



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA  
INGENIERÍA DE LA SALUD

**DESARROLLO DE SISTEMA MULTIAGENTE PARA  
LA SIMULACIÓN DE EPIDEMIAS**

**MULTIAGENT SYSTEM DEVELOPMENT FOR  
EPIDEMIES SIMULATIONS**

Realizado por  
**DANIEL OLIVA GONZÁLEZ**

Tutorizado por  
**EDUARDO GUZMÁN DE LOS RISCOS**

Departamento  
**LENGUAJE Y CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
MÁLAGA, JUNIO DE 2020

Fecha defensa:



# Resumen

A lo largo de la historia la especie humana se ha visto afectada por una gran cantidad de enfermedades algunas de las cuales acabaron con muchas personas. La última ha sido la pandemia del COVID-19 o comúnmente conocido como coronavirus. Esta enfermedad se está expandiendo a gran velocidad por todo el planeta dejando altos números de contagios y fallecidos. Anterior a ella, otras enfermedades como la peste negra o el VIH supusieron una gran amenaza para la humanidad.

Es por ello por lo que, y tras el último brote de ébola especialmente, los países con mayor inversión en tecnología y bioinformática empezaron a apostar por realizar aplicaciones dedicadas a simular epidemias. Así surge el desarrollo de un sistema multiagente cuyo fin es estudiar y simular la expansión una enfermedad. En este trabajo pretende centrarse en la epidemia actual debido a los datos usados y así poder simular diferentes escenarios.

**Palabras clave:** modelado y simulación de epidemias, COVID-19, sistema multiagente.



# Abstract

Throughout the history the human specie has been affected by a lot of diseases, some of them kill many people. The last one has been COVID-19 or commonly known as coronavirus. This illness is spreading at high speed all around the world leaving an incredible amount of infections and deads. Previously, other diseases such as black plague or HIV were a major threat to the humanity.

This is why, after the last ebola outbreak specially, the countries with the biggest investment in technology and bioinformatics started putting their faith in applications to simulate epidemics. This is how the development of a multi-agent system arises, whose aim is studing and simulating the spread of an illness. This work tries to focus on the current epidemic due to the data used and thus be able to simulate different scenarios.

**Keywords:** epidemic modeling and simulation, COVID-19, multi-agent system.



# Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>1</b>
<b>Índice .....</b>	<b>1</b>
<b>Índice ilustraciones y tablas.....</b>	<b>4</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Motivación .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Conceptos previos .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Antecedentes .....</b>	<b>9</b>
.....	<b>11</b>
<b>1.5 Situación actual .....</b>	<b>12</b>
<b>1.6 Estructura de la memoria.....</b>	<b>14</b>
<b>Contexto tecnológico .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Teoría de agentes .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 ¿Qué es un agente? .....</b>	<b>16</b>
.....	<b>16</b>
<b>2.3 Características del entorno .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Sistemas multiagentes .....</b>	<b>17</b>
2.4.1 Aplicaciones de los sistemas multiagentes .....	19
2.4.2 Herramientas para su construcción.....	19
<b>2.5 Modelos de propagación de enfermedades .....</b>	<b>20</b>
<b>Metodología y herramientas de trabajo .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Metodología .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Herramientas de trabajo.....</b>	<b>25</b>
3.2.1 R y RStudio.....	25

3.2.2 Microsoft Excel .....	25
3.2.3 Github .....	25
3.2.4 Netlogo .....	26
<b>Procesamiento y análisis de los datos .....</b>	<b>27</b>
<b>Modelo básico .....</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Requisitos modelo básico .....</b>	<b>36</b>
5.1.1 Requisitos funcionales .....	36
5.1.2 Requisitos no funcionales .....	37
<b>5.2 Diseño modelo básico.....</b>	<b>38</b>
<b>5.3 Simulaciones de prueba.....</b>	<b>44</b>
<b>Modelo avanzado .....</b>	<b>47</b>
<b>6.1 Requisitos modelado avanzado .....</b>	<b>47</b>
6.1.1 Requisitos funcionales .....	47
6.1.2 Requisitos no funcionales .....	48
<b>6.2 Diseño modelo avanzado.....</b>	<b>49</b>
<b>6.3 Simulaciones de prueba.....</b>	<b>55</b>
6.3.1 Simulaciones con un país / ciudad.....	55
6.3.2 Simulación con dos países / ciudades .....	58
6.3.3 Simulaciones con cuatro países / ciudades .....	60
<b>Conclusiones y futuras mejoras .....</b>	<b>63</b>
<b>6.1 Conclusiones .....</b>	<b>63</b>
<b>6.2 Futuras mejoras.....</b>	<b>63</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>65</b>
<b>Manual de Instalación.....</b>	<b>67</b>
<b>Requerimientos: .....</b>	<b>67</b>
<b>Apertura de los modelos .....</b>	<b>69</b>
<b>Manual de uso Modelo Básico .....</b>	<b>71</b>
<b>Manual de uso Modelo Avanzado.....</b>	<b>75</b>
.....	76



# Índice ilustraciones y tablas

Ilustración 1. Estadísticas de la epidemia de sida en 2009 [4] .....	11
Ilustración 2. Zonas más afectadas por la epidemia de ébola (2014-2016) [16].....	12
Ilustración 3. Captura realizada a la página de El País el 5 de abril de 2020 [5].....	13
Ilustración 4. Mapa de casos confirmados por COVID-19 [16] .....	13
Ilustración 5. Representación de un agente en su entorno [15].....	16
Ilustración 6. Ecuaciones del modelo SI [6] .....	20
Ilustración 7. Ecuaciones del modelo SIS [6].....	21
Ilustración 8. Ecuaciones del modelo SIR [6] .....	21
Ilustración 9. Fases de CRISP-DM [16] .....	24
Ilustración 10. Variables del conjunto de datos de pacientes de COVID19 .....	27
Ilustración 11. 20 primeros síntomas de los pacientes con COVID19 .....	29
Ilustración 12. 6 primeras filas del conjunto de datos creados (parte 1).....	30
Ilustración 13. 6 primeras filas del conjunto de datos creados (parte 2).....	30
Ilustración 14. Histograma de la variable edad.....	31
Ilustración 15. Distribución de la población con el síntoma fiebre .....	31
Ilustración 16. Síntomas y sus porcentajes de aparición en la población .....	32
Ilustración 17. Otros porcentajes de utilidad .....	32
Ilustración 18. Ventana de inicio de Netlogo.....	38
Ilustración 19. Entrada del número de personas.....	39
Ilustración 20. Botón setup de la simulación.....	39
Ilustración 21. Botón go para movimiento de los agentes .....	39
Ilustración 22. Seleccionador de la forma .....	40
Ilustración 23. Ventana de entrada del porcentaje de infectados inicial.....	41
Ilustración 24. Ventanas de entrada de porcentaje de aparición de los síntomas .....	42
Ilustración 25. Creación de síntomas de los agentes.....	42
Ilustración 26. Carga y muestra de tasa de letalidad y recuperación .....	42
Ilustración 27. Ventanas de entrada de porcentaje de recuperación y fallecimiento.....	43
Ilustración 28. Ventana de entrada de porcentaje de contagio.....	43
Ilustración 29. Deslizador tiempo de recuperación .....	43
Ilustración 30. Porcentajes referidos a las mascarillas .....	43
Ilustración 31. Gráfica de población de la simulación 1 del modelo básico.....	45
Ilustración 32. Gráfica de población de la simulación 2 del modelo básico.....	46
Ilustración 34. Ventana de entrada de porcentaje de ser vacunado y efectividad de la vacuna .....	51
Ilustración 35. Ventana de entrada porcentaje de patologías previas .....	51
Ilustración 36. Ventana de entrada de número de animales.....	51
Ilustración 37. Creación de los agentes animales en la simulación.....	52
Ilustración 38. Ventana de entrada de porcentaje de cumplimiento del confinamiento ..	52

Ilustración 39. Seleccionador del número de países .....	53
Ilustración 40. Interruptor y deslizador de tendencia a realizar viajes.....	53
Ilustración 41. Fragmento de código del movimiento del agente en un país.....	53
Ilustración 42. Entorno a la mitad de la simulación 1 en el modelo avanzado.....	56
Ilustración 43. Entorno a la mitad de la simulación 8 en el modelo avanzado.....	60
Ilustración 44. Gráfica de la simulación 8 del modelo avanzado.....	62
Ilustración 45. Gráfica de la simulación 9 del modelo avanzado.....	62
Ilustración 46. Gráfica de la simulación 10 del modelo avanzado.....	62
Ilustración 47. Gráfica de la simulación 11 del modelo avanzado.....	62
Ilustración 48. Imagen obtenida de la página de Netlogo [7] .....	67
Ilustración 49. Imagen para descargar Netlogo [7] .....	68
Ilustración 50. Opciones de descarga de Netlogo [7].....	68
Ilustración 51. Interfaz inicial de Netlogo .....	69
Ilustración 52. Deslizador de la velocidad de simulación .....	72
Ilustración 53. Interfaz inicial del modelo básico .....	73
Ilustración 54. Interfaz inicial del modelo avanzado .....	76
Tabla 1. Requisitos funcionales del modelo básico .....	37
Tabla 2. Requisitos no funcionales modelo básico.....	38
Tabla 3. Requisitos funcionales modelo avanzado.....	48
Tabla 4. Gráficas de las simulaciones con cuatro ciudades .....	62



# 1

## Introducción

### 1.1 Motivación

Como consecuencia de todas las pandemias surgidas en la historia de la humanidad y que por desgracia seguiremos sufriendo, los gobiernos de los países precisaron que era necesario la creación de modelos informáticos los cuales les permitiese saber cómo actuar en estos casos. De esta forma, se podrá estudiar el impacto de una enfermedad en una población con unas características determinadas pudiendo actuar de la mejor manera posible para así disminuir posibles daños.

Desde el punto de vista personal, a la hora de la elección de esta línea de trabajo (noviembre de 2019), me decanté por el tema de la simulación puesto que siempre me interesó dicho tema. Con el avance de los días y la aparición de este virus, mi interés fue creciendo a pasos agigantados.

### 1.2 Objetivos

El objetivo del proyecto es realizar una aplicación de escritorio usando Netlogo que, mediante el estudio previo de unos datos, y la inserción de parámetros varios, permita simular y visualizar el comportamiento de una enfermedad en una población determinada para ver cómo se desarrolla con el paso del tiempo.

A partir de un conjunto de datos estadísticos sobre la COVID-19 se construirán dos modelos: En un primer modelo básico, se permitirá la simulación y visualización de la enfermedad en una población en la que los agentes, que representarán personas, realizarán actividades sencillas. Además, el usuario que ejecuta la simulación podrá ver cómo varían los porcentajes de infectados, recuperados, fallecidos y susceptibles de la población, así como ver la tasa de reproducción de la enfermedad. En la simulación, se podrán introducir el porcentaje de aparición de un síntoma específico.

En un segundo modelado avanzado se pretende mejorar la actividad del agente individuo, variando las actividades a realizar dependiendo de si se encuentra infectado, curado, es susceptible de contraer la enfermedad, vacunado o fallecido. Además, se incluirá la posibilidad de elegir entre uno, dos o cuatro países de ubicación, de tal forma que se permita y a la vez se pueda limitar el movimiento entre países y se puede activar la posibilidad de viajar entre ellos. Cada país, presentará un hospital, capaz de ingresar infectados y reducir el tiempo de curación.

De esta forma, se podrá realizar un estudio sobre dicha epidemia para lograr disminuir sus efectos en la población, así como estudiar diferentes escenarios posibles.

### **1.3 Conceptos previos**

Antes de comenzar con el tratamiento de situaciones pasadas y en este caso, de la situación actual que se está viviendo en el mundo, sería recomendable aclarar diferentes aspectos relacionados entre sí:1

- Brote epidémico: se trata de la aparición repentina de una enfermedad debida a una infección producida en un lugar específico y en un momento determinado. Un ejemplo claro de esta situación puede ser una intoxicación alimentaria.
- Epidemia: se cataloga como epidemia cuando una enfermedad se propaga activamente debido al descontrol del brote y que éste se mantiene en el tiempo, provocando un aumento en el número de casos en un área geográfica concreta.

- **Pandemia:** para la declaración de estado de pandemia se deben cumplir dos requisitos principalmente: que el brote epidémico afecte a más de un continente y que los casos provocados en cada país no sean importados, sino provocados por transmisión comunitaria.
- **Número reproductivo básico (R0):** se trata del número medio de personas contagiadas por un individuo infectado que se introduce en una población susceptible de contraer la enfermedad.
- **Tamaño de la epidemia:** se trata del número total de individuos afectados.

Así, por ejemplo, el caso más reciente de todos y que se está viviendo actualmente, se encuentra la enfermedad COVID-19 o coronavirus 2 del síndrome respiratorio agudo grave (SARS-CoV-2). Esta se transmitió por animales comercializados en mercados mayoristas de la ciudad de Wuhan, China y que se puede tratar en sus inicios de la enfermedad como un brote. Debido a su expansión por toda China pasó a ser una epidemia. Por último, conforme se fue transmitiendo por todos los continentes, la OMS acabó reconociendo la pandemia global el 11 de marzo de 2020. Todo esto se recoge en las palabras de Ángel Gil, catedrático de Medicina Preventiva y Salud Pública de la Universidad Rey Juan Carlos: “Mientras los casos eran importados y el foco epidémico estaba localizado en China la situación era calificada de epidemia pero en el momento en que salta a otros países y empieza a haber contagios comunitarios en más de un continente se convierte en pandemia”.

#### **1.4 Antecedentes**

A continuación, se van a exponer diferentes enfermedades que fueron en su momento respectivas epidemias o pandemias:

- **Peste de Justiniano:**

Cuando el Imperio bizantino se encontraba en uno de sus momentos de mayor esplendor, una epidemia de peste sacudió el mandato de Justiniano. Se trata de la primera epidemia de peste de la que se tiene constancia. La enfermedad se expandió por toda Constantinopla, una ciudad de unos 800000 habitantes, con

gran rapidez, afectando a un 40% de la población, incluido el emperador Justiniano.

- Peste negra:

El brote más importante sufrido por la humanidad de peste negra tuvo lugar a mediados del siglo XIV (1346-1353). Se conocía debida a sus antecedentes, pero no se tenía constancia de tratamiento para curarla. Esto junto a la velocidad a la que se expandió, dejó números estremecedores. La península ibérica perdió entre el 60% y 65% de la población, mientras que la región italiana de la Toscana, entre el 50% y 60%. En resumen, la población europea se disminuyó en 50 millones de personas.

- Viruela:

Su nombre hace referencia a las pústulas que surgen en la piel de la persona que la padece. Su aparición diezmo la población mundial, llegando a presentar un 30% de mortalidad, incluso alcanzando el nuevo mundo de la mano de los exploradores en el siglo XVIII, consiguiendo infectar y desfigurar a millones de personas.

- Gripe española:

En marzo de 1918, durante la Primera Guerra Mundial, se dio el primer caso en Estados Unidos. Fue una virulenta cepa del virus de la gripe que se extendió por todos los frentes mientras que las tropas se repartían en ellos. Se estima una tasa de mortalidad de un 10% a un 20%, muriendo de 20 millones de personas a 50 millones.

- Gripe asiática:

En la península de Yuhán, China, surgió en 1957 el virus de la gripe A (H2N2) de procedencia aviar. Para ese año, la Organización Mundial de la Salud (OMS) creada en 1948, se encargaba de crear vacunas anuales para paliar los efectos de la gripe. Aun teniendo en cuenta los avances médicos, esta pandemia registró un millón de muertos en todo el planeta.

- Gripe de Hong Kong:

Tan solo 10 años más tarde de superar la última pandemia de gripe, surgió en Hong Kong una variación de la gripe A (H3N2). Esta nueva cepa provocó un millón de muertos.

- Virus de Inmunodeficiencia Adquirida (VIH):

Más comúnmente conocido como SIDA. Sus primeros casos tuvieron lugar en 1981 y comenzó a extenderse, centrando los esfuerzos de las organizaciones de la salud. Se piensa que tuvo un origen animal y se podría describir como un agotamiento del sistema inmunológico. Como pasa en todos estos casos, el desconocimiento inicial del virus provocó una rápida expansión.

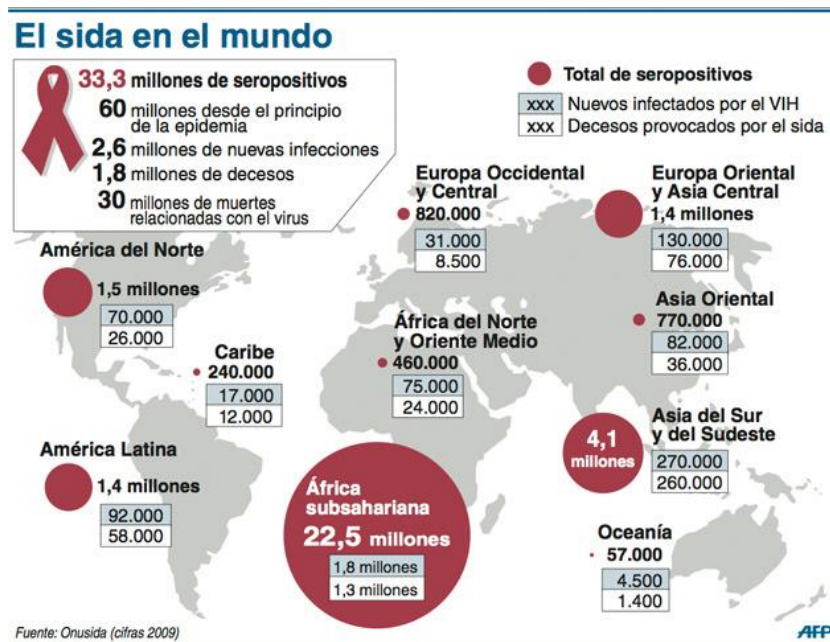


Ilustración 1. Estadísticas de la epidemia de sida en 2009 [4]

Como se observa en la Ilustración 1, el continente más afectado es África. Esto se puede deber al bajo desarrollo presente en él respecto a otros continentes, alcanzando cerca de dos millones de personas afectadas.

- Ébola:

Se trata de uno de los casos más allegados en el tiempo. El virus del ébola se descubrió por primera vez en 1976 en África. Se trata de una enfermedad grave que a menudo es mortal para el ser humano. El brote que tuvo lugar entre los años 2014 y 2016, ha sido el más importante, alcanzando las mismas cifras que los demás juntos. Las víctimas de este brote se localizaron especialmente en África.

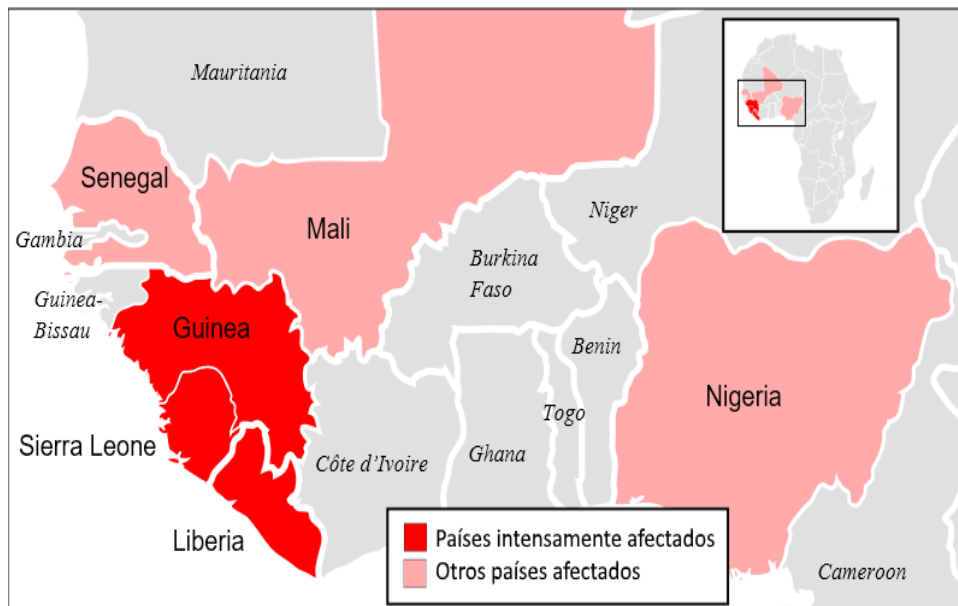


Ilustración 2. Zonas más afectadas por la epidemia de ébola (2014-2016) [16]

Además, caben destacar otras epidemias como pueden ser las de la meningitis, dengue o zika.

### 1.5 Situación actual

En estos días, el mundo se encuentra inmerso en una pandemia que prácticamente ha afectado a todos los países del mundo ya.

El COVID-19 o coronavirus 2 del síndrome respiratorio agudo grave (SARS-CoV-2) fue identificado por primera vez el 1 de diciembre de 2019 en la ciudad china de Wuhán al reportarse un número de personas con neumonía sin saberse la causa. La transmisión del virus se produce por las gotas emitidas al hablar, toser o estornudar.

Con el objetivo de frenar la expansión del virus, los gobiernos de todas las zonas del mundo están decretando restricciones de viajes, cuarentenas, confinamientos en casa entre otras medidas. Esta pandemia está teniendo un impacto a nivel mundial en diferentes aspectos como pueden ser el socioeconómico, cultural, medioambiental...

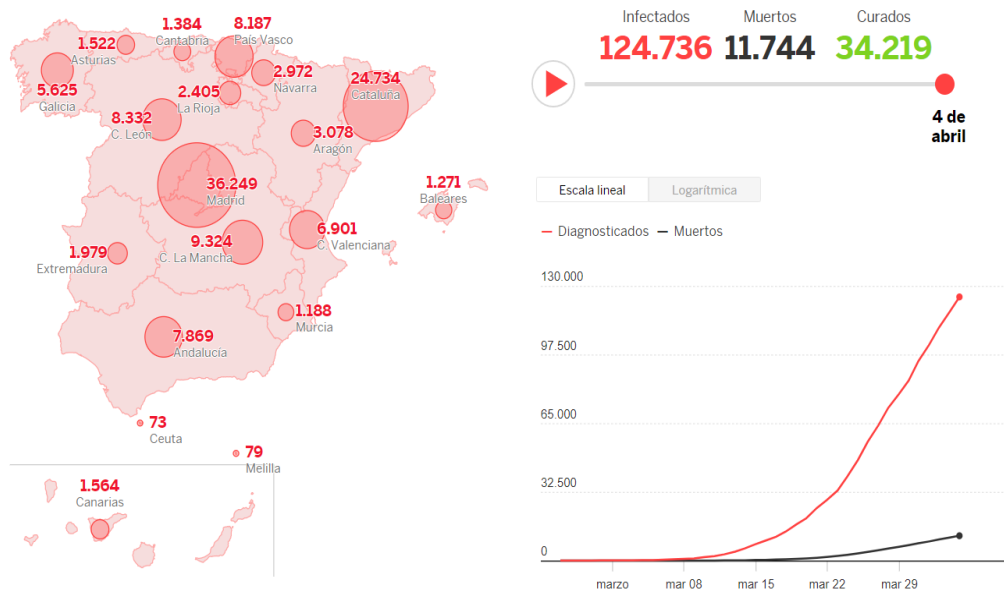


Ilustración 3. Captura realizada a la página de El País el 5 de abril de 2020 [5]

En la Ilustración 3, se pueden observar los casos de COVID-19 existentes en España hasta el 4 de abril de 2020. España es uno de los países más afectados en la actualidad por este virus. A continuación, se muestra una imagen de la expansión mundial del COVID-19.

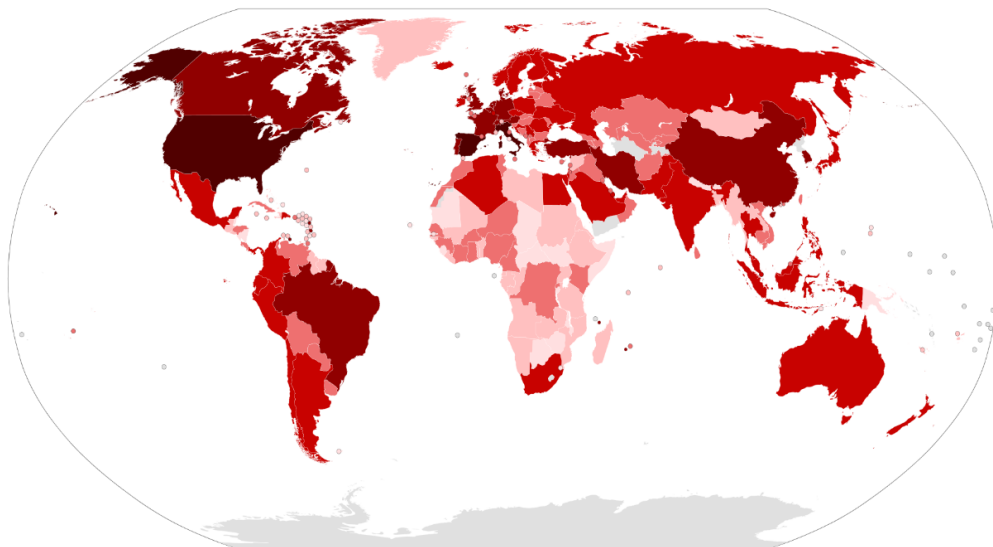


Ilustración 4. Mapa de casos confirmados por COVID-19 [16]

En la Ilustración 4, se observa el número de afectados por países representados en distintas intensidades de color; cuanto más oscuro es el color, más afectado se encuentra el país.

## 1.6 Estructura de la memoria

La memoria estará constituida por los siguientes capítulos:

**Capítulo** ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.: en este capítulo se abordarán temas como la teoría de agentes, los sistemas multiagentes y los modelos de propagación de enfermedades.

**Capítulo 0. Metodología y herramientas de trabajo:** se describirá cómo se realizará la aplicación, así como las herramientas usadas.

**Capítulo 4. Procesamiento y análisis de los datos:** para comenzar con el diseño de los modelados se va a necesitar un conjunto de datos para empezar a trabajar. En este capítulo se van a analizar y procesar el conjunto de datos para obtener otro que permita realizar los modelados

**Capítulo 5.** ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**básico:** se realizará un primer modelado sencillo, para simular la expansión de una enfermedad (en este caso COVID19), así como los síntomas destacados y la inclusión de mascarillas.

**Capítulo 6. Modelo avanzado:** se añadirán diversas mecánicas al modelado básico, tales como la inclusión de países, la oportunidad de los agentes de viajar por estos países y el confinamiento, que aportarán gran variedad en la simulación de diversos escenarios.

**Capítulo 7.** ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.: se comentarán ciertos aspectos que podrían ser implementadas con el fin de mejorar la aplicación.

# 2

## Contexto tecnológico

En la introducción se ha comentado la parte sanitaria de este trabajo. A continuación, se va a explicar la parte tecnológica, para ello se debe tratar todo lo relacionado con la teoría de agentes y el modelado en sistemas multiagentes.

### 2.1 Teoría de agentes

Los ordenadores, en general, no son buenos tomando decisiones. Cada acción realizada por una computadora es anticipada, planeada y programada por un informático. Por el contrario, si la acción no ha sido programada el sistema fallará en el mejor de los casos y en el peor, se romperá. De esta manera, las computadoras son aceptadas como máquinas que reciben órdenes y permiten realizar diversas aplicaciones. Sin embargo, para un aumento en el número de actividades es necesario el uso de otro tipo de sistemas capaces de tomar decisiones por sí mismos. Estos son conocidos como **agentes**. De ellos deriva el paradigma de la **programación de sistemas multiagentes (PSMA)** en el que a los agentes se le inserta el conocimiento que tiene el mundo de ellos e interactúan los unos con los otros originando **sistemas multiagentes**. Algunas ventajas del desarrollo con agentes son:

- Son amigables y adaptables al usuario.
- Presenta un coste bajo debido a la fácil reutilización.

- Reducción del mantenimiento: la funcionalidad puede cambiarse modificando los conocimientos, estrategias y objetivos o incluyendo nuevos agentes, nuevo conocimiento y nuevos objetivos en los agentes.
- Pueden ser compatibles con otras tecnologías como webs, base de datos...

## 2.2 ¿Qué es un agente?

Al término **agente**, según la bibliografía encontrada, se le dan definiciones diferentes. Una manera de definir a un agente podría ser como un sistema informático, objeto de software o una entidad autónoma e interactiva situada en un ambiente, reaccionando a los estímulos que les transmiten.

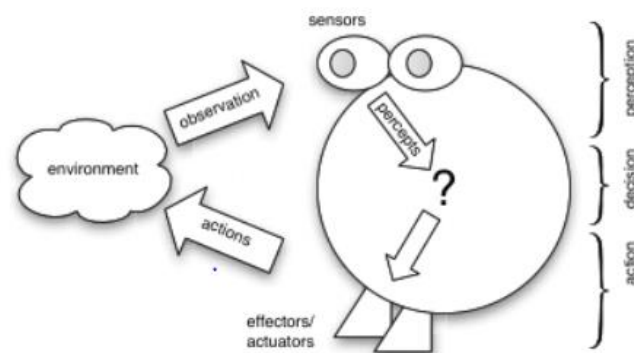


Ilustración 5. Representación de un agente en su entorno [15]

En la Ilustración 5 se representa a un agente inmerso en un entorno del que mediante unos sensores accede a información que le transmiten. Esta información va a ser procesada y finalmente se tomará una decisión que derivará en la realización de una acción por el agente.

Los agentes presentan unas reglas bases que les permiten interactuar con el entorno. También tienen reglas para cambiar reglas que les aportan adaptación. La característica fundamental es la capacidad de tomar decisiones de forma independiente, lo que es conocido como **autonomía**. Para ello, los agentes deben ser activos. Los agentes deben poseer las siguientes características:

- Son identificables, es decir, son individuos que presentan características y reglas para definir sus formas de actuar.
- Como se ha comentado anteriormente, un agente está inmerso en un entorno en el que puede interactuar con más agentes y otros objetos simulados del

entorno. Los agentes pueden colaborar para realizar diferentes tareas (sistemas multiagentes).

- Deben presentar uno o varios objetivos a cumplir, acorde a sus comportamientos. Por ello, para cumplir sus objetivos realizarán determinadas acciones (**proactividad**).
- Son flexibles, puesto que presentan la habilidad de aprender y modificar su comportamiento. Presentan reglas que les permiten adaptarse a los cambios mediante la modificación de sus reglas de comportamiento.

### **2.3 Características del entorno**

- Accesible/ inaccesible:  
Un entorno será accesible cuando el agente sea capaz de adquirir información actualizada y precisa sobre él. Cuanto más accesible sea, más sencillo será la construcción de un agente.
- Determinista/ no determinista:  
En este tipo de entorno, cada acción tiene un único efecto garantizado.
- Episódico/ no episódico:  
El agente desempeñará una acción dependiendo del episodio en el que se encuentre.
- Estático/ dinámico:  
El entorno estático es aquel que no recibe ningún cambio independientemente del acto del agente. Por el contrario, el dinámico es aquel que presenta cambios.
- Discreto/ continuo:  
Un entorno discreto está compuesto por un número de acciones, mientras que el continuo es una única acción.

### **2.4 Sistemas multiagentes**

Un sistema multiagente es aquel en el que interactúan un número de agentes. Cada agente presenta sus propios objetivos y motivaciones. Para interactuar de forma satisfactoria, los agentes necesitan las habilidades de cooperación, coordinación y negociación.

Según los agentes que compongan el sistema, éste presentará un tipo concreto de arquitectura:

- **Arquitectura reactiva pura.** Estos agentes presentan una conexión entre sensores y actuadores que hacen emerger una conducta inteligente. Su conducta se basa en estímulo-respuesta. Sus acciones no dependen del pasado, dependen únicamente del presente. Los agentes captan una observación del entorno y actúan acorde al estado presente. Por ejemplo: un termostato.
- **Arquitecturas reactivas con estado interno.** Existe un modelo del entorno que les permite decidir la reacción al estímulo. Pueden interpretar el entorno mediante una función que poseen y así poder realizar la mejor respuesta. El estado se actualiza mediante la combinación de la percepción y el estado interno.
- **Arquitecturas deliberativas.** Este tipo de arquitectura está orientada por objetivos. El funcionamiento se basa en el razonamiento, mediante decisiones lógicas, además de tener un modelo interno del entorno. La finalidad es revolver las tareas de los humanos, que les dicen qué hacer, pero no cómo. El agente elige sus propios objetivos y cómo alcanzarlos.  
Dentro de este tipo destacan los agentes BDI (Beliefs, Desires, Intentions). Presentan un razonamiento práctico. Se basan en la **deliberación** (decidir los objetivos a conseguir) y en el **razonamiento** (cómo conseguirlos). En el proceso de decisión intervienen 3 elementos:
  1. Creencias (Beliefs): saber la visión del mundo
  2. Deseos (Desires): opciones según las creencias
  3. Intenciones (Intentions): objetivos a perseguir. Este elemento permite influir en decisiones futuras y realizar restricciones en el razonamiento futuro.
- **Arquitecturas híbridas.** Este tipo presentan diferentes capas de decisión donde se combinan las aproximaciones reactivas y deliberativas. El objetivo será maximizar las ventajas de los dos modelos intentando evitar sus inconvenientes.

### 2.4.1 Aplicaciones de los sistemas multiagentes

A continuación, se van a nombrar diferentes ámbitos en los que se usan los sistemas multiagentes:

- Son utilizados en servicios de información en Internet.
- Ayudan a la recuperación y extracción de información.
- Permiten simular negociaciones.
- Son implementados en equipos móviles y PC domésticos.
- Redes públicas de telecomunicaciones.
- Se utilizan en la simulación de sistemas dinámicos.
- Muchos juegos actuales se apoyan en dicha tecnología.
- Robótica.

### 2.4.2 Herramientas para su construcción

Las herramientas o lenguajes para la programación de agentes deben contar con unas características determinadas. En ellos, se define los principales componentes del sistema (agentes) así como sus responsabilidades y capacidades y cómo interaccionan entre ellos. Destacan:

- **JADE** (Java Agent Development Framework): se trata de una plataforma dedicada al desarrollo de agentes e implementada en Java. es un middleware que facilita el desarrollo de sistemas multiagente bajo el estándar FIPA (organismo para el desarrollo y establecimiento de estándares de software para agentes heterogéneos que interactúan y sistemas basados en agentes) para lo cual crea múltiples contenedores destinados a los agentes, cada uno de los cuales puede ejecutarse en uno o en varios sistemas. Además, proporciona un entorno de ejecución con herramientas gráficas para la monitorización y administración y bibliotecas para la creación de agentes.
- **Repast**: se trata de un conjunto de herramientas de modelado y simulación basado en agentes, gratuito, de código abierto y multiplataforma. Repast fue desarrollado en la Universidad de Chicago y presenta múltiples implementaciones en diferentes idiomas. También presenta características adaptativas integradas tales como algoritmos genéticos y regresión.

- **MASON:** es un entorno de simulación de sistemas multiagentes. Fue desarrollado por la Universidad de George Mason y su primera publicación fue en 2003. Hoy en día, sigue actualizándose periódicamente.
- **Swarm:** se trata de un paquete de código abierto que permite la simulación de modelado basado en sistemas multiagentes, siendo útil para simular la interacción entre agentes y su comportamiento colectivo emergente.
- **Netlogo:** es un lenguaje de programación orientado a agentes y un entorno de modelado programable de múltiples agentes. Se encuentra orientado a la enseñanza, por lo que no es tan potente como otras herramientas dedicadas a la investigación. Se puede o descargar la aplicación de escritorio que incluye una biblioteca con diferentes modelados o utilizar la aplicación web. En su página, incluye diversos tutoriales para iniciarse, así como documentación varia. Esta será la herramienta utilizada para crear nuestro modelo.

## 2.5 Modelos de propagación de enfermedades

Los modelos matemáticos son herramientas muy utilizadas en la actualidad. Presentan objetivos como describir, explicar y predecir fenómenos y procesos en áreas tan variadas como medicina, biología, fisiología, epidemiologías entre otras muchas.

Estos modelos se basan en ecuaciones diferenciales y básicamente existen:

- **SI:** los individuos pueden estar sanos (susceptibles) o infectados.

$$\frac{dS}{dt} = -\lambda I(t)S(t)/N$$

$$\frac{dI}{dt} = \lambda I(t)S(t)/N$$

Ilustración 6. Ecuaciones del modelo SI [6]

- **SIS:** estos individuos pasan por los estados sanos, infectados y sanos de nuevo.

$$\frac{dS}{dt} = -\lambda I(t)S(t)/N + \mu I(t)$$

$$\frac{dI}{dt} = \lambda I(t)S(t)/N - \mu I(t)$$

Ilustración 7. Ecuaciones del modelo SIS [6]

- **SIR:** en este caso los individuos sanos pueden infectarse y luego pasan al estado recuperados cuando pasan la enfermedad.

$$\frac{dS}{dt} = -\lambda I(t)S(t)/N$$

$$\frac{dI}{dt} = \lambda I(t)S(t)/N - \mu I(t)$$

$$\frac{dR}{dt} = \mu I(t)$$

Ilustración 8. Ecuaciones del modelo SIR [6]

El parámetro  $\lambda$  es la tasa de contagio de la enfermedad, mientras que el parámetro  $\mu$  es la tasa de recuperación.



# 3

## Metodología y herramientas de trabajo

### 3.1 Metodología

La metodología empleada en la realización del proyecto es CRISP-DM, abreviación de “Cross-industry standard process for data mining”. Esta metodología surgió en la década de los 90. En ella se realiza una descripción del ciclo de vida de un proyecto de análisis de datos, de la misma forma a como se realiza un desarrollo de software en ingeniería. Presenta unas fases no rígidas, es decir, pueden realizarse unas antes que otras, aunque normalmente sigan la siguiente disposición:

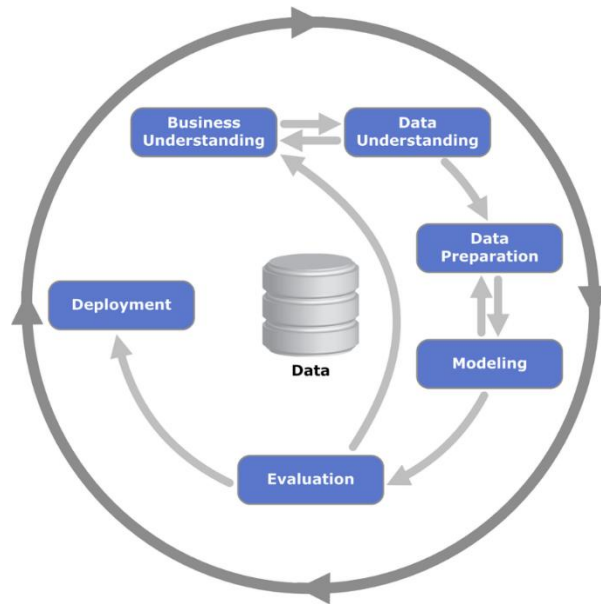


Ilustración 9. Fases de CRISP-DM [16]

A continuación, se van a explicar las fases:

- **Fase 1: Business Understanding.** En esta fase se estudian las necesidades del cliente o el negocio a trabajar. Además, también se estudian los objetivos a alcanzar.
- **Fase 2: Data Understanding.** Se realiza un estudio de los datos para ver cómo se encuentran organizados. Se realizan diferentes actividades para descubrir problemas de calidad en los datos o un determinado conocimiento previo de los datos.
- **Fase 3: Data Preparation.** Se procede a realizar un análisis de datos seleccionando las características necesarias para el conjunto de datos final. Se realizan tareas como selección de tablas, registros y atributos...
- **Fase 4: Modelling.** Se aplican técnicas de modelado para abordar el problema en cuestión. Para la realización de estas técnicas es necesario, muchas veces, volver a los datos debido a ciertos requerimientos específicos.
- **Fase 5: Evaluation.** Se realiza una evaluación para obtener resultados. Se evalúan todos los pasos para ver si existe alguna cuestión de negocio que no ha sido suficientemente considerada.
- **Fase 6: Deployment.** Se trata de la puesta en producción del producto o de la presentación al cliente para que así pueda usarlo.

## 3.2 Herramientas de trabajo

### 3.2.1 R y RStudio

R se trata de un lenguaje de programación orientado al análisis estadístico, siendo un lenguaje muy utilizado en investigación científica (minería de datos, machine learning, bioinformática...). Una de sus ventajas es la posibilidad de cargar librerías y paquetes de diversas funcionalidades. La versión utilizada ha sido la 3.6.2.

El entorno de desarrollo usado para programar en R ha sido **RStudio**, donde se dispone de una consola y de un editor de sintaxis con la función de ejecutar el código. La versión usada ha sido la 1.2.5033.

R y RStudio han sido utilizados en el proyecto para leer los datos, realizar el análisis de estos y conformar el conjunto de datos que finalmente sería utilizado para el modelado.

### 3.2.2 Microsoft Excel

Microsoft Excel se trata de la hoja de cálculo de Microsoft para Windows, MacOS... Presenta diversas características como funciones de cálculo o representaciones gráficas. La versión utilizada es 2004. Junto a R y RStudio ha sido utilizada para el análisis de los datos y para realizar la normalización de los síntomas de los pacientes del conjunto de datos como se verá en el análisis de datos.

### 3.2.3 Github

Para el control de las versiones se ha usado **Github**, una conocida plataforma de desarrollo colaborativo para alojar diversos proyectos. Se permiten crear diversos repositorios y realizar diferentes ramas, además de recuperar los archivos subidos a cada repositorio.

Para acceder a dicha plataforma se pueden usar dos vías, su página web [2] o mediante la aplicación de escritorio **Github Desktop**, la cual ha sido empleada en dicho trabajo con la versión 2.4.3.

### 3.2.4 Netlogo

Por último, pero no por eso menos importante, aparece la plataforma **Netlogo** la cual ha sido utilizada para realizar el modelado del sistema multiagente con el que se realiza la simulación de la expansión de una epidemia.

Esta plataforma ha sido explicada en el Capítulo 0. Al igual que ocurre con Github, a ella se puede acceder mediante su aplicación web [7] y con su aplicación de escritorio, que puede ser descargada desde su página. En este trabajo se ha utilizado la aplicación de escritorio para no depender del funcionamiento de su web. La versión empleada ha sido Netlogo 6.1.1.

# 4

## Procesamiento y análisis de los datos

Antes de comenzar, se ha de recalcar que el archivo íntegro del análisis de datos es “Análisis\_datos\_pacientes.docx”. En este anexo no se incluirá el archivo entero puesto que se va a realizar una especie de resumen incluyendo solo lo que es necesario y eliminando así la parte del código.

Una vez fueron cargados los datos de los pacientes, lo primero era ver cómo se encontraban organizados, es decir, qué variables presentaba cada uno.

```
names(datos_pacientes)

## [1] "id" "case_in_country"
## [2] "reporting.date"
## [4] "summary" "location" "country"
## [7] "gender" "age" "symptom_onset"
## [10] "If_onset_approximated" "hosp_visit_date"
## [11] "international_traveler"
## [13] "domestic_traveler" "exposure_start" "exposure_end"
## [16] "traveler" "visiting.wuhan" "from.Wuhan"
## [19] "death" "recovered" "symptom"
## [22] "source" "link"
```

Ilustración 10. Variables del conjunto de datos de pacientes de COVID19

Como se puede observar, hay más de 20 variables, de las cuáles no todas serán usadas, además de que alguna será cambiada para facilitar su uso.

A continuación, se van a explicar dichas variables:

- Id: número de identificación para cada paciente.
- Case\_in\_country: se trata del número de caso de esa persona en su país.

- Reporting date: fecha en la que se notificó el caso.
- Summary: resumen general del paciente, si visita Wuhán, síntomas, cuándo aparecen los síntomas...
- Location: provincia/ estado de la que pertenece el individuo.
- Country: país del que pertenece el individuo.
- Gender: sexo del individuo.
- Age: edad del individuo.
- Symptom\_onset: fecha de aparición de síntomas.
- If\_onset\_approximated: fecha de aparición aproximada.
- hosp\_visit\_date: fecha de visita al hospital.
- International\_traveller: indica si el individuo ha viajado (1) o no (0) fuera de las fronteras de su país.
- Domestic\_traveller: indica si el individuo ha viajado (1) o no (0) dentro de las fronteras de su país.
- Exposure\_start: fecha de inicio de exposición a la enfermedad.
- Exposure\_end: fecha de fin de la exposición.
- Traveler: indica si el individuo ha viajado o no.
- Visiting\_Wuhan: indica si el individuo visita Wuhán.
- From\_Wuhan: indica si el individuo proviene de Wuhán.
- Death: indica si el individuo ha muerto.
- Recovered: indica si el individuo se ha recuperado de la enfermedad.
- Symptom: síntomas que han aparecido en el individuo.
- Source: fuente de donde se consiguen los datos.
- Link: URL de los datos.

En el análisis original, se comenzaba estudiando las distintas variables interesantes para los modelados. En este caso, se ha de comentar primero que no todos los pacientes tenían todos sus campos con datos, así que antes de realizar el estudio, se eliminaron aquellos pacientes que presentaban el género, la edad o los síntomas vacíos. En algunas otras características también había algunos pacientes con los campos vacíos, aunque esto era debido a que algunos países, por ejemplo, el no visitar un hospital lo denotaban con un NA o simplemente sin rellenar la celda del paciente.

Por ello, antes de realizar este cribado había 3257 pacientes; una vez hecho, restan 265.

El objetivo es montar un nuevo dataset con aquellos datos que van a ser necesarios para el modelado. Algunas de las variables que hay van a ser modificadas. Por ejemplo, el día de la visita al hospital va a ser cambiado por un booleano (verdadero, 1, o falso, 0) de si el paciente visitó el hospital. Se añaden las variables edad, género y síntomas. Por último, antes de realizar la exploración de los datos, se advirtió que no todos los síntomas se encontraban dispuestos de la misma forma, por lo que se debían normalizar. A continuación, se ven algunos de los síntomas que aparecían en el conjunto de datos:

```
head(levels(datos_pacientes$symptom),20)
## [1] "back pain, fever, runny nose"
## [2] "chest discomfort"
## [3] "chills"
## [4] "chills, cough, fever"
## [5] "chills, fever, malaise"
## [6] "chills, headache, fatigue"
## [7] "cold, fever, pneumonia"
## [8] "cough"
## [9] "cough with sputum"
## [10] "cough, chest pain"
## [11] "cough, chill, muscle pain"
## [12] "cough, chills, joint pain"
## [13] "cough, chills, shortness of breath, diarrhea"
## [14] "cough, diarrhea, vomiting"
## [15] "cough, fever"
## [16] "cough, fever, chills"
## [17] "cough, fever, headache, nausea, vomiting, diarrhea"
## [18] "cough, fever, joint pain"
## [19] "cough, general malaise, joint muscle pain"
## [20] "cough, itchy throat"
```

Ilustración 11. 20 primeros síntomas de los pacientes con COVID19

El siguiente paso era normalizar estos síntomas de tal forma que cada paciente tuviera una celda por síntoma y una variable booleana que indicara si presentó dicho síntoma o no. De esta manera, se generará un conjunto de datos donde para cada paciente aparezcan todos los síntomas y “true” si lo padece o “false” en el caso contrario. Se van a tener algunas consideraciones en la realización de esta normalización:

- La primera de ellas es que los datos provienen de diferentes países por lo que existen síntomas nombrados de diferentes formas. Así por ejemplo existían pacientes con el síntoma “tired” que en el dataset ha sido clasificado en “fatigue”, entre otros muchos ejemplos.

- La segunda es que en esta clasificación no se va a atender al grado del síntoma. Al normalizar los datos algunos eran del estilo “high fever”, el cual no tendría cabida en el dataset, por lo que se le añade un “true” a la variable “fever”.
- La tercera es que algunos síntomas podían ser englobados en otros y aparecían en pocos pacientes. Así que para no sobrecargar el dataset, no se ha añadido ese síntoma y al paciente que lo presentaba se le ha puesto el síntoma más general y que englobaba el mencionado anteriormente.
- Y, por último, también ocurría el caso contrario a la tercera consideración. Algunos pacientes tenían “flu symptoms”, por lo que se ha optado en dividirlo en los síntomas que aparecen en el dataset.

Ahora se verá cómo queda el conjunto de datos creado:

id	gender	age	fever	cough	difficult.in.breathing	fatigue	joint.pain	pneumonia
195	female	28	true	true	true	false	false	false
196	female	51	true	true	true	false	false	false
197	male	37	true	false	false	false	false	false
254	male	35	true	false	false	false	false	false
268	male	45	true	true	false	false	false	false
271	female	55	true	true	false	false	false	false

Ilustración 12. 6 primeras filas del conjunto de datos creados (parte 1)

id	gender	age	fever	cough	difficult.in.breathing	fatigue	joint.pain	pneumonia
195	female	28	true	true	true	false	false	false
196	female	51	true	true	true	false	false	false
197	male	37	true	false	false	false	false	false
254	male	35	true	false	false	false	false	false
268	male	45	true	true	false	false	false	false
271	female	55	true	true	false	false	false	false

Ilustración 13. 6 primeras filas del conjunto de datos creados (parte 2)

Para empezar la exploración de los datos, se iniciará con la edad. La media de esta variable es 54.39 y su mediana es 55. También se ha realizado el histograma

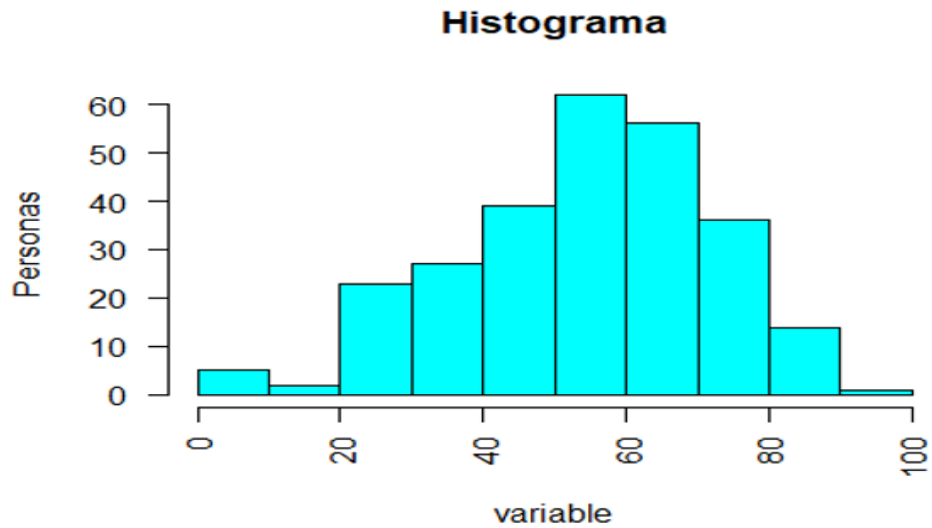


Ilustración 14. Histograma de la variable edad

Como es sabido, esta enfermedad afecta con mayor severidad a las personas de mayor edad, por lo que a la hora de realizar el modelado se añadirá un aumento en el porcentaje de fallecer para las personas mayores a 60 años, Ahora se verá la distribución del síntoma fiebre.

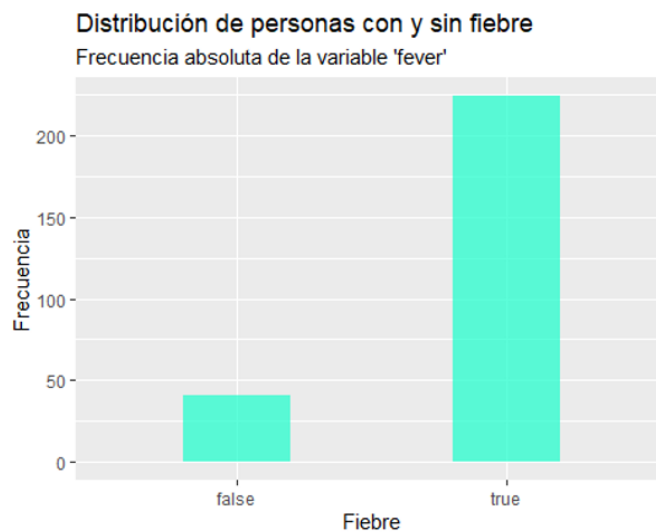


Ilustración 15. Distribución de la población con el síntoma fiebre

Se puede observar que este síntoma es muy frecuente en esta enfermedad. Para ver el porcentaje exacto de cada síntoma, se ha realizado una tabla donde se ve cada síntoma y su porcentaje, que serán los introducidos tanto en el modelo básico como en el avanzado.

	nombres	valores
	Porcentaje de fiebre	84.53
	Porcentaje de tos	36.98
	Porcentaje dificultad al respirar	8.68
	Porcentaje de fatiga	7.55
	Porcentaje de dolor articular	4.91
	Porcentaje de neumonía	4.15
	Porcentaje de vómitos	3.02
	Porcentaje de diarrea	2.26
	Porcentaje de malestar	19.25
	Porcentaje de dolor muscular	5.66
	Porcentaje de dolor de garganta	10.57
	Porcentaje de pérdida de apetito	1.13
	Porcentaje de náusea	1.13
	Porcentaje visita hospital	79.25

Ilustración 16. Síntomas y sus porcentajes de aparición en la población

El porcentaje de neumonía es tan bajo debido a que, como los pacientes eran de diferentes países, algunos incluían neumonía como un síntoma y otros lo añadían en el “summary” del paciente.

También, de estos datos se puede obtener la probabilidad de fallecer, la probabilidad de recuperación y la de viajar:

	nombres2	valores2
	Porcentaje muerte	3.02
	Porcentaje recuperación	7.17
	Porcentaje viajeros	14.72

Ilustración 17. Otros porcentajes de utilidad

En la Ilustración 17 se observa que el porcentaje de fallecer y de recuperarse no son datos representativos, por lo que para la realización del modelado se usarán o los datos mundiales o los de España.

A día 3 de junio, en España el porcentaje de recuperación es de 62.67% y el de fallecimiento de 11.31%, mientras tanto a nivel mundial el porcentaje de recuperación es de 44.44% y el de fallecimiento de 5.91%. Esta variación se debe a que la enfermedad llegó antes a España que a otros lugares del mundo.

Por último, para ver la probabilidad de conseguir una mascarilla se usarán los datos en España. Para obtener el número de mascarillas se usa el siguiente enlace. En esta página se da información en forma de conjunto de datos sobre la epidemia del COVID19 en España. El número de mascarillas repartidas el día de la consulta al conjunto de datos (9 de mayo de 2020) era de 27605827 unidades, por lo que

teniendo en cuenta que la población española es de 47100396 habitantes, se obtiene un porcentaje de 58.61%.



# 5

## Modelo básico

Como se ha comentado anteriormente en la sección 3.1, la metodología empleada va a ser la CRISP-DM. Para comenzar el desarrollo del modelado básico, se va a necesitar un conjunto de datos que aporte las suficientes características para poder simular la epidemia en cuestión.

En este caso, con el tema del COVID19 muy reciente, los datos escogidos van a ser sobre esta enfermedad, como se ha visto en el capítulo 4. Así, para el modelado básico se va a necesitar un conjunto de datos de pacientes en el que se muestre la información sobre los síntomas mostrados al padecer la enfermedad. Este conjunto de datos aporta otra gran cantidad de información que no va a ser empleada ni en este modelado ni en el siguiente.

Otra información necesaria para este modelo va a ser la posibilidad de un ciudadano de conseguir una mascarilla y la probabilidad de recuperación, fallecimiento o contagio. Para estos tres últimos datos, se aportará un archivo con los datos de España y otro con los del mundo.

El modelo matemático empleado será el SIR con la inclusión de fallecidos.

## 5.1 Requisitos modelo básico

### 5.1.1 Requisitos funcionales

Requisitos	Descripción
<b>Creación de agentes</b>	El usuario podrá crear un determinado número de agentes y con una forma una vez se hayan completado todas las variables de entrada. Deberá pulsar el botón <b>setup</b> .
<b>Elección de los síntomas</b>	El usuario podrá escoger la probabilidad de aparición de cada síntoma.
<b>Elección porcentaje infección inicial</b>	El usuario deberá introducir por pantalla el porcentaje de infectados al inicio de la simulación.
<b>Elección de tasa de recuperación, contagio y fallecimiento</b>	El usuario podrá introducir por pantalla las diferentes tasas posibles en forma de porcentaje.
<b>Elección de tiempo de recuperación</b>	El usuario escogerá el tiempo de recuperación de la enfermedad.
<b>Inclusión de mascarillas</b>	El usuario tendrá la posibilidad de incluir mascarillas, así como introducir el porcentaje de protección de éstas.
<b>Carga de datos de contagiado, recuperados y fallecidos</b>	El usuario podrá cargar un archivo con el número de infectados, recuperados y fallecidos.
<b>Mostrar tasa de fallecimientos y de recuperación</b>	El usuario podrá mostrar la tasa de fallecimientos y de recuperación cuando haya cargado los datos correspondientes.

<b>Ver tasa R0</b>	El usuario podrá ver en un monitor cómo va variando la tasa R0 a lo largo de la simulación.
<b>Ver porcentajes de recuperados, contagiados, fallecidos y susceptibles de la población</b>	El usuario podrá ver diferentes porcentajes de interés dentro de la población.
<b>Hacer una simulación</b>	El usuario podrá realizar la simulación de la enfermedad una vez se hayan creado los agentes de simulación Deberá pulsar el botón <b>go</b> .
<b>Ver una simulación</b>	El usuario podrá visualizar la expansión de la enfermedad en una población.
<b>Exportar interfaz</b>	El usuario podrá crear un archivo de imagen de la simulación.
<b>Exportar datos de los agentes</b>	El usuario podrá crear un archivo .csv con los datos de los agentes. Esta opción es aportada por el mismo programa.

Tabla 1. Requisitos funcionales del modelo básico

### 5.1.2 Requisitos no funcionales

<b>Requisitos</b>	<b>Descripción</b>
<b>Usabilidad</b>	La interfaz será fácil de usar e intuitiva. El tiempo de aprendizaje del usuario no será demasiado.
<b>Dependibilidad</b>	La aplicación no depende de un servidor externo o de conexión a internet.
<b>Mantenimiento</b>	El código se encontrará propiamente comentado, recalando las partes de más difícil comprensión.

<b>Documentación</b>	La aplicación tiene un manual de usuario para poder realizar la simulación de forma sencilla
----------------------	--

Tabla 2. Requisitos no funcionales modelo básico

## 5.2 Diseño modelo básico

En este apartado se va a comentar cómo se ha realizado el modelo 1. Para empezar, este tipo de modelado que se va a realizar solo necesita de un tipo de agente (los humanos). En el capítulo 6, se verá que para este modelo harán falta varios tipos de agentes más.

Cuando se crea un proyecto nuevo en Netlogo, se abre una pestaña como la siguiente:

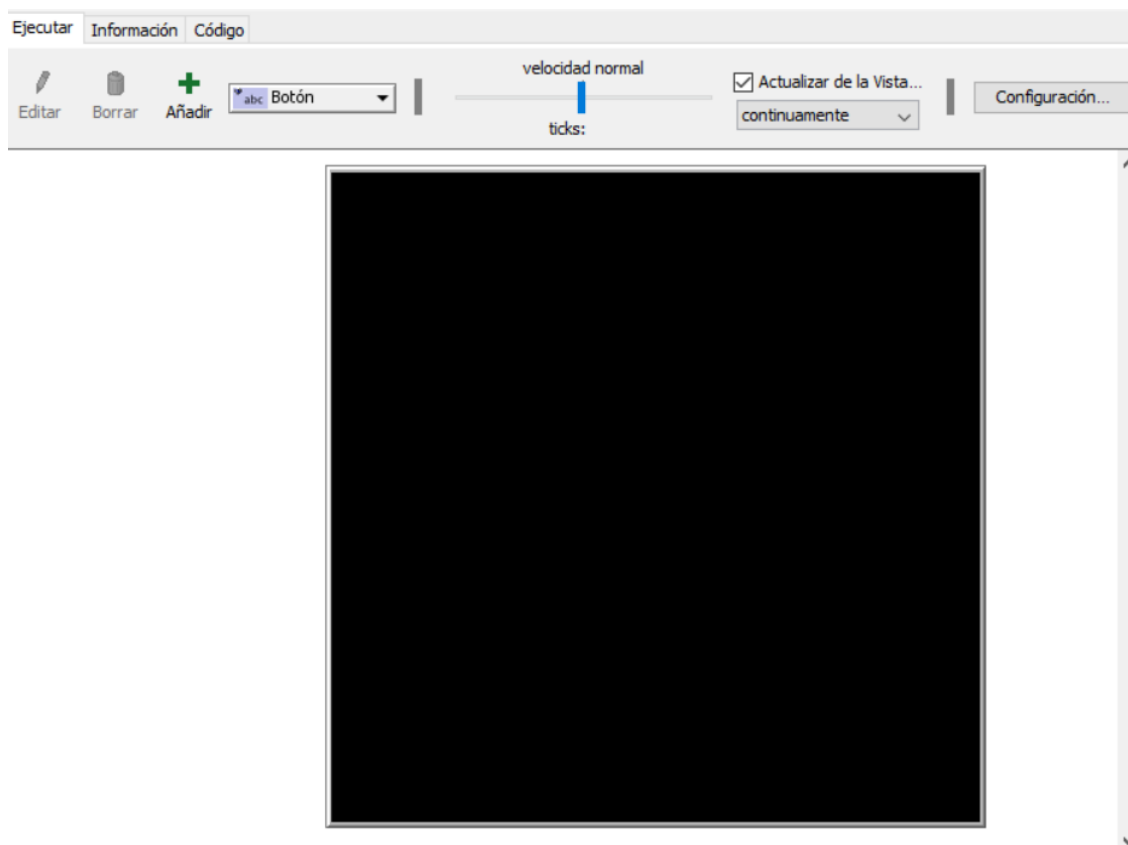


Ilustración 18. Ventana de inicio de Netlogo

Lo ideal antes de continuar, sería ajustar el tamaño de la ventana del modelado, con el fin de garantizar que se pueda ver la simulación, así como todas las ventanas de entrada y los monitores. En el cuadrado negro que se observa en la Ilustración 18 es donde se va a realizar la simulación. El proceso utilizado ha sido muy sencillo, se empezó añadiendo los agentes sin ningún tipo de funcionalidad y a partir de ahí,

mediante una forma progresiva, se fueron complementado las acciones que podían realizar los agentes y las características de estos.

Para crear un número exacto de agentes, se va a añadir una entrada de número, con el fin de que el usuario pueda decidir cuántas personas van a participar en la simulación.



Ilustración 19. Entrada del número de personas

El siguiente paso realizado fue comprobar si se creaban correctamente los agentes, para lo que se añadirá un botón setup, cuya función es “llamar” al procedimiento de creación de agentes.



Ilustración 20. Botón setup de la simulación

También, se quería ver si se producía el movimiento de los agentes. De esta forma se incluirá el botón go, que es el encargado de simular el movimiento de los agentes en el mapa. Este botón permanecerá desactivado hasta la creación de los agentes. Además, no hará falta pulsar cada vez que se quiera avanzar en la simulación.



Ilustración 21. Botón go para movimiento de los agentes

Hasta ahora, se ha realizado lo esencial para la simulación. El siguiente paso será ir añadiendo los diferentes atributos de los agentes. En este entorno de desarrollo, se distinguen atributos de las “tortugas” (forma de denominar de Netlogo a los agentes de simulación) y atributos globales de la simulación.

Los atributos añadidos a los agentes serán:

- Variable booleana que indicará si se encuentra infectado de la enfermedad.
- Variable booleana que indicará si ha curado de la enfermedad.

- Variable booleana que indicará si es susceptible de contraer la enfermedad.
- Variable numérica que dará los días que tarda un agente en recuperarse.
- Variable numérica que contará el número de días que lleva contagiado un agente
- A continuación, se añadirán tantas variables booleanas como síntomas se hayan encontrado en la exploración de los datos (capítulo 4)
- Por último, otra variable booleana que indicará si un agente ha podido conseguir una mascarilla o no.
- Otras variables de los agentes serán el tamaño (predeterminado en 1.5), la forma y el color. La forma podrá ser escogida en un seleccionador entre un punto, una silueta humana o una tortuga.

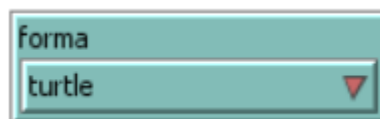


Ilustración 22. Seleccionador de la forma

El color variará según si el agente se encuentra infectado, es susceptible o se ha curado. Para ello, se ha configurado un procedimiento de asignación del color.

Como se puede observar, no se ha añadido una variable que indique si el agente ha fallecido o no. Esto es debido a que el mismo entorno facilita una instrucción (die) para eliminar a los agentes que fallezcan.

Como se ha nombrado anteriormente, también existen variables globales de numéricas para la simulación que almacenan la siguiente información:

- Número de contagios en la simulación.
- Número de recuperaciones en la simulación.
- Número de fallecidos en la simulación.
- Porcentaje de contagios en la simulación.
- Porcentaje de curados en la simulación.
- Porcentaje de fallecidos en la simulación.
- Porcentaje de susceptibles en la simulación.
- Porcentaje de recuperación según los datos introducidos.
- Porcentaje de fallecidos según los datos introducidos.

- Número de casos según los datos introducidos.
- Número de recuperaciones según los datos introducidos.
- Número de fallecidos según los datos introducidos.
- Número de infectados en el instante previo.
- Tasa  $R_0$ .
- Tasa de recuperación.
- Tasa de nuevas infecciones.

Ahora, el paso correspondiente sería añadir una entrada para calcular el número de infectados sobre la población inicial. La infección inicial se hará en el mismo procedimiento de creación de agentes, de tal forma que se generará un número flotante aleatorio de 0 a 100 y si este número es menor que el porcentaje introducido, este agente en cuestión se infectará. Esta forma de calcular la infección es realmente la usada en la mayoría de procesos “aleatorios” de este modelo de simulación. Además, cuando se produzca la infección, se le asignará al agente los síntomas correspondientes según los porcentajes.

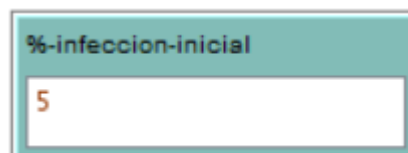
A screenshot of a software input window. The window has a light blue header with the text "%-infeccion-inicial". Below the header is a white input field with a thin border, containing the number "5" in a dark font.

Ilustración 23. Ventana de entrada del porcentaje de infectados inicial

Lo próximo a implementar serían los síntomas. Como se comenta en el capítulo 4, en el conjunto de datos hay una variable dedicada exclusivamente a los síntomas, aunque algunos síntomas son nombrados de diversas formas por lo que se realizó una normalización de los síntomas.



Ilustración 24. Ventanas de entrada de porcentaje de aparición de los síntomas

Las ventanas se encuentran inicializadas con los porcentajes obtenidos del conjunto de datos. Como se ha nombrado ya, la creación de síntomas se basará en números aleatorios.

```

to crear-sintomas
  if infectado? = true
  [
    ifelse random-float 100 < %fiebre
    [set fiebre? true][set fiebre? false]
    ifelse random-float 100 < %tos
    [set tos? true][set tos? false]
  ]

```

Ilustración 25. Creación de síntomas de los agentes

En la Ilustración 25 se puede ver cómo para poder crear los síntomas el agente debe haber sido infectado previamente. A continuación, para cada uno de los síntomas, si el número generado es menor que el porcentaje en cuestión, dicho agente presentará ese síntoma. Si por el contrario el número es mayor, no lo presentará.

Una vez incluidos los síntomas, se añadirá un botón para cargar los datos de infectados, recuperados y fallecidos en un archivo .txt (Ej: 564 465 50) para poder después mostrar las tasas de recuperación y letalidad.

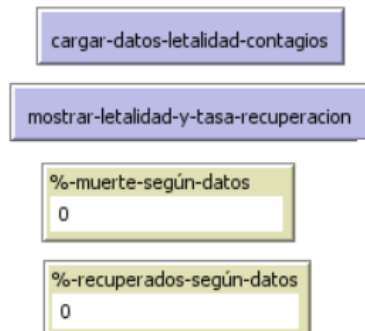


Ilustración 26. Carga y muestra de tasa de letalidad y recuperación

Estos datos calculados podrán ser usados en la simulación en las siguientes ventanas de entrada.

Two input boxes are shown. The first box is labeled '%-probabilidad-recuperacion' and contains the number 50. The second box is labeled '%-probabilidad-muerte' and contains the number 5.61.

Ilustración 27. Ventanas de entrada de porcentaje de recuperación y fallecimiento

Agregados a estas ventanas, se encontrará la que permitirá incluir el porcentaje de contagio en la población.

A single input box labeled '%-probabilidad-contagio' containing the number 40.

Ilustración 28. Ventana de entrada de porcentaje de contagio

La última información que queda por recibir de un agente es el tiempo de recuperación que va a necesitar.

A slider control labeled 'tiempo-recuperacion' with a red marker at the 50 position on a scale from 0 to 50.

Ilustración 29. Deslizador tiempo de recuperación

Para obtener el tiempo de recuperación de un agente, se hallará un número entre 0 y el doble del tiempo introducido.

La siguiente implementación será la manera de infectar de los contagiados, la posibilidad de fallecer y de recuperarse y la posibilidad de obtener mascarillas.

Para obtener una mascarilla y que éstas tengan un efecto, se introducirán por pantalla dos porcentajes más:

Two input boxes are shown side-by-side. The first box is labeled '%-conseguir-mascarilla' and contains the number 50. The second box is labeled '%-proteccion-mascarilla' and contains the number 20.

Ilustración 30. Porcentajes referidos a las mascarillas

Para la obtención de una mascarilla el agente tiene que ser susceptible y la conseguirá de forma aleatoria (se generará un número y si éste es menor al porcentaje, la obtendrá).

En el proceso de recuperación, por cada día pasado el contado de tiempo de infección aumentará. Si esta variable es mayor que el tiempo de recuperación de dicho agente, este podrá recuperarse. Con el fallecimiento pasa lo mismo, si la infección lleva en el agente más días que lo estipulado en su tiempo de recuperación, este podrá fallecer. Cuando un agente infectado se mueva en el entorno, será capaz de infectar a otros agentes cercanos, siempre y cuando, éstos no estén infectados ni hayan pasado la enfermedad ya. Luego, hay que tener en cuenta que ciertos agentes pueden presentar mascarillas, reduciendo así su probabilidad de ser contagiado.

Respecto al movimiento y las acciones de los agentes, todos podrán moverse (en este modelo) con libertad, independientemente de si están o no infectados. Además, los contagiados podrán infectar y recuperarse o fallecer. Los susceptibles tendrán la posibilidad de conseguir mascarillas.

Para acabar, se deberán calcular los porcentajes de infectados, recuperados, susceptibles y fallecidos en la población, así como la tasa  $R_0$ . Esta tasa  $R_0$  será calculada siguiendo las ecuaciones del modelo matemático de propagación de enfermedades SIR, para lo que se deberá tener en cuenta la tasa de nuevos infectados y recuperados por cada día (unidad de tiempo de la simulación) como se puede ver en la ilustración 8, apoyándonos en la función propuesta en uno de los modelos de Netlogo.

Otro aspecto introducido es la exportación de interfaz, que permite guardar la interfaz del programa en un instante determinado.

### 5.3 Simulaciones de prueba

En este apartado se realizarán dos simulaciones de prueba. Realmente el modelado que va a permitir tener varios escenarios es el siguiente, debido a la inclusión de varios parámetros y mecánicas más.

En esta **primera simulación**, no se van a incluir mascarillas y se van a usar los porcentajes de los síntomas obtenidos. También, se usarán los porcentajes de recuperación y de fallecimientos de los datos de España del 3 de junio de 2020

(archivo "covid19\_españa\_03\_06.txt"). Se establecerá un tiempo de recuperación de 30 días y una probabilidad de contagio de 40%. El número de personas iniciales será de 100 con una infección inicial del 5%.

Los datos obtenidos al final de esta simulación son:

- Tasa R0: 1.98
- Porcentaje de recuperados: 79%
- Porcentaje de fallecidos: 17%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de susceptibles: 4%

En esta **segunda simulación**, la probabilidad de conseguir mascarillas será del 50% y disminuirán un 30% la posibilidad de contagiarse. Los demás parámetros son los mismos que la simulación anterior para ver la comparación.

Los datos obtenidos al final de esta simulación son:

- Tasa R0: 1.98
- Porcentaje de recuperados: 79%
- Porcentaje de fallecidos: 13%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de susceptibles: 8%

En lo que a los datos obtenidos se refiere, no existen unas diferencias abismales, pero en las gráficas de la población, sí se notan grandes cambios.

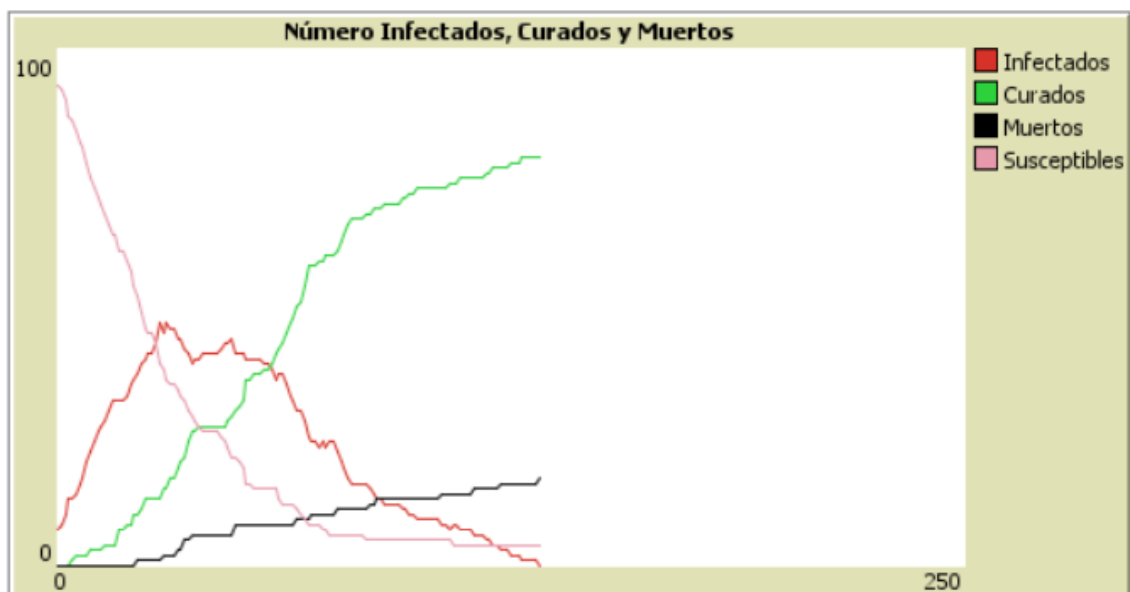


Ilustración 31. Gráfica de población de la simulación 1 del modelo básico

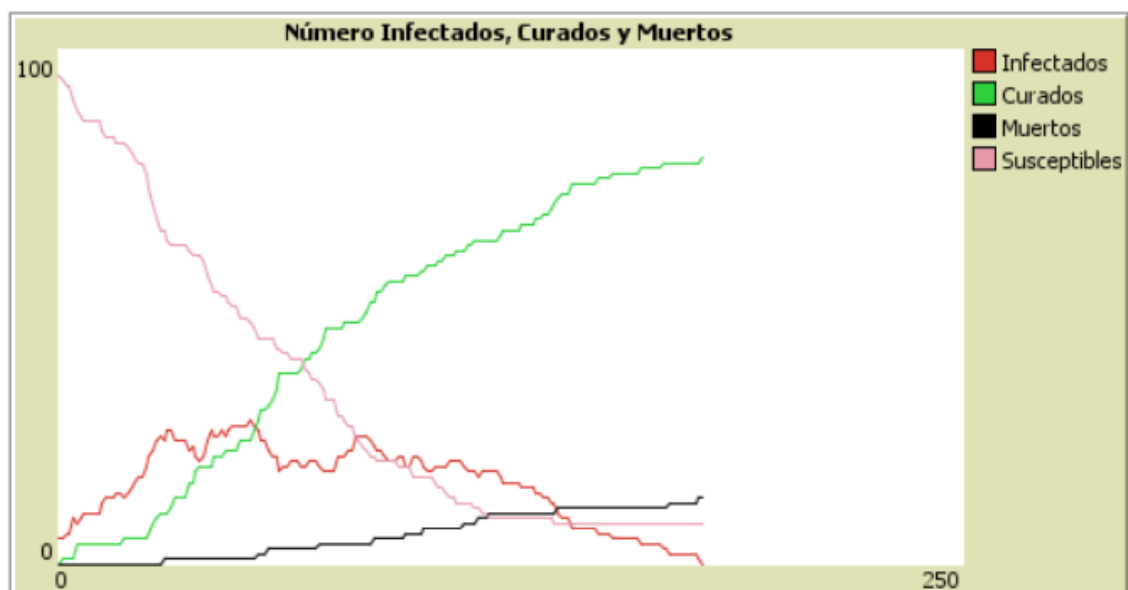


Ilustración 32. Gráfica de población de la simulación 2 del modelo básico

Se puede observar que la curva de infectados en la simulación 1 alcanza su pico en muy poco tiempo, mientras que en la simulación 2, el aumento de los contagios se hace de una forma progresiva.

Estas diferencias habrían provocado que en la simulación 1 los hospitales se hubiesen saturado puesto que habría más contagiados que camas libres. Por el contrario, en la simulación 2, al ir aumentando lentamente el número de contagios, los hospitales no se verían sobresaturados.

Todos los archivos generados en estas simulaciones se encontrarán en la carpeta "modelo básico", en la que habrá dos carpetas con los archivos de cada simulación y con el modelado en cuestión

# 6

## Modelo avanzado

En el modelado básico, se han incluido características y parámetros básicos para hacer la simulación. En el siguiente modelo, se pretende añadir diferentes mecánicas que permitirán trabajar en diferentes escenarios.

La base será el modelado básico, por lo que los primeros requisitos serán los expuestos en la tabla 1.

### 6.1 Requisitos modelado avanzado

#### 6.1.1 Requisitos funcionales

Requisitos	Descripción
<b>Inclusión de vacunas</b>	El usuario elegirá la probabilidad que tiene el agente de ser vacunado un día, así como la efectividad de la misma vacuna. Éstas no afectarán a los animales.
<b>Inclusión de animales</b>	El usuario escogerá un número de animales en la simulación.
<b>Inclusión de países y fronteras</b>	El usuario podrá elegir entre 1, 2 o 4 países dentro de la simulación. Se formará una frontera cada dos países.
<b>Inclusión de hospitales</b>	El usuario escogerá la tendencia de los agentes humanos a ir al hospital.

<b>Inclusión de viajes</b>	El usuario activará un interruptor para habilitar o deshabilitar los viajes. Además, deberá escoger la tendencia a viajar de los agentes humanos.
<b>Inclusión de patologías previas</b>	El usuario elegirá un porcentaje de la población que presentará patologías previas. Al tener patologías previas, el agente humano tendrá más posibilidades de fallecer
<b>Porcentaje de vacunados</b>	El usuario podrá visionar cómo varía el porcentaje de vacunados a lo largo de la simulación.
<b>Cambio de color de los agentes</b>	El usuario podrá ver cómo cambian los colores de los agentes (blanco si es susceptible, rojo si está infectado, verde si se ha curado y azul si la vacuna ha sido efectiva)
<b>Inclusión de confinamiento</b>	El usuario escogerá la probabilidad de cumplir el confinamiento de las personas susceptibles a contraer la enfermedad y la de los infectados.
<b>Ver gráfica</b>	El usuario podrá visualizar una gráfica con el número de susceptibles, vacunados, curados, infectados y muertos dentro de la población

Tabla 3. Requisitos funcionales modelo avanzado

### 6.1.2 Requisitos no funcionales

Respecto a los requisitos no funcionales del modelado avanzado, no se pretende incluir ninguno que no haya sido mostrado en el apartado 5.1.2 en la tabla 2.

## 6.2 Diseño modelo avanzado

Como se ha comentado al inicio de este capítulo, el modelo avanzado es una continuación del básico, al que se le añadirán diferentes aspectos con el fin de conseguir un modelo capaz de hacer simulaciones en una mayor cantidad de escenarios.

Se empezarán comentando las nuevas variables añadidas tanto a los agentes de simulación, como a la simulación. Respecto a las de los agentes de simulación destacan las siguientes:

- Variable booleana que guardará si el agente presenta patologías previas (provocará un aumento en la probabilidad de fallecer)
- Edad del agente, si es mayor de un determinado valor, el agente presentará una probabilidad superior a fallecer.
- Probabilidad de un agente a cumplir el confinamiento.
- País del que es originario el agente.
- País en el que se encuentra actualmente el agente.
- Variable booleana que especificará si el agente es humano o animal (“true” para indicar que es animal, “false” para indicar que es humano)

Respecto a las variables globales de la simulación, se han añadido dos variables que van a originar las fronteras, una en el eje “x” y otra en el eje “y”, y una para ver el ángulo de giro de los agentes cuando se acercan a las fronteras.

El primer paso para montar el modelado avanzado será la creación de los países y los hospitales, es decir, el originar las fronteras que dividieran el mapa de simulación en los países respectivos y el colocar un hospital por cada país (situado en el centro del país). A pesar de haber sido implementados gráficamente en el modelado en el primer paso, su funcionalidad no será añadida debido a su complejidad hasta prácticamente el final del modelado.

Para la creación de los países, habrá que tener en cuenta que se dispone de un seleccionador en el que el usuario deberá escoger el número de países para la simulación. En el caso de ser un único país, las fronteras serán nulas. En el caso de ser dos países, se activará la frontera en el eje “y”. Por último, si se escogiese la opción de cuatro países, se activarán la frontera en el eje “x” y en el eje “y”. Las fronteras serán pintadas de amarillo para no interferir con los otros colores usados en los agentes.

Para cada país corresponderá un hospital en el centro de este. Los hospitales se generarán con otro tipo de agente usado en Netlogo denominado parcelas (“patch”). El mapa de simulación tiene como coordenadas máximas los valores -32 y +32, tanto en el eje “x” como en el eje “y”. Por ello, para crear los hospitales se usan las mitades de las coordenadas máximas de los ejes. Además, los hospitales serán pintados en rosa:

```

to setup-patch-borders
  if numero-paises = 1
  [
    set bordery patches with [(abs(pxcor) >= 0 and abs (pycor) >= 0)]
    ask patch 0 0 [set pcolor pink]
  ]
  if numero-paises = 2
  [
    ask patch (max-pxcor / 2 ) 0 [set pcolor pink]
    ask patch (- max-pxcor / 2 ) 0 [set pcolor pink]

    set bordery patches with [(pxcor = 0 and abs (pycor) >= 0)]
    ask bordery [set pcolor yellow]
  ]

  if numero-paises = 4
  [
    ask patch (max-pxcor / 2 ) (- max-pycor / 2) [set pcolor pink]
    ask patch (- max-pxcor / 2 ) (- max-pycor / 2) [set pcolor pink]
    ask patch (max-pxcor / 2 ) ( max-pycor / 2) [set pcolor pink]
    ask patch (- max-pxcor / 2 ) ( max-pycor / 2) [set pcolor pink]

    set bordery patches with [(pxcor = 0 and abs (pycor) >= 0)]
    ask bordery [set pcolor yellow]
    set borderx patches with [(pycor = 0 and abs (pxcor) >= 0)]
    ask borderx [set pcolor yellow]
  ]
end

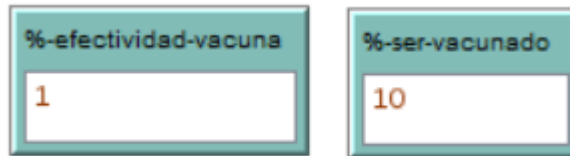
```

Ilustración 33. Creación de las fronteras y hospitales

Los siguientes aspectos añadidos serán la inclusión de las vacunas y la edad y las patologías previas.

Para el uso de las vacunas en el modelo, el usuario deberá introducir por pantalla una probabilidad de ser vacunado (no deberá ser muy alta dado que esta probabilidad es de cada día de la simulación) y otra de que dicha vacuna sea efectiva.

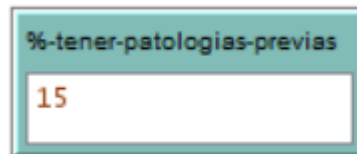
Su implementación se realizará con la generación de números aleatorios como se ha ido haciendo en el capítulo anterior.



Two input boxes side-by-side. The left box is labeled "%-efectividad-vacuna" and contains the number "1". The right box is labeled "%-ser-vacunado" and contains the number "10".

Ilustración 33. Ventana de entrada de porcentaje de ser vacunado y efectividad de la vacuna

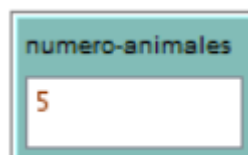
Para la generación de agentes humanos con patologías previas se volverá a usar la mecánica de generación de números aleatorios, una vez el usuario haya insertado una probabilidad de aparición.



A single input box labeled "%-tener-patologias-previas" containing the number "15".

Ilustración 34. Ventana de entrada porcentaje de patologías previas

Para la edad, al agente humano se le generará un número aleatorio entre el 0 y el 100. Más adelante, se comentarán los cambios añadidos a las diversas funcionalidades. El siguiente paso será generar de manera aleatoria los agentes en los diversos países. Cada agente presentará una coordenada "x" y una coordenada "y" y se les asignará un país. Según el país de procedencia del agente, para poder diferenciarlos con claridad, se les dotará de una forma diferente. También, existirá una función que actualice el país en el que se encuentra el agente una vez pasado el día de simulación. Respecto a la creación de los animales, el usuario deberá introducir el número de agentes animales que quiere incluir por pantalla.



A single input box labeled "numero-animales" containing the number "5".

Ilustración 35. Ventana de entrada de número de animales

El código de creación es el siguiente:

```

to setup-animales
  create-turtles numero-animales
  [
    setxy random-xcor random-ycor

    set infectado? false
    set curado? false
    set muerto? false
    set vacunado? false
    set susceptible? true
    set confinado? false
    set hospitalizado? false
    set patologias_previas? false

    set tiempo_recup random-float 2 * tiempo-recuperacion
    set probabilidad-ser-confinado 0

    set color white
    asignar-pais
    asignar-pais-actual

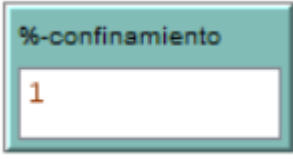
    set es_animal? true
    set shape "turtle"
    set size 1
  ]
end

```

Ilustración 36. Creación de los agentes animales en la simulación

Como se observa, a los animales no se les inicializará con patologías previas y con 0 en probabilidad de ser confinado. Tampoco podrán empezar infectados por lo que su color es blanco. Por último, se establecerá “true” en el atributo que indica si es animal y se le establecerá de forma la de una tortuga.

A continuación, se implementará el confinamiento. Esta mecánica va a ser muy útil en las futuras simulaciones. El usuario tendrá que introducir por pantalla un porcentaje de cumplimiento de confinamiento.



The image shows a small rectangular window with a light blue border and a white background. At the top, the text "%-confinamiento" is displayed in a dark font. Below this text is a white input field containing the number "1".

Ilustración 37. Ventana de entrada de porcentaje de cumplimiento del confinamiento

En este modelo, una vez se haya pasado la enfermedad, no se podrá recaer, por lo que el confinamiento solo lo podrán cumplir agentes humanos susceptibles de contraer la enfermedad y los infectados. De esta forma, para cumplir el confinamiento se creará una parcela alrededor del agente de color gris y el agente se quedará quieto hasta su recuperación. A la hora de realizar el movimiento del agente se comentará con más detalle esta mecánica.

Ahora se implementarán los viajes. Esta opción se deberá habilitar con un interruptor para después añadir la tendencia a viajar. Si un agente puede viajar, se le cambiarán

aleatoriamente las coordenadas, pudiendo viajar a otro país (si hay 2 o 4 países) o pudiendo quedarse en el mismo.



Ilustración 38. Seleccionador del número de países



Ilustración 39. Interruptor y deslizador de tendencia a realizar viajes

Para continuar, se explicarán las fronteras. El objetivo de las fronteras es dificultar el paso de los agentes a través de ellas. De esta forma si un agente se acercara a una frontera o al final del mapa, se le rotaría con un ángulo determinado para que no pasara la frontera o se saliese del mapa. Su movimiento dependerá finalmente del país en el que se encuentre.

```

if pais_actual = 1
[
  ifelse xcor > (- 0.5)
  [
    set angulo random-float 180
    let nueva_posicion patch-at-heading-and-distance angulo (-1)
    if nueva_posicion != nobody
    [
      move-to nueva_posicion
    ]
  ]
  [
    ifelse xcor < (min-pxcor + 1) or ycor > (max-pycor - 1) or ycor < (min-pycor + 1)
    [
      set angulo random-float 180
    ]
    [
      set angulo random-float 360
    ]
  ]
  rt angulo
]
fd 0.5
]

```

Ilustración 40. Fragmento de código del movimiento del agente en un país

En la Ilustración 41 se puede observar cómo se restringe el movimiento del agente. En este caso se supondrá que el agente se encuentra en el país en dos posibles situaciones: Como la frontera se establece con la recta  $x=0$ , cuando su coordenada “x” sea mayor que -0.5 eso significará que se acerca a la frontera, por lo que se debería cambiar la posición del agente. Luego, si se acerca al final del país, se le otorgará un

valor al ángulo para que así rote el agente. Por último, este avanzará según un valor predeterminado.

En la realización de los hospitales, habrá que determinar cuántos países ha introducido el usuario, así como el país en el que se encuentre el agente, debido a que, si se encuentra en, por ejemplo, el país 3, irá al hospital de dicho país, moviéndose a la parcela (“patch”) que simula ser un hospital.

Por último, se pasarán a comentar las mejoras implementadas en procedimientos del modelado básico. El primer procedimiento mejorado será el que simula el fallecimiento de los infectados. Si un individuo presentara patologías previas, las posibilidades de fallecer se verán aumentadas un 10% de los establecido por el usuario. Si además de patologías previas, su edad superase los 60 años, la probabilidad de fallecer se verá incrementada un 15%. Si fuera un animal el agente muerto, éste no se contabilizará en el número de fallecidos. Además, si el agente humano estuviera confinado, se eliminará dicha parcela.

En lo que al procedimiento de infección se refiere, la única modificación añadida será que, para poder ser infectado, no podrá estar vacunado. Además, al igual que pasaba anteriormente, los animales no contarán en el número de infectados.

En cuanto a la recuperación de los agentes, se añadirá la opción de estar en el hospital, lo que producirá una reducción a la mitad del tiempo que debe permanecer el agente en él.

Donde realmente se van a experimentar cambios de un modelo a otro, es en las acciones que cada agente puede realizar según sus características:

- Si un agente humano no está confinado ni hospitalizado podrá cumplir el confinamiento y si no, se moverá, además de poder conseguir mascarilla y vacuna.
- Si el agente humano ha pasado con éxito la enfermedad y no se encuentra confinado, podrá moverse con libertad.
- Un agente animal se moverá a pesar de estar infectado.
- Un agente vacunado se podrá mover libremente.
- Un agente humano infectado y sin estar confinado ni en un hospital podrá contagiar a los agentes de sus alrededores. Un humano puede infectar a otro humano o a un animal, pero no podrá ser infectado por un animal.

- Un agente humano infectado y sin estar confinado ni en un hospital, tendrá una probabilidad de cumplir su confinamiento. Además, también podrá recuperarse o fallecer.
- Un agente humano infectado que no esté confinado ni hospitalizado podrá ser hospitalizado. Al hospitalizarse se activa el confinamiento al permanecer en el hospital.
- Un agente humano infectado y hospitalizado podrá recuperarse o fallecer.
- Un agente animal infectado y no confinado podrá recuperarse o fallecer. Se añade no confinado, aunque a priori no debería haber ningún animal confinado.
- Un agente humano infectado y confinado podrá recuperarse o fallecer.
- Si un agente se vacuna estando confinado, dará por acabado su confinamiento
- Un agente humano curado y hospitalizado abandonará el hospital.
- Un agente humano curado y confinado dejará de estar confinado.

### 6.3 Simulaciones de prueba

En este modelo es donde se van a poder realizar diferentes escenarios. Se empezará con el modelo anterior usando los datos del archivo “`covid19_españa_03_06.txt`”. Las primeras simulaciones se harán usando un único país. Aunque se denominen país, realmente se podrían llamar ciudades, provincias o como quisiéramos.

#### 6.3.1 Simulaciones con un país / ciudad

En la **primera simulación** se usarán 100 personas con un porcentaje de infección inicial del 15% (como el de tener patologías previas). La probabilidad de conseguir mascarilla será de un 20% y su reducción del contagio de un 20% también. Se establecerá el tiempo de recuperación medio en 40 días y una tendencia de ir al hospital de 4. La probabilidad de ser contagiado será del 60%. Solo el 1% de la población podrá cumplir el confinamiento y el 10% podrá ser vacunado cada día. Además, la efectividad de la vacuna será de un 2%. Por último, para los porcentajes de los síntomas se usarán los vistos en el anexo de datos, no se activarán los viajes y se incluirán 5 animales.

Los datos obtenidos al final de esta simulación son:

- Tasa R0: 1.3

- Porcentaje de recuperados: 67%
- Porcentaje de fallecidos: 5%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 7%
- Porcentaje de susceptibles: 21%

A continuación, se va a ver el mapa de la simulación más o menos a la mitad de esta:

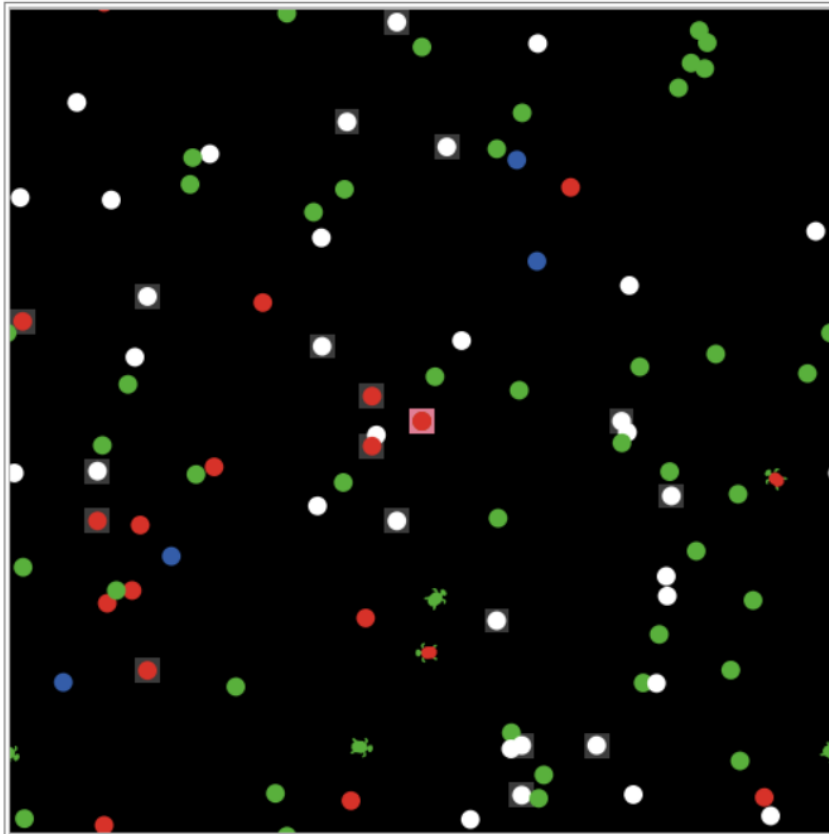


Ilustración 41. Entorno a la mitad de la simulación 1 en el modelo avanzado

Se puede observar como en el centro del entorno hay un cuadrado rosa (simula el hospital) con un agente infectado (puesto que va de rojo). Además, se observan agentes susceptibles e infectados que están cumpliendo el confinamiento.

Para la **segunda simulación**, se van a realizar diferentes cambios, lo demás se mantendrá igual. Estos cambios serán activar los viajes (lo que debería originar una más rápida expansión de la enfermedad) y se situará la tendencia en un valor de 8 y se verá reducido a 10% tanto la probabilidad de conseguir una mascarilla, como la reducción que provoca.

Los datos obtenidos al final de esta simulación son:

- Tasa R0: 1.91

- Porcentaje de recuperados: 81%
- Porcentaje de fallecidos: 10%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 0%
- Porcentaje de susceptibles: 9%

Los porcentajes obtenidos son muy curiosos. Respecto a la anterior simulación el porcentaje del número de personas que han pasado la enfermedad se ha visto incrementado en un 14%, así como ha disminuido un 7% el porcentaje de vacunados. Esto se explica con una rápida expansión de la enfermedad en la población.

En la **tercera simulación**, para acabar con las simulaciones con una sola ciudad o país, se va a aumentar el porcentaje de cumplimiento del confinamiento. Esta mecánica ha sido implementada de tal forma que cada día que pasa en la simulación, el agente humano decida si cumplir el confinamiento o no, por lo que al aumentarlo a 15%, eso quiere decir que de las personas que en ese día no están confinadas, ese porcentaje se decidirá a confinarse, por lo que se espera que la enfermedad infecte a un número menor de personas.

Los datos obtenidos al final de esta simulación son:

- Tasa R0: 0.79
- Porcentaje de recuperados: 41%
- Porcentaje de fallecidos: 7%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 0%
- Porcentaje de susceptibles: 52%

Como se observa en los datos, el porcentaje de susceptibles a contraer la enfermedad es increíblemente alto comparado con la de las simulaciones anteriores.

Estas simulaciones se encontrarán en la carpeta “1. simulaciones un país” dentro de la carpeta “modelo avanzado”. A cada simulación le corresponderá una carpeta con 4 archivos: dos imágenes (una a la mitad aproximadamente de la simulación y otra al final), un fichero .csv con la información exportada de todos los agentes desde Netlogo y un documento .xlsx con la información más importante de los agentes. Cabe destacar que para aquellos agentes susceptibles de contraer la enfermedad los síntomas aparecerán con un 0. Otro punto importante es que habrá menos agentes de los

introducidos, puesto que algunos habrán fallecido en la simulación. Para los animales también aparecerá el valor 0 en sus síntomas, ya que a ellos no se les ha incluido síntomas.

### **6.3.2 Simulación con dos países / ciudades**

Para la simulación en dos países, se distinguirán los agentes según la forma, siendo una "x" si está en el país 1 y un cuadrado si está en el 2.

De primeras, el número de personas seguirá siendo 100 y los porcentajes de infección inicial y de aparición de agentes con patologías previas serán 15%. Los síntomas y las probabilidades de contagio, recuperación y de fallecimiento serán los del apartado 5.3.1. En la primera simulación no se incluirán los viajes y se reducirá a 1% el porcentaje de cumplir el confinamiento. El tiempo de recuperación será de 40 y la tendencia a ir al hospital tendrá un valor de 4. Por último, las mascarillas volverán a tener un porcentaje de 10% en sus dos características y las vacunas serán accesible para el 10% de los susceptibles pero efectivas en un 2%.

Los resultados obtenidos al final de esta simulación son:

- Tasa R0: 0.65
- Porcentaje de recuperados: 34%
- Porcentaje de fallecidos: 9%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 6%
- Porcentaje de susceptibles: 51%

A raíz de no introducir viajes y que cuando un agente se acerca a una frontera, se dificulta su paso al otro país, la expansión de la enfermedad no será tan efectiva. Otro de los factores más importantes será que por cada país habrá unos 50 agentes humanos aproximadamente. Para contrarrestar esta información, en la siguiente simulación se incluirán 200 personas, de tal forma que en cada país haya unas 100.

Los resultados obtenidos para esta simulación son:

- Tasa R0: 2.06
- Porcentaje de recuperados: 79%
- Porcentaje de fallecidos: 9.5%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 4%

- Porcentaje de susceptibles: 7.5%

Se comprueba lo comentado anteriormente, al aumentar la población y al haber más cantidad de personas por espacio se produce una expansión más rápida de la enfermedad, originando que el porcentaje de recuperados (y por ello también el de infectados) se haya visto incrementado considerablemente y el de susceptibles haya disminuido. También, ha aumentado la tasa R0 debido a que cada agente contagiado infectará a más personas.

En la siguiente, se activarán los viajes con una tendencia a realizarlos de 10.

Los resultados obtenidos para esta simulación son:

- Tasa R0: 4.23
- Porcentaje de recuperados: 84%
- Porcentaje de fallecidos: 13.5%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 2%
- Porcentaje de susceptibles: 0.5%

En este caso se puede ver un aumento importante de la tasa R0. También, se observa cómo solo un 0.5% ha quedado susceptible de contraer la enfermedad.

Para acabar con las simulaciones en dos países, se va a intentar disminuir las personas afectadas por la enfermedad y la tasa R0, disminuyendo la tendencia a viajar a 6 y aumentando la de ir al hospital a 7 y estableciendo un porcentaje de cumplir el confinamiento de 5%. Cabe recordar que, por la implementación del confinamiento, el aumentar el porcentaje de 1% a 5% es un gran incremento que afectará considerablemente a los resultados:

- Tasa R0: 1.39
- Porcentaje de recuperados: 68.5%
- Porcentaje de fallecidos: 13%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 1%
- Porcentaje de susceptibles: 17.5%

Según los resultados, el objetivo se ha cumplido. Se ha disminuido el número de personas que han pasado la enfermedad a 68.5% y ha aumentado el número de personas que no la han sufrido.

Como en el apartado anterior, se destinará una carpeta a cada simulación con los mismos archivos.

### 6.3.3 Simulaciones con cuatro países / ciudades

En esta ocasión, el entorno se dividirá en cuatro países que corresponderán en orden al de los cuadrantes de los ejes cartesianos. A cada país, le corresponde una forma al agente diferente.

Para iniciar este apartado, se comenzará con una simulación con 200 personas y un porcentaje de infección inicial del 20%. El confinamiento volverá a afectar al 1% de los susceptibles y se aumentará el tiempo de recuperación a 50 días. De primeras, los viajes estarán desactivados y la tendencia al hospital se inicializará en 4.

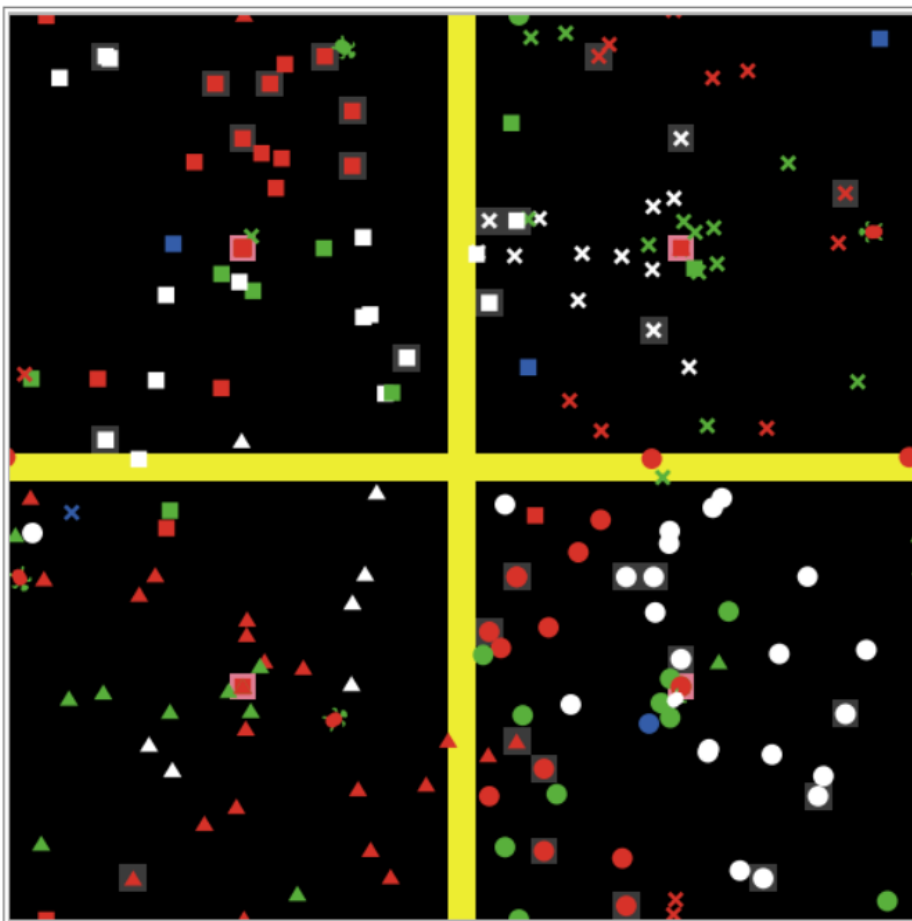


Ilustración 42. Entorno a la mitad de la simulación 8 en el modelo avanzado

Se puede observar cómo en el cuadrante 1 predomina la forma de agente “x”, puesto que es el agente propio de dicho país, mientras que en el cuadrante 2 destaca el “cuadrado”; en el tercero, los “triángulos” y en el cuarto, los “círculos”.

Los resultados obtenidos serán:

- Tasa R0: 1.11
- Porcentaje de recuperados: 68.5%
- Porcentaje de fallecidos: 10%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 4%
- Porcentaje de susceptibles: 17.5%

Se puede observar que la tasa R0 obtenido ha sido muy baja. En la siguiente simulación, se aumentará el porcentaje de confinamiento a 10% para intentar disminuir la tasa R0 y los porcentajes de la población.

De esta forma, los resultados obtenidos son:

- Tasa R0: 0.59
- Porcentaje de recuperados: 43%
- Porcentaje de fallecidos: 14%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 1.5%
- Porcentaje de susceptibles: 41.5%

Se ha conseguido el objetivo propuesto, bajar la tasa R0 y el porcentaje de personas que han pasado la enfermedad. Ahora, se va a aumentar el número de personas a 400, para que haya unas 100 por país y así ver cómo varía.

De esta forma, los resultados obtenidos son:

- Tasa R0: 1.57
- Porcentaje de recuperados: 74.5%
- Porcentaje de fallecidos: 17.5%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 0.5%
- Porcentaje de susceptibles: 7.5%

Se ve que al aumentar el número de personas y que en este caso los países son más pequeños, aumenta el porcentaje de recuperados, por lo que también el de infectados.

Por último, se disminuirá el porcentaje de personas que cumplan el confinamiento a 1% y se activarán los viajes con una tendencia de 8. Se espera un aumento en el

porcentaje de recuperados, lo que significaría que una gran cantidad de personas de la población será infectada.

De esta forma, los resultados obtenidos son:

- Tasa R0: 4.63
- Porcentaje de recuperados: 88.75%
- Porcentaje de fallecidos: 10.25%
- Porcentaje de infectados: 0%
- Porcentaje de vacunados: 1%
- Porcentaje de susceptibles: 0%

Se cumple lo esperado y, quitando las personas que pudieron vacunarse, no queda ha quedado nadie sin infectar, puesto que el porcentaje de susceptibles es 0.

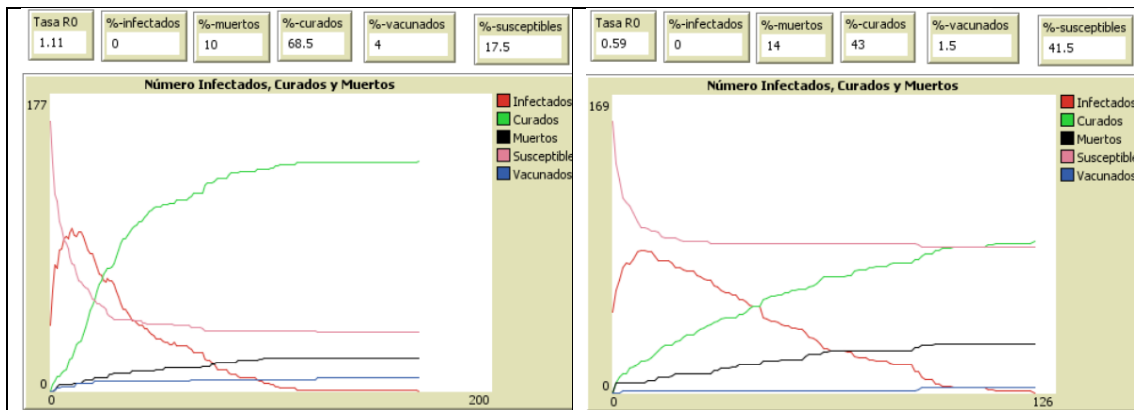


Ilustración 43. Gráfica de la simulación 8 del modelo avanzado

Ilustración 44. Gráfica de la simulación 9 del modelo avanzado

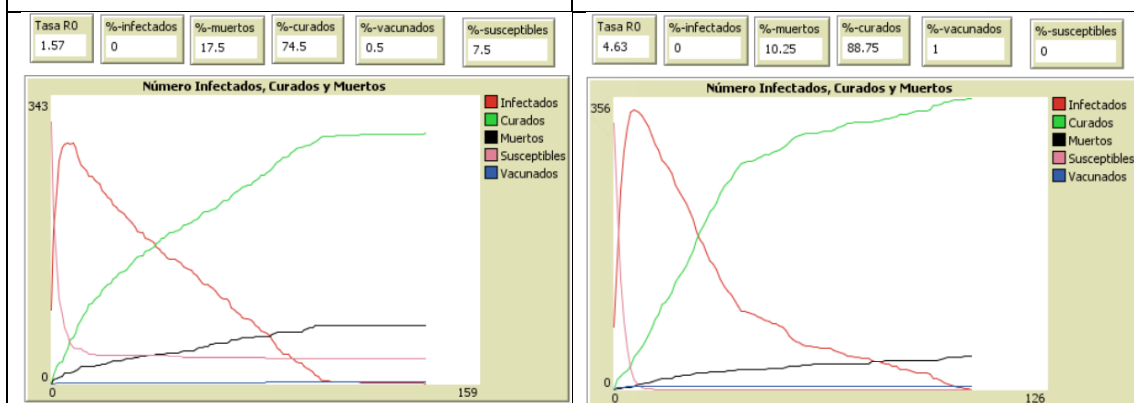


Ilustración 45. Gráfica de la simulación 10 del modelo avanzado

Ilustración 46. Gráfica de la simulación 11 del modelo avanzado

Tabla 4. Gráficas de las simulaciones con cuatro ciudades

# 7

## Conclusiones y futuras mejoras

### 6.1 Conclusiones

Este proyecto ha permitido generar dos modelos de simulación de personas, uno primero más sencillo y otro segundo algo más complejo, de tal forma que los usuarios de esos modelos puedan simular la expansión de diferentes epidemias, aunque en este caso se haya centrado en la que está afectando al mundo en la actualidad al usar datos de pacientes diagnosticados con COVID-19. Así, los usuarios podrán observar cómo diferentes cambios en los parámetros por pequeños que parezcan (como aumentar el porcentaje de cumplimiento del confinamiento en pocas unidades) pueden afectar positivamente en la expansión de la enfermedad.

### 6.2 Futuras mejoras

En este apartado se van a comentar diversas mejoras que se podrían implementar con el fin de obtener un modelo que permita realizar simulaciones de enfermedades de una forma mucho más compleja y completa. Estas mejoras podrían ser:

- Inclusión de más de una enfermedad a la simulación, con tal de conseguir un mayor realismo.
- Inclusión de estaciones del año. Las enfermedades no se expanden igual en invierno que en verano. Normalmente, los virus suelen morir con el calor, por lo que podría ser un factor determinante en su expansión.

- Inclusión de diferentes sitios de reunión de agentes humanos, tales como supermercados.
- Inclusión de ambulancias para aumentar la tendencia de los agentes humanos a ir al hospital.
- Otra mejora podría ser el establecimiento de un número máximo de personas por hospital, con el fin de convertirlo en más realista.

# Referencias

- [1] Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems.
- [2] GitHub. (s.f.). Obtenido de <https://github.com/>
- [3] González Arroyo, M. (2017). Modelización y simulación en epidemias. Universidad Complutense de Madrid: Trabajo Fin de Grado.
- [4] Juliana. (s.f.). Imágenes y Noticias. Recuperado el 15 de Abril de 2020, de <https://imagenesnoticias.com/estadisticas-del-sida-en-el-mundo-del-2009/>
- [5] Mariano Zafra, P. R. (5 de Abril de 2020). EIPaís. Recuperado el 5 de Abril de 2020, de [https://elpais.com/sociedad/2020/04/09/actualidad/1586437657\\_937910.html](https://elpais.com/sociedad/2020/04/09/actualidad/1586437657_937910.html)
- [6] Montesinos-López OA, H.-S. C. (2007). Modelos matemáticos para enfermedades infecciosas. Salud Publica Mex(49), 218-226.
- [7] Netlogo. (s.f.). Obtenido de <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- North, C. M. (2006). Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulation PART 2: How to Model with Agents. California.
- [8] OMS. (10 de Febrero de 2020). Recuperado el 13 de Abril de 2020, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ebola-virus-disease>
- [9] Pané, G. H. (25 de Marzo de 2020). National Geographic. Recuperado el 9 de Abril de 2020, de [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/grandes-pandemias-historia\\_15178/5](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/grandes-pandemias-historia_15178/5)
- [10] Pulido, S. (12 de Marzo de 2020). GacetaMédica. Recuperado el 9 de Abril de 2020, de <https://gacetamedica.com/investigacion/cual-es-la-diferencia-entre-brote-epidemia-y-pandemia/>
- [11] Ridenhour, B., M. Kowalik, J., & K. Shay, D. (2018). El número reproductivo básico (R0): consideraciones para su aplicación en la salud pública\*. doi:10.2105/AJPH.2013.301704s

[12] Schiffmann, A. (s.f.). Obtenido de <https://ncov2019.live/>

[13] Stackoverflow. (s.f.). Obtenido de [www.stackoverflow.com](http://www.stackoverflow.com)

[14] Ternero, M. d. (s.f.). Obtenido de

<http://www.dte.us.es/personal/mcromero/masredes/docs/SMARD.0910.mas.pdf>

f

[15] Weiss, G. (2013). Multiagent Systems (2nd ed.). Cambridge: Mass: MIT Press.

[16] Wikipedia. (s.f.). Obtenido de <http://wikipedia.org/>

# Apéndice A

## Manual de Instalación

### Requerimientos:

Para usar la aplicación de simulación de epidemias, ya sea el modelo básico o el modelo avanzado, es necesario tener instalado el programa Netlogo o usar su versión web. Para los dos casos es necesario acceder a su página [7].

Una vez se haya entrado, se dispondrá de las dos opciones, como se observa en la Ilustración 48.

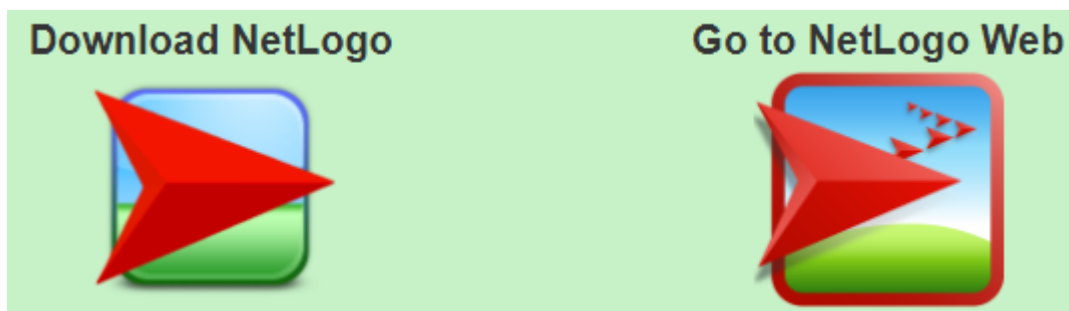


Ilustración 47. Imagen obtenida de la página de Netlogo [7]

En este caso, se usará la aplicación de escritorio puesto que al cargar los modelos diseñados en la aplicación web se han experimentado diversos errores. Se pulsa en **Download Netlogo** y la página te redireccionará a otra en la que se podrá añadir diversa información, aunque no es necesaria, siendo lo más relevante la elección de la versión a descargar.

**Version:**    
More versions [here](#)  
For help using old models with new versions see the [Transition Guide](#).

**Name:**

**Organization:**

**E-mail:**

**Comments:**

We read these but don't respond directly. For a response, write [feedback@ccl.northwestern.edu](mailto:feedback@ccl.northwestern.edu).

Ilustración 48. Imagen para descargar Netlogo [7]

En este caso ha sido usada la versión 6.1.1. Al pulsar en **Download** se cargará la siguiente página, en la que se podrá elegir para qué sistema operativo descargar Netlogo:

- |   |                         |                                   |
|---|-------------------------|-----------------------------------|
|  | <b>Mac OS X</b>         | <a href="#">Download</a> (215 MB) |
|  | <b>Windows (32-bit)</b> | <a href="#">Download</a> (186 MB) |
|  | <b>Windows (64-bit)</b> | <a href="#">Download</a> (189 MB) |
|  | <b>Linux (32-bit)</b>   | <a href="#">Download</a> (213 MB) |
|  | <b>Linux (64-bit)</b>   | <a href="#">Download</a> (210 MB) |

Ilustración 49. Opciones de descarga de Netlogo [7]

Una vez se seleccione la opción necesitada se iniciará la descarga del programa y lo único que habrá que hacer será esperar hasta que termine. Como se puede observar, es un programa que no ocupa mucho, así que no es necesario tener grandes cantidades de memoria en el disco duro.

Cuando se descargue, se inicia y se abrirá una aplicación que realizará la instalación del programa.

## Apertura de los modelos

Una vez se inicie el programa NetLogo, la interfaz primera que se obtendrá es:

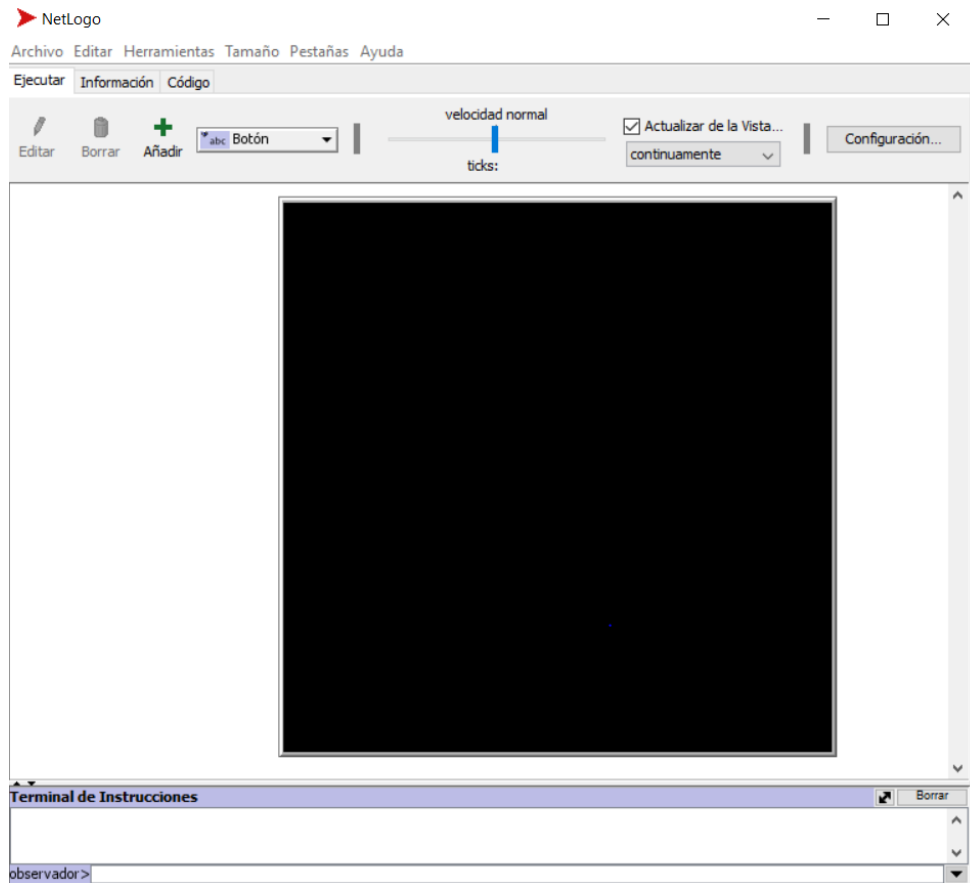


Ilustración 50. Interfaz inicial de NetLogo

Para abrir los modelos simplemente se pulsará en el desplegable **Archivo** para posteriormente pulsar en **Abrir** y seleccionar el modelo que quiera ser usado. Cuando se abra, ya se podrá pasar a los manuales de uso.



# Apéndice b

## Manual de uso

## Modelo Básico

Para la utilización del modelo básico se van a relatar los pasos a seguir:

1. Al haber abierto el Modelo 1 se iniciará una interfaz como la de la Ilustración 53. En ella se pueden observar botones, desplegables (para seleccionar la forma del agente durante la simulación), monitores (para ver la evolución de determinados valores), entradas (para introducir valores para realizar la simulación), deslizadores (para elegir un valor determinado), gráficas (para ver la evolución respecto al tiempo de ciertos valores) y el campo de la simulación (donde se realiza la simulación de la epidemia).
2. Para comenzar se deberán cargar los datos de la letalidad y la tasa de recuperación pulsando el botón cargar-datos-letalidad-contagios. Estos datos irán en un archivo .txt en el que se pondrán de la siguiente manera: nºcasos nºrecuperados nºmuertos.  
Ejemplo: 472 300 124.  
En el caso de la simulación se usarán los datos de España que se encuentran en el archivo "covid19.txt".
3. Se pulsa el botón mostrar-letalidad-y-tasa-recuperación.
4. Se muestra en los monitores la tasa de letalidad y la tasa de recuperación.
5. Se pueden usar esos datos para rellenar la entrada %-probabilidad-muerte y %-probabilidad-muerte
6. Se rellenan los porcentajes de padecer un síntoma. Para ello se usarán los porcentajes de los datos de pacientes que se tiene. (capítulo 4)
7. Se rellenan los campos restantes tales como el tiempo-recuperación mediante un deslizador (hay que tener en cuenta que es un tiempo estimado, realmente

se seleccionará un número al azar entre el 0 y el doble del introducido), el número-personas que da el número de agentes de la población inicial, se escoge en el seleccionador forma cómo van a ser vistos los agentes, se introduce el porcentaje de obtención de mascarillas (obtenido mediante los datos de repartición de mascarillas por comunidad autónoma en el archivo “ccaa\_covid19\_mascarillas.csv”) en la entrada %-conseguir-mascarillas y su disminución en la probabilidad de ser contagiado, así como esta misma.

8. Se pulsa el botón **setup** para inicializar los agentes.
9. Antes de comenzar la simulación, se recomienda bajar la velocidad de la ésta en un deslizador situado en la parte superior central de la interfaz:

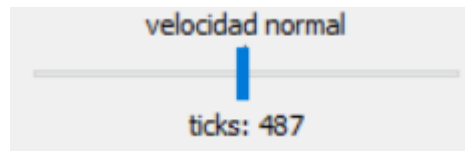


Ilustración 51. Deslizador de la velocidad de simulación

10. Se pulsa el botón **go**, iniciando la simulación.
11. Se pueden observar los resultados mediante una gráfica y viendo los porcentajes de infectados, muertos, recuperados y susceptibles.
12. Mediante el botón **exportar-interfaz** se puede conseguir una imagen de lo realizado.
13. Seleccionando **Archivo > Exportar > Exportar mundo** se puede conseguir un archivo .csv con en el que se ven las características de los diferentes agentes que intervienen en la simulación.

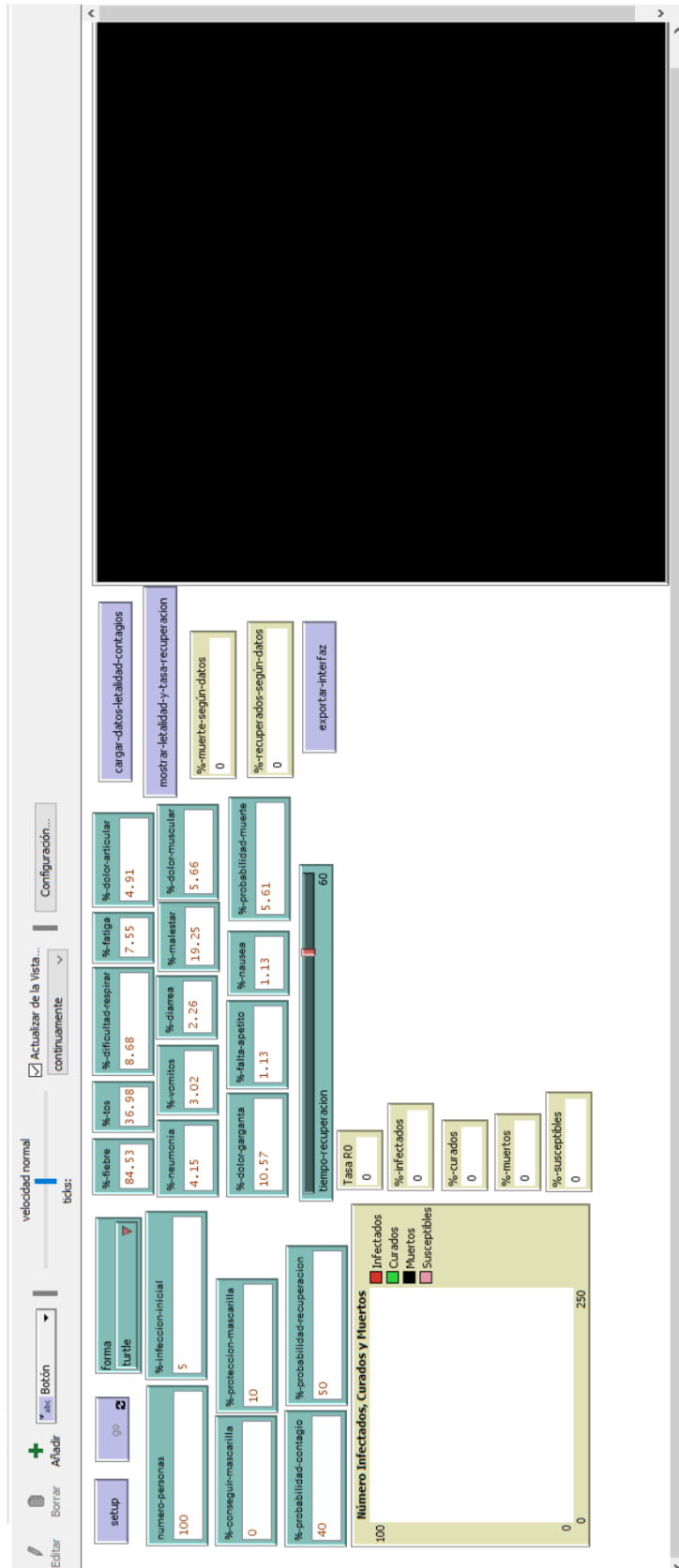


Ilustración 52. Interfaz inicial del modelo básico



# Apéndice c

## Manual de uso

### Modelo Avanzado

Al igual que en el apéndice anterior, se relatarán los pasos a seguir:

1. Inicialmente se comenzará usando el manual del modelado básico (apéndice b). El seleccionador de forma de los agentes no existe en este modelo. Habrá que escoger el número de países que habrá.
2. Se realizan los pasos del 1 al 7.
3. El siguiente paso es añadir la tendencia o probabilidad de los agentes humanos a ir al hospital, escogiendo un valor en el deslizador tendencia-ir-hospital.
4. A continuación, el usuario deberá decidir si activa los viajes (o no) en el interruptor “viajar?”. Si finalmente lo activase, deberá seleccionar un valor para la tendencia de los agentes en el deslizador tendencia-viajar, como se observa en la Ilustración 40.
5. Se escogerá el porcentaje que presenta el agente de ser vacunado, así como la efectividad de la vacuna, como se observa en la Ilustración 34.
6. Para rellenar la entrada del porcentaje de cumplir el confinamiento, %-confinamiento, se deberá tener en cuenta que este porcentaje afecta a cada día, es decir, cada día que pasa de la simulación, los agentes susceptibles y los infectados no confinados pueden comenzar su confinamiento.
7. Ahora se rellenará el porcentaje de agentes que presentarán patologías previas (lo cual afectará a su probabilidad de fallecer) y el número de animales que aparecerán. Se completarán las entradas %-tener-patologias-previas y número-animales.
8. Por último, se realizan los pasos del 8 al 13 del apéndice b.

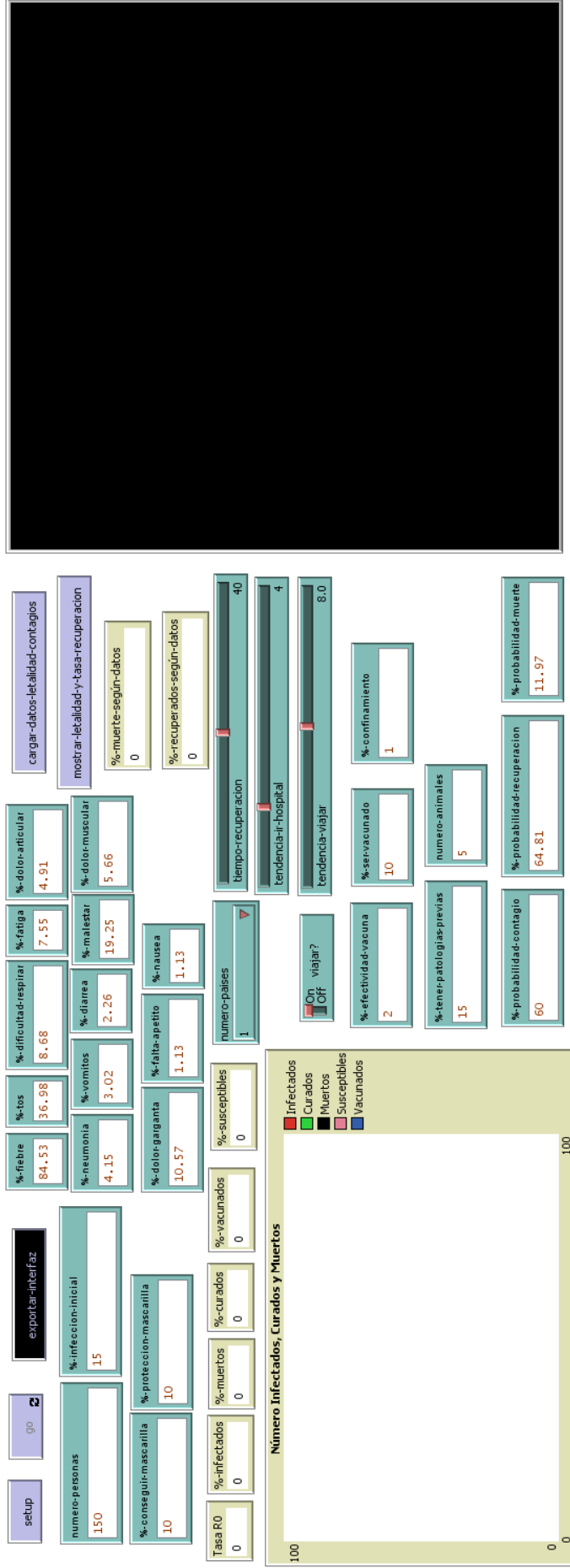


Ilustración 53. Interfaz inicial del modelo avanzado



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

| **uma.es**

E.T.S de Ingeniería Informática  
Bulevar Louis Pasteur, 35  
Campus de Teatinos  
29071 Málaga

E.T.S. DE INGENIERÍA INFORMÁTICA