficos se expresan en función del tiempo simulado.

4.7. Corrección discreta de fase para evitación

La política de evitación implementa una corrección *discreta* sobre la variable de fase orbital cuando se detecta proximidad, en lugar de modelar un control continuo (p. ej., un perfil de aceleración suave). Esta decisión se adopta por simplicidad y eficiencia: permite introducir un mecanismo de *separación relativa* entre satélites con un coste computacional muy reducido, manteniendo la integración temporal del sistema en pasos fijos.

Aunque la maniobra se aplica como una actualización instantánea de fase en los instantes de muestreo, su magnitud se calibra para que sea consistente con la escala del radio de seguridad. En particular, para una altitud típica de la simulación, el desplazamiento lineal aproximado asociado a un incremento de fase $\Delta\phi$ es $\Delta s \approx (R + h) \Delta\phi$ (en radianes), o equivalentemente $\Delta s \approx \text{km-per-deg} \cdot \Delta\phi_{\text{deg}}$. Por ello, elegir valores pequeños como $\text{phase-kick-deg} \approx 0,02^\circ$ (del orden de unos pocos kilómetros a la altitud considerada) sitúa la corrección en la misma escala que el umbral de proximidad (p. ej., 2 km), evitando efectos no realistas asociados a correcciones demasiado agresivas.

Bajo esta calibración, la corrección discreta puede interpretarse como una aproximación de un control continuo aplicado durante un intervalo corto: en lugar de integrar explícitamente un ajuste gradual de velocidad/orbita, se representa su *efecto neto* como un pequeño reordenamiento de fase que reduce la probabilidad de mantener proximidades persistentes. Esta aproximación es adecuada cuando el objetivo principal es comparar, de forma controlada, la diferencia de exposiciones a proximidad entre poblaciones con y sin evitación, manteniendo el modelo lo más simple posible.

Capítulo 5

Experimentación

5.1. Diseño experimental

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de los experimentos es evaluar si una regla de evitación local consigue reducir de forma sostenida los conflictos de proximidad, y cómo varía ese comportamiento cuando se modifica la densidad de la constelación u otros parámetros iniciales.

5.2. Resultados y análisis

Se realizan cuatro experimentos controlados (001–004) destinados a evaluar el impacto de la regla de evitación (*phase kick*) en la exposición a proximidad. En todos los casos se comparan dos poblaciones con condiciones iniciales idénticas: **RED** (sin evitación) y **BLUE** (con evitación activada). Las métricas se expresan en función del *tiempo simulado*, y el conteo (suma temporal de conflictos muestreados).

Experimento 001: baja densidad (1200 satélites, radio 2 km)

Parámetros:

- *num-satellites*: 1200
- *altitude-km*: 550
- *omega-deg-per-sec*: 0.04
- *safety-radius-m*: 2000
- *time-x-factor*: 200
- *sim-dt-sec*: 0.5
- *phase-kick-deg*: 0.02

Resultados: La Fig. 5.1 muestra la evolución del conteo acumulado de conflictos para RED (sin evitación) y BLUE (con evitación).

Análisis: En RED se observa un crecimiento aproximadamente lineal del acumulado, consistente con una *tasa de conflictos casi constante* durante todo el horizonte simulado. En cambio, BLUE presenta un comportamiento por fases: (i) transitorio inicial con aumento rápido ($0\text{--}5 \times 10^3$ s, $\approx 0\text{--}1.4$ h), (ii) reducción sostenida de la pendiente

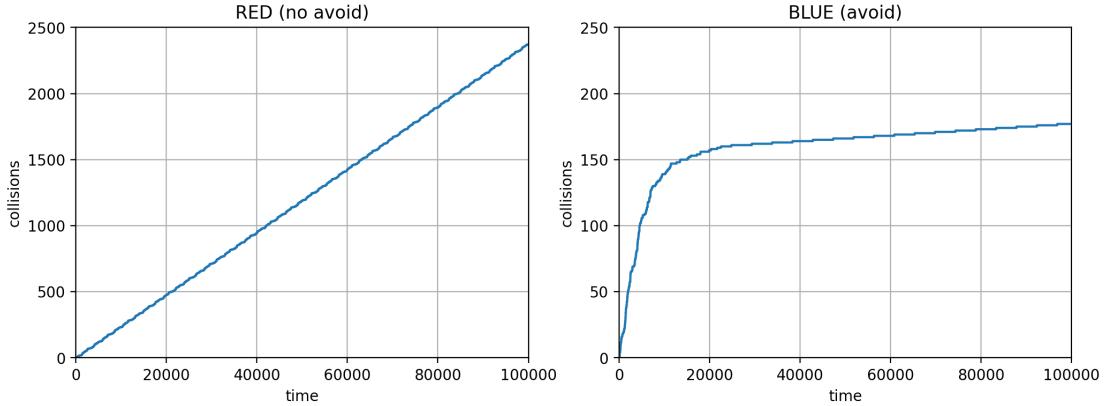


Figura 5.1: Experimento 001: comparación entre RED (sin evitación) y BLUE (evitación activada).

(5×10^3 – $1,5 \times 10^4$ s, ≈ 1.4 – 4.2 h) y (iii) régimen quasi-estacionario a partir de $\sim 1,5 \times 10^4$ s (≈ 4.2 h), donde el crecimiento es residual. La diferencia de pendientes tras el transitorio ($\sim 10^4$ s, ≈ 2.8 h) indica una reducción marcada de la *exposición agregada* a proximidad en BLUE respecto a RED.

Conclusión: En baja densidad (1200 satélites) y con radio de 2 km, la evitación local induce una reorganización progresiva en BLUE que reduce la tasa de conflictos hasta valores cercanos a cero tras unas pocas horas de tiempo simulado, mientras RED mantiene una tasa aproximadamente constante.

Experimento 002: densidad media (2400 satélites, radio 2 km)

Parámetros:

- *num-satellites*: 2400
- *altitude-km*: 550
- *omega-deg-per-sec*: 0.04
- *safety-radius-m*: 2000
- *time-x-factor*: 200
- *sim-dt-sec*: 0.5
- *phase-kick-deg*: 0.02

Resultados: La Fig. 5.2 muestra la evolución del conteo acumulado de conflictos para RED (sin evitación) y BLUE (con evitación).

Análisis: Al igual que en el experimento 001, RED mantiene un crecimiento aproximadamente lineal del acumulado (tasa de conflictos casi constante) durante todo el horizonte simulado. En BLUE se observa de nuevo un comportamiento por fases: (i) transitorio con aumento rápido (0 – 1×10^4 s, ≈ 0 – 2.8 h), (ii) reducción progresiva de la pendiente (1×10^4 – 3×10^4 s, ≈ 2.8 – 8.3 h) y (iii) régimen quasi-estacionario a partir de $\sim 3 \times 10^4$ s (≈ 8.3 h), donde el crecimiento es residual. Comparado con 001, el nivel de meseta en BLUE es mayor (más conflictos acumulados residuales), lo cual es coherente con el incremento de densidad: aun así, la pendiente en régimen estacionario sigue siendo muy inferior a la de RED.

Conclusión: Con densidad media (2400 satélites) y radio de 2 km, la evitación local

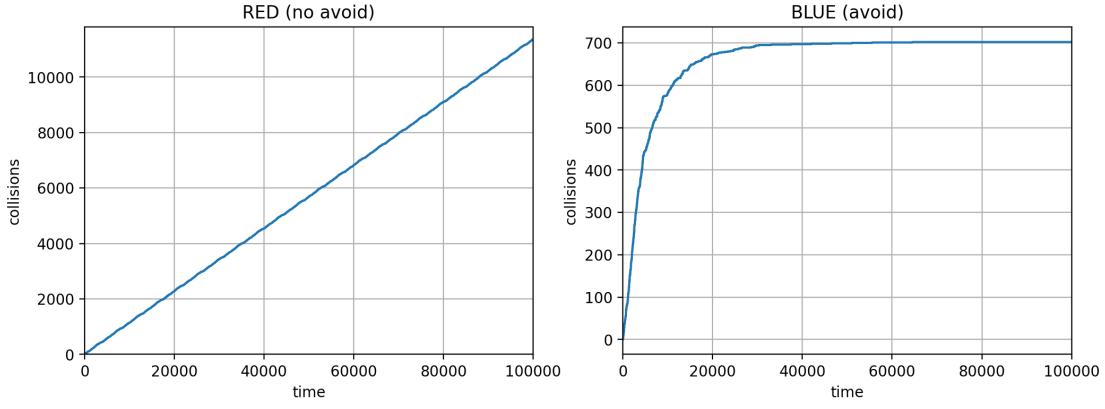


Figura 5.2: Experimento 002: comparación entre RED (sin evitación) y BLUE (evitación activada).

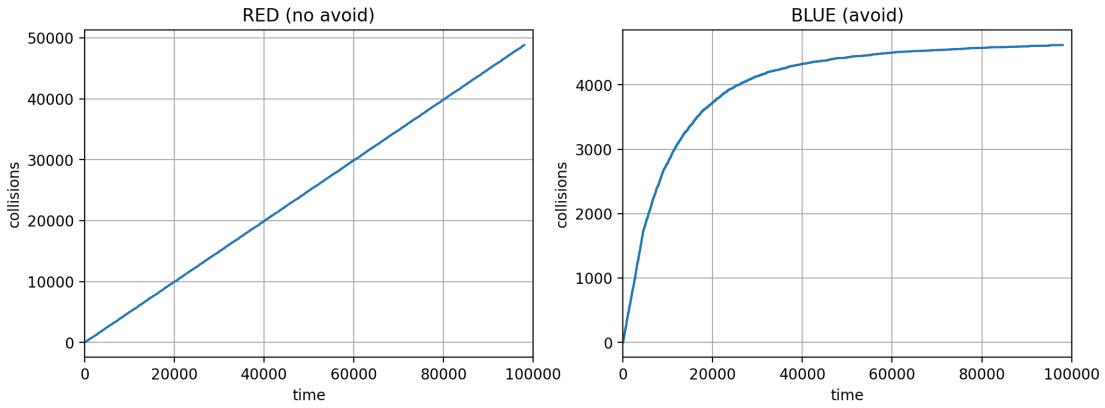


Figura 5.3: Experimento 003: comparación entre RED (sin evitación) y BLUE (evitación activada).

sigue induciendo estabilización en BLUE tras varias horas de tiempo simulado, reduciendo fuertemente la tasa de aparición de conflictos respecto a RED, aunque con una meseta final más alta que en el escenario de baja densidad.

Experimento 003: alta densidad (4800 satélites, radio 2 km)

Parámetros:

- *num-satellites*: 4800
- *altitude-km*: 550
- *omega-deg-per-sec*: 0.04
- *safety-radius-m*: 2000
- *time-x-factor*: 200
- *sim-dt-sec*: 0.5
- *phase-kick-deg*: 0.02

Resultados: La Fig. 5.3 muestra la evolución del conteo acumulado de conflictos para RED (sin evitación) y BLUE (con evitación).

Análisis: En RED se mantiene un crecimiento prácticamente lineal del acumulado, reflejando una tasa de conflictos sostenida en todo el horizonte. En BLUE se observa

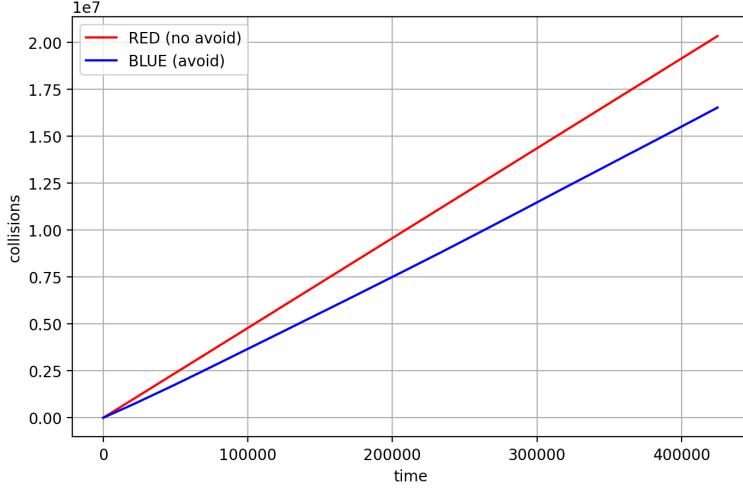


Figura 5.4: Experimento 004: comparación entre RED (sin evitación) y BLUE (evitación activada) con radio de seguridad ampliado a 20 km.

un transitorio inicial con aumento muy rápido ($0\text{--}2 \times 10^4$ s, $\approx 0\text{--}5.6$ h), seguido de una reducción progresiva de la pendiente ($2 \times 10^4\text{--}6 \times 10^4$ s, $\approx 5.6\text{--}16.7$ h) hasta entrar en un régimen cuasi-estacionario a partir de $\sim 6 \times 10^4$ s (≈ 16.7 h), donde el crecimiento residual es bajo. En comparación con los experimentos 001–002, la densidad mayor desplaza el tiempo de estabilización hacia valores más altos y eleva la meseta final (mayor acumulado residual), pero la diferencia de pendientes frente a RED sigue siendo marcada.

Conclusión: En alta densidad (4800 satélites) y radio de 2 km, la evitación local continúa reduciendo significativamente la tasa de conflictos en BLUE respecto a RED, aunque la estabilización requiere más horas de tiempo simulado y el nivel de conflictos acumulados residuales aumenta con la densidad.

Experimento 004: alta densidad y radio amplio (4800 satélites, radio 20 km) Parámetros:

- *num-satellites*: 4800
- *altitude-km*: 550
- *omega-deg-per-sec*: 0.04
- *safety-radius-m*: 20000
- *time-x-factor*: 200
- *sim-dt-sec*: 0.5
- *phase-kick-deg*: 0.02

Resultados:

La Fig. 5.4 muestra el conteo acumulado de conflictos para RED (sin evitación) y BLUE (con evitación) en el escenario de alta densidad con radio de proximidad ampliado a 20 km.

Análisis: Al aumentar el radio de seguridad a 20 km, el criterio de conflicto se aplica sobre un vecindario espacial mucho más amplio, incrementando significativamente el número de pares detectados por paso. En este régimen, **RED** mantiene un creci-

miento aproximadamente lineal del acumulado, lo que indica una tasa de conflictos sostenida durante todo el horizonte simulado. **BLUE** también presenta crecimiento aproximadamente lineal, pero con *pendiente menor* que **RED** (Fig. 5.4), evidenciando una reducción consistente de la *exposición agregada* a proximidad. No obstante, a diferencia de los escenarios con radio 2 km, no se observa un aplanamiento claro de la curva en **BLUE**: al operar con un umbral más amplio, la métrica contabiliza conflictos en una región donde la densidad efectiva permanece elevada a lo largo del tiempo.

Conclusión: En alta densidad y con radio amplio (20 km), la evitación local reduce de forma sostenida la tasa de conflictos respecto a **RED**, aunque el acumulado continúa creciendo en el horizonte analizado, reflejando un escenario intrínsecamente más exigente bajo esta definición de proximidad.

Síntesis comparativa

En los cuatro experimentos se observa un patrón robusto: **RED** mantiene un crecimiento aproximadamente lineal del conteo acumulado (tasa de conflictos casi constante), mientras que **BLUE** reduce dicha tasa al activar la evitación, con un efecto que depende tanto de la *densidad* como del *radio de seguridad*.

Para los casos con radio 2 km (Exp. 001–003), el efecto de la densidad es claro: conforme aumenta *num-satellites*, el sistema tarda más en entrar en un régimen estabilizado y/o la reducción de pendiente es menos abrupta. En particular, en **001** la estabilización de **BLUE** no es tan “cercana a cero” como en los casos posteriores, lo que es coherente con que, al existir menos conflictos iniciales, se ejecutan menos correcciones al principio y la reorganización ocurre de manera más gradual, resolviendo conflictos cuando las órbitas vuelven a interferir en regiones concretas del mapa. En **002** el transitorio es más prolongado y la estabilización es más evidente, y en **003** (alta densidad) la evitación sigue siendo efectiva en términos relativos (pendiente menor que **RED**), pero el régimen observado tiende a un crecimiento sostenido: el sistema reduce exposición agregada, aunque no elimina conflictos bajo el criterio de muestreo empleado.

El **004** introduce un cambio cualitativo al ampliar el radio a 20 km: el conflicto deja de ser un evento raro y pasa a ser una condición frecuente por la gran superficie cubierta alrededor de cada satélite. En este régimen, **BLUE** mantiene ventaja frente a **RED** (menor pendiente), pero no se aprecia convergencia como en 001–003, lo que sugiere que, con umbrales de proximidad tan amplios, la métrica captura un volumen de interacciones que permanece alto incluso tras la autorregulación local. En conjunto, la evitación es más efectiva (en términos de aplanamiento de la curva) en escenarios con radio reducido y densidades bajas-medias, mientras que para densidades altas o radios amplios su efecto se manifiesta principalmente como una *reducción relativa* de la tasa de conflictos, sin convergencia completa en el horizonte analizado.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

En conjunto, el trabajo realizado es satisfactorio no solo por los resultados obtenidos, sino por la propia construcción del entorno experimental. Se ha diseñado e implementando una simulación multiagente completa en NetLogo, con una representación geográfica global y controles parametrizables (*altitude-km*, *omega-deg-per-sec*, *safety-radius-m*, *sim-dt-sec*, *time-x-factor*, *phase-kick-deg*) que permiten explorar de forma sistemática el espacio de configuraciones sin modificar el código. Asimismo, se ha establecido una metodología comparativa robusta (poblaciones RED/BLUE con condiciones iniciales idénticas), que facilita atribuir cualquier divergencia observada exclusivamente al mecanismo de evitación.

Desde el punto de vista computacional, el modelo está diseñado para escalar: la detección de proximidad evita comparaciones globales $O(N^2)$ mediante un índice espacial simple basado en vecindad de *patches* (3×3), junto con cálculos de distancia optimizados (uso de distancia al cuadrado y precálculo de términos como $\cos \varphi$ y *km-per-deg*). Además, la estrategia temporal separa tiempo real y tiempo simulado, integrando con paso fijo y limitando el trabajo por iteración para mantener responsividad, de modo que la aceleración efectiva queda automáticamente acotada por la capacidad de la máquina sin comprometer la fidelidad del paso de integración.

En cuanto a los hallazgos, los experimentos respaldan la hipótesis principal: en escenarios con *congestión moderada* (densidades bajas y medias y radios de seguridad reducidos), la población con evitación (BLUE) reduce de manera sostenida la tasa de conflictos tras un transitorio inicial, alcanzando un régimen quasi-estacionario, mientras que el caso base sin evitación (RED) mantiene una tasa de conflictos aproximadamente constante. Esto sugiere que una política local basada en pequeñas correcciones discretas de fase puede inducir una reorganización progresiva de la constelación sin necesidad de control central ni supervisión global, al menos bajo la métrica de proximidad empleada.

A medida que aumenta la densidad o se amplía el radio de seguridad, la autorregulación sigue proporcionando una ventaja relativa (pendiente menor que RED), pero la convergencia se vuelve más lenta o puede no observarse en el horizonte simulado, delimitando el rango de aplicabilidad del enfoque y marcando líneas claras de trabajo futuro para políticas de control más ricas y/o métricas de proximidad más exigentes.

6.2. Limitaciones y mejoras futuras

Limitaciones

La principal limitación del trabajo es de naturaleza computacional. NetLogo ejecuta la simulación de manera esencialmente monohilo, sin paralelización efectiva de las operaciones intensivas (actualización de agentes, detección de proximidad y cálculo de métricas). Esto condiciona la exploración experimental a gran escala: aunque el modelo permite fijar valores elevados de *time-x-factor* para acelerar el tiempo simulado, existe un umbral a partir del cual la carga por iteración crece más rápido de lo que la CPU puede resolver, y la aceleración efectiva queda limitada por la capacidad de la máquina. En consecuencia, escenarios más exigentes en términos de densidad o radio de proximidad pueden volverse muy costosos en tiempo de ejecución; por ejemplo, configuraciones como el experimento 004 (alta densidad y radio amplio) pueden requerir del orden de ~ 24 horas de ejecución en un ordenador convencional para completar horizontes simulados comparables.

Mejoras futuras

- **Corrección progresiva:** sustituir el *phase kick* discreto por una maniobra aplicada de forma gradual (p. ej., ajuste continuo o por rampa durante varios pasos), más representativa de una evitación real.
- **Criterios de evitación más ricos:** incorporar selección multi-conflicto (no solo el vecino más cercano), reglas basadas en prioridad/tiempo de predicción, o políticas que minimicen correcciones acumuladas.
- **Predicción a corto horizonte:** estimar proximidad futura (lookahead) usando extrapolación simple de fase para anticipar conflictos en lugar de reaccionar solo cuando ya se cumple $d \leq r_s$.
- **Métricas alternativas:** complementar el conteo acumulado con medidas como tasa de conflictos por unidad de tiempo, distribución espacial/temporal de conflictos, o indicadores de “coste de maniobra” (número y magnitud total de correcciones).
- **Optimización/portabilidad del motor:** migrar el núcleo computacional a un entorno más eficiente y paralelizable (p. ej., Julia/C++ con estructura espacial tipo grid/k-d tree) manteniendo NetLogo como interfaz o solo como prototipo.

Uso de LLMs

Se ha apoyado la realización de este trabajo en el uso de modelos de lenguaje de gran escala (LLMs), concretamente ChatGPT, como herramienta de asistencia en tareas puntuales de redacción, formalización y desarrollo. En particular, se ha utilizado para:

1. **Reformulación y revisión de redacción:** reescritura de fragmentos del documento para mejorar claridad, coherencia y adoptar un tono más formal, manteniendo el contenido técnico original.
2. **Escritura de fórmulas matemáticas en L^AT_EX:** apoyo en la expresión correcta

de ecuaciones, notación y estructuras matemáticas, así como en su integración dentro del texto.

3. **Asistencia en implementación técnica:** guía para resolver bloqueos de implementación en NetLogo, por ejemplo en la búsqueda local de satélites vecinos, el uso de vecindades de *patches* y la estructuración experimental mediante poblaciones *RED* y *BLUE*.
4. **Formato y mantenimiento del documento en L^AT_EX:** ayuda en aspectos de maquetación y estilo, incluyendo ajustes de bibliografía, referencias y consistencia general del documento.

Bibliografía

- [1] Starlink (SpaceX), “Starlink — technology,” 2026. <https://starlink.com/technology>.
- [2] Eutelsat Group, “Oneweb leo constellation,” 2026. <https://www.eutelsat.com/satellite-network/oneweb-leo-constellation>.
- [3] Wikipedia contributors, “Equirectangular projection,” 2026. https://en.wikipedia.org/wiki/Equirectangular_projection.
- [4] Jet Propulsion Laboratory (NASA), “Planetary physical parameters (solar system dynamics),” 2026. https://ssd.jpl.nasa.gov/planets/phys_par.html.
- [5] Movable Type Scripts, “Calculate distance, bearing and more between latitude/-longitude points,” 2026. <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.
- [6] NetLogo Documentation, “Netlogo dictionary: in-radius,” 2026. <https://docs.netlogo.org/dict/in-radius.html>.