

# Estudio del desarrollo de una sociedad basada en un juego de roles

Harold González, Jonathan Julio y Simón Álvarez

Modelación y Simulación III, Departamento de Ciencias Matemáticas, Facultad de Ciencias  
Universidad EAFIT

hsgonzaleo@eafit.edu.co, jsjuliod@eafit.edu.co, salvarezo1@eafit.edu.co

**Resumen**—El desarrollo de una sociedad es un fenómeno muy complejo de comprender debido a todos los aspectos que se deben tener en cuenta al momento de estudiarlo como la economía, política, tecnología, entre otros. Diferentes autores han propuesto enfoques para explicar dichos aspectos o algunos eventos históricos. En esta investigación nos centraremos en el enfoque sistémico, apoyándonos en la dinámica de sistemas y anteriores investigaciones para comprender el fenómeno del desarrollo social basándonos en cuatro roles o estructuras básicas capaces de definir la dirección y velocidad de progreso, a la vez que hacemos variadas simulaciones para observar los resultados que produce esta partición y si son similares a lo que se ve en la sociedad moderna.

**Palabras clave**—Enfoque sistémico, Dinámica de Sistemas, Desarrollo social, Sociedad, Modelación y Simulación.

## I. INTRODUCCIÓN

En septiembre de 2015 la Organización de las Naciones Unidas creó los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con el fin de mejorar las condiciones humanas en el mundo. Los ODS son índices creados para cada país, los cuales se miden y promedian para hallar el índice de desarrollo sostenible en el mundo. Investigadores y presentadores como Steven Pinker [1] y Michael Green [2] defienden, a través de la recolección de datos históricos, que el mundo ha mejorado notablemente con respecto al pasado y que las actuales decisiones de los gobiernos y diferentes entidades influyentes parecen lograr un efecto, aunque lento, de mejora en los ODS y la calidad de vida humana. En la presente investigación, se utilizan los datos recolectados por *Social Progress Imperative* [3] y *Our World in Data* [4] para comprender cualitativamente la evolución del desarrollo social en un sistema delimitado por cuatro estructuras básicas.

Teniendo en cuenta las ideas de Pinker y Green, se puede entender el desarrollo social como la cantidad de acciones que genera la población para satisfacer unas necesidades. Las acciones pueden representar la generación de bienes materiales o la entrega de servicios a la comunidad.

En la literatura actual existen diferentes enfoques para el estudio de la sociedad. Rodrigo Lozada y Andrés Casas [5, pp. 221–259] mencionan algunos de ellos, como el enfoque estructural, que se encarga de estudiar la sociedad desde su estructura en una perspectiva holística a la vez que ignora sus actores; el enfoque sistémico, que estudia las características de

un sistema y sus subsistemas a través de retroalimentaciones y las relaciones entre sus actores, y el estructural-funcionalista que busca comprender las funciones de una estructura política dentro de un sistema y las relaciones de este con otros sistemas políticos. La actual investigación se centrará en el enfoque sistémico debido a la facilidad del modelado que presenta la dinámica de sistemas para la simulación de las relaciones entre las estructuras delimitadas.

El enfoque sistémico es útil para comprender empíricamente la estructura y componentes de la sociedad. Ludwig von Bertalanffy [6] busca generalizar, desde su punto de vista biológico, el concepto de sistema a cualquier disciplina bajo unas premisas básicas, como es la existencia de un entorno o la interdependencia entre las partes que conforman su estructura; por otra parte, David Easton [7] resalta que el equilibrio de un sistema cambiante se halla en los efectos sistémicos de las interacciones, mas no en los intereses particulares de los actores [5], y asimismo Parsons [8] busca definir los elementos necesarios para el análisis de la estructura y procesos del sistema social a través de su delimitación y establecimiento de sus componentes. Como crítica al enfoque sistémico y las obras antes mencionadas, se encuentra la falta de comprensión de los actores que conforman un sistema, la dificultad para delimitar los actores de un proceso y su incompatibilidad con un modelo matemático. Este último punto es una razón por la cual se busca comprender cualitativamente los sistemas políticos más no de forma cuantitativa, que es en algunos casos suficiente para la comprensión de las causas de un evento histórico, como lo hizo Braumoeller [9], que explica factiblemente los conflictos entre las grandes potencias del siglo XX.

En un sistema es importante definir las unidades en las que se compone el mismo; el ambiente, los procesos y los límites en los que interactúa, y las entradas y salidas, que son los activos que tienen autoridad en su entorno cambiante [10]. Se entiende que en sistemas con una alta complejidad como los sociales o políticos siempre habrá presencia de factores externos que afectarán sustancialmente la estructura interna; por tanto, se hizo una simulación apartada en la cual se suponía la existencia de riesgos aleatorios externos al sistema.

Debido a la naturaleza de los datos de *Social Progress Imperative* y *Our World in Data*, se utiliza un tiempo de simulación de 100 años en una población base de 100 personas.

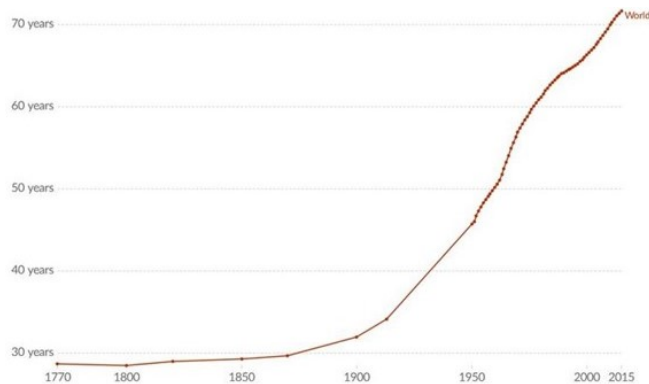
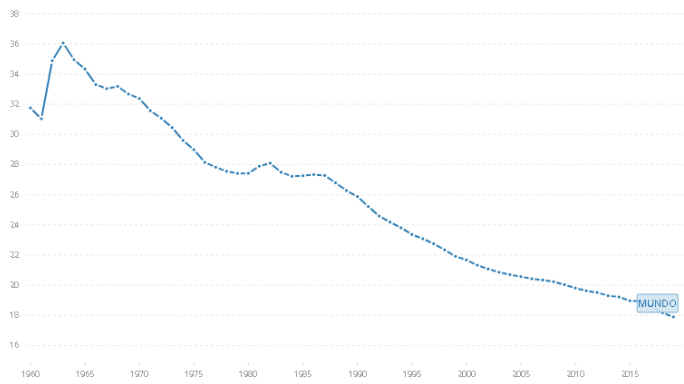
(a) Gráfica de la esperanza de vida entre 1770 y 2015 obtenida de *Our World in Data*.(b) Gráfica de la tasa de natalidad entre 1960 y 2019 obtenida de *Banco Mundial*.

Figura 1: Información sobre la población mundial.

Estos valores estarán sujetos a cambios en el futuro para la elaboración de un estudio más riguroso del sistema.

## II. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS DINÁMICA

Debido a la dificultad que presenta definir las estructuras del sistema moderno más influyentes en el avance de la tecnología y desarrollo sociocultural, se decide delimitar el entorno a cuatro actores esparcidos en diferentes funciones que terminan afectando al progreso social. Cada actor pertenece a dos diferentes particiones del sistema, llamadas interés y enfoque respectivamente. Entre los intereses, se encuentra uno colectivo y otro individual; mientras que los enfoques son el tecnológico y el social. Así, se tiene que el sistema se reparte en los siguientes subsistemas o roles: Tecnológico-Individual (TI), Tecnológico-Colectivo (TC), Social-Individual (SI) y Social-Colectivo (SC).

Como un ejemplo, se puede evidenciar en la sociedad moderna estos cuatro actores, refiriendo el componente TI a las personas investigando en el ámbito científico e ingenieril; mientras que TC es relativo a la aplicación de las tecnologías en sociedad y materialización de las ideas desarrolladas teóricamente; SI es el componente de competencia, el cual se refleja en empresas, instituciones educativas, universidades, hospitales, etc. Este rol es delimitable debido a la idea de que su exceso en la sociedad desencadenaría eventos perjudiciales para la población como monopolios o corrupción. Por último, SC trata sobre educar, culturizar y promover leyes y normas dentro de una comunidad.

### A. Diagrama causal

Como se quiere estudiar la evolución del desarrollo social, se supondrá que la población no es constante y, por lo tanto, presenta un flujo de nacimientos y muertes. También se sabe que en una población más desarrollada sucederá que habrá menos hijos por persona a la vez de que la población tiene una esperanza de vida mayor gracias a los avances tecnológicos [11], [12], [13]; así, se relaciona el desarrollo social y tecnológico con las tasas de natalidad y mortalidad respectivamente. Por otra parte, una sociedad siempre se verá afectada por factores difícilmente predecibles como el clima o el propio territorio.

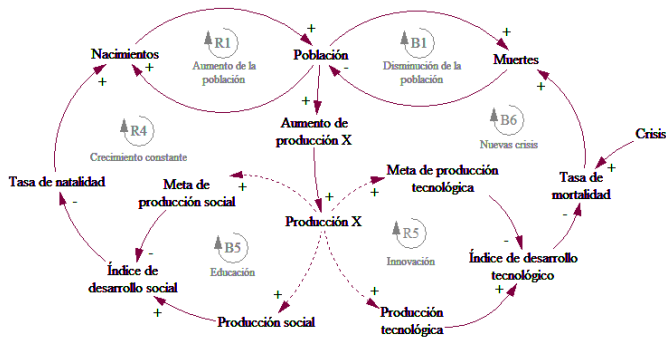
Por esta razón, se tiene en cuenta una variable crisis con un componente aleatorio que representa a todos los factores capaces de afectar la población y desarrollo de la sociedad.

La Figura 2.a. enseña el diagrama causal del subsistema de la población y el desarrollo. Los ciclos de realimentación son R1 y B1 que controlan el crecimiento de la población; R4 y B6 que disminuyen el ritmo con que decrecen las tasas de natalidad y mortalidad debido al crecimiento constante de las metas; y R5 y B5 que producen el decrecimiento de las tasas de natalidad y mortalidad.

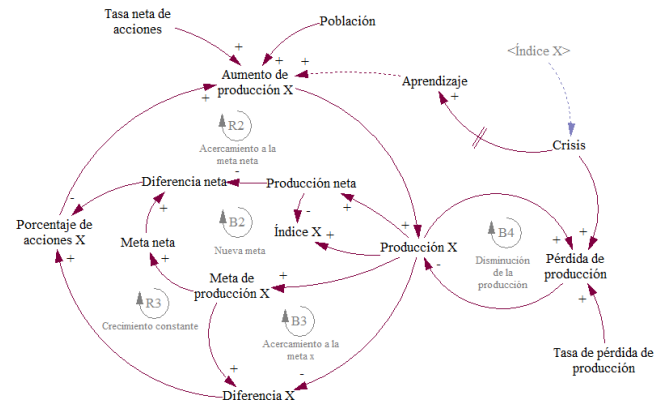
La población siempre buscará el crecimiento del sistema y para este fin generará unas acciones en promedio (tasa de acciones neta), las cuales se recolectarán en una variable producción existente para cada rol que dependerá de un aumento y una pérdida en la producción. El aumento de producción depende de la población y una tasa neta de acciones, mientras que la pérdida de producción de la variable crisis y una tasa de pérdida de producción.

También se tendrá en cuenta una meta por rol que la población quiere alcanzar, llamadas metas de producción, las cuales dependerán de la producción perteneciente al mismo subsistema. Asimismo, la razón entre la producción de una de las cuatro particiones y la producción total será el índice que representa la contribución del subsistema (entonces, al tener el índice del subsistema TI, lo nombraremos índice TI). La variabilidad entre estos cuatro índices será otro componente de la crisis antes definida, puesto que mientras más dispersos sean sus valores, más posibilidades habrán de que se esté invirtiendo en los roles incorrectos, lo que genera una inestabilidad en el sistema (como invertir demasiado en la exportación de un país y no en la educación, esto generará problemas en la sociedad). Estas crisis darán información sobre el sistema y cómo puede mejorarse, lo que materializamos en la variable aprendizaje. Esta variable, debido a que solo genera conocimientos teóricos, solo afectará al aumento de producción TI.

En la Figura 2.b. se muestra el diagrama causal del subsistema general para las producciones. Los ciclos de realimentación son R2 y B3 que cambian el porcentaje de acciones dirigidas al rol X debido a que hay un acercamiento a la meta X o a la



(a) Diagrama causal del subsistema para la población y el desarrollo.



(b) Diagrama causal del subsistema para las producciones.

Figura 2: Construcción del sistema.

meta general; B2 y R3 que provoca un aumento en las metas debido al supuesto de que la población siempre está en contante crecimiento; y B4 que provoca la pérdida en la producción.

Por último, la razón entre la diferencia de la meta y la producción generada en un subsistema, y la diferencia entre la meta y producción neta permitirán definir una nueva variable llamada porcentaje de acciones de un determinado rol, que representa a la cantidad de acciones que se dirigirán anualmente hacia una producción preestablecida.

Al relacionar los tres subsistemas y recordar que el segundo se aplica para los cuatro roles, se obtiene el diagrama causal del sistema. En la Figura 3 se puede ver diagrama causal del sistema. Las variables sombra de la forma <variable> sirven como apoyo para conectar las variables más alejadas a la vez que se intenta no cruzar líneas o generar un diagrama demasiado amplio con el fin de facilitar su comprensión.

### B. Diagrama de flujos y niveles

En el sistema se tiene como niveles a la población y las cuatro producciones, mientras que los flujos son los nacimientos y muertes para la población, y el aumento y disminución de producción para las producciones. Cada uno de estos flujos, exceptuando el aumento de producción, tiene una tasa correspondiente. El aumento de producción tiene un porcentaje de acciones diferente por rol y una tasa de acciones neta común. También se supusieron unos parámetros que ayudan a cambiar el comportamiento del sistema; algunos de ellos son la amplitud de la natalidad y amplitud de la mortalidad, que delimitan el intervalo en el que la tasa de natalidad y mortalidad pueden tomar valores; alpha, que determina qué tan aleatorio es el comportamiento de la tasa de pérdida de producción, y convergencia y epsilon, que alejan o acercan la meta de producción de las producciones actuales y decidirán los valores iniciales de los índices de desarrollo (Fig. 4 y Fig. 5).

## III. FORMULACIÓN DEL MODELO

### A. Supuestos, entradas y salidas

En el modelo, además de los supuestos ya comentados a lo largo del artículo, se tienen en cuenta otras propiedades, como que, si la producción de un rol particular es mayor a las demás, entonces este deberá decrementar su velocidad para buscar que los cuatro índices se establezcan en la media 0.25. La tasa de acciones neta también tendrá en cuenta a aquellas personas capaces de generar más acciones que el promedio, generando pulsos cada cierto tiempo.

La entrada principal del sistema es la población, mientras que los parámetros y valores iniciales marcarán el comportamiento del modelo a lo largo del tiempo. Las variables que se observan son los índices de los desarrollos, la evolución de las producciones y la población. Entre estas variables sobresale el desarrollo social, la cual es el corazón del sistema.

### B. Ecuaciones y unidades

En la Tabla II se presentan las ecuaciones y unidades de cada variable definida en el sistema. Para los parámetros se deciden los siguientes valores para el caso base:  $A_N = 0.8$ ,  $A_M = 0.8$ ,  $\alpha = 0.4$ ,  $c = 0.035$ ,  $\varepsilon = 0.05$ .

### C. Caso base

Para el primer caso se supone una población inicial de 100 personas y una producción neta de 1 acción dirigida únicamente al rol TI. Con estos valores iniciales se evidencia que la población tiene un crecimiento exponencial, con una población final de 800 mil personas (Fig. 6.a).

En las producciones no hay un comportamiento claro, pero también tienden a ser exponenciales (Fig. 6.b). El desarrollo social y el tecnológico van creciendo poco a poco, iniciando con un valor cercano a 0.1 por como se elige al parámetro  $\varepsilon$ , pues mientras más bajo sea su valor inicial, menor será el valor inicial de los desarrollos. En 20 años ambos índices crecen hasta 0.6, lo que significa que la sociedad tuvo un progreso considerable,

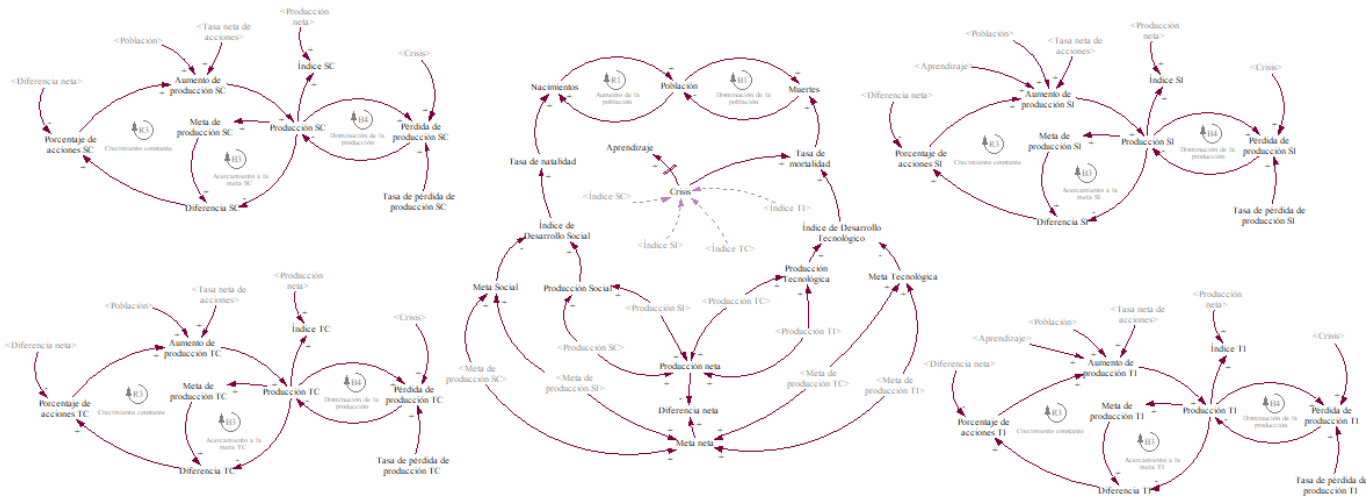


Figura 3: Diagrama causal del sistema.

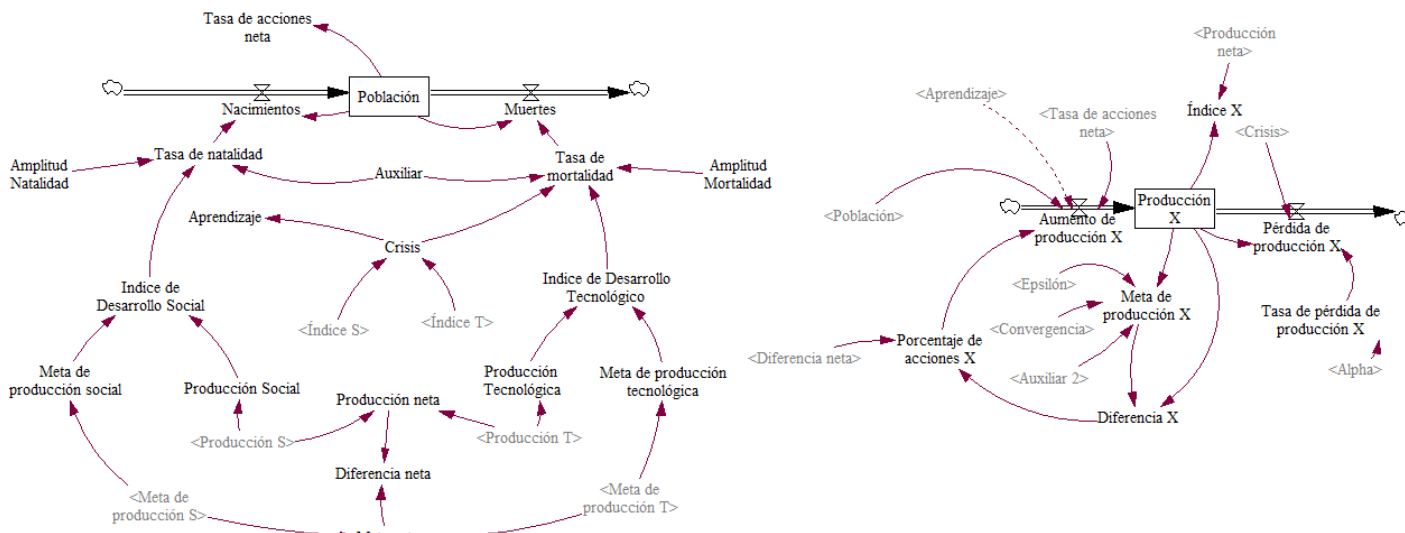


Figura 4: Diagrama de flujos y niveles para un rol y la población.

consecuencia del supuesto de que está en constante crecimiento. Finalmente, después de 40 años y hasta el final del horizonte, los desarrollos crecen más lento debido a las metas cada vez más altas dentro de la sociedad. Al final, los desarrollos redondean un valor de 0.8 (Fig. 7.a).

Por último, las tasas de natalidad y mortalidad tienden a decrecer a medida que pasa el tiempo debido al crecimiento de los desarrollos. Por otro lado, ambas tasas se mantienen en valores muy bajos, lo que se ajusta muy bien a los datos del Banco Mundial (Fig. 7.b).

#### IV. VALIDACIÓN

Respecto a la consistencia estructural del modelo, no se encontraron valores atípicos o convergencia a intervalos inesperados en las simulaciones, a la vez que los ciclos de realimentación

cumplen con los supuestos y en ningún caso hubo problemas de consistencia dimensional.

Para comprobar la confiabilidad del modelo, se simularon varios casos extremos como la ausencia de población o producciones (Fig. 8), cambios en el método de integración (Fig. 9) y alargamientos del horizonte de tiempo (Fig. 10). Entre los resultados, se observa que la ausencia de población o de producciones hace que los desarrollos converjan a 0 como se esperaba, puesto que es una sociedad en busca de la generación de producción. El modelo es invariante para diferentes métodos de integración con tamaños de paso menores a 1 año, pero se empiezan a presentar inconsistencias para un tamaño de paso mayor. A su vez, la estructura actual del modelo permite el crecimiento de las producciones sin límites, lo que permite que en horizontes de tiempo mayores a 300 años los desarrollos sean más próximos a 1 y los valores que toman los niveles de

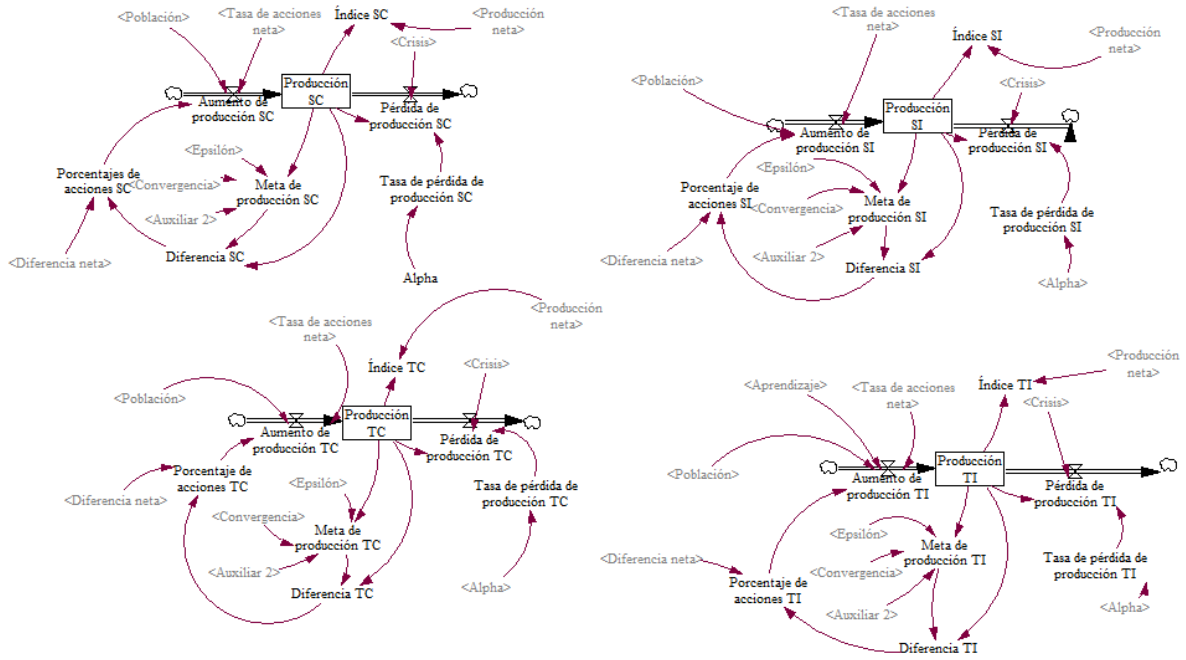


Figura 5: Diagramas de producción total en flujos y niveles del sistema. Puede observarse que cada rol tiene un subsistema propio parecido al de los demás.

población y producción son muy elevados e irreales, por lo que se recomienda que el horizonte de tiempo sea menor a 300 años.

Otra propiedad que tiene el modelo es que el cambio en los parámetros puede transformar completamente el comportamiento del modelo (Fig. 11).

## V. ESCENARIOS

Se supusieron tres escenarios diferentes para comprender mejor el comportamiento del modelo. Entre ellos, se encuentra la eliminación de la aleatoriedad, una producción inicial anormalmente alta y una generación de acciones por persona mayor.

### A. No Aleatoriedad

Para este escenario, se cambiaron todas las distribuciones normales y uniformes del modelo por la media respectiva, como se presenta en la Tabla I. Las producciones y los desarrollos son crecientes con varios picos generados por el efecto de la tasa de acciones neta en el aumento de producción de cada flujo, mientras que en la población no se presenta el mismo patrón debido a que el efecto disminuye con el tiempo en los índices de desarrollo (Fig. 12).

VARIABLE	NUEVA ECUACIÓN
Tasa de natalidad	$n = 0.8 \cdot (1 - A_N \cdot D_S)^2 \cdot a$
Tasa de mortalidad	$m = C \cdot (1 - A_M \cdot D_T) \cdot a$
Tasa de acciones neta	$p = 1 + P_L \left( 0.05, \frac{6}{1 + D_T + D_S} \right)$
Tasa de pérdida de producción	$l_X = \alpha$
Meta de producción [rol]	$M_X = \frac{\left( P_X + \frac{P_X^2}{2\varepsilon} \cdot \Phi(a_2 P_X, c) \right)}{1 + a_2 P_X} + a_2^{-1}$
Crisis	$C = \frac{\sqrt{\sum_X (l_X - 0.25)^2}}{4} + 0.075$
Aprendizaje	$A = 0.4 \cdot D_1(C, 3, 0)$

Tabla I: Variables con nuevas ecuaciones asignadas para el primer escenario. Suponemos  $\Phi(x, c) = (1 + x)^{-c}$ .

### B. Producción inicial alta

El estado inicial de las producciones aumenta a 800000 acciones cada una. Se pretende ver cómo se comportaría el modelo cuando nuestra población de 100 personas empieza en una sociedad ya avanzada.

En este caso, se observa un comportamiento similar al caso base, pero ocurre un hecho interesante: la producción inicial se pierde rápidamente en los primeros 10 años. Esto tiene sentido, pues la población inicial es muy pequeña para dar mantenimiento a las 3200000 acciones con las que empiezan, por lo que la pérdida de producción es mucho mayor al aumento de producción. Una vez que las acciones decaen, la población vuelve a ser suficiente para empezar a generar las acciones que se proponen como meta. Sin embargo, dado que ya empiezan con un desarrollo alto, el esfuerzo es menor y el crecimiento es más lento (Fig. 13).

VARIABLE	LETRA	ECUACIÓN	UNIDADES
Población	$P$	$\frac{dP}{dt} = N - M, P(0) = 100$	Personas
Nacimientos	$N$	$N = n \cdot P$	Personas/año
Muertes	$M$	$M = m \cdot P$	Personas/año
Tasa natalidad	$n$	$n = (1 - A_N \cdot D_S) \cdot R_N(0, 0.8, 0.8(1 - A_N \cdot D_S), 0.4(1 - A_N \cdot D_S))$	1/año
Tasa mortalidad	$m$	$m = (1 - A_M \cdot D_T) \cdot R_N(0.001, 0.8, C, C \cdot (1 - A_M \cdot D_T)) \cdot a$	1/año
Amplitud Natalidad	$A_N$	$A_N \in (0, 1]$	Adimensional
Amplitud Mortalidad	$A_M$	$A_M \in (0, 1]$	Adimensional
Índice de desarrollo social	$D_S$	$D_S = \frac{P_S}{M_S}$	Adimensional
Índice de desarrollo tecnológico	$D_T$	$D_T = \frac{P_T}{M_T}$	Adimensional
Auxiliar	$a$	$a = 1$	1/año
Tasa de acciones neta	$p$	$p = R_N(0, 3, 1, (P^{0.1} + 10^{-5})^{-1}) + P_L(0, 0.5, \frac{6}{1 + D_S + D_T})$	Acciones/(personas·año)
Producción [rol]	$P_X$	$\frac{dP_X}{dt} = A_X - L_X, P_X(0) = 0, P_{TI}(0) = 1$	Acciones
Aumento de producción [rol]	$A_X$	$A_X = P \cdot p_X \cdot p$	Acciones/año
Pérdida de producción [rol]	$L_X$	$L_X = (1 + C) \cdot P_X \cdot l_X$	Acciones/año
Producción neta	$P_{neta}$	$P_{neta} = \sum_X P_X$	Acciones
Meta de producción [rol]	$M_X$	$M_X = \left[ P_X + \frac{P_X^2}{\epsilon} \cdot R_N \left( 0, \Phi(y, c), \frac{\Phi(y, c)}{2}, \frac{\Phi(y, c)}{8} \right) \right] \frac{1}{y + 1} + a_2^{-1}, y = a_2 P_X$	Acciones
Meta de producción neta	$M_{neta}$	$M_{neta} = \sum_X M_X$	Acciones
Tasa de pérdida de producción [rol]	$l_X$	$l_X = R_N(0.001, 0.4, \alpha, 0.1)$	1/año
Alpha	$\alpha$	$\alpha \in [0.001, 0.4]$	1/año
Índice [rol]	$I_X$	$I_X = \frac{P_X}{P_{neta}}$	Adimensional
Diferencia [rol]	$D_X$	$D_X = M_X - P_X$	Acciones
Diferencia neta	$D_{neta}$	$D_{neta} = M_{neta} - P_{neta}$	Acciones
Porcentaje de acciones [rol]	$p_X$	$p_X = \frac{D_X}{D_{neta}}$	Adimensional
Convergencia	$c$	$c \in (0, 1)$	Adimensional
Épsilon	$\epsilon$	$\epsilon \in (0, 1]$	Acciones
Crisis	$C$	$C = \frac{\sqrt{\sum_X (I_X - 0.25)^2}}{4} + R_U(0, 0.15)$	Adimensional
Aprendizaje	$A$	$A = R_U(0, 0.8) \cdot D_1(C, 3, 0)$	Adimensional
Aumento de producción TI	$A_{TI}$	$A_{TI} = (1 + A) \cdot P \cdot p_X \cdot p$	Acciones/año
Producción social	$P_S$	$P_S = P_{SC} + P_{SI}$	Acciones
Producción social	$P_T$	$P_T = P_{TC} + P_{TI}$	Acciones
Auxiliar 2	$a_2$	$a_2 = 1$	1/acciones

Tabla II: Variables del diagrama de flujos y niveles, ecuaciones y respectivas unidades. La función  $\Phi(x, c)$  es monótonamente decreciente y se mueve en el intervalo  $(0, 1]$ , con asíntota horizontal en 0. Su velocidad de convergencia a 0 es proporcional a la velocidad de convergencia de los índices de desarrollo a 1. Para las simulaciones se supuso  $\Phi(x, c) = (1 + x)^{-c}$ .  $R_U$ (inicio, final) se refiere a una distribución aleatoria uniforme en el intervalo definido por los dos primeros parámetros (ver [14]).  $R_N$ (inicio, final, media, varianza) se refiere a una distribución normal truncada en el intervalo definido por los primeros dos parámetros (ver [15]).  $P_L$ (inicio, duración, tiempo de espera) genera pulsos durante toda la simulación en los valores propuestos (ver [16]).  $D_1$ (entrada, duración, valor inicial) produce un retraso en la variable de llegada (ver [17]).

### C. Prohibidos los genios y prohibida la gente promedio

Para este caso se hacen dos escenarios, una que consiste en eliminar la aparición de genios en el modelo (eliminando la función PULSE<sup>1</sup> de la tasa neta de acciones) y otra que consiste en hacer que haya sobreexplotación de genios (aumentando la duración de los pulsos a 1 de la función PULSE y multiplicando su valor por 20). Esto permitirá ver qué tanto afectan los genios

(personas capaces de generar muchas más acciones que 1 por año) a la sociedad.

Se encuentra que cuando hay menos genios, la población crece más rápido, mientras que cuando hay muchos genios, la población crece más lento. Esto se debe a que las tasas de natalidad y mortalidad decrecen un poco más rápido cuando hay muchos genios porque se necesita menos gente para alcanzar las metas. En general, el comportamiento del desarrollo es similar, con la diferencia de que crece solo un poco más rápido cuando hay muchos genios porque la producción es mucho mayor,

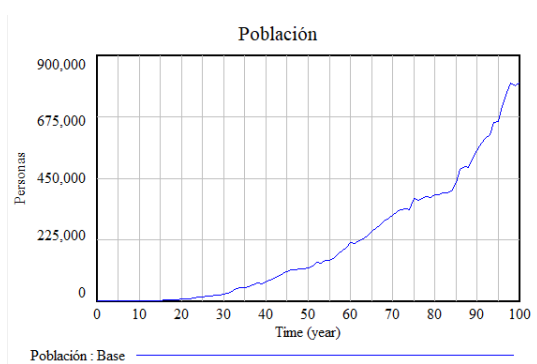
<sup>1</sup>Denotada como  $P_L$  en la Tabla I y II

aunque la sociedad terminará desarrollándose haya genios o no (Fig. 14).

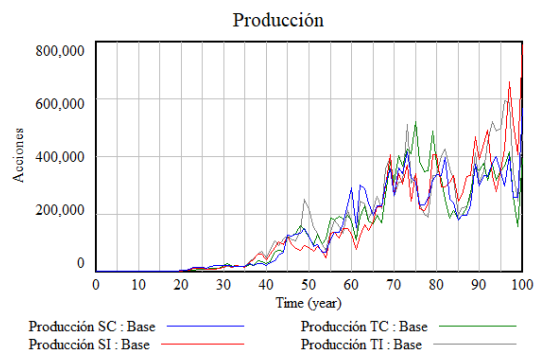
## VI. CONCLUSIONES

Vemos que el modelo se aproxima a los comportamientos que siguen el desarrollo social y tecnológico en la sociedad, así como el principio de producción y disminución de las tasas de natalidad y mortalidad, sin embargo, aún es inexacto debido a que las relaciones entre las producciones son demasiado superficiales, en las cuales se necesitaría más información para definir las con exactitud. Entre estas relaciones, es entendible que si no hay un conocimiento a priori, entonces es imposible generar nuevas tecnologías en la sociedad, por lo que es irreal que la producción TC supere a la producción TI, mientras que las producciones no mantendrían un crecimiento tan alto si no hay suficientes tecnologías que permitan una mayor velocidad de producción, lo cual es inconsistente con la independencia entre producciones.

Un estudio más detallado de las relaciones entre las producciones permitirá adaptar el modelo a la realidad de manera más precisa, lo cual, además de mejorar el entendimiento que se tiene del desarrollo en las sociedades, permitirá realizar simulaciones en las que se apliquen estrategias que busquen mantener un equilibrio entre las producciones propuestas y, con ello, acelerar el desarrollo, de manera que se evalúe su eficiencia en una sociedad real.

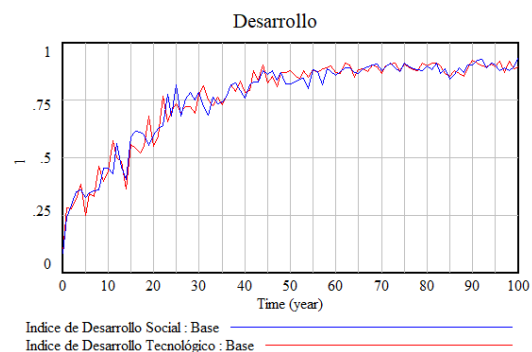


(a) Gráfica de la población para el caso base.

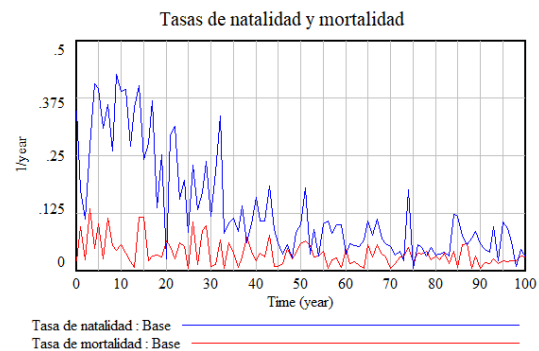


(b) Gráfica de las producciones para el caso base.

Figura 6: Gráficas del caso base (1).

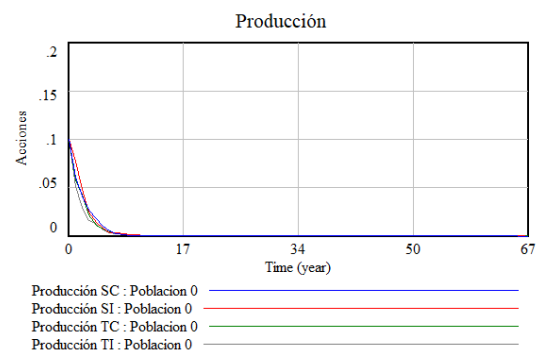


(a) Gráfica del comportamiento del desarrollo tecnológico y social para el caso base.

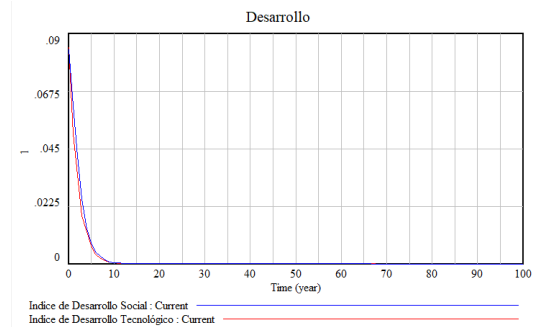


(b) Gráfica del comportamiento desarrollo de las tasas de natalidad y mortalidad para el caso base.

Figura 7: Gráficas del caso base (2).

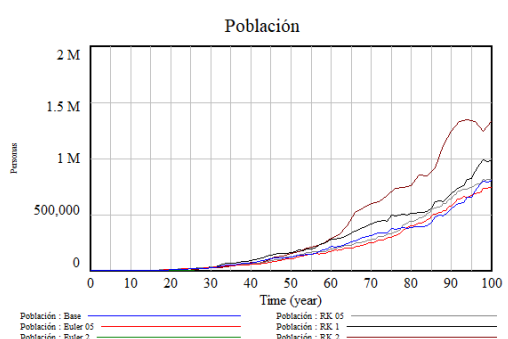


(a) Gráfica de la producción generada cuando la población inicial es 0.

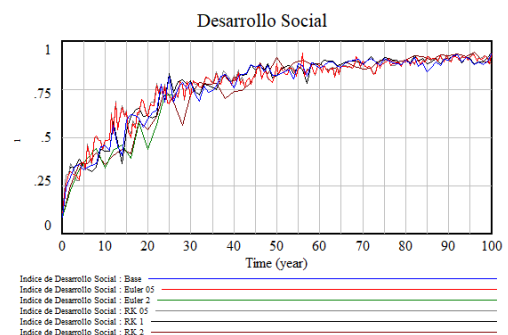


(b) Gráfica del comportamiento desarrollo social y tecnológico cuando la población inicial es 0.

Figura 8: Prueba de validación de parámetros.

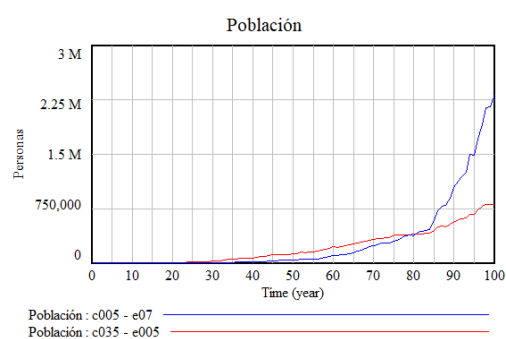


(a) Gráfica de la población para diferentes métodos de integración y tamaños de paso.

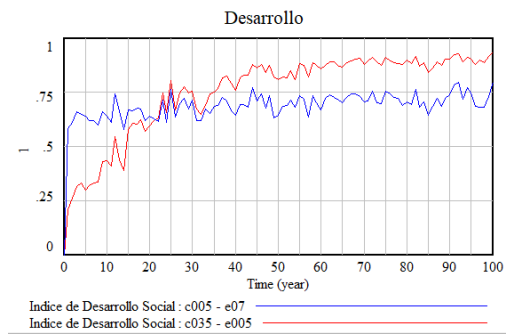


(b) Gráfica del desarrollo social para diferentes métodos de integración y tamaños de paso.

Figura 9: Prueba de validación de cambios en el tamaño de paso y método de integración.

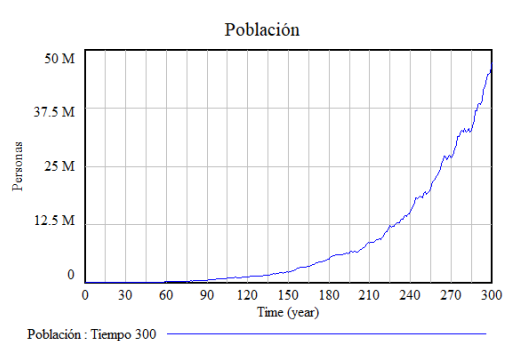


(a) Gráfica de la población para diferentes valores de los parámetros  $\epsilon$  y  $c$ .

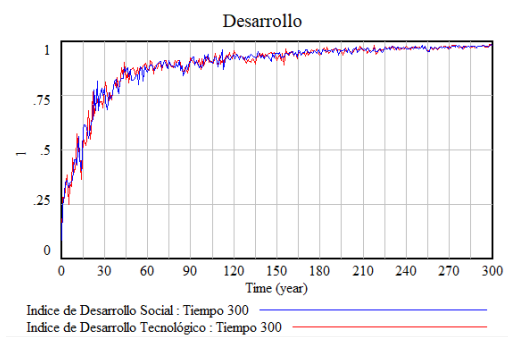


(b) Gráfica del desarrollo social para diferentes valores de los parámetros  $\epsilon$  y  $c$ .

Figura 11: Prueba de validación de análisis de sensibilidad. La gráfica azul tiene parámetros  $\epsilon = 0.7$  y  $c = 0.35$ , mientras que la gráfica roja tiene parámetros  $\epsilon = 0.05$  y  $c = 0.35$ .



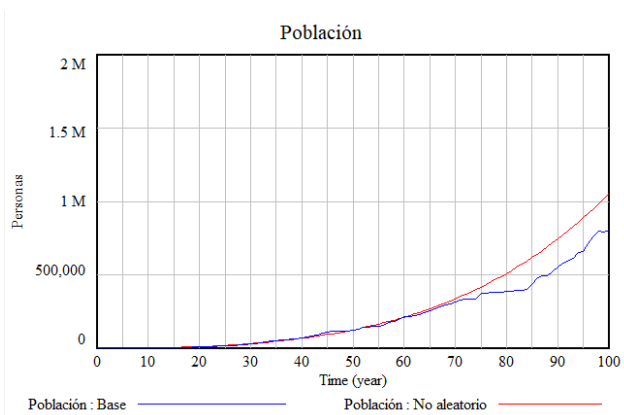
(a) Gráfica de la población para un horizonte de tiempo de 300 años.



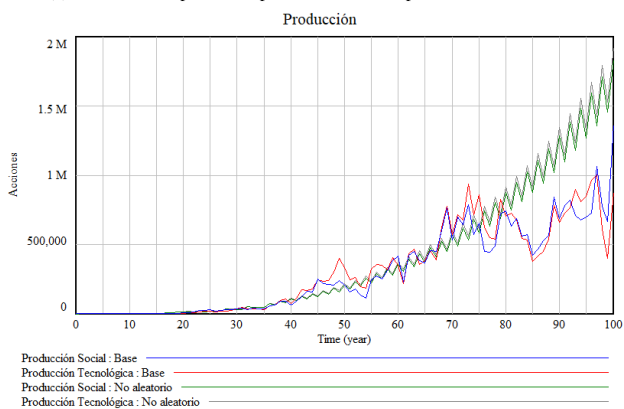
(b) Gráfica del desarrollo social y tecnológico para un horizonte de tiempo de 300 años.

Figura 10: Prueba de validación de cambios en el horizonte de tiempo.

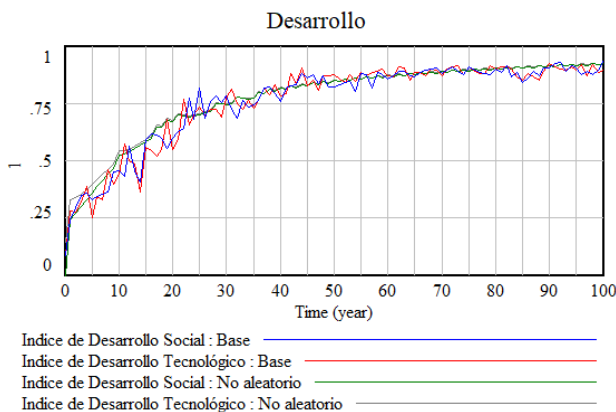




(a) Gráfica de la población para el caso 1 comparada con el caso base.

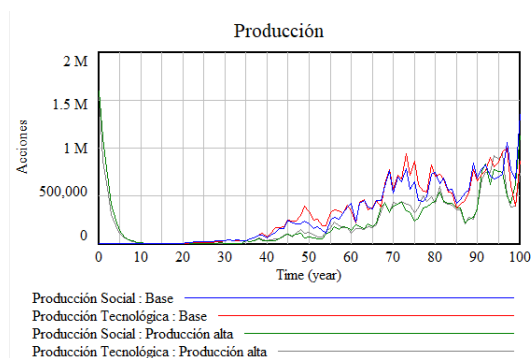


(b) Gráfica de la producción para el caso 1 comparada con el caso base.

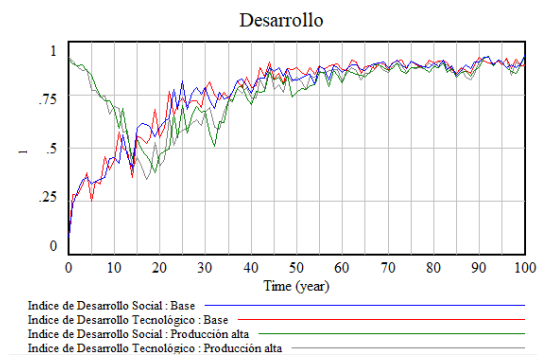


(c) Gráfica de los desarrollos para el caso 1 comparada con el caso base.

Figura 12: Gráficas del caso 1.

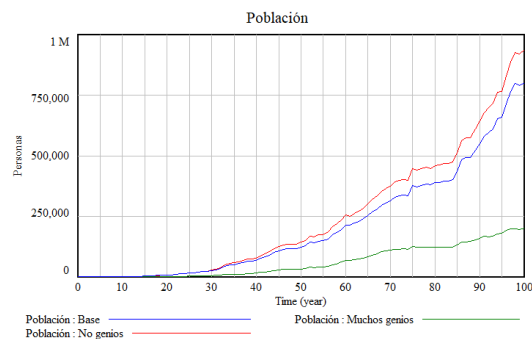


(a) Gráfica de la producción para el caso 2 comparada con el caso base.

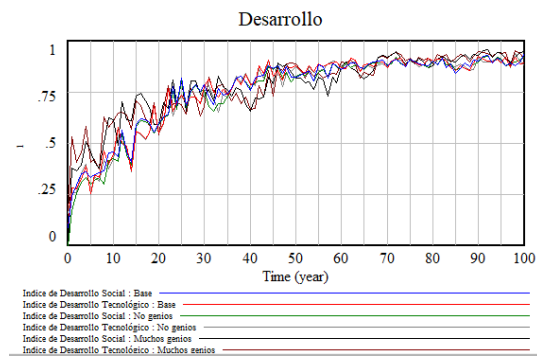


(b) Gráfica del desarrollo social y tecnológico para el caso 2 comparada con el caso base.

Figura 13: Gráficas del caso 2.



(a) Gráfica de la población para el caso 3 comparada con el caso base.



(b) Gráfica del desarrollo social y tecnológico para el caso 3 comparada con el caso base.

Figura 14: Gráficas del caso 3.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la profesora Jessica Arias y al profesor Juan Camilo Vásquez de la Universidad EAFIT por aconsejarnos y presentarnos los fundamentos teóricos para la construcción del modelo.

## REFERENCIAS

- [1] S. Pinker, "Is the world getting better or worse? A look at the numbers", 21-may-2018. [Vídeo] Disponible en: <https://youtu.be/yCm9Ng0bbEQ>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [2] M. Green, "The global goals we've made progress on – and the ones we haven't", 30-nov-2018. [Vídeo] Disponible en: <https://youtu.be/N3SQIrmV1cE>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [3] "Social Progress Imperative", 2021. [En línea] Disponible en: <https://www.socialprogress.org/>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [4] "Our World in Data", 2021. [En línea] Disponible en: <https://ourworldindata.org/>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [5] R. Lozada y A. Casas, *Enfoques para el análisis político*, 1ra ed. Bogotá, D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
- [6] L. von Bertalanffy, *Teoría General de los Sistemas*, 1ra ed. Nueva York: George Braziller, 1969.
- [7] D. Easton, *A framework for political analysis*, 1ra ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1965.
- [8] T. Parsons, *The social system*, 1ra ed. England: Routledge 11 New Fetter Lane London, 1951.
- [9] B. Braumoeller, "Systemic Politics and the Origins of Great Power Conflict", *The American Political Science Review*, vol 102, no. 1, pp 77-93, 2008. doi:10.2307/27644499
- [10] D. Easton, "An Approach to the Analysis of Political Systems", *World Politics*, vol 9, no. 3, pp 383-400, 1957. doi:10.2307/27644499
- [11] "Esperanza de vida al nacer, total (años) | Data", 2019. [En línea] Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.DYN.LE00.IN>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [12] "Tasa de mortalidad en un año (por cada 1.000 personas) | Data", 2019. [En línea] Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.DYN.CDRT.IN>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [13] "Tasa de natalidad, nacidos vivos en un año (por cada 1.000 personas) | Data", 2019. [En línea] Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.DYN.CBRT.IN>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [14] "Random Uniform Distribution", 2021. [En línea] Disponible en: <https://www.vensim.com/documentation/21090.html>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [15] "Random Normal Distribution", 2021. [En línea] Disponible en: <https://www.vensim.com/documentation/21095.html>. [Accedido: 09-dic-2021]
- [16] "Pulse Train", 2021. [En línea] Disponible en: [https://www.vensim.com/documentation/fn\\_pulse\\_train.html](https://www.vensim.com/documentation/fn_pulse_train.html). [Accedido: 09-dic-2021]
- [17] "Delay1 & Delay1I", 2021. [En línea] Disponible en: [https://www.vensim.com/documentation/fn\\_delay1.html](https://www.vensim.com/documentation/fn_delay1.html).