



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

# MODELO BASADO EN DINÁMICA DE SISTEMAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS SOCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

---

**Grado en Ingeniería en Organización Industrial**

Autora:

**Herreros García, Ana**

Tutores:

**Miguel González, Luis Javier**

**Parrado Hernando, Gonzalo**

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Valladolid, julio de 2020





**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Organización Industrial**

**Modelo basado en dinámica de sistemas  
para la evaluación de los impactos  
sociales del cambio climático**

**Autora:**

**Herreros García, Ana**

**Tutores:**

**Miguel González, Luis Javier  
Parrado Hernando, Gonzalo**

**Departamento de Ingeniería de  
Sistemas y Automática**

**Valladolid, julio de 2020**





## RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo desarrollar un modelo demográfico mundial de dinámica de sistemas, desagregado por cohortes de edad y por sexo, que sirva como herramienta para evaluar políticas e impactos medioambientales y sociales. Para ello, utiliza los IAMs colaborando con el proyecto mundial de MEDEAS perteneciente al programa europeo Horizonte 2020.

Además, realiza un análisis teórico de algunos efectos que tienen la contaminación atmosférica, el calentamiento global y la escasez de recursos sobre la sociedad con objeto de mostrar los posibles impactos que se podrían evaluar en el modelo. A modo de ejemplo, el trabajo estudia una de las mayores enfermedades a las que se ha sometido la población a lo largo del siglo XXI, la COVID-19.

**Palabras clave:** dinámica de sistemas, modelo poblacional, MEDEAS, cambio climático, IAM.





## ABSTRACT

This End-of-Degree Project aims to develop a global demographic model of System Dynamics, disaggregated by age cohorts and sex, to serve as a tool for evaluating environmental and social policies and impacts. To this purpose, the model uses the IAMs collaborating in the world project of MEDEAS belonging to the European program Horizon 2020.

It also performs a theoretical evaluation of some effects that air pollution, global warming and resource scarcity have on society in order to show possible impacts that could be evaluated in the model. By way of example, the work evaluates one of the greatest illnesses the population has been subjected to throughout the 21st century, the COVID-19.

**Keywords:** dynamic systems, model of population, MEDEAS, climate change, IAM.





## ÍNDICE

RESUMEN.....	III
ABSTRACT .....	V
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
3. METODOLOGÍA .....	7
3.1. DINÁMICA DE SISTEMAS .....	7
3.2. IAMs ('Integrated Assessment Models').....	9
3.3. MEDEAS.....	11
3.4. ESCENARIOS .....	14
4. IMPACTO GLOBAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA SOCIEDAD	21
4.1. IMPACTO ECONÓMICO: Crisis Energético-económica. ....	21
4.2. SALUD Y MEDIOAMBIENTE.....	22
4.3. PANDEMIAS .....	27
5. MODELO POBLACIONAL.....	29
5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO POBLACIONAL .....	30
5.2. SALIDAS DEL MODELO .....	37
5.3. CASO DE ESTUDIO: PANDEMIA COVID-19 .....	42
6. CONCLUSIONES .....	53
7. LÍNEAS FUTURAS.....	55
8. BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXO I: RELATOS DE LOS ESCENARIOS SSPs .....	I
ANEXO II: ESQUEMA GENERAL DEL MODELO POBLACIONAL.....	V





## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Logo Vensim.....	9
Figura 2. ‘MEDEAS-world model schematic overview’ .....	13
Figura 3. The ‘challenges space’ to be spanned by SSPs.....	17
Figura 4. Bloque de nacimientos del modelo poblacional. ....	31
Figura 5. Bloque de mortalidad del modelo poblacional.....	34
Figura 6. Bloque de mortalidad del modelo poblacional.....	36
Figura 7. Población total .....	37
Figura 8. Evolución temporal de nacimientos.....	38
Figura 9. Evolución temporal de fallecimientos.....	39
Figura 10. Evolución temporal de la esperanza de vida al nacer.....	40
Figura 11. Evolución temporal por cohortes de edad de los escenarios 1 y 2.....	41
Figura 12. Evolución temporal por cohortes de edad del escenario 3. ....	41
Figura 13. Evolución temporal por cohortes del escenario BAU.....	42
Figura 14. Distribución de la mortalidad para el escenario SCEN 4. .	47
Figura 15. Distribución de la mortalidad para el escenario BAU.....	48
Figuras 16 y 17. Distribución de la mortalidad por sexo.....	48
Figura 18. Distribución de las muertes por cohortes de edad causadas por I COVID-19 para el escenario ‘User defined’ .....	49
Figura 19. Distribución de las muertes por COVID-19 para los escenarios BAU y ‘User defined’.. ..	50
Figura 20. Evolución demográfica entre los años 2019-2040.....	51
Figura 21. Evolución demográfica entre los años 2019-2100.....	51



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Población esperada.....	17
Tabla 2. Relación entre escenarios SSP y MEDEAS .....	19
Tabla 3. Código de colores y símbolos.....	29
Tabla 4. Características de los escenarios para la evaluación de la pandemia. ....	46
Tabla 5. Variación temporal de los ratios de infección para los escenarios BAU y SCEN 4.. ....	46





## 1. INTRODUCCIÓN

El paradigma de la dinámica de sistemas es una herramienta fundamental para el estudio de entornos complejos que permite analizar relaciones entre sus variables que, desde otras perspectivas, no son perceptibles. La sociedad desde un punto de vista globalizado es quizá uno de los entornos más complejos con el que se pueden encontrar los investigadores. La población mundial está sufriendo cambios esencialmente debidos al desarrollo tecnológico ocasionando un aumento de la población mundial, impulsando el crecimiento de grandes urbes, incrementando el gasto de energía y la necesidad de alimentos y de bienes básicos de consumo, entre otros, con el impacto ambiental que todo ello supone. Aplicar al estudio de la sociedad global una visión sistémica del funcionamiento del entorno permite observar las posibles realimentaciones, anticipar cierto tipo de impactos y plantear la posibilidad o conveniencia de implantar medidas políticas y los efectos que estas pueden tener a corto, medio y largo plazo.

Desde la segunda revolución industrial, los problemas de la contaminación atmosférica y el cambio climático han comenzado a tomar cada vez mayor relevancia. El efecto invernadero es el principal causante del calentamiento global. Algunos gases presentes en la atmósfera retienen parte de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre calentada por el sol y mantienen la temperatura del planeta a un nivel adecuado para la vida. Sin embargo, la acción del hombre con la deforestación, la explotación de ganado y, entre otros, la producción de fertilizantes ha aumentado la presencia de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono, entre otros gases de efecto invernadero; lo que hace que se retenga más calor y, junto a aquellos que se emiten de forma natural, han conseguido elevar la temperatura global de la superficie terrestre en 1,1°C desde la era preindustrial y en 0,2°C con respecto al período 2011-2015 (WMO, 2019).

Las manifestaciones más conocidas del calentamiento global son el deshielo de los glaciares y, debido al mismo, el aumento del nivel del mar y las inundaciones de ciudades costeras e islas y el incremento de la intensidad de los eventos meteorológicos extremos como tifones y huracanes. No obstante, la cara más humana del cambio climático es la salud; ya que genera escasez de alimentos, numerosas enfermedades, propagación de epidemias y muertes al año. La contaminación atmosférica, por ejemplo, fomenta las patologías respiratorias, cardiológicas y enfermedades muy presentes hoy día como son los cánceres. Además, no solo aumenta el número de enfermos, sino que, en muchas ocasiones, las temperaturas llegan a alcanzar umbrales tan altos que inciden de forma directa sobre determinados grupos de edad más vulnerables, como es el caso de los niños



o los ancianos. Así, cada año, son miles las muertes causadas por las olas de calor siendo un efecto que va en aumento.

Por otro lado, la sobreexplotación de recursos y la escasez de los mismos, incentiva la competencia pudiendo llegar a provocar grandes crisis económicas; constituyendo una fuente de riesgo que puede llegar a ocasionar, incluso, guerras (Klare, 2003). La sociedad y la hambruna están estrechamente relacionadas con la cantidad de petróleo disponible, por lo que un consumo abusivo del mismo influye en un aumento de la pobreza y la hambruna mundial, afectando nuevamente sobre la salud (Castro, 2017).

Otra de las cuestiones tratadas más adelante en este trabajo es la escasez de agua, dado que es un recurso imprescindible para la vida. Cada vez la cantidad disponible es menor y la calidad de la misma se ve afectada por muchos de los eventos extremos que ocurren la pluviometría incontrolable que produce inundaciones y efectos devastadores en diversas zonas.

El planeta Tierra se comporta como un sistema formado por una serie de subsistemas que se complementan entre sí tales como son las distintas poblaciones, los bosques, glaciares, granjas, industrias, los mercados de capital, los ecosistemas, la biosfera etc. (Frumkin & McMichael, 2008). Todo ello forma parte de un mismo sistema que precisa de equilibrio entre los subsistemas que lo componen porque la variación de uno repercutiría en el resto, provocaría un efecto, en mayor o menor medida, en los demás, una reacción en el ecosistema general. Este sistema está formado por una cantidad limitada de recursos y de energía, por lo que es de vital importancia entender el entorno como un conjunto sistémico con múltiples realimentaciones y donde los recursos se acaban, son finitos. Cualquier pequeño cambio en el funcionamiento de un subsistema, que puede incluso parecer a priori inocente, sin consecuencias perceptibles a la capacidad cognitiva humana, puede sin embargo provocar importantes repercusiones debido a la no linealidad de los sistemas naturales.

Por su parte, los IAMs (Modelos de Evaluación Integrada, siglas en inglés de 'Integrated Assessment Models') buscan identificar las principales características que rigen una sociedad, economía o cualquier tipo de entorno complejo para poder generar un modelo sobre el que evaluar las diferentes políticas que se deban plantear en un momento determinado.

Por lo tanto, hay que recalcar la importancia de plasmar todos los efectos que pueden tener la economía, el uso de la tierra o el cambio climático sobre la sociedad. Con este motivo, el presente trabajo busca elaborar un modelo poblacional, basándose en datos históricos recogidos desde 1995. Así como proyectar un amplio abanico de escenarios en los que se puede encontrar la sociedad de cara al año 2100.



Una vez diseñado dicho modelo, se utiliza para su demostración un caso de estudio. La sociedad experimenta cada vez mayor número de nuevas enfermedades infecciosas de carácter vírico o bacteriológico que han causado un gran número de fallecimientos, una realidad vinculada al cambio climático y a la destrucción de los ecosistemas. Estas patologías han causado un gran número de muertes en tan solo dos décadas de siglo, entre ellas, se encuentra la COVID-19 que, por el momento, se ha llevado más de 450.000 vidas en menos de seis meses (General Secretary for Health & Centre., 2020). Por ello, se ha escogido la actual pandemia de coronavirus que es, hasta la fecha, uno de los mayores conflictos al que se ha tenido que someter la sociedad del siglo XXI. De esta forma, se hace una evaluación temporal de los efectos que tiene el SARS-CoV-2 sobre la población en un periodo de cinco años en el que se proyectan rebrotes modificando sus tasas de mortalidad y de incidencia.

Este trabajo analiza en primer lugar los distintos conceptos de dinámica de sistemas e IAMs e introduce el proyecto MEDEAS; así como los diferentes escenarios utilizados para elaborar el modelo poblacional. A continuación, hace un repaso de los impactos más relevantes que las alteraciones en los ecosistemas están produciendo en la sociedad, para finalizar con el análisis de un caso concreto de estudio y establecer unas conclusiones y reflexiones sobre los resultados del estudio y la viabilidad y utilidad de los modelos de estudio basados en la dinámica de sistemas.

## 1.1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

Este Trabajo de Fin de Grado surge a raíz de MEDEAS, un proyecto financiado por el programa Horizonte 2020 de la Unión Europea que establece una serie de modelos dinámicos que proporcionan una herramienta de libre acceso e integran distintas disciplinas sociales, económicas y medioambientales con el objetivo de evaluar políticas y servir de ayuda para lograr un desarrollo sostenible.

Sobre la base de los IAM desarrollados por MEDEAS nace el proyecto LOCOMOTION (Sociedad con bajas emisiones de carbono: un instrumento mejorado de modelización para la transición a la sostenibilidad, traducción del inglés 'Low-carbon society: an enhanced modelling tool for the transition to sustainability') financiado también por ya citado Horizonte 2020 cuyo objeto es diseñar un nuevo conjunto de IAMs que proporcionen a los encargados de elaborar políticas, a los ciudadanos interesados y a los expertos implicados en la materia, un sistema de modelización fiable, eficaz y de código abierto para evaluar la viabilidad, la eficacia, los costos y los efectos de las diferentes opciones de política de sostenibilidad uniéndose al



objetivo último de MEDEAS de una transformación socioeconómica hacia una sociedad con bajas emisiones de carbono.

Por lo tanto, el motivo que impulsó este Trabajo de Fin de Grado es cubrir una de las necesidades del proyecto MEDEAS al generar una nueva variable endógena, que aumente el nivel de detalle al crear un modelo poblacional que desagrega a los individuos por cohortes de edad y por sexo. Además, este modelo influye en varios de los objetivos de LOCOMOTION; ya que mejora el estado de la técnica de los IAM, al aumentar el nivel de detalle y la precisión, elaborando un marco de modelización que represente mejor la incertidumbre (*Objectives | LOCOMOTION*, n.d.).



## 2. OBJETIVOS

El principal objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es modelar la población utilizando técnicas de dinámica de sistemas y posteriormente programar dicho modelo con el software de dinámica de sistemas Vensim obteniendo una herramienta que permita la evaluación de impactos sobre la mortalidad y la natalidad; ya sea como consecuencia de políticas que afecten al número de nacimientos o provoquen impactos negativos que induzcan a la mortalidad de la población. Además, el modelo busca tener la posibilidad de diferenciar a la población por cohortes de edad y sexo para que la evaluación de los impactos pueda ser lo más realista posible.

Otro de los objetivos es mostrar una ejemplificación del uso del modelo representando la pandemia sufrida en el año 2020 causada por la COVID-19 y sus impactos demográficos.

Por último, ofrecer un modelo con una variable de salida que represente la evolución de la población y que se pueda utilizar como variable endógena en el conjunto del proyecto de MEDEAS y así, tener mejor aproximación de la realidad ayudando a lograr una transición socioeconómica de bajo carbono.





### 3. METODOLOGÍA

Como ya se ha introducido, el objeto principal del presente Trabajo de Fin de Grado es desarrollar un modelo poblacional que sirva de herramienta para poder evaluar diferentes políticas y otros aspectos que puedan incidir en la evolución del mismo. Por este motivo, el modelo se desarrolla mediante el uso de la dinámica de sistemas y se vincula con otros aspectos económicos y medioambientales mediante los IAMs, bajo el nombre del proyecto de MEDEAS. Este apartado busca explicar en qué consiste cada uno de estos aspectos; ya que forman los pilares fundamentales sobre los que se construye el modelo poblacional. Además, en último lugar, se explica el desarrollo de los distintos escenarios utilizados para dicho modelo.

#### 3.1. DINÁMICA DE SISTEMAS

La dinámica de sistemas es una técnica de modelado de entornos complejos. Su origen tiene lugar a mediados de 1950 de la mano del profesor Jay Forrester quien, a raíz de su trabajo en General Electric (GE), comenzó a introducir realimentaciones, causalidades circulares y demoras en entornos sociales. Por este motivo, uno de los principales factores que caracterizan la dinámica de sistemas son los bucles o ciclos de realimentación (Eberlein & Peterson, 1992; Izquierdo et al., 2008).

La dinámica de sistemas se utiliza en múltiples ámbitos como son la ingeniería, la economía, la gestión de proyectos o medioambiental y la sanidad pública, entre otros. Su fortaleza reside en que ofrece una perspectiva sistémica del entorno, por lo que las variables no se estudian de forma individual sino que se analizan de manera agregada, poniendo especial atención en las relaciones entre las distintas variables (Izquierdo et al., 2008).

Otro de los métodos de modelado más conocidos, es la simulación basada en agentes. Su principal característica reside en considerar los entornos complejos como el resultado de los comportamientos individuales y sus interacciones. Este tipo de modelado se utiliza para tratar aspectos sociales en el que cada uno de los agentes individuales tiene un comportamiento en función de sus intereses, por lo que el entorno complejo, será el resultado de la combinación de cada una de las partes y del mismo modo, las fronteras que delimitan el entorno complejo, son las que se abstraen de las individuales (Izquierdo et al., 2008). Además, la simulación basada en agentes combina elementos de teoría de juegos, sociología computacional o lo que es uno de sus puntos más fundamentales, el concepto de emergencia que hace referencia a aquellos fenómenos que no pueden reducirse a una de sus partes, sino que surgen a partir de las



relaciones descentralizadas de los componentes más simples (Holland, 1998).

A diferencia de la simulación basada en agentes, la dinámica de sistemas se fundamenta en la retroalimentación entre variables observables. Ambas permiten desarrollar conocimiento a través del diseño y el análisis de modelos formales de sistemas complejos; pero en la basada en agentes, los sistemas sociales son producto de comportamientos individuales y de cómo se interrelacionan (Izquierdo et al., 2008).

Por lo tanto, el principal propósito de la dinámica de sistemas es comprender los entornos complejos mediante el modelado; así como identificar las diferentes variables que se involucran en ellos y las relaciones entre las mismas, ya sean dinámicas, realimentaciones o retardos, entre otras. Además, permite analizar el comportamiento dinámico para optimizar la toma de decisiones acerca de diferentes medidas, resolviendo problemas y previniendo escenarios futuros (García, 2003).

En la dinámica de sistemas se diferencian tres tipos de variables principales. Primero, las de nivel o 'stock' que son aquellas variables dinámicas, dependientes del tiempo, que actúan como memoria o almacén de materia energía o información. Por otra parte, están las de flujo que se encargan de producir las variaciones en los 'stocks'; ya sea acrecentándolos (flujos positivos) o disminuyéndolos (flujos negativos). Por último, el resto de variables se consideran auxiliares y se relacionan entre ellas y con los flujos mediante funciones algebraicas lineales y no lineales, discretas o continuas. Pueden ser constantes, conversores de unidades, parámetros estimados etc. Por lo general, el número de variables auxiliares es muy superior al del resto, especialmente en los modelos grandes (García, 2003).

## VENSIM

Vensim es un entorno software de simulación creado por Ventana Systems, Inc. La historia de Vensim y Ventana, comienza en el año 1985 año en el que se funda la empresa con el objetivo de utilizar técnicas modernas y análisis de datos para resolver problemas de negocios, economía e ingeniería. Tras un periodo de aprendizaje con el creador de algoritmos clave para hacer deducciones sobre sistemas complejos cuando los datos son inexactos, el profesor Fred C. Schweppe del Instituto Tecnológico de Massachusetts, Ventana amplió el trabajo de Forrester y Scweppe al combinar los modelos realistas con la capacidad de evaluar la calidad de la información. Es entonces cuando en 1991 surge el software Vensim que facilita el desarrollo, análisis y optimización de diferentes modelos con el objetivo de mejorar el rendimiento de los sistemas reales (*Ventana Systems, Inc.*, n.d.).



Figura 1. Logo Vensim. Fuente: <http://vensim.com/>

El programa permite construir los diferentes modelos conectando las variables típicas de la dinámica de sistemas (flujo, 'stock' y auxiliares) mediante la unión de palabras con flechas, por lo que las relaciones entre ellas se introducen como conexiones causales. Una vez establecidas estas relaciones, el editor puede introducir todo tipo de ecuaciones lineales, no lineales, discretas o continuas que represente el comportamiento de cada variable (ATC-INNOVA, n.d.).

Vensim proporciona una herramienta para la creación de diagramas causales, de modelos, de árboles causales o de simulaciones con sus respectivas gráficas, entre otras de sus múltiples aplicaciones. Su motor de simulación permite utilizar bases de datos con gran cantidad de información y compilar los modelos en c para que la velocidad de simulación sea óptima. Otro de los puntos más interesantes es que posibilita la introducción de datos externos para poder utilizarlos en un modelo o compararlos con los resultantes de una simulación y, del mismo modo, el programa también permite exportar datos a las aplicaciones de bases de datos y a las hojas de cálculo (Vensim, n.d.).

Por último, cabe destacar que Vensim ofrece un total de 6 configuraciones distintas, de entre las cuales, una es de libre acceso para uso académico o personal. En este trabajo, se utiliza la versión más completa: Vensim DSS. Además, Ventana ofrece otro software de simulación, Ventity, desarrollado para crear modelos basados en agentes.

### 3.2. IAMs ('Integrated Assessment Models')

Los 'Integrated Assessment Models' (Modelos de Evaluación Integrada), son un tipo de modelos que tratan de identificar las principales características de la sociedad, economía, biosfera y la atmósfera y vincularlas entre sí. El principal objetivo de los IAMs es facilitar una herramienta que permita proyectar futuros alternativos donde se evalúen las diferentes políticas; de forma que se pueda ofrecer a los responsables de las políticas a todos los niveles del gobierno y de la industria, una idea general de los beneficios y de las pérdidas que supone tomar o no determinadas decisiones.

La motivación para una evaluación integrada es la necesidad de tomar decisiones políticas sobre cómo prevenir y/o adaptarse al cambio climático, y



cómo asignar los fondos para la investigación climática. Por otro lado, el mayor desafío es el de ganar credibilidad y para ello hay que lograr un equilibrio entre la especificidad y la exactitud del modelo. Las preguntas que se han de responder desempeñan un papel central en el equilibrio que se establece en el diseño de estos modelos, así como la transparencia para comunicar el contenido, la rapidez de respuesta tras una consulta y la capacidad de difusión del modelo (Dowlatabadi, 1995).

Los IAMs son modelos de naturaleza compleja e incierta con múltiples fortalezas y debilidades. Su complejidad abarca todo el proceso: desde el momento de comprender el problema hasta el planteamiento de las posibles respuestas al mismo, presentando innumerables desafíos a los desarrolladores de los modelos.

Existen dos tipos básicos de IAM, por un lado están los de proceso detallado (DP) IAM y, por otro, los de costo-beneficio (BC) IAM. Ambos tratan cuestiones sobre políticas de mitigación acerca de las emisiones de los gases de efecto invernadero; así como el coste de distintas formas de mitigarlo como, por ejemplo, la conservación de energía, los cambios en los procesos de producción o de combustible, entre otros. La diferencia entre ambos tipos reside en que los IAM de proceso detallado están más desagregados y tratan de buscar proyecciones del clima y de sus impactos a nivel regional y sectorial de forma detallada. Algunos utilizan la valoración económica y otros emplean proyecciones de impactos físicos tales como la reducción en el crecimiento de los cultivos, tierras inundadas por el aumento del nivel del mar o muertes adicionales por golpes de calor (Weyant, 2017).

A modo de ejemplo, se introduce un Modelo de Evaluación Integrada totalmente descriptivo, el E3ME-FTT-GENIE<sup>1</sup>, que está basado en la simulación y creado para evaluar políticas. Su estructura se divide en tres grandes bloques. En primer lugar, una simulación desagregada de la economía mundial basada en regresiones de series temporales (E3ME) que determina la demanda total de productos, servicios y portadores de energía. En segundo lugar, un conjunto de simulaciones de difusión tecnológica basado en modelos de elección discreta (FTT) que determina los cambios necesarios en las cantidades de energía para el transporte, la generación de electricidad y la calefacción de los hogares. Por último, para determinar los impactos climáticos de las políticas elegidas, se introducen las emisiones mundiales generadas por ambos bloques en el modelo del ciclo del carbono (GENIE); lo que permite determinar de manera probabilística si se cumplen los objetivos climáticos, entre otras de sus múltiples aplicaciones (Mercure et al., 2018).

---

<sup>1</sup> E3ME: Energy-Economy-Environment Macro-Econometric model, global macroeconomic model. FTT: Future Technology Transformations family of technology models. GENIE: Grid Enabled Integrated Earth system model, an integrated carbon-cycle and climate simulation model.

El objetivo principal de este IAM es crear un mapa detallado, así como un escenario de política mundial que sirva como herramienta para encontrar la trayectoria que permita alcanzar los objetivos del Acuerdo de París de no superar los 2°C de calentamiento global. Su punto de partida es, al mismo tiempo, su mayor limitación, la incertidumbre del comportamiento humano. Esta premisa expresa que no es posible que los individuos, las empresas u otros agentes conozcan todos los posibles resultados de un proceso de toma de decisiones y que, por lo tanto, existan incógnitas desconocidas. Por consiguiente, la toma de decisiones por parte de agentes que carecen de conocimiento no puede reducirse a un riesgo puro haciendo que, desde el principio, los agentes cometan errores de decisión y, de este modo, que los resultados sean inciertos (Mercure et al., 2018).

No obstante, a pesar de que este tipo de modelización presenta una incertidumbre inherente, son el único método disponible para informar cuantitativamente la formulación de políticas y mejorar nuestra comprensión de la realidad (Mercure et al., 2018).

El modelo E3ME-FTT-GENIE es tan solo un ejemplo dentro de una gran diversidad de IAMs que proporcionan diferentes aproximaciones para lidiar con las complejas interacciones que existen en los entornos complejos. De entre ellos, el objeto del presente trabajo busca trabajar a partir del marco de modelización MEDEAS ('Modeling energy system development under environmental and socioeconomic constraints').

### 3.3. MEDEAS

Es un conjunto de modelos dinámicos, que proporcionan una herramienta de código abierto que permite evaluar distintas políticas con el fin de encontrar el camino óptimo hacia la transición energética durante las próximas décadas. Estos modelos se desarrollan en dinámica de sistemas, posibilitando la integración de distintas áreas desde diferentes perspectivas así como sus realimentaciones. Está diseñado por el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS) de la Universidad de Valladolid (España).

El proyecto MEDEAS está financiado por la Unión Europea en el marco del programa Horizonte 2020 (H2020) creado por la Unión Europea y forma parte del grupo LCE21-2015: Modelado y análisis del sistema energético, su transformación e impactos (aspectos sociales, ambientales y económicos del sistema energético). Su principal objetivo es proporcionar a los encargados de formular políticas u otros interesados, nuevos instrumentos que mejoren la evaluación de impactos y limitaciones de la producción o consumo de la energía de la Unión Europea, así como la transición del sistema a una socioeconomía sostenible de bajo carbono.



Los modelos suelen estar comprendidos entre los años 1995 y 2060, pudiendo ampliarse hasta el año 2100. No obstante, según va aumentando el tiempo de la proyección, se incrementa la incertidumbre, disminuyendo la validez; aunque consiga mantener siempre un cierto valor analítico. Además, MEDEAS presenta tres tipos de modelos en función de su escala geográfica. En primer lugar, a nivel mundial (MEDEAS-W), en el que se basa este Trabajo de Fin de Grado; en segundo, a nivel de la Unión Europea (MEDEAS-EU); y, por último, nacional para Austria y Bulgaria (MEDEAS-AUT y MEDEAS-BGR, respectivamente). Estos tres modelos están integrados en una única dirección diferenciando entre 'padres' e 'hijos'. De este modo, MEDEAS-W es padre de MEDEAS-EU y de MEDEAS-country y por otra parte, MEDEAS-EU, es padre de MEDEAS-country, en otras palabras, los modelos de mayor rango geográfico alimentan a las regiones que contienen (Capellán-Pérez et al., 2020).

Por otra parte, los modelos incluyen las siguientes características principales:

- Limitaciones biofísicas de la energía disponible.
- Modelización del mineral e inversiones de energía para la transición energética.
- Escasez de minerales y cálculo de la energía neta disponible para la sociedad.
- Daños del cambio climático con las evaluaciones del clima realizadas por especialistas.
- Integración de las evaluaciones sectoriales detalladas.
- Estructura económica (análisis input-output) dentro de un enfoque de dinámica de sistemas.
- Cambios de energía impulsados por escasez física.
- Indicadores de impacto socioeconómico y ambiental.

Dentro de estas características cabe destacar dos incorporaciones como son la consideración de la disponibilidad de energía y los daños provocados por el cambio climático; ya que son aspectos que, rara vez, se tienen en cuenta; de modo que proporcionan un paso adelante en el estado de la técnica del campo (Capellán-Pérez et al., 2020).

MEDEAS alcanza varios enfoques dinámicos siendo los de Economía y Energía los más detallados. Los modelos de este proyecto están estructurados en nueve módulos principales (ver Figura 2):

- Economía
- Demanda de energía
- Disponibilidad de energía
- Infraestructuras energéticas y retorno de la energía invertida (EROI)
- Minerales

- Uso de la tierra
- Agua
- Clima/emisiones
- Indicadores de impacto social y ambiental

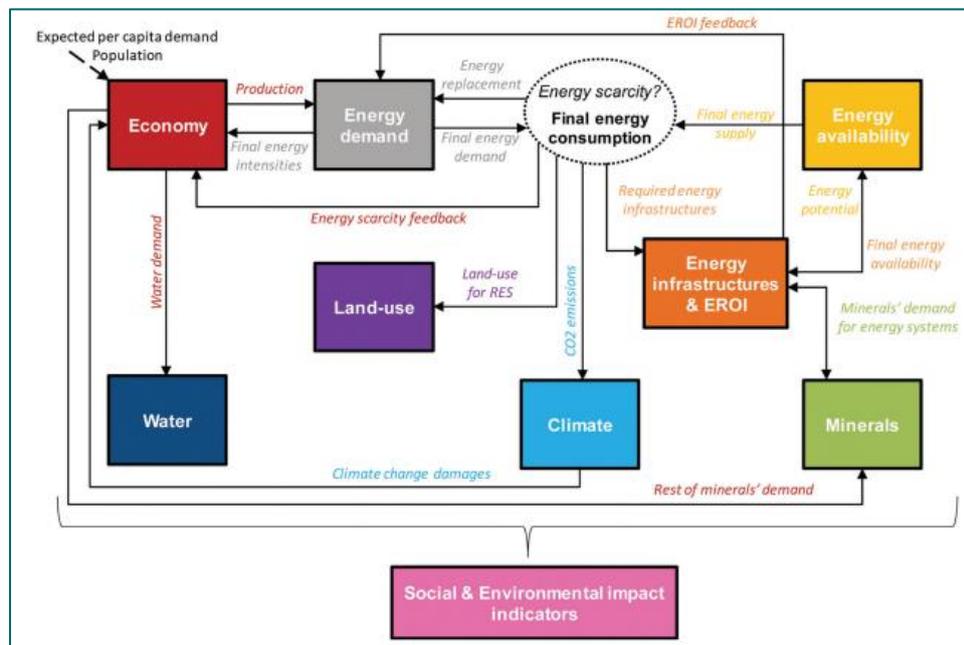


Figura 2. 'MEDEAS-world model schematic overview'. Las principales variables que conectan los diferentes módulos (simbolizadas por rectángulos de color) están representadas en cursiva y por flechas sólidas. La flecha punteada indica las entradas de los controladores exógenos. Fuente: adaptación de Capellán-Pérez et al.

Finalmente, MEDEAS, tras la ejecución de diferentes modelos, llega a la conclusión de que una continuación de las tendencias socioeconómicas actuales se traduciría en fuertes carencias materiales y de recursos y en impactos biofísicos que podrían derivar en conflictos de gran magnitud. Una crisis global podría llevar al colapso de la actual civilización (Capellán-Pérez et al., 2020).



### 3.4. ESCENARIOS

Una vez integrados los conceptos de Dinámica de sistemas, IAMS y MEDEAS, este apartado desarrolla el proceso de creación de los escenarios sobre los que se desarrolla el modelo poblacional. El planteamiento de los mismos se puede explicar en varias partes. Por un lado, están aquellos que establecen un patrón de desarrollo demográfico (SSP) y, por el otro, los recogidos en el propio modelo de MEDEAS generados por los SSP. Por este motivo, en este apartado se explica de manera extensa el desarrollo de los distintos escenarios y sus relaciones.

#### **SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS (CAMINOS SOCIOECONÓMICOS COMPARTIDOS)**

Los 'Shared Socioeconomic Pathways' (SSPs) son un total de cinco escenarios que explican las posibles trayectorias que pueden seguir la demografía y el cambio climático de cara al año 2100. Cada uno estructura el futuro socioeconómico; así como el desarrollo demográfico que lo acompaña. Los aspectos tratados son el tamaño de la población, ratios de urbanización, uso de la tierra y de la agricultura, energía y producción, emisiones y cambio climático.

Para conceptualizar cada uno de los SSPs se establecen dos desafíos principales: mitigación y adaptación. En los siguientes puntos se explican cuáles son los factores que facilitan o dificultan cada desafío. Además, se analiza el procedimiento a seguir para obtener los escenarios y las combinaciones de mitigación y adaptación -nivel alto o bajo- de cada una de las posibles combinaciones.

#### **MITIGACIÓN**

Las acciones de mitigación son aquellas que están dirigidas a reducir y a limitar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los desafíos de la mitigación introducidos en los SSPs no están pensados para establecer medidas de contención, sino para detectar los factores socioeconómicos que inciden en ella.

Los desafíos socioeconómicos para la mitigación, según describe (O'Neill et al., 2014), se diferencian en dos tipos de factores:

Los factores que, ante la falta de políticas de mitigación, provocan altas emisiones, obstaculizando la tarea. Algunos de los que más pueden acrecentar las emisiones son las grandes tasas de crecimiento demográfico y económico, el uso extensivo de la tierra o los suministros de energía intensivos en carbono, entre otros. Además, muchos de los procesos



tecnológicos y sociales pueden impulsar el uso de dichos factores, aumentando el nivel de las emisiones.

Por otro lado, están aquellos factores que tienden a aumentar la capacidad de mitigación inherente en una sociedad, entre los que se encuentran la gama de opciones tecnológicas, las instituciones que formulan políticas, la disponibilidad de recursos financieros que apoyen las actividades de contención y la voluntad política para abordar las cuestiones energéticas y ambientales (O'Neill et al., 2014).

Cada uno de los SSPs incluye distintas suposiciones de combinaciones de los diferentes factores que involucran la capacidad de mitigación. Y será alta o baja en función del resultado que se obtenga al conjuntar los distintos factores, sin estos tener que influir en la misma dirección.

## ADAPTACIÓN

Las medidas de adaptación son aquellas enfocadas a reducir la vulnerabilidad producida por los efectos del cambio climático.

Como ya se ha explicado previamente, la funcionalidad de las SSPs no consiste en explicar cuáles son las medidas o las políticas de adaptación, sino en buscar aquellas condiciones sociales o ambientales que favorecen o perjudican la adaptación a los riesgos provocados por el cambio climático. Estos riesgos están derivados de una suma de impactos como son el aumento del nivel del mar, las variaciones de temperatura o las precipitaciones que dificultan la adaptación (O'Neill et al., 2017).

Los problemas de adaptación dependen de tres determinantes socioeconómicos principales:

La exposición a los peligros del cambio climático: la subida del nivel del mar es un claro ejemplo dado que no afecta de igual forma a la población que vive en zona costera que en plena meseta (O'Neill et al., 2014)

La sensibilidad a los peligros del cambio climático, entendiéndose por tal la capacidad de respuesta de un sistema socioeconómico ante una determinada cantidad de cambio climático (exposición-respuesta). Volviendo al ejemplo de la población costera, no afectará de igual forma a los habitantes cuyas viviendas estén bien construidas que aquellas que habiten en casas en las que un aumento del nivel del mar pueda destrozar su hogar (O'Neill et al., 2014)

La capacidad de adaptación, entendiéndose como tal la que tiene una sociedad para sobrevivir pese al cambio climático. Estos factores comprenden las distintas opciones tecnológicas, la eficacia de las instituciones y la disponibilidad de recursos humanos y financieros (O'Neill et al., 2014).



Continuando con el ejemplo de un aumento del nivel del mar, una sociedad provista de recursos financieros, tiene la posibilidad de amortiguar las consecuencias provocadas por el cambio climático.

Una vez establecida la diferencia entre mitigación y adaptación, para generar el proceso de creación de escenarios de los SSPs, Riahi et al. (2017) define las siguientes etapas:

En primer lugar, se define una serie de relatos donde se conceptualiza la lógica de cada SSP (ver anexo I). En segundo lugar, se extienden los relatos en forma de 'input tables' describiendo las hipótesis en términos cualitativos. A continuación, se elaboran una serie de indicadores demográficos y económicos utilizando modelos cuantitativos. Después, se utilizan los IAMs para elaborar los escenarios de referencia en términos de energía de sistema, uso de la tierra y emisiones. Por último, se describen los IAMs para elaborar los escenarios de mitigación.

Los SSPs son, por lo tanto, un conjunto de escenarios cuya finalidad es servir de base para poder modelar las diferentes políticas que se pueden adoptar para favorecer un desarrollo sostenible. La diferencia entre unos y otros escenarios reside en que cada uno está concebido con diferentes niveles de desafío ante la adaptación y la mitigación (ver Figura 3)

Así, el modelo parte de cinco escenarios básicos que se describen a continuación:

SSP1: Sostenibilidad (tomando el camino ecológico). Este modelo presupone bajos desafíos de mitigación y de adaptación.

SSP2: En medio del camino. Este se encuentra en un punto intermedio tanto para las medidas de mitigación como para las de adaptación.

SSP3: Rivalidad Regional (un camino rocoso). Este escenario tiene elevados desafíos de adaptación y mitigación.

SSP4: Desigualdad (un camino dividido). Escenario en el que los desafíos de mitigación son bajos y los de adaptación, altos.

SSP5: Desarrollo con combustibles fósiles (tomando la autopista). En este último escenario, los desafíos de mitigación son altos y los de adaptación, bajas.

Todos estos escenarios presentan una serie de indicadores sobre el número de personas que habrá en el mundo cada década entre los años 2020 y 2100 (ver Tabla 1).

Scenario (People)	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
SSP1-Baseline	7576	8062	8389	8531	8492	8299	7967	7510	6958
SSP2-Baseline	7611	8262	8787	9169	9385	9457	9407	9254	9032
SSP3-Baseline	7698	8514	9257	9957	10574	11117	11633	12134	12620
SSP4-Baseline	7626	8259	8766	9147	9377	9473	9471	9402	9292
SSP5-Baseline	7552	8054	8403	8579	8589	8457	8200	7831	7375

Tabla 1. Población esperada. Para cada uno de los escenarios SSP se tiene una estimación aproximada del número de personas que hay a comienzos de década entre los años 2020 y 2100. Fuente: Las bases de datos de los SSP realizados por el programa de energía IIASA <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>.

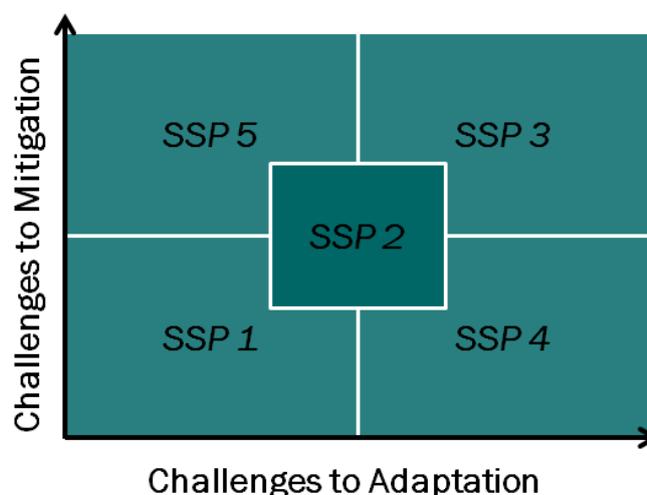


Figura 3. The 'challenges space' to be spanned by SSPs. Los cinco SSP en función de sus desafíos de adaptación y mitigación. Fuente: Kriegled et al. 2012, Fig. 3.

## ESCENARIOS IMPLICADOS EN EL MODELO POBLACIONAL

En los últimos años, varios acuerdos internacionales han establecido diferentes hipótesis acerca del desarrollo que puede producirse en la demografía de cara al año 2100. Estas posibilidades están basadas en características concretas que, a su vez, distancian significativamente el desarrollo de unos escenarios de otros dificultando, en ocasiones, su



comparación. Con objeto de facilitar la clasificación, van Vuuren et al. (2012), recogieron las características que definen los diferentes arquetipos de escenarios y los agruparon en lo que denominaron 'familias de escenarios'. Cada una de ellas engloba escenarios que tienen el mismo tipo de propiedades en común, es decir, los autores identifican una serie de características y en función de la posición tomada por cada escenario, pertenece a una de las seis familias que defienden.

Cada uno de los escenarios de MEDEAS se focaliza dentro de una de las familias de escenarios. Antes de explicar la correlación que existe entre ambos, se definen las características que unen un escenario a una determinada familia. Estas características son:

- Enfoque global o regional, es decir, si el escenario considera a la población como un conjunto o la separa en regiones que pueden gestionarse de diferentes maneras. En este modelo poblacional, el enfoque de todos los escenarios es global.
- Grado de propensión o aversión al riesgo de degradación del medio ambiente.
- Posición respecto a los valores históricos, es decir, si se produce una continuidad de lo ocurrido históricamente o una derivación de dichos valores.
- Actitud de cooperación o de competición que tome la región o las regiones consideradas.

Por lo tanto, van Vuuren et al. (2012) definen un total de seis familias que responden de diferentes maneras a las características explicadas.

Por otra parte, volviendo al tema principal de este apartado, MEDEAS define un total de seis escenarios que responden a las características detalladas y, por lo tanto, cada uno pertenece a una familia distinta. Estos escenarios son los siguientes:

- **BAU (Business As Usual):** desarrolla el futuro en base a las tendencias históricas; lo que supone que todo sigue en la misma línea que hasta ahora. Esto no implica que no se produzcan cambios; ya que, a lo largo de la historia, siempre se han tomado medidas de mitigación u adaptación frente a cambios climáticos o situaciones de crisis; pero sí significa que el desarrollo continuará dentro de la misma dinámica producida hasta el momento (van Vuuren et al., 2012). Las tendencias de crecimiento demográfico continúan en base a los datos históricos.
- **Escenarios 1 y 2:** pertenecen a las familias de escenarios de optimismo económico. Toman un enfoque competitivo, en el que los mercados se reforman aumentando su eficiencia y se produce un rápido crecimiento económico. Por otro lado, conseguir este desarrollo

económico conlleva una evolución demográfica lenta (van Vuuren et al., 2012).

- **Escenario 3:** estima un alto crecimiento de la población. Corresponde a la familia de escenarios conocida como competencia regional. Considera que el principal objetivo de las regiones es centrarse en la soberanía nacional y en la autosuficiencia, acercándose a la diversidad; pero manteniendo la tensión entre distintas regiones y culturas. Cada región se centra en protegerse, dando primacía al desarrollo de su mercado. El principal aspecto en esta familia de escenarios es conocer hasta qué punto se puede dar paso a la supremacía individual sin que se agoten los (van Vuuren et al., 2012).
- **Escenario 4 'Post crecimiento':** pertenece a la familia de escenarios de desarrollo sostenible, en los que la globalización y los mercados internacionales pierden sus valores tradicionales. Los países se centran en solucionar problemas ambientales y sociales combinando cambios drásticos con la descentralización del gobierno (van Vuuren et al., 2012). En definitiva, se presenta un control de la población, por lo que el crecimiento es el mínimo.
- **User defined:** este escenario permite al usuario parametrizar el modelo libremente.

En el modelo poblacional, cada uno de estos escenarios se relaciona con los escenarios SSPs, previamente explicados. Como se muestra en la Tabla 2, el escenario 4 no se ajusta a ninguno de los SSPs; ya que considera un crecimiento demográfico muy bajo y ninguno de los SSPs muestra tal tipo de evolución.

	BAU	SCEN1	SCEN2	SCEN3	SCEN4
Population Evolution	Medium	Low	Low	High	Very Low
SSP	SSP2	SSP1	SSP1	SSP3	-

Tabla 2. Relación entre escenarios SSP y MEDEAS. Para cada uno de los escenarios de MEDEAS, se muestra el crecimiento demográfico esperado de cara al año 2100. El nivel de crecimiento se muestra de forma cualitativa, siendo un crecimiento medio para el escenario BAU; bajo para los escenarios 1 y 2; alto para el escenario 3, y muy bajo para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.



## 4. IMPACTO GLOBAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA SOCIEDAD

El objeto de este apartado es recoger el análisis de literatura académica sobre los impactos que origina el cambio climático sobre la sociedad tratando diferentes aspectos desde la problemática económica del agotamiento de recursos, a los problemas sanitarios y el aumento de las mortalidades debido a distintas enfermedades causadas por eventos extremos o por las alteraciones en la atmósfera.

### 4.1. IMPACTO ECONÓMICO: Crisis Energético-económica.

Un buen ejemplo para expresar las consecuencias de las realimentaciones de algunos aspectos, con otros que a priori pueden parecer que no están relacionados, es la crisis energético-económica. En la actualidad, la alimentación y el nivel de hambruna se pueden correlacionar a través del aumento del precio del petróleo.

Para entender el funcionamiento de la extracción de petróleo, Castro (2017) hace una analogía con la retirada del agua de una esponja que inicialmente está empapada. Durante los primeros minutos, el líquido cae rápido, sin requerir de un gran esfuerzo. Sin embargo, a medida que se va cayendo, es necesario incrementar el esfuerzo para proporcionar la misma cantidad de agua.

Durante muchos años, expertos anunciaron que el fin del petróleo barato llegaría antes del año 2020, esto se debía a que, antes de 2015, la cantidad extraída estimada iba a ser menor (Campbell & Laherrère, 1998). Por lo tanto, si la oferta disminuye y la demanda se mantiene constante, los precios suben. Esto fue lo que ocurrió en el año 2008 cuando el precio del petróleo se incrementó cinco veces por encima de sus valores habituales (Castro, 2017).

La primera consecuencia observable en la subida del precio del petróleo es el incremento de los precios del resto de las energías. Esto se debe a que la mayor parte de las máquinas, que se encargan de extraer materias primas energéticas y no energéticas, están hechas de materiales plásticos, derivados del petróleo y alimentadas por combustible. Por esta razón, si sube el precio del petróleo, aumenta el del resto de energías provocando el incremento del precio de fertilizantes; ya que estos necesitan de mucha energía para fabricarse y, por consiguiente, sube el precio de los alimentos (Castro, 2017).

Como resultado de las subidas de precio mencionadas, se observa que el sistema agrícola actual es completamente dependiente del valor de los



fertilizantes y abonos y, por lo tanto, del petróleo. Estos incrementos hicieron que algunos países promovieran el cultivo de biocombustibles; lo cual crea una competencia directa por el uso de la tierra incrementando, aún más, el precio de los alimentos como ocurrió entre los años 2006-2008 y 2009-2015. Este crecimiento provoca que la hambruna aumentase de 800 a 1000 millones de personas a mediados de 2008 en tan solo año y medio (Castro, 2017).

Como consecuencia, las personas con necesidad de alimentos emigran a ciudades y países con mayor prosperidad económica, agrandando el número de parados y dando lugar a una gran crisis económica. Esta situación hace que la demanda disminuya, los precios bajen y, en consecuencia, se vuelvan a disparar los precios del petróleo permitiendo que se repita todo el proceso de nuevo (Castro, 2017).

La conclusión que se saca es que, para poder salir de una crisis económica, es imprescindible que el crecimiento económico no dependa del precio del petróleo. Sin embargo, para sustituir este combustible fósil por otras energías como la nuclear, se debería haber empezado a construir en el año 2010 alrededor de 3.000 centrales nucleares, cifra que está muy lejos de ser la real; ya que, a finales del año 2018, tan solo había 454 reactores nucleares operativos en todo el mundo. Además, como el uranio es un recurso finito, solo serviría como solución temporal para alrededor de unos 25 años. Por otra parte, el resto de renovables producen principalmente electricidad que equivale tan solo al 20% de nuestro consumo energético. Respecto a los biocombustibles, para que pudieran sustituir al petróleo, su uso debería alcanzar unas 500 millones de hectáreas lo que es inmoral y seguramente inviable (Castro, 2017).

Por lo tanto, según las afirmaciones Castro (2017), la única solución sería reducir de forma voluntaria el consumo de energía per cápita en el mundo; lo que exigiría que los países emergentes dejaran de crecer permitiendo el desarrollo de los más pobres. Esto pues, requiere que la sociedad se guíe por principios de solidaridad e igualdad y, de no ser así, el consumo se reducirá de igual manera dado que si no hay recursos, será un imperativo físico.

## 4.2. SALUD Y MEDIOAMBIENTE

La relación que existe entre la salud y el medioambiente está llena de realimentaciones. Si se observa la naturaleza como un único sistema formado por distintos subsistemas como la sociedad, los mercados de capital, los bosques, las capas de hielo, las granjas etc. no es difícil ver el efecto que un pequeño cambio en un grupo puede provocar en todo el ecosistema (Frumkin & McMichael, 2008). En otras palabras, el cambio climático se está

produciendo por pequeñas variaciones de comportamiento en los distintos subsistemas que conviven entre sí, provocando que las temperaturas aumenten, así como la contaminación, lo que tiene un efecto dominó sobre la sociedad, encaminándola hacia el colapso.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que la salud es ‘un estado de completo bienestar físico, mental y social y no solo ausencia de enfermedad o incapacidad’. Por ello, la salud no se puede considerar solo como una cuestión científica, sino se debe considerar desde un punto de vista social y político.

La relación entre el medio ambiente y la salud es indiscutible, el deterioro medioambiental incide de forma directa sobre la salud pública de diversas maneras tanto a corto como a largo plazo. La OMS ya ha anunciado que el cambio climático causó más de 150.000 muertos en el año 2000 y que esta cifra ascenderá a 250.000 fallecimientos en una proyección hacia el año 2040 (OMS, 2018).

Con el objetivo de explicar mejor los impactos que tiene no solo el cambio climático, sino la contaminación atmosférica sobre la salud en la sociedad, se distinguen cuatro tipos de afectación sobre la salud. En primer lugar, aquellos que inciden de forma directa sobre la mortalidad, como son las olas de calor; en segundo lugar aquellos efectos que aumentan el número de patologías del ser humano, provocando múltiples enfermedades debido a los cambios del medioambiente. En tercer lugar, la influencia que tiene el cambio climático sobre los eventos extremos y la implicación de estos últimos sobre la salud física y mental. Por último, la influencia que tiene la escasez y la mala calidad del agua sobre la salud.

## **EFFECTOS DE LAS OLAS DE CALOR SOBRE LA SOCIEDAD**

Uno de los principales impactos del calentamiento global sobre la salud es el aumento de la mortalidad asociada al calor (Smith et al., 2014).

En el año 2003, en Inglaterra y Gales se registraron alrededor de 2.000 fallecimientos en exceso causados por las olas de calor (Haines et al., 2006). Estos aumentos, inciden con mayor fuerza en los grupos poblacionales más envejecidos y, además, afectan en mayor grado a la población que vive dentro de los núcleos urbanos debido al efecto ‘isla de calor’, es decir, a la concentración de construcciones hechas a base de hormigón y otros materiales que dificultan la refrigeración.

Por otra parte, el aumento de las temperaturas conlleva a una realimentación; dado que la sociedad tiende a contrarrestar estos incrementos elevando el uso de aire acondicionado que, a su vez, aumenta la



combustión de las centrales eléctricas y, por lo tanto, contribuye a que se siga acrecentando el cambio climático (Frumkin & McMichael, 2008).

Si bien es cierto que los grupos poblacionales están adaptados a sus climas locales, el riesgo de mortalidad está aumentando fuera del rango de temperatura óptimo específico de un lugar (OMS, 2018). Una cuestión de vital importancia es el ritmo con el que la población es capaz de aclimatarse a mayores temperaturas a nivel conductual, fisiológico y tecnológico. Mientras que una adaptación orgánica y funcional inicial puede ocurrir en unos pocos días, la aclimatación completa, mientras sea factible, puede llevar varios años (Haines et al., 2006). Por lo tanto, el problema ya no es si la población puede adaptarse a un aumento progresivo del calor, sino si la velocidad a la que puede hacerlo es suficiente para evitar el aumento de fallecimientos debido a dicha causa.

## **ENFERMEDADES Y MORTALIDAD CAUSADAS POR EL DETERIORO MEDIOAMBIENTAL**

Otro de los principales problemas medioambientales que percibimos durante el siglo XXI es el aumento de la contaminación del aire, cuyos impactos inciden sobre la salud humana y animal. Las principales consecuencias no están relacionadas directamente con la mortalidad sino con la aparición de un gran número de molestias que afectan a gran parte de la población. No obstante, una mala calidad del aire afecta tanto a la morbilidad como a la mortalidad, aunque, al menos por el momento, no sea de forma directa.

La OMS recuerda que anualmente 3,8 millones de personas mueren a causa de patologías derivadas de la contaminación del aire, siendo un 27% por neumonía, 18% accidentes cardiovasculares, 27% cardiopatía isquémica, 20% neumonía obstructiva crónica, y 8% cáncer de pulmón (OMS, 2018). Además, la contaminación tiene sus primeros efectos durante el desarrollo del feto porque dificulta la maduración pulmonar, tanto en la vida intrauterina como a largo plazo, durante los primeros años de vida. Asimismo, durante la vida adulta, la contaminación atmosférica acelera el declive de la función pulmonar durante el envejecimiento. Por otra parte, los impactos también afectan a la aparición de otras enfermedades como el asma, diabetes de tipo 2, cáncer de pulmón y otros tumores, enfermedades cardiovasculares etc. (S. T. Holgate, 2017).

Los efectos en la salud son muy variables en función de la edad de los individuos; de ahí, la importancia de hacer una diferenciación por cohortes a la hora de modelar. El efecto en los niños es más grave debido a que la defensa del cuerpo y su sistema respiratorio no están en completo desarrollo. Por otra parte, los impactos en edad adulta consisten en una disminución



acelerada de la capacidad pulmonar, asma, diabetes tipo 2, ataques al corazón y el comienzo de un cáncer pulmonar, también se ha señalado la relación con otros tipos de procesos oncológicos... Por último, en las personas mayores afectará a la capacidad cognitiva teniendo también más riesgo de sufrir un ataque al corazón, insuficiencias cardíacas o un tumor en el pulmón. Todo ello, además de otras enfermedades neurológicas como son el Alzheimer u otras demencias (EEA, 2019; S. Holgate, 2017).

Por otra parte, el aumento de la temperatura y del dióxido de carbono están dañando la vegetación al alterar su ciclo de vida. Esta última responde generando mayor producción de polen y, por lo tanto, mayor número de alérgenos y un alargamiento de la temporada de polinización y con ello, de la de alergias; lo que, una vez más, afecta a la salud humana (Katelaris & Beggs, 2018)

## EVENTOS EXTREMOS: INUNDACIONES

El cambio climático influye en la aparición de múltiples fenómenos meteorológicos como son las inundaciones o los vientos extremos, entre otros. Este apartado se centra en los problemas derivados de las inundaciones al ser uno de los más comunes en la actualidad.

En las zonas costeras se asocia mortalidad a inundaciones. Según (Nicholls, 2007) alrededor de 120 millones de personas están expuestas a inundaciones tanto por ciclones tropicales como por tormentas cada año, a lo que se le atribuyen 12.000 muertes anuales.

La continua alteración del medioambiente provoca que los desastres naturales se produzcan con mayor frecuencia. Estos afectan de múltiples formas a la sociedad.

En primer lugar, los eventos extremos como las inundaciones provocan lesiones físicas además de incidir en la mortalidad y en la morbilidad. Por otro lado, estas crecidas de agua provocan la movilización de productos químicos altamente peligrosos para el medioambiente y el ser humano por lo que se produce de nuevo una realimentación y la propia anegación altera aún más el ecosistema. Además, estos productos químicos así como la inundación tienen un efecto muy negativo sobre la calidad del agua. Según Haines et al. (2006), después de una riada, se produce un aumento en el número de enfermedades diarreicas y respiratorias. En este aspecto, hay que diferenciar que esto afecta independientemente del poder adquisitivo de la región en la que se produce; puesto que, aunque es fácil pensar que en los países más desarrollados dichas enfermedades no suponen un gran agravio debido a la existencia de un buen sistema sanitario, en particular aquellos con una atención sanitaria pública, gratuita, universal y accesible para la ciudadanía, sí que tiene un gran impacto a nivel económico. Además, otro de los efectos



más preocupantes son los daños psicológicos que puede causar el trauma ante este tipo de acontecimientos provocados por los daños en el entorno doméstico y las pérdidas económicas que suponen. Estas enfermedades mentales pueden llegar a persistir durante más de un año después de que se haya producido el fenómeno (Haines et al., 2006).

Por último, el aumento en los eventos extremos como tormentas eléctricas o ciclones tropicales generan un hábitat que incentiva el desarrollo de algunas de estas plantas con alérgenos como, por ejemplo, el moho que prolifera en lugares húmedos tras producirse el desbordamiento de las aguas (Katelaris & Beggs, 2018).

## **CALIDAD DEL AGUA**

Otro de los mayores peligros a los que se enfrentará la sociedad a lo largo del siglo XXI son los problemas de escasez de agua potable, los cuales se refieren tanto a la calidad como a la cantidad disponible.

Según el PNUD (2006), en el año 2005 había alrededor de mil millones de personas en el mundo con dificultades para acceder al agua y, al ritmo del consumo actual, se estima que este problema afectará al 60% de la población mundial en el año 2050.

Por otra parte, en relación con la calidad del agua, existen tres factores hidrológicos que impulsan su contaminación microbiana. El 'efecto de escorrentía' se produce cuando las precipitaciones provocan que la contaminación microbiana se infiltre en el medio ambiente. El 'efecto de dilución' tiene lugar cuando las grandes corrientes de agua disuelven las concentraciones microbianas. Por último, el 'efecto de concentración' ocurre cuando las condiciones de sequía permiten la acumulación de microorganismos en el medio ambiente (Mellor et al., 2016).

Una de las enfermedades que más se relaciona con una mala calidad del agua es la diarrea. Factores desencadenados por el cambio climático como las variaciones de temperatura, aumento de las precipitaciones o las inundaciones afectan directamente al estado del agua y, por lo tanto, aumentan el número de individuos que padecen dicha patología. Además, la escasez de agua impulsa a recorrer largas distancias para su recolección; lo que también se relaciona con un mayor riesgo de diarrea, retraso en el crecimiento de los niños y muerte entre los menores de cinco años en África.

Las comunidades de todo el mundo en desarrollo, que ya están muy agobiadas por las enfermedades diarreicas debido al escaso acceso al agua, a la falta de saneamiento y de adecuadas instalaciones para la higiene personal, carecen de la capacidad de adaptación necesaria para responder suficientemente a las adversidades adicionales causadas por el cambio

climático. Los estudios sugieren que las tasas de diarrea están positivamente correlacionadas con el aumento de la temperatura y muestran una relación compleja con las precipitaciones (Mellor et al., 2016).

### 4.3. PANDEMIAS

No es una novedad que el cambio climático perturba los ecosistemas naturales. El desequilibrio medioambiental favorece la propagación de las infecciones y su transmisión. El agua, los alimentos y los vectores de transmisión son la clave. Si un calentamiento global hace que proliferen determinados vectores como mosquitos o garrapatas, o que aparezcan en hábitats hasta entonces inusuales para ellos, estos factores potencian las infecciones y lo hacen en poblaciones nuevas y, por ello, desprotegidas inmunológicamente. Además, hay una fuerte influencia antropológica en la interacción entre el clima y las enfermedades como constatan las migraciones vinculadas a catástrofes, tales como la malaria, la fiebre tifoidea o las infecciones gástricas agudas, las cuales se disparan cuando un huracán, por ejemplo, ha arrasado a toda una población. La relación pues entre el cambio climático y las epidemias es estrecha y, de ahí, el desarrollo de sistemas de vigilancia epidemiológica que permitan predecir la aparición de brotes como el de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el año 2005, denominado *'early warning system model'* (EWS); lo que permite implementar medidas de contención y control de forma rápida y efectiva para evitar la propagación (Berberian & Rosanova, 2012).

Desde finales del siglo XX, han comenzado a emerger más de 30 nuevas patologías infecciosas causando grandes impactos sobre la salud humana y animal (Jiménez, 2013). Aunque las enfermedades llevan acompañando al ser humano desde sus comienzos, en los últimos tiempos las infecciones bacteriológicas y virológicas se han convertido en una exponencial amenaza pese a los enormes avances científicos y médicos. Ya son muchos los estudios que encuentran una estrecha relación entre aumento del número de patologías y el cambio climático; ya que, al alterar los ecosistemas, se favorecen las condiciones ideales para la propagación de infecciones y desarrollo de epidemias.

La interacción entre el medio ambiente, los agentes patógenos y las poblaciones incide directamente en la salud tanto humana como animal. Cualquier desequilibrio puede provocar nuevos agentes infecciosos o la reemergencia de patologías olvidadas, desatendidas o incluso superadas. Y ello puede suponer unas graves consecuencias no solo en el ámbito sanitario sino en el económico y social (Jiménez, 2013).



Un buen ejemplo de estas nuevas enfermedades son las causadas por coronavirus. La OMS (2020) define al coronavirus como ‘una extensa familia de virus que pueden causar enfermedades tanto en animales como en humanos’. Uno de los casos más recientes fue el SARS, que surgió en China entre los años 2002 y 2003 y se extendió por varios países causando la muerte de más de 750 personas. Posteriormente, en el año 2013, apareció una enfermedad respiratoria vírica conocida como el MERS, causada por un coronavirus identificado por primera vez en Arabia Saudita (Jiménez, 2013). Y, a finales del año 2019 en Wuhan (China), la COVID-19, una enfermedad infecciosa provocada por el último coronavirus descubierto (SARS-CoV-2), desencadenó una pandemia que aún sigue activa, sin vacuna ni tratamiento específico conocido a fecha de hoy. Una epidemia que ha causado ya más de 465.000 fallecimientos en todo el mundo.

Las epidemias no solo tienen un enorme impacto sobre la vida de millones de personas de uno o varios países sino que han provocado unas serias y largas repercusiones económicas y sociales a nivel global. Los gobiernos han implementado medidas para frenar la recesión económica que provoca cualquier pandemia y, en la situación actual, la COVID-19. Ayudas a las empresas, pymes y grandes compañías, cobertura de expedientes de regulación, intervención de precios y suministros de productos de primera necesidad y combustibles, medidas para la recuperación del empleo y los negocios persiguen contener una grave crisis económica. La recesión impacta directamente sobre la producción, en calidad y en cantidad; rompe las cadenas de suministro y distribución, en particular de los productos sanitarios y de los importados y golpea el perfil financiero de las empresas y del mercado de valores (Deloitte Touche Tohmatsu Limited (DTTL), 2020)

En este apartado pues se muestran múltiples impactos con sus respectivas realimentaciones que afectan a la población e influyen sobre la mortalidad en mayor o menor medida. Cualquiera de los ejemplos expuestos en tendrían interés para ser modelados, desde el número de hambrunas causadas por la escasez del petróleo al aumento de la mortalidad provocada por los incrementos de temperatura o escasez en el agua. El abanico es muy amplio, pero dada la situación actual, analizar la COVID-19 se muestra especialmente interesante para modelarla en este Trabajo de Fin de Grado.

## 5. MODELO POBLACIONAL

Este apartado comprende todos los aspectos que se han tenido en cuenta a la hora de desarrollar el modelo poblacional. En primer lugar, se explican las principales características del mismo, así como su formulación. A continuación, se analizan gráficamente los resultados del modelo. Y, finalmente, se hace una evaluación de los impactos causados por la COVID-19 donde se introducen nuevas variables y se analizan los resultados obtenidos.

### CÓDIGO DE COLORES Y SÍMBOLOS

Con ánimo de mejorar la comprensión del modelo se ha establecido un código de colores y símbolos que facilita la consulta y la relación entre las variables (ver Tabla 3).

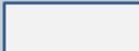
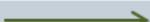
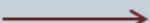
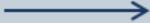
Símbolo	Descripción
	Entrada de datos externos provenientes de una hoja de cálculo Excel
	Entrada de constantes de los escenarios de MEDEAS desde una hoja de cálculo Excel
	Entrada de constantes desde una hoja de cálculo Excel
	VARIABLES CLAVE
	Variable de tipo stock
	Flujos del sistema de entrada (nacimientos)
	Sistema principal
	Flujos del sistema de salida (muertes)

Tabla 3. Código de colores y símbolos. Los hexágonos representan todas las entradas de datos externos al programa. Además, están clasificados por colores en función del tipo de datos que toman: el color lila representa a la introducción en el modelo de datos; el amarillo, de constantes; y el azul, de las constantes de los escenarios SSPs para facilitar la consulta rápida. Por otra parte, ya que el modelo está dividido en tres tramos, cada tramo está identificado con un color: el granate representa el sistema principal; el verde, el flujo de entrada (las concepciones); y, por último, el azul representa el flujo de salida (la mortalidad). Finalmente, los 'stocks' están representados por cajas y la principal salida de este modelo, la población total, está simbolizada por un círculo. Fuente: elaboración propia.



## 5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO POBLACIONAL

El modelo tiene como objetivo principal explicar la evolución de la población mundial desde 1995 con proyección hasta el año 2100 para los escenarios antes mencionados. Para ello, se utiliza un total de 81 cohortes de edad que comprenden de 0 a 79 años e igual o mayores de 80 como una única cohorte. Además, el modelo refleja una diferenciación entre el sexo masculino y el femenino.

La principal característica de este modelo consiste en representar las cohortes de edad de un año y de forma matricial, es decir, en vez de representar la maduración pasando de un 'stock' al siguiente, el modelo tiene un único 'stock' de población y la estratificación por edad es un vector introducido dentro del modelo.

De forma general, esta simulación tiene dos comportamientos en el tiempo. Por un lado, el generado a partir de los datos históricos comprendido entre 1995 y 2020 y, por el otro, el provocado desde los diferentes escenarios posibles que comienza en 2021 y finaliza en el año 2100. Para analizar el comportamiento de la población de cara al año 2100, MEDEAS establece un total de seis escenarios explicados previamente (BAU, Escenarios 1-4 y uno definido por el usuario).

Por el momento, la simulación de la población representa únicamente los escenarios SSP. Esto lo hace a través de una interfaz que son los escenarios de MEDEAS, los cuales tienen asignado un SSP para cada uno de ellos (ver Tabla 2). Es decir, el usuario escoge, para cada escenario, el SSP base sobre el que se realizará la simulación. Una vez elegido, el programa lee la opción seleccionada y simula dicho SSP. Esto lo hace mediante la variable 'SSPs decision', que tiene influencia en todos los ratios conectados con los datos externos a las SSPs.

Para esta simulación, muchos de los datos recogidos están en formatos de cohortes de cinco años. Por este motivo, se han diseñado dos tipos de 'subscripts' en cohortes de edad de un año y de cinco. Cuando los datos estén recogidos en grupos de cinco años, el programa los toma y los divide entre cinco; de forma proporcional para tener los datos en cohortes de un año. Este proceso se realiza en tres ocasiones a lo largo del modelo: para los datos iniciales de población, para los de muertes históricas y para la esperanza de vida al nacer.

La estructura general del modelo se centra en una variable 'stock' de población, en un flujo de entrada correspondiente a los nacimientos y en otro de salida que simula las muertes, modelando para cada cohorte de edad la

variación de la población de forma matricial, distinguiendo entre el sexo masculino y el femenino.

Todos los datos introducidos en el modelo están proporcionados por la División de Población de las Naciones Unidas, Perspectivas de la Población Mundial 2019 (UN Department of Economics and Social Affairs, 2019).

(<https://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/>)

## BLOQUE CENTRAL DE LA POBLACIÓN

### NACIMIENTOS

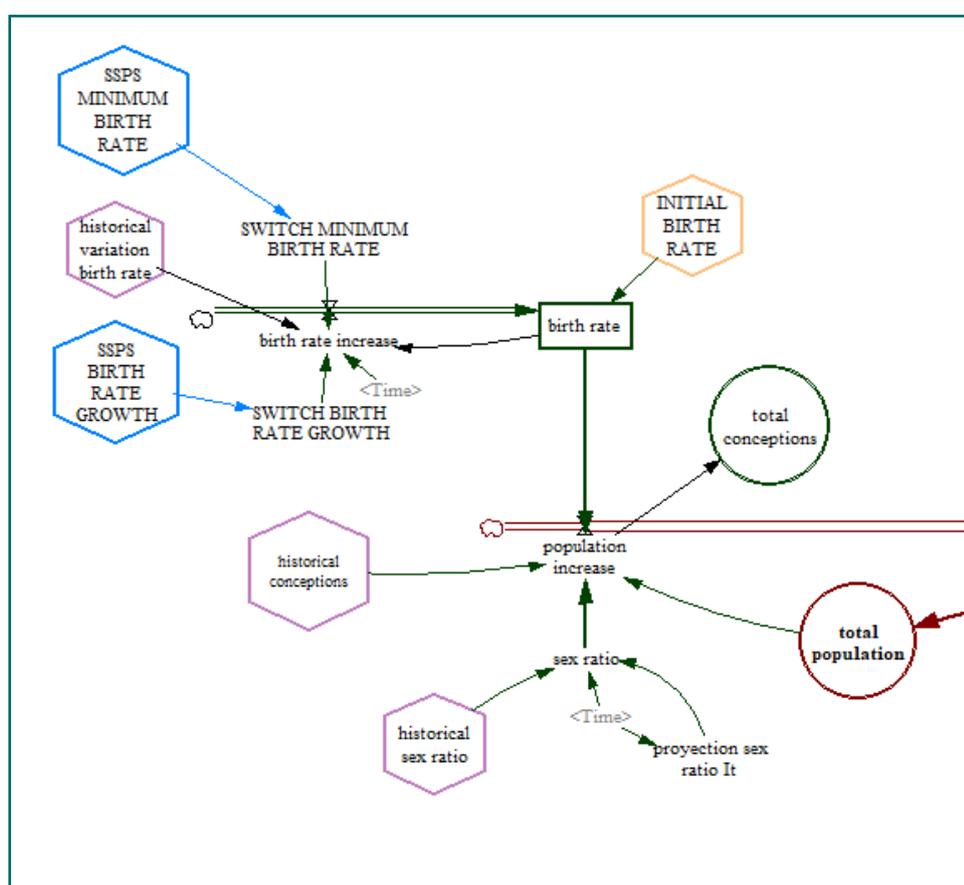


Figura 4. Bloque de nacimientos del modelo poblacional. Fuente: elaboración propia.



## ***Entradas externas***

### *SSPS MINIMUM BIRTH RATE*

Mínimo valor que puede tener la tasa de natalidad de cada uno de los escenarios SSPs. Este valor se ha elegido de forma experimental, adaptándolo para conseguir que los valores de la población total de cada escenario coincidan con los proporcionados por las SSPs.

### *SSPS BIRTH RATE GROWTH*

Velocidad de crecimiento de la tasa de natalidad de cada uno de los escenarios SSP. Este valor se ha elegido de forma experimental, adaptándolo para conseguir que los valores de la población total de cada escenario coincidan con los proporcionados por las SSPs.

### *HISTORICAL VARIATION BIRTH RATE*

Variación histórica del flujo de la tasa de natalidad.

### *INITIAL BIRTH RATE*

Valor inicial de la tasa de natalidad, correspondiente al año 1995.

### *HISTORICAL CONCEPTIONS*

Datos históricos de los nacimientos producidos entre los años 1995 y 2020.

### *HISTORICAL GENDER RATIO*

Valores históricos del ratio de sexo masculino y femenino entre los años 1995 y 2020.

## ***Formulación***

### *Population increase (Nacimientos)*

Representan los nacimientos. En el primer periodo, están modelados directamente por valores históricos. A partir de 2020, su formulación se corresponde a la siguiente ecuación:

$$\text{population increase} = \text{total population} \times \text{birth rate} \times \text{sex ratio}$$

*Ecuación 1*

### *Birth Rate (Tasa de Natalidad)*

Esta variable es un 'stock' cuyo valor inicial es el histórico de 1995 y tiene un flujo de entrada formulado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{birth rate increase} = \\ \text{birth rate} \times \text{SWITCH BIRTH RATE GROWTH} \times (\text{birth rate} - \\ \text{SWITCH MINIMUM BIRTH RATE}) \end{aligned}$$

*Ecuación 2*

Tanto la variable 'Min Birth Rate', como 'Birth Rate Growth' dependen del escenario SSPs escogido. El objeto general de esta formulación es poder representar la evolución de la tasa de natalidad para cada uno de los seis escenarios que recoge MEDEAS.

### *Sex ratio (Ratio de sexo):*

Esta variable indica el sexo masculino o femenino que tomarán los nuevos nacimientos. Para ello, hasta el año 2020, se toman los valores históricos y, a partir de dicho año, se realiza una proyección de los ratios esperados.

$$\text{Sex Ratio}[Female] = \frac{1}{1 + \text{GenderRatio}}$$

*Ecuación 3*

$$\text{Sex Ratio}[Male] = \frac{\text{GenderRatio}}{1 + \text{GenderRatio}}$$

*Ecuación 4*

En resumen, las concepciones están construidas con datos históricos hasta el año 2020 y, a partir de ahí, se modelan en función de la población total, la tasa de natalidad y la de sexos.

Uno de los problemas ocasionados durante el desarrollo del modelo fue conseguir adaptar los datos históricos a las proyecciones de los escenarios sin que se produjese un salto cuantitativamente elevado. En el caso de los nacimientos, hasta 2020, estos eran independientes del tamaño de la población que había en cada periodo de tiempo, por lo que al integrarlo, en un principio, el salto era considerablemente grande. La solución que resolvió este conflicto fue hacer que las mortalidades también dependiesen hasta 2020 de valores históricos, cosa que, en un principio, no se había modelado así. Este nuevo enfoque equilibró el modelo disminuyendo el salto producido entre los datos históricos y las proyecciones.



## MUERTES

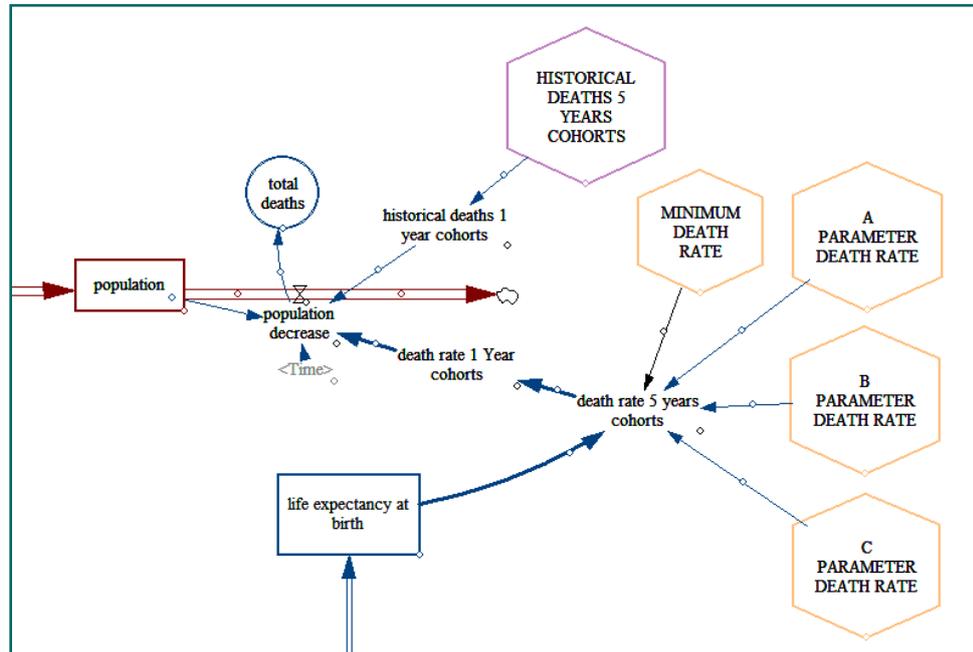


Figura 5. Bloque de mortalidad del modelo poblacional. Esta figura muestra los ratios de mortalidad y su generación a partir de los parámetros a, b y c y la esperanza de vida al nacer. Fuente: elaboración propia.

### Entradas externas

#### SSPS MAXIMUN LIFE EXPECTANCY AT BIRTH

Valores en función de los SSPs, que indican la máxima esperanza de vida al nacer. Este valor se ha elegido de forma experimental, adaptándolo para conseguir que los valores de la población total de cada escenario coincidan con los proporcionados por las SSPs.

#### SSPS LIFE EXPECTANCY GROWTH

Indica el crecimiento de la esperanza de vida al nacer. Este valor se ha elegido de forma experimental, adaptándolo para conseguir que los valores de la población total de cada escenario coincidan con los proporcionados por las SSPs.

#### HISTORICAL LIFE EXPECTANCY AT BIRTH

Valores históricos de la esperanza de vida al nacer hasta 2020.



### *INITIAL EXPECTANCY AT BIRTH*

Esperanza de vida al nacer en el año 1995. Es el valor inicial del 'stock' Life Expectancy at Birth.

### *A/B/C PARAMETER DEATH RATE*

Constantes de la ecuación polinómica del ratio de mortalidad en función del sexo y la cohorte de edad de cinco en cinco.

### *HISTORICAL DEATHS*

Valores históricos de muertes entre 1995 y 2020.

## **Formulación**

### *Population decrease (Muertes):*

Hasta 2020, las muertes están representadas por valores históricos. Después, son el producto del ratio de mortalidad por la población. Las muertes están en función de la cohorte de edad y el sexo correspondiente.

$$\text{population decrease} = \text{population} \times \text{death rate}$$

*Ecuación 5*

### *Death rate (Ratio de mortalidad)*

El ratio de mortalidad está generado por una ecuación polinómica de segundo grado con tres parámetros (a, b y c) y la esperanza de vida al nacer. Experimentalmente se ha demostrado que existe una relación entre la esperanza de vida al nacer y el ratio de mortalidad. Por este motivo, en un proceso previo, se calcularon los parámetros a, b y c en función de los datos históricos que relacionaban ambas variables. Una vez obtenidos los parámetros, la tasa de mortalidad a partir de 2020 se genera en base a la ecuación polinómica previamente explicada:

$$\begin{aligned} \text{death rate} = & A \text{ PARAMETER DEATH RATE} \times (\text{life expectancy at birth})^2 \\ & + B \text{ PARAMETER DEATH RATE} \times \text{life expectancy at birth} \\ & + C \text{ PARAMETER DEATH RATE} \end{aligned}$$

*Ecuación 6*

Con objeto de evitar que la ecuación polinómica pueda dar lugar a ratios negativos, se introdujo en el modelo la variable 'min death rate'. Esta variable se corresponde con el mínimo valor de los ratios históricos, en función de la cohorte y del sexo y, en el caso de que la ecuación polinómica



resulte negativa, el modelo considera dicha variable en lugar de la resultante de la ecuación.

*Life expectancy at birth (Esperanza de vida al nacer):*

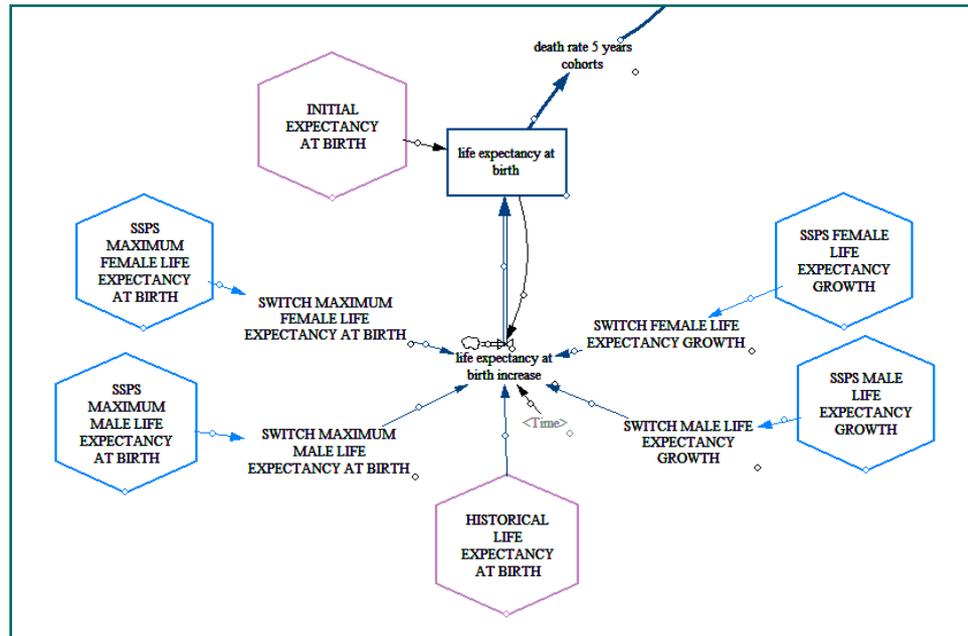


Figura 6. Bloque de mortalidad del modelo poblacional. La figura muestra las variables y el proceso seguido para calcular la esperanza de vida al nacer, a partir de las variables de los escenarios SSPs. Fuente: elaboración propia.

La esperanza de vida al nacer hasta 2020 está basada en datos históricos. Sin embargo, a partir de esa fecha, como ocurría con el ratio de nacimientos, está en función de los seis escenarios; de los cuales, el usuario selecciona el SSP que desea utilizar.

Esta variable es un 'stock' alimentado por un flujo de entrada que, a su vez, se realimenta del 'stock'. El flujo modela la evolución de la esperanza de vida al nacer, utilizando dos variables que dependen de los SSPs. Por un lado, el flujo está limitado por un valor máximo que depende de cada escenario (Max Life Expectancy at Birth). Por el otro, la variable que determina la velocidad de crecimiento (Life Expectancy Growth) también depende del SSP en el que se modela:

$$\text{Life expectancy at birth flow} = \text{life expectancy at birth} \times \text{SWITCH FEMALE LIFE EXPECTANCY GROWTH} \times (\text{SWITCH MAXIMUM FEMALE LIFE EXPECTANCY AT BIRTH} - \text{life expectancy at birth}) / (\text{SWITCH MAXIMUM FEMALE LIFE EXPECTANCY AT BIRTH})$$

Ecuación 7

## 5.2. SALIDAS DEL MODELO

En este apartado se expone de forma gráfica los resultados obtenidos tras realizar la simulación. Para poder comparar unos con otros, en un primer lugar, se explican las principales variables de forma conjunta para todos los escenarios. Por último, se analiza el desarrollo de la variable población para algunas de las cohortes de edad dentro de cada escenario.

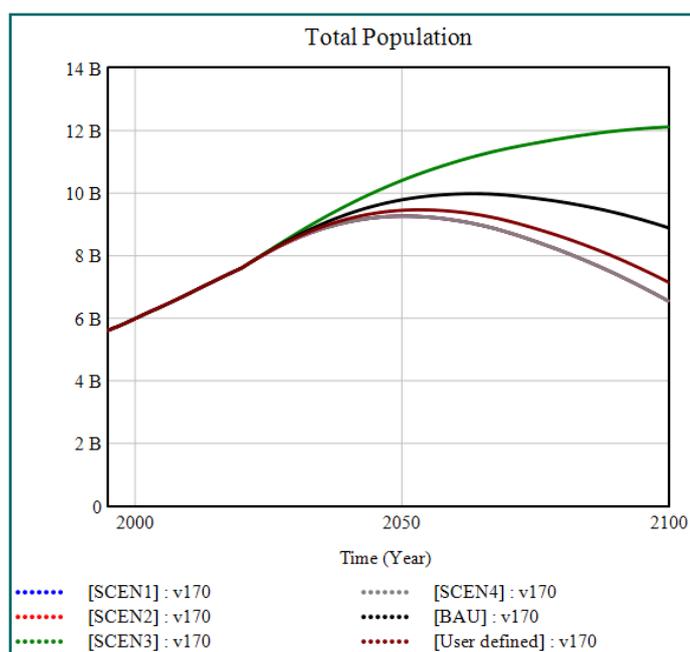


Figura 7. Población total para los seis escenarios definidos por MEDEAS. La evolución temporal comprende el periodo entre los años 1995 y 2100. Fuente: elaboración propia.

Los escenarios 1 y 2 (ver Figura 7) están parametrizados en base al escenario base SSP1, por lo que la representación gráfica de ambos es la misma, por el momento, en todas las variables. Estos escenarios representan el camino más ecológico, dicho de otra manera, supone que los desafíos de mitigación y de adaptación son bajos. Por lo tanto, ambos escenarios, presentan una proyección de bajo crecimiento demográfico, alcanzando el pico alrededor del año 2050 con un total de 9 billones de habitantes y siguiendo con una caída pronunciada hasta los 6,5 billones en el año 2100. Las hipótesis que se establecen para conseguir estos resultados presuponen que las regiones reforman sus mercados haciéndolos más sostenibles y alcanzando un optimismo económico. El crecimiento económico es rápido lo que implica que la evolución demográfica sea más lenta.

Como se muestra en la Figura 7, y como ya se había estimado con anterioridad, el escenario 3 presenta un elevado crecimiento de la población alcanzando los 12 billones de habitantes en el año 2100. Este incremento, tal como presentaba su escenario base, el SSP3, hace que los desafíos de



adaptación y mitigación sean muy elevados. Los hechos que permiten que la demografía pueda alcanzar tal aumento poblacional se caracterizan por la búsqueda de la autarquía y la soberanía nacional. Este es el camino menos ecológico; ya que las regiones dan primacía a su desarrollo de mercado y dejan en segundo plano, la búsqueda de medidas que ayuden a la mitigación y adaptación.

En lo respectivo al escenario 4, por el momento, al igual que el 1 y 2, se ha seleccionado el SSP1 y esto no es correcto; ya que el crecimiento esperado de este escenario es mucho menor, pero al carecer de una opción alternativa, temporalmente se mantiene como escenario base el SSP1 dado que es el de menor crecimiento demográfico (ver Figura 7).

El escenario BAU, según el SSP2, presenta un crecimiento demográfico intermedio. La intención del mismo es que su desarrollo sea una consecución de las tendencias históricas. En la Figura 7 se muestra cómo este escenario presenta una continuidad demográfica hasta alcanzar su máximo valor entre los años 2060-2070, a partir de los cuales sufre una pequeña caída hasta alcanzar la suma de 9 millones de habitantes de cara al año 2100.

Para representar el 'User Defined' se ha escogido el escenario SSP5 con el fin de mostrar la evolución de un SSPs diferente. Este escenario considera un enfoque con elevados desafíos de mitigación y bajos de adaptación; lo que implica uno de los crecimientos demográficos más bajos. La población alcanzará su pico en los 9 millones, en 2060, donde comienza a caer rápidamente hasta alcanzar los 7 billones de habitantes en el año 2100.

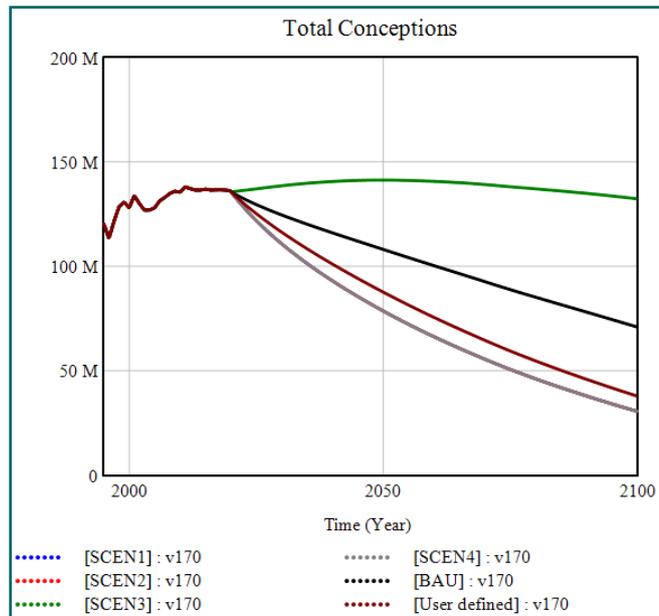


Figura 8. Evolución temporal del número de nacimientos anuales desde el año 1995 hasta 2100 para cada uno de los seis escenarios definidos en MEDEAS. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 8 se observa el número de nacimientos anuales entre los años 1995 y 2100 para cada uno de los escenarios. Hasta 2020, todos ellos siguen la misma distribución ya que parten de datos históricos. Desde dicho punto, se puede observar cómo el número de nacimientos aumenta únicamente para el escenario 3, valor esperado puesto que es el de mayor aumento demográfico. Por otro lado, el número de nacimientos en BAU sigue con bastante fidelidad las tendencias históricas; aunque la natalidad cae por debajo de los 100 millones anuales. Por último, tanto los escenarios 1, 2 y 4 como el 'User Defined' presentan una caída precipitada desde los 140 millones de nacimientos iniciales hasta alrededor de los 40 millones en el año 2100.

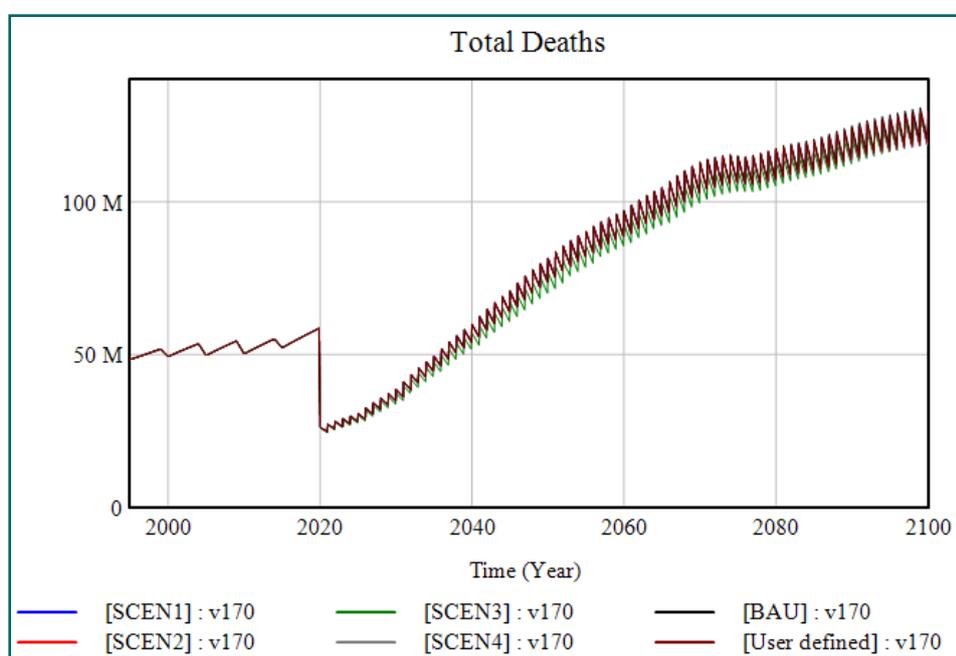


Figura 9. Evolución temporal del número de fallecimientos anuales desde el año 1995 hasta 2100 para cada uno de los seis escenarios definidos en MEDEAS. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 9, se ve la evolución temporal del número de muertes para cada escenario. Aparentemente, no hay gran diferencia entre unos escenarios y otros. El aspecto exponencial del número de fallecimientos se debe a una de las principales debilidades del modelo. El número de habitantes de cada cohorte de la variable población pasa, cada año, al siguiente eslabón; de esta forma, al llegar al último, al de 80 o más años, se acumulan varias generaciones. El problema se debe a que la tasa de mortalidad se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el periodo de la simulación y a que, cada año, la población perteneciente a la penúltima cohorte de edad (c79) pasa a formar parte del último eslabón de la cadena en el que los individuos, que ya pertenecían a dicho subgrupo, siguen



acumulados en el mismo eslabón. Por lo tanto, el número de personas que pertenece a la última cohorte crece rápidamente a lo largo del tiempo y, a pesar de que la mortalidad también es alta, por ser directamente proporcional al número de individuos del subgrupo, no consigue estabilizar la variable; ya que los individuos que llegan y se acumulan son muy superiores al de los fallecidos. Como consecuencia directa de este aumento, cada año, el número de fallecidos también será mayor, alterando los resultados de la simulación y ocasionando un número de defunciones que llega a triplicar el valor de referencia del año 2020.

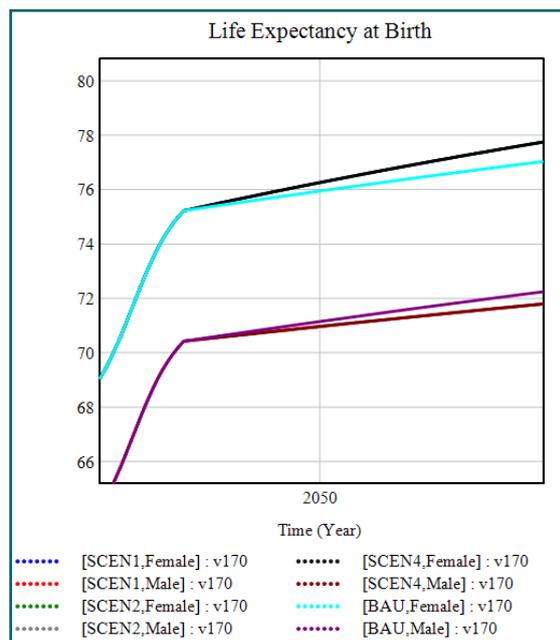


Figura 10. Evolución temporal de la esperanza de vida al nacer en función del sexo, masculino o femenino, y de los seis escenarios de MEDEAS. Fuente: elaboración propia.

La Figura 10 muestra la esperanza de vida al nacer en función del sexo y del escenario escogido. Durante todo el periodo, la esperanza de vida al nacer es mayor en las mujeres que en los varones para todos los escenarios.

Para explicar mejor la evolución poblacional por cohortes, Figura 11 y Figura 12 muestran dicho progreso para las cohortes de 1, 20, 40, 60, 70 y 79 años. De forma general, y común para las tres, en todas las gráficas se puede observar cierto retraso en el comportamiento a medida que los tramos de edad son mayores, esto se debe al paso de un eslabón al siguiente; lo que significa, que el cambio de tendencia demográfica perteneciente a los 79 años se empezará a observar a partir del año 2079. Otro de los aspectos a tener en cuenta es que las gráficas solamente representan el sexo femenino; ya que el comportamiento para ambos sexos es similar por lo que se ha seleccionado tan solo un sexo para facilitar el análisis de las cohortes.

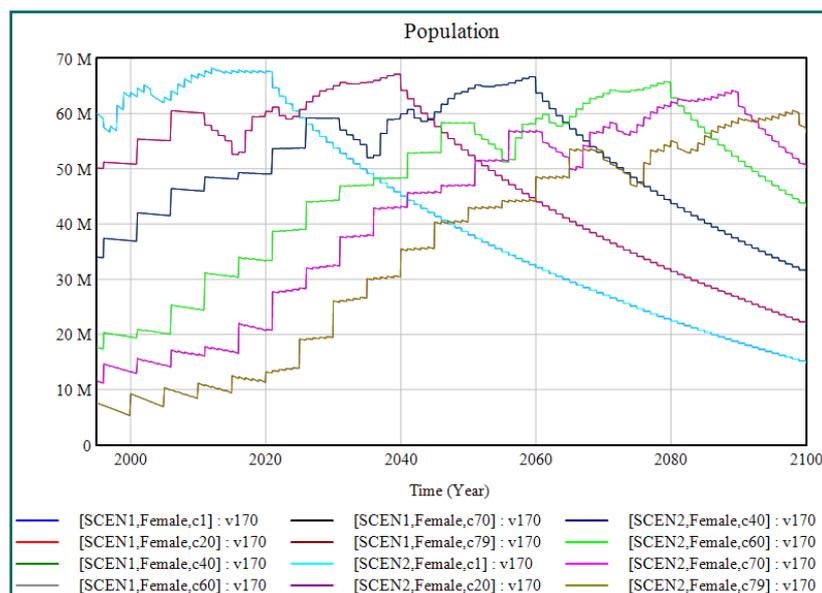


Figura 11. Evolución temporal de 1995 a 2100 por cohortes de edad de 1,20, 30, 40, 60, 70 y 79 años para el sexo femenino de los escenarios 1 y 2. Fuente: elaboración propia.

Para los escenarios 1 y 2 (ver Figura 11) en el momento en que la simulación comienza a ejecutarse a partir de los valores de los SSPs, los valores de cada cohorte bajan de forma pronunciada, tal y como cabe esperar, en base a las hipótesis de estos escenarios que se han mencionado con anterioridad. Unas de las observaciones más interesantes de este escenario es que muestra la proyección poblacional hacia el envejecimiento demográfico, al ser el número de nacimientos cada vez menor, este escenario presenta de cara al 2100 una demografía muy envejecida; de tal forma que se llega a invertir con respecto a los datos históricos, donde había mayor volumen de jóvenes.

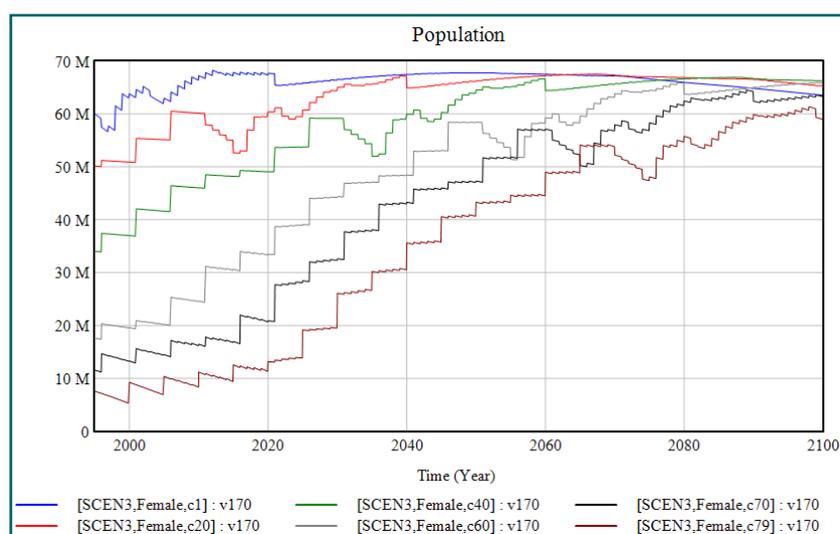


Figura 12. Evolución temporal de 1995 a 2100 por cohortes de edad de 1,20, 30, 40, 60, 70 y 79 años para el sexo femenino del escenario 3. Fuente: elaboración propia.



La Figura 12 pertenece a la evolución por cohortes del escenario 3. A partir del momento que la proyección de cada tramo de edad comienza a mostrar su tendencia, se observa que mientras para las cohortes más pequeñas, el crecimiento permanece dentro de un mismo intervalo (60 y 70 millones de habitantes); para las de mayor edad, el incremento es cada vez mayor, según se acerca a la última cohorte.

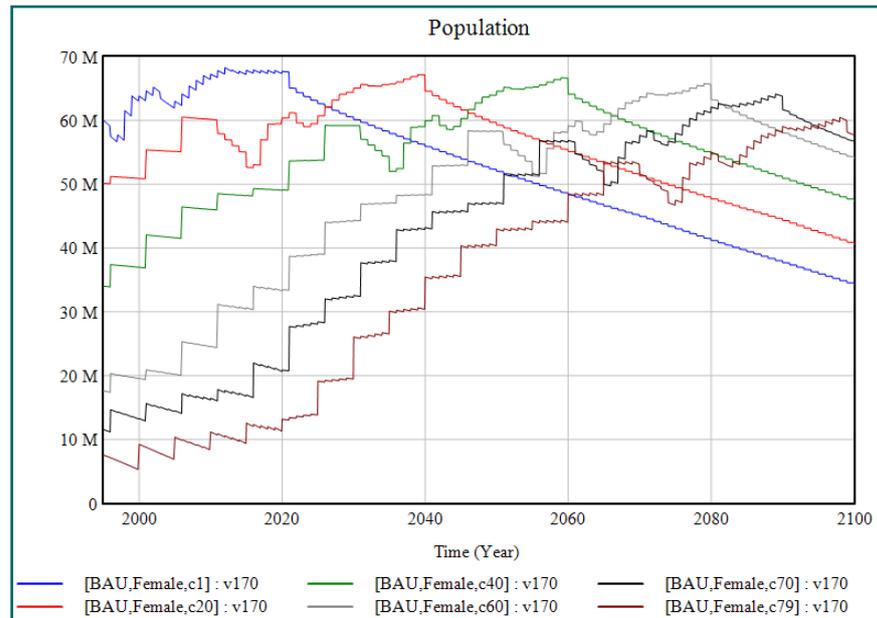


Figura 13. Evolución temporal de 1995 a 2100 por cohortes de edad de 1, 20, 30, 40, 60, 70 y 79 años para el sexo femenino del escenario BAU. Fuente: elaboración propia.

En el escenario BAU (ver Figura 13), conforme la simulación se genera en base a las proyecciones establecidas por el BAU, el tamaño de la población dentro de cada cohorte disminuye, consiguiendo, al igual que ocurría en los escenarios 1 y 2, una población más envejecida respecto al punto de partida.

### 5.3. CASO DE ESTUDIO: PANDEMIA COVID-19

#### DESCRIPCIÓN DEL NUEVO MODELO

Como se explica en apartados anteriores, la sociedad experimenta cada vez mayor número de nuevas enfermedades infecciosas de carácter vírico o bacteriológico. Estas patologías han causado un gran número de muertes en tan solo dos décadas de siglo, entre ellas, se encuentra la COVID-19 que, por el momento, se ha llevado más de 450.000 vidas en menos de seis meses.

Para poder ejemplificar la utilidad del modelo poblacional explicado en el apartado anterior, se ha elegido la pandemia originada por la COVID-19 como objeto de estudio. El propósito de este apartado es el de evaluar el



impacto demográfico que provoca la propagación del SARS-CoV-2. En este modelado, se van a evaluar las consecuencias sobre los fallecimientos en la población global en función de las cohortes de edad y de ambos sexos; ya que, a pesar de que aún a día de hoy, no se sabe con exactitud cuál es la tasa de letalidad del virus, sin embargo, son conocidos los grupos de riesgo que tienen más probabilidades de ser víctimas del virus como son las personas con insuficiencias respiratorias, enfermedades cardiovasculares, grupos de edad etc. No obstante, este modelo se centra únicamente en la edad y el sexo de las cohortes; ya que hay evidencias de que la tasa de mortalidad aumenta de forma muy pronunciada con la edad y, por otro lado, esta es mayor en los hombres que en las mujeres.

Para realizar el estudio, se han buscado los datos a nivel mundial con la información conocida del año 2020 y se han ampliado conforme a esos valores para cinco años más con la finalidad de poder captar crecimientos y descensos en la mortalidad, considerando que aparecen nuevos brotes más fuertes y otros más débiles de forma aleatoria. Además, el efecto que tendrá sobre cada cohorte influye de forma aleatoria, en función de sus valores de 2020, por lo que el modelo representa cómo afectará a cada grupo de edad por separado, siendo posible representar que una de las mutaciones del virus afecte en mayor magnitud a los jóvenes, que hasta el momento, no son un grupo de alto riesgo. Hay que tener en cuenta que el modelo no considera la aparición e implementación de una vacuna, solamente hace referencia a la evolución de los próximos cinco años con nuevos brotes, en función de los valores conocidos en la actualidad.

Todos los datos reales utilizados se han extraído de la Actualización nº 138. Enfermedad por el coronavirus (COVID-19). 16.06.2020 realizado por el Centro de Coordinación de Alertas y Emergencias Sanitarias del Ministerio de Sanidad del Gobierno de España.

([https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov-China/documentos/Actualizacion\\_138\\_COVID-19.pdf](https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov-China/documentos/Actualizacion_138_COVID-19.pdf))

Para realizar el estudio se introducen las siguientes variables:

*INFECTED BY COVID-19 RATE (tasa de infección COVID-19)*

Esta tasa, es el número de infectados conocidos a nivel mundial entre la población mundial para 2020. A partir de ese año, la tasa es un valor aleatorio que aumentará o disminuirá en un rango de  $\pm 100\%$  respecto de su valor inicial de 2020.



### *COVID19 infected (infectados por COVID-19)*

Número de personas infectadas por COVID-19 en cada año. Es el producto de la tasa de infección por COVID-19 y la población total.

### *LETHALITY RATE FROM COVID-19 (ratio de letalidad por COVID-19)*

Número de personas fallecidas entre el número de la población total para el año 2020. A partir de ese año, la tasa es un valor aleatorio que aumentará o disminuirá en un rango de  $\pm 100\%$  respecto de su valor inicial de 2020.

### *COVID19 deaths (fallecidos por COVID-19)*

Es el producto del número de infectados y la tasa de letalidad.

### *LETHALITY COVID-19 COHORTS (tasa de letalidad de la COVID-19 por cohortes de edad)*

Es la distribución de las muertes dentro de cada grupo de edad de forma porcentual, es decir, las tasas suman 1. Los valores del año 2020 de la distribución en grupos de edad están extrapolados de la distribución de muertes en España, según los datos del Ministerio del Interior. A partir de ese año, la tasa es un valor aleatorio que aumentará o disminuirá en un rango de  $\pm 50\%$  respecto de su valor inicial de 2020.

### *LETHALITY COVID19 1 YEAR COHORTS*

Esta variable recoge la letalidad por cohortes de edad de un año.

### *COVID19 deaths cohorts distribution (distribución de las muertes por COVID-19 por cohortes de edad)*

Producto de las muertes por COVID-19 y la distribución de las muertes por cohortes. Es el número total de defunciones dentro de cada cohorte y sexo, masculino o femenino.

En cuanto al resto del modelo, la única variable que se modifica es 'population decrease', a la que se le suman las muertes por cohortes causadas por el coronavirus. Por lo tanto, si realizamos la simulación como en el apartado anterior, entre 1995 y 2100, está sufriendo una pequeña variación entre 2020-2025 donde se producen varios brotes de la pandemia causada por la COVID-19.

Para evaluar los resultados obtenidos tras introducir las nuevas variables en el modelo, los mismos se dividirán en dos casos de estudio.



Debido a que este modelo consta de un total de seis escenarios y ya que los impactos de la pandemia no alteran la conducta demográfica a largo plazo, los escenarios definidos en el apartado anterior se han utilizado para representar distintas proyecciones de la COVID-19, que se producirá entre los años 2020 y 2025. Para que la comparación entre escenarios, sea lo más significativa posible, todas las proyecciones se realizan utilizando el SSP2 de base. En la Tabla 4 se ven las características que toma cada escenario, siendo los parámetros de diferenciación entre unos y otros, la tasa de contagio que puede ser la actual con los datos recogidos, un 10% para representar un caso mayor de contagios o 0 en el caso del escenario 3 que representa el patrón del escenario SSP2 proporcionando una visión de que no hay coronavirus. Los otros dos parámetros se explican de forma conjunta. Por una parte, podemos partir de la situación real de ahora con la tasa de mortalidad actual y con un reparto entre las distintas cohortes extrapolado de los datos de España y, por el otro lado, se ejemplifica la situación de que a todas las cohortes les afecta en gran proporción la enfermedad, por lo tanto, la tasa de mortalidad es mucho mayor; ya que está generada con los datos del tramo de edad de mayores de 80 años. Estos parámetros, son el punto de partida de los cinco escenarios utilizados. En otras palabras, a partir del 2021, sea cual sea la situación de partida, el crecimiento de la mortalidad por estratos de edad se genera de forma aleatoria partiendo de estos valores iniciales, como se ha explicado en el desarrollo de cada una de las variables.



	SSP	Tasa de contagio	Tasa de mortalidad	Distribución de la mortalidad entre Cohortes
BAU	2	Datos Reales (junio 2020)	Datos Reales (junio 2020)	Datos extrapolados del reparto en España
SCEN 1	2	10%	Datos Reales (junio 2020)	Datos extrapolados del reparto en España
SCEN 2	2	10%	Resultante de que todas las cohortes tengan la misma mortalidad que los mayores de 80	Reparto igualitario
SCEN 3	2	0%	0%	No hay reparto porque no hay COVID-19
SCEN 4	2	Datos Reales (junio 2020)	Datos Reales (junio 2020)	Datos extrapolados del reparto en España
User defined	2	Datos Reales (junio 2020)	Resultante de que todas las cohortes tengan la misma mortalidad que los mayores de 80	Reparto igualitario

Tabla 4. Características de los escenarios para la evaluación de la pandemia. Fuente: elaboración propia.

## CASO 1: COVID-19, EN LA REALIDAD DE 2020

Time (Year)	2020	2021	2022	2023	2024	2025
INFECTED BY COVID-19 RATE[BAU]	0,001	0,0017	0,0008	0,0012	0,0004	0,0016
INFECTED BY COVID-19 RATE[SCEN4]	0,001	0,0013	0,0006	0,0008	1E-05	0,0015

Tabla 5. Variación temporal de los ratios de infección para los escenarios BAU y SCEN 4. Fuente: elaboración propia.

En este primer caso, se analizan los resultados obtenidos de forma más precisa, valorando la diferencia de la mortalidad entre los diferentes cohortes y sexos.

Para este primer caso de estudio, se analizan los resultados obtenidos con mayor detenimiento. El objetivo es entender la situación actual y poder valorar cómo afectaría a la población si la pandemia durase cinco años intercalando brotes más fuertes y otros más débiles. Debido a que, como ya

se ha explicado, los datos entre 2021 y 2025 se generan de forma aleatoria, aumentando o disminuyendo el valor de partida, con objeto de que las conclusiones y observaciones de las gráficas sean lo más precisas posibles, se utilizan dos escenarios con la misma configuración: BAU y el escenario 4 (ver Tabla 4).

En primer lugar, la simulación da evidencias de que, efectivamente, el número de víctimas por COVID-19 aumenta con el envejecimiento demográfico (ver Figura 14 y Figura 15). Además, a medida que la tasa de contagio es mayor, como ocurre en el escenario BAU en el año 2021, la distancia entre el número de fallecimientos por cohorte se dispara, habiendo unas diferencias entre los más jóvenes y ancianos de hasta más de 5.000 fallecidos en este segundo caso. Por otro lado, se puede ver que en el año 2024, la tasa de contagio del escenario BAU es inferior siendo esta de 0,0004 (ver Tabla 5. Variación temporal de los ratios de infección para los escenarios BAU y SCEN 4. Fuente: elaboración propia.); lo que se traduce en que el número de fallecidos es más cercano entre jóvenes y ancianos. En el caso de los resultados para el escenario 4, se confirman las suposiciones explicadas; dado que, en este escenario, se encuentra una situación más drástica de que los brotes fuertes se producen cada dos años causando más daño a la población más envejecida (ver Figura 14).

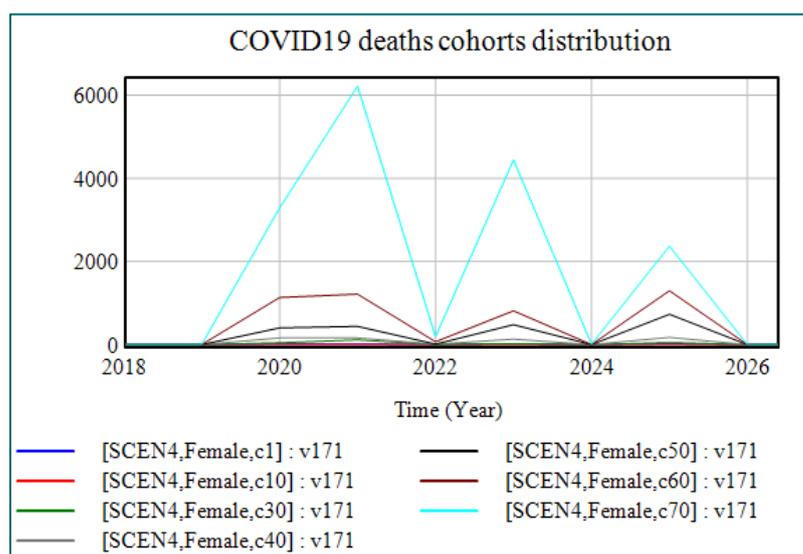


Figura 14. Distribución de la mortalidad femenina por cohortes causados por COVID-19 para el escenario SCEN 4. Fuente: elaboración propia

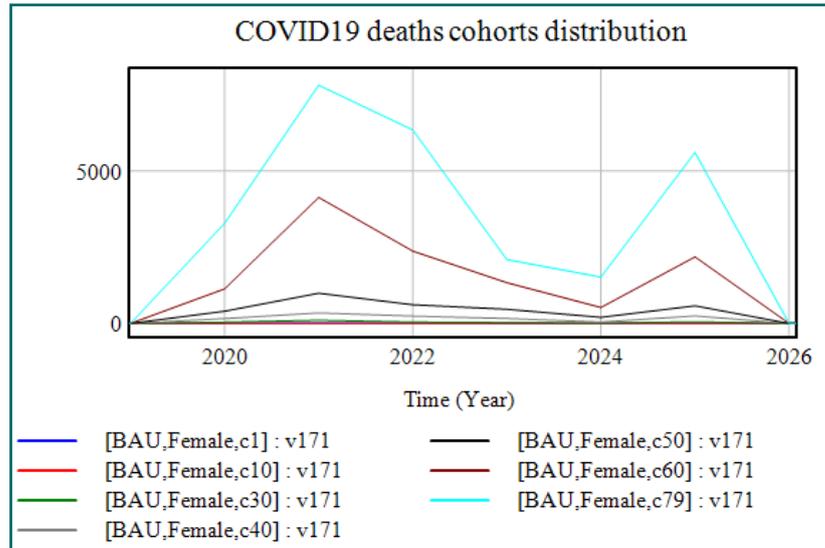
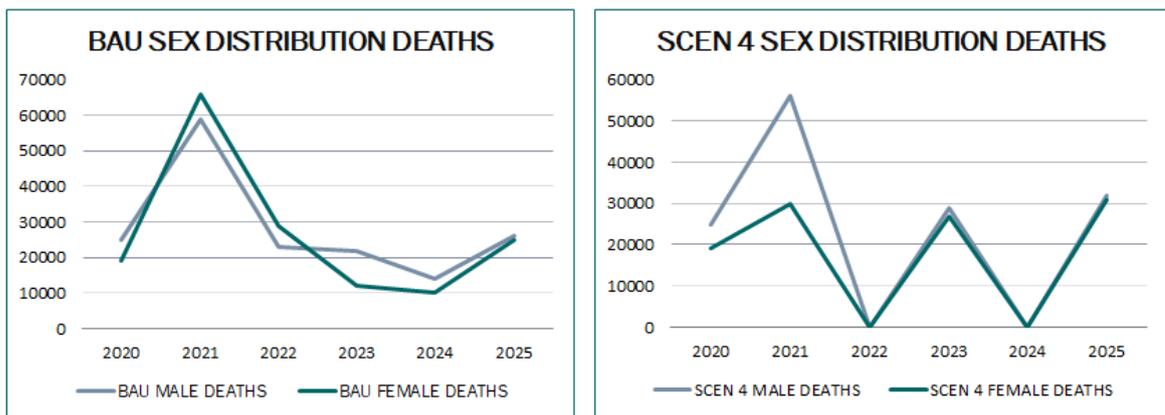


Figura 15. Distribución de la mortalidad femenina por cohortes causados por COVID-19 para el escenario BAU. Fuente: elaboración propia



Figuras 16 y 17. Distribución de la mortalidad por sexo causada por COVID-19 para los escenarios BAU y SCEN 4. Fuente: elaboración propia.

Tras realizar varios experimentos, se ha podido comprobar que, en la mayor parte de los casos, el número de muertes de hombres por COVID-19 es superior al de las mujeres. No obstante, en las Figuras 16 y 17 se observa que no siempre se comporta de este modo, habiendo en ocasiones mayor número de mujeres víctimas del virus como ocurre en el año 2021 en el escenario BAU.

Por último, sería interesante observar si una pandemia como la que se está viviendo actualmente tiene suficiente fuerza como para condicionar la evolución demográfica. Durante este último año, la pandemia ha causado alrededor de 450.000 muertes en todo el mundo un gran número de fallecimientos por encima del habitual. Y, sin embargo el número no es suficientemente alto como para condicionar la evolución; ya que lo que se ha experimentado en los últimos años es que cada doce meses se produzcan

alrededor de 60 millones de fallecimientos, por lo tanto, pese a que las cifras sean altas, no tienen la capacidad de ejercer un cambio sobre la evolución demográfica.

## CASO 2: COVID-19 CON VARIACIONES EN LA TASA DE CONTAGIO Y DE MORTALIDAD

En este segundo caso, se evalúa que hubiera pasado, si la tasa de letalidad fuese similar para todas las cohortes de edad, es decir, en la situación de que la tasa fuese la de los grupos de riesgo, en este caso, la mortalidad para mayores de 80 en España, siendo el porcentaje de contagiados el mismo.

El escenario 'User defined' parte de la suposición de cómo sería la situación si todos las cohortes tuvieran una tasa de mortalidad similar siendo el número de contagios el mismo que en el caso real.

La primera observación es que la diferencia entre el número de fallecidos entre unas edades y otras no depende de la tasa, sino del número de personas que pertenecen a cada cohorte (ver Figura 18). Este nuevo reparto afectará en mayor medida a los grupos con mayor número de habitantes.

Por otro lado, ya que estos valores son únicamente suposiciones, no tiene sentido en este caso valorar la diferencia entre cómo afecta a cada uno de los sexos de la población; puesto que el resultado de realizar estas gráficas sería totalmente circunstancial.

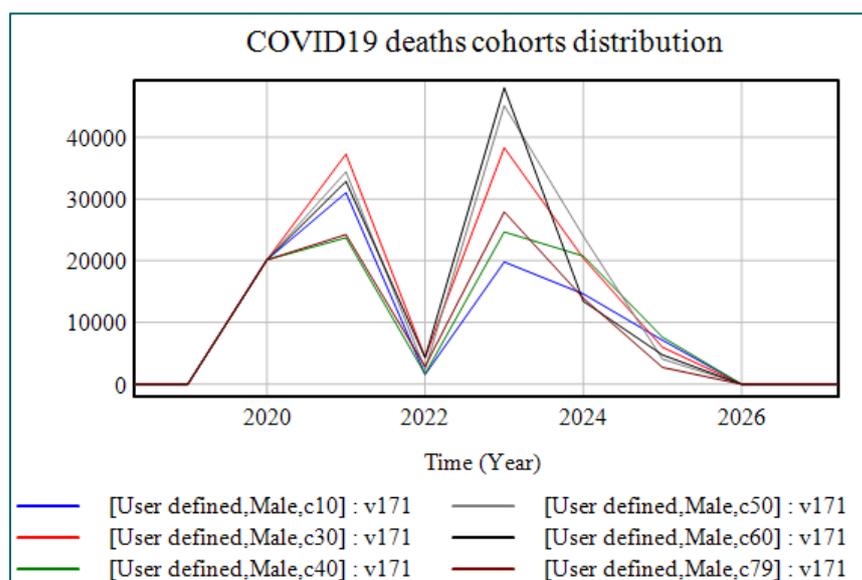


Figura 18. Distribución de las muertes por cohortes de edad causadas por la COVID-19 para el escenario 'User defined'. Fuente: elaboración propia.



Uno de los puntos más interesantes es comparar en cuánto aumentarían las muertes, si toda la población se considerase como grupo de riesgo. En la Figura 19 se comparan ambos escenarios y se observa como el número de fallecidos puede pasar de estar cerca del millón en el peor de los casos para el escenario actual (BAU) a cuadruplicar su número en el caso de que la mortalidad afectase a toda la población por igual.

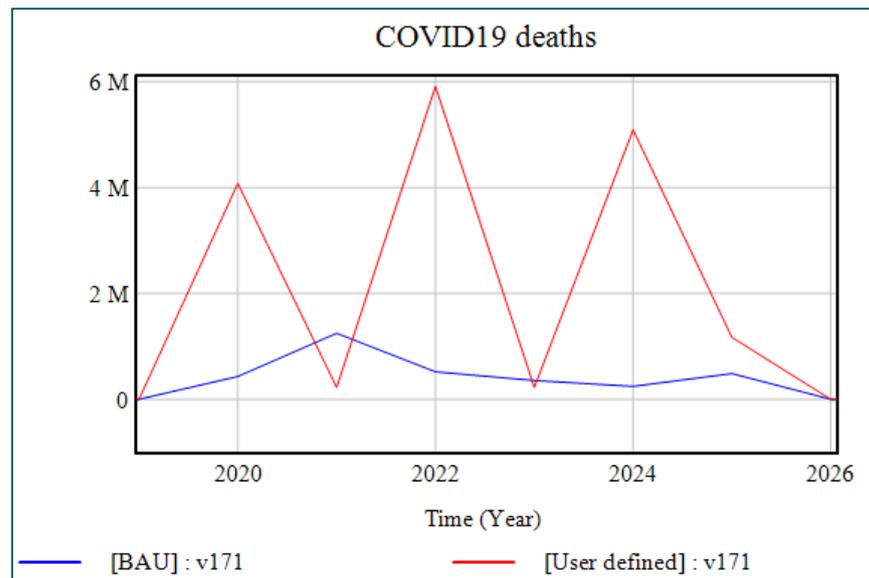


Figura 19. Distribución de las muertes por COVID-19 para los escenarios BAU y 'User defined'. Fuente: elaboración propia.

Por último, se comparan cómo afecta a la evolución demográfica cada uno de los escenarios explicados al comienzo de este apartado. Para saber si los mismos sufren cambios en cuanto al aumento de la población, se comparan respecto del escenario 3 que simula la situación de que nunca hubiera habido COVID-19. Como ya se ha explicado en el caso 1, el número de muertes producidas con los datos actuales no tiene impacto sobre la evolución de la población, siendo inapreciable el aumento del número de fallecidos en el periodo entre 2020 y 2025. En el caso del escenario 'User defined' tampoco es apreciable una distinción en la demografía porque este mantiene el número de infectados igual que en la situación real y actual. Los cambios se producen cuando se aumenta la tasa de contagio a un 10% de la población global tal y como ocurre en los escenarios 1 y 2. Esto resulta lógico puesto que, a mayor número de infectados, la mortalidad es mayor independientemente de la tasa. Además, en el escenario 2 al ser la mortalidad la de los grupos de riesgo, es decir, alta y coincidir con una gran transmisión del virus, aumentaría notablemente el número de muertes. En estos dos últimos casos, sí que se ve una diferencia en la evolución de la población. Por un lado, en el escenario 2, pese a que las muertes ejercen un fuerte impacto durante el periodo que dura la pandemia, se puede observar

cómo, finalmente, la población se recupera y converge con el escenario de partida. Sin embargo, en el escenario que explica la peor situación posible, se puede observar como la población no termina de recuperarse del número de pérdidas ocasionadas durante la epidemia. En otras palabras, el número de fallecidos producidos entre los periodos 2020 y 2025 sigue teniendo secuelas 95 años más tarde.

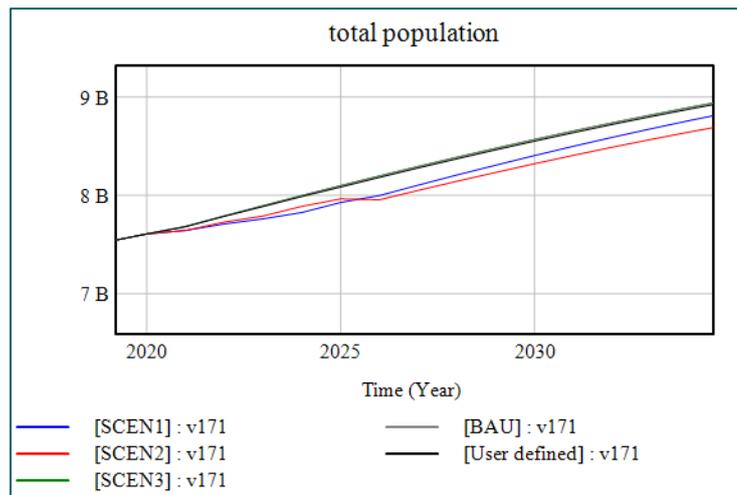


Figura 20. Evolución demográfica entre los años 2019-2040 para todos los escenarios. Fuente: elaboración propia.

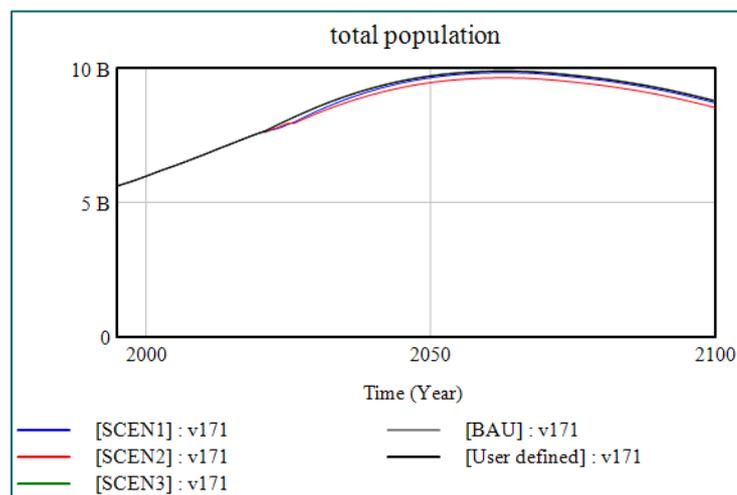


Figura 21. Evolución demográfica entre los años 2019-2100 para todos los escenarios. Fuente: elaboración propia.



## 6. CONCLUSIONES

En este apartado se exponen las conclusiones generadas atendiendo a los objetivos planteados al comienzo del documento.

En primer lugar, en este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado un modelo demográfico que recoge el comportamiento de la población entre 1995 y 2020 y proyecta un total de seis escenarios plasmando un abanico de posibilidades en los que se puede presentar la sociedad de cara al año 2100. Además, el modelo hace una diferenciación en la población dividiéndola en un total de 81 cohortes de edad y diferenciando entre sexo masculino y femenino; de forma que se puedan evaluar los distintos impactos en función de la edad y el sexo de los individuos. Esto tiene especial interés a la hora de valorar los impactos causados por enfermedades ya que permite introducir variables que afecten de distinta manera a cada grupo.

Los resultados en la evaluación del comportamiento de la población se ajustan a los indicadores de los escenarios SSP. No obstante, queda pendiente buscar un mejor ajuste para la cohorte de mayores de 80 años ya que acumula múltiples generaciones aumentando notablemente la incertidumbre sobre el verdadero comportamiento de este grupo de edad.

Por otra parte, se presenta a modo de ejemplo de su uso los impactos que ha tenido la actual pandemia de la COVID-19 sobre la sociedad haciendo distinción por sexo y grupo de edad en la mortalidad. Su evaluación considera posibles rebrotes de mayor o menor intensidad en los próximos cinco años. Además, otro de los casos de estudio permite ver la incidencia que esta puede llegar a tener en el caso de que la tasa de mortalidad fuese igual en toda la población a la de los grupos de riesgo. Los resultados demuestran que el efecto de una pandemia no condiciona la evolución de la población, desde un punto de vista demográfico, a largo plazo.

Por último, este modelo al estar implementado dentro del modelo mundial de MEDEAS participa en su objetivo de ayudar en la búsqueda hacia una transición socioeconómica de baja emisión de carbono, aportando una variable endógena de población -'total population'- y ofreciendo así un paso más a la finalidad del proyecto. Además, este nuevo modelo permitirá utilizar la población de forma desagregada para otros módulos que están siendo programados en el proyecto LOCOMOTION, tales como el de economía, para la parte de empleo y consumo de los hogares, o indicadores sociales.

Sin duda los modelos de dinámica de sistemas podrán ayudar a la sociedad con una intervención en el presente para enfrentarse a los problemas venideros.



## 7. LÍNEAS FUTURAS

Para finalizar, en este apartado se esboza un punto de partida para posibles futuras mejoras en el desarrollo así como sus posibles aplicaciones.

Un primer punto de partida para mejorar el modelo consistiría en buscar una forma de resolver el problema del envejecimiento de las cohortes de edad; ya sea influyendo en ellas desde el principio, o con una mayor precisión en los datos, evitando que dicha cohorte abarque tanto rango de edad. Así mismo, podría realizarse una desagregación regional del modelo, que permitiría simular movimientos migratorios; así como evaluar distintos impactos en función del clima o del poder adquisitivo de cada región, entre otros.

En este análisis, se han expuesto diferentes impactos que pueden provocar el cambio climático y el agotamiento de recursos sobre la sociedad así como sus realimentaciones. El mismo modelo creado en este trabajo y empleado para estudiar cómo se comportaría una pandemia como la de la COVID-19 y cómo afectaría demográficamente a la población puede exportarse para analizar cualquier otro tema de interés social y conocer su evolución por cohortes de edad o sus diferencias en función del sexo. Así podrían analizarse escenarios de futuro que reflejen el aumento de la mortalidad por hambruna causado por el agotamiento de recursos como el petróleo; la contaminación atmosférica y sus consecuencias sobre el aumento de enfermedades respiratorias o la escasez y pérdida de calidad del agua que provoca un incremento en el número de enfermedades gastrointestinales. Todos estos impactos ofrecen una visión de la importancia de las simulaciones sobre la población para predecir daños, anticipar efectos y mostrar posibles soluciones.

La posibilidad de modelar las repercusiones que tienen los eventos extremos, el aumento de algunas enfermedades, comparando los impactos que alcanzaría una pandemia ofrece una visión de la desigualdad en la preocupación que existe en la sociedad entre los estamentos de la Administración y los sectores productivos así como a nivel social. Las consecuencias del cambio climático en estos modelos permiten reflejar cómo afecta a todas las regiones independientemente de su nivel de desarrollo y que cada año ocasiona millones de muertes con unos resultados mucho más dramáticos que las causadas por la última pandemia y a los que se presta mucha menos atención.





## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Air quality in Europe 2019* – European Environment Agency. (n.d.). Retrieved June 24, 2020, from <https://www.eea.europa.eu//publications/air-quality-in-europe-2019>
- ATC-INNOVA. (n.d.). *Prestaciones del software Vensim*. Retrieved July 16, 2020, from <http://atc-innova.com/>
- Berberian, G., & Rosanova, M. T. (2012). Impacto del cambio climático en las enfermedades infecciosas Impact of climate change on infectious diseases. *Arch Argent Pediatr*, 110(1), 39–45. <https://doi.org/10.5546/aap.2012.39>
- Campbell, C. J., & Laherrère, J. H. (1998). The End of Cheap Oil. In *Scientific American* (Vol. 278, pp. 78–83). Scientific American, a division of Nature America, Inc. <https://doi.org/10.2307/26057708>
- Capellán-Pérez, I., De Blas, I., Nieto, J., De Castro, C., Miguel, L. J., Carpintero, Ó., Mediavilla, M., Lobejón, L. F., Ferreras-Alonso, N., Rodrigo, P., Frechoso, F., & Álvarez-Antelo, D. (2020). MEDEAS: A new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 13, Issue 3, pp. 986–1017). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c9ee02627d>
- Castro Carranza, C. (2017). Colapso y transición de nuestra civilización: defensa del Gaiarquismo. *La Albolafia: Revista de Humanidades y Cultura*, 10, 75–94. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6040199.pdf>
- Deloitte Touche Tohmatsu Limited (DTTL). (2020). *El impacto económico del COVID-19 | Deloitte España*.
- Dowlatabadi, H. (1995). Integrated assessment models of climate change. An incomplete overview. In *Energy Policy* (Vol. 23, Issues 4–5, pp. 289–296). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(95\)90155-Z](https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)90155-Z)
- Eberlein, R. L., & Peterson, D. W. (1992). Understanding models with Vensim™. *European Journal of Operational Research*, 59(1), 216–219. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90018-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90018-5)
- Empresa: Historia | Ventana Systems, Inc.* (n.d.). Retrieved July 20, 2020, from [https://www.ventanasystems.com/company\\_history/](https://www.ventanasystems.com/company_history/)
- Frumkin, H., & McMichael, A. J. (2008). Climate Change and Public Health. Thinking, Communicating, Acting. In *American Journal of Preventive Medicine* (Vol. 35, Issue 5, pp. 403–410). <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.019>
- García Martín, J. (2003). *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RQ5BDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Teoría+y+ejercicios+prácticos+de+Dinámica+de+Sistemas+Juan+Martín+García&ots=agV2a4ov3q&sig=Rhy10cVaZExqtPOLadGVxs>



- hJbPk#v=onepage&q=Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Siste
- General Secretary for Health, & Centre., H. alert and E. C. (2020). *Actualización nº 137. Enfermedad por el coronavirus (COVID- 19)*. [https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov-China/documentos/Actualizacion\\_138\\_COVID-19.pdf](https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov-China/documentos/Actualizacion_138_COVID-19.pdf)
- Haines, A., Kovats, R. S., Campbell-Lendrum, D., & Corvalan, C. (2006). Climate change and human health: Impacts, vulnerability and public health. *Public Health*, 120(7), 585–596. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2006.01.002>
- Holgate, S. (2017). Every breath we take: The lifelong impact of air pollution. Report of a working party. *Clinical Medicine*, 17(1), 8–12. <https://www.rcplondon.ac.uk/projects/outputs/every-breath-we-take-lifelong-impact-air-pollution>
- Holland, J. H. (1998). Emergence: from chaos to order. In *Choice Reviews Online* (Vol. 35, Issue 11). <https://doi.org/10.5860/choice.35-6184>
- Izquierdo, L. R., Galán Ordax, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo Martínez, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, 16, 85–112. <https://doi.org/10.5944/empiria.16.2008.1391>
- Jiménez, L. C. V. (2013). Epidemias y pandemias: Una realidad para el siglo XXI. Un mundo y una salud. In *Revista Lasallista de Investigación* (Vol. 10, Issue 1, pp. 7–8).
- Katellaris, C. H., & Beggs, P. J. (2018). Climate change: allergens and allergic diseases. *Internal Medicine Journal*, 48(2), 129–134. <https://doi.org/10.1111/imj.13699>
- Klare, M. (2003). *Guerra por los recursos*. [http://imes.edu.uy/images/biblioteca/2015/PDF/GUERRAS\\_POR\\_LOS\\_RECURSOS\\_jpg.pdf](http://imes.edu.uy/images/biblioteca/2015/PDF/GUERRAS_POR_LOS_RECURSOS_jpg.pdf)
- Mellor, J. E., Levy, K., Zimmerman, J., Elliott, M., Bartram, J., Carlton, E., Clasen, T., Dillingham, R., Eisenberg, J., Guerrant, R., Lantagne, D., Mihelcic, J., & Nelson, K. (2016). Planning for climate change: The need for mechanistic systems-based approaches to study climate change impacts on diarrheal diseases. In *Science of the Total Environment* (Vols. 548–549, pp. 82–90). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.087>
- Mercure, J. F., Pollitt, H., Edwards, N. R., Holden, P. B., Chewprecha, U., Salas, P., Lam, A., Knobloch, F., & Vinuales, J. E. (2018). Environmental impact assessment for climate change policy with the simulation-based integrated assessment model E3ME-FTT-GENIE. *Energy Strategy Reviews*, 20, 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.03.003>
- Nicholls, R. J. (2007). *Global climate change: implications for coastal systems and low-lying areas*.



- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Objectives | LOCOMOTION. (n.d.). Retrieved July 16, 2020, from <https://www.locomotion-h2020.eu/about-project/objectives/>
- OMS. (2020). *Preguntas frecuentes sobre los nuevos coronavirus*. 2020. <https://www.who.int/es/emergencias/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/q-a-coronaviruses>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Smith, K. R., Woodward, A., Campbell-Lendrum, D., Chadee Trinidad, D. D., Honda, Y., Liu, Q., Aranda, C., & Berry, H. (2014). *1 Human Health: Impacts, Adaptation, and Co-Benefits Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Contributing Authors*.
- UN Department of Economics and Social Affairs. (2019). *World Population Prospects - Population Division - United Nations*. The International Journal of Logistics Management. <https://doi.org/10.1108/09574099810805708>
- van Vuuren, D. P., Kok, M. T. J., Girod, B., Lucas, P. L., & de Vries, B. (2012). Scenarios in Global Environmental Assessments: Key characteristics and lessons for future use. *Global Environmental Change*, 22(4), 884–895. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.06.001>
- Vensim Software | Vensim. (n.d.). Retrieved July 20, 2020, from <http://vensim.com/vensim-software/>
- Watkins, K. (2006). Human development report, 2006: beyond scarcity: power, poverty and the global water crisis. In *Choice Reviews Online* (Vol. 44, Issue 12). <https://doi.org/10.5860/choice.44-6944>
- Weyant, J. (2017). Some contributions of integrated assessment models of global climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 115–137. <https://doi.org/10.1093/reep/rew018>



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

WHO | Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. (2018). *WHO*.

World Meteorological Organization. (2019). The Global Climate in 2015 - 2019. *World Meteorological Organization*, 1179, 32.



## INDICE DE ANEXOS

ANEXO I: RELATOS DE LOS ESCENARIOS SSPS .....	I
ANEXO II: ESQUEMA GENERAL DEL MODELO POBLACIONAL.....	V





## **ANEXO I: RELATOS DE LOS ESCENARIOS SSPS**

Este anexo presenta una traducción propia de los cinco relatos descritos por O'Neill et al. (2017).

### **SSP1-SOSTENIBILIDAD - TOMANDO EL CAMINO VERDE (DESAFÍOS PARA LA MITIGACIÓN Y LA ADAPTACIÓN)**

El mundo cambia gradualmente, hacia un camino más sostenible, haciendo hincapié en un desarrollo más inclusivo que respete las fronteras ambientales percibidas. La gestión del patrimonio mundial mejora lentamente, las inversiones en educación y salud aceleran la transición demográfica y el énfasis en el crecimiento económico se desplaza hacia un énfasis más amplio en el bienestar humano. La desigualdad, impulsada por un compromiso cada vez mayor con el logro de los objetivos de desarrollo, se reduce tanto entre los países como dentro de ellos. El consumo está orientado hacia un bajo crecimiento material y una menor intensidad de recursos y energía.

### **SSP2- MITAD DEL CAMINO (DESAFÍOS MEDIANOS PARA LA MITIGACIÓN Y LA ADAPTACIÓN)**

El mundo sigue un camino en el que las tendencias sociales, económicas y tecnológicas no se apartan marcadamente de las pautas históricas. El desarrollo y el aumento de los ingresos se producen de forma desigual, ya que mientras algunos países progresan relativamente bien, otros no cumplen con las expectativas. Las instituciones mundiales y nacionales se esfuerzan por alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible y hacen grandes progresos en ese sentido. Los sistemas ambientales experimentan una degradación, aunque hay algunas mejoras y en general la intensidad del uso de los recursos y la energía disminuye. El crecimiento de la población mundial es moderado y se estabiliza en la segunda mitad del siglo. La desigualdad de los ingresos persiste o mejora sólo lentamente y sigue habiendo problemas para reducir la vulnerabilidad a los cambios sociales y ambientales.

### **SSP3-RIVALIDAD REGIONAL - UN CAMINO ROCOSO (GRANDES DESAFÍOS PARA LA MITIGACIÓN Y LA ADAPTACIÓN)**

El resurgimiento del nacionalismo, la preocupación por la competitividad y la seguridad y los conflictos regionales empujan a los países a centrarse cada vez más en cuestiones internas o, a lo sumo, regionales. Los



'Micks' cambian con el tiempo para orientarse cada vez más hacia los temas de seguridad nacional y regional. Los países se centran en lograr la seguridad energética y alimentaria en sus propias regiones a expensas de un desarrollo más amplio. Las inversiones en educación y desarrollo tecnológico disminuyen. El desarrollo económico es lento, el consumo es intensivo en materiales y las desigualdades persisten o empeoran con el tiempo. El crecimiento de la población es bajo en los países industrializados y alto en los países en desarrollo. Una baja prioridad internacional para abordar las preocupaciones ambientales conduce a una fuerte degradación del medio ambiente en algunas regiones.

### **SSP4-DESIGUALDAD - UN CAMINO DIVIDIDO (POCOS DESAFÍOS PARA LA MITIGACIÓN, GRANDES DESAFÍOS PARA LA ADAPTACIÓN)**

Las inversiones desiguales en capital humano, combinadas con las crecientes disparidades en cuanto a oportunidades económicas y poder político, dan lugar a un aumento de las desigualdades y de la estratificación tanto entre los países como dentro de ellos. Con el tiempo, se amplía la brecha entre una sociedad conectada internacionalmente que contribuye a los sectores basados en el conocimiento y el capital de la economía mundial, y una colección fragmentada de sociedades de bajos ingresos y escasa educación que trabajan en una economía de mano de obra intensiva y de baja tecnología. La cohesión social se degrada y el conflicto y el malestar se hacen cada vez más comunes. El desarrollo de la tecnología es alto en la economía y los sectores de alta tecnología. El sector energético conectado a nivel mundial se diversifica, con inversiones tanto en combustibles de alto contenido de carbono, carbón y petróleo no convencional, como en fuentes de energía de bajo contenido de carbono. Las políticas ambientales se centran en cuestiones locales en torno a las zonas de ingresos medios y altos.

### **SSP5-DESARROLLO IMPULSADO POR LOS COMBUSTIBLES FÓSILES - TOMANDO LA CARRETERA (ALTOS DESAFÍOS PARA LA MITIGACIÓN, BAJOS DESAFÍOS PARA LA ADAPTACIÓN)**

Este mundo tiene cada vez más confianza en los mercados competitivos, la innovación y las sociedades participativas para producir un rápido progreso tecnológico y un desarrollo del capital humano como camino hacia el desarrollo sostenible. Los mercados mundiales están cada vez más integrados. También se realizan fuertes inversiones en salud, educación e instituciones para mejorar el capital humano y social. Al mismo tiempo, el



impulso del desarrollo económico y social va unido a la explotación de los abundantes recursos de combustibles fósiles y a la adopción de estilos de vida que requieren un uso intensivo de recursos y energía en todo el mundo. Todos estos factores conducen a un rápido crecimiento de la economía mundial, mientras que la población mundial alcanza su punto máximo y disminuye en el siglo XXI. Los problemas ambientales locales como la contaminación del aire se gestionan con éxito. Se confía en la capacidad de gestionar eficazmente los sistemas sociales y ecológicos, incluso mediante la geoingeniería si es necesario.



## ANEXO II: ESQUEMA GENERAL DEL MODELO POBLACIONAL

