



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Economía, ambiente y paz:
Modelación desde el enfoque de la
economía de la complejidad**

Ángela Isabel Giraldo Suárez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Económicas
Bogotá, Colombia

2023

Economía, ambiente y paz: Modelación desde el enfoque de la complejidad

Ángela Isabel Giraldo Suárez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctora en Ciencias Económicas

Directora:

Ph.D. Nohra León Rodríguez

Línea de Investigación:

Economía del desarrollo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas

Bogotá, Colombia

2023

Dedicatoria

A mis padres, con todo mi amor.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Ángela Isabel Giraldo Suárez

Fecha 31/01/2023

Agradecimientos

Para ser totalmente justa con los agradecimientos, probablemente esta sección sería tan extensa como la tesis misma, porque pocas serían las líneas que hubiese escrito de no ser por las ideas de tantos que me han permitido explorar mis inquietudes a partir de sus hallazgos, análisis y avances. Así, me regalaron la mirada de la complejidad no solo para el análisis de un fenómeno, sino para la contemplación de la vida misma. También están esas muchas personas que, con su compromiso, ayuda y cariño han contribuido a escribir esta investigación.

Este estudio, además, es fruto de un esfuerzo institucional del hoy Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia, que me apoyó con recursos económicos para dedicarme a este proyecto académico. De igual forma, agradezco a la Universidad Nacional de Colombia, por ser ese espacio de conocimiento y solidaridad y entidad conformada por personas comprometidas con el proceso de formación y aporte a la sociedad. Allí, en particular, agradezco la dedicación y el cariño de Yadira Luna Silva que, con su labor en el doctorado, siempre me hizo sentir el apoyo fraterno.

Agradezco, también, las discusiones académicas con mi compañero Javier Valencia que, sin lugar a duda, han ayudado a acortar mis puntos ciegos.

De manera muy especial agradezco a mi directora de tesis, la profesora Nohra León Rodríguez, no solo por orientar esta investigación, sino por acompañarme en este largo proceso con gran cariño, respeto y compromiso.

Agradezco a mis padres, Nohemy y José Hugo, y a mis hermanos, Carlos y Alejandro, por ser esos grandes impulsores y por transmitirme siempre la fuerza y la confianza para continuar este recorrido.

Y, con amor, agradezco a mi esposo, Carlos, y a mis hijos, Arturo y Elena, por cederme tantas horas que debí estar con ellos para dedicarlas a este fin.

Resumen

Economía, ambiente y paz: modelación desde el enfoque de la economía de la complejidad

Bajo una creciente demanda de recursos mayor a la regeneración del sistema biofísico (Wackernagel *et al.*, 2021) se genera un estrés en los recursos ambientales, y la sociedad se enfrenta a incertidumbres relacionadas a su escasez y al cambio climático. En este marco, se observan conflictos que llevan a cuestionarse sobre mecanismos para comprender y adaptarse. Así, el planteamiento de Fisher y Rucki (2017) adquiere relevancia: el desarrollo económico, el funcionamiento de los ecosistemas, la paz y el manejo de los conflictos son componentes necesarios de la sostenibilidad, pero se desconoce, de manera profunda, cómo funcionan. Por tanto, el objetivo de esta investigación es analizar la presencia de comportamientos que promuevan la paz en el marco de la economía de la complejidad a partir de las dinámicas entre los sistemas económico, ambiental y social. Para ello, primero, se profundiza en un marco teórico, que abarca los tres sistemas mencionados y se indaga sobre el surgimiento de la paz en un sistema, autoorganizado y adaptativo, propio de sistemas complejos. Como elemento que conecta los subsistemas con la paz se identifica la cooperación. En segundo lugar, para reconocer emergencias que contribuyan a comprender las dinámicas que impactan la paz, se construye un modelo de simulación a partir de los modelos basados en agentes. Como hallazgos se identifica que implementar mecanismos de selección intergrupales pueden favorecer la emergencia de una paz estable y en escenarios en que se percibe escasez de recursos la estrategia no cooperativa es la que genera menos beneficios.

Palabras clave: ambiente, complejidad, cooperación, economía, paz, sostenibilidad.

Abstract

Economy, environment, and peace: modeling from the complexity economics approach

Under a growing demand for resources greater than the regeneration of the biophysical system (Wackernagel *et al.*, 2021) stress is generated in environmental resources, and society faces uncertainties related to their scarcity and climate change. In this framework, conflicts are observed that lead to questions about mechanisms to understand and adapt. Thus, the approach of Fisher and Rucki (2017) acquires relevance: economic development, ecosystem functioning, peace, and conflict management are necessary components of sustainability, but how they work is deeply unknown. Therefore, this research aims to analyze behaviors that promote peace within the framework of the complex economy based on the dynamics between the economic, environmental, and social systems. To accomplish this, first, a theoretical framework is deepened, which covers the three mentioned systems and inquiries about the emergence of peace in a self-organized and adaptive system, typical of complex systems. Cooperation is identified as an element that connects the subsystems with peace. Second, a simulation model is built from the agent-based models to recognize emergencies that contribute to understanding the dynamics that impact peace. As findings, it is identified that implementing intergroup selection mechanisms can favor the emergence of stable peace. In scenarios in which there is a perceived scarcity of resources, the non-cooperative strategy is the one that generates the least benefits

Keywords: environment, complexity, cooperation, economy, peace, sustainability.

Contenido

	PÁG.
RESUMEN	XI
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABLAS	XVI
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	XVII
INTRODUCCIÓN	1
1. CONFLICTO AMBIENTAL: MIRADA INTERSISTÉMICA	7
1.1 PROBLEMÁTICA	7
1.1.1 Relaciones intersistémicas y la paz.....	10
1.1.2 Problemática multiescalar	13
1.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO	16
1.3 LA SOSTENIBILIDAD EN CLAVE SISTÉMICA: PROBLEMA Y OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	24
2. SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS	28
2.1 SISTEMAS COMPLEJOS Y SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS	28
2.1.1 Sistemas complejos.....	31
2.1.2 Sistemas complejos adaptativos	32
2.2 LA ECONOMÍA COMO SISTEMA COMPLEJO ADAPTATIVO	38
2.2.1 Contextualización de la economía en un marco de sistema complejo adaptativo	39
2.2.2 Racionalidad de los agentes económicos en los sistemas complejos adaptativos.....	41
2.2.3 Aproximación metodológica de la economía de la complejidad.....	44
2.2.4 La economía como sistema complejo adaptativo y otras aproximaciones teóricas	47
2.2.5 Críticas a la aproximación compleja de la economía	50
2.3 EL SISTEMA AMBIENTAL DESDE LA TRANSICIÓN A LA SOSTENIBILIDAD.....	51
2.4 LA PAZ, EMERGENCIA DE UN SISTEMA COMPLEJO ADAPTATIVO	54
3. SISTEMAS ECONÓMICO, SOCIAL Y AMBIENTAL: MODELACIÓN BASADA EN AGENTES.....	63
3.1 MODELAMIENTO BASADO EN AGENTES (MBA).....	65
3.2 DISEÑO TEÓRICO DEL MODELO	67
3.2.1 Consideraciones, supuestos y alcance	67
3.2.2 Agentes y su comportamiento	69
3.2.3 Dinámicas de los sistemas económico, social y ambiental	70
3.2.3.1 Sistema ambiental.....	70
3.2.3.2 Sistema económico.....	73
3.2.3.3 Sistema social	87
3.3 PROTOCOLO PARA LOS MODELOS BASADOS EN AGENTES	94
3.3.1 Protocolo de diseño ODD	94
3.3.2 Protocolo de validación, verificación y calibración	99
3.3.2.1 Validación.....	99

3.3.2.2	Verificación y calibración.....	100
3.3.2.3	Consideraciones de calidad del modelo	101
3.4	HERRAMIENTA NETLOGO.....	102
3.5	SÍNTESIS DE LA MODELACIÓN	103
4.	EMERGENCIA DE LA COOPERACIÓN PARA LA PAZ	105
4.1	EXPERIMENTOS	106
4.1.1	Evaluación del modelo: caso global y países OCDE y no OCDE	107
4.1.1.1	Caso global	107
4.1.1.2	Caso OCDE vs. no OCDE.....	112
4.1.2	Consumo etnocentrista.....	117
4.1.3	Eficiencias en el consumo de recursos debido a la tecnología	123
4.2	APORTES DE LOS RESULTADOS PARA LA PAZ.....	128
	CONCLUSIONES	131
A.	ANEXO. CONDICIONES INICIALES Y PARÁMETROS DEL MODELO	135
B.	ANEXO. PROCESOS DE LOS AGENTES.....	137
C.	ANEXO. DINÁMICA DEL MODELO	141
D.	ANEXO. REPOSITORIOS DE MODELOS Y CÓDIGO	145
	REFERENCIAS	161

Lista de figuras

Figura 1-1:	Reporte global de desastres naturales por tipo, 1970-2019	9
Figura 1-2:	Interrelaciones en el macro nivel (sistemas económico-ambiental-social)	11
Figura 2-1:	Curva logística.....	30
Figura 2-2:	Sistema complejo adaptativo para la paz.....	59
Figura 3-1:	Balance en el modelamiento	64
Figura 3-2:	Dinámica del sistema ambiental.....	73
Figura 3-3:	Dinámica del sistema económico.....	87
Figura 3-4:	Dinámica del sistema social.	93
Figura 4-1:	Mecanismo de indagación en los experimentos	107
Figura 4-2:	Experimento 1. Escenario global de renovación actual. Personas sin percepción de escasez de recursos ambientales	109
Figura 4-3:	Experimento 1. Escenario global de renovación actual. Personas con percepción de escasez de recursos ambientales	111
Figura 4-4:	Experimento 1. Escenario de países OCDE	113
Figura 4-5:	Experimento 1. Escenario países no OCDE	115
Figura 4-6:	Experimento 2. Solo cooperadores compran a empresas cooperadoras	121
Figura 4-7:	Experimento 3. Individuos sin capacidad de percibir escasez de recursos .	125
Figura 4-8:	Experimento 3. Individuos con capacidad de percibir escasez de recursos	126
Figura B-1:	Diagrama de flujo del sistema económico.....	138
Figura B-2:	Diagrama de flujo del sistema social.....	139

Lista de tablas

Tabla 2-1:	La economía como sistema complejo adaptativo.....	46
Tabla 3 1:	Matriz de pagos	83
Tabla A 1:	Condiciones iniciales y parámetros del modelo.....	135

Lista de símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>MBA</i>	modelos basados en agentes
<i>OCDE</i>	organización para la cooperación y el desarrollo económico
<i>ODS</i>	objetivos de desarrollo sostenible
<i>RPI</i>	reciprocidades positivas intergrupales
<i>RNI</i>	reciprocidades negativas intergrupales
<i>SCA</i>	sistema complejo adaptativo

Introducción

No son pocos los retos a los que se enfrenta la humanidad en esta era del Antropoceno, con una población aún en aumento, que demanda recursos a un nivel mayor a la tasa de regeneración del sistema biofísico (Wackernagel *et al.*, 2021). Esto genera un estrés en los recursos ambientales que, inexorablemente, afecta a la sociedad y la enfrenta a grandes incertidumbres con respecto a amenazas que pueden representar no solo el cambio climático, sino la escasez de recursos. En este marco, se observan desplazamientos y conflictos que invitan a cuestionarse sobre mecanismos que permitan comprender y adaptarse a esta situación.

Uno de los mecanismos actuales, que busca mejorar las condiciones humanas en este contexto de preocupación ambiental, son los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2022). Estos evidencian que, para asegurar el bienestar humano, se debe garantizar el del planeta en un acuerdo tácito de bienestar entre la sociedad y el mundo que se habita. Entre estos objetivos se encuentra el de la paz que, como para muchos retos que enfrenta la humanidad, comprender cómo surge y las medidas para estimularla no es tarea simple.

La ausencia de paz tiene grandes costos para las naciones, no solo en cuanto al sufrimiento para su población, sino que, en términos económicos, retrasa el progreso y el acceso al bienestar. Para 2019, el impacto económico de la violencia fue estimado en \$ 14,4 trillones de dólares, lo que equivale a \$ 5 dólares por persona, por cada día del año. Por ello, en un contexto de paz, redireccionar estos recursos podría mejorar, de manera significativa, el bienestar de muchas personas (Institute for Economics & Peace, 2021).

Pero no son pocas las fuerzas y son complejos los mecanismos que determinan la paz que, para esta investigación, se considera a partir de la definición de Coleman de paz sustentable como «el estado donde la probabilidad de usar conflictos y violencia destructivos para

resolver problemas es tan baja que no entra en la estrategia de ningún agente, mientras que la probabilidad de usar la cooperación y el diálogo para promover justicia social y bienestar es tan alto que gobierna la organización social y la vida» (Coleman, 2016, p. 150). Entre estas fuerzas, en algunos contextos, se encuentran relaciones entre lo ambiental y lo económico que afectan la paz; por ejemplo, alteraciones en los medios de vida natural representan conflictos violentos que están asociados a crisis económicas, explotación de recursos y degradación ambiental (Scheffran, 2016).

En este ámbito de dinámicas entrelazadas entre lo económico y lo ambiental, en el escenario social, estos mecanismos presentan incidencia sobre la paz. Este es, entonces, el contexto en el que esta investigación centra su objeto de estudio. Para ello, parte de la sostenibilidad como recurso epistemológico sobre el futuro deseado (Mebratu, 1998). Este es dinámico y está sujeto a las realidades y expectativas de la sociedad en el tiempo. Desde esta perspectiva, es relevante el planteamiento de Fisher y Rucki (2017) según el cual la sostenibilidad es el proceso para mantener los avances logrados en las dinámicas de los sistemas deseables, mientras se cambian, modifican o mejoran, de manera activa, otras dinámicas para acercar el sistema al objetivo de justicia social y bienestar humano. Por esta razón el desarrollo económico, el funcionamiento de los ecosistemas, la paz y el manejo de los conflictos se hacen componentes necesarios de esta sostenibilidad.

Sin embargo, Fisher y Rucki (2017) también observan que solo se tienen entendimientos superficiales de cómo funcionan los impulsores de cualquier componente de sostenibilidad (desarrollo económico, funcionamiento del ecosistema y paz). Se sabe que la calidad ambiental afecta el desarrollo económico y que el acceso a recursos afecta la probabilidad de conflicto, pero falta comprensión acerca de estos procesos de retroalimentación dentro del sistema que componen. Por lo tanto, resulta relevante, para las ciencias económicas, **lograr una mayor comprensión de cómo los procesos de retroalimentación entre la dinámica económica y el acceso a los recursos afectan la paz en un contexto social.**

Pero para comprender estas dinámicas son necesarias aproximaciones teóricas holísticas y sistémicas. En ese sentido, los sistemas complejos ofrecen las herramientas epistemológicas para identificar los comportamientos que surgen a partir de la interacción de los componentes de un sistema (Newman, 2009) que no está sujeto a un control central (Mitchell, 2009) y en el que se presentan ciclos de retroalimentación que dificultan distinguir

causas de efectos, además de generar retrasos que dan paso a umbrales, discontinuidades y límites (Costanza *et al.*, 2013). Cabe destacar que la emergencia es el comportamiento macroscópico que surge de la ejecución de las reglas simples de los elementos que conforman el sistema (Mitchell, 2009).

A partir de estos enfoques teóricos, la economía ha empezado a abordar problemas que la ocupan con una perspectiva de sistema abierto, interconectado, a través de redes que evolucionan de manera constante. Se la considera como un sistema complejo, adaptativo, cuya dinámica está trazada por mecanismos evolutivos de selección multinivel (Newman, 2009), diversificación (Paravantis, 2016) y dinámicas de adaptación y aprendizaje (Gowdy *et al.*, 2016; Wilson, 2016b). Partiendo de allí la aproximación de la economía de la complejidad.

Así mismo, desde el enfoque de las ciencias complejas, la transición a la sostenibilidad, como campo de estudio, busca promover cambios en el sistema sociotécnico, establecidos a modo de producción más sostenible (Markard *et al.*, 2012).

Por consiguiente, dado que es necesario entender mejor el funcionamiento intersistémico en relación con la paz y que, desde el enfoque de las ciencias de la complejidad, es posible lograr una mayor comprensión de ellas, **el objetivo de esta investigación es analizar la emergencia de comportamientos que promuevan la paz en el marco de la economía de la complejidad a partir de las dinámicas que ya existen entre los sistemas económico, ambiental y social.**

Para ello, se desarrolla una propuesta teórica a partir de la aproximación de los sistemas complejos adaptativos para comprender cómo las dinámicas y mecanismos de retroalimentación de los sistemas económico, social y ambiental ejercen incidencia sobre la paz a través de interacciones de los agentes individuales. En esta propuesta, se identifica la cooperación como elemento que conecta los tres subsistemas con la paz.

De acuerdo con Bowels y Gintis (2002), cooperar implica decidir mejor por comportamientos benéficos en los grupos para coevolucionar. Sus estudios identificaron que comportamientos cooperativos, que traen beneficios a los miembros de una agrupación, permiten que aquellas conformadas por individuos altamente cooperativos dominen en

conflictos intergrupales. En esta dirección, Cottey (2018) sugiere que la cooperación puede llevar a la prevención del conflicto, ya que este prospera en ambientes de individualismo, competencia y acumulación al mostrar una actitud severa contra los perdedores.

Por otra parte, durante la investigación, también se desarrolla un **modelo de simulación, que da cuenta de las dinámicas entre los sistemas económico y ambiental y la paz, a partir de las interacciones individuales**. Para este fin, siguiendo la metodología de las ciencias de la complejidad, se hace uso de la herramienta de modelos basados en agentes (MBA) para modelar el comportamiento de los agentes heterogéneos al ofrecerles independencia en la toma de decisiones, capacidad de percibir cambios en el entorno y de reaccionar, la posibilidad de actuar en función de sus objetivos al ser proactivos, habilidades sociales al poder comunicarse y actuar entre ellos, y, también, memoria para aprender y adaptar sus comportamientos basados en experiencias (Sarmiento-Vásquez & López-Sandoval, 2017).

Este es un enfoque *bottom-up* en el que, a partir de la modelación de interacciones simples entre los agentes, cuyas decisiones están determinadas por sus actos previos, que han modificado el entorno del que toman información para, de nuevo, decidir en un proceso de autorreferenciación, se evalúan las emergencias en un nivel meso o macro, lo que ofrece una mayor comprensión sobre las dinámicas que favorecen la paz.

Los resultados de este modelo permiten evaluar, comparativamente, varios escenarios, con el fin de reconocer emergencias que aporten a la paz a partir de la identificación de estrategias dominantes, tomadas por actores a nivel individual.

El alcance del modelo no contempla la conformación de instituciones formales, ni simula un mercado guiado por los precios, ya que implicaría un nivel de complejidad tan alto que dificultaría su interpretación. Por esta razón, se modelan los comportamientos que se consideran relevantes a la luz de la revisión bibliográfica de la problemática señalada.

A pesar de estas acotaciones, el marco teórico propuesto y la herramienta de simulación diseñada se constituyen en instrumentos confiables no solo para identificar emergencias que aporten mayor comprensión en el entendimiento de la paz, sino porque permiten

plantear nuevas preguntas que lleven a encontrar caminos para su promoción en un contexto sostenible, y contribuir al ODS 16: paz, justicia e instituciones sólidas.

En esta investigación, en el capítulo 1, «Conflicto ambiental: mirada intersistémica», se presenta, en detalle, el contexto que da origen al problema de investigación: falta de comprensión de cómo los procesos de retroalimentación entre la dinámica económica y el acceso a los recursos ambientales afectan la paz en un contexto social. Allí mismo, se explica el estado del conocimiento en el que se entregan las perspectivas teórico-metodológicas desde el punto de vista de la economía para aportar a esta falta de entendimiento; posteriormente, se introducen la pregunta y los objetivos que guían este estudio.

En la siguiente sección, «Sistemas complejos adaptativos», se desarrolla el marco teórico a partir de la aproximación de sistemas complejos y evolutivos. Se propone un camino para la comprensión de la paz como emergencia de la interacción de los subsistemas económicos, social y ambiental.

En el apartado tres, «Sistemas económico, social y ambiental: modelación basada en agentes», se describe cómo se concibe la realidad para ser modelada, se expone la pertinencia de los MBA para la comprensión de los sistemas complejos adaptativos, y se presentan el protocolo de modelación ODD (Overview, Design Concepts and Details) y los mecanismos de validación, verificación y calibración para el modelo de simulación.

Posteriormente, en cuarto capítulo, «Emergencia de la cooperación para la paz», el lector se encuentra con los resultados y discusiones para tres experimentos: en el primero, se evalúa el comportamiento del modelo desarrollado para el caso global y para subgrupos de países; en el segundo, se estudia el efecto de comportamientos etnocéntricos a favor de perfiles cooperativos; y en el tercero, se analiza el impacto de las eficiencias en el consumo de recursos ambientales gracias a adelantos tecnológicos en los comportamientos del sistema.

Los aprendizajes de este proceso investigativo se presentan en las conclusiones. Ahí se sugieren posteriores investigaciones para ahondar en los hallazgos. De igual forma, se acompaña el manuscrito de cuatro anexos. En el anexo A, se encuentran los parámetros

del modelo y su explicación. En el B, se esquematizan los diagramas de flujo, que representan, desde el rol de cada agente, la secuencia de todo el modelo y de la dinámica del espacio en el que interactúan los agentes. En el C, se narra el funcionamiento de todo el modelo desde la perspectiva de la programadora. Y, en el D, se encuentra la ubicación de acceso a los modelos y el código del modelo principal del que se desprenden los experimentos.

Finalmente, se presentan las referencias, es decir, la compilación de las fuentes consultadas, su estudio y clasificación. Esto se constituye en la base de las ideas desplegadas en la investigación.

1. Conflicto ambiental: mirada intersistémica

Este capítulo, en un primer momento, esboza cómo la paz surge a partir de las dinámicas de varios sistemas, cuyas interrelaciones no son siempre nítidas, ni obvias, pero que subyacen a la interacción de los agentes sociales y económicos que actúan en un sistema ambiental. En el segundo acápite, se presenta el estado del conocimiento y se observa que el enfoque de las ciencias de la complejidad está más cerca de dar respuesta al problema identificado y, finalmente, se formula la pregunta de investigación, además de los objetivos que trazan el camino para resolverla y para dar origen al aporte teórico y metodológico que este estudio presenta.

1.1 Problemática

Hoy en día, es casi innegable que el entorno ha determinado la evolución del ser humano, pero pareciera que se ha cruzado un umbral y que se ha establecido un nuevo orden en los poderes. Antes, el ser humano era uno de tantos seres vivientes que habitan el planeta, con un poder sobre este poco significativo; y ha pasado a convertirse en una especie con una gran capacidad de incidir en sus dinámicas. Este último estadio hace referencia al Antropoceno, considerado como el intervalo del que hace parte el tiempo presente. En este, varios procesos y condiciones genealógicas son profundamente alteradas por la actividad humana. Muchos ubican su inicio en la Revolución Industrial; el actual cambio climático se reconoce por su naturaleza antropogénica, como consecuencia de las más altas emisiones de gases de efecto invernadero registradas desde hace 800 000 años (Brauch, 2019).

Dicho comportamiento antropogénico se origina, según Brauch (2019), como consecuencia de cinco grandes cambios: i) cambio de cultura, con una visión mundial de iluminación

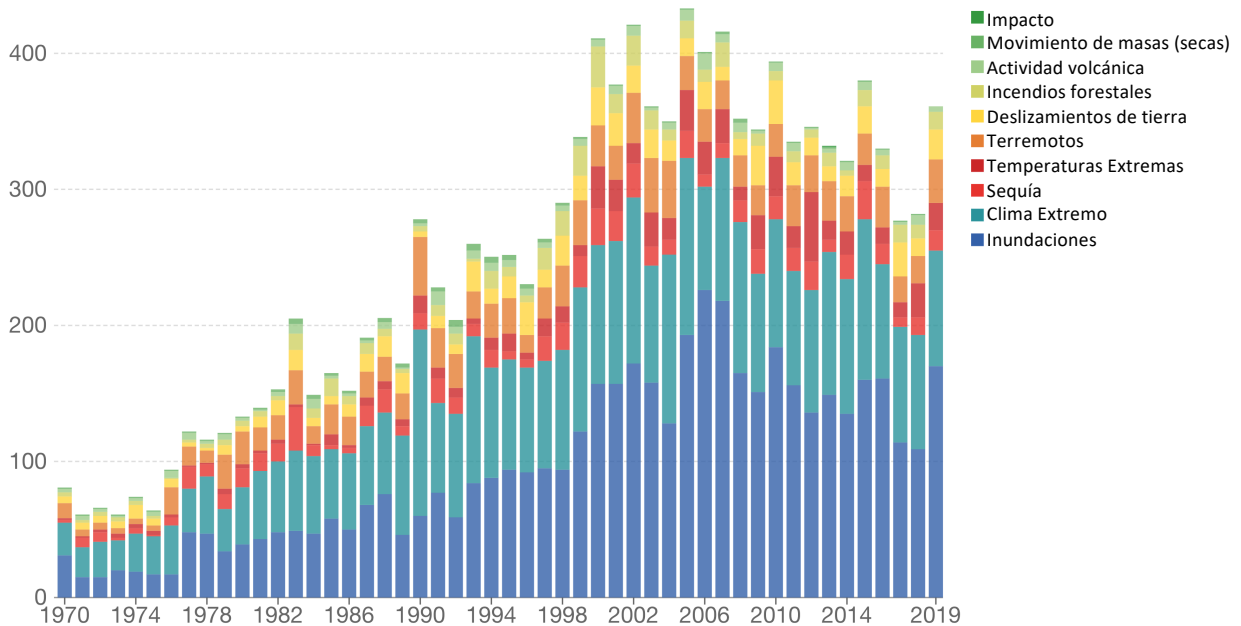
artificial de los espacios; ii) surgimiento de nuevas políticas ideológicas con las revoluciones industriales del Reino Unido, Francia y Estados Unidos; iii) cambio en el sistema económico capitalista británico en el que una burguesía financiera proveía recursos y capital para el emprendimiento; iv) revolución científica en las ciencias naturales que propició innovaciones tecnológicas que facilitaron el cambio económico en el Reino Unido, Alemania y Estados Unidos; y v) un cambio económico, como resultado de complejas interacciones, que llevó a un sistema energético barato de energías fósiles (carbón, gas, petróleo) y facilitó un cambio en los estilos de vida, principalmente, en Occidente.

De esta forma, estas variaciones en los sistemas económico, social y ambiental afectan los distintos tipos de sistemas y a diferentes escalas. Entre muchas de ellas, se encuentran: i) para 2015, la población humana alcanzó los 7349 millones de personas con una proyección, a 2050, de 9725 millones (Brauch & Oswald Spring, 2016). Esto acentúa la presión sobre los recursos naturales; ii) solo entre 1980 y 2000, en los trópicos, cerca del 55 % de los bosques vírgenes y 21 % de los perturbados fueron desplazados por actividades agrícolas, lo que ha implicado una pérdida de biodiversidad y, por tanto, de recursos ecosistémicos que proveen agua, alimento, oxígeno, energía y fibra, que apoyan el ciclo de nutrientes, carbono, nitrógeno y azufre. Estos ciclos actúan como biodigestores de desechos y eliminadores de toxinas, reguladores del clima, del agua, las olas, controlan inundaciones, vientos y tormentas, y ofrecen servicios culturales de bienes materiales e inmateriales (Brauch & Oswald Spring, 2016); iii) la temperatura del aire ha aumentado un grado en los últimos cien años; los últimos años ha sido los más calurosos, lo que ha implicado deshielos, que llevan a un aumento en el nivel del mar de 7 a 8 pulgadas desde 1900, a acidificaciones oceánicas y a un aumento del vapor de agua atmosférico (U.S. Global Change Research Program, 2017); y iv) para 2015, cerca de 850 millones de personas sufrían de hambre, (cifra que podría incrementarse con el aumento de la población). Sin embargo, países como China o India han aumentado su demanda de carne, leche y huevos, que provienen de animales alimentados con cereales; esto ha provocado un incremento en sus precios (Brauch & Oswald Spring, 2016). De esta manera, la capacidad de los ecosistemas para renovarse se está convirtiendo en cuello de botella para la economía humana (Wackernagel *et al.*, 2021).

Por tanto, el crecimiento poblacional, atado a un nivel de consumo regido por las estructuras socioeconómicas que el ser humano ha creado, ha generado unas dinámicas en el uso de la energía y su afectación ambiental. De ahí que el uso exosomático de la energía (para mantener una sociedad estructurada), utilizada en los hogares y el transporte, e indirectamente gastada en la producción, no puede ser explicada por la biología humana, sino que depende de la economía, la cultura, la política y las diferencias sociales. En ese sentido, la naturaleza proporciona unos ciclos biogeoquímicos de reciclaje de elementos químicos, como los ciclos del carbono o los ciclos del fósforo y, a partir de la forma en que opera la economía actual, estos se aceleran aumentando el dióxido de carbono (Alier, 1998). Esto lleva a alteraciones importantes en el sistema ambiental.

A continuación, en la figura 1-1, se representa el número de desastres naturales por año, clasificados por tipo. Se observa cómo estos eventos vienen presentando un crecimiento acentuado.

Figura 1-1: Reporte global de desastres naturales por tipo, 1970-2019



Fuente: tomado de *OFDA/CRED International Disaster Databases*, por EMDAT, 2020 (OurWorldInData.org/natural.disaster).

Pero los cambios y comportamientos que se observan en el sistema ambiental no provienen exclusivamente del sistema económico, sino del compendio de interacciones del sistema social en el que, además de las relaciones económicas, se encuentra el conjunto de relaciones entre lo humano y su espacio habitado, espacio que, a su vez, incide en el comportamiento humano.

Uno de estos comportamientos son los relacionados con la paz. Así, el International Panel of Climate Change (IPCC) (2014) señaló que, en medio del cambio climático, las personas afectadas por conflictos violentos son particularmente más vulnerables (Brauch & Oswald Spring, 2016).

1.1.1 Relaciones intersistémicas y la paz

Lo económico afecta lo ambiental, pero este, a su vez, afecta lo social. Así, se teje una compleja red de interrelaciones, en la que no se precisa un origen o una relación directa. Por ejemplo, si se habla de la Revolución Industrial, que da paso a la era antropogénica, se encuentran diversas explicaciones que dan cuenta del mismo fenómeno, ya que no tuvieron lugar tan solo una serie de adelantos tecnológicos o de cosmovisiones en el siglo XVIII, sino, como plantea Schmidt (1959), es necesario considerar la evolución de miles de procesos de producción desde el trabajo manual, hasta una producción en masa.

Se lee, entonces, la historia a través de una cantidad de hilos que la tejen. De esta manera, Schmidt (1959) señala que la Revolución Industrial responde a diferentes circunstancias, como la obstaculización del desarrollo técnico en la Edad Media debido a la «prohibición de comprar en grandes cantidades». Se podía comprar materias primas solo en función de los encargos que ya existían, por tanto, ¿para qué invertir en máquinas si no podían ser usadas? Una vez abolida la prohibición, ya tenía sentido pensar en máquinas que ampliaran la producción.

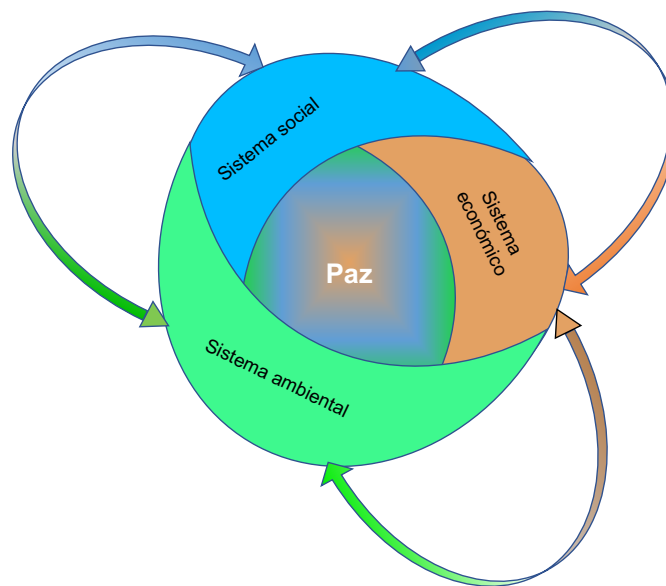
También hubo cambios sociales importantes, como el triunfo del racionalismo, que exigía la constatación y, como lo metafísico (divino) no lo era sino después de la muerte, los problemas de la vida cobraron sentido. Los estudios de la economía y su relación con el trabajo empezaron a ser preocupaciones; se prefirió el disfrute por encima de la adoración al trabajo; la veneración al progreso y al éxito económico resultaron gérmenes de ideas

mercantilistas (las exportaciones deben superar las importaciones), marco en el que surge la Revolución Industrial.

Estos son solo algunos elementos que atañan el fenómeno, pues están las transformaciones que trajo el Renacimiento, la riqueza obtenida por el «descubrimiento» de América, las guerras napoleónicas, que demandaron ingenio, y, así, un abanico de interacciones y dinámicas que van dando paso a un fenómeno que no solo transformó la sociedad humana, sino el sistema ambiental en el que se desenvuelve.

De esta misma forma, entre dinámicas complejas, la paz se presenta como un comportamiento que aparece o desaparece entre las interacciones del sistema social y las fuerzas económicas que se relacionan con el sistema ambiental.

Figura 1-2: Interrelaciones en el macro nivel (sistemas económico-ambiental-social)



Fuente: elaboración propia.

En la figura 1-2, se representan los tres sistemas (económico, social y ambiental) como independientes, pero cohesionados a la vez, y desde una perspectiva más agregada, para conformar un metasistema. En este nivel de abstracción, se simbolizan dinámicas entre ellos en distintas direcciones y, de estas, emerge la paz (o su ausencia). A continuación, se presentan las dinámicas halladas en la literatura, en las que se observan comportamientos

que no son asignables, estrictamente, a un solo sistema; todo lo contrario, se evidencia que, en algunos casos, pueden operar, de manera simultánea, entre ellos, o con mecanismos de retroalimentación. Entre estas dinámicas, se puede considerar:

- La continua expansión de la esfera humana (Scheffran, 2016) amplía demanda y ejerce presión sobre los recursos naturales y ecosistémicos.
- Las empresas presionan, en algunos casos, el surgimiento o mantenimiento de conflictos en el sistema social, dadas diferentes tasas de crecimiento económico en combinación con diferentes tasas de crecimiento tecnológico. Esto equivale a una tendencia a llevar a cabo actividades a niveles antes no experimentados por la sociedad, o a adquirir cierto grado de influencia o control sobre una extensión más amplia del espacio, o sobre un mayor número de personas (Choucri & North, 1972, citados en Stephenson, 2016).
- Procesos insostenibles recrudecen la crisis ambiental, que afecta la infraestructura y los ecosistemas (U.S. Global Change Research Program, 2017), así como desestabilización social, que puede generar acciones violentas por escasez de recursos, como agua potable o alimentos (Brauch, 2016).
- Procesos económicos, como el transporte mundial, el comercio y los mercados financieros también están sujetos al cambio climático. Transacciones financieras y de información sobre precios representan transacciones virtuales, que vinculan eventos ambientales en cortos períodos. Si hay una afectación en un lugar como efecto del clima, puede haber pérdidas de producción o quiebra de empresas, que se reflejan en el mercado de valores y se propagan a través de redes y mercados globales (Scheffran, 2016).
- En áreas afectadas por el conflicto, prevalece una administración ineficiente de los ingresos, incluyendo aquellos que provienen de los recursos naturales (Naciones Unidas, Pacto Global, 2010).
- En periodos de conflicto, se han encontrado mayores amenazas al ambiente debido a procesos crecientes de deforestación, uso inadecuado de la tierra, retorno de la población desplazada sin una planeación apropiada y gran dependencia del sector primario, con importantes impactos en el medio ambiente (Hochschild, 2015; Suárez *et al.*, 2017).

- Recursos naturales de alto valor pueden potenciar la paz o afectarla al convertirse en foco de disputas violentas o al financiar grupos que promueven el conflicto violento (Lujala & Rustad, 2012).
- Quienes viven conflictos violentos son más vulnerables al cambio climático, dada su menor capacidad organizativa para afrontarlo (Brauch & Oswald Spring, 2016).
- Alteraciones de los medios de vida naturales y sociales, en diversas regiones del mundo, representan amenazas de conflictos y actos de violencia relacionados, incluyendo intervenciones militares, guerras civiles asociadas a crisis económicas, hambrunas, explotación de recursos y degradación ambiental (Scheffran, 2016).
- El cambio climático es un multiplicador de riesgos, ya que puede afectar el funcionamiento de infraestructura crítica, redes y suministros; los asentamientos humanos e instituciones políticas; puede intensificar el nexo entre agua, energía y alimentos; puede llevar a pérdidas de producción; inducir a un aumento de precios; y acentuar las crisis financieras a través de mercados globales. Todo esto socava condiciones sociales de vida y de estabilidad política, al estimular movimientos migratorios y afectar dimensiones de seguridad, con nivel de percepción creciente de amenazas y conflictos violentos (Scheffran, 2016).
- En gran medida, comunidades locales de los países en desarrollo dependen de la producción de cultivos, ganadería, pesca, caza, leña y recolección de productos forestales, lo que implica que, su interrupción por afectaciones ambientales pone en peligro los medios de subsistencia (Randhir, 2016).

Estos elementos son comportamientos, en su mayoría, a gran escala; sin embargo, sus dinámicas se presentan en diferentes niveles, desde las microinteracciones, pasando por niveles meso, hasta lo que se evidencia en los entornos más amplios. Por tanto, este tipo de problemáticas pueden tener la particularidad de ser multiescalar.

1.1.2 Problemática multiescalar

Es posible que pequeños grupos de individuos, o perturbaciones ambientales puntuales, puedan poner en marcha cadenas globales de eventos que influyan, incluso, en las relaciones internacionales. Por ejemplo, los desastres naturales, en una determinada región, pueden socavar la legitimidad y la capacidad de los Estados para proteger a sus

ciudadanos de daños. Si la agricultura de un país en desarrollo sufre importantes afectaciones, están en juego el sustento y la existencia de muchas personas. La pérdida de vidas, ingresos, riqueza, trabajos, salud, familia o amigos provoca malestares que amenazan el contrato social y socavan el orden político. Algunos de estos procesos ocurren lentamente y contribuyen a la erosión de la estabilidad social y política, mientras que otros se dan rápidamente y superan la capacidad de resolución de problemas y de adaptación de las comunidades. Por tanto, dadas estas interdependencias globales, las desestabilizaciones, en cualquier lugar, no pueden ser ignoradas. Por ejemplo, el cambio en las temperaturas y las precipitaciones acentúa las migraciones humanas y trae consigo problemas de seguridad, que es un factor de conflicto. Así, mientras más fuertes sean los impactos y más subsistemas estén involucrados, más difícil será para las sociedades enfrentar las consecuencias (Scheffran, 2016). De allí que las interdependencias entre las dimensiones ambientales y sociales de los ecosistemas generen efectos complejos en cascada y combinados (de Coning & Krampe, 2021).

Estos comportamientos son el reflejo de lo que ocurre en las interacciones entre los individuos. Cada uno se relaciona con otros, o con grupos o instituciones. Y cada individuo, en tanto entidad, ejerce —para la representación de la realidad que aquí se describe— varios roles. Es decir, este es un mismo agente que interactúa en diferentes contextos, como ciudadano, consumidor, trabajadora, estudiante, empresaria, inversionista, padre, madre o hijos, entre otros. Incluso, se interpretan varios roles al tiempo, pero, para fines de comprensión, se nombran de manera separada. Estos comportamientos están sumidos en decisiones que obedecen a unas expectativas y a una realidad del entorno, que ha sido sujeta de cambio a partir de decisiones previas, pero siguen transformando el entorno y transformándose, ellos mismos, en procesos continuos de retroalimentación que, en términos, de Flórez y Thomas (1993), son retroacciones. En medio de esta multiplicidad de roles, los intereses resultan en dilemas o disyuntivas que, incluso, se dan a lo largo del tiempo, porque una decisión actual puede estar condicionada por decisiones o hechos anteriores y, a su vez, impactar en el futuro. Entonces, la decisión de la ciudadana hoy, puede afectar a su hijo como consumidor mañana. De allí que el análisis de estos fenómenos debe contemplar la capacidad de aprendizaje, adaptación y evolución como respuesta a la incertidumbre que trae consigo todo tiempo venidero.

En cierto modo, estas interacciones de los individuos han estado influenciadas por la aproximación epistemológica dominante en la economía. Las reflexiones de Adam Smith¹ sugieren que el ser humano actúa por su propio egoísmo y, al lograr su provecho, la sociedad satisface sus necesidades (Smith, 1994). Esta concepción de que cada agente actúa por su propio provecho ha persistido en los modelos económicos; la naturaleza de la teoría económica parece haber sido influenciada por esta premisa (Sen, 2007a). El bienestar económico, entonces, ha estado dominado por la tradición utilitarista, que considera las agregaciones interpersonales; el bienestar común sería la suma total de todas las utilidades de las personas involucradas (Sen, 2007b). El concepto de utilidad planteado por Bentham hace referencia a la propiedad o tendencia, en cualquier objeto, a producir beneficio, ventaja, placer, bien o felicidad, o prevenir la pena, el mal o la infelicidad (Bentham, 1780).

Partir de la utilidad como una unidad de cuenta en la que se busca la mayor felicidad menos cualquier tipo de pena relacionada deriva en una relación de compensación que se constituye en una relación costo-beneficio. En el modelo económico, esta racionalidad se traduce en lo que se está dispuesto a pagar por dicha utilidad *willingness to pay*. De esta forma, el bienestar económico se asume como lineal. Es decir, el bienestar de todos obedece a la suma de cada bienestar individual. Desde el punto de vista de la lógica de la utilidad, este sería el mayor provecho para cada individuo que provee los bienes o servicios a los menores costos posibles, que deriva en un modelo de competitividad dominante que promueve un consumo masivo poniendo mayor presión sobre los recursos ambientales. Desde esta perspectiva, muchos modelos de negocios se basan en incrementos constantes de productos; así, se estimula la cultura del consumo al asegurar cambios de moda, tendencias tecnológicas y ciclos cortos de vida de los productos (Göpel, 2016).

¹ «El hombre reclama en la mayor parte de las circunstancias la ayuda de sus semejantes y en vano puede esperarla solo de su benevolencia. La conseguirá con mayor seguridad interesando en su favor el egoísmo de los otros y haciéndoles ver que es ventajoso para ellos hacer lo que les pide. Quien propone a otro un trato le está haciendo una de esas proposiciones. Dame lo que necesito y tendrás lo que deseas, es el sentido de cualquier clase de oferta. Y así obtenemos de los demás la mayor parte de los servicios que necesitamos. No es la benevolencia del carnicero, del cervecero o del panadero la que nos procura el alimento, sino la consideración de su propio interés. No invocamos sus sentimientos humanitarios sino su egoísmo; ni les hablamos de nuestras necesidades, sino de sus ventajas» (Smith, 1994, pp. 45-46).

La forma de asignación de los recursos pone el énfasis en la utilidad de la venta de los bienes o servicios, es decir, cuando ya han sido consumidos, y no en la utilidad que se puede obtener al no hacer uso de recursos naturales para la producción de dichos bienes o por no haber generado desechos o contaminación propios de las actividades de producción económica (Göpel, 2016). Sin embargo, este tipo de limitaciones, propio de la racionalidad económica de maximización de utilidad, no solo atañe lo ambiental, sino que, también, puede tener implicaciones sociales, con efectos similares a los ambientales, por ejemplo, los problemas en salud de una población producidos por el funcionamiento de una empresa.

Hasta aquí se han descrito, a nivel macro, las interrelaciones e impactos entre los sistemas económico, ambiental y social, y, posteriormente, se ha señalado cómo, a nivel micro, se toman decisiones influenciadas por el entorno, que ha sido modificado, en parte, por las decisiones de quienes lo habitan. Dichas decisiones han estado dominadas por una racionalidad económica utilitarista.

Como se mencionó en la introducción, el problema de investigación se centra en la falta de comprensión de cómo los procesos de retroalimentación entre la dinámica económica, y el acceso a los recursos ambientales afectan la paz en un contexto social.

Sin embargo, esta problemática amplia y compleja, ha sido planteada, sobre todo, de forma segmentada. Recientemente, se han identificado aproximaciones más holísticas, en las que los abordajes económicos se complementan con otras disciplinas, como se muestra a continuación.

1.2 Estado del conocimiento

La aproximación de esta investigación es económica, pero, como se ha explicado, en el contexto en el que surge el problema de investigación, este no atañe, exclusivamente, a problemas económicos, sino que se encuentra en medio de varios comportamientos cuyo análisis puede ser transdisciplinar. Esto requiere de marcos teóricos y metodológicos para indagar y responder a partir de estos traslapes de las áreas del conocimiento. Esto es fruto de un cambio en la forma de concebir los fenómenos.

Flórez y Thomas (1993) sugieren que el positivismo de Comte del siglo XIX, en el que la información es la única base del conocimiento y este solo se obtiene a partir del estudio del fenómeno, y en el que la realidad objetiva se determina mejor en un aislamiento experimental, implicó una visión reduccionista del universo, centrada en objetos desconectados y en una separación disciplinar. Es decir, las ciencias se desarrollan cerradas hacia ellas mismas al alimentar cada vez menos los diversos campos científicos y ofrecer, entonces, explicaciones científicas, individuales, restringidas y fragmentadas. Sin embargo, en la segunda mitad del siglo pasado, surgen visiones más holísticas, que empiezan a irrumpir con el reduccionismo tradicional.

Esta dinámica no ha sido ajena al tipo de indagaciones y a la forma de resolverlas. Es por ello que, en esta sección, se muestra cómo la economía ha abordado, de manera segmentada, el problema de investigación y cómo, al empezar a conectar los problemas que, inicialmente, se intentaron resolver de una manera más fragmentada, se evidencia el surgimiento de propuestas teóricas y metodológicas más sistémicas.

De manera específica, en la economía hay varios enfoques para indagar sobre el impacto de la dinámica económica sobre el sistema ambiental y, en algunos casos, el social. Uno de ellos es la economía ambiental, que utiliza las herramientas convencionales del análisis económico para el estudio de problemas ambientales. Plantea que los seres humanos buscan satisfacer sus necesidades al hacer uso de los recursos de la tierra, mano de obra, maquinaria, infraestructura y recursos naturales, entre otros, y organiza estos recursos con el fin de maximizar su bienestar de acuerdo con las necesidades satisfechas. En este caso, el mercado juega un papel fundamental, ya que allí se procesa toda la información que las personas proporcionan sobre sus preferencias y posibilidades. De aquí surgen señales sobre el valor de las cosas, como los precios que, en sí mismos, contienen información necesaria para que las personas organicen su comportamiento en su papel de productores y consumidores (Azqueta, 2007). Esta corriente busca establecer la función de tasas óptimas de extracción de recursos de acuerdo con su oferta, demanda, tasa de interés, tasa de descuento, así como de la distribución de costos de contaminación que represente la internalización de externalidades causadas en el ambiente por este procedimiento (Serna-Mendoza, 2015).

Otra perspectiva es la economía verde, que ha sido ampliamente adoptada por instituciones políticas, como el Banco Mundial y ciertos gobiernos. Este ha sido un enfoque para apuntar a soluciones sobre el cambio climático en foros políticos internacionales. Este abordaje surge a finales del siglo XX como respuesta a la infravaloración de los costos ambientales y sociales en el sistema de precios del momento (Loiseau *et al.*, 2016). El capítulo de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la define «como aquella que da como resultado una mejora del bienestar y la equidad social, al tiempo que reduce significativamente los riesgos ambientales y las carencias ecológicas». Se caracteriza por ser baja en carbono, eficiente en recursos y socialmente inclusiva (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2018).

La economía del comportamiento también aporta al aproximarse a los problemas ambientales no solo al hacer referencia a los bienes privados, sino de manera muy importante a los bienes comunes (Sen, 2007a). Este enfoque sugiere que, establecer condiciones bajo las cuales las personas cooperen y muestren un comportamiento de reciprocidad puede resolver los dilemas sociales. En ese sentido, el trabajo de Ostrom (2010) es significativo, ya que no solo a partir de una visión económica e institucional, sino política y sistémica, argumenta que los seres humanos cuentan con una estructura motivacional más compleja y con una mayor capacidad de resolver dilemas sociales que la que postula la teoría de elección racional, que asume que los individuos tienen información completa sobre todas las acciones posibles para ellos y sobre las estrategias que otros podrían adoptar, así como sobre las probabilidades de las consecuencias específicas que resultan de sus propias elecciones. Este enfoque de los comunes sugiere que es posible a través de un sistema de gobernanza adaptativa (Dietz *et al.*, 2003), en el que se tienen en cuenta los comportamientos cooperativos resolver dichos dilemas sociales.

Otro enfoque es la economía ecológica, que surge de los estudios realizados por Nicholas Georgescu-Roegen al aplicar la segunda ley de la termodinámica a consideraciones económicas. Esta aproximación sostiene que los procesos económicos (de producción) convierten la baja entropía de los bienes y servicios originales en alta entropía de bienes y servicios finales (Jakimowic, 2020). Así, este planteamiento reconoce los límites ecológicos del crecimiento económico. En este nivel de abstracción, el funcionamiento de la economía requiere de suministros adecuados de energía y materiales y de poder disponer de los

residuos de manera no contaminante (Alier, 1998). Cabe resaltar que la economía ecológica acoge una aproximación sistémica y evolutiva al considerar que el sistema socioeconómico modifica el biológico, que debe adaptarse a los cambios introducidos por el primero, y comprender las modificaciones para adquirir un nuevo conocimiento. Esto lleva a la creación de nuevas instituciones, leyes o normas de comportamiento (Aguilera & Alcántara, 1994). Además, esta perspectiva, desde el punto de vista ontológico, considera el ambiente como un meta sistema en el que está incluido el sistema social y del que la economía es un subsistema. De esta manera, se crea una panarquía dinámica (Spangenberg, 2016).

Con respecto al tema de los conflictos sociales violentos, la economía de la paz ha presentado algunos aportes. Este abordaje entiende por *paz negativa* la ausencia directa de violencia y, por *paz positiva*, la ausencia de violencia estructural o indirecta. Con la presencia de condiciones que eliminan las causas de la violencia y establecen una paz duradera, se puede plantear la *paz positiva* como un sistema social sustentable. Desde esta perspectiva, Brauer y Caruso (2013) afirman que la economía de la paz se centra en el estudio económico y en el diseño de instituciones políticas, económicas y culturales, en sus interrelaciones, y en sus políticas para prevenir, mitigar o resolver cualquier tipo de violencia latente o real u otro tipo de conflicto destructivo dentro o entre sociedades. Los autores llaman la atención sobre el foco de la paz positiva, que no radica en la supresión de lo que es destructivo, sino en la amplificación de lo constructivo, ya que la paz negativa puede ser el resultado de la represión de la violencia (que en sí misma puede ser violenta), subestimando las causas de una violencia descontrolada. En contraste, la paz positiva repara las causas latentes de la violencia, haciendo la violencia superflua e incluso impensable.

Para entender el significado mismo de la economía de la paz, hay una distinción clásica en economía entre actividades productivas e improductivas. Las actividades productivas son, por ejemplo, la producción de bienes útiles; y las improductivas, aquellas que no generan utilidad a la sociedad. Las actividades productivas son beneficiosas, mientras que las últimas —improductivas e incluso destructivas— son perjudiciales para el bienestar y el desarrollo. Cuanto mayor sea la interdependencia productiva entre las partes, menor será el incentivo para luchar (Caruso, 2010). Bajo estos conceptos, el tema de la paz, desde el punto de vista de la economía, se ha modelado con esquemas de teorías de equilibrio. Son

pioneros los modelos de Hirshleifer, que integraba los incentivos y las posibilidades de apropiación con las posibilidades de producción de los agentes racionales (Caruso, 2010).

La economía del comportamiento también se aproxima a la problemática de la paz a través del modelo de disonancia cognitiva, que ofrece diferentes resultados a partir de la forma estándar de análisis. La idea básica que subyace en los modelos es que las personas se sienten incómodas con creencias o apreciaciones que están en desacuerdo con las de otros; por tanto: a) las cambian; b) adquieren nueva información para afianzar la idea o creencia propia; y/o c) reducen importancia en las disonancias, lo que puede llevar a que persistan las creencias (Caruso, 2010). Esta línea de la teoría del comportamiento hace importantes aportes al incorporar elementos como equidad, reciprocidad y autoidentidad, que afectan las decisiones (Gsoffbauer, 2013; Kahneman *et al.*, 1986). En particular, las personas se preocupan por los resultados equitativos y se comportan de manera justa y cooperativa en muchas situaciones en las que el modelo de interés propio predeciría la deserción completa (Gsoffbauer, 2013).

En aproximaciones más holísticas, se encuentra el ejercicio de modelar los sistemas económico, ecológico y social con el enfoque de los sistemas complejos, como lo presenta el trabajo de Holling (2001), con el propósito de indagar si su interrelación permite un desarrollo sostenible. Allí, se proponen cuatro fases: i) explotación empresarial (Holling, 2004), en la que se da un alto crecimiento con recursos disponibles y una alta resiliencia (Folke *et al.*, 2010); ii) consolidación organizacional en la que se da una acumulación de capital en una fase gradualmente «rigidizada»; en su mayoría, los recursos están encerrados con poca flexibilidad o novedad (Folke *et al.*, 2010); iii) destrucción creativa es la fase dinámica o caótica en que las relaciones y estructuras se deshacen (Folke *et al.*, 2010); y iv) reestructuración es la fase de reorganización, en la que la novedad prevalece (Folke *et al.*, 2010).

En este modelo, los sistemas evolucionan desde la rápida fase de explotación y consolidación, durante la que capturan recursos de fácil acceso, hasta la etapa de destrucción creativa y reestructuración, en la que las estructuras son cada vez más complejas. Las dos primeras fases son conocidas, lentas, tienen patrones de crecimiento bastante predecibles: se llaman *forward loop* (bucle delantero), y las dos fases siguientes,

menos conocidas, impredecibles y más rápidas en su reorganización, se llaman *back loop* (bucle posterior). Específicamente, la reorganización del bucle posterior, en una escala más pequeña, puede desencadenar cambios en las escalas más grandes y lentas de los bucles delanteros. De esta forma, surge la novedad. Al mismo tiempo, la consolidación organizacional a escalas más altas (bucles delanteros) puede proporcionar una «memoria» que influye en la recuperación de la dinámica del sistema a escalas más finas. Eso es lo que sostiene la repetición de los ciclos adaptativos.

La transición a la sostenibilidad también es un campo de estudio sistémico que busca proponer con un enfoque multinivel en tres escalas i) nichos; ii) regímenes socio-técnicos; y iii) Un entorno exógeno al sistema sociotécnico, modelos de producción descarbonizados. Para lo que se requiere transiciones entrelazadas en diferentes campos: demográficas, tecnológicas, económicas, sociales e institucionales ([Brauch & Oswald Spring, 2016](#))

En esta corriente sistémica, utilizando los modelos basados en agentes (MBA), los trabajos de Hassani-Mahmoei y Parris (2012b; 2012a) evalúan la relación entre escasez y conflicto. Encuentran que los agentes tienden a no involucrarse en conflictos durante escenarios leves de escasez de recursos a medida que se adaptan a los cambios, y que el principal vínculo entre la escasez de recursos y el conflicto se da través de cambios en la distribución de recursos en lugar de su disponibilidad general.

De igual forma, el trabajo de BenDor y Scheffran (2019) propone un marco teórico para comprender las realidades de los agentes en un sistema de conflicto ambiental, al considerar la información disponible, las decisiones, las capacidades para actuar y los objetivos de las partes en conflicto. Para ello, utilizan como herramienta los MBA. A partir de las simulaciones, en su propuesta metodológica, llamada VIABLE, encuentran que los agentes en conflicto pueden ajustar sus acciones para estabilizar, cooperativamente, sus interacciones y, a veces, para formar coaliciones estables y ajustes que se pueden lograr a través de innovaciones sociales, que incluyen gobernanza y estructuras institucionales más efectivas para la resolución de conflictos.

En estos dos últimos trabajos, la modelación se hace desde un único rol, ignorando la heterogeneidad de los agentes al considerar solo el económico y no incorporar el agente

social, que tiene la capacidad de influir en el sistema de acuerdo con su estrategia de consumo y su posición sobre la administración de los recursos.

En la misma línea sistémica, en particular de las ciencias de la complejidad, en el Advance Consortium on Cooperation, Conflict and Complexity del Earth Institute, de la Universidad de Columbia, se busca conceptualizar y medir las dinámicas temporales complejas de las sociedades con una mayor paz duradera. Bajo su enfoque nodal del CLD (por sus siglas en inglés, del Diagrama de Bucle Causal), han encontrado que la paz, en las sociedades, se operacionaliza como la relación PIR:NIR², es decir, el modelo propone que la dinámica central, responsable del surgimiento y mantenimiento de relaciones pacíficas sostenibles en las sociedades, son las miles o millones de interacciones recíprocas intergrupales que ocurren a diario entre miembros de diferentes grupos en esas comunidades; en la medida en que más interacciones positivas superen a las negativas, mayor es la relación PIR:NIR, lo que se traduce en una mayor probabilidad de una paz sustentable (Coleman *et al.*, 2020). Este estudio cobra gran importancia para el estado actual del conocimiento, ya que logra presentar, de manera empírica, la conexión entre la paz y los comportamientos recíprocos positivos, que es lo que describe un comportamiento cooperativo. Sin embargo, en su enfoque de sistema dinámico, no se rastrea el efecto del comportamiento de los agentes netamente económicos sobre el sistema.

Es importante señalar que hay muchos estudios direccionados, particularmente, a estrategias corporativas, en los que las empresas, como un organismo, responden a demandas sociales, ambientales y, por supuesto, económicas. Sin embargo, estos enfoques se centran en modelos de negocios específicos más que en comprender la economía en su conjunto y su relación con el sistema ambiental.

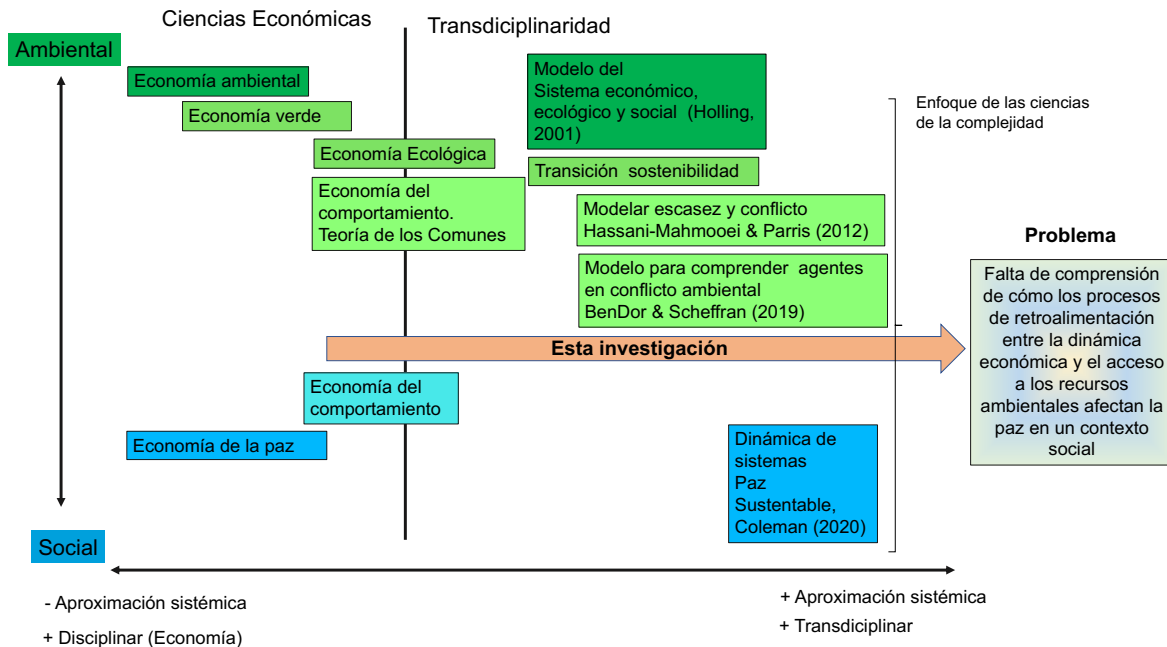
Este estado del conocimiento muestra dos elementos importantes. Primero, que las aproximaciones sistémicas están tomando relevancia en el debate académico, lo que implica que no solo las teorías y metodologías son más amplias y menos disciplinares, sino que lo son, también, sus problemas y preguntas de indagación. Y, segundo, que el tema de

² PIR, por sus siglas en inglés, relaciones positivas intergrupales; y NIR, por sus siglas en inglés, relaciones negativas intergrupales.

la paz (o conflicto, como ha sido abordado por algunos autores), si bien se ha estudiado a partir de la preocupación de escasez de los recursos como consecuencia de la dinámica económica cuando ha sido el caso, en sus aproximaciones teóricas y metodológicas, el comportamiento social es ignorado. En caso de que la dinámica social sea modelada, el énfasis en lo económico se disipa en las muchas causas que pueden inducir la paz; no se refiere al contexto específico en el que esta investigación centra su análisis, que es cuando las dinámicas económicas afectan los recursos ambientales y estas alteraciones inciden en la paz, es decir, cuando los comportamientos asociados a la paz surgen de la interacción de los sistemas económico, social y ambiental.

A continuación, se presenta la figura 1-3, que sintetiza el estado del conocimiento descrito.

Figura 1-3: Estado del conocimiento



Fuente: elaboración propia.

El eje vertical izquierdo representa el énfasis en el que se enmarca la literatura encontrada en función del problema de investigación planteado. Este puede moverse hacia un abordaje enfocado más en lo ambiental o, por el contrario, en lo social. Por otra parte, en el eje

horizontal inferior, se muestra la intensidad del enfoque o la investigación en cuanto a una aproximación sistémica, así como su nivel de transdisciplinaridad, es decir, si supera la fragmentación del conocimiento al enriquecerse con otras disciplinas y a través de un intercambio de métodos y epistemologías (Pérez & Setién, 2008). En la parte superior de la figura, se marca el umbral de cuándo las investigaciones dejan de ser netamente disciplinares de las ciencias económicas.

Se puede observar que, para aproximarse al problema planteado, la literatura es nutrida según el énfasis en la problemática ambiental. Sin embargo, como ya se mencionó, el ámbito social tiende a ser ignorado. El estudio más reciente del que se tiene referencia es el de Coleman (2020) que, si bien enfatiza mucho en los aspectos sociales que dan origen a la paz, la dinámica económica no aparece, en este, como central.

Por esta razón, es necesario un marco teórico y metodológico que conecte los sistemas económico, social y ambiental, para comprender sus interrelaciones y entender la incidencia de esta dinámica intersistémica en la paz. Por lo tanto, a partir de estas interrelaciones sin estudiar, se diseña y ejecuta este proceso investigativo. En el siguiente acápite, se presentan la pregunta que guía esta investigación y los elementos teóricos y metodológicos en los que se apoya para su solución.

1.3 La sostenibilidad en clave sistémica: problema y objetivos de investigación

Como se muestra en la descripción de la problemática, en ciertos contextos, se presentan relaciones fuertes entre lo económico, lo ambiental y la paz, pero que no son estudiadas suficientemente. Aquí, la sostenibilidad asumida como un recurso epistemológico sobre el futuro, como lo planteó Mebratu (1998), cobra total relevancia. La sostenibilidad es, entonces, una forma de «ser y estar» en el presente con miras al futuro, que invita a un pensamiento más amplio y holístico, pero también dinámico. De esta forma, como plantean Fisher y Rucki (2017), la sostenibilidad se convierte en un proceso para mantener los avances logrados en las dinámicas de los sistemas deseables, mientras se cambian, modifican y mejoran, activamente, otras dinámicas para acercar el sistema al objetivo de la justicia social y al bienestar humano deseado.

Sin embargo, también según Fisher y Rucki (2017), solo hay entendimientos superficiales acerca de los caminos a través de los cuales funcionan los impulsores de cualquier subcomponente de la sostenibilidad (desarrollo económico, funcionamiento del ecosistema y paz); se sabe que estos subcomponentes están interconectados, pero se carece de una comprensión coherente de estos procesos de retroalimentación dentro de los sistemas. De igual forma, se sabe sobre los vínculos entre los estudios de sostenibilidad ambiental y paz sustentable, pero aún no están claramente identificados (Stephenson, 2016). Por esta razón, resulta relevante, desde las ciencias económicas, buscar una mayor comprensión de estas interrelaciones.

Además, en el estado del conocimiento, se evidencia que el enfoque de las ciencias de la complejidad es el que más se ha aproximado a la pregunta de investigación. Asimismo, se ha identificado en este un desarrollo sustancial en los aspectos teórico y metodológico para dilucidar el camino en busca de responder al problema de investigación.

Por tanto, la pregunta que guía esta investigación es: **¿Cómo un modelo teórico y de simulación, desde la aproximación de la economía de la complejidad, permiten analizar la paz como emergencia a partir de las interacciones económicas, sociales y ambientales?**

Para resolver esta pregunta, como se representa en la figura 1-3, el acervo teórico que se va a utilizar no es exclusivo de las ciencias de la complejidad, sino que parte del área disciplinar de las ciencias económicas. Hay elementos de la economía ecológica que coinciden, como el enfoque intersistémico y de flujos abiertos con el sistema natural. Este es el caso, también, de la aproximación evolutiva que aporta los mecanismos de evolución del sistema como un todo, pero el enfoque, para esta investigación, parte de la disciplina de las ciencias económicas al ofrecer el marco teórico de la racionalidad del agente económico; y de la identificación de la economía, como un sistema complejo adaptativo, donde se identifican patrones emergentes. Así, la comprensión del problema de interdependencia sistémica se resuelve al identificar y analizar acaecimientos, en el marco de la aproximación de la economía de la complejidad.

Como consecuencia, el objetivo general es **analizar la emergencia de comportamientos que promuevan la paz, en el marco de la economía de la complejidad, a partir de las dinámicas entre los sistemas económico, ambiental y social.**

Con este fin, el primer objetivo específico es **desarrollar una propuesta teórica desde los sistemas complejos adaptativos para comprender cómo las dinámicas y mecanismos de retroalimentación de los sistemas económico, social y ambiental ejercen incidencia sobre la paz a partir de interacciones de los agentes individuales.** Esta contribución teórica se encuentra en el siguiente capítulo, «Sistema complejo adaptativo».

Un sistema complejo adaptativo (SCA) tiene la característica central de que el sistema se modifica por las acciones de los individuos que lo conforman. Este sistema, ya alterado nuevamente, incide sobre las decisiones de estos actores, por tanto, no es estático. Lo que cada miembro del sistema hace es relevante para conformar emergencias en niveles de mayor de agregación.

El segundo objetivo específico, que se presenta en la tercera sección, se dirige a **desarrollar un modelo de simulación que dé cuenta de las dinámicas entre los sistemas económico, ambiental y la paz, a partir de las interacciones individuales.** En ese sentido, al considerar el abordaje complejo, se deben tener en cuenta las relaciones multinivel. En particular, la complejidad busca identificar patrones emergentes a niveles meso o macro, como producto de las interacciones en el nivel micro. Es decir, estas emergencias son fruto de las interacciones de los agentes, pero no están contenidas en ellos. Por tanto, la metodología de análisis es de orden *bottom-up*: estudiar lo que sucede, a nivel micro, para descubrir lo que sucede a nivel meso o macro. Así, el método de modelos basados en agentes (MBA) es el más indicado, pues enriquece el modelo con la capacidad de caracterizar agentes heterogéneos que pueden preguntarse sobre ellos mismos y modificar su comportamiento.

Finalmente, el tercer objetivo, que se desarrolla en el cuarto capítulo, busca, a partir del modelo de simulación diseñado, **evaluar, comparativamente, varios escenarios con el fin de reconocer emergencias que aporten a la paz al identificar estrategias dominantes de actores a nivel individual.**

De esta forma, con el aporte teórico y el modelo que surge de esta investigación, se contribuye a la discusión académica sobre la paz con herramientas que, no solo permiten comprender el fenómeno, sino plantearse nuevas preguntas que pueden incidir en decisiones que moldean el mundo real.

En el siguiente capítulo, se muestra cómo la economía cumple con características de un sistema complejo adaptativo (SCA) y que las dinámicas evolucionistas que lo caracterizan se pueden acoplar para que la paz emerja como fenómeno estable a partir de interacciones individuales.

2. Sistemas complejos adaptativos

Las interacciones entre las personas son moldeadas por el contexto social y ambiental. Las construcciones y deconstrucciones sociales, las ideas, costumbres y comportamientos, en un espacio que provee y nutre la vida humana y otras tantas formas de existencia, dan paso a procesos económicos que buscan organizar y sustentar la vida de las personas. Estos surgen de múltiples interacciones entre diferentes agentes. Comprender lo que resulta de estas interacciones amalgamadas requiere de elementos epistemológicos que no pierdan de vista la perspectiva ni del árbol, ni del bosque. Así, a continuación, se presenta, en un primer momento, el abordaje de los sistemas complejos y, posteriormente, se señala cómo sus elementos teóricos contribuyen a comprender la economía como uno sistema complejo adaptativo. Posteriormente, se identifica que, a dicha dinámica económica se conectan otros sistemas, como el ambiental y el social, dando paso a una propuesta teórica para entender la emergencia de la paz, como fruto de la interrelación de los sistemas económico, social y ambiental.

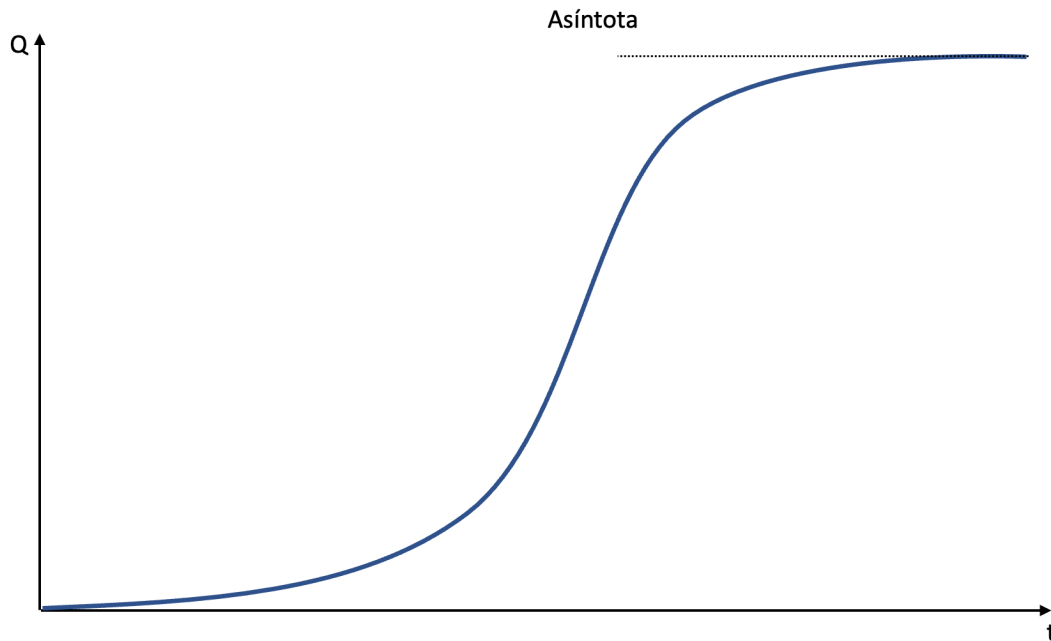
2.1 Sistemas complejos y sistemas complejos adaptativos

El pensamiento sistémico ha estado presente en la historia. Aristóteles ya sugería una mirada holística al señalar «que el todo es más que la suma de sus partes». En tiempo reciente, en la segunda mitad del siglo XX, surge el «sistema» como concepto clave en la investigación científica, pero, como lo explicó Bertalanffy (1986), este presenta limitaciones en los procesos analíticos en la ciencia, ya que estos dependen de: i) que no haya interacciones entre partes o que estas sean tan débiles que no puedan ser consideradas en ciertas investigaciones. Así, es posible delimitar las partes —real, lógica y matemática— y después volverlas a juntar; y ii) que la relación que describe el comportamiento de partes sea lineal para satisfacer la condición de aditividad. Por tanto, la ecuación que describe la

conducta total debe tener la misma forma que las que describen la conducta de las partes; así, procesos parciales pueden ser superpuestos para describir el proceso total.

Sin embargo, esto no ocurre con los sistemas, que están constituidos por partes con interacciones fuertes o, por lo menos, no triviales para dar paso a posibles no-linealidades. Su aproximación metodológica, comparada con la analítica-aditiva de la ciencia clásica, es de naturaleza más general (Bertalanffy, 1986). En este contexto, Bertalanffy (1986) considera que leyes de estructura análoga, en diferentes campos, permiten emplear modelos más sencillos o mejor conocidos para comprender fenómenos más complicados, transfiriendo principios de un campo a otro. Por ejemplo, la curva logística (ver figura 2-1) describe el crecimiento exponencial en un principio, pero, posteriormente, este crecimiento es limitado por una condición restrictiva. Esta ley puede describir una población que aumenta exponencialmente en su número de individuos, pero si existe una limitación de alimento, su crecimiento se estabilizará al nivel que los recursos lo permitan. También, puede describir el desarrollo embrionario. La célula fecundada empieza a duplicarse, pero no de manera indefinida; el tamaño del feto está restringido por el tamaño de la matriz de la madre. Estos ejemplos ilustran que se puede llegar a ciertas leyes de la naturaleza no solo desde la experiencia, sino de manera puramente formal. Los sistemas de ecuaciones que describen estos comportamientos, su desarrollo en series de Taylor y las condiciones iniciales adecuadas son particularidades de cada fenómeno, pero las leyes son *a priori* a su interpretación física, química, biológica o sociológica.

Figura 2-1: Curva logística



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, se debe considerar que no todos los isomorfismos en la ciencia son válidos, pero sí las homologías lógicas: «si un objeto es un sistema, debe tener ciertas características de los sistemas, sin importar de qué sistema se trate» (Bertalanffy, 1986, p. 87). Bertalanffy (1986) afirma, entonces, que, dado que ciertos principios se aplican a los sistemas en general, sin importar su naturaleza o entidades, se puede explicar que, en diferentes campos de la ciencia, aparezcan concepciones y leyes que se corresponden. Por tanto, conceptos como totalidad y suma, jerarquización, estados estacionarios y uniformes surgen en diferentes campos de las ciencias naturales, así como en la psicología o la sociología.

Sin embargo, hay que considerar que, para que un sistema se considere complejo, debe reunir ciertas características; además, no necesariamente todo sistema complejo es un sistema complejo adaptativo. En esta categoría se encuentra el sistema económico.

2.1.1 Sistemas complejos

Se podría decir que el uso de isomorfismos para entender fenómenos disimiles, a partir de la aproximación sistémica, resulta en una suerte de heurística en la que la ciencia —o, por lo menos, la occidental—, como un todo, utiliza estos atajos para intentar comprender otros fenómenos que pueden resultar más insondables. En palabras de Cottey (2018), es un acto de fe de los científicos de la complejidad al suponer que los fenómenos complejos están sujetos a fuerzas similares que, al aumentar su complejidad, producen transformaciones en las que interacciones simultáneas dan forma a un patrón que, de otra manera, sería impredecible. De allí que estudien el desarrollo de estos patrones para luego aplicar los resultados generales a casos específicos.

En la literatura, no hay unicidad en una definición técnica para un sistema complejo (Cumming *et al.*, 2013; Newman, 2009), pero, al menos, hay algún consenso en que es un sistema de partes que interactúa y muestra un comportamiento emergente (Newman, 2009). Cumming *et al.* (2013) sugieren que los sistemas complejos presentan comportamientos que incluyen, pero no se limitan, a propiedades para alterar estados del sistema que mantienen diferentes regímenes; la capacidad de procesar información y responder a ella; la presencia de ciclos de retroalimentación que regulan o amplifican las tendencias, que resultan, regularmente, en equilibrios múltiples; y, una vez el sistema termina en un estado estable, puede ser tan resistente a los cambios, que se necesiten impactos considerables para cambiar a otro régimen. Esto se conoce como encierro (Arthur, 2014).

Estas retroalimentaciones hacen difícil distinguir la causa del efecto, además, se producen retrasos en el tiempo y el espacio, discontinuidades, umbrales y límites. Por esta razón, no es posible sumar o agregar el comportamiento de pequeñas unidades para obtener el resultado agregado (Costanza *et al.*, 2013). En este nivel de sistema complejo, las interacciones entre los agentes generan una emergencia, que no se encuentra en los elementos que interactúan.

Holling (2001) señala que se presentan dos aproximaciones a partir de la complejidad. Una, planteada por Emory Roe, en la que, algo aparentemente no entendible por el gran número de interacciones entre sus elementos requiere, para su análisis, del estudio de diferentes

subconjuntos de interacciones; cada una de estas parecen relevantes desde un número de operaciones fundamentalmente diferentes y desde distintas perspectivas filosóficas. La otra alternativa, propuesta por Holling, sugiere que la complejidad de los seres vivos resulta no de un gran número de factores, sino de un pequeño número de procesos controlados que crean y mantienen una autoorganización. Esta última es una característica de los sistemas complejos adaptativos, en los que los resultados típicos dependen de los accidentes de la historia, de la diversidad e individualidad de los componentes, de las interacciones entre componentes y de los procesos autónomos que usan los resultados de esas interacciones locales para seleccionar un subconjunto de esos componentes para mejorar.

2.1.2 Sistemas complejos adaptativos

Con el propósito de ir precisando qué es un sistema complejo adaptativo (SCA), se presenta su definición. De acuerdo con Holland, son aquellos «sistemas que tienen un gran número de componentes, frecuentemente llamados agentes, que interactúan, adaptan o aprenden» (Holland, 2006, p. 1). Esto implica que, estos sistemas son capaces de modificar su estructura o comportamiento como respuesta a cambios externos en el ambiente (Cumming *et al.*, 2013).

Un de los elementos distintivos de estos sistemas es que los agentes «adaptativos» individuales cambian continuamente su entorno, en lugar de seguir una conducta de respuesta fija a los estímulos externos (BenDor & Scheffran, 2019). Entonces, estos agentes pueden adaptarse a su ambiente externo, que incluye otros agentes adaptativos, cambiando reglas a medida que se acumula la experiencia. Los agentes aprenden de su entorno y modifican su comportamiento al alterar el propio sistema (Holland, 1996).

Todos estos comportamientos implican la presencia de múltiples bucles de retroalimentación, que conllevan la no linealidad y la emergencia de patrones a gran escala, imposibles de examinar en los individuos que los crean. Se suma a que muchos SCA tienen un efecto amplificador relacionado con la no-linealidad (Paravantis, 2016), lo que resulta esencial para entender los temas ambientales desde el punto de vista de la economía.

La literatura sobre SCA se construye a partir de un matrimonio entre la teoría de sistemas complejos y la teoría evolutiva, pero no es una hija de ambas. Es decir, no es un cuerpo de teoría que nace de ambas vertientes, sino que toma partes de cada una. En un primer momento, la teoría de los sistemas complejos aporta que las interacciones entre agentes individuales actúan a partir de sus propias condiciones al afectar el sistema que ellos mismos constituyen. Es decir, tienen un comportamiento de autorreferenciación que da origen a emergencias o comportamientos a nivel agregado, que no subyacen a cada uno de los agentes.

Godwy *et al.* (2016) clasifica los aportes de cada vertiente. La complejidad se caracteriza por la autoorganización, los fractales, las cuencas de atracción y la dependencia sensible a las condiciones iniciales y al control sin jerarquía. La teoría evolutiva aporta conceptos como la selección multinivel, la distinción entre causas próximas y últimas, la coevolución genético-cultural y, mayores transiciones discontinuas. En un SCA, las dinámicas que describen el proceso de adaptación o aprendizaje se pueden describir a partir del marco de la teoría evolutiva.

Así, cuando la teoría de la complejidad se imbrica con la teoría evolutiva sobresale el concepto de *fitness*, idea que representa qué tan bien se está desempeñando un individuo, grupo, especie o estrategia en comparación con la competencia y, por tanto, qué tan probable es que prospere (Newman, 2009). Holland (1996) explica este proceso dentro del sistema como una asignación de créditos que provee al sistema de hipótesis que anticipan las consecuencias futuras al fortalecer las reglas que sientan las bases para actividades posteriores que recompensan abiertamente. En ese sentido, el autor señala que, en estudios matemáticos de genética, economía y psicología, estas recompensas se asignan por decreto al asignar valores numéricos a objetos de interés. La aptitud se asigna a los cromosomas; la utilidad, a los bienes; y las recompensas, a los comportamientos. A través de la competencia con pagos locales, se va desarrollando la dinámica evolutiva.

Pero la evolución no solo se da a partir de los procesos de selección sino, también, por los entrecruzamientos. Por tanto, como sugiere Paravantis (2016), un patrón fundamental en la evolución de los SCA es la combinación de bloques de construcción (grupos de componentes), nuevos y antiguos, en los que permanecen los de mayor *fitness* para generar propiedades inesperadas y, por tanto, futuros alternativos. A este proceso se suma

la mutación que, de acuerdo con Holland (1996), es el proceso en el que cada una de las formas alternativas se modifica de manera aleatoria para, finalmente, cerrar el ciclo evolutivo con la sustitución en la que los nuevos agentes reemplazan a los anteriores.

Esta coexistencia entre la teoría de la ciencia de la complejidad y la teoría evolutiva es justificada por autores como Axtell *et al.* (2016), quienes señalan que, un SCA no es necesariamente evolutivo, aunque puede serlo. Este tipo de sistemas se conciben como información que se recuerda en forma de reglas, que definen el sistema (ambiente), y estrategias, que determinan agentes (o nodos) del sistema. Cuando los sistemas adaptativos complejos son evolutivos, la selección puede ocurrir, al menos, en dos niveles: en el nivel de agente individual o en el nivel del sistema como un todo al interactuar con otros sistemas. Aun si la información que define la interacción de los agentes reside, enteramente, en estos, el nivel en que la selección ocurre puede conllevar a resultados muy diferentes. De este modo, Bowles (2004) plantea que la población puede estar estructurada jerárquicamente, los individuos interactúan con individuos, pero también constituyen grupos (como familias, empresas) y otras entidades superiores (como naciones), con los que también interactúan y en los que la selección ocurre en más de un nivel.

En esta misma línea, Wilson *et al.* (2016) consideran que, a partir de la teoría de la complejidad, el hecho de que los sistemas estén compuestos por elementos gobernados por simples reglas de comportamiento y, desde allí, la selección se pueda explicar como una emergencia sin considerar la selección natural es un error ya que, en ausencia de selección, las propiedades que surgen de los sistemas complejos, aunque puedan ser impactantes, no son más que adaptaciones al ambiente con mutaciones. Desde esta perspectiva, plantea que hay dos tipos de SCA:

1. SCA 1: Sistema complejo adaptativo como un sistema.
2. SCA 2: Sistema complejo compuesto de agentes que emplean estrategias adaptativas.

La diferencia radical es que en el SCA 2 no es adaptativo como un todo. Según la teoría evolutiva, de acuerdo con los autores, la organización funcional existe en el nivel de organismos individuales debido a procesos de selección natural entre individuos. Para que sea SCA 1 el sistema debe tener una unidad de selección; por el contrario, en cualquier

otro caso, el sistema calificaría como SCA 2. Una idea central es que un proceso de autoorganización eficaz se debe seleccionar entre un número mucho mayor de procesos de regulación de autoorganizaciones menos eficaces. Por tanto, en el nivel de grupo, la organización funcional requiere de individuos que desempeñen servicios entre sí o para su grupo como un todo. Los miembros que cooperan son, probablemente, menos buenos para sobrevivir o reproducirse que aquellos *free riders* o que explotan activamente a los cooperadores. Cuando esto sucede, la organización funcional, a nivel de organismo individual, para y no se extiende al grupo social o a un nivel más alto. La cooperación puede ser una selección desventajosa comparada con quienes no cooperan (*free riders*) o con explotadores en el mismo grupo; pero grupos compuestos, principalmente, por cooperadores están en una selección ventajosa frente a grupos de explotadores y no cooperadores. De allí que la selección natural tenga lugar entre miembros del mismo grupo y entre grupos. Una adaptación que beneficie al grupo puede evolucionar si la selección entre grupos es lo suficientemente fuerte con respecto a la oposición disruptiva dentro del grupo. En ese sentido, grupos de individuos prosociales tienen ventaja competitiva sobre grupos gobernados por egoístas. Comportamientos prosociales pueden ganar desde el punto de vista de la perspectiva darwiniana, siempre y cuando la selección entre grupos, en una población multigrupal, sea lo suficientemente fuerte para prevalecer en la selección de individuos en los grupos. Entonces, la evolución está determinada por la competencia, es decir, por la cooperación y competencia simultáneas de los agentes (Paravantis, 2016).

Ya descrito el comportamiento de los SCA, se puede decir que las características y propiedades más sobresalientes son, en los SCA, múltiples agentes que interactúan en paralelo para enviar y recibir señales de manera simultánea, con comportamientos condicionales IF (captura la señal) / THEN (ejecuta la acción). Ejecutan distintas combinaciones de subrutinas (Holland, 1996) para dar paso a comportamientos adaptativos que llevan a que los sistemas cambien su comportamiento para mejorar sus posibilidades de supervivencia o de éxito, a través de procesos evolutivos o de aprendizaje (Rosser & Kramer, 2000). Esto implica múltiples bucles de retroalimentación, que engendran la no linealidad y la aparición de patrones agregados a gran escala, que son imposibles de predecir al examinar el comportamiento de un agente individual (Paravantis, 2016). Esto conlleva a la descomponibilidad limitada. Esto quiere decir que, en la estructura dinámica, no es posible estudiar las propiedades al descomponerlas en elementos estables, porque la interacción del sistema con el entorno, y de sus elementos entre sí, induce propiedades

de autoorganización y de reestructuración del sistema (Fernández *et al.*, 2004). Así mismo, en estos sistemas, el comportamiento organizado surge sin un comportamiento interno o externo; el controlador, líder final, es la autoorganización (Rosser & Kramer, 2000).

Estos comportamientos llevan a hacer precisión sobre el tiempo tanto de cara al pasado, como al futuro. Los SCA se caracterizan por su dependencia del pasado, ya que los procesos evolutivos solo se pueden entender en la dimensión del tiempo histórico, en el que son observables diferentes fases, como emergencia, crecimiento, estacionalidad y transiciones estructurales, sobre los que se pueden hacer preguntas teóricas relacionadas con la variedad, la innovación, la difusión, la selección y el mantenimiento del sistema (Fisher & Rucki, 2017). Es el mismo caso de la incertidumbre de cara al futuro, ya que la dirección de la evolución es imposible de predecir dado que la adaptación y el aprendizaje abren el camino tanto a posibilidades alternativas, como a innovaciones adicionales (Paravantis, 2016).

Por otra parte Fisher y Rucki (2017) señalan que hay jerarquías de sistemas complejos, que permiten comprender a qué tipo de sistema se hace referencia cuando se señalan los sistemas socioeconómicos:

- i) Primer orden (energía impuesta): no son estructuras adaptativas, como fractales o turbulencias. Se presentan en el área fisicoquímica.
- ii) Segundo orden (imposición de conocimiento y adquisición de energía): recibe energía que se transforma en estructuras de conocimiento, que permite cierto grado de control sobre la adquisición de energía. Se da en el nivel biológico (la información viene genéticamente). Es un sistema complejo y adaptativo.
- iii) Tercer orden (adquisición de conocimiento): el sistema biológico interactúa con el ambiente y con imágenes formadas en un mundo posible. El conocimiento no solo es acumulable, sino un modelo mental. Se observa en un nivel temprano de la economía en el que el entorno se organiza en función de la explotación ventajosa (es un sistema complejo adaptativo, en el que la adaptación no es solo selección, sino, también, creatividad).
- iv) Cuarto orden (conocimiento interactivo): interacción entre los modelos mentales. La imaginación puede moldear la realidad. Mi conocimiento lleva a otros a imaginar lo que yo

imagino. Este tipo de sistema complejo prevalece cuando las personas forman aspiraciones y compromisos en el futuro y celebran contratos a cierto plazo y otros acuerdos con fechas terminales en el futuro. Tal complejidad constituye una fuerza poderosa al desarrollar sistemas económicos muy sofisticados. Reúne las aspiraciones de los individuos en «entendimientos» que permiten la creación de una complejidad organizada que, de otra manera, sería inalcanzable.

García-Valdecasas (2016) sugiere que los fenómenos sociales se pueden describir a partir de la visión sistémica y caracterizarse por: i) su composición, que corresponde al conjunto de los actores que lo integran; ii) su estructura, que son las relaciones entre los actores; iii) su entorno, que es aquello que modifica o es modificado por el fenómeno, pero que no es el fenómeno en sí mismo; y iv) su dinámica, que corresponde al conjunto de procesos dentro del fenómeno a través del tiempo y el espacio, y que lo hacen preservar o modificar sus propiedades al ser estas emergentes y no percibidas por el observador en sus elementos constituyentes, cuando están aislados entre sí.

En este contexto, los acontecimientos, de acuerdo con Bertalanffy (1986), parecen envolver algo más que las decisiones y acciones individuales y estar más bien determinados por sistemas socioculturales, ya sean prejuicios, ideologías, tendencias sociales, grupos de presión, decadencia de civilizaciones y otros tantos más. Se sabe, científicamente, dice el autor, cuál será el efecto de la contaminación o el despilfarro de recursos naturales, pero los guías nacionales o la sociedad, en su conjunto, parecen no hacer nada (o por lo menos no lo suficiente) para remediarlo; es como si se siguiera una trágica necesidad histórica. Sugiere, entre líneas, una dependencia del pasado de lo que ha sido el sistema sociocultural que determina el actuar presente y moldea el futuro.

Como bien lo plantean Wilson *et al.* (2016), el comportamiento de los humanos coevoluciona con el ambiente. La cooperación y la competencia, el establecimiento de nuevas relaciones y la pérdida de otras, la formación y disolución de alianzas implican cambios sistemáticos en los objetivos perseguidos y en las estrategias para alcanzarlos. Esto lleva a una naturaleza cambiante de los agentes, que preserva la micro diversidad, trayendo consigo fenómenos emergentes que alimentan la dinámica evolutiva del ecosistema como un todo. Así, en el contexto del sistema económico, la estabilidad no es

una de sus características inherentes; por el contrario, el ecosistema económico es inestable, evolutivo y complejo.

A continuación, se caracteriza la economía a partir de la teoría de la complejidad y, posteriormente, se contrasta con otras aproximaciones económicas con las que presenta afinidades o profundas diferencias para, finalmente, señalar cuáles son las críticas que se hacen a este abordaje.

2.2 La economía como sistema complejo adaptativo

Quienes estudian la economía desde la complejidad, consideran que la sociedad es un sistema en capas, compuesto de subsistemas cambiantes, con propiedades globales reducibles y no reducibles, relevantes en una visión *top-down*, por ejemplo, de instituciones a individuos, así como *bottom-up*, de individuos a estructuras sociales (Arthur, 2014). Sin embargo, bajo esta mirada sistémica, toman relevancia la emergencia de la estructura y los patrones que despliegan en la economía los agentes (Schasfoort, 2017). Por tanto, los sistemas económicos complejos se superponen con otros sistemas complejos al interactuar entre ellos en una panarquía (Arthur, 2014). Esta consiste en el grupo de interacciones dinámicas de un conjunto de ciclos adaptativos anidados (Folke *et al.*, 2010).

En ese sentido, Arthur (2014) considera la economía como «un amplio y complicado conjunto de arreglos y acciones entre agentes y consumidores, firmas, bancos, inversores y agencias gubernamentales, entre otros —que compran, venden, especulan, comercian, exportan, importan, ofrecen servicios, invierten en compañías, ponen en marcha estrategias, exploran, pronostican, compiten, aprenden, inventan y adaptan—. Es un masivo sistema paralelo de comportamientos que concurren y establecen precios, mercados, acuerdos comerciales, instituciones, industrias y, a partir de allí, surgen comportamientos agregados» (Arthur, 2014, p. 2). La pregunta relevante, desde la economía de la complejidad, es ¿cómo podrían reaccionar los comportamientos individuales frente al patrón que crean juntos y cómo ese patrón se alteraría a sí mismo como resultado? (Arthur, 2014).

A continuación, se muestra cómo los mecanismos de adaptación, a partir del comportamiento de los agentes económicos, corresponden a las dinámicas propias de un sistema complejo adaptativo.

2.2.1 Contextualización de la economía en un marco de sistema complejo adaptativo

Responder a la pregunta de investigación, ¿Cómo un modelo teórico y de simulación, desde la aproximación de la economía de la complejidad, permite analizar la paz como emergencia a partir de las interacciones económicas, sociales y ambientales?, implica entender cómo opera la economía como un SCA que coevoluciona con otros sistemas y evoluciona, ella misma, como un todo.

Para que se dé tal evolución, el sistema económico debe estar abierto a otros, de tal forma que pueda reconfigurar su estructura conectiva y, así, cambiar estructuralmente tanto en su orden interno, como en las relaciones del orden externo. Para ello, debe haber un sistema de reglas, que determine las conexiones clave en el sistema económico y cuya naturaleza sea de orden «meso económico», no microeconómico o macroeconómico. Como estos sistemas de reglas son estructuras, en la medida en que cambian las circunstancias, se tornan obsoletas, degenerativas, no están adaptadas y, por tanto, son reemplazadas por nuevas reglas (Foster, 2005). Entonces, el sistema económico presenta una naturaleza multisistémica que impulsa su dinámica. En el nivel micro, se encuentran los agentes; en el meso, las reglas; y en el macro, el sistema como un todo. Esto implica que la economía, de manera constante, se cree y recree a sí misma, en la medida en que produce nuevos elementos, en ocasiones tecnologías e instituciones, que instauran nuevas estructuras conforme va evolucionando (Arthur, 2014). Debido a estas relaciones entre agentes y entre agentes y redes, surgen, en el nivel macro, propiedades no halladas en el nivel micro (agentes). Como consecuencia, el sistema no se puede conocer, aunque haya una comprensión precisa de sus partes, ya que el nivel de agregación no es solo la suma del comportamiento de los individuos (Fernández *et al.*, 2004), sino el espacio en el que se evidencian los patrones emergentes.

En el nivel micro, el sistema económico está conformado por muchos agentes heterogéneos sin previsión perfecta, pero capaces de aprender y de adaptarse en el tiempo. Sus interacciones se dan solo con algunos de los otros agentes en el espacio (Rosser & Kramer, 2000). Por esta razón, ningún controlador global o competidor puede explotar todas las oportunidades en la economía (Rosser & Kramer, 2000). Dichas interacciones se pueden dar con o entre redes y generar interacciones dispersas (Foxon *et al.*, 2013), cuya organización jerárquica resulta transversal a muchas interacciones enredadas (Rosser & Kramer, 2000). Entre estas heterogeneidades, se encuentran asimetrías entre niveles que llevan a que su capacidad para interactuar esté sujeta a la forma como está estructurado el entorno. Dentro de la conformación de estas estructuras aparecen redes económicas, que se constituyen en entidades dinámicas en las que se presenta formación y eliminación de vínculos para conformar una configuración que influye en los resultados económicos. Por tanto, las relaciones importan y el tipo de comportamiento colectivo es mucho más que la suma de sus partes (Wilson *et al.*, 2016).

Como ya se ha dicho, la economía está en permanente movimiento en la medida en que los agentes exploran, aprenden y se adaptan. Por tanto, involucra algo que se dará en el futuro, trayendo consigo cierto grado de desconocimiento (Arthur, 2014). Este desconocimiento se traduce en incertidumbre que aportan los agentes y el sistema como un todo. El concepto de incertidumbre fue introducido, en economía, por Knight y Keynes, que consideran que se deben distinguir el riesgo y la incertidumbre. En el caso del riesgo, se conocen los posibles eventos futuros o las consecuencias de una acción o decisión. Esto implica que se pueden calcular probabilidades para cada evento. Sin embargo, hay situaciones en las que no se conocen los resultados posibles, por lo tanto, el cálculo de las probabilidades no tiene base sólida (Arthur, 2014). De allí que los individuos no tengan un conocimiento completo de la estructura del mundo y sean incapaces de enumerar todas las posibles contingencias o sus estados. Este es el elemento principal analítico que Shackle destacó en sus obras (Basili & Zappia, 2010).

Para sortear esta situación, los agentes económicos intentan dar sentido a los problemas al utilizar conocimientos y experiencias pasadas a través de heurísticas simples de toma de decisiones. Así, actualizan, de manera continua, su modelo interno. Esto significa que constantemente se adaptan, descartan y reemplazan las acciones o estrategias en función

de su experiencia a medida que exploran (Arthur, 2014). Así, las elecciones individuales se llevan a cabo entre alternativas, que son representaciones subjetivas de resultados futuros alternativos, y no entre resultados futuros en sí mismos (Basili & Zappia, 2010).

Además, de manera agregada, la tecnología también opera como agente disruptor, ya que estos cambios tecnológicos implican cambios endógenos y continuos y, a su vez, a través de estos cambios, la economía entra en permanente transformación (Arthur, 2014). En ese mismo sentido, en la medida en que actualiza el modelo interno en la toma de decisiones, el presente del sistema está condicionado a los hechos pasados (Fernández *et al.*, 2004). Como consecuencia de estos comportamientos, el no equilibrio resulta ser el estado natural de la economía por las mismas razones de incertidumbre e innovación tecnológica (Arthur, 2014).

Así, la esencia de la caracterización de la economía, como un sistema complejo adaptativo, proviene de la racionalidad de sus agentes, que conforman el ecosistema económico-social en función de un espacio habitado (sistema ambiental). Por tanto, es relevante señalar su comportamiento.

2.2.2 Racionalidad de los agentes económicos en los sistemas complejos adaptativos

A continuación, se presentan los elementos centrales de la racionalidad de los agentes desde la teoría de los sistemas complejos adaptativos. Esta teoría, como ya se ha precisado, se constituye a partir de los conceptos de autorreferenciación de los agentes en medio de una ecología propia de la teoría de la complejidad, es decir, el agente determina su entorno y este entorno lo determina a él; también, a partir de los aportes de la teoría evolutiva.

Se comienza por indicar cuál es el problema de racionalidad que, como bien precisa Arthur (2020), surge al no ser los agentes idénticos; al no conocer las circunstancias ni el comportamiento probable de otros agentes; o al no ser, incluso, comprendidas las propias circunstancias, lo que conlleva a una incertidumbre fundamental:

- «el problema» no está bien definido;

- la «racionalidad» no está bien definida;
- el comportamiento «óptimo» no está bien definido.

Esto implica que es poco probable que el comportamiento y el resultado estén en equilibrio, ya que, si una situación está sujeta a un alto grado de incertidumbre fundamental, el problema carece de una adecuada definición y no se puede expresar en términos lógicos claros. Esta falta de definición en el problema lleva a que la racionalidad no esté bien definida. Por tanto, cuando el comportamiento deductivo racional no está bien definido, es probable que cualquier resultado sea temporal y no esté en equilibrio. Entonces, el pensamiento deductivo propio de la teoría neoclásica carece de validez al suponer que se logran equilibrios permanentes. Así, los agentes, por lo general, no optimizan en el sentido estándar, no solo porque estén restringidos por una memoria finita o por cierta capacidad de procesamiento, sino porque el concepto mismo de un curso de acción óptimo, a menudo, no se puede definir (Arthur, 2015).

Resulta relevante, entonces, conocer cuáles son los razonamientos de los agentes a partir de la aproximación compleja y evolutiva. Para ello, se debe partir de que la adopción de que una estrategia es racional si esta se percibe como una más ventajosa con respecto a las alternativas posibles (León, 2006).

En el nivel micro, los actores se entienden como racionales limitados. Esto significa que, su racionalidad está limitada por la manejabilidad del problema de decisión, las limitaciones cognitivas del actor y el tiempo disponible para tomar la decisión. De allí que los individuos, en general, no optimizan (por ejemplo, la utilidad), sino, que se involucran en procesos cognitivos, como la comparación social, la imitación y el comportamiento repetitivo (hábitos) para utilizar, de manera eficiente, sus recursos cognitivos limitados (Arthur, 2014).

En ese sentido, la economía del comportamiento, según Arthur (2014), sugiere que los contextos determinan cómo deciden las personas y las ciencias cognitivas sugieren que, si una decisión es importante, las personas pueden dar un paso atrás e intentar darle sentido a partir de conjeturas, adivinando, o con base en conocimiento o experiencias pasadas. Por tanto, una forma de modelar esto es suponer que los agentes económicos forman creencias individuales acerca de la situación en la que están y, continuamente, la actualizan, es decir,

la adaptan o rechazan y reemplazan las acciones o estrategias basadas en eso que exploraron al desplegar una racionalidad por inducción.

Bajo esta lógica, Bicchieri (1993) plantea que cada agente, para predecir, debe adivinar las expectativas de otros agentes, ya que las acciones de estos dependerán de sus expectativas. El resultado económico agregado que se va a pronosticar no es más que el resultado de todas estas acciones. Así, los agentes actúan según sus predicciones del futuro, pero este depende, en parte, de las predicciones de los agentes. En ese contexto, cada agente debe saber algo sobre las predicciones de otros agentes y sobre el conocimiento en que se basan estas predicciones. La racionalidad individual debe complementarse con cierto conocimiento del entorno, que incluye las acciones y las creencias de otras personas .

La idea central del razonamiento inductivo, expuesta por Arthur (2015), es que este está constituido por múltiples elementos en forma de modelos de creencias o hipótesis que se adaptan al entorno agregado que crean conjuntamente. Por tanto, califica como un sistema complejo adaptativo. Después de un aprendizaje inicial, las hipótesis o modelos mentales en uso se adaptan mutuamente. Los agentes compiten por la supervivencia contra las ideas o modelos mentales de otros agentes. Es un mundo tanto evolutivo, como complejo.

Ya que se presenta un comportamiento evolutivo endógeno en la racionalidad propuesta, es pertinente señalar algunos elementos centrales de la teoría evolutiva. León (2006) indica que hay una tendencia a mantener las rutinas que funcionan bien, mientras que los fracasos inducen a buscar otras mejores. En ese sentido, los errores no solo se constituyen en un dispositivo para la experimentación evolutiva de nuevas soluciones a problemas, sino que implican que la adaptación evolutiva tenga en cuenta la mirada hacia atrás. Por tanto, para cada momento, prima la experiencia pasada del agente y, a través del ensayo y el error, el comportamiento se ajusta de manera continua con base en las nuevas experiencias. El conocimiento que se obtiene en el curso del aprendizaje evolutivo es saber acumular acerca de las situaciones pasadas.

En esta misma línea, León (2006) también señala que, en el nivel individual, se presentan reglas innatas y aprendidas que, en este nivel, constituyen la historia de aprendizaje para la persona y la evolución cultural que forman reglas que prevalecen en un grupo social.

En síntesis, como expresan Gómez y Gubareva (2021), cuando los agentes son limitadamente racionales, pero tienen la capacidad de aprender, de adaptarse y de evolucionar, se puede propiciar el escenario para que surjan las macro realidades, o emergencias, en las que se vive.

Ahora bien, la metodología que busca comprender la economía como un sistema complejo adaptativo debe tener la capacidad de representar el comportamiento racional aquí expuesto. Así que, a continuación, se describe la metodología propia de este enfoque sistémico.

2.2.3 Aproximación metodológica de la economía de la complejidad

Se pueden considerar diversos fenómenos endógenos al sistema económico. En este sentido, es válida la reflexión de Davis (2018) sobre las ciencias sociales y, en particular, sobre las ciencias económicas, al plantear que la economía, como objeto de estudio, pero también la metodología económica y sus métodos han ido evolucionando con el mundo que investiga. El autor resalta que, en las ciencias sociales, el agente de estudio es activo, puede comprender la ciencia que explica su objeto de análisis y reaccionar acerca de la rama del saber que le permitió comprender el fenómeno. Así, los complejólogos de la economía observan patrones emergentes y luego desarrollan modelos que explican los mecanismos que los impulsan. Por tanto, las interacciones entre las observaciones y la teoría no son lineales, ya que nuevos modelos conducen a nuevos patrones que, a su vez, inspiran nuevos modelos (Watkins *et al.*, 2016).

Este fenómeno de autorreferenciación en el sistema económico, que no muestra una relación causal ni lineal, requiere de una metodología que dé cuenta de este tipo de comportamiento, pero también de interacciones dispersas cuando las decisiones están sujetas a acciones anticipadas de algunos de los otros agentes y del estado agregado que ellos crean; de la ausencia de control global, que es sustituida por mecanismos de competencia y coordinación entre agentes; de la organización jerárquica transversal, es decir, de la existencia de niveles de organización e interacción; de una adaptación continua; de la novedad perpetua en la que, constantemente, ciertos nichos crean nuevos mercados; y, por tanto, de continuos desequilibrios. Estas características son propias de los SCA, que

no actúan, solamente, en función de estímulos y respuestas, sino que anticipan y forman expectativas (Arthur, 2015).

En este escenario, las herramientas matemáticas tradicionalmente usadas, que explotan la linealidad, puntos fijos y ecuaciones de sistemas diferenciales, no pueden ofrecer un adecuado entendimiento de las adaptaciones no lineales. Se requieren, entonces, nuevas técnicas matemáticas y computacionales, que, si bien, están en una etapa de desarrollo temprana, son válidas para el descubrimiento de emergencias en diferentes niveles (Arthur, 2015; Arthur *et al.*, 2020). Esta información nueva recién percibida por el observador; no reside en los elementos constituyentes estudiados en condiciones aisladas, sino que surge a partir de interacciones entre ellos (García-Valdecasas, 2016). Por esto, es necesario un enfoque que busque explicaciones en entidades de más bajo nivel, como individuos para dar cuenta de fenómenos a nivel agregado (Bowles, 2004).

A diferencia de muchos modelos de simulación usados en economía para representar el equilibrio, que presentan un enfoque *top-down* (Davis, 2018) para describir un control central (Epstein, 2020), para esta investigación, dada la naturaleza emergente y porque el énfasis está en la influencia de los elementos individuales, se puede hablar de modelación *bottom-up* (Verhoog, 2018). En esta no hay reglas que rijan el sistema como un todo, sino que el comportamiento surge a lo largo de la simulación (Sarmiento-Vásquez & López-Sandoval, 2017).

A continuación, en la tabla 2-1, se presentan los tipos de configuraciones que se han revisado: sistema, sistema complejo y sistema complejo adaptativo, con sus definiciones y algunas descripciones para aportar mayor claridad en lo expuesto; también, se ofrecen elementos teóricos que definen la economía a partir de las aproximaciones revisadas.

Tabla 2-1: La economía como sistema complejo adaptativo

TIPO DE CONFIGURACIÓN	DEFINICIÓN	DESCRIPCIÓN		
SISTEMA	Cierto número de elementos en interacción (Bertalanffy, 1986).			
SISTEMA COMPLEJO	Sistema de partes que interactúa y muestran un comportamiento emergente (Newman, 2009).	Capacidad de procesar información y responder a ello (Cumming et al., 2013).	Presencia de ciclos de retroalimentación que regulan o amplifican las tendencias que resultan habitualmente por equilibrios múltiples (Cumming et al., 2013).	Las retroalimentaciones dificultan distinguir causas de efectos, además generan retrasos y dan paso a umbrales, discontinuidades y límites (Costanza et al., 2013).
SISTEMA COMPLEJO ADAPTATIVO	Sistema que tienen un gran número de componentes, frecuentemente llamados agentes, que interactúan, adaptan o aprenden (Holland, 2006).	Modifican su estructura o comportamiento como respuesta a cambios externos en el ambiente (Cumming et al., 2013).	Dependencia al pasado (Fisher & Rucki, 2017).	Incertidumbre (Paravantis, 2016).
↓		SISTEMA COMPLEJO	TEORIA EVOLUTIVA	
		Comportamiento de autorreferenciación que da origen a emergencias (Newman, 2009).	Selección multinivel -> <i>Fitness</i> (Newman, 2009); Diversificación - combinación de bloques (Paravantis 2016); Mutación (Holland, 1996).	
		Dependencia sensible a condiciones iniciales (Godwy et al., 2016).	Dinámicas de adaptación o aprendizaje (Godwy et al., 2016).	
		Control sin jerarquía (Godwy et al., 2016).	Adaptación del sistema como un todo (Wilson et al., 2016).	
ECONOMÍA	Es un sistema de comportamientos masivos que concurren paralelamente, de los cuales se forman mercados, precios, acuerdos comerciales, instituciones e industrias. Se forman patrones agregados. (Arthur, 2014).	Interacción dispersa. agentes heterogéneos actúan paralelamente. Sus acciones dependen de acciones anticipadas de algunos de los otros agentes y del estado agregado que ellos crean (Arthur, 2015). Racionalidad inductiva (Arthur, 2014).	Sin controlador global. El control se da por mecanismos de competencia y coordinación entre agentes. Las acciones económicas están medidas por instituciones legales, roles asignados y asociaciones cambiantes (Arthur, 2015).	Organizaciones jerárquicas transversales. La economía presenta varios niveles de organización e interacción (comportamientos, acciones, estrategias) que sirven como bloques de construcción para unidades de niveles más altos (Arthur, 2015).
		Sistema de reglas (estructuras), que determina conexiones claves en el sistema económico y, cuya naturaleza es de orden "meso económica" que al cambiar las circunstancias se tornan obsoletas, degenerativas, no adaptadas y reemplazadas (Foster, 2005).	En la conformación de estructuras surgen redes económicas que constituyen entidades dinámicas donde se presenta formación y eliminación de vínculos, conformando una configuración que influye en los resultados económicos. Por tanto, las relaciones importan, y el tipo de comportamiento colectivo es más que la suma de sus partes (Wilson et al., 2016).	Adaptación continua: Comportamientos, acciones, estrategias son revisadas continuamente como agentes individuales que acumulan experiencia. El sistema constantemente se adapta (Arthur, 2015).
		Novedad perpetua: Nichos continuamente están creando nuevos mercados que llevan a la economía fuera del equilibrio (Arthur 2015).	Sistema abierto a otros sistemas (Beinhocker, 2006).	Incertidumbre desde agentes y desde el sistema como un todo (Arthur, 2014). Además, el presente del sistema está condicionado por hechos pasados (Fernández et al., 2004). De allí, que lo propuesto en un nicho puede no funcionar en otro (Costanza et al., 2013).

Fuente: elaboración propia a partir de Arthur (2014; 2015; 2021), Beinhocker (2006), Bertalanffy (1986), Costanza *et al.* (2013), Cumming *et al.* (2013), Fernández *et al.* (2004), Fisher y Rucki (2017), Foster (2005), Gowdy *et al.* (2016), Holland (1996; 2006), Newman (2009), Paravantis (2016) y Wilson *et al.* (2016).

2.2.4 La economía como sistema complejo adaptativo y otras aproximaciones teóricas

Una vez caracterizada la economía como un sistema complejo adaptativo, a continuación, se presentan las afinidades de esta aproximación con otros enfoques de la economía; también, se señalan algunos de los principales argumentos en la discusión entre la economía de la complejidad y la aproximación neoclásica.

De acuerdo con Arthur (2014), la economía de la complejidad es compatible con aquellas escuelas de pensamiento económico no convencionales, que no se oponen al modelo matemático, entre las que se encuentra la economía austriaca. Hayek fue conocido por su visión de la economía de mercado como un sistema de procesamiento de información caracterizado por un orden espontáneo: el surgimiento de la coherencia, a través de las acciones independientes de un gran número de individuos, cada uno con conocimientos limitados y locales, coordinados por precios, que surgen de procesos descentralizados de competencia. Los austriacos contemporáneos, por su parte, enfatizan en la importancia del no equilibrio y en los procesos emergentes en la explicación del mundo social.

Por otro lado, se encuentra la economía conductual, ecológica, evolutiva, e institucional. Como la economía de la complejidad, bebe de las nociones más amplias de complejidad y también se inspira en otras disciplinas, como la biología, la ecología, la física y las matemáticas, por tanto, desde esta aproximación, la economía de la complejidad se apoya en otras corrientes de la economía para explicar los sistemas complejos adaptativos. De ahí que se soporte en la economía conductual para explicar el proceso de toma de decisiones de los agentes; en la economía institucional, que ayuda a comprender la emergencia y comportamiento de las instituciones que facilitan y dan forma a las decisiones; en la economía evolutiva, para conocer los mecanismos de selección que dan lugar tanto al comportamiento, como a las instituciones; y en la economía ecológica, para comprender

la sostenibilidad del sistema complejo y su relación con otros sistemas complejos no económicos.

Sin embargo, con respecto a la corriente ortodoxa neoclásica, representada principalmente por el modelo de equilibrio general Arrow-Debreu, de competencia perfecta con propiedad privada, la aproximación de la economía compleja sostiene profundas diferencias, comenzando por el comportamiento de cómo se concibe la racionalidad en los individuos. La corriente neoclásica explica el comportamiento global de un mercado por la suma del comportamiento de dos tipos de agentes racionales individuales: consumidores y productores. Cada uno de estos maximiza su función objetivo con restricciones. El consumidor maximiza su función de utilidad con restricciones de presupuesto, mientras que el productor maximiza sus beneficios con restricciones de producción (Monsalve, 2021). Desde esta perspectiva, la agregación de la macroeconomía se explica, directamente, a partir de la microeconomía como la suma de comportamientos de individuos homogéneos, sin considerar las dinámicas en un nivel meso económico, que sí se contempla en la mirada compleja. En este, la racionalidad no es optimizadora, sino limitada en su capacidad de aprender y de adaptarse; sus creencias e hipótesis se ajustan al entorno agregado creado en conjunto.

En el paradigma neoclásico, los agentes, que están perfectamente bien informados y sin mayores costos de optimización, se enfrentan a una estructura de precios. Sin embargo, el enfoque complejo plantea que la información es limitada para los agentes y tiene altos costos de procesamiento, pero que, en condiciones apropiadas, evolucionan no de manera óptima, pero sí de manera eficiente desde la perspectiva heurística. Además, los agentes participan en sofisticadas redes superpuestas, que les permiten compensar, en parte, la falta de información y los costos de procesamiento (Gintis, 2006).

Uno de los elementos centrales de la teoría neoclásica es el equilibrio, ya que la economía es modelada como la solución de un conjunto de soluciones en equilibrio al usar herramientas teóricas de la matemática y de la física (Gintis, 2006). Esta aproximación se pregunta con qué precios y cantidades de bienes producidos y consumidos podrían ser consistentes con el patrón general de precios y cantidades en los mercados económicos

(Arthur, 2014). Sin embargo, en las aproximaciones evolucionistas, como la de Gintis (2006), este cuestionamiento carece de sentido si se considera una permanente interacción entre los agentes. Dicha interacción entre agentes y con el ambiente implica adaptabilidades y evolución a través de procesos de selección y amplificación, que crean novedad. Se suman al aprendizaje que, en contextos evolutivos de la cultura, también se dan a través de la imitación. La mayoría de las mutaciones resulta nociva, por tanto, es más probable que un agente mejore su posición al imitar a otro exitoso en lugar de experimentar por sí mismo. Así, los sistemas económicos reales siguen reglas simples, pero estas reglas no son estáticas, ni siquiera en el corto plazo, porque los humanos y sus instituciones son el producto de una evolución cultural a paso rápido y de una evolución genética a paso lento. Aquí, la trayectoria dependiente es importante en contraste con el supuesto ahistórico del equilibrio general (Axtell *et al.*, 2016).

La interacción entre los dos tipos de agente, en el abordaje neoclásico, resulta en un flujo circular de bienes y servicios y factores de producción (mano de obra, tierra y capital), en un circuito cerrado, guiado por señales de precio (Göpel, 2016). Sobre este punto, el complexólogo Beinhocker (2006) apela al principio de conservación de la energía (primera ley de la termodinámica), que postula que, en sistemas cerrados, la energía no se crea ni se destruye, sino que cambia sus formas y, en la medida en que esto sucede, aumenta la entropía (medida de desorden o aleatoriedad), lo que implica que la continua actividad, en cualquier sistema cerrado, lleva a que este se desintegre. Solo los sistemas abiertos al tomar la energía necesaria de los sistemas conectados pueden contrarrestar este proceso. Así, la naturaleza usa la energía del sol para sus circuitos de reproducción evolutiva, y los humanos usan la de la naturaleza. Por tanto, la economía es un sistema abierto al tomar la energía de otro sistema, que es el natural. Sin embargo, esto es invisible al modelo neoclásico, que solo rastrean precios de intercambio.

Con respecto a la necesidad de intervención del Gobierno en las decisiones económicas, la postura neoclásica es más cercana a asumir el Estado y el mercado como opositores (Colander, 2016). Por esta razón, es más proclive a dejarle los procesos de selección y amplificación de los planes de negocio al mercado (Gintis, 2006). Sin embargo, varios autores de la economía de la complejidad apelan por una coevolución entre el Estado y el mercado. Beinhocker (2006), por su parte, sostiene que el papel económico del Estado es

crear un marco institucional que apoye el funcionamiento evolutivo de los mercados; Wilson *et al.* (2016) sugieren que las políticas públicas son, en sí mismas, estructuras complejas que deben ser equiparadas, ajustadas y adaptadas al sistema que pretenden regular; y Colander (2016) señala que el análisis de políticas, a partir de la complejidad, no puede usarse como «solución» al mercado, porque el mercado no podría existir sin el Gobierno.

Es evidente que la economía de la complejidad es crítica frente a los planteamientos neoclásicos. Pero, así mismo, muchos de sus impulsores son conscientes de las limitaciones que el enfoque complejo puede presentar para explicar los fenómenos económicos. A continuación, se señalan los más relevantes.

2.2.5 Críticas a la aproximación compleja de la economía

Una de las principales críticas es la vaguedad del abordaje no solo por la dificultad en la definición de complejidad, sino porque muchos de sus conceptos, como entropía, aleatoriedad o información son imprecisos (Jakimowic, 2020). Además, varios simpatizantes de las ciencias complejas, incluso, consideran que este abordaje no reúne los estándares del entendimiento científico, es decir, que algunos de sus planteamientos son conjeturas o especulaciones, pero no son comprobables (Colander, 2016). En esta dirección, el propio Arthur (2015) señala que la economía de la complejidad no es más que un enfoque, pero no es aún un programa de investigación pues, para ello, es necesario identificar problemas económicos concretos para los que el enfoque proporcione nuevos conocimientos y construir los fundamentos cognitivos y estructurales para modelar estos problemas, así como desarrollar métodos para relacionar las teorías basadas en estos fundamentos con los fenómenos observables. Para esto, si bien se han hecho adelantos, la tarea aún está inconclusa.

Algunas de las críticas más fuertes provienen de economistas de la complejidad influenciados por la escuela austriaca, pues, de acuerdo con Arthur (2014), estos plantean un gran escepticismo sobre qué tanto se puede entender y pronosticar sobre el sistema económico, dado que el número de variables, para su explicación, es tan grande que puede ser indefinible. La superposición de sistemas complejos puede llevar a interacciones inesperadas que no pueden ser anticipadas por los modelos económicos; al ser la economía

un sistema complejo, muestra sensibilidad a las condiciones iniciales y hace poco probable la calibración de los modelos con las condiciones necesarias para pronósticos útiles.

Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, el abordaje desde la complejidad tiene la ventaja de caracterizar agentes heterogéneos y sus comportamientos, así como de introducir una nueva mirada en el nivel agregado, pero desde la perspectiva *bottom-up*. Esto quiere decir que el nivel micro no es desconocido al generalizarlo, sino que es la esencia misma de lo que ocurre en el nivel macro, considerando que lo que ocurre en el macronivel afecta, posteriormente, los comportamientos individuales del sistema.

Una vez descrita la economía como un sistema complejo adaptativo, a continuación, se presenta como un sistema ambiental y su interacción con el sistema económico se puede plantear desde el enfoque de la complejidad y la perspectiva de los estudios de transición a la sostenibilidad.

2.3 El sistema ambiental desde la transición a la sostenibilidad

El pensamiento occidental separó a los seres humanos de la naturaleza y, tal como lo describe Carrizosa (2000), esto llevó a que mejorara la percepción de los otros «reinos» y, a su vez, se afirmaran la jerarquía y el poder humano de transformar el resto de lo natural. Esto trajo consigo que, en varias disciplinas, la acción humana sea vista como externa a la dinámica de los ecosistemas. Pero es, precisamente, esta mirada la que ha llevado a desconocer que los ecosistemas y los sistemas sociales que los usan están, inextricablemente, vinculados (Folke *et al.*, 2010).

A partir de la interrelación de vínculos, surge la sostenibilidad del sistema, ya que no está en sus elementos individuales. Según Acquier *et al.*, (2017) los productos, servicios, tecnologías y organizaciones no se pueden considerar sostenibles por sí mismos, pero sí elementos de un sistema sociotécnico sostenible. Estos elementos de los sistemas económico, social y ambiental, en conjunción, son abordados por la transición a la sostenibilidad.

Transición a la sostenibilidad

Las transiciones son emergencias de interacciones entre grupos sociales con puntos de vista miopes y estrategias, intereses y recursos diferentes, en los que los grupos sociales intentan hallar su camino a través de la búsqueda y el aprendizaje. En ese recorrido, se pueden presentar controversias, debates e, incluso, luchas de poder (Geels, 2020). La aproximación de transición a la sostenibilidad es sistémica, es el escenario en el que se ejercen procesos de transformación a largo plazo, en diferentes escalas y, esencialmente, en el sistema sociotécnico establecido que busca cambiar a modos de producción y consumo más sostenibles (Markard *et al.*, 2012).

Este enfoque se mueve en tres niveles, principalmente:

- Nichos: corresponden a una nueva estructura, de un pequeño grupo de agentes que surge dentro del sistema y se alinea con una nueva configuración. Por lo general, esta nueva alineación es una propiedad emergente del sistema (Mesjasz, 2016). Allí, los nichos son protegidos. Así, para desarrollar innovaciones radicales, no están sujetos a la presión de selección del régimen predominante (Markard *et al.*, 2012).
- Sistema sociotécnico: se refiere al conocimiento científico, prácticas de ingeniería y tecnologías de procesos que están socialmente integrados. Es decir, se vinculan con expectativas y habilidades de los usuarios de tecnología con estructuras institucionales e infraestructuras más amplias (Markard *et al.*, 2012). En el camino de una transición a la sostenibilidad, esto implica cambios en diferentes aspectos de los regímenes técnico-material, organizacional, institucional, político, económico y sociocultural, lo que conlleva a la emergencia de nuevos productos, servicios y modelos de negocio que sustituyen o complementan los que ya existen (Mesjasz, 2016). En ese sentido, en lo tecnológico, en confluencia con la financiación y la administración de sistemas, se requieren, pero no son suficientes, y se hacen necesarios cambios en la gobernanza, en las instituciones y en los sistemas de valores para la transformación hacia una sociedad globalmente más sostenible, que aporte a la paz, la libertad, el bienestar material, la cooperación, el cuidado y la salud ambiental (Brauch & Oswald Spring, 2016).
- Entorno: corresponde al macronivel, que consiste en el conjunto de profundas tendencias estructurales (Morone, 2018). Estas pueden ser consideradas tendencias exógenas de largo plazo (Grin *et al.*, 2010). En esta escala, los individuos

y la naturaleza se conectan e interactúan de forma más aguda. Por tanto, la composición y la configuración del entorno afectan profundamente y se ve afectadas por las actividades humanas (Wu, 2013). Ejemplo de ello puede ser el cambio climático.

Estas escalas o grados de estructuración representan relaciones funcionales entre actores, estructuras y prácticas estrechamente relacionadas con una jerarquía anidada, en la que los nichos están integrados a los regímenes socioeconómicos y, estos, al entorno. Mientras más alto sea el nivel (entorno), más agregados están sus componentes y la dinámica entre actores, estructuras y prácticas es más lenta. Para lograr la transición a la sostenibilidad, se debe dar una alineación particular de trayectorias dentro y entre los niveles (Grin *et al.*, 2010).

Las innovaciones de los nichos aumentan el impulso interno a través de procesos de aprendizaje, eficiencias y expansión de redes, entre otras. A su vez, los cambios a nivel de entorno crean presión en el régimen sociotécnico, desestabilizándolo. Esto abre oportunidades para la difusión de las novedades de nicho que se alinean con procesos que se van incorporando a los regímenes, que conllevan transformaciones y disrupciones sustanciales (Brauch & Oswald Spring, 2016).

Aquí, el principal desafío es identificar y superar barreras estructurales como condiciones de mercado, regulaciones, tecnologías, rutinas del consumidor para moverse en la dirección deseada. De allí que la gestión de la transición tenga como objetivo experimentar, desarrollar y aprender sobre el potencial de diferentes innovaciones, ya sean tecnologías, prácticas, productos u organizaciones con el potencial de materializar la visión estratégica y convertirse en nuevas estructuras más sostenibles (Loorbach *et al.*, 2010). Sin embargo, es necesario considerar que cada contexto muestra un inicio histórico diferente de dependencia con el pasado; así, lo que se propone en un nicho puede no funcionar en otro (Costanza *et al.*, 2013).

Esta aproximación tiene un enfoque de descarbonización, desmaterialización, reducción en el consumo del agua y de la huella ambiental, en busca de la cooperación global y la solidaridad que contribuyan a la paz. Identificar cómo la paz opera dentro de esta propuesta

multiescalar de la transición a la sostenibilidad también exige que la paz se analice desde el punto de vista de los sistemas complejos.

2.4 La paz, emergencia de un sistema complejo adaptativo

En esta sección, en un primer momento, se aborda la paz a partir del enfoque teórico de los sistemas complejos, al identificar mecanismos de operación y presentar ejemplos de autoorganización. Posteriormente, se desarrolla la propuesta teórica que describe su emergencia a partir de la relación de los sistemas económico, social y ambiental.

Coleman, desde una perspectiva sistémica, define paz sustentable como «el estado donde la probabilidad de usar conflictos y violencia destructivos para resolver problemas es tan baja que no entra en la estrategia de ningún agente, mientras que la probabilidad de usar la cooperación y el diálogo para promover justicia social y bienestar es tan alto que gobierna la organización social y la vida» (Coleman, 2016, p. 150).

Bajo este mismo enfoque de sistemas complejos, Eoyang (2015) plantea que la paz es simples reglas en el sistema que, al ser identificadas, pueden lograr cambios en los patrones emergentes, en las condiciones iniciales o en su interpretación. En esta misma línea, el trabajo de Coleman (2020) identificó que, en contextos de sociedades establemente pacíficas, aunque la paz es compleja e idiosincrásica, se puede operacionalizar en función de la relación de RPI (reciprocidades positivas intergrupales) y RNI (reciprocidades negativas intergrupales). La dinámica central, responsable del surgimiento y mantenimiento de relaciones pacíficas sostenibles en las sociedades, son los miles o millones de interacciones intergrupales recíprocas que ocurren a diario entre miembros de diferentes grupos en esas comunidades y dependen del grado en que las interacciones más positivas superan a las más negativas: cuanto mayor sea la proporción de RPI:RNI, mayor será la probabilidad de mantener la paz.

En este mismo sentido Fry *et al.* (2021), en su investigación etnográfica, hallaron que, con el tiempo, las relaciones prosociales recíprocas se desarrollan y vinculan a las sociedades que no están en guerra dentro de un sistema social común más amplio, donde prevalecen

la cooperación y la unidad, mientras que la guerra entre los miembros deja de considerarse una opción. Queda, entonces, en evidencia el vínculo directo entre cooperación y paz.

Por tanto, el concepto de cooperación resulta relevante. De acuerdo con los estudios de por Bowels y Gintis (2002), la cooperación se basa, en parte, en las capacidades distintivas de los seres humanos para construir entornos institucionales que limiten la competencia dentro del grupo al aumentar la importancia relativa de la competencia entre grupos, lo que lleva altos costos individuales e implica decidir, mejor, por comportamientos benéficos en los grupos para coevolucionar. Por esta razón, en la historia de la humanidad, la cooperación ha favorecido la evolución al mejorar las oportunidades del individuo para el apareamiento y la formación de coaliciones. En su análisis de modelos dinámicos, los autores encuentran que los comportamientos cooperativos que traen beneficios a los miembros del grupo permiten que grupos con altas vínculos de cooperación dominen en conflictos intergrupales, lo que resulta en un mecanismo evolutivo de internalizar normas, ya que lleva a mejorar la aptitud individual en un mundo en el que el comportamiento social se ha vuelto demasiado complejo para una evaluación racional individual.

En el nivel de grupo, la organización funcional requiere de individuos que desempeñen servicios cooperativos. Los miembros que cooperan son, probablemente, menos buenos para sobrevivir o reproducirse que aquellos *free-riders*, que explotan de manera activa los cooperadores. Cuando esto sucede, la organización funcional, a nivel de organismo individual, se detiene y no se extiende al grupo social o a un nivel más alto. Así, la cooperación es desventajosa si se compara con quienes no cooperan; pero grupos compuestos, principalmente, por cooperadores están en selección ventajosa con respecto a grupos de explotadores y no cooperadores (Wilson, 2016a).

Así, los conflictos pueden disminuir cuando los agentes llevan a cabo acciones cooperativas que otorgan valor a todos los agentes (ganar-ganar) (BenDor & Scheffran, 2019). Por ello, como plantea Cottey (2018), la cooperación es uno de los aspectos que puede llevar a la prevención del conflicto, ya que este último prospera en ambientes de individualismo, competencia y acumulación al mostrar una actitud severa contra los perdedores.

Continuando con la dinámica que despliega un SCA, adquiere relevancia la apreciación de Mesjasz (1988), que plantea que, para estudios sociales, con el fin de prevenir la violencia, se debe abandonar la esperanza de un control centralizado. Los estudios de paz deben tener en cuenta el rol de la autoorganización en los sistemas sociotécnicos. Esto resulta crucial para la transición a la sostenibilidad. Bajo esta perspectiva, de Coning (2020) plantea que la consolidación de la paz se basa en estimular y facilitar la capacidad en las sociedades para autoorganizarse. Es decir, en gestionar sus propias tensiones, presiones, disputas, crisis y conmociones sin recaer en un conflicto violento. La solidez y la resiliencia para generar esta autoorganización determinan hasta qué punto la sociedad puede resistir a presiones y conmociones que lleven a un conflicto violento. Este proceso autoorganizativo debe provenir de un proceso local ascendente y específico del contexto.

En esta línea, la propuesta teórica de Coning (2020) expone el enfoque adaptativo frente a la complejidad de la resolución de conflictos y la consolidación de la paz, que se puede resumir en seis principios: i) las acciones tomadas para influir en una paz sustentable, deben ser específicas al contexto y al tiempo y deben surgir de la participación de las propias sociedades; ii) identificar en la sociedad a qué debe aspirar en el proyecto de paz; iii) contar con una metodología específica que facilite la obtención de resultados orientados a objetivos; iv) experimentar con un espectro de opciones; v) debe ser un proceso selectivo que preste atención a la retroalimentación para determinar acciones con mejor efecto; y vi) hacer este proceso iterativo, ya que las evaluaciones funcionan para ventanas de tiempo relativamente cortas antes de que entren nuevas dinámicas.

Una vez identificadas en este acápite las interacciones de orden cooperativo, como mecanismos individuales que pueden favorecer la paz, y que dan paso a comportamientos autoorganizados y evolutivos en la medida en que predominan los de mejor *fitness*, a continuación, se presentan algunos ejemplos

Uno de ellos es la inteligencia de enjambre. Maldonado (2019) la describe como aquella relación sistémica en la que no se habla de causalidades, ya que estas solo se dan en niveles locales y circunstancias controladas, sino de emergencias, pues no hay una relación directa de causa-efecto. Se ve, entonces, un orden en el que la causalidad parece ser una probabilidad. En este tipo de comportamiento, las comunicaciones son permanentes y se

da una participación activa en asambleas y reuniones en las que surge el aprendizaje como condición de adaptación. Cuando esta inteligencia de enjambre aparece, el sistema social integra más que a los individuos; allí las preocupaciones, metas y objetivos son los que importan. Esta inteligencia de enjambre es el resultado de un sistema autoorganizado de manera espontánea, que surge de la racionalidad de comportamientos emergentes colectivos. No hay, por tanto, un plan o estrategia desde el inicio, sino posibilidades, problemas u obstáculos que permiten la inteligencia colectiva, en la que cada individuo obtiene el mayor beneficio al ser parte del enjambre y no actuar individualmente. Esta emergencia y autoorganización explica la no linealidad y da cabida, por ejemplo, a situaciones con más de una solución y, estrategias, como maximización u optimización, dejan de ser relevantes.

Axelrod (1984) sugiere que, en este tipo de comportamientos cooperativos, cuando la probabilidad de que dos individuos se encuentren de nuevo es suficientemente alta, la cooperación basada en la reciprocidad puede prosperar y ser evolutivamente estable en una población sin mucho parentesco.

También, se encuentra el aprendizaje social, como otro elemento que subyace a las relaciones sociales. Folk *et al.* (2005) plantean que los procesos que generan aprendizaje, significado y experiencia de la dinámica de los ecosistemas, que se expresan en la práctica de su manejo, son parte de la capacidad social para responder al cambio ambiental. Así, sugieren que, una visión clara, historias y significados completos, buenos vínculos sociales y confianza con los demás interesados pueden movilizar grupos de interés en varios niveles e iniciar un proceso de autoorganización de aprendizaje y de generación de capital social para el manejo de sistemas adaptativos complejos.

Por su parte, Cumming (2013) enfatiza en el aprendizaje social «haciendo» a través de experiencias en procesos de grupos exitosos, que deben mostrar un cambio en el entendimiento de los individuos involucrados. Esto permite que esta variación vaya más allá de los individuos e incorpore no solo un gran número de ellos, sino prácticas de la comunidad por medio de interacciones sociales y de procesos entre actores con redes sociales (Cumming *et al.*, 2013). Por tanto, en el aprendizaje social, persiste la idea de que los entendimientos entre los individuos dan paso a prácticas en la comunidad en distintos

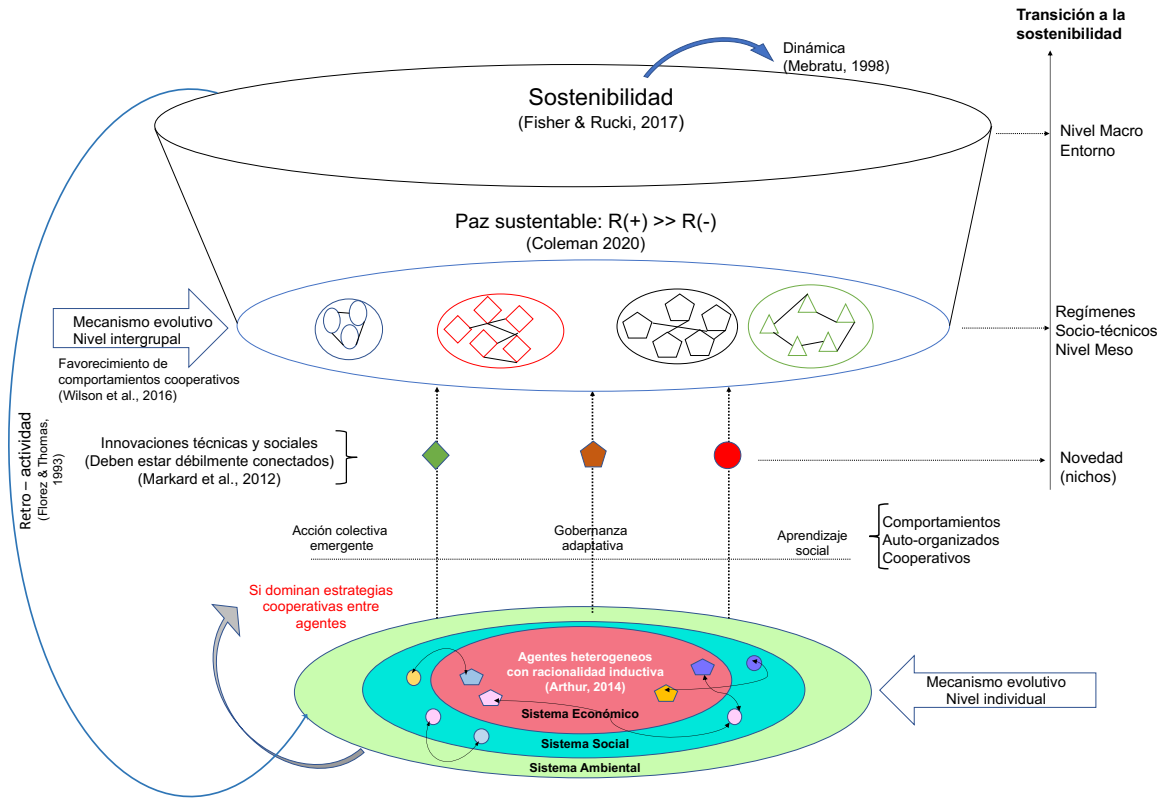
niveles, que se representan en una autoorganización que pone en marcha cambios más allá de cada uno.

Otro comportamiento es la gobernanza adaptativa que, de acuerdo con Folke *et al.* (2006), es una forma de arreglo social en la que las acciones se coordinan de manera voluntaria por individuos y grupos multindividuales con autoorganización y capacidad de hacer cumplir. En estos, se evidencian arreglos institucionales policéntricos anidados y tomadores de decisiones cuasi autónomos en distintos niveles, que recaen sobre redes que conectan individuos, organizaciones, agencias e instituciones en múltiples niveles de organización y provén colaboración, flexibilidad y aproximaciones de manejo de ecosistemas basados en aprendizaje. Es decir, se observa una estructura evolutiva de múltiples interacciones en distintos niveles para coordinar acciones sin un gran poder central.

Dietz, Ostrom y Stern (2003) proponen que los requerimientos de gobernanza adaptativa en un sistema complejo son: i) proveer información confiable de *stocks*, flujos y procesos con los recursos del sistema gobernado; ii) capacidad de manejar conflictos. Grandes diferencias en poder y valores entre las partes interesadas hacen que el conflicto sea inherente. De allí que sea conveniente promover la deliberación analítica, a través de un diálogo bien estructurado y representado por los distintos actores; iii) proveer infraestructura y estar preparados para el cambio. Las instituciones deben estar diseñadas para permitir el cambio, sin reglas muy fijas y no fallar en darle mucha importancia al estado actual del conocimiento; y iv) anidamiento: debe haber arreglos institucionales anidados en varias capas.

Los elementos teóricos presentados a lo largo de este capítulo se integran a través de una propuesta que considera la dinámica de los SCA en un contexto de interrelación de los sistemas económico, ambiental y social en busca de favorecer la paz, que se representan en la figura 2-2.

Figura 2-2: Sistema complejo adaptativo para la paz



Fuente: elaboración propia.

En la base de la figura, se esquematizan las relaciones intersistémicas a partir de interacciones entre los sistemas abiertos económico, social y ambiental, constituidos por agentes heterogéneos con capacidades cognitivas e información limitada que, a través de una racionalidad inductiva, se adaptan o evolucionan. Este es un marco teórico que aporta la economía de la complejidad.

Los procesos de adaptación y evolución se dan a través de mecanismos de selección entre diversas alternativas, que se ejecutan de manera sistemática y a diferentes escalas. En la base de la figura, se muestran los mecanismos de selección individual entre las diversas estrategias implementadas por los agentes. En la medida en que domine la estrategia cooperativa, se puede dar paso a comportamientos autoorganizados, como acción colectiva emergente, gobernanza adaptativa, aprendizaje social, u otro, que promuevan comportamientos favorecedores para la paz.

Estos comportamientos puedan propiciar innovaciones técnicas y sociales que afecten el sistema socioeconómico y que estén en concordancia con la idea de sostenibilidad que, si bien es dinámica, es decir, puede cambiar en el tiempo, para esta propuesta teórica se considera la de Fisher y Rucki (2017). Aquí, la sostenibilidad es el proceso de mantener los avances logrados en las dinámicas de los sistemas deseables, mientras se cambian, modifican o mejoran activamente otras dinámicas para acercar el sistema al objetivo de justicia social y bienestar humano. El desarrollo económico, el funcionamiento de los ecosistemas, la paz y el manejo de los conflictos se hacen componentes necesarios.

En este sentido, de la propuesta de Coning (2020), con su enfoque adaptativo de experimentar entre acciones enfocadas para la paz de acuerdo con el contexto de tiempo y espacio y en el que, de manera iterada, se seleccionen las opciones más eficaces, pueden surgir iniciativas que trasciendan a un nivel superior.

Para que estos nichos de innovación no sean descartados por todo el sistema y puedan prosperar y trascender al nivel socioeconómico, la transición a la sostenibilidad sugiere que deben estar conectados débilmente con las estructuras dominantes (Markard *et al.*, 2012).

Una vez permeado el nivel sociotécnico con estas iniciativas, se sugieren mecanismos de selección intergrupales que, como plantean Wilson *et al.* (2016) y Coleman (2020), pueden favorecer comportamientos cooperativos que, a su vez, irradian al nivel superior del meta sistema. Promoviendo de esta manera las reciprocidades positivas.

Los estudios de Coleman (2020) señalan que, en una sociedad caracterizada por una paz sustentable, la diferencia entre reciprocidades intergrupales positivas supera con gran diferencia las reciprocidades intergrupales negativas. Esto lleva a sugerir que, en la medida en que la diferencia entre las acciones cooperativas y las no cooperativas sea mayor, la paz, como emergencia, se puede instaurar como un comportamiento estable.

De esta manera, como la sostenibilidad es el recurso epistemológico de cómo se desea el futuro (Mebratu, 1998), que está sujeto a todas las relaciones que se dan dentro del sistema, su naturaleza es dinámica. Esta misma idea de sostenibilidad, creada por todos los agentes

del sistema, de nuevo permea las decisiones de los individuos, generando retroacciones, para dar paso, a procesos de decisión individual.

Con el fin de lograr una mayor comprensión de las dinámicas emergentes a partir de las interacciones entre agentes de los sistemas económico y social, que están en relación continua con el sistema ambiental, es decir, a nivel de selección individual (la base de la propuesta teórica aquí expuesta y que corresponde a la base de la figura 2-2), en el siguiente capítulo se propone un modelo basado en agentes para simular y comprender esta dinámica.

3. Sistemas económico, social y ambiental: modelación basada en agentes

Como ya se presentó en el capítulo anterior, el camino para lograr comportamientos que favorezcan la emergencia de la paz parte de comportamientos individuales locales, que desencadenan otras dinámicas a nivel meso y macro. Esto explica la importancia de comprender su funcionamiento local. Por tanto, se propone un modelo que dé cuenta de cómo se generan los comportamientos dominantes en el micronivel.

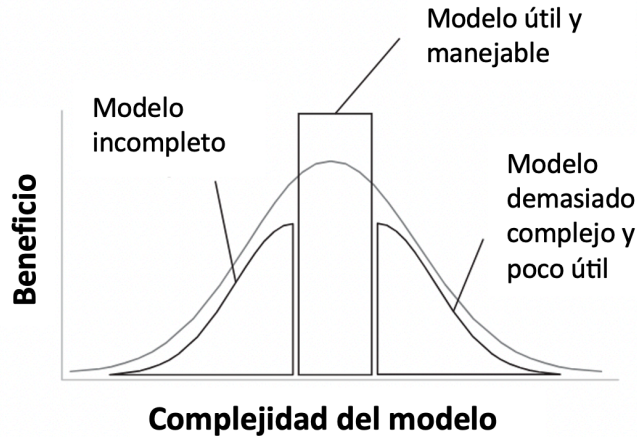
La evolución de los sistemas económicos y sociales puede estar determinada, en parte, por la percepción que los agentes tienen de cómo funciona cada sistema (Kirman *et al.*, 2016). Sin embargo, la consideración del ambiente en el que interactúan puede reflejar posteriores adaptaciones tanto del escenario mismo, como de los propios agentes que los afectan. Esto implica, para esta investigación, que el diseño del sistema a modelar debe considerar, como fenómeno endógeno, la afectación de la paz a partir de las interacciones entre agentes económicos y sociales con el sistema ambiental.

En el capítulo dos se enunciaron los procesos de adaptación, que se pueden dar a través del aprendizaje, que permiten incluir prácticas de la comunidad a partir de interacciones sociales (Cumming *et al.*, 2013). Por tanto, para evaluar este comportamiento, el modelo de simulación incorpora adaptaciones como resultado de la imitación de las estrategias que generan mayores recursos, así como de imitación del comportamiento de otros agentes. De esta manera, se busca identificar estrategias dominantes o comportamientos autoorganizados dentro del sistema.

No obstante, uno de los retos más grandes que trae consigo un proceso de modelación es encontrar un balance entre el detalle y la generalidad. No se puede llegar al nivel minucioso que complejice a tal punto el modelo que haga imposible identificar las principales fuerzas

que jalonan su comportamiento. Pero tampoco, puede ser lo suficientemente general como para que sus resultados se reduzcan a obviedades. Así lo representa BenDor (2019) en el siguiente esquema:

Figura 3-1: Balance en el modelamiento



Fuente: BenDor & Scheffran (2019).

Así, para el proceso de modelación, es necesaria una lectura de los principales comportamientos que determinan la dinámica de cada subsistema que, para esta investigación en particular, están en función de su relación con el ambiente. También se considera una mirada compleja y sistémica en la que la paz se percibe como una emergencia a partir de un proceso endógeno dentro del meta sistema habitado por interacciones y retroalimentaciones de orden económico, ambiental y social. Sin embargo, estas dinámicas deben ser acotadas ante unas restricciones en el proceso de modelación y del alcance esperado del modelo.

Según estas consideraciones, para este capítulo, en un primer momento, se presenta el método de simulación de modelos basados en agentes (MBA) y se explica por qué se constituye en un método adecuado para la modelación del fenómeno de la paz a partir del marco teórico expuesto. Posteriormente, se presentan los argumentos, supuestos y alcances que tienden un puente entre el comportamiento real y el comportamiento a modelar para dar paso a los elementos teóricos y de diseño que describen las

características de los agentes, del ambiente en el que se despliegan y del tipo de interacciones entre ellos. Por último, se presenta el protocolo de diseño y verificación que aporta robustez a los resultados obtenidos de la simulación.

3.1 Modelamiento basado en agentes (MBA)

Como ya se mencionó en el segundo capítulo, el análisis de un sistema complejo adaptativo requiere de una metodología con mecanismos para comprender las emergencias observables en un nivel meso o macro a partir de las interacciones en el nivel micro, así como considerar que los agentes son modificados por el conjunto de interacciones que ellos mismos han realizado. En ese sentido, los modelos basados en agentes (MBA) resultan ser uno de los métodos adecuados, en particular para este modelo de simulación, que busca indagar por los patrones cooperativos de los agentes, sujetos a su entorno, que está en constante cocreación.

Los MBA permiten comprender las emergencias a partir de las interacciones de los individuos (BenDor & Scheffran, 2019; Foxon *et al.*, 2013; Köhler *et al.*, 2018; Newman, 2009; Sarmiento-Vásquez & López-Sandoval, 2017). Estos «son una simulación computarizada de un número de tomadores de decisiones (agentes), que interactúan a través de reglas preestablecidas» (Foley & Farmer, 2009). Se parte, entonces, de reglas y suposiciones que, se cree, replican la forma en que los agentes individuales se comportan, interactúan y aprenden. La comunicación se puede dar de manera directa o través de intercambios creados mutuamente (BenDor & Scheffran, 2019).

La economía *neoclásica* estándar se ha preguntado con cuáles acciones, estrategias o expectativas de los agentes se llega al equilibrio con el patrón de este comportamiento agregado. Por su parte, los MBA permiten preguntarse cómo las acciones de los agentes, estrategias o expectativas podrían reaccionar (cambios endógenos) a los patrones que crean (Arthur, 2006; Foley & Farmer, 2009; Perona, 2005). Esto permite indagar por cómo se forman patrones en la economía (Arthur, 2006) en medio de agentes que se consideran heterogéneos, y no un solo tipo de agente representativo (Arthur, 2006; BenDor & Scheffran, 2019), que se adaptan, constantemente, a la situación general o a la ecología —

como la llama Arthur— que crean juntos (Arthur, 2006). De esta forma, se acercan a una aproximación evolutiva (Arthur, 2006). Los MBA abren la posibilidad de simular los objetivos, expectativas y retrasos en la adaptación de los agentes individuales de forma más sofisticada. Por ejemplo, retrasos en la adquisición de información y cambios de estrategia dan paso a procesos no lineales (BenDor & Scheffran, 2019).

El modelamiento basado en agentes permite diseñar un sistema complejo a partir de varias características, como autonomía en los agentes, al darles independencia en la toma de decisiones; con capacidad de percibir cambios en el entorno y de reaccionar ante ellos y de actuar en función de sus objetivos de manera proactiva; con habilidades sociales al poder comunicarse y actuar entre ellos; con memoria para aprender y adaptar sus comportamientos basados en experiencias (Sarmiento-Vásquez & López-Sandoval, 2017); con la posibilidad de operar en un espacio explícito (Epstein, 2020); con limitación en la información y en el poder computacional (Epstein, 2020); sin perder de vista que su principal atributo es la capacidad de interacción entre diversos tipos de agentes tomadores de decisiones (Köhler *et al.*, 2018).

Por tanto, estos algoritmos computacionales de los MBA permiten verbos, mientras que las ecuaciones solo cantidades cuantitativas de cosas, es decir sustantivos. Con los algoritmos, los agentes pueden comprar, vender y cambiar de opinión (Arthur *et al.*, 2020). Esta es una aproximación para realizar experimentos que podrían ser imposibles o difíciles de llevar a cabo con otras metodologías (García-Valdecasas, 2016). Esto permite relajar hipótesis de los modelos matemáticos compactos al cambiar robustez por rigor y realismo (Galán-Ordax, 2007).

El diseño basado en agentes tiene dos aproximaciones: i) se basan en el fenómeno ya conocido en el que, previamente, se han identificado las características y las referencias de los patrones a modelar; y ii) puede ser un modelamiento exploratorio, en el que se empieza con un conjunto básico de mecanismos y, a partir de allí, se explora lo que resulta de estos mecanismos (Rand, 2018). Para esta investigación, se parte de la aproximación exploratoria, ya que los MBA facilitan la investigación de coexistencia estable y, de hecho, una simbiosis de diferentes tipos de agentes, que se observan como rutina en la vida real (Laver, 2020). Este es un método útil cuando no se conoce cómo funciona el sistema y no

se pueden identificar las variables clave de su interrelación (Sarmiento-Vásquez & López-Sandoval, 2017). Por tanto, a través de este tipo de modelamiento, se busca entender los mecanismos que afectan la paz a partir de la interacción entre los sistemas económico, social y ambiental.

A continuación, se describe, teóricamente, la realidad que se va a modelar desde la perspectiva de la racionalidad individual, es decir, en la unidad básica, sin considerar estructuras más avanzadas y complejas, como las instituciones.

3.2 Diseño teórico del modelo

Los elementos teóricos que aquí se exponen dan cuenta de la heterogeneidad de los tipos de agentes que conforman el sistema económico y social, de las características del entorno que lo constituyen, de la forma en que los agentes perciben su entorno, y de cómo, a partir de establecer aleatoriedades y ciertos supuestos en el modelo, es posible presentar relaciones entre la emergencia en un nivel superior y las condiciones iniciales.

3.2.1 Consideraciones, supuestos y alcance

Como la modelación es un ejercicio de abstracción de la realidad, es importante resaltar cómo esta se refleja en el modelo. Para ello, se presentan las consideraciones y los supuestos. Así mismo, es importante señalar cuáles elementos se descartan para centrar la atención en las indagaciones propias de esta investigación, que se mencionan en el alcance.

Consideraciones

- Para identificar emergencias relevantes, fruto de las interacciones de los agentes en tres subsistemas, se hace necesario rastrear los flujos entre ellos por medio de una métrica homogénea, que se ajuste a los distintos tipos de agentes en cada subsistema. Por tanto, los recursos, que son los elementos de interacción, se representan en unidades de biocapacidad. Este concepto se detallará más adelante. En este contexto, es importante diferenciar que, cuando se habla de recursos ambientales, se refiere a los que las empresas toman, directamente, del sistema

ambiental, mientras que, cuando se habla de recursos de una empresa o de un individuo, estos son los recursos que cada agente va acumulando para sí mismo.

- Las condiciones iniciales juegan un papel importante. Diferentes condiciones, pero mismas reglas generan otros patrones (Eoyang, 2015). Como no es posible simular todas las alternativas, se modela con variables que presentan cierto grado de aleatoriedad con el propósito de identificar emergencias que sean independientes de sus condiciones de inicio.
- El sistema económico está abierto a un sistema ambiental, de donde se obtienen los recursos, y a uno social, en el que se presentan dilemas y conflictos.
- Se simula la dinámica global, pero a una relación de escala más pequeña.
- Todos los procesos se ejecutan en un *tick* que equivale a un año.

Supuestos

- Los mecanismos de interacción están dados por actores locales y, cuando muchos de estos interactúan, sus consecuencias se examinan para identificar propiedades emergentes.
- No se considera la presencia de instituciones formales, ya que la simulación se ocupa de los patrones dominantes a partir de la racionalidad inductiva de individuos. Es decir, a la dinámica previa a la conformación de dichas instituciones.
- Se hace una representación simple del mercado que no da paso a dinámicas endógenas, como la innovación. Sin embargo, uno de los experimentos considera las eficiencias que trae consigo la tecnología y cómo esto afecta el comportamiento de los agentes y el estado del sistema ambiental.
- Las empresas no se transfieren recursos ambientales. La relación comercial de compra y venta se da, exclusivamente, entre el agente empresa y el agente persona.

Alcance

- Pese a que la abundancia de recursos también puede generar conflictos, para esta investigación, el análisis se centra en una dinámica de escasez de recursos ambientales.
- No se consideran por separado, en el modelo, los efectos de contaminación y disposición de residuos tanto de las personas, como de las empresas. El énfasis está en el agotamiento del total de los recursos ambientales requeridos para el

consumo y la absorción de desechos y en cómo esto puede activar dinámicas de estrategias no cooperativas, que acentúen los conflictos.

3.2.2 Agentes y su comportamiento

El abordaje, desde la economía de la complejidad, intenta dar un paso más allá en el modelamiento del sistema económico al contemplar no un único tipo de agente *hiperracional*, sino la heterogeneidad de estos y las restricciones en la toma de decisiones.

Como plantea Bicchieri (1993), lo que tienen en común los agentes económicos es que todos tienen preferencias; y lo que los distingue es, precisamente, la diferencia entre ellas. Así pues, los individuos pueden ser envidiosos, altruistas, egoístas o cooperativos. Sin embargo, son consistentes en que tienden a elegir la acción que mejor sirve a sus objetivos.

Estas preferencias no permanecen como dadas en los agentes, sino que las circunstancias, y sus propias características, hacen parte de un cambio acumulativo de rasgos heredados y de experiencias pasadas (León, 2006). A partir del planteamiento de pensamiento inductivo, Arthur (2015) considera que, cuando los agentes se enfrentan a problemas complicados o débilmente definidos, usan pistas de la situación para formar patrones, marcos y asociaciones hipotéticas y, a través de las interacciones, los agentes «aprenden» cuáles de sus hipótesis funcionan; estas siguen en consideración. Sin embargo, aquellas menos exitosas tienden a ser descartadas.

Este comportamiento de los agentes se da en un transitar permanente entre el pasado y el futuro, y entre el individuo y los otros agentes con su entorno. Con respecto al pasado, como precisa León (2006), en el contexto de la maximización racional en la perspectiva evolutiva, los errores no solo hacen parte de la experimentación evolutiva al aportar nuevas soluciones a problemas, sino que implican una mirada hacia atrás, ya que el conocimiento obtenido de ese aprendizaje es evolutivo. Sin embargo, el comportamiento de los agentes y de cómo deciden está determinado por el comportamiento de los demás agentes y por cómo este comportamiento afecta su entorno. Es decir, sus decisiones, también, dependen de las predicciones de su futuro y de cómo los otros agentes hacen esas predicciones. De este

modo, esta racionalidad individual se debe complementar con cierto conocimiento del entorno, que incluye las acciones y creencias de los otros (Bicchieri, 1993).

Este enfoque, de complementar la elección racional con una perspectiva evolutiva, tiene la ventaja de que la aproximación evolutiva aporta simpleza al no requerir razonamiento y aprendizaje sofisticados en circunstancias como interacciones de grupos grandes. Aquí, es viable suponer qué interacciones estratégicas se propagan y evolucionan en una gran población a partir de simples mecanismos de adaptación. Permanecen las estrategias exitosas y se descartan las que fracasan (Bicchieri, 1993).

Teniendo en cuenta este tipo de comportamiento de los agentes, a continuación, se describen los rasgos que determinan los sistemas económico, social y ambiental, y que dan paso al diseño del modelo que representa la interacción de estos tres subsistemas en función de la paz en el nivel individual.

3.2.3 Dinámicas de los sistemas económico, social y ambiental

Como ya se ha explicado, los problemas ambientales, asociados al consumo de recursos, presentan gran complejidad. Uno de los rasgos estriba en que los sistemas que los generan se intersectan mientras continúan su propia dinámica. Por esta razón, en el siguiente apartado se describe cada sistema individualmente, pero se señalan las dinámicas y puntos de intersección, así como los mecanismos de adaptación de los agentes.

3.2.3.1 Sistema ambiental

Como se ha mencionado, el sistema ambiental está integrado por agentes heterogéneos, con distintas cosmovisiones. De allí la pertinencia de la visión ambiental compleja que, según Carrizosa (2000), permite una aproximación a partir de varias dimensiones que se interconectan y que ofrecen apertura epistemológica acerca de cómo se pueden entender para agentes gobernados por distintos intereses.

Para el autor, la visión ambiental compleja debe implicar una mirada tanto profunda, como amplia, en su contexto vertical y horizontal. La dimensión horizontal se caracteriza por un pensamiento holístico, mientras que el énfasis en el detalle es su dimensión vertical. Sin

embargo, esta mirada tampoco es neutra ante lo ético y estético e implica apelar a razones más allá de lo económico. Es decir, aproximarse gracias a las capacidades del cerebro humano que le permiten ser multiracional lo que le exige reconocer sus interrelaciones reales y prever otras posibles sin descartar las débiles, teniendo en cuenta discontinuidades en tiempo y espacio, y efectos sinérgicos. Para modelar dicha complejidad, se deben seleccionar las relaciones más fuertes, pero desde una perspectiva de adaptación se hace necesario dejar el modelo abierto, de manera que otras variables puedan ser incluidas conforme la incertidumbre disminuye y adaptarse al diálogo de sus gestores.

En este planteamiento resulta relevante entender cómo las dinámicas de los sistemas económico y social ejercen efectos sobre el sistema ambiental, de manera que el sistema económico toma sus recursos, pero, a su vez, el sistema social reacciona ante su escasez.

El informe del Panel Internacional de Recursos de Naciones Unidas (2016), señala que la cantidad de materia prima extraída de la Tierra aumentó de 22 000 millones de toneladas, en 1970, a 70 000 millones, en 2010. De continuar con la misma tendencia de proveer agua, alimento, vivienda, movilidad y energía a los 9 000 millones de personas estimados para la fecha, en 2050 se necesitarían 180 000 millones de toneladas de materiales cada año. Por consiguiente, se elevarían los impactos adversos en el sistema ambiental. La preocupación adicional es que, para el momento del informe se habían evidenciado pocas eficiencias de materiales a escala global, ya que la producción se ha desplazado desde economías eficientes en su uso, como las de Japón, Corea del Sur y Europa, hacia economías menos eficientes como las de China, India y Asia Suroriental. Esto implica un dilema complejo, ya que estos mismos recursos impulsan economías y permiten proveer de condiciones necesarias para una vida digna (United Nation Environment Programme [UNEP], 2016).

Esta situación muestra un agotamiento de los recursos, que pone en riesgo la continuidad de las propias empresas y de logros alcanzados en cuanto a bienestar social. De ahí que la idea central de comprender el sistema económico como uno abierto y conectado al sistema ambiental, del que toma los recursos ambientales, sea relevante.

La humanidad demanda áreas biológicamente productivas para la producción de alimentos, fibra y madera, de infraestructura física y para absorción de desechos, en particular dióxido de carbono de la combustión de combustibles fósiles. Esta demanda es comparable con

áreas productivas disponibles que brindan regeneración. Como esta varía, se debe medir no en términos de área física, sino de renovación biológica. Así, la capacidad del ecosistema para reconstituir biomasa se denomina biocapacidad, que se mide en hectáreas globales estandarizadas, que representan la productividad de una hectárea biológicamente productiva promedio mundial. De acuerdo con los datos de 2017, la Tierra tenía alrededor de 12 100 millones de hectáreas biológicamente productivas, que incluyen áreas oceánicas productivas (Wackernagel *et al.*, 2021).

La totalidad de los recursos ambientales, en términos de hectáreas de biocapacidad, se denotan como $S(t)$ con t como el tiempo > 0 , y está conformado por los recursos en áreas más pequeñas, denominadas R_i con i variando entre $(0 \text{ y } 1225)^3$ y que, gráficamente, se observan en el modelo como pequeñas cuadrículas llamadas parcelas. En estas, cada una representa, aproximadamente, un millón de hectáreas de biocapacidad. La renovación de aquellos recursos que lo pueden hacer, se hace en cada tiempo (*tick*), que equivale a un año por un valor dado por el observador a través de la variable (*inc-environmental-resources*).

El total de recursos para un tiempo (t) está dado por:

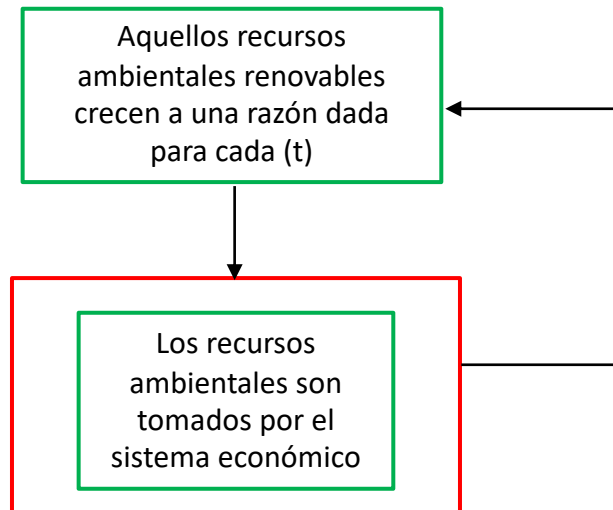
$$S(t) = \sum_0^i R_i(t)$$

Y presenta un comportamiento de renovación:

$$S(t) = \sum_0^i (R_{i(t-1)} + inc\ environmental\ resources) \quad (1)$$

El siguiente esquema representa la dinámica del sistema ambiental en el modelo propuesto. En el que el cuadro rojo representa su interacción con el sistema económico.

³ Con el fin de representar las hectáreas de biocapacidad mundial en el modelo (12 100 millones de hectáreas). Cada cuadrícula representa, aproximadamente, un millón de hectáreas de biocapacidad.

Figura 3-2: Dinámica del sistema ambiental

Fuente: elaboración propia.

3.2.3.2 Sistema económico

En el modelo propuesto, el sistema económico está conformado por empresas atomizadas que buscan maximizar sus beneficios y no están sujetas a ningún ente regulatorio. Estas interactúan con las personas que constituyen el sistema social (individuos) y, a su vez, ambos grupos interactúan con el sistema ambiental.

Cada empresa e individuo actúa en el marco de un juego cooperativo, que será explicado más adelante, utilizando una de cuatro estrategias j que oscilan entre (1 y 4), que permiten representar la heterogeneidad de los agentes y que se asigna de manera aleatoria. Esto quiere decir que el universo creado está conformado tanto por empresas, como por individuos cooperativos, no-cooperativos, etnocéntricas o *tit-for-tat* y la proporción tanto de empresas, como de individuos de cada una de estas estrategias se asigna de manera aleatoria. Las características generales de cada estrategia son:

$j = 1$ estrategia cooperativa

Como plantea Cottey (2018), la intrincada red social está tejida con acciones humanas a nivel micro, día a día, casi minuto a minuto, en las que la cooperación juega un papel importante. No existe el mercado como «una mano invisible» exógena, sino como una profusa red de interacciones, muchas de ellas con una naturaleza cooperativa.

De acuerdo con León (2006), la cooperación es el comportamiento individual que incurre en costos personales para participar en una actividad común que confiere beneficios que exceden los costos a otros miembros de su grupo.

j = 2 no cooperativa (deserción)

En oposición a la cooperación, la deserción es el comportamiento individual que se aleja del bienestar común, incentivado por un mayor beneficio particular.

j = 3 etnocentrismo

Axelrod y Hammond (2003), en su investigación, definen el etnocentrismo como cooperación con los miembros que están en el grupo, pero no con los que están fuera de este. Al interactuar, la elección del agente depende de si el otro agente tiene la misma etiqueta observable o una diferente. Los autores, en sus indagaciones, encontraron que las personas validan su pertenencia a un grupo con respecto a un conjunto de atributos que, por lo general, corresponden a rasgos culturales evidentes, que los miembros creen compartir. De igual forma, los autores también señalan que, tanto el favoritismo dentro del grupo, como la hostilidad hacia los que no pertenecen a este, tiende a ser más fuerte en situaciones competitivas o en presencia de amenazas externas que, dadas las características ambientales actuales, pueden llegar a representar una de estas. Así, este tipo de interacciones ha sido vista no solo en conflictos étnicos y guerras, sino en comportamientos de elección del consumidor.

j = 4 tit-for-tat

Varios estudios han mostrado que la estrategia de *tit-for-tat* (ojo por ojo) ha sido dominante en varios torneos de rondas que simulan comportamientos racionales humanos entre pares de agentes. Estos comportamientos se han constatado en las relaciones humanas y en la naturaleza, y presentan el siguiente patrón:

- Se comienza siendo cooperador
- Se replica la movida inmediatamente anterior de la pareja. Cuando la pareja responde de manera cooperativa, se establece un comportamiento cooperativo. Sin embargo, si la pareja cambia a deserción, el agente también responde con deserción, lo que se interpreta como una «retaliación» por parte del agente. Pero si la pareja cambia de deserción a cooperación, el agente vuelve a cooperar, lo que se interpreta como «perdón».

Esto permite restablecer la dinámica cooperativa. En este tipo de interacciones es necesario recordar la última acción pasada (Axelrod, 1984).

Además, a cada tipo de estrategia, se asocia un comportamiento no solo en el juego cooperativo del dilema del prisionero —que se utiliza para representar los dilemas ambientales—, sino a cada una de ellas, que están vinculadas al nivel de consumo de recursos ambientales por parte de las empresas y al nivel de consumo de los individuos. Es decir, las empresas cooperativas toman recursos ambientales de forma moderada, mientras las no cooperativas lo hacen a las mayores tasas posibles. De igual forma, los individuos de estrategia cooperativa presentan un consumo frugal, mientras que los que exhiben una estrategia no cooperativa tienen un consumo más opulento. Estos comportamientos se irán presentando con mayor detalle en el transcurso de la descripción del modelo.

Los datos base con los cuales se construye, calibra e inicia el modelo corresponden a datos de 2017, ya que este es el año más reciente que muestra todos los datos requeridos para este fin.

Cada persona se denota como p_i con i oscilando entre 0 y un número de personas seleccionadas por el observador del modelo, a través de la variable llamada N -peo. Este número de personas representa la población mundial que, para 2017 era de 7620 millones de personas (Wackernagel *et al.*, 2021). El modelo se desarrolla a escala, por tanto, se modela 762 personas.

P_i : Persona i en el modelo $\forall i (0 - N$ -peo).

Mientras tanto, la cantidad de empresas está determinada por la densidad de empresas a nivel mundial (3,8 empresas por cada 100 habitantes)⁴. De este modo, la cantidad de empresas que componen el modelo está sujeta a la cantidad de personas inicialmente dado. Este valor se registra en el parámetro num-com/num-peo.

Por consiguiente,

⁴ De acuerdo con la firma recopiladora de datos Bolddata (2022), se estima, en el mundo, 300 000 000 empresas.

$$\begin{aligned}\text{Cantidad de empresas} &= \text{Número de personas} * \text{Densidad de empresas} \\ &= \text{Número de personas} * 0.038\end{aligned}$$

Así, las empresas se denotan como:

Ei Empresa *i* en el modelo $\forall i (0 - N\text{-peo} * 0.038)$.

Los recursos iniciales de las empresas están dados en unidades biofísicas (que es la métrica de transacción en el modelo), que son asignadas, de manera aleatoria, para cada una de ellas, en un rango entre el mínimo requerido para su existencia (*minimum-life-com*) más un valor aleatorio dado en un rango entre cero y un valor asignado por el observador del modelo, ajustables en la variable *initial-resources-com* y que es calibrado. Por tanto, los recursos iniciales de cada empresa son un valor aleatorio que oscila en el rango (*minimum-life-com + random (0 - initial-resources-com)*).

Como ya se ha mencionado, Arthur interpreta el sistema económico como «un amplio y complicado conjunto de arreglos y acciones entre agentes-consumidores, firmas, bancos, inversores, agencias gubernamentales, entre otros —que compran, venden, especulan, comercian, exportan, importan, ofrecen servicios, invierten en compañías, hacen estrategias, exploran, pronostican, compiten, aprenden, inventan y adaptan—. Es un masivo sistema paralelo de comportamientos que concurren y forman precios, mercados, acuerdos comerciales, instituciones, industrias, y a partir de allí surgen comportamientos agregados» (2014, p. 2).

Aunque estos comportamientos demuestran lo complejo que es el sistema económico, la intensidad de este, ya señalada, hace énfasis en las dinámicas relevantes para la emergencia de comportamientos que dan origen a la paz, dada la disponibilidad de los recursos ambientales. Estas dinámicas fueron descritas en el primer capítulo y, a continuación, se describe cómo se representarán en el modelo diseñado. Esta sección trata, en particular, el sistema económico.

Relación económica empresas-individuos

Como ya se señaló en la descripción del sistema ambiental, hay una oferta de recursos ambientales que se mide en hectáreas de biocapacidad, pero, también, una demanda por parte de la humanidad sobre estos recursos, que se llama huella ambiental. Para mantener la biodiversidad, que es fundamental para la integridad del ecosistema global, la huella de la humanidad debería ser menor que la biocapacidad total del planeta. Sin embargo, para 2017, se calculaba en 20 900 millones de hectáreas de biocapacidad, que comprende todas las demandas humanas, incluso las demandas de animales domésticos, pero no de los otros seres vivos que conforman el planeta. Esto equivale a un 73 % más que la regeneración de todos los ecosistemas del planeta combinados. Este valor, por persona, equivale a 2,8 hectáreas globales (Wackernagel *et al.*, 2021).

Como las empresas están encargadas de tomar los recursos ambientales y procesarlos para entregarlos a las personas a través de bienes y servicios (pero en este modelo la única métrica transaccional es unidades biofísicas), tomando en cuenta el número de empresas actuales, se encuentra que cada empresa demanda, en promedio, 66 hectáreas de biocapacidad.

La relación económica entre las empresas y personas se representa en el modelo a partir de dos roles. Uno, desde el punto de vista de las empresas, que son las que hacen transferencias al sistema social, por ejemplo, a través de la contratación de mano de obra o pago de dividendos, y se constituye en la única fuente de ganancias de las personas. Y el otro, el rol de los individuos que compran los bienes o servicios demandados para su bienestar.

Bajo la perspectiva de compra de los individuos, cada uno de ellos, de acuerdo con su perfil, realiza un consumo que corresponde a un porcentaje con respecto al consumo establecido por cada persona, que está dado por la variable *tick-consume-peo*, que corresponde a un valor de 2,8 hectáreas de biocapacidad. Si el individuo es de estrategia cooperativa, realizará un consumo menor a este valor; si es etnocentrista o *tit-fort-tat*, el consumo será cercano a este monto. Si es de carácter no-cooperativo, el consumo será mayor al valor base. Estos porcentajes se ajustan con variables para cada estrategia, que son: *%consume-tick-coop-peo*, *%consume-tick-average-peo*, *%consume-tick-non-coop-peo*.

$$\text{Consumo de cada individuo} = \text{tick consume peo} * \% \text{ consume tick peo (de acuerdo con la estrategia)}$$

Este valor consumido se descuenta del total de los recursos de las personas y se suma a la empresa seleccionada para hacer la «compra».

En un primer momento, el individuo se pregunta si cuenta con los recursos suficientes para consumir lo demandado de acuerdo con su perfil. De ser así, escoge una de las empresas que ha tomado recursos del sistema ambiental, le transfiere los recursos que va a consumir (realiza el pago) y le asigna una etiqueta a la empresa que ha vendido, porque solo las empresas que venden tienen la capacidad de tomar recursos del sistema ambiental.

Si el individuo no cuenta con los recursos suficientes para el consumo de acuerdo con su perfil, gasta el monto que tienen en una empresa que haya tomado recursos del sistema natural y le asigna a la empresa la etiqueta de que ha vendido.

Desde la perspectiva de las empresas, cuando transfieren parte de sus recursos al sistema social, cada una selecciona un número de personas a las cuales hacerles el pago (dividendos o salarios). Este número se determina a partir de la relación del número de personas en el sistema sobre el número de empresas vigentes. Cada compañía, a este número de personas les «paga» lo equivalente a lo que consume cada empresa más un valor aleatorio que se encuentra dentro del excedente de cada compañía, dividido por el número de personas a transferir. Así, cada individuo no recibe el mismo monto transferido.

La fórmula estaría dada por:

$$\text{Valor a transferir} = \frac{(\text{consume tick com}) + \text{random}(\text{total earnings com})}{\text{Total personas (t)} / \text{Total empresas (t)}}$$

Dilemas ambientales

La lógica económica de las empresas está sujeta, también, a otra serie de dinámicas que atañen su relación con el sistema social y ambiental, y que llevan a que las compañías

asuman posiciones con respecto al tema de la sostenibilidad, que obedecen a diversas dinámicas.

En ese sentido, desde la lógica de las empresas, estas adoptan modelos de sostenibilidad bajo incentivos como la sostenibilidad, que es un nuevo enfoque para crear valor a los accionistas (Barcellos, 2010a; Ferro *et al.*, 2017; Markard *et al.*, 2012). Esta es una forma de hacer negocios que garantiza viabilidad económica y financiera con inclusión social, optimización de recursos naturales y reducción del impacto ambiental (Barcellos, 2010b); es una respuesta a los cambios globales que afectan a las empresas (Virakul, 2015); es un mecanismo de estrechar vínculos con los grupos de interés, que generan valor para la compañía, el mercado y la sociedad (Ferro *et al.*, 2017); los factores de sostenibilidad se convierten en oportunidades y riesgos que las empresas competitivas deben abordar; es una forma de mejorar el rendimiento (Seuring & Mu, 2008); es un mecanismo de crear valor económico al crear valor social (Porter & Kramer, 2011); y una exigencia en el cumplimiento de normas (Ferro *et al.*, 2017). Por tanto, se puede afirmar que, las empresas encuentran beneficios al moverse hacia prácticas sostenibles.

Este tipo de acciones implica una preocupación por el cuidado del sistema ambiental como un juego de cooperación. Se entiende la cooperación como un comportamiento individual, que incurre en costos personales, para participar en una actividad conjunta que confiere beneficios que exceden los costos a otros miembros de su grupo (Bowles & Gintis, 2002).

Ostrom (2010), al analizar el trabajo desarrollado por Hardin, conocido como la «tragedia de los comunes», en el que el uso de un bien describe un comportamiento inexorable de uso excesivo y destrucción, señala que, al ser realizado, bajo una perspectiva no cooperativa, oculta esfuerzos individuales o comunitarios al resolver dilemas sociales.

En esta dirección, Joireman (2005) ya había planteado que, comportamientos proambientales se pueden considerar dilemas sociales, ya que actuar en beneficio del sistema ambiental puede ser costoso en términos de tiempo, dinero y esfuerzo para cada individuo o, en este caso, para cada agente, pero puede traer beneficios colectivos a largo plazo. Así, se puede sugerir que un comportamiento ambiental es una firme señal de comportamiento cooperativo (Vesely *et al.*, 2020).

De esta manera, las estrategias establecidas tanto por las empresas, como por las personas son relevantes en el momento de dirimir dichos conflictos y en situaciones en que los agentes no son homogéneos y, por tanto, sus objetivos varían y pueden estar en conflicto entre ellos; se actúa no solo considerando el raciocinio propio, sino el de los otros. En este contexto, la teoría de juegos resulta ser una adecuada aproximación para su modelación al proporcionar un marco optimizador de análisis en la toma de decisiones interdependientes entre agentes (BenDor & Scheffran, 2019; Bicchieri, 1993).

La teoría de juegos es la rama del análisis matemático que se ocupa del conflicto y la cooperación entre tomadores de decisiones inteligentes y racionales (BenDor & Scheffran, 2019), por tanto, se encuentra estrechamente vinculada con la teoría de la racionalidad, en la que los juegos se consideran interacciones entre los seres humanos (Maldonado, 2019).

Aquellas interacciones en las que se genera un cambio a partir de los modelos y las elecciones subsiguientes de los demás agentes resulta ser un comportamiento típico, estudiado por la teoría de juegos (Bicchieri, 1993). Aquí, una solución se sustenta en la siguiente hipótesis: los agentes son racionales en el sentido de que siempre prefieren estrategias con pagos altos a estrategias con pagos bajos y basan su estrategia en lo que harán los otros agentes (León, 2006).

Cuando las estrategias de los agentes y la composición de la población cambian con el tiempo, se entra en el marco de un juego evolutivo. La idea central es que, cuanto mejor se desempeñe la estrategia en el presente, más a menudo se utilizará en el futuro. Como resultado, los elementos de las estrategias del juego evolutivo (estabilidad, aptitud y beneficios frente a otras estrategias) están fundamentalmente interconectados. Esta es una herramienta útil para analizar, en particular, aquellos conflictos en los que unos pocos oponentes están involucrados en intensas luchas entre sí por los recursos o la propiedad (BenDor & Scheffran, 2019).

Así, la teoría de juegos moderna es el marco matemático más ampliamente investigado disponible para analizar las interacciones estratégicas de agentes con objetivos en conflicto (Arthur *et al.*, 2020). Por tanto, permite representar, de manera adecuada, los dilemas ambientales en función de los sistemas económico y social.

Dentro de esta estructura, el dilema del prisionero es una aproximación que se refiere a cómo, a pesar del interés propio, se puede llegar a acuerdos con un interés colectivo (Maldonado, 2019). Muchas interacciones sociales reales, como el calentamiento global, parecen tener esta estructura (Laver, 2020).

Estos dilemas no son exclusivos de la relación empresa-individuos, sino que se pueden presentar entre individuos o entre empresas. Es importante tener en cuenta que, si bien las acciones cooperativas pueden traer beneficios, este tipo de interacciones no son una fuente de recursos para los agentes (empresas o personas). Por el contrario, pueden traer consigo un desgaste de estos.

Considérese el siguiente ejemplo. En un territorio específico se presenta agotamiento de un recurso, que es una materia prima para el funcionamiento de una compañía en la región, que también provee puestos de trabajo para la comunidad. Esto lleva a disputas entre empresas, entre la comunidad y/o entre empresa y comunidad. Dicha disputa implica gastos, en el mejor de los casos, por el tiempo invertido para establecer e identificar el problema y plantear alguna solución. Pero la situación puede escalar a acciones que conlleven a daños reputacionales de la empresa, o a daños materiales a los bienes de la comunidad como consecuencia de las protestas realizadas. Es decir, este tipo de dilemas representa costos para los jugadores.

El dilema del prisionero (DP) se ha convertido en una forma clásica de modelar interacciones entre agentes que enfrentan objetivos mixtos de conflicto y cooperación. En estos casos, las personas son cooperativamente mejores si colaboran con miras a un interés común, pero se enfrentan a la estrategia de desertar (*free rider*), que está mejor pagada al disfrutar o explotar la cooperación de otros sin una contribución a esta.

En una colección de agentes heterogéneos, que hacen asociaciones en forma de modelos mentales, hipótesis o creencias subjetivas, estos modelos pueden tomar varias formas, como matemáticas simples, hipótesis estadísticas o reglas de predicción (si se observa la situación Q se predice el resultado o acción D), que se usan para predecir variables o acciones. Un agente puede considerar más de una estrategia simultáneamente; esta es evaluada en su desempeño, pero cuando es momento de decidir, se decanta por la más

plausible (rentable). La psicología cognitiva informa que, aunque haya varias estrategias, se actúa sobre la más posible y no sobre una combinación racional de ellas (Arthur, 2015).

La parametrización, con base en el modelo base de Axelrod (1984), que es una interpretación de la modelación del mundo real, parte del supuesto esencial de que algunos elementos de mutua cooperación que se repite son esenciales para la prosperidad y la supervivencia de una gran población, mientras que la mutua deserción repetida destruye el valor y genera una amenaza a la población como un todo; este es el caso del problema ambiental del calentamiento global (Laver, 2020).

Con base en las relaciones establecidas en el modelo de BenDor y Scheffran (2019), se presentan las reglas de los agentes que determinan el conflicto o la cooperación en situaciones en que los agentes toman decisiones con recursos limitados, sesgos, e información incompleta o incorrecta:

1. Si dos agentes están desconectados (no se encuentran en el mismo espacio), son independientes y no tienen ningún impacto en los valores del otro.
2. En una relación hostil o competitiva, cada agente pierde, ya que ha invertido esfuerzos para contrarrestar las acciones del oponente, ya sea entre dos empresas en la disputa por el mercado, o entre las empresas y la sociedad civil en disputas que pueden acarrear desde pérdida de mercado para las empresas e imposibilidad de satisfacer la demanda, en el caso del consumidor, hasta disputas legales o cierre de compañías, que también traen pérdidas de puestos de trabajo, de tiempo invertido y deterioro reputacional de las partes, entre otras.
3. En una relación cooperativa, ambos agentes se benefician entre sí y pueden reducir sus propios esfuerzos para conseguir sus objetivos con más facilidad. Los conflictos se pueden ver disminuidos cuando los agentes cooperan y brindan valor para todos, sin ser óptimos en el logro de metas individuales y sin significar perder estos objetivos particulares. En este caso, implica que no se asumen pérdidas al dirimir el problema.
4. En caso de interacción entre cooperación y hostilidad, se lleva a una explotación unilateral; esta situación tiende a ser inestable ya que, el explotado puede cambiar a no cooperar.

En los ejercicios de cooperación, en la construcción de la matriz de pagos, las compensaciones no deben ser de la misma magnitud, ni simétricas, pero los *pay-off* sí deben estar de acuerdo con el dilema del prisionero. No necesariamente las compensaciones deben estar en una escala absoluta, pero sí los valores deben ser relativos entre ellos y la matriz debe reflejar que la cooperación es deseable (Axelrod, 1984).

Cada jugador tiene dos posibles acciones en cada movimiento: {cooperar, desertar}.

Las interacciones se dan entre parejas de jugadores.

El número de movimientos es fijo, pero desconocido para cada jugador.

La matriz de pago es conocida por los jugadores antes del juego.

Tabla 3 1: Matriz de pagos

Estrategia Jugador/ Pareja	Pagos Jugador	Descripción
C-C	0	Si el jugador y el compañero de ronda cooperan, ninguno pierde recursos
D-C	0	Si el jugador decerta y el compañero coopera. El Jugador no pierde recursos
C-D	(-)	Si el jugador coopera y el compañero deserta. El jugador pierde recursos
D-D	(-)	Si el jugador coopera y el compañero deserta. El jugador pierde recursos

Fuente: elaboración propia.

A partir de la interacción de los agentes que dirimen sus conflictos, se obtiene un *score* procedente de la matriz de pagos, que representa las pérdidas en el conflicto para cada agente de acuerdo con la estrategia implementada.

Obtención de recursos del sistema ambiental

Es cierto que el sistema social puede tomar recursos del sistema ambiental para su bienestar, pero estos consumos tienden a ser despreciables en una economía de mercado y de derechos de propiedad. La mayoría de los individuos, o sus instituciones, debe pagar desde el agua, hasta sofisticados tratamientos médicos.

En su informe sobre los impulsores de la degradación ambiental, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL, (2020) plantea que, en una economía intercapitalista persiste la tensión por abrir y mantener espacios de rentabilidad que

determinen cambios en la escala de producción en la mezcla de productos de cada empresa y una combinación de técnicas de comercialización y de producción. En un marco de estructura de rivalidad continua entre empresas, esto incentiva una concentración industrial y de poder de mercado, que se refleja en economías de escala para reducir costos y aumentar la competitividad.

Este comportamiento de uso de los recursos ambientales varía entre las empresas y está dado por el tipo de estrategia que se siga. Las empresas con estrategia cooperativa toman con mesura los recursos del sistema ambiental; aquellas *tit-for-tat* o etnocentristas toman un poco más de recursos ambientales que las de estrategia cooperadora, pero no toman todos los recursos posibles del sistema ambiental, como sí lo hacen las de estrategia no cooperativa. Estas proporciones de consumo están dadas por porcentajes asignados a cada estrategia a través de las variables *%resources-taken-coop-com*; *%resources-taken-average-com*; *%resources-taken-non-coop-com*.

Adaptación de los agentes económicos

Una vez los agentes de los sistemas económico y social han dirimido sus dilemas ambientales, y el sistema económico ha tomado recursos del sistema ambiental de acuerdo con cada estrategia, los agentes del sistema económico adaptan su estrategia en función de su nivel de recursos y de las empresas a su alrededor.

En este punto, la empresa E_{ij} se pregunta: ¿Cuál ha sido la estrategia (de las cuatro ya señaladas) que ha generado mayores beneficios a las compañías a su alrededor? Para determinar qué es exactamente «alrededor», se utiliza un radio de acción, que es editable por el observador y es llamado *radius-influence-com*. Así, la empresa compara sus recursos propios en el tiempo (t) con el máximo del conjunto conformado por los promedios de los recursos de las empresas ubicadas en el rango de influencia con cada tipo de estrategia en el mismo tiempo (t). Si los propios no son más altos que el promedio de la estrategia más exitosa en el rango de influencia, cambia a la estrategia que ofrece mejores resultados.

De esta manera, si

$$\text{Recursos-totales com } E_{ij} < \text{Max} \left\{ \frac{\sum_{i=0}^n \text{Recursos totales } E_{i1} \text{ en radio } n(t)}{\text{Número de } E_{i1} \text{ en radio } n(t)}, \right. \\ \left. \frac{\sum_{i=0}^n \text{Recursos totales } E_{i2} \text{ en radio } n(t)}{\text{Número de } E_{i2} \text{ en radio } n(t)}, \right. \\ \left. \frac{\sum_{i=0}^n \text{Recursos totales } E_{i3} \text{ en radio } n(t)}{\text{Número de } E_{i3} \text{ en radio } n(t)}, \frac{\sum_{i=0}^n \text{Recursos totales } E_{i4} \text{ en radio } n(t)}{\text{Número de } E_{i4} \text{ en radio } n(t)} \right\}$$

Siendo n el radio de influencia de las empresas

Cambia a la estrategia de máximo promedio.

Nacimiento y muerte de agentes económicos

Finalmente, cada empresa realiza un balance de sus propios recursos con los que cuenta y si sobrepasa determinado umbral puede generar una nueva empresa con sus mismas características. Dicho umbral es determinado por el observador del modelo a través de la variable *Threshold-reproduction-com*.

Bajo este marco de teoría evolutiva, la nueva empresa presenta un porcentaje de probabilidad de mutar al no seguir la estrategia de su progenitora. Esto significa que puede escoger, aleatoriamente, cualquiera de las cuatro estrategias presentadas. Este porcentaje de mutación es editable por el observador a través de la variable *%mutation-com*. Además, esta nueva empresa cuenta con % de los recursos de la estrategia progenitora, editable por el observador a través de la variable *%heritage-com*.

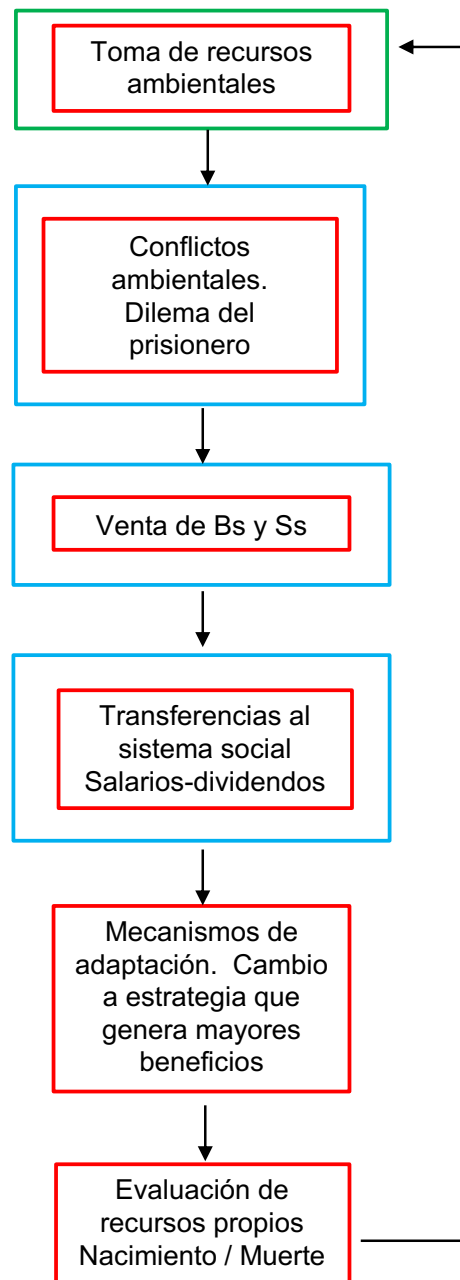
Posteriormente, los recursos necesarios para la implementación de una nueva empresa se descuentan. Este valor lo establece el observador a partir de la variable *reproduction-com-cost* y calcula el nuevo saldo de recursos de la empresa. Si este se encuentra por debajo del umbral de vida, editable por el observador a través de la variable *threshold-life-com*, la empresa desaparece.

De esta forma, se busca evaluar cuáles son las estrategias que dominan en el sistema en dos escalas: i) si se presenta una tendencia dominante de ciertas estrategias adoptadas por los agentes dadas las características adaptativas; y ii) qué estrategia presentan los agentes que tienen mayor capacidad de sobrevivir y, por tanto, de reproducirse.

En síntesis, el saldo de recursos de las empresas, llamados *total-earnings-com* en el modelo, resulta por los recursos totales en un tiempo dado más, los recursos obtenidos de los individuos por «venderle sus bienes», menos los recursos entregados a las personas como pagos salariales o de dividendos, menos los costos de los dilemas sociales *score*, más los recursos obtenidos, directamente, del sistema ambiental de acuerdo con el tipo de estrategia implementada, menos el costo en recursos por generar una nueva empresa.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Total earnings com=} \\
 & (\textit{Total earnings com (t)}) + \textit{consume tick peo} * \% \textit{consume tick (strategy)peo} \\
 & - \left(\frac{(\textit{consume tick com} + (\textit{random} ([\textit{total earnings com}] - \textit{consume tick com}))}{\textit{count people/count companies}} \right) - (\textit{score}) \\
 & + (\textit{sum [resources to]of patches in radius radius influence com}) \\
 & - (\textit{reproduction com cost})
 \end{aligned}$$

La dinámica del sistema económico se representa en la figura 3-3, a través de la secuencia de los procesos. El color de cada cuadro representa el tipo de sistema que interviene en ellos: rojo, para el sistema económico; azul, para el social; y verde, para el ambiental. Es importante aclarar que, si bien la relación económica se explicó en un mismo apartado, los procesos no se ejecutan de manera consecutiva. En un momento, las personas compran y, en otro, no necesariamente inmediato, reciben los pagos provenientes de las empresas.

Figura 3-3: Dinámica del sistema económico

Fuente: elaboración propia.

3.2.3.3 Sistema social

El principal agente que representa este sistema son las personas, que participan en distintos procesos tanto en el sistema económico, como en el social. La forma cómo operan puede incidir en las estrategias de las empresas que, para este modelo, son el único tipo

de agente que puede tomar recursos ambientales. Sin embargo, el nivel de recursos del sistema ambiental incide en el comportamiento de las personas y sus dinámicas subsecuentes pueden llevar a afectar, de nuevo, el sistema ambiental.

Las personas comienzan con una cantidad de recursos, que son asignados de manera aleatoria para cada una de ellas, en un rango entre el mínimo requerido para su existencia *minimum-life-peo* más un valor aleatorio establecido en un rango entre 0 y un valor asignado por el observador del modelo, ajustables en la variable *initial-resources-peo* y que es calibrado. Por tanto, estas condiciones iniciales de las personas $r_{peo}(0)$ son un valor aleatorio que oscilan en el rango ($minimum-life-peo + random(0 - initial-resources-peo)$).

Dinámica económica

Estas personas establecen una relación comercial con las empresas, a las que se les compran sus bienes o servicios, y desde las cuales obtienen sus recursos a través del pago de salarios o dividendos, como se explicó en el sistema económico.

Frente a la dinámica de toma de recursos ambientales por parte de las empresas, surge, desde el sistema social, una respuesta como preocupación sobre la disponibilidad de estos para satisfacer la demanda de una población creciente y mayores requerimientos de su estilo de vida.

De esta manera, las acciones de la sociedad civil, muchas de ellas enmarcadas en el movimiento ambientalista, inciden en los sistemas económico y ambiental. El movimiento ambientalista tiene sus raíces en los siglos XVIII y XIX, surge como respuesta a la industrialización europea y crece hasta convertirse en un fenómeno transnacional, primero con una preocupación por la sobrepoblación, como efecto del *baby-boom* de la posguerra y su impacto en el planeta y en los recursos globales como un todo, pero, también, con una dependencia mayor de los modelos científicos y las soluciones técnicas. Este es el caso del Club de Roma, en 1968: un grupo de científicos internacionales, legisladores y empresarios que se reunieron para abordar cuestiones políticas internacionales, entre ellas, el impacto en el ambiente ejercido por el crecimiento poblacional y económico. Posteriormente, con la Comisión Brundtland, no solo se acuña el concepto de desarrollo sostenible en foros intergubernamentales, sino que actores económicos lo acogen como una sostenibilidad

racionalizada, orientada a resultados y a la medición. Este también ha venido variando hacia un concepto de resiliencia como elemento clave, mucho más relacionado con la gestión de riesgo, desastres y seguros (Bothello & Salles-Djelic, 2017). Esto resulta lógico al considerar el incremento sustancial y reciente de los desastres naturales, como ya se mencionó en el primer capítulo. Así, este elemento cultural, de preocupación ambiental, se vincula con aquellos individuos que despliegan una estrategia cooperativa.

Dilemas ambientales

En este contexto se presentan los dilemas ambientales, cuyo comportamiento está sujeto a las estrategias (cooperadores, no cooperadores, *tit-for-tat* y etnocentristas) tomadas por cada tipo (persona y empresa); su interacción ya fue descrita en el sistema económico.

Mecanismos de adaptación

Las estrategias de las personas están sujetas a cambios según la dinámica del entorno en el que interactúan. En el modelo diseñado, las adaptaciones al entorno, por parte de las personas, se dan a través de dos mecanismos: i) percepción de escasez de recursos ambientales; e ii) influencia social.

Con respecto al primer punto, la evidencia académica sugiere que, el nivel de los recursos ambientales se puede percibir como una amenaza en el sistema social, lo que lleva a que se derive otro comportamiento endógeno para el modelo. Se ha identificado que, tanto en la economía, como en la biología evolutiva, la competencia involucra recursos escasos. Roux *et al.* (2015), en su investigación tanto bibliográfica, como experimental, encontraron que la escasez de recursos puede llevar a comportamientos egoístas. En la medida en que los recursos se tornan insuficientes, las personas emplean más esfuerzos y tiempo para competir con otros por estos. Sus resultados experimentales mostraron evidencia de una asociación cognitiva entre la escasez y la competencia. Además, los autores señalan que, recordatorios de la escasez de recursos pueden tener implicaciones en la toma de decisiones, a través de un cambio en la orientación competitiva, que se manifiesta en un mayor deseo de promover el propio bienestar, lo que puede llevar a priorizar los beneficios para uno mismo sobre los beneficios para los demás.

Sin embargo, los autores, en sus experimentos, concluyeron que la orientación competitiva no necesariamente produce resultados egoístas. Los recordatorios de escasez de recursos

pueden, de hecho, promover comportamientos generosos cuando se destaca la conexión entre tales comportamientos y el avance del propio bienestar. Una explicación más amplia de esta situación la exponen Bowles y Gintis (2002), quienes, a partir de sus estudios, sugieren que, cuando un grupo está amenazado de extinción o dispersión, como en caso de guerra, pestilencia o hambruna, la cooperación es más necesaria para sobrevivir. Sin embargo, la probabilidad de que las contribuciones de uno sean reembolsadas en el futuro disminuyen, de manera drástica cuando el grupo se ve amenazado, ya que la probabilidad de que el grupo se disuelva aumenta y, por tanto, el incentivo para cooperar no prosperará. Esto lleva a que, cuando un grupo está más necesitado de un comportamiento prosocial, la cooperación basada en el altruismo recíproco colapse. Estos periodos críticos son comunes en la historia evolutiva de la especie humana.

Por tanto, la percepción de escasez de recursos ambientales puede ser un amplificador de un comportamiento en el que el interés personal prevalezca sobre el cooperativo. En este contexto, para el modelo propuesto, las personas se preguntan por el nivel de recursos ambientales a su alrededor, delimitado por un radio de acción dado por la variable *radius-influence-peo*. Si estos recursos están por debajo de un umbral establecido por el observador, llamado *shortage-threshold-peo*, las personas, con cierta probabilidad entre 0 y un valor dado por el observador a través de la variable *%change-people*, cambian a una estrategia no cooperativa, si esta no está ya implementada.

If $\sum_0^i R_i \text{ in radius influence peo} < \text{Shortage threshold peo}$

Entonces,

p_{ij} cambia a p_{i2} con una probabilidad entre $(0 - \%change\ people)$.

De lo contrario, si no hay percepción de escasez, aparece el segundo mecanismo de adaptación, que proviene de la influencia social.

Holling (2001) plantea que, en los sistemas humanos, los patrones autorganizados se desarrollan con frecuencia. Los humanos tienen la habilidad única de comunicar ideas y experiencias y, en la medida en que son probadas, se van incorporando como mitos,

normas y leyes, entre otros. En la modelación de Axelrod (1997) sobre diseminación de la cultura, se encuentra que, en más de cien definiciones, hay un consenso de que cultura es algo que se aprende entre las personas. De ahí que, para su modelo de cómo se transmiten los rasgos culturales, utilice también una aproximación *bottom-up*. Axelrod asumió que la cultura es aquello que la influencia social influencia.

Como se ha venido explicando a partir de la racionalidad de los agentes, el sistema social, conformado por las personas, afecta las decisiones de los individuos que, a su vez, afectan de nuevo todo el entorno social. Por esta razón, en este modelo, también se considera el entorno social como fuerza influenciadora de las adaptaciones de las personas. En este sentido, cada p_{ij} puede cambiar con una probabilidad dada entre 0 y *%change people* (dada por el observador) a una de las estrategias de las p_{ij} que se encuentran en su radio de influencia *radius-influence-peo*.

Por tanto, la estrategia de p_{ij} puede cambiar a la estrategia de cualquier otra p_{ij} que se encuentre en el radio de influencia. Este comportamiento trae consigo un mecanismo amplificador ya que, mientras más rodeada se encuentre una persona de otras con un mismo tipo de estrategia, mayor será la probabilidad de cambiar a esa estrategia y, así, desencadenar un efecto de expansión de esta. Dicha estrategia, posteriormente, incide al dirimir los dilemas ambientales con otros agentes. Estos dilemas traen unos costos que afectan los recursos totales de las empresas y, con base en ese saldo, las empresas pueden cambiar el tipo de estrategia que determina la intensidad de consumo de los recursos ambientales. De esta manera, un individuo tiene incidencia sobre el sistema completo.

Nacimiento y muerte de agentes sociales

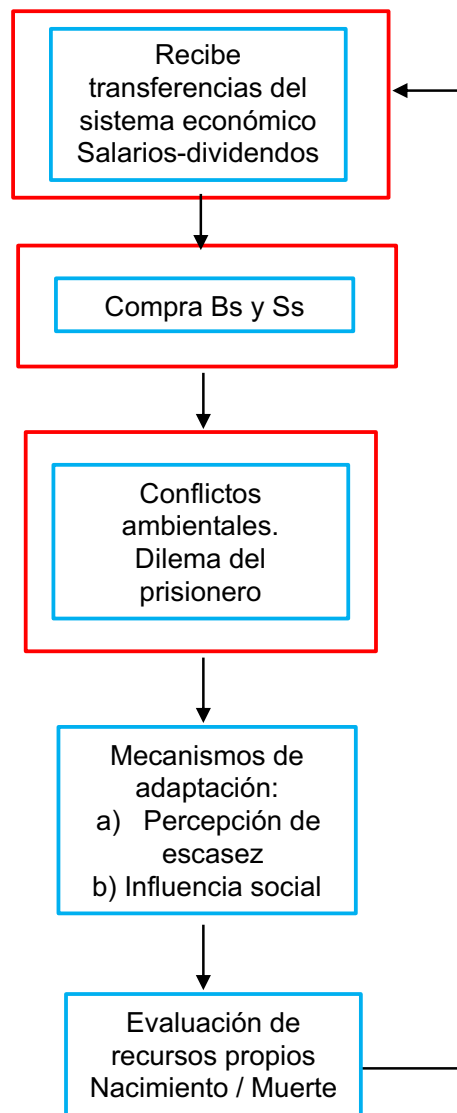
Posteriormente, cada persona evalúa el nivel de sus unidades biófisicas y, si estas superan el umbral de reproducción dado para las personas, que es asignado por el observador a través de la variable *Threshold-reproduction-peo*, se reproduce para generar un individuo con sus mismas características. Sin embargo, se puede presentar una mutación con una probabilidad dada por el observador con la variable *% mutación-peo*, que implica que, en lugar de asumir la misma estrategia de su progenitora, puede escoger, con la probabilidad establecida, cualquiera de las cuatro estrategias. Además, esta nueva persona cuenta con un % de los recursos de la progenitora, establecido por el parámetro *%heritiage-peo*.

Posteriormente, se descuenta el costo de un nuevo nacimiento cuyo valor está dado por la variable *reproduction-peo-cost* (ajustable por el observador). Finalmente, se hace un balance de los recursos con los que cuenta el individuo y, si estos están por debajo del umbral de supervivencia ajustable a través de la variable *Threshold-life-peo*, la persona muere. De lo contrario, reinicia el ciclo.

El balance total de los recursos para cada p_{ij} , llamado *total-earnings-peo*, está dado por el saldo de unidades biofísicas del individuo en un tiempo (t) más las transferencias de las empresas por pagos de salarios o utilidades, menos los recursos del individuo asignados a la compra de sus bienes o servicios, menos los costos de los dilemas sociales *score*, menos el costo de reproducirse si así lo hace.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Total earnings peo} \\
 & = \textit{Total earinigs peo (t)} \\
 & + \frac{(\textit{consume tick com} + (\textit{random} ([\textit{total earnings com}] \textit{of myself} - \textit{consume tick com}))}{\textit{count people/count companies}} \\
 & - (\textit{consume tick peo} * \% \textit{consume tick (strategy) peo}) - (\textit{score}) \\
 & - (\textit{reproduction peo cost})
 \end{aligned}$$

La dinámica del sistema social se representa en la figura 3-4, a través de la secuencia de procesos con el tipo de agente que los ejecuta y los puntos de conexión con otros sistemas, que se representan por los colores de los cuadros. Rojo significa sistema económico; azul, sistema social; y verde, ambiental.

Figura 3-4: Dinámica del sistema social.

Fuente: elaboración propia.

Después de haber descrito las dinámicas más fuertes entre los tres subsistemas, económico, social y ambiental, se hace necesario el protocolo de modelación que se debe seguir con el fin de garantizar rigor en la modelación.

3.3 Protocolo para los modelos basados en agentes

Los MBA, aunque presentan atributos muy útiles para la investigación, se enfrentan a limitaciones, por ejemplo: i) representar diferentes tipos de agentes que coevolucionan tiene la desventaja de que el diseño del comportamiento de los actores influencia los resultados (BenDor & Scheffran, 2019), lo que significa que las decisiones que toma quien modela impactan en el resultado de los experimentos; ii) este tipo de modelamiento, al permitir representar ciclos de retroalimentación entre agentes y su entorno, pueden describir efectos no-lineales que, sumados a cambios de parámetros, pueden resultar en comportamientos caóticos que, junto con el número de supuestos, la sobreparametrización, el nivel de detalle y la falta de datos apropiados, dificultan la validación (Klügl, 2008) y; iii) la complejidad evolutiva hace más difícil su interpretación (Laver, 2020).

Por esta razón, resulta relevante seguir mecanismos que garanticen que el modelo es una aproximación adecuada de la realidad y las simulaciones son descriptores pertinentes de esta. Por tanto, siguiendo la orientación al diseño, pero con un enfoque más global, se encuentra la herramienta ODD (Overview, Design Concepts and Details).

3.3.1 Protocolo de diseño ODD

Esta herramienta permite que el modelo sea entendible y replicable. Dicho protocolo propone tres categorías, constituidas por siete elementos: i) resumen compuesto por propósito, variables de estado y escala, y resumen del proceso y cronograma; ii) conceptos de diseño para los que se debe proveer el marco conceptual del diseño y la interrelación de variables, en el que se pueden considerar elementos como emergencia, adaptación, predicción, precisión, sensibilidad, interacción, estocasticidad y colectividad; y iii) detalles relacionados con condiciones iniciales al preguntarse cómo son el ambiente y los individuos creados al momento de correr las simulaciones y las entradas correspondientes a algunos valores de condiciones iniciales; también, se explican los submodelos en los que se describe su comportamiento, las variables, las escalas y la parametrización (Grimm *et al.*, 2006). A continuación, se presentan estos componentes en el marco de este protocolo.

Visión general

- *Propósito*

Este es comprender el comportamiento de la cooperación, en tanto elemento esencial para favorecer la paz a partir de las emergencias provenientes de las interacciones entre el sistema ambiental, el sistema económico y el sistema social. En este modelo, el comportamiento del sistema económico responde a la maximización de sus beneficios, que se ven afectados por los dilemas ambientales con la sociedad, que actúa en función del estado de estos recursos ambientales y de la influencia que la misma sociedad ejerce sobre sus individuos.

- *Variables de estado y escala*

El modelo distingue entre dos tipos de agentes (individuos y empresas) y parcelas (el espacio en que los agentes interactúan y que contienen los recursos ambientales).

Sistema ambiental

- i) La parcela corresponde a una unidad de recursos renovables y está conformada por el número predeterminado para ajustarse a la realidad de hectáreas; biocapacidad mundial (35 X 35): 1225 en total.
- ii) En cada corrida, aquellos recursos ambientales renovables lo son uniformemente en razón de un valor dado por el observador, que representa la tasa de regeneración ambiental.

Sistema económico:

- i) El tipo de agente que lo representa es la empresa, que puede desplegar una de cuatro estrategias (cooperativo, no-cooperativo, *tit-for-tat* y etnocentrista).
- ii) Estas empresas proveen bienes y servicios a las personas (sistema social).
- iii) Dirimen los conflictos ambientales con las personas o con otras empresas a través del dilema del prisionero, con una matriz de pagos negativa, que representan los gastos de las disputas.
- iv) Transfieren recursos (unidades biofísicas), al sistema social, a través del pago de salarios o dividendos, proveyendo los medios al sistema social para el consumo de los bienes o servicios demandados.
- v) Posteriormente, evalúa entre las empresas cercanas cuál estrategia genera mayores beneficios y cambia a ella, de no estar ya aplicándola.

- vi) Toma los recursos ambientales con una intensidad sujeta al tipo de estrategia que despliega.
- vii) De contar con los recursos suficientes, genera una nueva empresa y descuenta el costo de la creación de este nuevo agente.
- viii) Evalúa si tiene los recursos suficientes para vivir.

Sistema social

- i) El tipo de agente que lo representa es el individuo, que puede implementar una de cuatro estrategias (cooperativo, no-cooperativo, *tit-for-tat* y etnocentrista).
- ii) Estas personas demandan a las empresas bienes y servicios según nivel de sus propios recursos para pagarlos.
- iii) Dirimen los conflictos ambientales con las empresas o con otras personas a través del dilema del prisionero, con una matriz de pagos negativa, que representan los gastos de las disputas.
- iv) Reciben recursos del sistema económico como salarios o dividendos, que usan para satisfacer sus necesidades.
- v) Cambian su estrategia vigente a una estrategia no cooperativa si el nivel de los recursos ambientales, a su alrededor, se encuentra por debajo de un umbral determinado. De lo contrario, con cierta probabilidad, cambian su estrategia a la estrategia de otra persona que sea cercana.
- vi) De contar con los recursos suficientes, se reproduce y se descuenta el costo de un nacimiento
- vii) Evalúa si tiene los recursos suficientes para vivir.

- *Generalidades de los procesos y tiempo*

Escala

Hace referencia a la resolución (tamaño del grano espacial, unidad de tiempo o grado de complicación del modelo) y la extensión (tiempo, espacio y número de componentes modeladas). La escala está directamente atada al problema de agregación (Costanza *et al.*, 2013). Para la investigación de la sostenibilidad y su práctica, se sugiere que una escala de tiempo operacional y realista sea de 50 años o 2 generaciones (Wu, 2013).

Avanzar en el tiempo

En MBA hay dos métodos para avanzar el reloj: el método de avance de tiempo de incremento fijo (o actualización asincrónica) y el método de avance del siguiente evento (o actualización sincrónica) (Sarmiento-Vásquez & López-Sandoval, 2017). Para esta investigación, se utiliza la primera opción, es decir, todos los procesos se corren en un mismo *tick* (periodo de ejecución del modelo), que es acumulable y se considera como un año.

Concepto de diseño

Emergencia

Se espera observarla en el tipo de estrategia dominante, así como en la cantidad de recursos disponibles.

Interacción

Las interacciones se dan a través del intercambio de recursos entre agentes (personas y empresas), que representan las transacciones de mercado; a través de dilema del prisionero, sujeto a las estrategias de los agentes, cuya interacción simula los dilemas ambientales; y a través de la toma de recursos ambientales por parte de las empresas.

Detección

- i) Las empresas son sensibles al nivel de recursos de otras empresas que se encuentran a su alrededor, lo que les permite identificar la estrategia más exitosa entre las empresas cercanas.
- ii) Los individuos son sensibles a los recursos ambientales de su entorno y a las estrategias de otras personas cercanas.

Estocasticidad

Es usada para crear variabilidad en las condiciones en varios momentos:

- i) Distribución de las estrategias entre las personas.
- ii) Los recursos con los que inicia cada empresa (son aleatorios, en un rango específico).
- iii) Los recursos con los que inicia cada individuo (son aleatorios, en un rango específico).
- iv) La ubicación inicial de empresas y personas es aleatoria.

- v) Las personas pueden cambiar de estrategia a una utilizada por sus vecinos con una probabilidad entre 0 y el valor dado por el observador.
- vi) La estrategia de las nuevas empresas y/o personas pueden presentar mutación (no heredan la estrategia de la progenitora, sino que pueden escoger, aleatoriamente, una de las cuatro estrategias dadas). La probabilidad del evento de mutación está dada por el observador.

Planeación

Se modela en tiempo discreto por *ticks* (años). Las acciones de los agentes deben tener un orden, como se describe en los diagramas de flujo que se presentarán en los submodelos.

Detalles

▪ *Inicialización*

- i) El modelo se inicia con una asignación de los recursos en cada una de las parcelas. En el modelo base, la suma total de los recursos de cada parcela (r) representa la biocapacidad total del planeta (recursos ambientales).
- ii) El número de empresas está dado por una relación entre número de personas a nivel mundial y número de empresas (dato empírico).
- iii) Cómo parámetros que requieren calibración están:
- Rango superior de los recursos iniciales de las empresas.
 - Rango superior de los recursos iniciales de las personas.
 - Umbral de los recursos ambientales por debajo del cual las personas asumen comportamientos no cooperativos.
 - Umbral de recursos de la empresa a partir del cual se puede generar una nueva.
 - Umbral de recursos del individuo a partir del cual puede nacer una nueva persona.
 - Costos de generar una nueva empresa.
 - Costos de reproducción de una persona.
 - Umbral de recursos de la empresa a partir del cual una empresa desaparece.
 - Umbral de recursos del individuo a partir del cual una persona muere.
 - Valores de la matriz de pago del dilema del prisionero.

3.3.2 Protocolo de validación, verificación y calibración

Los procesos de validación, es decir, si el modelo explica la realidad (Klügl, 2008), la verificación con la que se busca asegurar que el modelo conceptual coincide con el modelo implementado (Rand, 2018) y la calibración que determina la veracidad del instrumento son fundamentales con el fin de producir resultados creíbles. A continuación, se presentan los mecanismos utilizados para tal fin.

3.3.2.1 Validación

La validación empírica o estadística solo es posible si se pueden encontrar números característicos que describan el sistema de manera apropiada. Tales descriptores, a menudo, se pueden encontrar para los niveles agregados, pero no es trivial para el nivel de agente, ya que las características del comportamiento individual son difíciles de capturar de manera razonable (Klügl, 2008). Teniendo en cuenta esto, se implementan procesos como *validación de cara*, que dependen de la inteligencia humana (evaluación de expertos) que muestran que los procesos y los resultados son razonables y plausibles dentro del marco de base teórica y de su conocimiento implícito sobre el sistema o las partes interesadas (Klügl, 2008).

Así, en diferentes etapas y versiones del modelo, desde su diseño, este se ha expuesto a la comunidad científica, ya sea a través de un seminario en sostenibilidad con estudiantes de doctorado, o con expertos en temas de economía de la complejidad, modelación en agentes, teoría de juegos, paz y visión ambiental compleja; también, ha habido un acompañamiento permanente de la directora de la tesis doctoral.

A continuación, se mencionan, de manera cronológica, estas validaciones de cara:

- Reunión con el profesor Sergio Monsalve, experto en economía de la complejidad: discusión sobre ideas preliminares (20 de noviembre de 2020).
- Pasantía en investigación doctoral en la Universidad de Valladolid, en la que se desarrolló la primera fase de modelación bajo la tutoría del profesor PhD. José Ignacio García-Valdecasas Medina, experto en teoría de juegos y modelación en agentes (primer semestre de 2021).

- Presentación en seminario de estudiantes doctorales en temas de sostenibilidad en la Universidad Nacional de Colombia, bajo la dirección de la profesora PhD. Nohra León Rodríguez (22 de marzo de 2022).
- Presentación al profesor Julio Carrizosa, profesor e investigador sobre temas ambientales y de paz desde la perspectiva compleja (21 de abril de 2022).
- Presentación al profesor Paolo Buonanno, profesor del Departamento de Economía de la Universidad de Bergamo, Italia, experto en temas de paz desde la perspectiva económica (4 de mayo de 2022).
- Presentación al profesor Juan Fernando Vargas, profesor del Departamento de Economía de la Universidad del Rosario, Colombia, experto en temas de paz desde la perspectiva económica (6 de mayo de 2022).

3.3.2.2 Verificación y calibración

Para garantizar que el modelo conceptual y lo implementado coincidan, en los MBA se utilizan varias técnicas, entre ellas, pruebas de código en unidades funcionales, ejecución de casos con valores extremos para revisar si el modelo presenta el comportamiento esperado, y prueba de valor relativo, en la que se examina la relación de entradas y salidas (Rand, 2018).

Por otro lado, para encontrar los parámetros y las condiciones iniciales para que los resultados de las simulaciones generadas por el modelo concuerden con datos reales, es necesario realizar un proceso de calibración. Este implica usar datos empíricos para ajustar los parámetros y los mecanismos del modelo con el fin de usarlos para examinar algunos casos particulares (Wilensky & Rand, 2015).

Para dichas comprobaciones, se establece un plan de experimento en el que los valores de los parámetros varían de acuerdo con algún programa sistemático. Para cada una de estas combinaciones de valores de parámetros, se ejecutan y se evalúan una o más simulaciones (Klügl, 2008).

Para ello, se realizan varias simulaciones en las que se usan, como periodo de análisis, 50 años, aunque el tiempo de simulación para estas pruebas supera el tiempo de análisis. En

un primer momento, se utilizan condiciones extremas para identificar si la dinámica del modelo está en armonía con un comportamiento esperado. Posteriormente, se analizan los resultados para ajustar los parámetros a la luz de la información tomada del Ecological Footprint Data para 2018 y de algunos artículos académicos originados en el estudio de estos datos. Los datos empíricos muestran que la tasa de consumo de biocapacidad es, por mucho, más alta que la tasa de regeneración, lo que llevaría a un acelerado agotamiento de todos los recursos y, por consiguiente, de la misma especie humana, como se observa en las simulaciones del modelo. Sin embargo, esto aún no sucede, dada la tasa de acumulación de recursos que ha permitido no solo mantener hasta ahora el nivel poblacional y de consumo, sino aumentarlo. Este fenómeno se detallará en el apartado de resultados.

3.3.2.3 Consideraciones de calidad del modelo

Como lectura de los resultados de la calidad del modelo, es importante considerar los principios de verificación (V), validación (V) y acreditación (A) de los modelos de simulación propuestos por Balci (1997).

1. V&V se deben desarrollar a lo largo de todo el ciclo de modelamiento y simulación.
2. Los resultados VV&A no se deben considerar como una variable binaria en la que el modelo es absolutamente correcto o incorrecto.
3. El modelo de simulación está construido con base en los objetivos de modelamiento y simulación y su credibilidad se justifica con respecto a estos objetivos.
4. V&V requiere independencia para prevenir sesgos de los desarrolladores.
5. VV&A es difícil y requiere de creatividad y visión.
6. La credibilidad se puede reclamar solo para las condiciones prescritas, para las cuales se verifica, valida y acredita el modelo o la simulación.
7. La prueba completa del modelo de simulación no es posible.
8. VV&A debe ser planeado y documentado.
9. Deben evitarse los errores de tipo I, II y III.

Error tipo I: se rechazan los resultados de la simulación cuando, de hecho, son lo suficientemente creíbles.

Error tipo II: se aceptan resultados de simulación no válidos como si fueran suficientemente válidos.

Error tipo III: el problema incorrecto se resuelve, el problema formulado no contiene completamente el problema real (Balci, 1998).

10. Los errores se deben detectar lo antes posible en el ciclo de vida de modelamiento y simulación.
11. El problema de respuesta múltiple debe reconocerse y resolverse de manera adecuada. La validez de un modelo de simulación con dos o más variables de salida (respuesta) no se puede probar al comparar el modelo correspondiente y las variables de salida del sistema de una en una (Balci, 1998).
12. Probar con éxito cada submodelo (módulo) no implica credibilidad general del modelo.
13. El problema de doble validación se debe reconocer y resolver de manera adecuada. Si los datos se pueden recopilar tanto en la entrada, como en la salida del sistema, se puede validar el modelo llevado a cabo al comparar el modelo y las salidas del sistema que se obtienen al ejecutar el modelo con los «mismos» datos de entrada que controlan el sistema.
14. La validez del modelo de simulación no garantiza la credibilidad y la aceptabilidad de los resultados de la simulación.
15. Un problema bien formulado es esencial para la aceptabilidad y la acreditación de los resultados del modelo y sus simulaciones.

3.4 Herramienta NetLogo

Existen diferentes tipos de lenguaje de programación para modelos basados en agentes (MBA). Dentro de esta variedad, se encuentran Swarm, Repast, MASON y NetLogo. Este último, creado por Uri Wilensky y desarrollado en The Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, de la Universidad Northwestern, en Illinois, Estados Unidos (Wilensky, 2021), es el de más amplio uso. Se ha seleccionado para la programación del modelo propuesto. Se usa la versión NetLog-6.2.2.2.dmg.

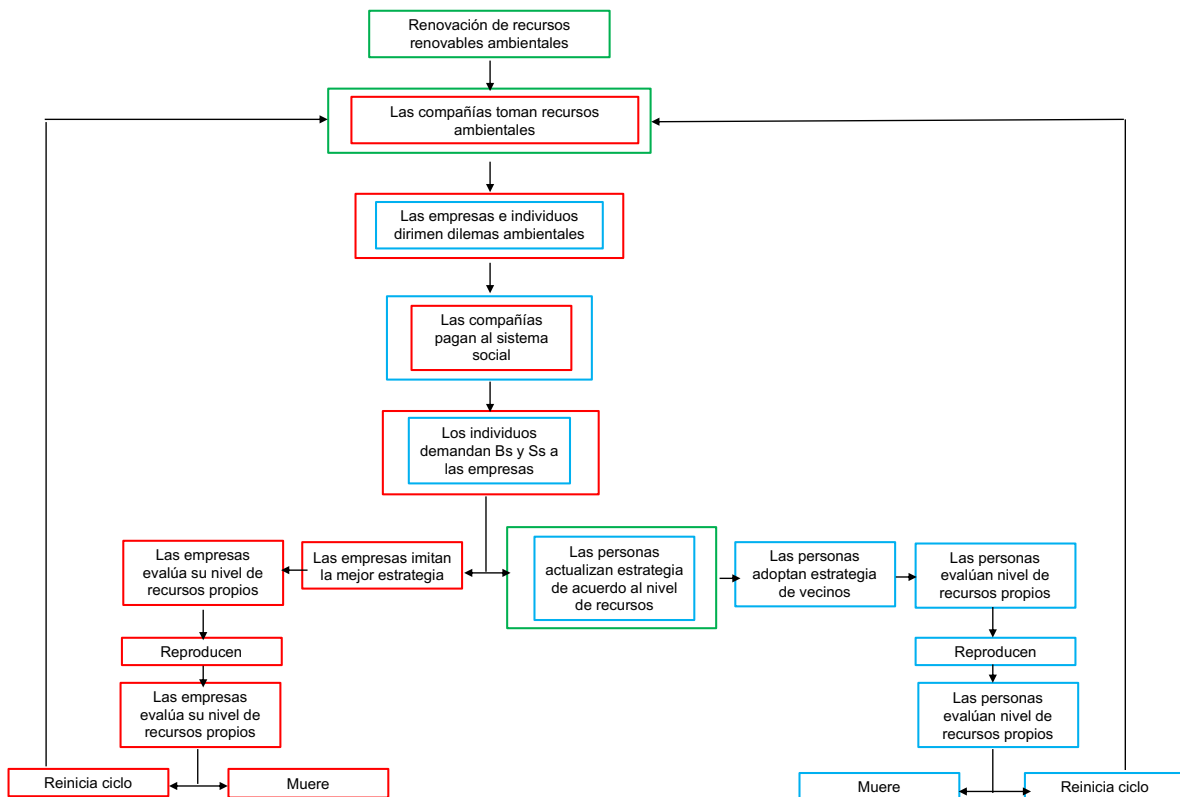
Dado que el *software* fue desarrollado en inglés, y que las entidades del lenguaje de programación han sido nombradas en este idioma, así como la discusión del modelo en foros internacionales, se construye el código, también, en el idioma anglo.

El código se corrió en un equipo MacBook Pro M1 2020.

3.5 Síntesis de la modelación

En la figura 3-5, se presenta la síntesis de la modelación. El color de cada una de las cajas indica el sistema o los sistemas involucrados en dicho proceso. Así, el color rojo representa el sistema económico; el azul, el social; y el verde, el ambiental. De esta forma, se evidencia que hay procesos en los que se establecen relaciones Inter sistémicas.

Figura 3-5: Síntesis de la modelación



Fuente: elaboración propia.

Además, otros elementos, que pueden ser aclaradores sobre el proceso de modelación, se presentan en los suplementos finales. En el anexo A, se muestran los parámetros y su explicación, así como las condiciones iniciales para la ejecución del modelo general. De este modelo, se desprenden algunas versiones para la creación de los experimentos. Para aquellos valores que no requieren calibración, pero que aparecen como un valor dado, se expone la fuente de información respectiva.

En el anexo B, se encuentra, de manera detallada, el diagrama de flujo en el que se representa la secuencia del modelo desde la perspectiva de cada agente y del espacio en el que interactúan. Se resalta cuándo el agente interactúa con otro sistema distinto al que representa.

En el anexo C, se narra la dinámica del modelo general desde la perspectiva de la programadora, en el que se consideran las variables y los parámetros usados en el código. Por último, en el anexo D, se encuentra la ubicación para acceder a los modelos usados en esta investigación, así como el código del modelo general.

4. Emergencia de la cooperación para la paz

En sistemas naturales o de gran escala, desarrollar y comprender por completo el sistema puede ser muy difícil o, si no, imposible. Sin embargo, los sistemas adaptativos complejos se reconocen por exhibir comportamientos colectivos emergentes, autoorganizados y similares a otros fenómenos (Niazi & Hussain, 2011). Bajo esta consideración, identificar estas emergencias resulta de gran importancia para entender mejor el fenómeno. Así, los datos obtenidos de las dinámicas y los comportamientos de los modelos, que representan este tipo de sistemas, se pueden interpretar como experimentos y analizarlos inductivamente a través de métodos cuantitativos y cualitativos. Esta es una práctica de las llamadas «ciencias sociales generativas» (BenDor & Scheffran, 2019).

En general, en la metodología de MBA, es importante hacer múltiples simulaciones de los experimentos con el propósito de determinar si algunos resultados corresponden, realmente, a un patrón o tan solo ocurrieron una vez (Wilensky & Rand, 2015). Para los sistemas complejos adaptativos, las simulaciones son estocásticas. Por tanto, se pueden producir diferentes resultados para un mismo conjunto de entrada, al estar involucrada la aleatoriedad.

Los experimentos desarrollados en el modelo buscan identificar, bajo circunstancias particulares, qué ocurre con las estrategias de cada agente a nivel colectivo y, por tanto, cómo inciden en la paz.

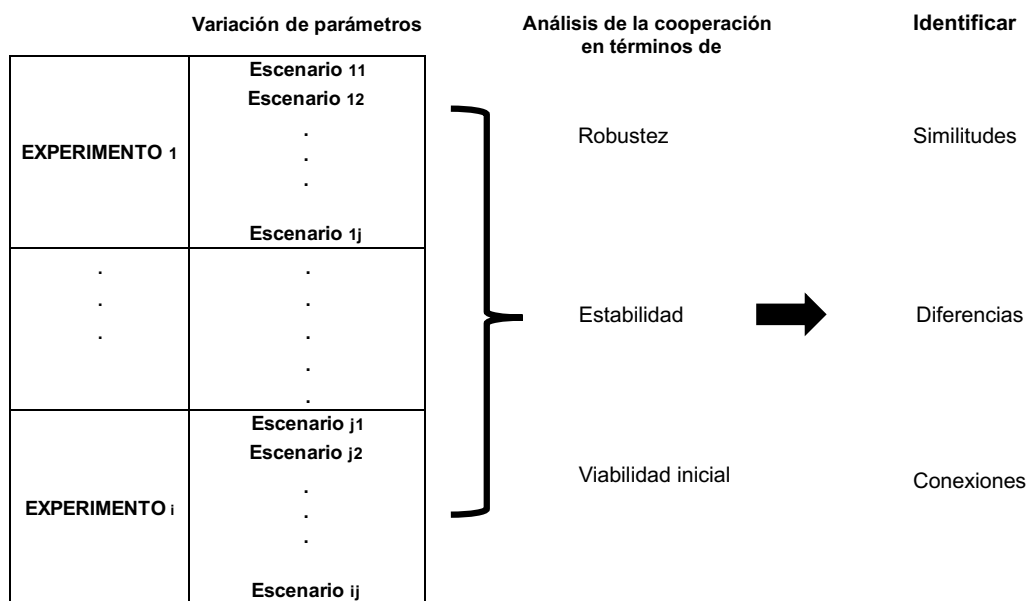
4.1 Experimentos

Se presentan tres tipos de experimentos que buscan indagar, bajo parámetros específicos, cómo se comporta el sistema a nivel agregado. Estos experimentos son: i) evaluación del modelo para el caso a nivel mundial y para dos grupos de países: los países pertenecientes a la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) y los que no hacen parte de esta; ii) comportamientos netamente etnocéntricos por parte de las personas en el consumo a favor de empresas con estrategias cooperativas (que consumen moderadamente los recursos); y iii) bajo el aumento de eficiencias logradas por la tecnología en la cantidad de recursos tomados del sistema ambiental y de los consumidos por los individuos.

Para cada tipo de experimento, se contrastan escenarios. A partir de allí, como plantea Eoyang (2014), con el propósito de identificar los patrones del sistema, se indaga por las similitudes, diferencias y conexiones.

Dado que el propósito de esta investigación es preguntarse por la estrategia de cooperación, que se identifica en sistemas pacíficos, se puede estudiar su evolución en términos de tres conceptos propuestos por Axelrod (1984): i) robustez, que se refiere al tipo de estrategia que prospera en un ambiente diverso de estrategias más o menos sofisticadas; ii) estabilidad, que analiza bajo qué condiciones podría un tipo de estrategia, una vez establecida, resistir a la invasión de una estrategia mutante; y iii) viabilidad inicial, es decir, si incluso la estrategia es robusta y estable, cómo puede ser alimentada en un ambiente predominantemente no cooperativo.

Con base en este contexto teórico, se diseña un mecanismo de indagación utilizado para el análisis de cada experimento propuesto. Este se representa en la figura 4-1. Cada experimento consta de varios escenarios que se generan dada la variación de parámetros en determinada variable. Cada escenario presenta diez simulaciones, que produce aleatoriamente el software NetLogo a través de la herramienta BehaviourSpace. Los datos obtenidos de las corridas se procesan a través de estadísticas y gráficas para buscar patrones relevantes a partir de cuestionamientos comparativos sobre los elementos ya mencionados de robustez, estabilidad y viabilidad inicial de las estrategias cooperativas con respecto a las demás.

Figura 4-1: Mecanismo de indagación en los experimentos

Fuente: elaboración propia.

4.1.1 Evaluación del modelo: caso global y países OCDE y no OCDE

A continuación, se describen y discuten los resultados del modelo cuando se evalúan los resultados a nivel global, es decir, teniendo en cuenta la cantidad de biocapacidad global y la demanda mundial. Posteriormente, se contrastan simulaciones para el grupo de países que conforman la OCDE, organización en la que se encuentra la mayoría de países desarrollados, que presentan un importante consumo de los recursos ambientales mundiales con respecto a los demás países, que tienden a tener un menor consumo.

4.1.1.1 Caso global

El caso mundial evalúa la capacidad biofísica del planeta con respecto a la demanda total antropocéntrica sobre estos recursos. Se consideran los datos de 2017, que sirven de parámetros necesarios para el inicio de la simulación. Este caso resulta importante, ya que permite una validación del modelo al corroborar que su dinámica se corresponde con la que ofrecen los datos del Global Footprint Network (Global Footprint Network National Footprint

Accounts, 2018), así como para determinar un referente general con respecto al cual se puedan identificar diferencias y similitudes con los demás experimentos.

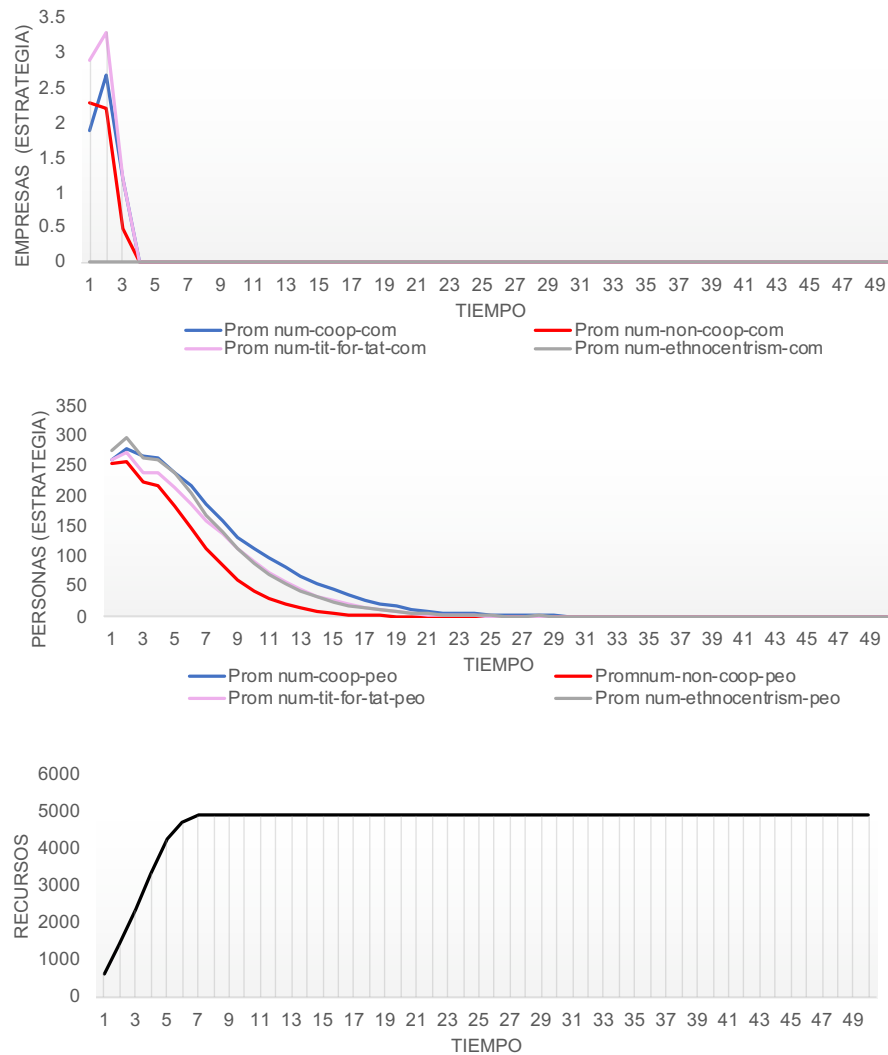
En 2017, la tierra tenía 12 100 mil millones de hectáreas biofísicamente productivas. Sin embargo, la demanda, para la misma fecha, sumó 20 900 mil millones de hectáreas globales. Esto equivale a un 73 % más que la capacidad de regeneración de aquellos ecosistemas que lo pueden hacer, es decir, hay una huella de 2,8 hectáreas globales por persona, mientras la biocapacidad disponible es de tan solo 1,6 (Wackernagel *et al.*, 2021). Es importante mencionar que, no todos los ecosistemas se pueden regenerar; en algunos casos se transforman, impactan, sufren desequilibrios o daños irreversibles.

A partir de estos datos, se evidencia un consumo que no corresponde a la oferta de recursos ambientales y, por tanto, lleva a una situación de escasez, que genera insostenibilidad del nivel de consumo actual; o, si este permanece constante, hay una insostenibilidad del actual nivel poblacional y su crecimiento. En las simulaciones, se evidencia que las empresas, en tan solo 5 *tick* (años), ya no cuentan con los recursos que se obtienen del sistema ambiental para satisfacer la demanda (ver figuras 4-2 y 4-3). Esto implica la desaparición de las empresas al no obtener los recursos ambientales para ofrecer los bienes y servicios que demanda la población, y los individuos al no recibir los recursos del sistema económico, sobreviven con el capital acumulado hasta agotarse. Es importante tener en cuenta que, en este modelo general, no hay construcción de mercado ni de desarrollo tecnológico que ofrezca alternativas para evitar el colapso. De allí la importancia de considerar el alcance del modelo para cada experimento.

Este punto crítico se puede entender como un punto de quiebre entre las fases tres, en la que se deshacen estructuras, y cuatro, de reorganización del ciclo adaptable de los sistemas socio ecosistémicos propuestos por Holling (2004). Se presenta una etapa de inestabilidad, que exige el paso a un nuevo paradigma. La fase uno, llamada *r*, se caracteriza por un rápido crecimiento de los recursos libremente disponibles y por una alta resiliencia. En la siguiente fase, *k* presenta una acumulación de capital. Esta fase es gradualmente rigidizada; la mayoría de los recursos están encerrados y presentan poca novedad. La fase tres, Ω , muestra una dinámica caótica en la que las relaciones y estructuras se deshacen; y la fase cuatro, α , es de reorganización; prevalece la novedad.

El comportamiento del ciclo depende de qué tanto se combinen experiencias y conocimientos, y se ajusten las respuestas a cambios externos y procesos internos.

Figura 4-2: Experimento 1. Escenario global de renovación actual. Personas sin percepción de escasez de recursos ambientales



Fuente: elaboración propia.

En este contexto, se encuentra que, actualmente, en la realidad, aunque se sabe que hay una tasa de consumo mayor que la capacidad de regeneración, la población no decrece y los recursos siguen respondiendo a gran parte de esta demanda. Este fenómeno crea la

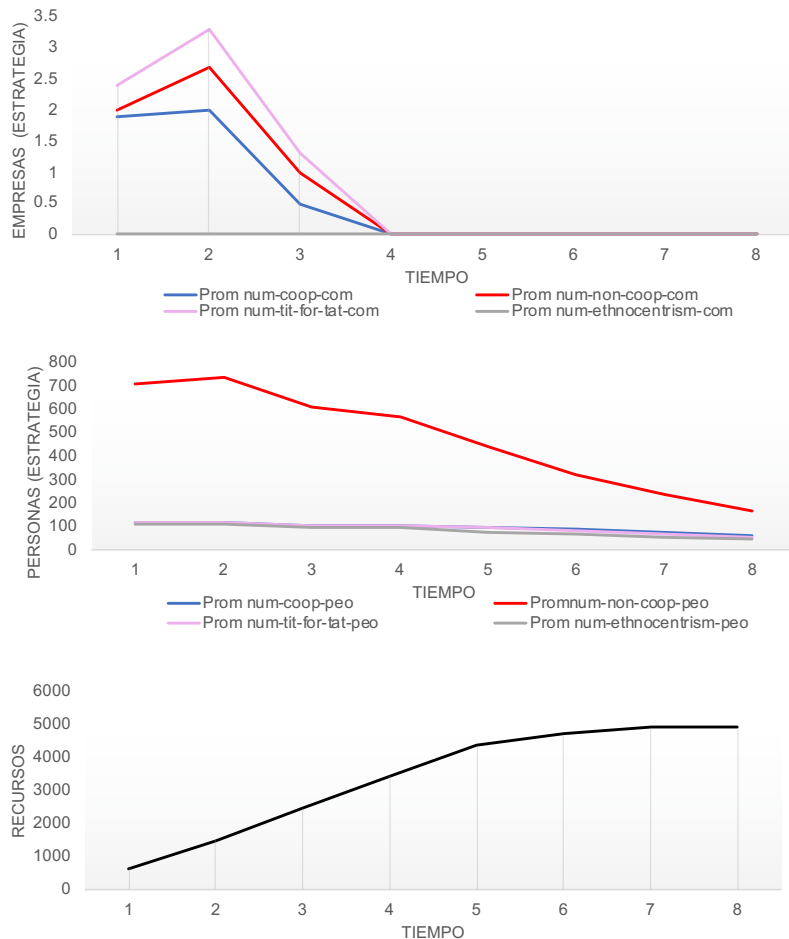
sensación de que dicho agotamiento se dará en un futuro lejano y no inmediato, como en la simulación.

Esto se explica debido a las reservas de recursos acumuladas, lo que ha permitido, incluso durante las últimas décadas, el sobreuso ecológico global y el aumento continuo de la demanda de consumo total. Pero esto ha acelerado el agotamiento de los activos ecológicos de la biosfera, trayendo consigo una pérdida de biodiversidad, el cambio climático, la destrucción de bosques y la escasez de agua dulce, entre otros. Este impacto, y una retroalimentación débil, amplifican los desafíos futuros de seguridad de los recursos al agotar, aún más, el capital natural (Wackernagel *et al.*, 2021).

Esta situación se enmarca en un desconocimiento de cuánto más la humanidad puede persistir en el uso excesivo de los recursos ambientales antes de que el desempeño económico se vea afectado de manera notable. Este periodo define el tiempo máximo de transición hacia un futuro regenerativo o cuándo una regeneración biológica (posiblemente disminuida) constreñiría el metabolismo material de la humanidad (Wackernagel *et al.*, 2021).

Al considerar que los individuos pueden percibir escasez en su entorno y cambiar a una estrategia no cooperativa, el escenario resulta más desventajoso para los recursos ambientales (ver figura 4-3) que en el caso de que estos individuos no puedan cambiar a una estrategia no cooperativa como consecuencia de percibir escasez (ver figura 4-2). En el primer caso, los recursos ambientales se agotan de manera más rápida, hasta que su nivel de escasez limita el funcionamiento de las empresas y, por tanto, la posibilidad de obtener los recursos para satisfacer la demanda de la población.

Figura 4-3: Experimento 1. Escenario global de renovación actual. Personas con percepción de escasez de recursos ambientales



Fuente: elaboración propia.

En este punto, se puede observar que, una vez implementada la estrategia no cooperativa por parte de los agentes sociales, como consecuencia de la percepción de escasez en el entorno, el comportamiento luce irreversible (ver figura 4-3). Así, se podría hablar de un fenómeno de encerramiento *lock-in*, ya que, si hay escasez en el entorno, en algún momento los individuos empiezan a comportarse de manera no cooperativa. Si los recursos dejan de escasear, el mecanismo de adaptación opera con una probabilidad del 50 % de cambiar a cualquier estrategia de las personas que rodean al agente social; mientras más agentes se hayan movido a la estrategia no cooperativa, la probabilidad de que quien no la haya implementado la copie tiende a aumentar. Además, permanece invariable a los mecanismos de mutación que se presentan en la reproducción. Esta situación de

encerramiento representa aquellos casos en los que se conservan comportamientos, tecnologías o demandas que ya carecen de vigencia, por ejemplo, QWERTY (las primeras líneas del teclado). La razón por la que estas letras están en ese orden es que los primeros tipos de máquinas de escribir tenían esta secuencia, que se hizo más popular que la de sus competidores. Así, fijó un patrón más o menos permanente, que se conserva, incluso, en el cambio de máquina de escribir a computador o en nuevas tecnologías, como teléfonos inteligentes o tabletas (Colander, 2013).

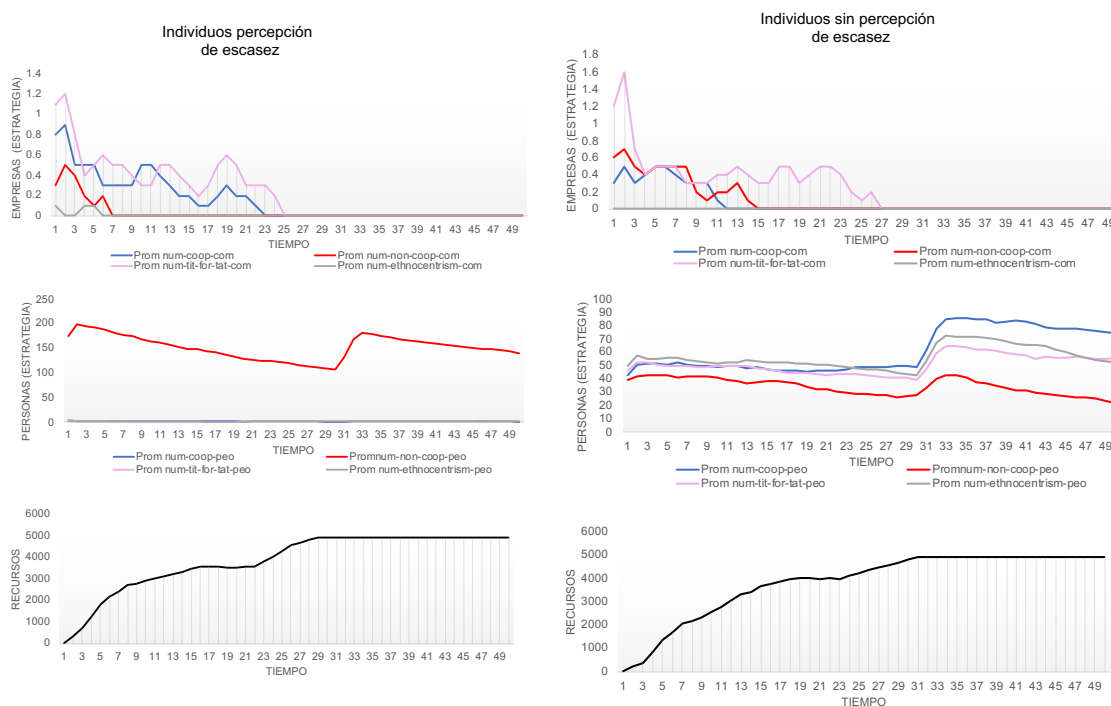
A pesar de este comportamiento de los individuos, la estrategia del *tit-for-tat* (empezar cooperando y replicar los mismos términos del oponente) resulta prosperar en las empresas. Esto quiere decir que cierta cooperación condicional se muestra robusta al ser dominante; además, presenta viabilidad inicial al prevalecer en medio de comportamientos hostiles (estrategia no cooperativa) por parte de los individuos.

A continuación, se analiza cómo es el comportamiento cooperativo para un grupo de países en los que se encuentra concentrado un alto nivel de desarrollo y, por tanto, de industrialización con respecto al resto de países.

4.1.1.2 Caso OCDE vs. no OCDE

Se toma como escenario para analizar, el grupo de países que conforman la OCDE a 2018. Este grupo está conformado, en su mayoría, por aquellos países clasificados por Naciones Unidas como desarrollados, es decir, básicamente aquellos con mejores condiciones económicas (United Nations, 2022).

Para estos escenarios, se hace una consideración particular. Las empresas tienen la capacidad de tomar recursos con un radio tan amplio, que casi pueden abarcar el territorio global, lo que permite seguir satisfaciendo la demanda a pesar de que las áreas próximas se encuentren en un mayor nivel de agotamiento. Esta consideración cobra sentido ya que, a través de filiales internacionales, es posible ampliar los flujos de recursos casi desde cualquier lugar.

Figura 4-4: Experimento 1. Escenario de países OCDE

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4-4, se observan, a la izquierda, las simulaciones con agentes que presentan percepción de escasez en su entorno y, a la derecha, las que corresponden a quienes no tienen esa facultad. Esta variación es importante, ya que ofrece un contexto para analizar la viabilidad inicial de la cooperación, es decir, qué tanto prospera en un ambiente hostil.

Tanto para este experimento, como para otros que se analizarán, es evidente un salto poblacional alrededor del tiempo 30. Este cambio drástico corresponde a que, en la creación de los agentes individuos, un porcentaje importante fue creado con edad de 0 o valores muy pequeños⁵ y, a partir de los 28⁶ años, los individuos se empiezan a reproducir, dado el promedio del comportamiento global, como se explica en las condiciones iniciales (ver anexo A). Estas simulaciones son estocásticas, ya que muchos valores se asignan

⁵ El lector debe recordar que este es un valor aleatorio que asigna el sistema para cada persona entre 0 y la esperanza de vida.

⁶ El promedio mundial en el que las mujeres tienen su primer hijo es 28 años (World Population Review, 2022).

aleatoriamente. Sin embargo, en realidad, los valores son pseudoaleatorios ya que aparecen aleatoriamente, pero son generados por un proceso determinístico, es decir, se obtiene el mismo resultado siempre. Así, se inicia con la misma «semilla» aleatoria (se repite la misma cadena de números aleatorios). Este mecanismo pseudoaleatorio es deseable, ya que permite que los experimentos sean reproducibles. Alguien más puede correr las simulaciones y obtener los mismos resultados (Wilensky, 2021). Por tanto, este crecimiento poblacional no es una emergencia, sino la consecuencia de condiciones iniciales particulares. Sin embargo, resulta de gran utilidad al permitir analizar el comportamiento de las estrategias ante un fenómeno endógeno que implica un cambio drástico que, para este caso particular, es un cambio poblacional.

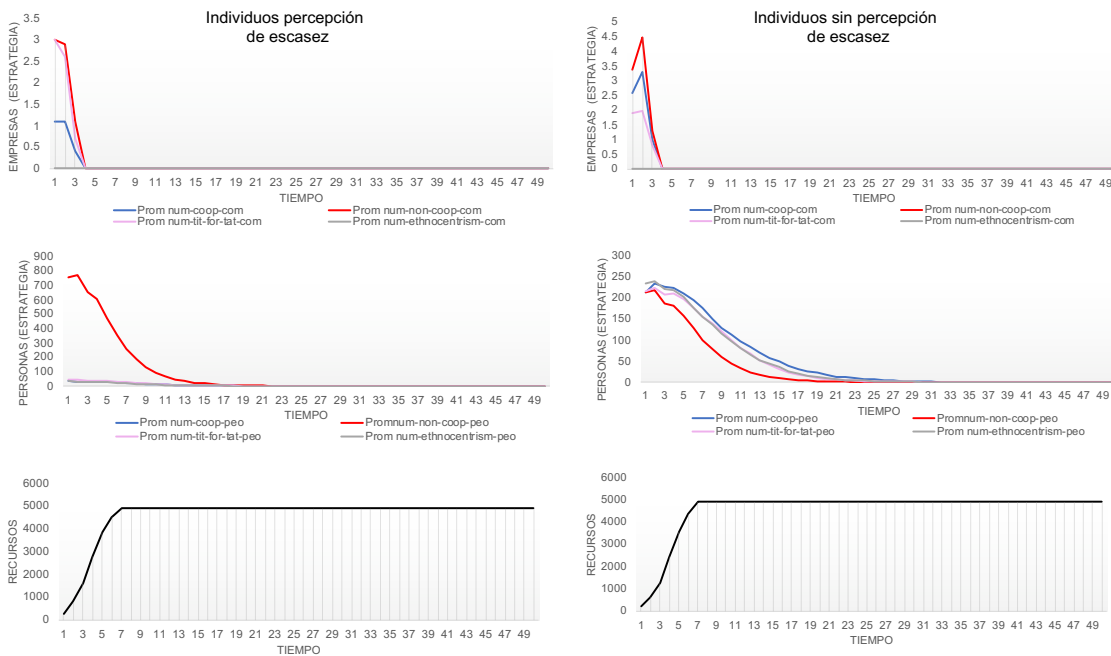
Cuando las personas perciben escasez de recursos ambientales a su alrededor, los recursos, al comienzo, presentan un agotamiento más acelerado con respecto al caso en el que las personas no perciben esta escasez. En el contexto en que las personas no perciben escasez, la estrategia que domina entre ellos es la cooperativa. Comparando estos dos escenarios: agente con percepción de escasez Vs agente sin percepción de escasez. En este último escenario la población aumenta un 23 %. Esto sugiere que cuando domina la estrategia cooperativa en los individuos, los recursos ambientales presentan un incremento que es absorbido por el aumento poblacional. Es decir, este escenario es más próspero para la humanidad. Sin embargo, al contrastar los datos del crecimiento poblacional de países OCDE los nacimientos pueden tener una tendencia contraria cuya explicación se escapa de esta investigación. Lo que se quiere resaltar es que, en contextos cooperativos, se presenta una mayor disponibilidad de recursos ambientales.

Para ambos escenarios, la estrategia que prevalece en las empresas es *tit-for-tat* la cual es de naturaleza cooperativa. Esta estrategia es robusta ya que, en caso de que los individuos no perciban agotamiento de los recursos ambientales, en un primer momento, domina la estrategia etnocéntrica, pero, posteriormente, se impone la cooperativa. Incluso, esta estrategia persiste a pesar del salto poblacional y evidencia cierta resiliencia del sistema al no ser tan vulnerable a un inesperado e impredecible choque (Holling, 2001). En este escenario en el que, durante el tiempo de análisis, dominó las estrategias de orden cooperativa en individuos y empresas, los recursos ambientales describieron un crecimiento estable.

Para el caso en el que la estrategia cooperativa dominó solo en las empresas —dado que, cuando los individuos perciben escasez, la estrategia que domina en ellos es la no cooperativa—, se puede mencionar estabilidad en la estrategia, ya que se mantiene a pesar de que los procesos de reproducción están acompañados de cierto nivel de mutación. Y, por último, presenta viabilidad inicial debido a que la estrategia prospera en un ambiente hostil por parte de individuos.

Por el contrario, como se observa en la figura 4-5, para el caso del resto de países, que no pertenecen a la OCDE, el comportamiento de la estrategia cooperativa en las empresas no domina, ni persiste. Los resultados son similares al del caso global, con un colapso de todo el sistema en los primeros cinco años. A diferencia del caso OCDE en que el sistema se logra mantener entre 25 y 27 años, dependiendo del escenario. Además, cuando en individuos y empresas dominan estrategias de orden cooperativo, el sistema se observa más estable y provee mayores recursos para la población.

Figura 4-5: Experimento 1. Escenario países no OCDE



Fuente: elaboración propia.

Como resultado de este experimento se encuentra que en los países OCDE con alto nivel industrial domina las estrategias de orden cooperativo en empresas e individuos. Este comportamiento coincide con que 16 de los 20 países considerados los más pacíficos del mundo para 2018 pertenecen a la OCDE. El costo de la violencia para los países más pacíficos corresponde a un 4% del PIB, mientras que para el resto de los países es un 11% (Institute for Economics & Peace, 2018). Es decir, países con menores ingresos tienden a desplegar estrategias no cooperativas en contraste con los países más ricos, y además estos países no – OCDE no sólo parten de un contexto de riqueza menor, sino que los costos por sus estrategias no cooperativas que llevan a conflictos son más altos que los países OCDE. Además, el modelo puede considerar que el radio de alcance de una empresa sea tan grande que sobre pase límites nacionales. Es decir, una filial puede tomar recursos más allá de sus fronteras.

Analizando una dimensión particular se puede tomar los recursos pesqueros. Se ha encontrado que donde existe mejor registro y estadísticas sobre el tema es en los países ricos de Europa, América del Norte, Australia y Japón (Casi los mismos que conforman la OCDE para 2018) y es precisamente alrededor de las regiones de estos países en los que se ha encontrado un nivel sano de estos recursos. E incluso en las regiones de Australia, Alaska, las costas del noreste y sureste de EE. UU., Japón y Europa, las poblaciones de peces están creciendo, en lugar de permanecer estables o decreciendo. Además es en estos mismo países donde se evidencia los mayores porcentajes de aguas territoriales protegidas (Our World in Data, 2022). Esto implica una mayor seguridad en recursos ambientales disipando comportamientos que lleven a instaurar estrategias no-cooperativas.

En la investigación realizada por BenDor y Scheffran (2019). Los autores en un ejercicio realizado en el contexto de la tragedia de los comunes representando de manera abstracta a los pescadores involucrados en un conflicto ecológico y económico; en el escenario donde los más especializados usan técnicas para el aumento de la pesca, lo que va en detrimento de la posibilidad de pesca de los demás, y dejando en riesgo el bien pesquero común fueron realizadas varias simulaciones.

Al evaluar el escenario cooperativo en el sistema, a través de la implementación de mecanismos como marcos de negociación, aportes desde la comunidad científica y manejo

de la gobernanza, los resultados mostraron mejoras en términos de sostenibilidad y estabilidad del mercado. Es decir, los comportamientos cooperativos favorecieron la salud del ecosistema lo que inactiva los conflictos presentados como consecuencia de la forma como se tomaban los recursos entre los diferentes pescadores.

Estos resultados van en concordancia con los obtenidos de la simulación en esta investigación para países OCDE en que, en condiciones ambientales sanas, emergen comportamientos cooperativos. Sin embargo, cabe resaltar que uno de los aportes teóricos de esta investigación aboga por estos rasgos cooperativos a través de procesos de selección intergrupala que dan paso a dinámicas que favorecen la paz y la sostenibilidad, pero desde estructuras auto-organizadas y retroalimentaciones endógenas del sistema, lo que permite considerar las condiciones iniciales o historia particular del propio sistema. En contraste de comportamientos exógenos implementados como lo fue lo realizado en la investigación de BenDor y Scheffran arriba señalada.

El escenario de los países OCDE es interesante primero porque en la medida en que su resultado coincide con los elementos empíricos que se han encontrado sobre estos países, aporta confianza sobre la validez del modelo y, en segundo lugar, estos resultados muestran lo que ocurre en el meso – nivel económico, y es cierta prevalencia de un comportamiento cooperativo de parte de agentes sociales y económicos, cuando el sistema ambiental se encuentra en condiciones saludables.

4.1.2 Consumo etnocentrista

La teoría de transición a la sostenibilidad sugiere que las innovaciones, desde los nichos, son fundamentales para cambiar el sistema sociotécnico por los requerimientos sostenibles. Estos nichos deben ser protegidos (Markard *et al.*, 2012) para resistir a todas las presiones del sistema. Una de las formas de este tipo protección a partir de sistemas autoorganizados es el mecanismo etnocéntrico, operable desde el mercado.

Bajo la perspectiva de este trabajo, el sistema social no se concibe como uno conformado por la agregación del agente representativo, sino por seres humanos heterogéneos, con diversidad en sus preferencias, y que asumen diversos roles que, no necesariamente, están definidos con claridad y separados unos de otros. Por tanto, un mismo individuo dentro del sistema social e, incluso, dentro del mismo sistema económico, puede ejercer, casi de forma

simultánea, varios roles como comprador, vendedor, proveedor, empleado, inversionista, legislador o activista. Sus fronteras son difusas; su ejecución se puede dar al mismo tiempo o variar con rapidez entre un rol y otro. Basta con imaginar que se está invirtiendo en la bolsa de valores a través de internet, mientras se contesta un mensaje de la oficina y se apoya una iniciativa ambiental por medio de las redes sociales. Sin embargo, este individuo, con sus múltiples roles, está contenido en los mismos sistemas económico, social y ambiental, es decir, sus acciones están determinadas por el comportamiento de un único sistema externo que influencia su racionalidad. En la toma, de decisiones no se separa cada subsistema, ni se quitan los ropajes de cada rol.

Para comprender su importancia en la transición a la sostenibilidad, es importante partir del ciudadano. Cuando se habla de ciudadanía, se encuentran dos corrientes, entre estas, la liberal, que se enfoca en los derechos. Se argumenta que es justificable restringir las libertades de las personas a través de un Gobierno; esta es la manera de garantizar los derechos civiles y las libertades relacionadas con estos derechos, mientras que la versión republicana se enfoca más en los deberes; los ciudadanos tienen la responsabilidad de tomar parte en la creación de reglas para promover el bien público; estos deberes no son impuestos, sino obligaciones intrínsecas. Por tanto, la promoción del bien público no es tarea exclusiva del Gobierno, sino deber de individuos y comunidades. La ciudadanía es, entonces, una actividad política. La teoría contemporánea de ciudadanía enfatiza en la interdependencia de derechos y deberes. Los derechos liberales brindan condiciones para un buen comportamiento ciudadano republicano y este buen comportamiento se expresa en la participación activa y consiente de los derechos políticos (Schrader, 2007).

Así, siguiendo las ideas de Hirschman (1970), bajo un sistema económico, social o político, individuos, firmas y organizaciones, en general, pueden evidenciar lapsus de eficiencia, racionalidad y respeto a la ley, entre otros. Estos llevan a que, fallas de algunos actores no estén al nivel de lo esperado por clientes u otros miembros de la sociedad. La sociedad, desde adentro, es decir endógenamente, genera fuerzas para revertir el comportamiento y moverlo a la dirección que se requiere para su correcto funcionamiento. Para ello, se plantean dos opciones: i) la salida: un cliente o miembro de una organización, que está insatisfecho, decide salirse y cambiar a otra opción, de ser posible. De esta forma, defiende su bienestar y busca mejorar su posición al poner en movimiento las fuerzas del mercado

(en el caso económico), que intentaría recuperar a quien se ha ido; y ii) la voz, que es un intento de cambiar la situación indeseable mediante la petición individual o colectiva al apelar a una autoridad superior. No obstante, tanto la salida, como la voz están mediadas por la lealtad, vista como un apego a la organización. Un individuo con alta lealtad será más reticente a salir y a darle más alcance a la voz.

Bajo esta perspectiva, se encuentra el consumidor sostenible consiente, que se basa en información sobre las consecuencias sociales y ecológicas de comprar, usar y desechar productos (Schrader, 2007). Aquí, el principal mecanismo de influencia de los consumidores es el mercado que, al expresar sus necesidades y deseos, como una demanda, las empresas les responden posteriormente al proporcionarles los bienes y servicios que requieren. Esta es la base de la idea del consumo ético, que sugiere que, en cierta medida, los consumidores pueden actuar en el control social de los negocios. Por tanto, estos utilizan sus compras como «votos» para apoyar o rechazar ciertas prácticas comerciales en lugar de usar las urnas para estas acciones políticas a través del Gobierno (Crane *et al.*, 2004).

Vale la pena enfatizar en que el planteamiento de Hirshman no se reduce tan solo al consumidor; él habla de miembros de organizaciones en general, que dan cabida a cualquiera de los grupos de interés de las empresas. De este modo, se ha observado que la presión en la cadena de suministros ha impulsado a empresas a buscar certificaciones sociales y ambientales, incluso, si no las perciben como valiosas. Bajo este mismo mecanismo, los accionistas tienen una posición poderosa que les permite responsabilizar de una variedad de temas, entre ellos los ambientales, a las empresas (Crane *et al.*, 2004). De esta forma, la sociedad, y cada individuo en particular, tiene la facultad de incidir en el comportamiento de un tipo de agente específico de la economía, como las empresas. Este tipo de comportamiento se puede ubicar en las interacciones etnocentristas en las que se favorece al que tiene rasgos o actitudes similares a las propias.

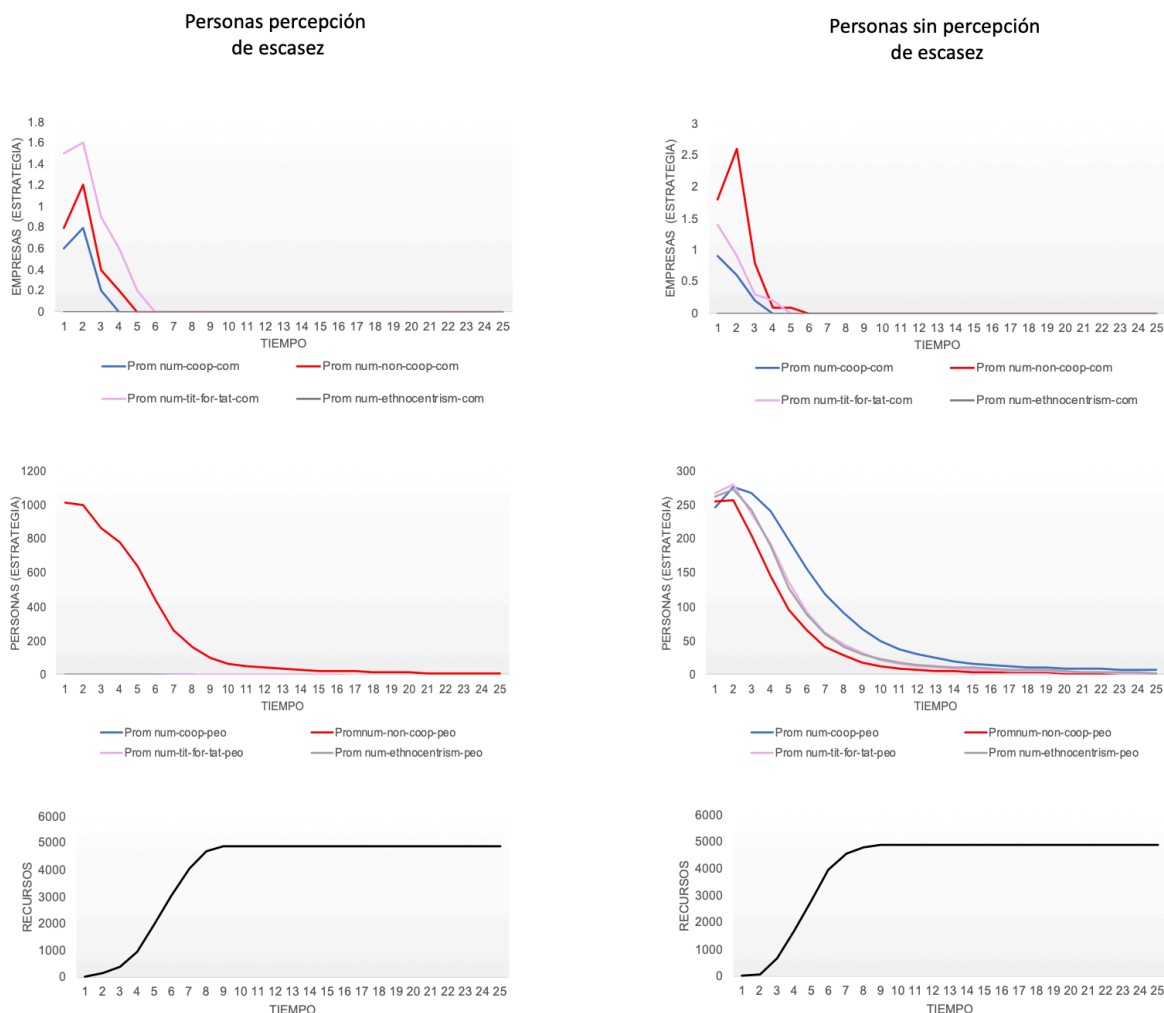
Así, recientes estudios del comportamiento han mostrado que actividades proambientales irradian una señal de cooperación, lo que implica que otros actúen sobre esta señal, y sean buscados como socios cooperadores. De esta manera se obtiene más cooperación por parte de los demás (Barcellos, 2010a). Esto puede ser relevante para las innovaciones proambientales de las empresas que son cada vez más visibles ante sus grupos de interés

que tienden a estar más informados, tener altas expectativas, y ser consientes e influyentes (Barcellos, 2010a).

En este marco, Barcellos (2010a) identificó que las empresas con comportamientos proambientales, y que desarrollan su responsabilidad social corporativa, son emocionalmente más atractivas para trabajar; develan menos vulnerabilidad ante la crisis; son más atractivas para inversores responsables; tienen mejor reputación corporativa; implementan estándares de transparencia y buen gobierno; y al tiempo, logran mejorar la calidad de la oferta comercial, la calidad laboral, la responsabilidad ética, la medioambiental y la social, e innovar.

Por esta razón, resulta pertinente evaluar qué sucede cuando aquellas personas con estrategia cooperativa solo compran a empresas con comportamiento cooperativo.

Figura 4-6: Experimento 2. Solo cooperadores compran a empresas cooperadoras



Fuente: elaboración propia.

Bajo las condiciones actuales de niveles de consumo y tamaño de la población, no es suficiente un comportamiento etnocentrista alrededor de una estrategia cooperativa de orden proambiental, que resulte dominante y lleve a niveles de recursos que garanticen la permanencia de la población. Como se observa en la figura 4-6, los recursos ambientales, con la tasa de renovación actual, no alcanzan un estado estable (*steady state*). Por el contrario, solo se observa una estabilidad de los recursos cuando ya no hay agentes económicos y ni sociales. Sin embargo, llama la atención que, cuando los agentes sociales tienen la capacidad de percibir escasez que los lleve a cambiar a estrategia no cooperativa,

las empresas se mueven a una estrategia *tit-for-tat* (empezar cooperando y replicar en los mismos términos del oponente).

También, es notorio que, para el caso en el que los agentes sociales no tienen percepción de escasez, a pesar del comportamiento etnocentrista con respecto a los cooperadores, la estrategia cooperativa muestra robustez y estabilidad solo a nivel de personas, pero no trasciende a nivel de empresas. Esto quiere decir que las decisiones de los consumidores-ciudadanos no alcanzan a tener el impacto necesario para que las estrategias trasciendan a las compañías y, de esta forma, impacten en un nivel más alto, como el socioeconómico.

Dicha situación se ve reflejado también en los estudios sobre consumo verde señalado por White et al., (2019) en el que del 65% de los consumidores que reportaron actitud positiva hacia los productos y servicios ecológicos, sólo el 26% concreta el consumo de este tipo de bienes generando un impacto bastante limitado sobre el sistema ambiental, mas como se indica en el mismo artículo, en el que se estima que alrededor del 70% de la huella ambiental de los gases efecto invernadero dependen de cómo los consumidores escogen, usan y disponen de manera sostenible los bienes adquiridos.

Este experimento dos sería un caso de un sistema complejo compuesto de agentes que emplean estrategias adaptativas, donde el proceso de selección opera a nivel funcional del individuo. Es probable que aquellos que cooperan, sobrevivan y se reproduzcan menos bien que los miembros que se benefician de la cooperación sin aportar o que explotan activamente los cooperadores (Wilson, 2016b). Entonces, este no es el escenario de un sistema que evolucione como un todo y en el que dicha cooperación trascienda a un nivel jerárquico superior, es decir, un sistema complejo adaptativo en tanto sistema.

Este comportamiento corrobora el planteamiento, a partir de la transición a la sostenibilidad, de que los nichos en los que surgen las innovaciones a nivel micro (Morone, 2018) requieren de ambientes protegidos para que las innovaciones se puedan desarrollar sin estar sujetas a la presión de selección del régimen dominante (Markard et al., 2012). Esta protección no puede estar sujeta solo al comportamiento de un grupo de la población (los que despliegan la estrategia cooperativa), pues resulta insuficiente para dominar en el sistema y, por tanto, es necesario otro tipo de protección, que puede ser de orden exógeno a la realidad aquí modelada.

En ese sentido, esta protección podría provenir de un nivel más alto que las empresas o individuos, como las instituciones formales. Así, la propuesta, desde la economía de la complejidad y evolutiva, toma relevancia al sugerir promover mecanismos de selección que permitan que el sistema evolucione como un todo y que los comportamientos puedan trascender a estructuras superiores. Para ello, Wilson (2016a) sugiere mecanismos de selección entre grupos, en los que prevalecerán aquellos que tienen, en su mayoría, agentes cooperadores que puedan llevar a fortalecer el grupo y, en el nivel agregado, a que el sistema evolucione en términos de una sola unidad. Dinámica que puede ser inducida por instituciones de nivel superior como Estados o de otra naturaleza formal.

4.1.3 Eficiencias en el consumo de recursos debido a la tecnología

Una preocupación relevante, que salta a la vista con respecto a la sostenibilidad, es que los seres humanos toman más de la tierra de lo que la tierra puede producir. En este sentido, subyace el concepto de desmaterialización, que apunta a la reducción de cosas o de energía necesaria para producir algo útil. Esto se puede obtener a través de desarrollos tecnológicos, ya que estos pueden llevar a la disminución de la cantidad de recursos necesarios para cumplir una función determinada, lo que se conoce como «eficiencia de los materiales» (Magee & Devezas, 2017).

Esta se representa en el modelo en dos frentes: en la disminución de los recursos ambientales tomados por las empresas y en la disminución de requerimientos de bienes por parte de los individuos. De esta forma, para cada año, el uso de recursos ambientales y de bienes demandados será menor con el fin de identificar, bajo estos escenarios, qué ocurre con las estrategias de los agentes y con el saldo global de los recursos ambientales. A continuación, se presentan los resultados de la modelación en que la tasa de consumo, para cada agente y empresa, se reduce en cada *tick* (año) en razón de una variable llamada eficiencia, como efecto de los desarrollos tecnológicos.

Se evaluaron escenarios con ganancias de eficiencias de 5 % y 1 % anual, teniendo en cuenta los agentes que no pueden percibir escasez (ver figura 4-7) o sí la perciben y

cambian a una estrategia no cooperativa (ver figura 4-8). Para los cuatro escenarios, incluso con pequeñas ganancias de eficiencia, como de 1 % anual, se logra una estabilidad del sistema, a diferencia del caso global previamente evaluado, con la tasa actual de consumo y de regeneración de recursos; en este, el sistema colapsaba tempranamente. Para los cuatro casos del experimento tres, también se observa el crecimiento poblacional alrededor del año 30, que, como se explicó en el primer experimento, obedece a condiciones iniciales en las que varios agentes sociales se encontraban en el rango de edad de 0 a 2 años y, cuando llegaban a los 28 —que corresponde al parámetro en el que se pueden empezar a reproducir⁷—, se observa un brusco crecimiento poblacional. A pesar de ello, las empresas se mantienen, ya que los recursos ambientales cuentan con superávit.

Cuando se analiza el escenario en que los individuos no perciben escasez de recursos (ver figura 4-7), tanto para eficiencias del 1 % como del 5 % en las empresas, se observa la emergencia de la estrategia dominante *tit-for-tat* (empezar cooperando y responder de igual manera que el oponente). En general, es una estrategia que se mueve más a lo cooperativo, pero que permite replicar cuando la contraparte no es cooperativa. Como segunda opción dominante, aparece la estrategia cooperativa. *Tit-for-tat* presenta robustez al prevalecer sobre otras opciones y estabilidad al permanecer a pesar de las mutaciones. En este mismo escenario, para el caso de los individuos, no hay una estrategia robusta y estable. La estrategia dominante varía dependiendo del nivel de eficiencia y cambia a lo largo del tiempo.

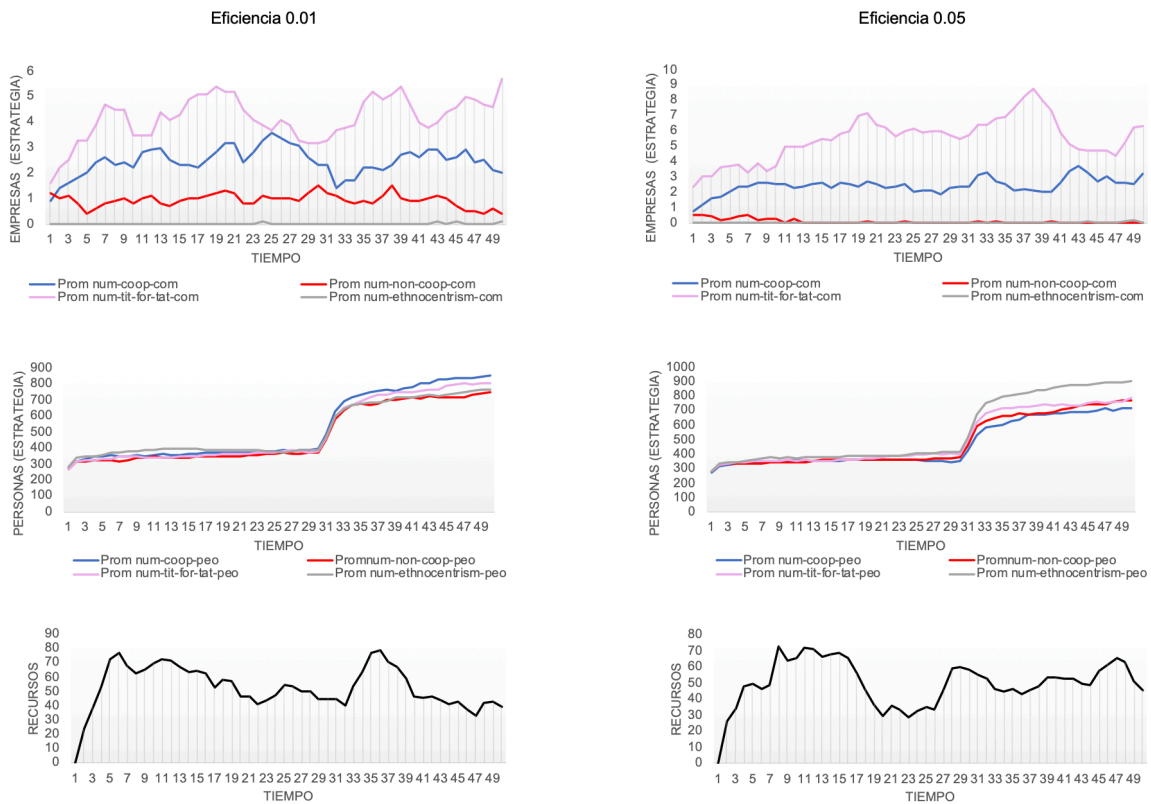
En el escenario en el que los individuos cuentan con percepción de escasez (ver figura 4-8), para los agentes sociales permanece la estrategia no cooperativa. Esta presenta robustez y estabilidad al no ser modificable y se observa el efecto de encerramiento ya mencionado. Mientras tanto, para las empresas, en el caso en el que la eficiencia es de 1 %, domina la estrategia *tit-for-tat* mientras que, cuando la eficiencia es de 5 %, domina la estrategia cooperativa. Sin embargo, para las empresas, cuando varía la tasa de eficiencia, no coincide la misma estrategia dominante, pero sí prevalecen las estrategias de orden cooperativo.

⁷ Se establece este valor como promedio mundial en que las mujeres tienen su primer hijo (World Population Review, 2022).

Al comparar los escenarios de individuos con percepción de escasez con respecto a los que no tienen, se encuentra que, para el caso en el que no perciben escasez, la estrategia de no cooperación nunca domina y, en estos casos, la población es un 15 % más alta si se compara con el escenario con percepción de escasez. Esto quiere decir que, estrategias que tienden a ser más cooperativas redundan en mayores ganancias, que se reflejan en el aumento de la población.

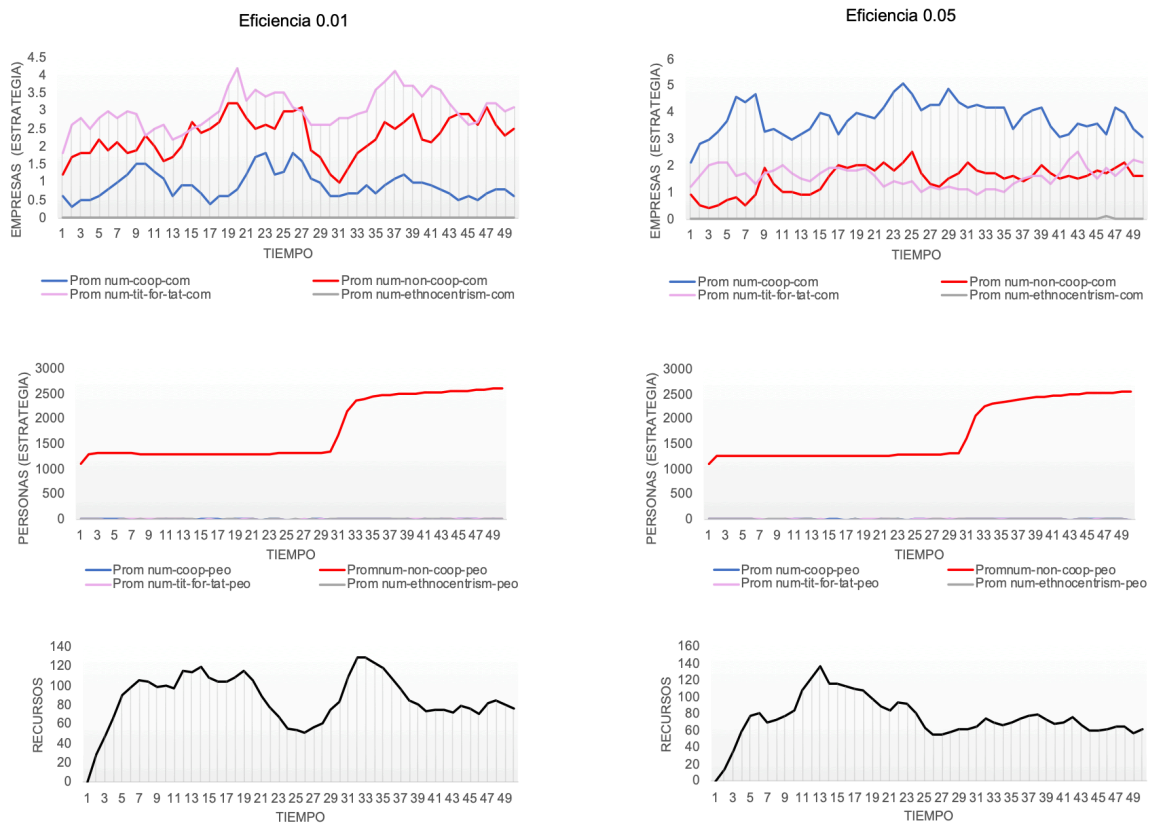
Así, para los individuos resulta más provechoso no establecer mecanismos autorganizados de no cooperación, ya que esto limita la obtención de recursos ambientales y su capacidad de crecer desde el punto de vista poblacional. Si bien este crecimiento puede implicar varios problemas para su existencia, no deja de ser una señal de prosperidad y éxito como especie.

Figura 4-7: Experimento 3. Individuos sin capacidad de percibir escasez de recursos



Fuente: elaboración propia.

Figura 4-8: Experimento 3. Individuos con capacidad de percibir escasez de recursos



Fuente: elaboración propia.

En este tercer experimento, el sistema no colapsa; sin embargo, se alcanza un fino estado estable en el que el superávit de recursos es bastante bajo. La condición inicial global de recursos biofísicos es de 1225 unidades, pero a lo largo del tiempo, el sistema se mantiene con menos del 15 % de los recursos ambientales. En los cuatro escenarios, la población más que se duplicó. No porque haya eficiencia en el consumo de recursos ambientales y de bienes, el sistema ambiental se recupera; todo lo contrario. Ese superávit es consumido por el aumento de la población. Esto quiere decir que se termina por generar un mayor consumo de los recursos ambientales, pero el sistema no colapsa porque la tecnología permite mantener la disponibilidad gracias a sus constantes eficiencias.

Se presenta así la paradoja de que los adelantos tecnológicos que buscan un menor consumo de recursos, tienen el efecto inverso, ya que al reducir el consumo y presentarse mayor disponibilidad en el sistema ambiental, se provee mejores condiciones para el crecimiento poblacional lo que implica un aumento neto en el total consumido. Si bien, este modelo no es poblacional, si permite alertar sobre las implicaciones que puede tener la tecnología, sino está en concordancia con las implicaciones sistémicas.

Este comportamiento, se ve reflejado en la paradoja de Jevons (1866) al afirmar que el uso de energía aumenta en lugar de disminuir cuando se introducen tecnologías energéticas más eficientes. Estos resultados se corroboran con el estudio realizado por Magee y Tessaleno (2017) en el que se examinaron empíricamente la tendencia de consumo como también la tendencia en costos para 57 casos en los que se consideraron materiales y algunos artefactos. El estudio encontró que la mejora tecnológica no resultó en una desmaterialización en términos absolutos y el consumo pudo superar el progreso tecnológico.

Es interesante que, en este experimento que analiza el impacto de la tecnología en las estrategias de los agentes, las emergencias más claras se observan a nivel de empresa y con estrategias de orden cooperativo. Al respecto, Axelrod (1984) plantea que, en un juego infinito del dilema del prisionero la cooperación surge porque los jugadores pueden encontrarse de nuevo. La decisión actual de cada jugador está influenciada no solo por el resultado actual, sino por las posibles decisiones del futuro. *Tit-for-tat*, que es la estrategia que domina, es una estrategia de cooperación ya que el agente inicia cooperando y, de esta manera, previene crear problemas innecesarios; también, es una estrategia de reciprocidad, ya que siempre responde de la misma forma en que fue tratada la última vez y desestimula futuras deserciones; además, es una estrategia de perdón, ya que acepta comportamientos cooperativos de su oponente, aunque este antes haya atacado; y de retaliación al responder en los mismos términos en que fue atacado. Ante esta dinámica clara, cuando el tiempo de interacción es lo suficientemente largo, emergen la ética y los rituales. Esto lo ejemplifica claramente Axelrod (1984) con la cooperación que surge en medio de trincheras en una guerra. Ahí se observa un comportamiento cooperativo de «vivir y dejar vivir». Cada bando restringe su ataque al enemigo, pero siempre deja en claro que podría tomar retaliaciones en caso de que no se siguiera cooperando.

A continuación, se presenta los hallazgos relevantes de estos experimentos que aportan a la comprensión de las dinámicas que permiten o no la emergencia de la paz, en función de investigaciones teóricas y empíricas previas.

4.2 Aportes de los resultados para la paz

En general, con respecto a los tres experimentos realizados —i) comparación por grupos de países OCDE y no OCDE; ii) estrategias totalmente etnocentristas con respecto a la cooperación; y iii) eficiencias en el uso de recursos gracias a la tecnología—, se encuentra que:

La perspectiva de sostenibilidad de los recursos ambientales, y con ella, la de mantener las condiciones de vida digna de la humanidad, si bien ya se satisfacen en muchas regiones del mundo, no se puede hablar de una universalidad en su cubrimiento. Este depende, crucialmente, como plantea Valente (2005), de la tasa de aumento de recursos, que se puede interpretar como el efecto del ahorro de recursos y de tecnologías disponibles a medida que se desarrollan nuevos métodos de producción. Sin embargo, estas tecnologías deben estar alineadas hacia una sostenibilidad sistémica de lo contrario pueden generar el efecto rebote en el consumo de recursos ambientales.

En los casos que se podrían llamar exitosos, es decir, en los que la interacción de los tres sistemas no colapsa tempranamente, que corresponden al caso de países OCDE y al escenario en el que las tecnologías permiten la eficiencia en el consumo de recursos ambientales y de bienes ya procesados, se evalúan dos comportamientos en el sistema social: primero, cuando los individuos tienen la capacidad de percibir escasez y resultan encerrados en una estrategia no cooperativa. Un estudio reciente sobre el comportamiento humano en la era prehistórica, en California, encontró que la violencia en sus comunidades se explicaba por escasez de recursos ambientales y no por su organización política. Los hallazgos muestran que, en ambientes de baja productividad ambiental, fueron más frecuentes los actos violentos. Esto ayuda a comprender por qué la violencia surge en lugares específicos a lo largo de la historia humana (Allen *et al.*, 2016). Este hallazgo corrobora el dominio de la estrategia no cooperativa en el sistema social en un contexto de percepción escasez de recursos, pero no explica por qué continúa dominando, aunque los

recursos ambientales se encuentren en un estado de mayor abundancia. En ese sentido, Brauch (2016) plantea que, después de que se estabilizan las guerras, las personas todavía experimentan altos niveles de inseguridad física. Esta explicación coincide con lo observado en la simulación, en la que persiste la estrategia no cooperativa.

El segundo caso se refiere a cuando los individuos no cambian a una estrategia no cooperativa como consecuencia de la escasez de recursos. En este escenario, no se observa en las personas una estrategia que prevalezca en los contextos expuestos, como sí ocurre en el caso de las empresas. Sin embargo, para el caso en que domina la estrategia cooperativa en individuos, la población es mayor que cuando domina la estrategia no cooperativa en las personas, develando que una estrategia cooperativa contribuye a la supervivencia.

En las empresas, se observa el dominio de las estrategias cooperativas, ya sean esencialmente cooperativas o *tit-for-tat*. Esta emergencia permite sugerir que las empresas, al evaluar los beneficios que traen las estrategias cooperativas, entre las que se encuentran estrategias que aseguren recursos ambientales, pueden liderar las transformaciones necesarias para que trasciendan al nivel sociotécnico.

En esta senda de cooperación Beinhocker, en el Simposio de Otoño sobre Economía, en 2019, en el Santa Fe Institute, enfatizó en que la economía debe crear un orden imaginado, en el que se construya infraestructura en torno a la cooperación a gran escala y los mercados deben crear competencias evolutivas entre esas estructuras, pero sin desplazar dicha cooperación. El deber social de las empresas es resolver los problemas humanos (Arthur *et al.*, 2020), es decir, el cambio se debe dar en la medida en que los mecanismos de competencia de los mercados no socaven los mecanismos de cooperación necesarios en las empresas.

En ese sentido, es importante tener en cuenta que el mecanismo de adaptación puede incidir en el tipo de emergencia. En los casos en que el sistema logra cierta estabilidad, las estrategias cooperativas emergen en las empresas, pero no en todos los casos domina en los individuos, lo que puede estar influenciado por el mecanismo de cambio de estrategia. Las empresas cambian hacia aquella estrategia que genera mejores beneficios a las empresas cercanas, mientras que la estrategia de los individuos cambia en función de la

percepción que tienen sobre la escasez de recursos ambientales o al copiar la estrategia del vecino, porque este tiene alguna influencia sobre ellos, mas no al evaluar con cuál estrategia se acumulan mayores recursos para sí mismo, como sí lo hacen las empresas.

Resulta relevante reiterar que la estabilidad de la estrategia cooperativa, para el caso de las empresas, significa que las expectativas de los jugadores son estables y correctas, y suele darse cuando el comportamiento aparece en un grupo amplio de la población durante un largo periodo de tiempo. Esto crea el contexto para que las normas puedan surgir, extenderse y persistir en toda la población (Bicchieri, 1993). Estas normas son fundamentales para que trasciendan a instituciones formales y, por consiguiente, a un nivel de agregación más alto. Así, desde una perspectiva multinivel, las unidades, en un nivel, se combinan para producir unidades en el siguiente nivel superior (Arthur, 2015). Una vez establecida la estrategia cooperativa, de acuerdo con Axelrod (1984), los individuos empiezan a constituir estrategias discriminativas que los protegen de estrategias invasoras; el nivel de cooperación promedio tiende a aumentar y no a disminuir. Por tanto, la evolución de la cooperación propende por no devolverse. De ahí que el sistema evolucione como un todo y genere los efectos de esta evolución en niveles más altos de agregación.

Los recursos de cada actor se pueden aplicar con fines productivos, en cooperación, o con fines destructivos, como el uso de la fuerza en el conflicto. Las acciones colectivas pueden llevar a los agentes a ciclos de violencia o cooperación que se impongan a sí mismos. En este caso, esta forma autoorganizada de cooperación puede responder a estrategias para apalancar la paz. Como ya se ha mencionado, a partir de las investigaciones de Coleman (2020), en la medida en que sea mayor la tasa de reciprocidad positiva intergrupal sobre una tasa de reciprocidad negativa intergrupal, se puede llegar a que la paz sea un comportamiento estable. Esto significa que la implementación de gestos cooperativos, muy por encima de los gestos no cooperativos, puede llevar a que emerja la paz sustentable

Conclusiones

Para la comprensión de cómo la paz es afectada en un contexto de escasez de recursos ambientales, la mirada holística y sistémica de las ciencias de la complejidad aportan elementos epistemológicos y metodológicos para tener una mayor comprensión del fenómeno que resulta de la interacción de agentes heterogéneos. Desde un análisis *bottom-up* se puede ubicar en un punto privilegiado de alta agregación, no de los agentes, sino del sistema como un todo, para divisar emergencias que no se encuentran en los agentes individuales, ni en la agregación de un mismo tipo de agente sin participar del sistema. De esta forma, se logra entender los comportamientos que se dan en el bosque y no pueden ser explicados por el árbol, propios de los sistemas sociales que, como plantea de Coning (2020) son altamente dinámicos, no lineales y emergentes.

Se desarrolla una propuesta teórica para la paz, que conecta la importancia de dos niveles de selección en el meta sistema. El primer proceso de selección es individual y parte de la interacción de los agentes económicos y sociales desde una racionalidad de pensamiento inductivo, en un contexto del sistema ambiental. En caso de que prospere la estrategia cooperativa, se pueden generar estructuras autoorganizadas, como gobernanza adaptativa, inteligencia de enjambre, aprendizaje social u otra, de las cuales surjan nichos de innovación que puedan apalancar cambios en dirección a la sostenibilidad y que trasciendan al meso nivel sociotécnico; pero, para esto, deben estar débilmente conectados a la estructura dominante y bajo mecanismos de protección. Una vez en un nivel de agregación mayor, se da paso a un segundo proceso de selección, en este caso intergrupar, que favorece los comportamientos cooperativos que, al ser dominantes, dan cabida a la emergencia de una paz estable, que hace parte de uno de los componentes de la sostenibilidad que aquí se considera. Esta se asume como dinámica y, por tanto, puede modificarse de acuerdo a cómo cambia el sistema y, de esta manera, influenciar de nuevo la toma de decisiones de los agentes.

En la elaboración de este marco teórico, se hacen dos hallazgos teóricos importantes que, al conectarlos, tienen incidencia directa sobre comportamientos que favorecen la paz. El primero, es cómo la selección natural ocurre en dos niveles: individual e intergrupales (Wilson, 2016). En la selección intergrupales, Bowels y Gintis (2002) encontraron que este mecanismo de selección favorece los rasgos individuales beneficiosos para el grupo como un todo, lo que ha llevado las formas altruistas de socialidad humana hacia las no familiares o a estructuras institucionales a nivel de grupo, como el intercambio de recursos, que han surgido y se han difundido, repetidamente, en una amplia variedad. En ese sentido, Wilson (2016) sostiene que, una adaptación que beneficie al grupo como un todo puede evolucionar si la selección entre grupos es lo suficientemente fuerte frente a la oposición disruptiva dentro del grupo. Para que esto suceda, los grupos compuestos principalmente por cooperadores están en una selección ventajosa si se comparan con grupos de explotadores y no cooperadores. Por tanto, la selección intergrupales favorece los comportamientos prosociales (Wilson, 2016). De esta manera se conecta con el segundo hallazgo teórico, aportado por Coleman, para quien, en la medida en que la diferencia entre las reciprocidades positivas intergrupales sea mucho mayor con respecto a las negativas, la paz emerge como un comportamiento estable (Coleman *et al.*, 2020). De ahí que se proponga que, implementar mecanismos de selección intergrupales puede favorecer la emergencia de la paz duradera.

En ese mismo sentido, en los experimentos realizados a partir de la simulación de un modelo que representa la primera parte de la propuesta teórica descrita, es decir, la mecánica de selección individual desde la racionalidad inductiva de los agentes, en la que se conectan los sistemas económico, social y ambiental, se halló que: i) para el caso de países OCDE, prosperó la estrategia cooperativa tanto en empresas, como en individuos, cuando estos no contaban con percepción de escasez y, en este caso, el sistema logró un comportamiento estable por un tiempo mayor a 25 años. Esto no ocurre en el caso de la simulación global o de países no OCDE, en la que el sistema colapsa antes de los 5 años. Al contextualizar los países OCDE para 2018, en la escena global, se encuentra que estos hacen parte del grupo de los países pacíficos. Este comportamiento es un reflejo de la propuesta teórica; ii) en los escenarios en los que se observa que el sistema simulado logra estabilizarse (caso de países OCDE y bajo desarrollos tecnológicos que promueven la eficiencia de recursos ambientales), en las empresas prosperaron estrategias de orden

cooperativo. Esto quiere decir que, en aquellos sistemas ambientales perdurables emerge la estrategia cooperativa. Por tanto, se evidencia el vínculo entre sostenibilidad y cooperación, y por consiguiente, con la paz, en la medida en que comportamientos cooperativos dan paso a actitudes prosociales necesarias para su consolidación; iii) al comparar los resultados del sistema para cada experimento según los escenarios —cuando hay percepción de escasez por parte de los individuos y cuando no—, se halló que, para todos los casos, la población era mayor cuando los individuos no percibían escasez y asumían una estrategia diferente a la no cooperativa; por tanto, incluso en condiciones en que se consideran los recursos ambientales como escasos, la estrategia no cooperativa no es la que representa mayores beneficios; iv) al promover el comportamiento cooperativo en todo el sistema, a partir de la estrategia etnocentrista —cooperativo compra solo a cooperativo—cuando el tamaño de este grupo no es mucho mayor a otros grupos que representen una estrategia en el sistema, resulta ser una estrategia ineficiente; v) en caso de que los individuos tengan la habilidad de percibir escasez y, por consiguiente, de actuar de manera no cooperativa, este comportamiento resulta difícil de cambiar y la estructura de autoorganización, a nivel de individuo es insuficiente para revertir este comportamiento; por tanto, puede ser necesaria la intervención de mecanismos exógenos al sistema aquí evaluado.

El énfasis del manejo de la sostenibilidad puede cambiar de uno en que los mecanismos de competencia del mercado no socaven la cooperación, a uno en que los mecanismos de competencia del mercado promuevan la cooperación y se encamine a la sostenibilidad, trayendo consigo paz como emergencia.

El aporte teórico y la herramienta de simulación desarrolladas en este trabajo son elementos que abren la posibilidad de cuestionarse la paz desde nuevas perspectivas, en la búsqueda de caminos que lleven a acercar los componentes de sostenibilidad planteados por Fisher y Rucki (2017), esto es, desarrollo económico, funcionamiento del ecosistema y paz, al objetivo de justicia social y bienestar humano.

Para futuras investigaciones, se sugiere continuar este análisis a partir de la modelación en un nivel más alto de selección, como el intergrupala, lo que permitiría indagar bajo qué condiciones los sistemas evolucionan como un todo y si esta evolución se puede traducir en diseminación de comportamientos pacíficos donde no los hay, continuando con una

mecánica de autoorganización o coevolutiva con los Estados o instituciones formales, que podrían fomentar estos comportamientos intergrupales.

A. Anexo. Condiciones iniciales y parámetros del modelo

Tabla A 1: Condiciones iniciales y parámetros del modelo

Parámetros	Monto	Explicación	Fuente
No per	762	Número de personas. Para 2017, 7620 millones	(York University Ecological Footprint Initiative & Global
Relación número de personas / compañías	0.0375	No. de empresas de acuerdo al número de personas	(Bolddata, 2022)
Matriz de pagos			
c-c	0	La relación de los valores se explicó en la tabla 3 1	
d-c	0		
c-d	-0.4		
d-d	-0.7		
Inc-environmental-resource	1.00	1 Representa la renovación natural de los recursos planetarios	
expectation-age-com	200.00	Se deja 200 (valor alto) para no limitar la vida por las empresas al tiempo de existencia	
expectation-age-peo	72.00	Promedio expectativa de vida	(York University Ecological Footprint Initiative & Global Footprint Network, 2022)
Initial-resources-com	297.00	Valor aleatorio que oscila en un rango entre lo mínimo necesario para vivir y 4.5 veces este valor, describiendo de esta forma la inequidad. (Minimum-life-peo + un valor aleatorio entre cero y el valor aleatorio dado) $\text{Consume-tick-com} \times 4.5$	
initial-resources-peo	12.33	Valor aleatorio que oscila en un rango entre lo mínimo necesario para vivir y 4.5 veces este valor, describiendo de esta forma la inequidad. (minimum-life-peo + un valor aleatorio entre cero y el valor aleatorio dado) $\text{Consume-tick-peo} \times 4.5$	
initial-resources-path	1.00	Con un valor de 1 la suma de todas las parcelas es de 1225 que representa los 12,1 mil millones de hectáreas biológicamente productivas. (biocapacidad)	
consume-tick-com	66.00	El total de hectáreas requeridas por la humanidad, dividido entre el número de empresas mundiales	
consume-tick-peo	2.74	La demanda de biocapacidad por persona	(York University Ecological Footprint Initiative & Global Footprint Network, 2022), (Bolddata, 2022)
%-tick-coop-peo	0.80	% consumo de recursos personas cooperativas	
%consume-tick-average-peo	0.90	% consumo de recursos personas <i>tít-for-tat</i> & etnocentristas	
%consume-tick-non-coop-peo	1.10	% consumo de recursos personas no-cooperativas	
radius-influence-com	20.00	Radio de alcance para tomar recursos ambientales por parte de las empresas	
radius-influence-peo	1.00	Radio en que las personas pueden ser influenciadas por otras personas	

Parámetros	Monto	Explicación	Fuente
%resources-taken-coop-com	0.80	% de recursos tomados del ambiente por parte de las empresas con estrategia cooperativa en el radio en el que tienen influencia	
%resources-taken-average-com	0.90	% de recursos tomados del ambiente por parte de las empresas con estrategia tit-for-tat y etnocéntrica en el radio en el que tienen influencia	
%resources-taken-non-coop-com	1.00	% de recursos tomados del ambiente por parte de las empresas con estrategia no-cooperativa en el radio en el que tienen influencia	
shortage-threshold-peo	0.50	Se estima que para que se cumplan los recursos de los seres humanos cada parcela debe tener como mínimo un valor de 1. Alrededor de una persona se contabiliza una parcela cuando el radio de influencia es uno	
%change-peo	51.00	% en que cambiaría una persona de estrategia	
threshold-reproduction-com	105.60	Recursos para crear una nueva empresa. Lo que consume cada empresa más el mínimo para que sobreviva una empresa (consume-tick-com + minimum-life-com)	
threshold-reproduction-peo	4.38	Recursos para tener un nuevo hijo. Lo que consume cada persona + el mínimo que se requiere para que sobreviva una persona (consume-tick-peo + minimum-life-peo)	
age-birth-com	1.00	Edad a partir de la cual se reproduce una empresa.	
age-birth-peo	28.00	Edad a partir de la cual en promedio las mujeres tienen su primer hijo en el mundo	(World Population Review, 2022)
num-average-child-com	100.00	Es un valor grande, para que crecimiento del número de las empresas no sea restringido	
num-average-child-peo	2.00	El promedio es 2.3 por mujer, luego por persona es de 1.15. Pero en Netlogo se escribe 2, ya que los valores random tomados serían 0 ó 1	
reproduction-resources-com	39.60	Costo de reproducción. 60% del consumo regular requerido	
reproduction-resources-peo	1.64	Costo de reproducción. 60% del consumo regular requerido	
%mutation-peo	2.00	% en el que se puede adoptar una persona una estrategia diferente a la progenitora	
%mutatio-com	2.00	% en el que se puede adoptar una empresa una estrategia diferente al progenitor	
minimum-life-com	39.60	Recursos mínimos para permanecer. 60% del recurso promedio requerido	
minimum-life-peo	1.64	Recursos mínimos para permanecer. 60% del recurso promedio requerido	
% heritage-com	0.70	% de los recursos que se heredan	
% heritage-peo	0.70	% de los recursos que se heredan	

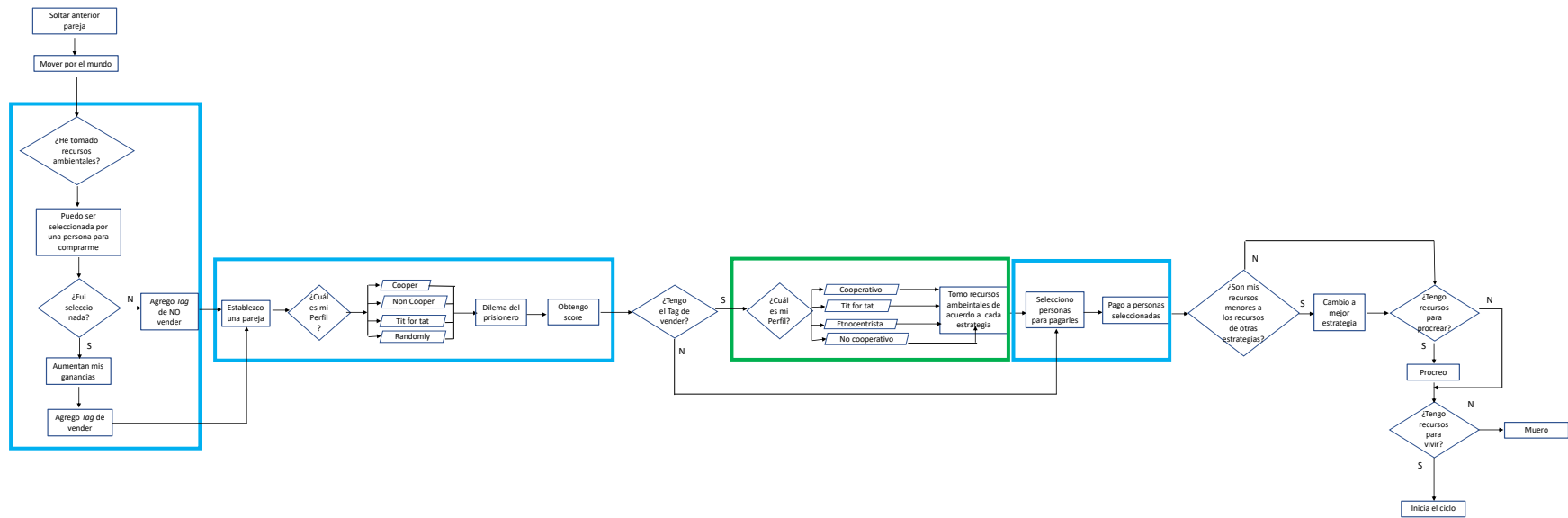
Fuente: elaboración propia.

B. Anexo. Procesos de los agentes

A continuación, se presentan los diagramas de flujo para cada tipo de agente. En estos, se representan los procesos ejecutados en cada ciclo.

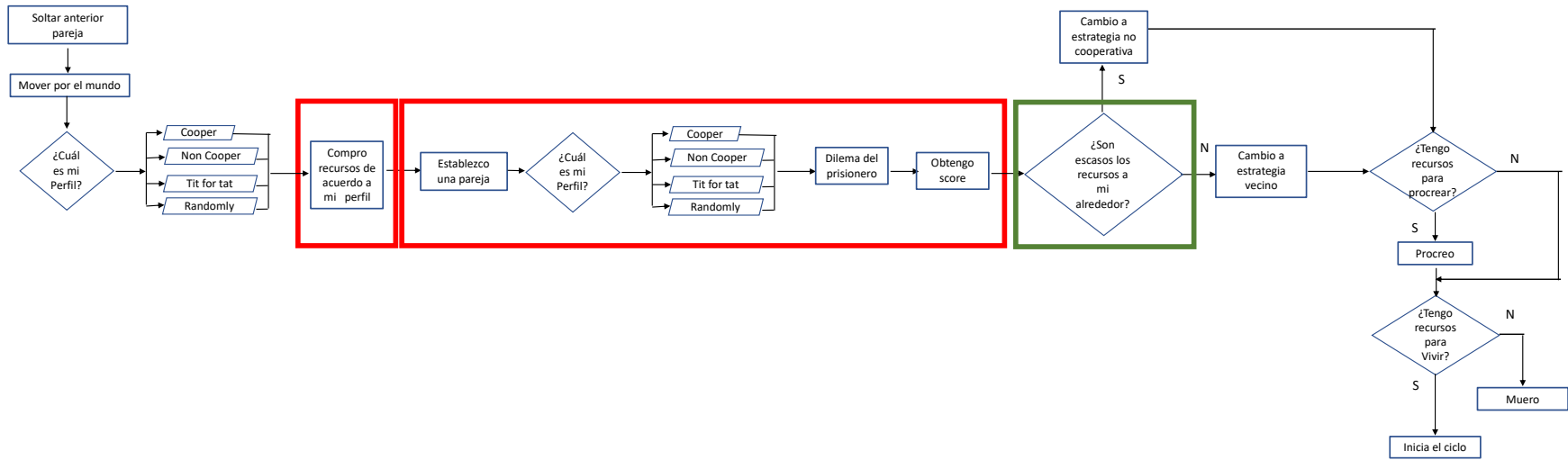
Para cada tipo de agente, se señala, a través de recuadros, cuándo este interactúa con otros sistemas. Los recuadros rojos representan el sistema económico; los azules, el social; y los verdes, el ambiental.

Figura B-1: Diagrama de flujo de las empresas



Fuente: elaboración propia.

Figura B-2: Diagrama de flujo de los individuos



Fuente: elaboración propia.

C. Anexo. Dinámica del modelo

El modelo comienza por determinar el número de personas (N-peo) y, de allí, se generan las empresas a partir de una razón de cuántas personas y empresas hay en el planeta. Además se establecen las condiciones iniciales, que son recursos iniciales con los que inician los agentes, que corresponden a un valor aleatorio en el rango entre el mínimo requerido para vivir (empresas: *minimum-life-com* & personas: *minimum-life-peo*) más un valor aleatorio de recursos iniciales (empresas: *initial-resources-com* & personas: *initial-resources-peo*). También, se considera el promedio de recursos consumidos por las empresas en un *tick* (año) (*consume-tick-com*) y el de las personas (*consume-tick-peo*). El total de las parcelas representa el total de todos los recursos disponibles en el planeta, cuyo valor está dado (*Inc-enviaromental-resources*). En función de este parámetro, crecen los recursos ambientales, que son renovables anualmente.

Este modelo considera que hay agentes económicos y sociales heterogéneos, que desempeñan cualquiera de cuatro tipos de estrategia: cooperativo (siempre coopera), no cooperativo (nunca coopera), etnocentrista (coopera solo con los similares), *tit-for-tat* (inicia cooperando y responde al replicar la última jugada de su opositor).

Las empresas representan el sistema económico; las personas, el sistema social; y las parcelas, el ambiental. Para modelar las relaciones económicas, cada persona, de acuerdo con su estrategia, selecciona una empresa que haya tomado recursos del sistema ambiental y le asigna unos recursos, que equivalen a las compras necesarias para su subsistencia durante un *tick* (año). Esta cantidad de recursos demandados está dada de acuerdo con la estrategia que desempeña cada persona: si es cooperativo, demanda un porcentaje austero del promedio de recursos (*%consume-tick-coop-peo*); por el contrario, si es no cooperativo, demanda un porcentaje mayor que el promedio (*%consume-tick-non-coop-peo*) y, si es *tit-for-tat* o etnocentrista, demanda un porcentaje que se ajusta al

promedio de recursos (*%consume-average-peo*). La empresa seleccionada para transferirle estos recursos (comprarle) recibe la etiqueta de qué ha vendido.

Solo las empresas que han vendido pueden tomar recursos del sistema ambiental. La cantidad de recursos que se toma depende de la estrategia que desempeña cada empresa. Si es cooperadora, toma un porcentaje austero de los recursos (*%resources-taken-coop-com*); si no es cooperadora, toma una cantidad mayor (*%resources-taken-non-coop-com*); si es *tit-for-tat* o etnocentrista, toma un porcentaje entre la empresa cooperativa y no cooperativa de los recursos (*%resources-taken-average-com*).

Por su parte, las empresas entregan recursos a los individuos (que pueden ser salarios o dividendos), equivalentes a lo que requieren para su funcionamiento (*consume-tick-com*), dividido entre el número de personas sobre las que tendría influencia la empresa (esto es, una razón entre la población y el número de empresas en el sistema para cada año), a lo que se suma un valor aleatorio, sujeto a la cantidad de recursos que posee cada empresa. Así, no todos los individuos reciben la misma cantidad de recursos.

Durante esta dinámica, las empresas y las personas están sujetas a dilemas ambientales por los recursos, de los que no obtienen ganancias, pero sí se pueden ver enfrentadas a pérdidas. Estos dilemas son dirimidos a través del dilema del prisionero en el que los pagos están dados por la matriz manipulable por el observador (C-C); (C-D); (D-D); (D-C). De acuerdo con la estrategia que siga cada individuo, se harán los pagos (*score*) que, en el mejor de los casos, no representan alguna pérdida.

Las empresas evalúan cuál estrategia, seguida por las empresas que se encuentran a su alrededor (*radius-influence-com*), es la que genera mayores recursos y, si no es la estrategia que ya está implementando, se cambia a ella.

Por su parte, las personas cuentan con dos mecanismos de adaptación. En un primer momento, perciben si hay escasez en los recursos ambientales a su alrededor (*radius-influence-peo*). Si perciben que los recursos se encuentran por debajo del umbral (*\$shortage-threshold-peo*), adoptan una estrategia no cooperativa; pero si se supera el umbral, las personas, con cierta probabilidad (*%change-peo*), pueden cambiar a cualquier

estrategia que siguen las personas que las rodean. Es decir, son permeables a cambios provenientes del comportamiento de otros, como los cambios culturales. Esto implica que, si están rodeados de personas que tienen la misma estrategia entre ellos, habrá una mayor propensión a copiar la estrategia de las otras personas que los rodean.

Tanto las personas, como las empresas, evalúan su nivel de recursos propios. Si supera cierto umbral (empresas: *threshold-reproduction-com* & personas: *threshold-reproduction-peo*), pueden generar otra entidad, además de cumplir con la edad requerida para procrear (empresas: *age-birth-com* & personas: *age-birth-peo*), y sujeto a que no excedan la cantidad de nuevos descendientes que pueden procrear (empresas: *num-average-child-com* & personas: *num-average-child-peo*). Estas nuevas entidades, cuentan con un porcentaje de los recursos de su progenitora (empresa: *%heritage-com* & persona: *%heritage-peo*) y existe una probabilidad de mutación de esta nueva generación, que consiste en seguir cualquiera de las cuatro estrategias y no, específicamente, la de la progenitora. El porcentaje de mutación está dada por (empresas: *%mutation-com* & personas: *%mutation-peo*). A la entidad progenitora, se le descuenta un costo por nacimiento (empresa: *reproduction-resources-com* & personas: *reproduction-resources-peo*). Ahora bien, si los recursos del agente se encuentran por debajo de un umbral (empresas: *minimum-life-com* & personas: *minimum-life-peo*), los agentes desaparecen. Además, también desaparecen al evaluar su edad con respecto al umbral de vida (empresas: *expectation-age-com* & personas: *expectation-age-peo*). De continuar vivo, reinicia el ciclo.

D. Anexo. Repositorios de modelos y código

Los modelos en NetLogo usados para este trabajo se pueden consultar en:

https://drive.google.com/drive/folders/1yFt4SonAlhTWY0J99CXeYs-6hrb442Qk?usp=share_link

Código modelo general

```
globals
[
;; number of companies
num-com
num-total-com

num-coop-com
num-non-coop-com
num-tit-for-tat-com
num-ethnocentrism-com

;; number of people
num-peo
num-total-peo

num-coop-peo
num-non-coop-peo
num-tit-for-tat-peo
num-ethnocentrism-peo

%peo-coop
%peo-non-coop
%peo-tit-for-tat
%peo-ethnocentrism

;Total Resources
total-initial-resources
total-resources
%resources-Vs-initial

;Total supply and consume
total-supply-com
```

total-demand-peo

;rate companies -people
num-total-com-peo
]

breed [companies company]
breed [people person]

turtles-own [
score ; my current score.
strategy
defect-now? ; what will i do this round?
partner-defected? ; did my partner defect last round?
partner ; Who of partner. (Nobody if not partnered)
partnered? ; am I a partner?
i-defected? ; do I defected last round?
strategy-list; a list containing information about past interactions

; For reproduction of agents..
memory-partners
memory-partnermove
memory-ownmove

; Companies strategies score
score-coop-com-near
score-non-coop-com-near
score-tit-for-tat-com-near
score-ethnocentrism-com-near
score-best-strategy-near
resources-amount-radius-near

; People
num-coop-peo-near
num-non-coop-peo-near
num-tit-for-tat-peo-near
num-ethnocentrism-peo-near
trend-people-near
]

companies-own
[
earnings-t0-com
earnings-taken-com
total-earnings-com
age-com
num-child-com
sell-com?
taken-resources-com?
]

people-own
[
earnings-t0-peo

```

total-earnings-peo;
age-peo
num-child-peo
received-from-com
buy-peo?
]

patches-own
[
resources-amount ;; resources amount in each patches
resources-to ;; aux variable to count resources taken
]

.....
;;;Setup Procedures;;;
.....
;;;;;;;;;;;;;;;;

to setup
clear-all
setup-turtles ;;setup the turtles and distribute them randomly
setup-patches
reset-ticks
end

;;SETUP TURTLES
;=====

to setup-turtles
make-people ;; create the appropriate number of turtles playing each strategy
store-initial-peo
make-companies ;;create the appropriate number of turtles playing each strategy
common-variables-com
store-initial-com
setup-common-variables ;;sets the variables that all turtles share

end

to make-people ;; create the appropriate number of people playing each strategy
create-people n-peo
[set shape "person"
set size 1.3
set earnings-t0-peo minimum-life-peo + random-float initial-resources-peo ;;randomly initial
resources in the range [ minimum-life-peo + random value btw (0 and initial-resource-peo)].
set total-earnings-peo earnings-t0-peo
set strategy-list ["coop" "non-coop" "tit-for-tat" "ethnocentrism"]
set strategy one-of strategy-list ;; "one-of" take one from the list in this case randomly
if strategy = "coop" [set color blue ]
if strategy = "non-coop" [set color red ]
if strategy = "tit-for-tat" [set color pink ]
if strategy = "ethnocentrism" [set color grey ]
set num-child-peo random num-average-child-peo ; The average childs by person is 1.17. Here
num-average-child-peo is 2, because randomly just take 0 or 1
set age-peo random expectation-age-peo
set received-from-com false
set buy-peo? false

```

```
]
end
```

```
to store-initial-peo
  set num-peo n-peo
  set num-coop-peo count people with [ strategy = "coop"]
  set num-non-coop-peo count people with [ strategy = "non-coop"]
  set num-tit-for-tat-peo count people with [ strategy = "tit-for-tat"]
  set num-ethnocentrism-peo count people with [ strategy = "ethnocentrism"]
  set %peo-coop num-coop-peo / n-peo
  set %peo-non-coop num-non-coop-peo / n-peo
  set %peo-tit-for-tat num-tit-for-tat-peo / n-peo
  set %peo-ethnocentrism num-ethnocentrism-peo / n-peo
end
```

to make-companies ;; create the appropriate number of companies playing each strategy. For each 1000 people there is a company

```
create-companies num-com/num-peo * n-peo * %peo-coop
[ set shape "pentagon"
  set size 1.3
  set strategy "coop"
  set color blue ]
```

```
create-companies num-com/num-peo * n-peo * %peo-non-coop
[ set shape "pentagon"
  set size 1.3
  set strategy "non-coop"
  set color red]
```

```
create-companies num-com/num-peo * n-peo * %peo-tit-for-tat
[ set shape "pentagon"
  set size 1.3
  set strategy "tit-for-tat"
  set color pink]
```

```
create-companies num-com/num-peo * n-peo * %peo-ethnocentrism
[ set shape "pentagon"
  set size 1.3
  set strategy "ethnocentrism"
  set color grey ]
end
```

```
to common-variables-com
ask companies[
  set score-coop-com-near 0
  set score-non-coop-com-near 0
  set score-tit-for-tat-com-near 0
  set score-ethnocentrism-com-near 0
  set score-best-strategy-near 0
  set earnings-t0-com minimum-life-com + random-float initial-resources-com ;; randomly initial
  resources in the range [ minimum-life-com + random value btw (0 and initial-resource-com)].
```

```
set age-com random expectation-age-com
set num-child-com random num-average-child-com
set strategy-list ["coop" "non-coop" "tit-for-tat" "ethnocentrism"]
```

```

set sell-com? true
set num-child-com random num-average-child-com
set taken-resources-com? true
]
end

to store-initial-com
  set num-coop-com count companies with [ strategy = "coop"]
  set num-non-coop-com count companies with [ strategy = "non-coop"]
  set num-tit-for-tat-com count companies with [ strategy = "tit-for-tat"]
  set num-ethnocentrism-com count companies with [ strategy = "ethnocentrism"]
  set num-com count companies
end

to setup-common-variables
  ask turtles [
    setxy random-xcor random-ycor
    set score 0
    set partnered? false
    set partner nobody
    set partner-defected? false
    set l-defected? false
  ]
  setup-memory;; initialize Partner-history list in all turtles
end

to setup-memory
  let default-memory [] ;;initialize the DEFAULT-HISTORY variable to be a list. ;;give each turtle a
  copy of this list for tracking partner histories
  ask turtles [
    set memory-partners default-memory
    set memory-partnermove default-memory]
  ask turtles [ set memory-ownmove default-memory ]
end

; SETUP PATCHES
;=====
to setup-patches
  ask patches [ set resources-amount initial-resources-patch]
  ask patches [set total-initial-resources sum [resources-amount] of patches]
  ask patches [
    set pcolor (ifelse-value

      resources-amount < 0 [ black ]
      resources-amount = 0 [ 38 ]
      resources-amount > 0 and resources-amount <= 1 [ 49 ]
      resources-amount > 1 and resources-amount <= 2 [ 58 ]
      resources-amount > 2 and resources-amount <= 3 [ 67 ]
      resources-amount > 3 and resources-amount <= 4 [ 65 ]
      [ 73 ]
    )
  ]
end

.....
;,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,

```

```
;;Runtime Procedures;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;
```

```
to go
  clear-last-round
  ask patches [adjust-patches]
  ask people [consume]
  ask turtles [ partner-up ]           ;;have turtles try to find a partnerlet partnered-turtles turtles
  with [ partnered? ]
  let partnered-turtles turtles with [partnered?]
  ask partnered-turtles [ select-action ]      ;;all partnered turtles select action
  ask partnered-turtles [ play-a-round ]
  ask companies [take-resources-companies ]
  ask companies [spend]
  ask companies [change-com-to-best-option]
  ask people [Change-strategy-peo]
  ask companies [birth-die-com]
  ask people [birth-die-peo]
  do-scoring
  tick
end
```

```
;;Clear last round
;;=====
```

```
to clear-last-round
let partnered-turtles turtles with [ partnered? ]
ask partnered-turtles [ release-partners ]
ask companies [set sell-com? false ]
ask people [ set buy-peo? false
  set received-from-com false ]
end
```

```
To release-partners ; release partner and turn around to leave
set partnered? false
set partner nobody
rt 180
end
```

```
to adjust-patches
set resources-to 0
set resources-amount (resources-amount + Inc-enviromental-resources ) ;; Resources are
renewable. They grow up again between 0 and variable (Inc-Ecological-resources).
set resources-amount
( ifelse-value
  resources-amount < 0 [0] ;;
  resources-amount > 4 [4] ;;
  [resources-amount]
)
```

```
;; Patches are colored according their level
```

```
set pcolor (ifelse-value
resources-amount < 0 [ black ]
resources-amount = 0 [ 38 ]
```



```

resources-amount > 0 and resources-amount <= 1 [ 49 ]
resources-amount > 1 and resources-amount <= 2 [ 58 ]
resources-amount > 2 and resources-amount <= 3 [ 67 ]
resources-amount > 3 and resources-amount <= 4 [ 65 ]
[ 73 ])
end

```

to consume ; People consume according their strategy. In case it does not have enough resources for the average consume, spend all the resources.

```

ifelse any? companies
[
  if strategy = "coop"
  [
    ifelse (total-earnings-peo >= consume-tick-peo * %consume-tick-coop-peo )
    [
      ifelse any? companies with [ taken-resources-com? = true]
      [
        ask one-of companies with [ taken-resources-com? = true]
        [set total-earnings-com total-earnings-com + (consume-tick-peo * %consume-tick-coop-peo)
        set sell-com? true]
        set total-earnings-peo total-earnings-peo - (consume-tick-peo * %consume-tick-coop-peo)
        set buy-peo? true
      ]
      [ ask companies [ set sell-com? false]
      set buy-peo? false ]
    ]
  ]
  [
    ifelse any? companies with [ taken-resources-com? = true]

    [ ask one-of companies with [ taken-resources-com? = true]

    [set total-earnings-com total-earnings-com + [total-earnings-peo] of myself
    set sell-com? true]

    set total-earnings-peo total-earnings-peo - total-earnings-peo
    set buy-peo? true
  ]
  [ ask companies [ set sell-com? false]
  set buy-peo? false ]
]
]
if strategy = "non-coop"
[
  ifelse (total-earnings-peo >= consume-tick-peo * %consume-tick-non-coop-peo )
  [
    ifelse any? companies with [ taken-resources-com? = true]
    [
      ask one-of companies with [ taken-resources-com? = true]
      [set total-earnings-com total-earnings-com + (consume-tick-peo * %consume-tick-non-coop-peo)
      set sell-com? true]
      set total-earnings-peo total-earnings-peo - (consume-tick-peo * %consume-tick-non-coop-peo)
      set buy-peo? true
    ]
  ]
]

```

```

    [ ask companies [ set sell-com? false]
      set buy-peo? false ]
  ]

  [
    ifelse any? companies with [ taken-resources-com? = true]
  [ ask one-of companies with [ taken-resources-com? = true]
[set total-earnings-com total-earnings-com + [total-earnings-peo] of myself
  set sell-com? true]

    set total-earnings-peo total-earnings-peo - total-earnings-peo
    set buy-peo? true
  ]
  [ ask companies [ set sell-com? false]
    set buy-peo? false ]
  ]
]
if (strategy = "ethnocentrism") or (strategy = "tit-for-tat")
[
  ifelse (total-earnings-peo >= consume-tick-peo * %consume-tick-average-peo )
  [
    ifelse any? companies with [ taken-resources-com? = true]
    [
      ask one-of companies with [ taken-resources-com? = true]
      [set total-earnings-com total-earnings-com + (consume-tick-peo * %consume-tick-average-
peo)
set sell-com? true]
      set total-earnings-peo total-earnings-peo - (consume-tick-peo * %consume-tick-average-peo)
set buy-peo? true
    ]
    [ ask companies [ set sell-com? false]
      set buy-peo? false ]
  ]
]

[
  ifelse any? companies with [ taken-resources-com? = true]

    [ ask one-of companies with [ taken-resources-com? = true]

[set total-earnings-com total-earnings-com + [total-earnings-peo] of myself
  set sell-com? true]

    set total-earnings-peo total-earnings-peo - total-earnings-peo
    set buy-peo? true
  ]
  [ ask companies [ set sell-com? false]
    set buy-peo? false ]
  ]
]

[
  if strategy = "coop" [set total-earnings-peo total-earnings-peo - (consume-tick-peo * %consume-
tick-coop-peo)]
  if strategy = "non-coop" [set total-earnings-peo total-earnings-peo - (consume-tick-peo *
%consume-tick-non-coop-peo)]
]

```

```

    if (strategy = "tit-for-tat") or (strategy = "ethnocentrism")[set total-earnings-peo total-earnings-peo -
(consume-tick-peo * %consume-tick-average-peo)]
  ]
end

```

```

;;Partner up
;;=====
;;Turtles try to find a partner
;;Since other turtles that have already executed partner-up may have
;;caused the turtle executing partner-up to be partnered,
;;a check is needed to make sure the calling turtle isn't partnered.

```

```
to partner-up ;; turtle procedure
```

```

  rt (random-float 90 - random-float 90) fd 1
  if any? other turtles in-radius 1
  [
    ;;move around randomly
    set partner one-of other (turtles in-radius 1 ) ;with [ not partnered?]

    set partnered? true
    set heading 270           ;;face partner
    ask partner [
      set partnered? true
      set partner myself
      set heading 90
    ]
  ]
end

```

```

;;Select-action
;;=====

```

```

to select-action ;; turtle procedure. Select an action based upon the strategy being playing
  if strategy = "coop" [coop]
  if strategy = "non-coop" [non-coop]
  if strategy = "tit-for-tat" [tit-for-tat]
  if strategy = "ethnocentrism" [ethnocentrism]
end

```

```

;;Strategies
;;=====

```

```

to coop
  set defect-now? false
end

```

```

to non-coop
  set defect-now? true
end

```

```
to tit-for-tat
```

```
ifelse member? [who] of partner memory-partners [
```

```

    set partner-defected? item (position [who] of partner memory-partners) memory-partnermove
  ifelse (partner-defected?) [
    set defect-now? true
  ] [
    set defect-now? false
  ]
  [set defect-now? false]
end

```

```

to ethnocentrism
  ask partner
  [ ifelse strategy = [ strategy ] of myself
    [ ask myself
      [set defect-now? false]
    ]
  ]
  [ask myself
    [set defect-now? true]
  ]
]
end

```

```

;;Play a round
;;=====

```

```

to play-a-round ;; turtle procedure
  get-pay-off ;; calculates the payoff of this round

end

```

```

To get-pay-off ; Calculate the payoff for this round and display a label with that payoff
  set partner-defected? [defect-now?] of partner

```

```

  set i-defected? defect-now?
  set memory-partnermove (fput partner-defected? memory-partnermove)

```

```

  set memory-partners (fput [who] of partner memory-partners)

```

```

  set memory-ownmove (fput i-defected? memory-ownmove)

```

```

  ifelse partner-defected?
  [
    ifelse defect-now?
      [set score (D-D) set label D-D]
      [set score (C-D) set label C-D]
  ]
  [
    ifelse defect-now?
      [set score (D-C) set label D-C]
      [set score (C-C) set label C-C]
  ]
]

```

```

  ifelse breed = companies
  [set total-earnings-com total-earnings-com + score]
  [set total-earnings-peo total-earnings-peo + score]

```

end

; Take resources companies ; Resources are taken for companies just, those who have already made sales

; =====

; The reference as minimum for earning-take-com to be allow to sell to people y next run, is according with the most consuming people strategy (non-coop-peo). Companies have to take enough resources to

; meet needs from their natural demand (People around)

To take-resources-companies ;; Here companies consume resources, and amount of resources depend of type of strategy. Coop behaviour consume: %resources-taken-coop-com; non-coop behaviour consume: %resources-taken-non-coop-com

set taken-resources-com? false

;set earnings-taken-com (earnings-taken-com - earnings-taken-com)

ifelse (sell-com?) ; and (total-earnings-com > minimum-life-com); Here if no sell die, because even if has enough resources to buy to another company resources, this is not available in this model. You can no buy resources from other company, Just need take them by themself

[

if strategy = "coop" ; Always cooperate and just take %resources-taken-coop-com

[ask patches in-radius radius-influence-com; Always no cooperate and take %resources-taken-non-coop-com

[

set resources-to (resources-amount * %resources-taken-coop-com);

set resources-amount (resources-amount - resources-to)

]

set earnings-taken-com (sum [resources-to] of patches in-radius radius-influence-com)

set total-earnings-com (total-earnings-com + earnings-taken-com)

if (earnings-taken-com) > (consume-tick-peo * count people / count companies)

[set taken-resources-com? true]

]

if strategy = "non-coop"

[

ask patches in-radius radius-influence-com

[

set resources-to (resources-amount * %resources-taken-non-coop-com)

set resources-amount (resources-amount - resources-to)

]

set earnings-taken-com (sum [resources-to] of patches in-radius radius-influence-com)

set total-earnings-com (total-earnings-com + earnings-taken-com)

if (earnings-taken-com) > (consume-tick-peo * count people / count companies)

[set taken-resources-com? true]

]

if (strategy = "tit-for-tat") or (strategy = "ethnocentrism")

[

ask patches in-radius radius-influence-com ; As partner cooperate. Strategye becomes cooperative

[

set resources-to (resources-amount * %resources-taken-average-com)

set resources-amount (resources-amount - resources-to)

```

]
  set earnings-taken-com (sum [ resources-to ] of patches in-radius radius-influence-com)
  set total-earnings-com (total-earnings-com + earnings-taken-com)
  if (earnings-taken-com) > (consume-tick-peo * count people / count companies )
  [set taken-resources-com? true]
]
]
[ die]

end

;; Spend
;; ===== Companies spend at least ( consume-tick-com ) + random level of the total earnings
minus cosume-tick-com

to spend

  ifelse any? people
  [
    ask n-of (count people / count companies ) people [set total-earnings-peo total-earnings-peo +
    ((consume-tick-com + random ([total-earnings-com] of myself - consume-tick-com)) / (count people
    / count companies ) )
    set received-from-com true]
    set total-earnings-com total-earnings-com - (consume-tick-com + random total-earnings-com )
  ]
  [die]
end

;; Adaptation companies to best option ; Company compares its total-earnings-com with strategies
of surronding (radius-influence-com) companies. Closer companies become reference
;=====
to change-com-to-best-option

  if any? other companies in-radius radius-influence-com with [strategy = "coop" ][set score-coop-
  com-near (sum ([total-earnings-com] of other companies in-radius radius-influence-com with [
  strategy = "coop"]) / count other companies in-radius radius-influence-com with [strategy = "coop"])]
  if any? other companies in-radius radius-influence-com with [strategy = "non-coop" ][set score-non-
  coop-com-near (sum ([total-earnings-com] of other companies in-radius radius-influence-com with [
  strategy = "non-coop"]) / count other companies in-radius radius-influence-com with [strategy = "non-
  coop"])]
  if any? other companies in-radius radius-influence-com with [strategy = "tit-for-tat" ][set score-tit-for-
  tat-com-near (sum ([total-earnings-com] of other companies in-radius radius-influence-com with [
  strategy = "tit-for-tat"]) / count other companies in-radius radius-influence-com with [strategy = "tit-
  for-tat"])]
  if any? other companies in-radius radius-influence-com with [strategy = "ethnocentrism"]][set score-
  ethnocentrism-com-near (sum ([total-earnings-com] of other companies in-radius radius-influence-
  com with [ strategy = "ethnocentrism"]) / count other companies in-radius radius-influence-com with
  [strategy = "ethnocentrism"])]

  if any? other companies in-radius radius-influence-com [
    let score-com-strategies-near (list(score-coop-com-near) (score-non-coop-com-near)(score-tit-for-
    tat-com-near)(score-ethnocentrism-com-near))
    set score-best-strategy-near max (score-com-strategies-near)
    if total-earnings-com < score-best-strategy-near
    [

```

```

if score-coop-com-near = score-best-strategy-near [set strategy "coop" set color blue]
if score-non-coop-com-near = score-best-strategy-near [set strategy "non-coop" set color red]
if score-tit-for-tat-com-near = score-best-strategy-near [set strategy "tit-for-tat" set color pink]
if score-ethnocentrism-com-near = score-best-strategy-near [set strategy "ethnocentrism" set color
grey]
]
]
end

```

```

; Adaptation people ; Here people first check how the amount of resources are, if those are critical,
they become no-coop. In other case, with a probability they change to neighborhood strategy
; =====

```

```

to Change-strategy-peo

```

```

set resources-amount-radius-near sum [resources-amount] of patches in-radius radius-influence-
peo; radius-influence-peo is distance between person and patch u other turtles that can affect its
decisions
ifelse resources-amount-radius-near < Shortage-threshold-peo ; Shortage-threshold-peo is
threshold under people fell shortage and become to behave non-coop
[set strategy "non-coop" set color red]

```

```

[if Random-float 100 < %change-peo ; %change-people is the random % between 0 and the this %,
that people can decide change their currently strategy for another of near person.

```

```

[
set strategy [strategy] of one-of people in-radius radius-influence-peo
if strategy = "coop" [ set color blue ]
if strategy = "non-coop" [ set color red ]
if strategy = "tit-for-tat" [ set color pink ]
if strategy = "ethnocentrism" [ set color grey ]
]
]
end

```

```

; Birth, die companies
; =====

```

```

to birth-die-com

```

```

if (age-com > age-birth-com) and (total-earnings-com > Threshold-reproduction-com)
[
hatch-companies 1
[
set score 0
set memory-partners []
set memory-partnermove []
set memory-ownmove []
set partnered? false
set partner nobody
set partner-defected? false
set i-defected? false
set num-child-com 0
set sell-com? true
set taken-resources-com? true
set age-com 0
set total-earnings-com total-earnings-com * %heritage-com

```

```

    if Random-float 100 < %mutation-com ; a chance for mutation
    [set strategy one-of strategy-list]
    ]
    set total-earnings-com total-earnings-com - reproduction-resources-com
    set num-child-com num-child-com + 1
    ]
    set age-com age-com + 1
    if (total-earnings-com < minimum-life-com ) or (age-com > expectation-age-com) [die]
end

; Birth, die people
; =====
to birth-die-peo
  if (num-child-peo < num-average-child-peo) and (total-earnings-peo > Threshold-reproduction-peo)
  and (age-peo > age-birth-peo)
  [
    hatch-people 1
    [
      set score 0
      set memory-partners []
      set memory-partnermove []
      set memory-ownmove []
      set partnered? false
      set partner nobody
      set partner-defected? false
      set i-defected? false
      set num-child-peo 0
      set age-peo 0
      set buy-peo? false
      set total-earnings-peo total-earnings-peo * %heritage-peo
      if Random-float 100 < %mutation-peo ; a chance for mutation
      [set strategy one-of strategy-list]
    ]
    set total-earnings-peo total-earnings-peo - reproduction-resources-peo
    set num-child-peo num-child-peo + 1
  ]
  set age-peo age-peo + 1
  if (total-earnings-peo < minimum-life-peo ) or (age-peo > expectation-age-peo) [die]
end

;Scoring
; =====

to do-scoring
  set num-coop-com count companies with [ strategy = "coop"]
  set num-non-coop-com count companies with [ strategy = "non-coop"]
  set num-tit-for-tat-com count companies with [ strategy = "tit-for-tat"]
  set num-ethnocentrism-com count companies with [ strategy = "ethnocentrism"]

  set num-peo n-peo
  set num-coop-peo ( count people with [ strategy = "coop"])
  set num-non-coop-peo ( count people with [ strategy = "non-coop"])
  set num-tit-for-tat-peo ( count people with [ strategy = "tit-for-tat"])
  set num-ethnocentrism-peo ( count people with [ strategy = "ethnocentrism"])

```



```
set total-resources sum[resources-amount] of patches
set %resources-Vs-initial (sum [resources-amount] of patches - total-initial-resources)/ total-initial-resources
```

```
set num-total-com (count companies)
set num-total-peo (count people)
```

```
set total-supply-com ( sum [earnings-taken-com] of companies )
set total-demand-peo ( count people * consume-tick-peo )
```

```
if any? people
[set num-total-com-peo ((count companies)/ (count people))]
end
```

;By Angela Isabel Giraldo Suárez Dic /22

Referencias

- Aguilera, F. & Alcántara, V. (1994). *De la economía ambiental a la economía ecológica*. CIP Ecosocial.
- Alier, J. M. (1998). *Curso de economía ecológica* (2ª ed.). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina regional para América Latina y el Caribe.
- Allen, M., Bettinger, R., Coddling, B., Jones, T. & Schwitalla, A. (2016). Resource scarcity drives lethal aggression among prehistoric hunter-gatherers in central California. *PNAS*, 113(43), 12120-12125.
<https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1607996113>
- Arthur, W. B. (2006). Out of equilibrium economics and agent-based modeling. In L. Tesfatsion & J. Kenneth L. (Eds.), *Handbook of computational economics* (Vol. 2, Issue 05). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-0021\(05\)02032-0](https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02032-0)
- Arthur, W. B. (2014). Complexity economics: A different framework for economic thought. In *Complexity and the Economy*. Oxford University Press.
- Arthur, W. B. (2015). *Complexity and the Economy*. Oxford University Press.
- Arthur, W. B., Beinhocker, E. & Stanger, A. (2020). *Complexity economics. Proceedings of the Santa Fe Institute's 2019 Fall Symposium*. The Santa Fe Institute Press.
- Axelrod, R. (1984). *The evolution of cooperation*. Basic Books.
- Axelrod, R. (1997). *The dissemination of culture: A model with local convergence and global polarization*. 41(203). <https://doi.org/10.1177/0022002797041002001>

- Axelrod, R., & Hammond, R. A. (2003). *The evolution of ethnocentric behavior*. http://www-personal.umich.edu/~axe/research/AxHamm_Ethno.pdf
- Axtell, R., Kirman, A., Couzin, I. D., Fricke, D., Hens, T., Hochberg, M. E., Mayfield, J. E., Schuster, P. & Sethi, R. (2016). Challenges of integrating complexity and evolution into economics. In D. S. Wilson & A. Kirman (Eds.), *Complexity and evolution. Toward a new synthesis for economics* (Ferst, pp. 65-81). The MIT Press.
- Azqueta, D. (2007). *Introducción a la economía ambiental* (2ª ed.). McGraw Hill.
- Balci, O. (1997). Verification, validation and accreditation of simulation models. *Winter Simulation Conference*.
- Balci, O. (1998). Verification, validation, and testing. In J. Banks (Ed.), *Handbook of Simulation* (pp. 335-396). Jhon Wiley & Sons Inc.
- Barcellos, L. (2010a). *Modelos de gestión aplicados a la sostenibilidad empresarial* [tesis doctoral]. Universidad de Barcelona, España.
- Barcellos, L. (2010b). *Modelos de gestión aplicados a la sostenibilidad empresarial* [tesis doctoral]. Universidad de Barcelona, España.
- Basili, M. & Zappia, C. (2010). Ambiguity and uncertainty in Ellsberg and Shackle. *Cambridge Journal of Economics*, 34(June 2005), 449-474.
<https://doi.org/10.1093/cje/bep008>
- BenDor, T. & Scheffran, J. (2019). *Agent-based modelling of environmental conflict and cooperation*. Taylor and Francis Group.
- Bentham, J. (1780). *Introduction on the principles of morals and legislation*.
- Bertalanffy, L. V. (1986). *Teoría general de los sistemas*.
- Bicchieri, C. (1993). *Rationality and coordination*. Cambridge University Press.
- Bolddata. (2022). *Number of companies worldwide surpasses 300 million*.
<https://bolddata.nl/en/number-of-companies-worldwide-surpasses-300-million/>

- Bothello, J. & Salles-Djelic, M.-L. (2017). *Evolving conceptualizations of organizational environmentalism: A path generation account*. 1(27).
- Bowles, S. & Gintis, H. (2002). The origins of human Ccooperation. *SFI Working Papers*.
<https://sfi-edu.s3.amazonaws.com/sfi-edu/production/uploads/sfi-com/dev/uploads/filer/d2/2b/d22b3fd4-83eb-437d-a0d8-aa64e6e7ccf5/02-08-035.pdf>
- Brauch, H. G. (2016). Sustainable peace in the Anthropocene: Towards political geoeology and peace ecology. In H. G. Brauch, Ú. Oswald Spring, J. Grin & J. Scheffran (Eds.), *Handbook on sustainability transition and sustainable peace* (pp. 187-236). Springer.
- Brauch, H. G. (2019). Sustainable peace through sustainability transition as transformative science: A peace ecology perspective in the Anthropocene. In H. G. Brauch, U. O. Spring, A. E. Collins, & S. È. O. Serrano (Eds.), *Climate change, disasters, sutainability transition and peace in the Anthropocene* (pp. 175-234). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-97562-7>
- Brauch, H. G. & Oswald Spring, Ú. (2016). Sustainability transition and sustainable peace: Scientific and policy context, scientific concepts, and dimensions. In H. G. Brauch, Ú. Oswald Spring, J. Grin & J. Scheffran (Eds.), *Handbook on sustainability transition and sustainable peace* (Vol. 10). Springer.
- Brauer, J. & Caruso, R. (2013). Economists and peacebuilding. In M. Ginty (Ed.), *Routledge handbook of peacebuilding* (pp. 147-158). Routledge.
- Carrizosa, J. (2000). *¿Qué es el ambientalismo? La visión ambiental compleja*. IDEA, Universidad Nacional de Colombia.
- Caruso, R. (2010). *Peace economics, Peace science and public policy on the nature of peace economics*. 16(2).

- CEPAL. (2020). *Los motores de la degradación ambiental. El modelo macroeconómico y la explotación de los recursos naturales en América Latina*. Naciones Unidas.
- Colander, D. (2013). *The QWERTY keyboard and technological lock-in*.
<https://sites.middlebury.edu/colanderdave/2017/07/16/the-qwerty-keyboard-and-technological-lock-in/>
- Coleman, P. (2016). The essence of peace? Toward a comprehensive and parsimonious model of sustainable peace. In H. G. Brauch, Ú. Oswald Spring, J. Grin & J. Scheffran (Eds.), *Handbook on sustainability transition and sustainable peace*. (pp. 149-160). Springer.
- Coleman, P. T., Fisher, J., Fry, D. P., Liebovitch, L. S., Chen-carrel, A. & Souillac, G. (2020). How to live in peace? Mapping the science of sustaining peace: A progress report. *American Psychologist*. <http://dx.doi.org/10.1037/amp0000745>
- Costanza, R., Wainger, L., Folke, C., Mäler, K., Costanza, R. & Wainger, L. (2013). *Modeling complex ecological economic systems. Toward an evolutionary of people dynamic understanding and nature*. 43(8), 545-555.
<http://www.jstor.org/stable/1311949> .
- Cottey, A. (2018). Environment change, economy change and reducing conflict at source. *AI & SOCIETY*, 33, 215-228. <https://doi.org/10.1007/s00146-018-0816-x>
- Crane, A., Matten, D. & Moon, J. (2004). Stakeholders as citizens? Rethinking rights, participations, and democracy. *Journal of Business Ethics*, 107-122.
- Cumming, G. S., Olsson, P., Chapin, F. S. & Holling, C. S. (2013). Resilience, experimentation, and scale mismatches in social-ecological landscapes. *Landscape Ecology*, 28(6), 1139-1150. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9725-4>
- de Coning, C. (2020). Insights from complexity theory for peace and conflict studies. In *The Palgrave encyclopedia of peace and conflict studies*. Palgrave Macmillan.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-11795-5_134-1

- de Coning, C. & Krampe, F. (2021). *Why peace should matter for the COP, and why COP26 is important for peace*. IPI Global Observatory.
<https://theglobalobservatory.org/2021/11/why-peace-should-matter-for-the-cop-and-why-cop26-is-important-for-peace/>
- Dietz, T., Ostrom, E. & Stern, P. C. (2003). The struggle to govern the commons. *Science*, 302(December), 1907-1912.
- Eoyang, G. (Director). (2014). *Find the patterns by asking the right questions*.
<https://www.hsdinstitute.org/resources/patterns-and-questions.html>
- Eoyang, G. (2015). Peace is a pattern: Simple rules for sustainable peace. *Sustaining Peace 2015*.
https://www.youtube.com/watch?v=OAEMJTd0XXk&feature=youtu.be&list=PLF_C_RsjuyaDXfTACfyzqB9pMmrm4-IID
- Epstein, J. (2020). Agent-based computational models and generative social science. In *Generative social science* (pp. 4-46). Princeton University Press.
- Fernández, E. O., Valderas, J. M. & Mateos de Cabo, R. (2004). La economía en el marco de la ciencia compleja. *Encuentros Multidisciplinares*, 6(17), 56-61.
- Ferro, C., Padin, C., Svensson, G., Sosa Varela, J. C., Wagner, B. & Høgevold, N. M. (2017). Validating a framework of stakeholders in connection to business sustainability efforts in supply chains. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 32(1), 124-137. <https://doi.org/10.1108/JBIM-12-2015-0253>
- Fisher, J. & Rucki, K. (2017). Re-conceptualizing the science of sustainability: A dynamical systems approach to understanding the nexus of conflict, development, and the environment. *Sustainable Development*, 275(November 2016), 267-275.
<https://doi.org/10.1002/sd.1656>
- Flórez, A. & Thomas, J. (1993). *La teoría general de los sistemas*, 4(1-2), 111-137.

- Foley, D. & Farmer, D. (2009, August 6). The economy needs agent-based modelling. *Nature*, 460, 685-686. DOI: 10.1038/460685a
- Folke, C., Hahn, T., Olsson, P. & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 30(1), 441-473. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>
- Folke, C., Olsson, P., Gunderson, L. H., Carpenter, S. R., Ryan, P., Lebel, L. & Holling, C. S. (2006). Shooting the rapids: Navigating transitions to adaptive governance of social-ecological systems. *Ecology and Society*, 11(1), 18. <https://doi.org/10.2307/26267806>
- Folke, C., S. R. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin & J. Rockstrom. (2010). Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability, and transformability. *Ecology and Society*, 15(4), 20. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.191>
- Foster, J. (2005). From simplistic to complex systems in economics. *Cambridge Journal of Economics*, 29(6), 873-892. <https://doi.org/10.1093/cje/bei083>
- Foxon, T. J., Köhler, J., Michie, J. & Oughton, C. (2013). Towards a new complexity economics for sustainability. *Cambridge Journal of Economics*, 37(January), 187-208. <https://doi.org/10.1093/cje/bes057>
- Fry, D. P., Souillac, G., Liebovitch, L., Coleman, P. T., Agan, K., Nicholson-Cox, E., Mason, D., Gomez, F. P. & Strauss, S. (2021). Societies within peace systems avoid war and build positive intergroup relationships. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8(17). <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00692-8>
- Galán-Ordax, J. M. (2007). *Evaluación integradora de políticas de agua: modelado y simulación con sociedades artificiales de agentes*. Universidad de Burgos.
- García-Valdecasas, J. I. (2016). *Simulación basada en agentes. Introducción a NetLogo*. CIS Centro de Investigación Sociológicas.

- Global Footprint Network National Footprint Accounts. (2018). *Ecological Footprint data. Edition Downloaded*. <http://data.footprintnetwork.org>.
- Göpel, M. (2016). *The great Mindshift. How a new economic paradigm and sustainability transformations go hand in hand*. Springer Open & Wuppertal Institute.
- Gowdy, J., Mazzucato, M., van den Bergh, J. C. J. M., van der Leeuw, S. E. & Wilson, D. S. (2016). Shaping the evolution of complex societies. In D. S. Wilson & A. Kirman (Eds.), *Complexity and evolution. Toward a new synthesis for economics* (1st ed., pp. 327-350). The MIT Press.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S. K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J. U., Jørgensen, C., Mooij, W. M., Müller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S. F., Robbins, A. M., ... DeAngelis, D. L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198(1-2), 115-126.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023>
- Grin, J. (2016). Transitions studies: Basic ideas and analytical approaches. In H. G. Brauch, Ú. Oswald Spring, J. Grin, & J. Scheffran (Eds.), *Handbook on sustainability transition and sustainable peace* (pp. 105-121). Springer.
- Grin, J., Rotmans, J. & Schot, J. (2010). *Transitions to sustainable development: New directions in the study of long term transformative change*. Routledge.
- Gsottbauer, E. (2013). *Behavioral economics and environmental policy: Theory and experiments*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Hassani-Mahmoei, B. & Parris, B. (2012a). Resource scarcity, effort allocation and environmental security: An agent-based theoretical approach. *Economic Modelling*, 30(January 2013), 183-192.

- Hassani-Mahmooei, B., & Parris, B. (2012b). *Why might climate change not cause conflict? An agent-based computational response*.
<https://ssrn.com/abstract=2172669> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2172669>
- Hirschman, A. (1970). *Exit, voice, and loyalty: Response to decline in firms, organizations and States*. Harvard University Press.
- Hochschild, F. (20 de enero de 2015). *La paradoja ambiental del acuerdo de paz*. Diario *El Espectador*. <https://www.elespectador.com/colombia/mas-regiones/la-paradoja-ambiental-del-acuerdo-de-paz-article-539073/>
- Holland, J. (1996). *Hiddeng order: How adaptation builds complexity*. Helix Books.
- Holland, J. H. (2006). Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19(November 2005), 1-8.
- Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4(5), 390-405. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0101-5>
- Holling, C. S. (2004). From complex region to complex worlds. *Ecology and Society*, 9(1). <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art11/>
- Institute for Economics & Peace. (2018). *The economic value of peace 2018. Measuring the global economic impact of violence and conflict*. Institute of Economics & Peace.
- Institute for Economics & Peace. (2021). *The economy value of peace 2021*. <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/EVP-2021-web.pdf>
- Jakimowic, A. (2020). The role of entropy in the development of economics. *Entropy*, 22(452). <https://doi.org/doi:10.3390/e22040452>
- Jevons, W. S. (1866). *An inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines* (2nd editio). Macmillan and Co.

- Joireman, J. (2005). Environmental problems as social dilemmas: The temporal dimension. In *Understanding behavior in the context of time: theory, research, and application* (pp. 289-304). Lawrence Erlbaum Associates Publisher.
- Kahneman, D., Knetsch, J. L. & Thaler, R. (1986). *Fairness as a constraint on profit seeking: Entitlements in the market*, 76(4), 728-741.
- Kirman, A., Wilson, D. S. & Lupp, J. (2016). Introduction. In *Complexity and evolution: Toward a new synthesis for economics*. The MIT Press.
- Klügl, F. (2008). A validation methodology for agent-based simulations. *SAC '08: The 2008 ACM Symposium on Applied Computing*, 1-8.
- Köhler, J., de Haan, F., Holtz, G., Kubeczko, K., Moallemi, E., Papachristos, G. & Chappin, E. (2018). Modelling sustainability transitions: An assessment of approaches and challenges. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 21(1).
<https://doi.org/10.18564/jasss.3629>
- Laver, M. (2020). *Agent-based models of polarization and ethnocentrism*. Cambridge University Press.
- León, N. (2006). *Mecanismos para la regulación ambiental*. Universidad Nacional de Colombia.
- Loiseau, E., Saikku, L., Antikainen, R., Droste, N., Hansjürgens, B., Pitkänen, K., Leskinen, P., Kuikman, P. & Thomsen, M. (2016). Green economy and related concepts: An overview. *Journal of Cleaner Production* 139, 139, 361-371.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616311490>
- Loorbach, D., van Bode, J. C., Whiteman, G. & Rotmans, J. (2010). Business strategies for transitions towards sustainable systems. *Business Strategy and the Environment*, 19(2), 133-146. <https://doi.org/10.1002/bse.645>

- Lujala, P. & Rustad, S. (2012). High-value natural resources: A blessing or a curse for peace? In P. Lujala & S. Rustad (Eds.), *High-value natural resources and post-conflict peacebuilding* (Issue June). Earthscan.
- Magee, C. L. & Devezas, T. C. (2017). A simple extension of dematerialization theory: Incorporation of technical progress and the rebound effect. *Technological Forecasting & Social Change*, 117, 196-205.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.12.001>
- Maldonado, C. E. (2019). Emergent collective action: Complexifying the World. In F. Cante & W. T. Torres (Eds.), *Nonviolent political economy. Theory and applications* (1st ed., pp. 61-75). Routledge.
- Markard, J., Raven, R. & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955-967.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>
- Mebratu, D. (1998). Sustainability and sustainable development: Historical and conceptual review. *Environmental Impact Assessment Review*, 18(6), 493-520.
[https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(98\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00019-5)
- Mesjasz, C. (1988). Applications of systems modelling in peace research. *Journal of Peace Research*, 25(3).
- Mesjasz, C. (2016). Sustainability and complexity: A few lessons from modern system thinking. In H. G. Brauch, Ú. Oswald Spring, J. Grin, & J. Scheffran (Eds.), *Handbook on sustainability transition and sustainable peace* (pp. 421-450). Springer.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* (1st ed.). Oxford University Press.
- Morone, P. (2018). Sustainability transition towards a biobased economy: Defining, measuring, and assessing. *Sustainability (Switzerland)*, 10(8).
<https://doi.org/10.3390/su10082631>

- Naciones Unidas. (2022). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*. UN.Org.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Naciones Unidas. Pacto Global. (2010). *Lineamientos sobre responsabilidad empresarial en áreas de alto riesgo y afectadas por conflicto*. ONU.
- Newman, M. E. J. (2009). Complex systems: A survey. I. *Am. J. Phys.*, 79, 800-810.
- Niazi, M. & Hussain, A. (2011). A novel agent-based simulation framework for sensing in complex adaptive environments. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Sensors Journal*, 11(2), 404-412. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2068044>
- Ostrom, E. (2010). Beyond markets and states: Polycentric governance of complex economic systems. *American Economic Review*, 100(June), 641-672.
- Our World in Data. (2022). *Fish stock and overfishing*. Our World in Data.
<https://ourworldindata.org/fish-and-overfishing#discards>
- Paravantis, J. (2016). From game theory to complexity science and agent-based modeling in world politics. In *Intelligent Computing Systems* (pp. 39-85). Springer.
- Pérez, E., & Setién, E. (2008). La interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad en las ciencias: Una mirada a la teoría bibliológico-informativa. *Sociológica (México)*, 23(67).
- Perona, E. (2005). Ciencias de la complejidad: ¿La economía del siglo XXI? *Apuntes del CENES*, 25(40), 27-54.
- PNUMA. (2018). *Economía verde*. <http://web.unep.org/es/rolac/econom%C3%ADa-verde>
- Porter, M. & Kramer, M. (2011). La creación de valor compartido. *Harvard Business Review América Latina*, enero-febrero, 3-18.
- Rand, B. (2018). *An introduction to agent-based modeling*. Santa Fe Institute.

- Randhir, T. O. (2016). Globalization impacts on local commons: Multiscale strategies for socioeconomic and ecological resilience. *International Journal of the Commons*, 10(1), 387-404. <https://doi.org/10.18352/ijc.517>
- Rosser, J. B. & Kramer, K. (2000). Integrating the complexity vision into mathematical economics. In D. Colander (Ed.), *Complexity and the reaching of Economics* (pp. 209-230). Edward Elgar.
- Roux, C., Goldsmith, K. & Bonezzi, A. (2015). On the psychology of scarcity: When reminders of resource scarcity promote selfish (and generous) behavior. *Journal of Consumer Research*.
- Sarmiento-Vásquez, A. & López-Sandoval, E. (2017). Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes. *Ingeniería Industrial*, 0(035), 27. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2017.n035.1789>
- Schasfoort, J. (2017). *Complexity economics*. [Www.Exploring-Economics.Org/](http://www.Exploring-Economics.Org/). <https://www.exploring-economics.org/en/orientation/complexity-economics/>
- Scheffran, J. (2016). From a climate of complexity to sustainable peace: Viability transformations and adaptive governance in the Anthropocene. In H. G. Brauch, U. Oswald Spring, J. Grin, & J. Scheffran (Eds.), *sustainability transition and sustainable peace: Scientific and policy context, scientific concepts, and dimensions* (Vol. 10, pp. 305-346). Springer.
- Schmitd, G. (1959). *Causas y expansión de la revolución industrial*. 83-121.
- Schrader, U. (2007). Moral responsibilities as consumers. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 2(1), 79-96. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.606.4778&rep=rep1&type=pdf>

- Sen, A. (2007a). Rational fools. A critique of the behavioral foundations of economy theory. In J. Cunningham & R. Wood (Eds.), *Amartya Sen. Critical assessments of contemporary economist* (pp. 138-160). Routledge.
- Sen, A. (2007b). Rationality and social choice. In J. Cunningham & R. Wood (Eds.), *Amartya Sen. Critical assessments of contemporary economist* (pp. 432-464). Routledge & Kegan Paul.
- Serna-Mendoza, C. A. (2015). *Racionalidad económica y medio ambiente* (1ª ed.). Grupo Editorial Ibáñez.
- Seuring, S. & Mu, M. (2008). *From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management*. 16, 1699-1710.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>
- Smith, A. (1994). *La riqueza de las naciones* (1ª ed.). Alianza Editorial.
- Spangenberg, J. H. (2016). The World we see shapes the World we create: How the underlying worldviews lead to different recommendations from environmental and ecological economics – the green economy example. *International Journal of Sustainable Development*, 19(2), 127-146.
- Stephenson, C. (2016). Paradigm and praxis shifts: Transition to sustainable environmental and sustainable peace praxis. In H. G. Brauch, Ú. Oswald Spring, J. Grin, & J. Scheffran (Eds.), *Handbook on sustainability transition and sustainable peace* (pp. 89-104). Springer.
- Suárez, A., Arias-Arévalo, P. A. & Martínez-Mera, E. (2017). Environmental sustainability in post-conflict countries: Insights for rural Colombia. *Environment, Development and Sustainability*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-9925-9>

UNEP (United Nation Environment Program). (2016). *Global material flows and resource productivity*. <https://www.resourcepanel.org/reports/global-material-flows-and-resource-productivity-database-link>

United Nations. (2022). *World economic situation and prospect 2022*.

https://www.un.org/development/desa/dpad/wp-content/uploads/sites/45/WESP2022_ANNEX.pdf

U.S. Global Change Research Program. (2017). *Climate science. Special report. Fourth National Climate Assessment: Vol. I*.

Valente, S. (2005). Sustainable development, renewable resources and technological progress. *Environmental & Resource Economic*, 30, 115-125.

Vesely, S., Klöckner, C. & Brick, C. (2020). Pro-environmental behaviour as a signal of cooperativeness: Evidence from a social dilemma experiment. *Journal of Environmental Psychology*, (67).

Virakul, B. (2015). Global challenges, sustainable development, and their implications for organizational performance. *European Business Review*, 27(4), 430-446.

<https://doi.org/10.1108/EBR-02-2014-0018>

Wackernagel, M., Hanscom, L., Jayasinghe, P., Lin, D., Murthy, A., Neill, E. & Raven, R. (2021). The importance of resource security for poverty eradication. *Nature Sustainability*, 4, 731-738. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00708-4>

Wilensky, U. (2021). *NetLogo User manual 6.2.1* (Version 6.2.1).

Wilensky, U. & Rand, W. (2015). *An introduction to agent-based modeling. Modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. The MIT Press.

Wilson, D., Kirman, A. & Lupp, J. (2016). Complexity and evolution. Toward a new synthesis for economics (Introduction book). In W. David S & A. Kirman (Eds.), *Complexity and evolution. Toward a new synthesis for economics* (1st ed.). The MIT Press.

- Wilson, D. S. (2016a). Two meanings of complex adaptative system. In D. S. Wilson & A. Kirman (Eds.), *Complexity and evolution. Toward a new synthesis for economics* (1st ed., pp. 31-46). The MIT Press.
- Wilson, D. S. (2016b). Two meanings of complex adaptive system. In W. David S & A. Kirman (Eds.), *Complexity and evolution. Toward a new synthesis for economics* (1st ed., pp. 31–46). The MIT Press.
- White, K., Hardisty, D., & Habib, R. (2019). *The elusive Green Consumer*. Harvard Business Review.
- World Population Review. (2022). *Average age of having first child by country*.
<https://worldpopulationreview.com/country-rankings/average-age-of-having-first-child-by-country>
- Wu, J. (2013). Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 28(6), 999-1023.
<https://doi.org/10.1007/s10980-013-9894-9>