

ARTÍCULO TEMA LIBRE

Uso de inteligencia artificial simbólica para entender comportamientos de mercado

Use of symbolic artificial intelligence for understanding market behaviour

Cristian Von Matuschka

Facultad de Ciencias Económicas y Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo
cvonmatuschka@ffyl.uncu.edu.ar

Fecha de recepción: 7/4/2025. Fecha de aceptación: 20/5/2025



URL de la revista: revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/cuyonomics
ISSN 2591-555X

Esta obra es distribuida bajo una Licencia Creative Commons
Atribución No Comercial – Compartir Igual 4.0 Internacional

Resumen

En esta investigación de corte experimental se compara la teoría económica con los resultados de una simulación construida usando agentes con inteligencia artificial simbólica. El objetivo es comprobar si esos mercados ficticios se corresponden con los preceptos de la teoría económica. Para ello se crearon diferentes iteraciones simulando monopolios, duopolios y oligopolios. En el caso de monopolio, los resultados muestran un comportamiento de los agentes concordante con la teoría económica. Los resultados relacionados al comportamiento de los agentes duopólicos y oligopólicos coinciden de manera parcial, ya que el modelo propuesto llega a sus límites técnicos.

Palabras clave: inteligencia artificial, simulación, aprendizaje reforzado, microeconomía

Abstract

In this experimental research, economic theory is compared with the results of a simulation constructed using agents with symbolic artificial intelligence. The aim is to check whether these fictitious markets correspond with the precepts of economic theory. Different iterations were created to simulate monopolies, duopolies and oligopolies. In the case of monopoly, the results show a behaviour of the agents which is consistent with economic theory. The results relating to the behaviour of the duopolic and oligopolic agents are partially consistent, because the proposed model reaches its technical limits.

Keywords: artificial intelligence, simulation, reinforced learning, microeconomy

Journal of Economic Literature (JEL): C71, C72, L12, L13

Introducción

La incertidumbre ha sido una característica constante en los mercados económicos a lo largo de la historia, ha desafiado tanto a individuos como a instituciones. Los ciclos económicos, las fluctuaciones en los precios, los cambios en la demanda y la oferta y los eventos imprevistos, como crisis financieras o pandemias, han puesto de manifiesto las limitaciones de los modelos económicos tradicionales para predecir y gestionar estos escenarios y la necesidad de nuevas soluciones (Agrawal et al., 2018). Durante décadas, la teoría económica ha operado bajo ciertos supuestos de racionalidad y estabilidad que, si bien proporcionan una base útil, han demostrado ser insuficientes en un entorno cada vez más complejo y dinámico.

En este contexto, la integración de nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático y el análisis de *big data*, ofrece una oportunidad única para actualizar estos modelos y dotarlos de una mayor capacidad predictiva y adaptativa (Brynjolfsson et al., 2014). Estas herramientas no solo permiten procesar grandes volúmenes de información en tiempo real, sino que también ofrecen la posibilidad de identificar patrones y relaciones que anteriormente escapaban a los enfoques económicos convencionales (Varian, 2010a). Esta investigación explora si las simulaciones basadas en IA simbólica son capaces de asistir en la explicación de fenómenos de mercado.

Estado del arte

Corresponde mencionar el estado del arte referido al objeto de estudio. A continuación, algunos avances relevantes y sus respectivos inconvenientes:

- ▶ Políticas públicas: se puede usar la IA para diseñar políticas públicas, pero las investigaciones futuras deberían escalarlas y calibrarlas para los datos del mundo real (Zheng, 2021).
- ▶ Diseño de mercados: la IA ayuda a los diseñadores con la eficiencia de los mercados; no obstante, existen fricciones clave en la economía tradicional que la IA debe tener en cuenta (Milgrom et al., 2018).
- ▶ Decisiones de inversión y financiamiento: Patel (2018) construye un modelo con IA simbólica que proporciona un reflejo decente del mercado financiero con un operador, pero no considera el efecto de otros operadores.

La presente investigación busca contribuir a la realización de modelos de microeconomía computacional usando IA simbólica. Se sostiene que los constantes avances tecnológicos pueden hacer posible la reducción de los inconvenientes previamente planteados. El creciente acceso a la potencia informática y las progresivas capacidades de la IA han permitido que los métodos de aprendizaje automático se vuelvan más precisos y robustos, superando significativamente a los métodos tradicionales (Qian, 2023).

Sobre el problema de la investigación

El problema de la investigación es aquel planteado por Fagiolo et al. (2007): la heterogeneidad de los modelos basados en agentes. Los autores sostienen que los aportes de dichos modelos al ámbito de la microeconomía son poco comparables entre ellos. La propuesta al respecto es un marco teórico que sirva de contraste a los resultados simulados. Los marcos teóricos de la microeconomía moderna se basan en resultados extraídos mediante la praxeología o mediante resultados empíricos. Dichos resultados son consensuados por ser entendidos como más cercanos a la economía humana, a diferencia de una economía basada en agentes computacionales. Esto se conoce como representatividad de agentes (Tilbury, 2023).

Con respecto al alcance del problema de investigación, el estudio se extiende a un experimento computacional en el que se compara la teoría microeconómica con los resultados de una simulación construida usando agentes con IA simbólica. El objetivo es comprobar si esos mercados ficticios se corresponden con los preceptos teóricos de la disciplina. El estudio se limita a estudiar diferentes iteraciones construidas para simular monopolios, duopolios y oligopolios.

Diseño de la investigación

El diseño planteado para esta investigación es de tipo experimental. En él se definen y se administran diferentes estímulos destinados a agentes de una simulación cerrada o controlada. Se parte de la siguiente hipótesis: H_0 = los mercados ficticios, con agentes basados en inteligencia artificial simbólica, responden a los preceptos de la teoría económica.

Las variables de este estudio serán:

- los agentes intervinientes,
- el mercado a definir,
- el contexto con el cual operará el mercado,
- los recursos con los que se cuenta, y
- los objetivos que persiguen los agentes.

La estructura general del trabajo consiste en definir qué se entiende por cada variable según la teoría económica consensuada y cómo esas variables se trasladan al mundo de la IA simbólica.

La IA simbólica en este estudio

Dentro de los conceptos asociados a la inteligencia artificial se encuentra la IA simbólica, también conocida como inteligencia artificial clásica o inteligencia artificial basada en la lógica (Garnelo et al., 2019; Thomason, 2024). Este es el término paraguas de los métodos de investigación en IA basados en representaciones de problemas, lógicas y búsquedas, usando símbolos legibles por humanos (Garnelo et al., 2019). La IA simbólica usa herramientas como programación lógica, reglas de producción, redes y marcos semánticos, y ha desarrollado aplicaciones tales como sistemas basados en el conocimiento (sistemas expertos, matemáticas simbólicas, demostradores de teoremas automatizados, ontologías, la red semántica y sistemas automáticos de planificación). El paradigma de la IA simbólica permitió avances en búsqueda, sistemas multiagentes y las ventajas y desventajas del conocimiento formal asociado a sistemas de razonamiento.

La parte medular de este escrito comprende, entonces, las siguientes secciones:

- ▶ Sobre los agentes: donde se retrata el funcionamiento teórico/práctico de los agentes intervinientes en la simulación.
- ▶ Definición del mercado: donde se explica la diferencia entre mercado teórico y mapa.
- ▶ Relación con el contexto: la explicación de la relación entre el agente y su entorno.
- ▶ Recursos disponibles: donde se explica la diferencia entre recursos y recompensas.
- ▶ Tipos de objetivos: donde se definen los objetivos económicos de los agentes.
- ▶ Armado del experimento: explicación de las herramientas usadas para la simulación.
- ▶ Resultados del experimento: explicación y análisis de las figuras obtenidas.

Sobre los agentes

En la teoría económica una empresa se define como una organización que coordina y combina diferentes recursos, como el capital, la mano de obra y la tecnología, con el objetivo de producir bienes o servicios para satisfacer las necesidades del mercado (Varian, 2010b). Una empresa tiene varias funciones clave (Pindyck, 2018):

- ▶ Producción y/o venta de bienes y servicios.
- ▶ Maximización de beneficios: implica buscar la forma más eficiente de producir

al menor costo posible y vender al precio más alto que los consumidores estén dispuestos a pagar.

- ▶ Toma de decisiones estratégicas sobre producción, precios, inversión, contratación de empleados, etc., para mantenerse competitiva en el mercado.
- ▶ Asignación eficiente de recursos: las empresas buscan asignar los recursos de la manera más eficiente posible, es decir, combinando los factores productivos de una manera que minimice los costos y maximice la producción.

En IA se habla de agentes artificiales o, simplemente, agentes. Los agentes son entidades que reciben información sobre el estado del entorno y pueden elegir diferentes acciones con el fin de influenciar en el estado (Albrecht et al., 2024). Cada agente puede tener diferentes conocimientos previos sobre el entorno, tales como los posibles estados que el entorno puede poseer y cómo ese entorno puede ser afectado por el agente. Cabe aclarar que los agentes están orientados hacia objetivos, en el sentido de que pueden tener objetivos específicos y pueden escoger sobre un set de acciones para llegar a cumplirlos. Estos objetivos podrían ser llegar a cierto estado o maximizar ciertas cantidades como, por ejemplo, ingresos. En el aprendizaje por refuerzo multiagente esos objetivos están definidos por funciones de recompensas que especifican señales de recompensas recibidas luego de tomar ciertas acciones en determinados estados. El término política se refiere a una función usada por el agente para la selección de acciones (o asignar probabilidades de selección de cada acción) dado un estado actual del entorno. En caso de que el entorno sea parcialmente observado por el agente, la política podría estar condicionada en las observaciones actuales y pasadas del agente.

En la simulación usada en este experimento se recurrió a agentes con IA simbólica previamente creados por el motor OpenRA (2025). Este *software* libre está basado en la saga de juegos de estrategia en tiempo real *Command & Conquer*, desarrollados por Electronic Arts. OpenRA usa una licencia GPL3, lo cual significa que puede hacerse cualquier modificación sin pedido de autorización. Dicho *software* necesitó de varias modificaciones para esta investigación. Todos los recursos de OpenRA se encuentran disponibles en el OpenRA Resource Center (2025). Se entiende por recursos a aquellos mapas y modificaciones correspondientes al motor. En el caso de este estudio se usaron:

- ▶ Para monopolio y duopolio el mapa *desertrats*, accesible en <https://resource.openra.net/maps/19748/>.
- ▶ Para oligopolio el mapa *code19*, accesible en <https://resource.openra.net/maps/58280/>.

En lo que respecta al funcionamiento de funciones de recompensa de los agentes que usa el motor, existe documentación generada automáticamente bajo el repositorio *Traits* disponible en la OpenRA Documentation (2025).

En la simulación, los agentes representan a las empresas. Cada agente es una empresa que sigue las políticas de producción e inversión en comercialización, a diferen-

cia del original que trata de asentamientos de ejércitos donde se consume energía y amplía la tropa. A modo de síntesis se elabora la siguiente tabla comparativa.

Tabla 1. Comparación de conceptos: empresa vs. agente

Teoría económica	IA simbólica	
Empresa	Agente	Simulación
Producción	Direccionados por objetivos	Cantidad de agentes a definir
Maximización de beneficios	Conocimiento previo	Incentivos basados en maximizar ingresos
Toma de decisiones	Políticas	Políticas de producción e inversión en comercialización
Asignación eficiente de recursos	-	-

Fuente: elaboración propia con base en datos de Varian (2010b) y Albrecht et al. (2024).

Definición del mercado

Según la teoría económica, un mercado se define como un conjunto de mecanismos o instituciones que permiten a los compradores y vendedores interactuar para intercambiar bienes, servicios o factores productivos, como trabajo y capital. Es un espacio (físico o virtual) en el que se determina el precio y la cantidad de los productos en función de la oferta y la demanda (Samuelson et al., 2010).

Algunos elementos relevantes para esta investigación incluyen (Mankiw, 2018):

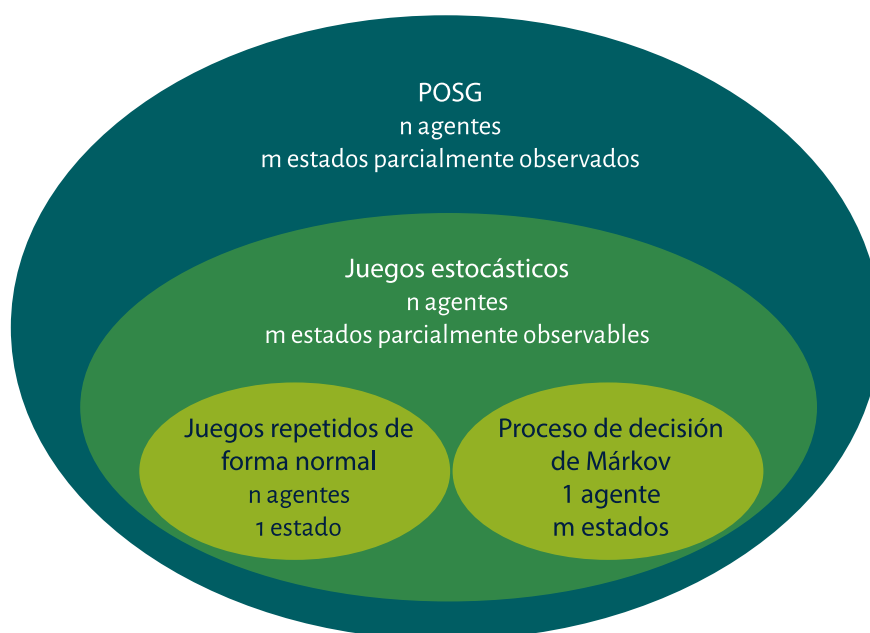
- ▶ Oferta y demanda: la demanda representa la cantidad de bienes o servicios que los consumidores están dispuestos a comprar a un precio determinado, mientras que la oferta refleja la cantidad que los productores están dispuestos a vender. El precio se determina en el punto en que la cantidad demandada iguala a la cantidad ofrecida, es decir, el equilibrio de mercado.
- ▶ Competencia: según el nivel de competencia entre los participantes los mercados se clasifican en distintos tipos:
 - Competencia perfecta: muchos compradores y vendedores, productos homogéneos, libre entrada y salida del mercado y perfecta información. Ningún agente tiene poder sobre el precio.
 - Monopolio: un solo vendedor que controla el precio y la cantidad ofrecida.
 - Oligopolio: pocos vendedores que pueden influir sobre el mercado.
 - Competencia monopolística: muchos vendedores ofrecen productos diferenciados.
- ▶ Información: en los mercados ideales de competencia perfecta se asume que los participantes tienen información perfecta, es decir, conocen todos los precios y

productos. Sin embargo, en la realidad, los mercados suelen tener información imperfecta o asimétrica.

- Mecanismos de mercado: los mercados pueden funcionar de diferentes maneras según sus mecanismos de asignación y regulación. En algunos casos, los precios se determinan mediante subastas, en otros, mediante precios fijos o regulados.

En la inteligencia artificial se aplica la teoría de juegos estocásticos, que utiliza una jerarquía de modelos de juegos denominados *partially observable stochastic games* (POSG). Estos juegos estocásticos son un caso especial en el que las decisiones sobre los estados de cada agente son totalmente observables (Albrecht et al., 2024). Dentro de esta categoría se encuentran aquellos casos especiales donde hay un solo agente en un proceso de decisión que usa procesos de decisión de Márkov y juegos repetidos de forma normal. A modo de síntesis se utiliza la siguiente figura.

Figura 1. Diferentes tipos de juegos según la cantidad de agentes y estados



Fuente: modificado de Albrecht et al. (2024).

En la simulación construida en este trabajo se usa el modelo POSG para interactuar con un mapa. El mapa es la representación virtual del mercado. En él interactúan los agentes entre ellos y con los recursos. En ese mapa los precios de los recursos son fijos durante la duración del juego. Ese mapa puede acoger desde una situación monopólica hasta una oligopólica de 12 agentes. La siguiente tabla comparativa muestra los conceptos clave de la teoría económica y la IA simbólica.

Tabla 2. Comparación de conceptos: mercado vs. mapa

Teoría económica	IA simbólica	
Mercado	Teoría de juegos estocásticos	Simulación
Oferta y demanda	Proceso de decisión de Márkov	Mapa simétrico
Competencia	POSG	Precios fijos
Información	Juegos repetidos de forma normal	Recursos variables
Mecanismos de mercado	-	Cantidad variable de agentes

Fuente: elaboración propia con base en datos de Varian (2010b) y Albrecht et al. (2024).

La relación con el contexto

Según la teoría económica, los agentes económicos (individuos, empresas, gobiernos y el sector externo) están en constante interacción con su contexto. Un contexto abarca diversos factores sociales, políticos, tecnológicos y económicos. Estas son algunas de las principales relaciones que los agentes económicos tienen con su contexto (Todaro et al., 2020):

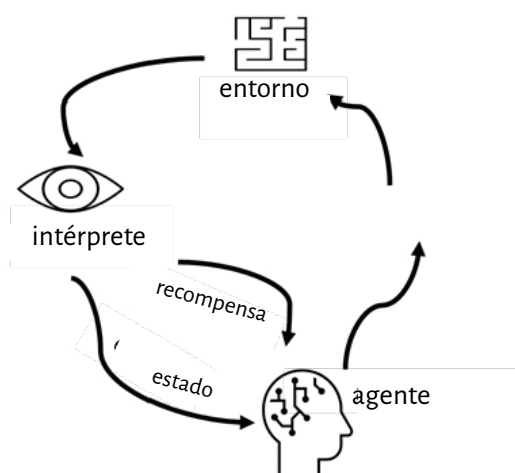
1. Contexto social: preferencias y hábitos de consumo determinados por diversos factores, tales como demografía, educación, cultura y ética.
2. Contexto político institucional: las políticas públicas (fiscales, regulatorias, monetarias, laborales, comerciales, judiciales, etc.) influyen en las decisiones económicas.
3. Contexto tecnológico: la innovación y el progreso tecnológico influyen directamente en la eficiencia y en la productividad de las empresas.
4. Contexto económico: los agentes económicos se ven afectados por las fluctuaciones de la economía (expansión o recesión). El acceso al financiamiento y el estado del mercado financiero (tasas de interés, disponibilidad de crédito) impactan las decisiones de inversión y gasto. Las condiciones macroeconómicas, como la inflación o el desempleo, afectan el poder adquisitivo de los individuos y la demanda general en la economía.
5. Contexto internacional: las relaciones comerciales, las inversiones extranjeras y los flujos de capital entre países influyen en las economías domésticas. Las fluctuaciones en el tipo de cambio influyen en las decisiones de exportación e importación, así como en la competitividad de los productos nacionales en los mercados globales. La existencia de tratados comerciales y las barreras arancelarias o proteccionistas afectan el comportamiento de los agentes económicos, especialmente de las empresas que operan internacionalmente.

En el caso de la IA, el contexto se relaciona con el entorno en el que se desempeña el modelo. Ese entorno está planteado típicamente por un proceso de decisión de Márkov, ya que varios algoritmos de aprendizaje reforzado usan técnicas de pro-

gramación dinámica (Van Otterlo et al., 2012). La diferencia principal entre los métodos clásicos de programación dinámica y los algoritmos de aprendizaje reforzado es que estos últimos no asumen un conocimiento de un modelo matemático exacto del proceso de decisión de Márkov y apuntan a procesos grandes, que no pueden ser abordados por modelos exactos (Li, 2023).

En un escenario típico de aprendizaje profundo el agente toma acciones del entorno, las cuales son interpretadas como una recompensa y un estado de representación es retroalimentado al agente. La figura 2 ilustra el funcionamiento de un agente en relación con su entorno.

Figura 2. Funcionamiento de un agente en relación con su entorno en un modelo de aprendizaje reforzado



Fuente: elaboración propia con base en datos de Albrecht et al. (2024).

En la simulación se procedió a otorgar recompensas asignadas por la inversión en comercialización. Además, los agentes no sabían exactamente dónde se encontraban los recursos necesarios para producir. El mapa consiste en una economía cerrada (no hay comercio exterior). Las políticas estatales no cambian durante el juego. La dotación inicial de recursos para cada agente se define antes de comenzar dicha simulación. El acceso a tecnologías es progresivo, esto es, a medida que el agente invierte en ellas se desbloquean. El precio de las tecnologías es fijo y no se discrimina por agente. A modo de síntesis se elabora la siguiente tabla comparativa.

Tabla 3. Comparación de conceptos: contexto vs. estados

Teoría económica	IA simbólica	
Contexto	Entorno	Simulación
Social	Acción	Estado inicial definido
Político	Recompensa	Búsqueda de recursos
Tecnológico	Estado	Desbloqueo progresivo de tecnologías
Económico	Intérprete	Recompensas, precios fijos de tecnologías
Internacional	-	Economía cerrada

Fuente: elaboración propia con base en datos de Varian (2010b) y Albrecht et al. (2024).

Los recursos disponibles

Según la teoría económica, los agentes económicos (individuos, empresas, gobiernos y el sector externo) disponen de diversos recursos que les permiten llevar a cabo sus actividades y tomar decisiones. Estos recursos se dividen generalmente en las siguientes categorías principales:

1. Mano de obra: la capacidad de los individuos para ofrecer su trabajo a cambio de un salario es uno de los recursos más importantes en la economía. El trabajo incluye tanto habilidades físicas como intelectuales, que pueden variar en función de la educación, la capacitación y la experiencia (Becker, 1994).
2. Tierra y recursos naturales: incluye la tierra física y los recursos que proporciona, como agua, minerales, bosques, petróleo, gas y otros insumos naturales que se utilizan en la producción de bienes y servicios. Los recursos naturales son limitados y, en muchos casos, no renovables, lo que los convierte en un factor crítico en la economía (Tietenberg et al., 2018).
3. Dinero: un recurso esencial para los individuos y las empresas, ya que se utiliza como medio de intercambio, unidad de cuenta y reserva de valor. Permite la compra de bienes y servicios, así como la inversión en proyectos productivos (Mishkin, 2019).
4. Maquinaria y equipo: el capital físico incluye todos los bienes duraderos que se utilizan en el proceso de producción, como máquinas, herramientas, fábricas y tecnología. Estos recursos permiten a las empresas producir bienes y servicios de manera eficiente (Jorgenson, 1967).

Cuando se habla de aprendizaje reforzado, el modelo de proceso de decisión de Márkov tiene como objetivo que el agente en cuestión aprenda un camino óptimo (o casi óptimo) que maximice su función de recompensa (Russell et al., 2010). Es un proceso similar al que ocurre en la psicología animal, optimizando la función objetivo implica un manejo correcto de los recursos disponibles (Lee et al., 2012).

Para el experimento de esta investigación se usó un mapa con recursos que se regeneran a medida que pasa el tiempo de juego. Los recursos existentes son:

- ▶ Mano de obra: el acceso a ella es ilimitado mientras se cumpla con el tiempo y el dinero asignado.
- ▶ Dinero: representado en una moneda ficticia que mide la inversión inicial, inversión en producción, en comercialización y beneficios.
- ▶ Tierra: espacio limitado por la extensión del mapa para las instalaciones de la empresa.
- ▶ Tecnología: accesible mediante inversiones progresivas de tiempo y dinero.
- ▶ Tiempo: la producción, esto es, la construcción, la contratación de mano de obra y tecnologías, y la comercialización consumen tiempo. Se mide el tiempo total de juego.
- ▶ Sistema institucional sin incertidumbre: la IA simbólica no puede transgredir las reglas de juego. Es importante destacar que durante una partida no hay intervenciones aleatorias de clima, ciclos económicos, inflación o demás factores que ocurren en la economía real. Tampoco existe intervención del investigador durante el juego para orientar a los agentes.

A modo de síntesis se elabora la siguiente tabla comparativa.

Tabla 4. Comparación de conceptos: recursos vs. recompensas

Teoría económica	IA simbólica	
Recursos	Recompensas	Simulación
Mano de obra	Proceso de decisión de Márkov	Mano de obra
Tierra y recursos naturales	Función de recompensa	Dinero
Dinero	Búsqueda de equilibrio matemático	Tierra
Maquinaria y equipos	-	Tecnología
-	-	Tiempo
-	-	Sistema institucional

Fuente: elaboración propia con base en datos de Varian (2010b) y Albrecht et al. (2024).

Tipos de objetivos

Según la teoría económica, los agentes económicos (no solo organizaciones, sino también individuos) persiguen diferentes objetivos dependiendo de su rol dentro del sistema económico. A continuación, se describen los objetivos principales de cada agente.

Tabla 5. Objetivos principales por agente económico

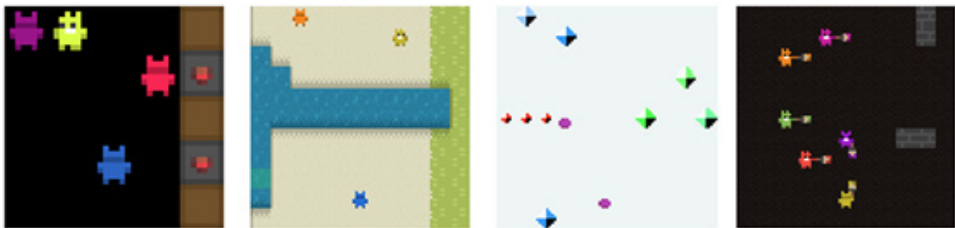
Agente económico		Objetivos principales
Consumidores (Blanchard, 2017)		Maximización de la utilidad, seguridad económica, equilibrio entre trabajo y ocio y optimización del ingreso disponible
Organizaciones (Krugman et al., 2018)	Con fines de lucro	Maximización del beneficio, minimización de costos, innovación, responsabilidad organizacional y maximización de la cuota de mercado
	Gobierno	Crecimiento económico, pleno empleo, estabilidad de precios, distribución equitativa de la riqueza y desarrollo sostenible
	Sector externo	Balanza comercial equilibrada, atracción de inversión extranjera, competitividad internacional y estabilidad de la moneda
	Sin fines de lucro	Maximización de beneficios sociales, minimización de costos, responsabilidad organizacional y desarrollo sostenible

Fuente: elaboración propia con base en datos de Blanchard (2017) y Krugman et al. (2018).

En IA existen aplicaciones construidas en función de sus objetivos de juego. Melting Pot (Leibo et al., 2021) es una colección de más de 50 juegos diferentes que involucran múltiples agentes basados en DeepMind Lab2D (Beattie et al., 2020). Algunos ejemplos de juegos pueden observarse en la figura 3. Las tareas en Melting Pot varían según la cantidad de agentes en el juego. Sus objetivos consisten en:

- competencia de suma cero,
- cooperación completa con recompensa conjunta, y
- juegos de objetivos mixtos.

Figura 3. Capturas de pantalla de juegos seleccionados (de izquierda a derecha *Collaborative Cooking*, *Clean-up*, *Chemistry*, *Territory*)



Fuente: modificado de Albrecht et al. (2024).

Las tareas en esos juegos son parcialmente observables y los agentes las desarrollan observando una imagen parcial (RGB de 88 x 88 píxeles) del entorno. El espacio de acción es discreto, con agentes que tienen seis acciones de movimiento para todas sus tareas: movimiento de avance, retroceso, laterales, con direcciones derecha o izquierda y, potencialmente, acciones adicionales según lo requiera cada tarea.

En el caso de *Collaborative Cooking*, los agentes necesitan cocinar un plato juntos. La tarea puede tener diferentes versiones que varían según el armado de la cocina, y así requiere cooperación y especialización de los agentes. Otro ejemplo es el de *Clean up*, donde siete agentes pueden recolectar manzanas en un entorno que los premia. La probabilidad de aparición de las manzanas depende de la limpieza de un río por parte de los agentes. En *Chemistry* los agentes transportan moléculas en un entorno en el que, según cómo se combinan, se generan nuevas moléculas. El juego *Territory* consiste en agentes que necesitan capturar recursos para eliminar agentes enemigos.

En la simulación planteada se construyeron los siguientes objetivos:

- ▶ Maximización de beneficios: la IA simbólica deberá hacer uso de los recursos definidos previamente para aumentar sus ingresos medidos en la moneda ficticia del juego. Simil *Clean-up*.
- ▶ Dominación del mercado: en caso de competencia los agentes quieren aumentar su cuota de mercado. Simil *Territory*.

Armado del experimento

Para construir el experimento se usaron las siguientes herramientas de *software*:

- ▶ OpenRA: el motor en el que corre el modelo de agentes, mapas, políticas y demás componentes.
- ▶ Windows 10 Pro: sistema operativo que corre el motor de juego.
- ▶ Microsoft Office: para diseño, captura y escritura de los resultados.

En cuanto al *hardware* usado:

- ▶ Intel Core i5-12400 2.50 GHz.
- ▶ 32 GB de memoria RAM DDR4.
- ▶ Disco de 1 TB M2.

Para adaptar el *software* se plantearon modificaciones en los indicadores de desempeño del juego base. Esto es, se reemplazó la parte de ejército por la comercial y se definió a cada agente como una empresa, en vez de un ejército asociado a un país. Se llevó a cabo un testeo que descartó varias iteraciones y llevó a reformular los indicadores. Los resultados aquí publicados son aquellos considerados relevantes para este estudio.

Los indicadores de resultados generales en todos los casos fueron los siguientes.

- ▶ Inversión inicial: ese valor, definido en moneda ficticia, se otorga al comienzo del juego. Es un valor estático.

- ▶ # de agentes: representa la cantidad de empresas que participan en el juego. Se define también antes de comenzar. Es un valor estático.
- ▶ Ventaja impositiva: se define como el porcentaje de impuestos que le cobrará el Estado ficticio a dicha empresa. El rango es de 0 % a 100 %. El Estado puede aplicar políticas individuales que afectan solo a un agente. No puede cambiarlas durante la partida de juego. Es un valor estático.
- ▶ Tiempo total: se entiende como el tiempo comprendido desde el lanzamiento exitoso del juego hasta el momento en que termina la simulación. El fin de la simulación puede estar dado de manera automática (todos los objetivos han sido cumplidos) o de manera manual (se termina la simulación debido a algún inconveniente). Es un valor estático.

Los indicadores de resultados específicos están relacionados con la producción y comercialización de la empresa a simular.

- ▶ Dinero en efectivo: el agente dispone de un número entero basado en una moneda ficticia. Es un valor dinámico.
- ▶ Beneficios: también se representan en moneda ficticia; se calculan sumando todos los ingresos y restando todos los costos de la simulación. Es un valor dinámico.
- ▶ Ingresos: son aquellos importes generados por la venta de los productos en moneda ficticia. Es un valor dinámico.
- ▶ Activos: es el valor en moneda ficticia de los activos pertenecientes a la empresa.
- ▶ Gastos: son aquellos egresos en moneda ficticia que pueden ser atribuidos a producción o comercialización. Es un valor dinámico.
- ▶ Valor de la empresa: es el valor en moneda ficticia de la empresa calculado por la cuota de mercado. Es un valor dinámico.

Esta simulación está centrada en el estudio de los agentes que toman decisiones empresariales. La función de consumo de las personas que compran el producto es fija. Esos consumidores no distinguen entre marcas ni reputación empresarial. Se acercaría a un mercado de *commodities*.

Resultados del experimento

Se simularon tres diferentes escenarios.

- ▶ Monopolio: un agente, explotación sin competencia del mercado, inversión inicial de \$ 5000.
- ▶ Igualdad de condiciones: dos agentes, competencia por los recursos y la participación de mercado. No hay diferencias en dotaciones ni discriminación impositiva. Inversión inicial de \$ 5000.
- ▶ Desigualdad de condiciones: dos agentes, competencia por los recursos y la participación de mercado. Hay diferencias en dotaciones y discriminación impositiva. Inversión inicial de \$ 5000.

En la tabla 6 se aprecian los resultados correspondientes a la simulación de un monopolio.

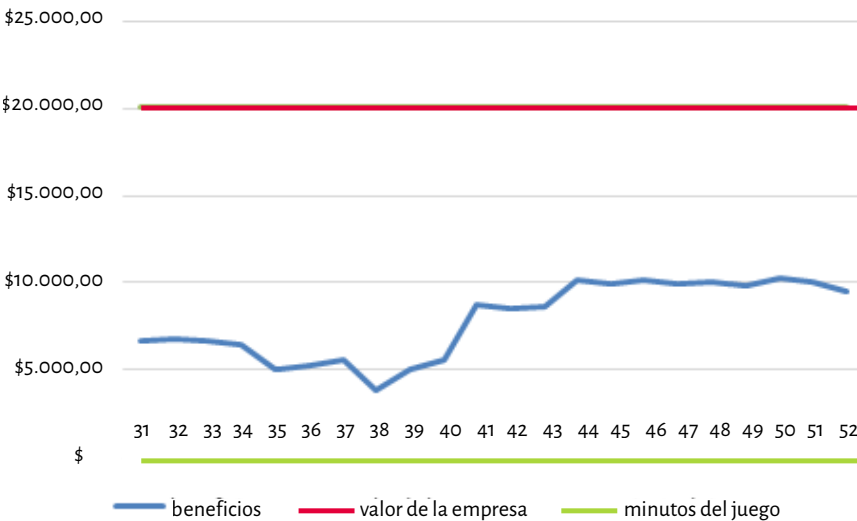
Tabla 6. Resultados finales de la simulación “monopolio”

Ventaja impositiva	o %	Tiempo total	00:52:00
Beneficios	\$ 333 250	Activos	\$ 72 700
Dinero en efectivo	\$ 227 521	Ingresos	\$ 10 000
Gastos	\$ 109 950	Valor de la empresa	\$ 20 100

Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

En este modelo no se aplicó ninguna ventaja impositiva debido a que se trataba de un solo agente. También se puede observar en la tabla que el tiempo total fue de 52 minutos. Se canceló manualmente la simulación, ya que ella no tenía fin debido a la estabilización de valores y regeneración de recursos.

Figura 4. Valor de la empresa monopolista y sus beneficios en el tiempo



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Durante el desarrollo del juego el valor de la empresa monopolista y sus beneficios se estabilizaron a la mitad del tiempo, como muestra la figura 4. Al parecer, el agente no ve incentivos en aumentar su producción utilizando todo el mapa y se “estanca” en las cercanías de su área inicial. Según la teoría económica, y teniendo en cuenta los resultados de esta investigación, se puede afirmar que para el caso del monopolio se cumple con todos los fenómenos de la teoría económica (tabla 7).

Tabla 7. Comparación entre teoría económica y simulación (monopolio)

Fenómeno	Teoría económica	Simulación
Producción reducida	Se cumple	Se cumple
Pérdida de eficiencia	Se cumple	Se cumple
Falta de innovación y calidad	Se cumple	Se cumple
Barreras de entrada	Se cumple	Se cumple

Fuente: elaboración propia con base en Mas-Colell et al. (1995) y resultados de OpenRA (2025).

La producción reducida se da cuando un monopolista tiende a producir una cantidad menor de bienes o servicios en comparación con un mercado competitivo, ya que maximizará sus beneficios a través de la restricción de la oferta, lo que genera una escasez relativa (Mas-Colell et al., 1995). En la simulación esto se ve cuando comienza a estancarse en sus inversiones y deja de explotar los recursos del mapa.

La pérdida de eficiencia en un monopolio ante la falta de competencia (agentes rivales) puede resultar en una asignación ineficiente de recursos, ya que el monopolista no tiene incentivos para minimizar costos o mejorar la calidad. Esto va de la mano con las inversiones en tecnología o innovación. Al no tener competencia, los monopolistas pueden tener menos incentivos para innovar o mejorar la calidad de los productos o servicios que ofrecen, ya que no enfrentan presiones externas para hacerlo (Mas-Colell et al., 1995). En la simulación no hay inversión ardua en tecnologías, como sí se podrá ver en próximas iteraciones.

Por último, las barreras de entrada de las que disfrutaban los monopolios pueden incluir costos de capital elevados, control exclusivo sobre recursos clave o poder político (Mas-Colell et al., 1995). Esto puede dificultar que otras empresas entren en el mercado para competir. Dicha situación se observa en la simulación y se trata de apalancar en las futuras iteraciones.

Tabla 8. Resultados finales de la iteración 1 “igualdad de condiciones”

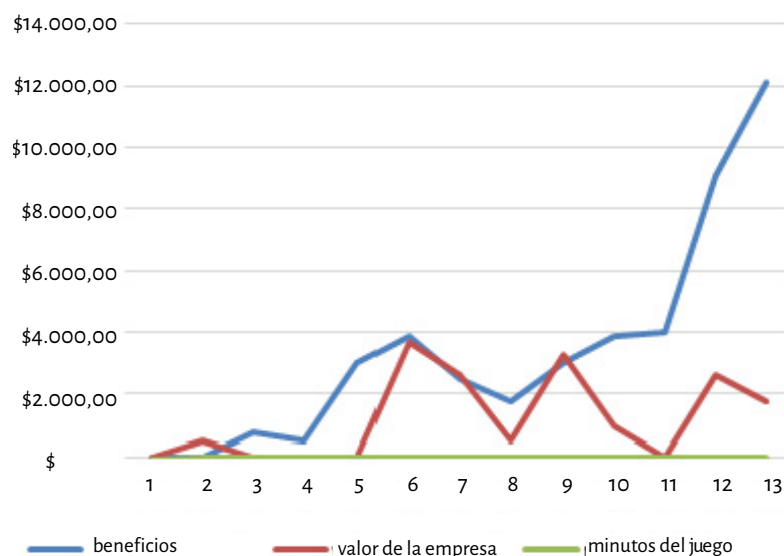
Ventaja impositiva	0 %	Tiempo total	00:11:41
Beneficios	Agente 1: \$ 81 270	Activos	\$ 39 900
	Agente 2: \$ 66 549		\$ 0
Dinero en efectivo	Agente 1: \$ 1531	Ingresos	\$ 8327
	Agente 2: \$ 683		\$ 3327
Gastos	Agente 1: \$ 84 739	Valor de la empresa	\$ 12 100
	Agente 2: \$ 70 866		\$ 1800

Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Para el caso de la igualdad de condiciones de los agentes se necesitaron tres iteraciones y se simuló un duopolio a la Nelson (Kamien y Schwartz, 1982). Estas simulaciones fueron usadas para poder determinar indicadores promedio con el fin de comparar los casos de manera más justa.

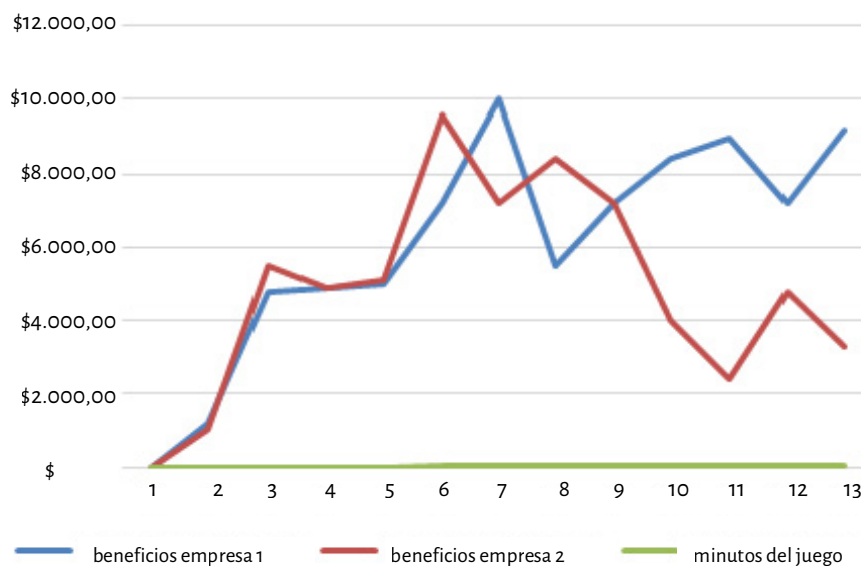
En la tabla 8 se ven los resultados de ambos agentes. El agente 1 lleva el color azul y el agente 2 posee color naranja. Aquel agente que al finalizar el juego posee o activos, en este caso el agente 2, es aquel que fue a la quiebra.

Figura 5. Valor de las empresas en el tiempo (iteración 1)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Figura 6. Beneficios de las empresas en el tiempo (iteración 1)



Fuente: elaboración propia en base a estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

En la figura 5, a partir del minuto 9, a la empresa 2 se le dificulta la competencia duopólica. En cuanto a los beneficios, la figura 6 muestra que la empresa 1 genera, hacia el final del juego, más del doble.

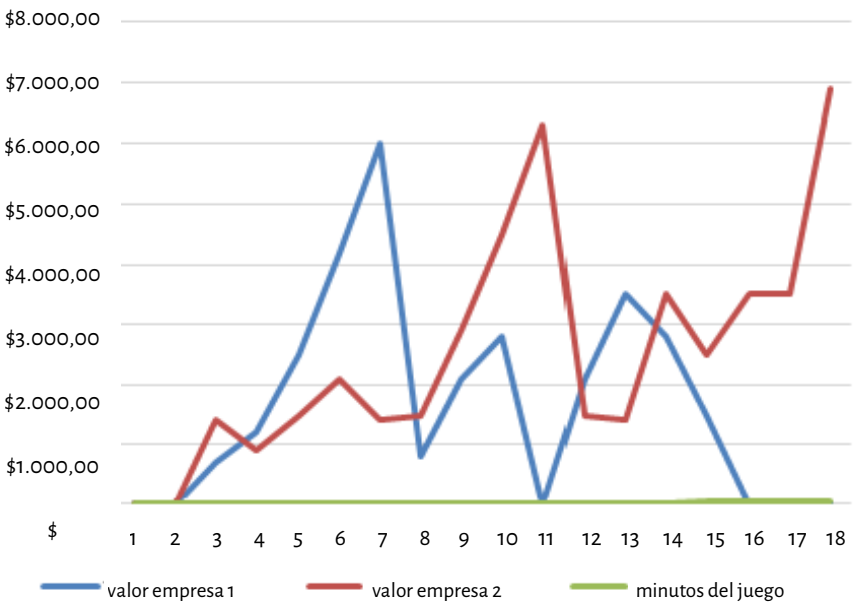
En la tabla 9 se muestran los resultados de la segunda iteración del duopolio, manteniendo el esquema de colores y gráficos previamente explicado.

Tabla 9. Resultados de la iteración 2 “igualdad de condiciones”

Ventaja impositiva	o %	Tiempo total	00:16:55
Beneficios	\$ 110 463	Activos	\$ 0
	\$ 108 218		\$ 34 850
Dinero en efectivo	\$ 363	Ingresos	\$ 445
	\$ 397		\$ 6740
Gastos	\$ 115 100	Valor de la empresa	\$ 0
	\$ 112 821		\$ 6900

Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

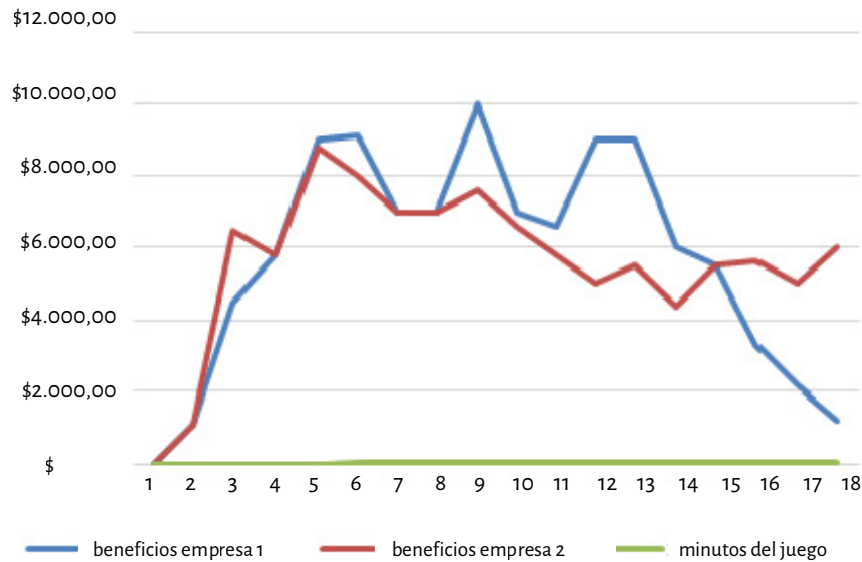
Figura 7. Valor de las empresas en el tiempo (iteración 2)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

La figura 7 muestra cómo la empresa 1 pierde valor relativo en el minuto 8 y no lo logra recuperar. En la figura 8 se ve que la empresa 1, aun con altos beneficios, pierde su cuota ante una estable empresa 2.

Figura 8. Beneficios de las empresas en el tiempo (iteración 2)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Pasando a la tercera iteración, la tabla 10 muestra cómo cambiaron los resultados de la competencia duopólica.

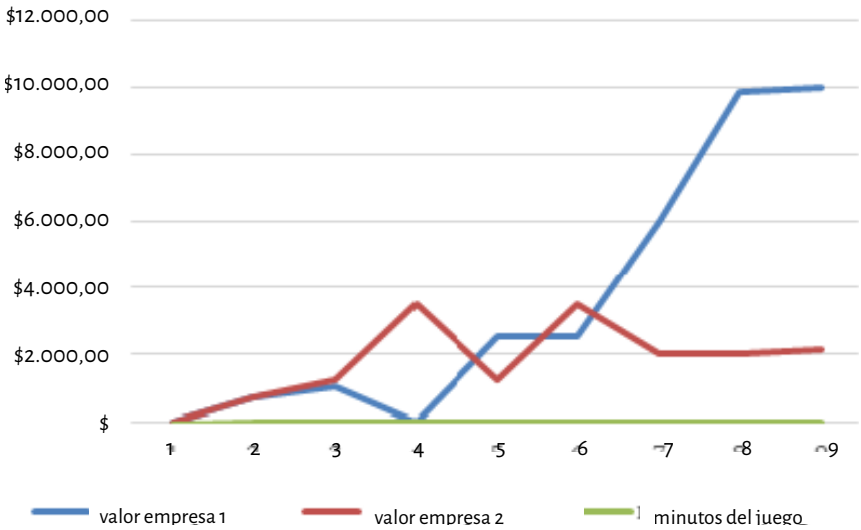
Tabla 10. Resultados de la iteración 3 “igualdad de condiciones”

Ventaja impositiva	0 %	Tiempo total	00:07:30
Beneficios	\$ 48 080	Activos	\$ 36 050
	\$ 29 804		\$ 0
Dinero en efectivo	\$ 1890	Ingresos	\$ 7935
	\$ 169		\$ 1240
Gastos	\$ 51 190	Valor de la empresa	\$ 10 000
	\$ 34 635		\$ 2100

Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

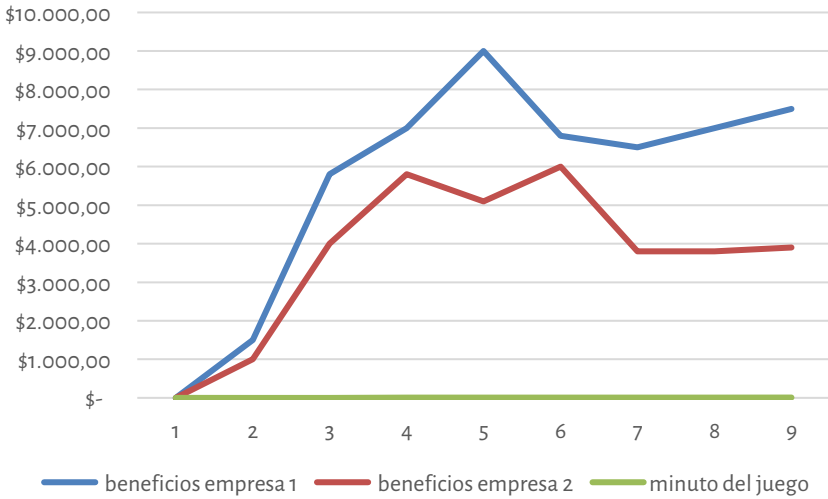
Las figuras 9 y 10 ilustran el valor de las empresas simuladas y sus beneficios.

Figura 9. Valor de las empresas en el tiempo (iteración 3)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Figura 10. Beneficios de las empresas en el tiempo (iteración 3)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

La tabla 11 muestra los resultados consolidados de la simulación en “igualdad de condiciones”. Estos resultados se calculan con los promedios de iteraciones anteriores con el objetivo de obtener una información consistente.

Tabla 11. Resultados consolidados de la simulación en “igualdad de condiciones”

Ventaja impositiva	o %	Tiempo promedio	00:11:45
Beneficios promedio	\$ 333 250	Activos promedio	\$ 25 316
	\$ 79 938		\$ 11 617
Dinero en efectivo promedio	\$ 1261	Ingresos promedio	\$ 5569
	\$ 416		\$ 3769
Gastos promedio	\$ 109 950	Valor de la empresa promedio	\$ 7367
	\$ 83 676		\$ 3600

Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

En un mercado de duopolio, en el que dos empresas dominan el mercado, la teoría económica establece varios posibles resultados dependiendo del tipo de competencia que exista entre ellas. Los resultados más comunes se describen a través de modelos como el de Cournot y el de Bertrand (Pepall et al., 2008). Los resultados aparecen en la tabla 12.

Tabla 12. Comparación entre teoría económica y simulación (duopolio)

Fenómeno	Teoría económica	Simulación
Producción mayor	Se cumple	Se cumple
Competencia estratégica	Se cumple	Imposibilidad técnica del motor para incentivos estratégicos
Pérdida de eficiencia	Se cumple	Se cumple
Interdependencia	Se cumple	Se cumple
Acuerdos colusivos	Se cumple	Imposibilidad técnica del motor para crear agentes con incentivos colusivos

Fuente: elaboración propia en base a estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Al haber dos empresas en lugar de una la producción en un duopolio es mayor que en un monopolio, ya que ambas tratan de ganar cuota de mercado. Sin embargo, la cantidad producida es menor que en un mercado competitivo, donde las empresas tienden a producir hasta que el precio se iguala al costo marginal (Pepall et al., 2008). La simulación muestra, en los resultados consolidados, una explotación de recursos superior a la realizada durante el monopolio.

En un duopolio las empresas suelen competir en estrategias que afectan sus decisiones de precios y cantidades, como ocurre en el modelo de Cournot (competencia en cantidades) o en el de Bertrand (competencia en precios). En el primero, las empresas fijan cantidades y el precio se ajusta en función de estas, mientras que, en el segundo, las empresas fijan precios y compiten para atraer consumidores (Ka-

mien y Schwartz, 1982). Los precios son fijos por definición del modelo de simulación y, por ende, no se pueden observar resultados al respecto.

Aunque en un duopolio hay competencia, la eficiencia no es óptima como en un mercado perfectamente competitivo, donde el precio es igual al costo marginal. En un duopolio las empresas generalmente fijan precios por encima de los costos marginales, lo que conduce a una pérdida de eficiencia y bienestar social, similar al caso de un monopolio (Pepall et al., 2008). No se poseen datos para llegar a esta conclusión mediante una simulación. Desde el punto de vista técnico, el motor OpenRA llega hasta 12 agentes, cantidad que no podríamos considerar competencia perfecta.

Una característica clave de un duopolio es que las decisiones de cada empresa afectan directamente a las decisiones de la otra (interdependencia). Si una empresa decide bajar el precio o aumentar la producción, la otra puede reaccionar de manera similar, lo que crea una dinámica de interdependencia estratégica (Kamien y Schwartz, 1982). Los agentes en la simulación logran realizar estrategias comerciales consistentes en inversiones crecientes con el objetivo de captar una mayor cuota de mercado.

En algunos casos, la teoría económica afirma que las dos empresas pueden llegar a acuerdos informales o incluso formales para fijar precios o restringir la producción, lo que puede resultar en un comportamiento parecido al monopolio, con precios más altos y menor producción que en competencia perfecta (Pepall et al., 2008). Esto puede ser una forma de colusión, aunque en muchos países la colusión es ilegal. Esta opción no puede ser explorada bajo el modelo usado debido a limitaciones técnicas de las funciones de recompensas de cada agente.

Un duopolio en igualdad de condiciones y un monopolio bajo todos los supuestos planteados son mercados meramente ilustrativos. Por lo general, en las ciencias económicas es de interés que se tienda a una competencia perfecta. Por esa razón, se procede al caso de agentes ante desigualdad de condiciones. La desigualdad puede establecerse de diferentes maneras. Las usadas en este trabajo utilizan incentivos fiscales y diferentes inversiones iniciales, esto último simulando que una empresa quiera irrumpir en un monopolio existente y encuentre barreras de entrada (empresa ya instalada con mercado cautivo y una inversión inicial mayor).

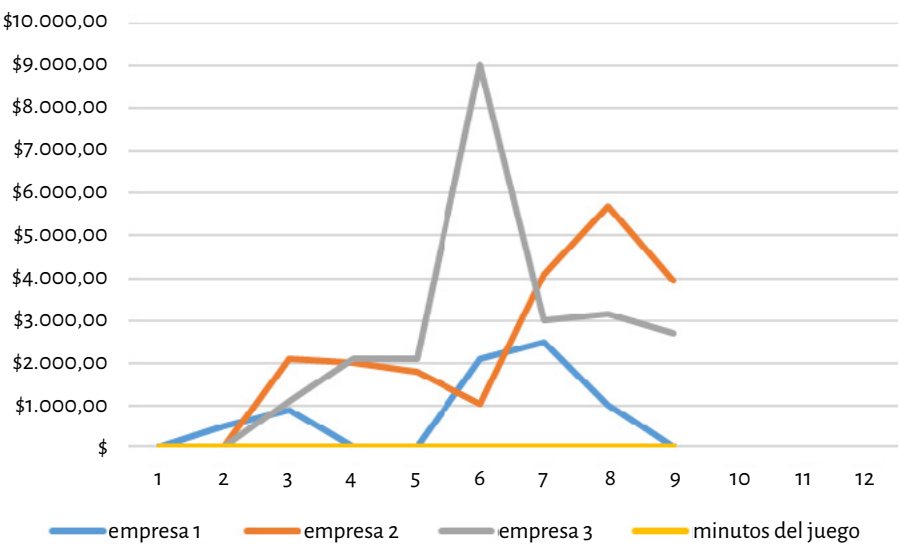
Tal como sucedió en el caso anterior de igualdad de condiciones, se necesitaron tres iteraciones para arribar a un resultado de compensación. Se intentó responder cómo se puede equiparar la situación de los agentes ante las desigualdades. Los agentes en cuestión fueron tres: dos de ellos (naranja y gris), trabajando en cooperación, el otro agente, recibiendo exenciones impositivas de variada índole. Este mercado se asemeja a una situación oligopólica. En la tabla 13 se aprecian las características de la primera iteración.

Tabla 13. Resultados de la iteración 1 “desigualdad de condiciones”

Carga impositiva	10 %	Tiempo total	00:08:13
Beneficios	\$ 52 271	Activos	\$ 0
	\$ 55 785		\$ 32 400
	\$ 64 995		\$ 31 150
Dinero en efectivo	\$ 317	Ingresos	\$ 3622
	\$ 172		\$ 8672
	\$ 0		\$ 64 995
Gastos	\$ 56 954	Valor de la empresa	\$ 0
	\$ 60 613		\$ 3950
	\$ 69 995		\$ 2700

Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

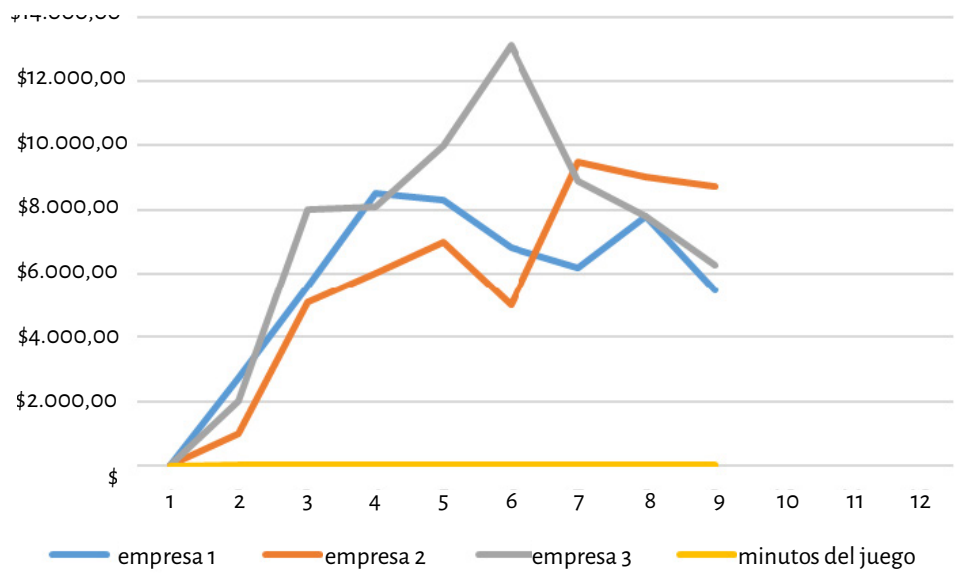
Figura 11. Valor de las empresas en el tiempo (iteración 1)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Los resultados de la tabla 13 y las figuras 11 y 12 muestran que, a pesar de haberse buscado una compensación mediante la aplicación de un impuesto del 10 % a las empresas colisionadas, no se logró que la empresa 1 sea lo suficientemente competitiva como para hacerles frente.

Figura 12. Beneficio de las empresas en el tiempo (iteración 1)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

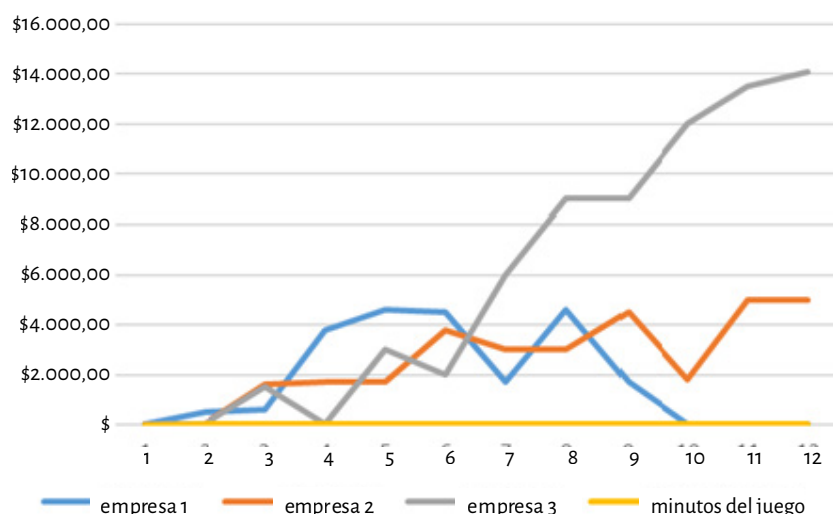
La segunda iteración tuvo las siguientes características.

Tabla 14. Resultados de la iteración 2 “desigualdad de condiciones”

Carga impositiva	15 %	Tiempo total	00:10:47
Beneficios	\$ 67 782	Activos	\$ 0
	\$ 45 405		\$ 15 900
	\$ 92 800		\$ 44 150
Dinero en efectivo	\$ 474	Ingresos	\$ 3172
	\$ 1778		\$ 2096
	\$ 7266		\$ 10 257
Gastos	\$ 72 308	Valor de la empresa	\$ 0
	\$ 48 627		\$ 5000
	\$ 90 534		\$ 14 100

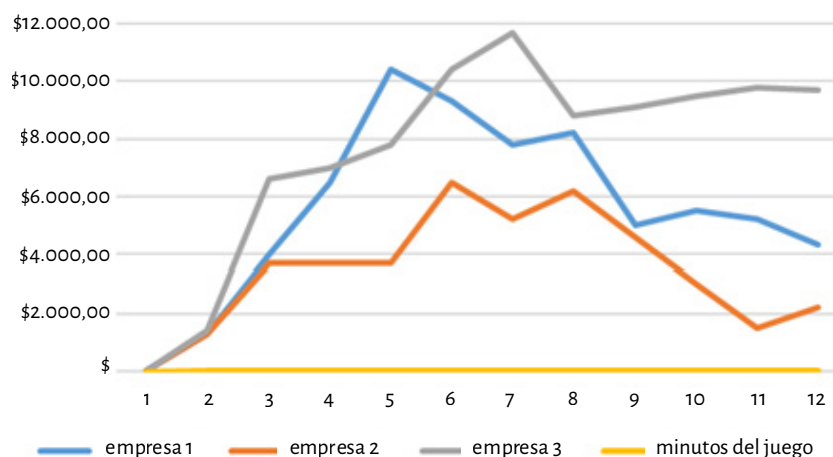
Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Figura 13. Valor de las empresas en el tiempo (iteración 2)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Figura 14. Beneficios de las empresas en el tiempo (iteración 2)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

El impuesto del 15 % sobre los ingresos a los agentes 2 y 3, que colaboran contra el agente 1, tampoco pudo ser suficiente para compensar la competencia (tabla 14, figuras 13 y 14). En la figura 13 se aprecia que la empresa 1 comienza a perder ingresos en el minuto 8 y termina por perder todo su valor en el minuto 10.

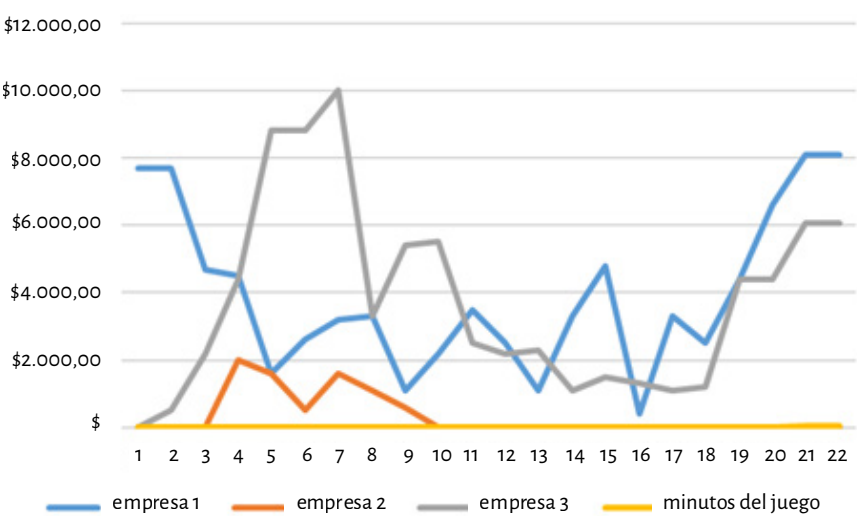
La tercera iteración de los agentes ante desigualdad arrojó los resultados que se ven en las siguientes tabla y figuras.

Tabla 15. Resultados de la iteración 3 “desigualdad de condiciones”

Carga impositiva	20 %	Tiempo total	00:27:31
Beneficios	\$ 166 679	Activos	\$ 21 800
	\$ 65 863		\$ 0
	\$ 170 359		\$ 0
Dinero en efectivo	\$ 5591	Ingresos	\$ 7538
	\$ 3334		\$ 0
	\$ 67		\$ 120
Gastos	\$ 166 088	Valor de la empresa	\$ 8100
	\$ 67 529		\$ 0
	\$ 175 292		\$ 6050

Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

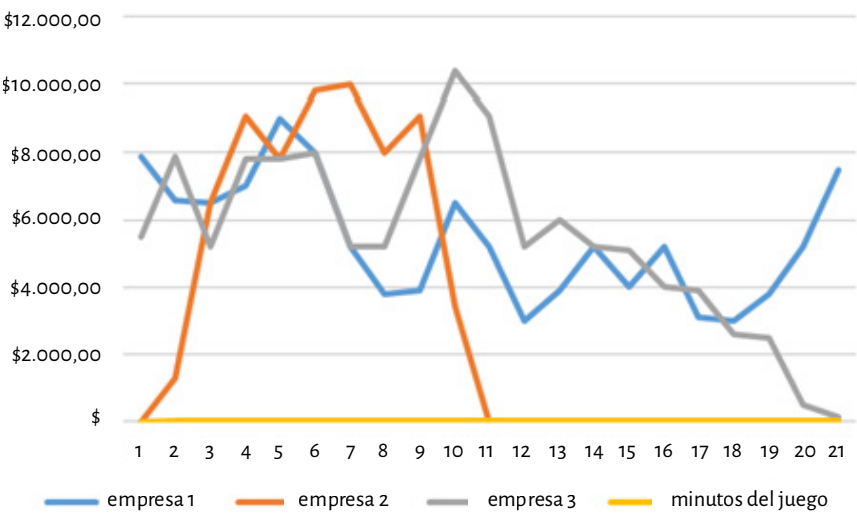
Figura 15. Valor de las empresas en el tiempo (iteración 3)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

En esta iteración el impuesto del 20 % sí logró compensar la desigualdad de enfrentar a dos agentes colisionados para competir, de este modo, por ocupar el mercado definido (tabla 15, figuras 15 y 16).

Figura 16. Beneficios de las empresas en el tiempo (iteración 3)



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Tabla 16. Comparación entre teoría económica y simulación (oligopolio)

Fenómeno	Teoría económica	Simulación
Menor producción	Se cumple	Se cumple
Beneficios a largo plazo	Se cumple	Se cumple
Innovación controlada	Se cumple	Imposibilidad técnica del motor para simular innovación
Competencia no basada en precios	Se cumple	Se cumple parcialmente
Colusión de empresas	Se cumple	Imposibilidad técnica del motor para crear agentes con incentivos colusivos

Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de cierre de simulación en OpenRA (2025).

Según la teoría económica, en un mercado oligopólico en el que unas pocas empresas dominan la oferta de bienes o servicios los resultados económicos pueden incluir una menor producción (Pindyck et al., 2018). Las empresas oligopólicas suelen limitar la cantidad de productos o servicios ofrecidos, con el objetivo de mantener los precios más altos, lo que puede resultar en menor eficiencia productiva (Pindyck et al., 2018). Este precepto se cumple, tal como fue comentado previamente en el caso del monopolio.

Debido a la barrera de entrada que generan los altos costos de inversión o la concentración de poder de mercado, las empresas oligopólicas pueden generar beneficios sustanciales a largo plazo (Pindyck et al., 2018). En la simulación esto se cumple si se observan los beneficios totales en comparación con el monopolio.

Aunque las empresas tengan los recursos para innovar, la competencia limitada puede reducir los incentivos para la innovación (Pindyck et al., 2018). Sin embargo, en algunos casos las empresas pueden competir por diferenciar sus productos, lo que lleva a avances tecnológicos. Este aspecto no se encuentra dentro de las funciones de optimización de los agentes a simular.

Para evitar guerras de precios, las empresas oligopólicas suelen competir en aspectos no basados en precios, tales como la publicidad, el servicio al cliente, la calidad o las características del producto (Pindyck et al., 2018). Esto se puede desprender en parte de la inversión en comercialización de los agentes simulados. Este *marketing* agresivo busca socavar la cuota de mercado.

Según Pindyck et al. (2018) existe la posibilidad de que las empresas se coludan (explícita o tácitamente) para fijar precios o repartirse el mercado, lo que puede ser perjudicial para los consumidores, ya que reduce la competencia real. Esto no es parte de las simulaciones de la investigación.

Conclusión

La hipótesis *H0* se cumple de manera parcial debido a dos cuestiones. Primero, los supuestos bajo los que opera la teoría económica dificultan la explicación del comportamiento de los agentes reales de la misma manera que los supuestos usados en el experimento. No obstante, varios resultados relacionados con el comportamiento de los agentes concuerdan exactamente con la teoría económica. En el caso del monopolio ambas coinciden. Los resultados relacionados con el comportamiento de los agentes duopólicos y oligopólicos coinciden de manera parcial (tablas 12 y 16). Para poder hacer frente a las limitaciones reveladas en el apartado de resultados se debe utilizar un motor más avanzado. Se cree que, con mayor capacidad de cómputo, un motor adecuado y una programación de agentes con funciones objetivo que simulen estrategia y colusión se podrán validar desde un punto de vista de la teoría económica.

Las limitaciones de la teoría económica parecen trasladarse al aprendizaje reforzado, debido a que ambos buscan racionalidad y equilibrios (Kirman, 2010). Esto significa que, así como la teoría económica inserta supuestos en sus modelos, las simulaciones también deben trabajar con ciertas restricciones (o políticas de programación). No obstante, se cree que es posible construir, a modo de testeo, una simulación más *realista* con el fin de visualizar los impactos que pueden generarse por ciertas políticas de competitividad (rebajas de impuestos, reducción de barreras de entrada, etc.). Rodrik (2015) propone que los modelos económicos deben ser flexibles a un mundo lleno de incertidumbres, y destaca el papel de las políticas económicas basadas en pruebas y que sean adaptables a cambios imprevisibles.

Las simulaciones presentadas en este trabajo tienen marcadas limitaciones. La idea es que sean disparadores de reflexión sobre su incorporación en el aparato de

herramientas de los profesionales. Futuras investigaciones del caso no solo deben tener en cuenta los supuestos del modelo, sino también que dichas simulaciones no deben ser usadas para la predicción, o sea, deben ser usadas para la explicación de comportamientos pasados o presentes. Para saber si los resultados de un modelo que usa IA simbólica son aplicables a humanos se necesita que el marco teórico planteado como contraste sea rigurosamente explorado, no solo con diferentes tipos de modelos sino también con diferentes tipos de mercados artificiales (sobre todo, competencia perfecta). Un mercado trabaja con infinitud de factores, los que se entienden como no simulables y, por ende, no predecibles, tal como lo comprobaron Shiller (2019) o Taleb (2007). Los mercados anteriores a la computación moderna eran más simples y, hoy en día, son más complejos por el mero hecho de contener en ellos los avances en IA.

Bibliografía

- AGRAWAL, A., GANS, J. y GOLDFARB, A. (2018). *Prediction Machines: The Simple Economics of Artificial Intelligence*. Harvard Business Review Press.
- ALBRECHT, S. V., CHRISTIANOS, F. y SCHÄFER, L. (2024). *Multi-agent reinforcement learning: Foundations and modern approaches*. The MIT Press.
- BEATTIE, Ch., KÖPPE, T., DUÉÑEZ-GUZMÁN, E. A. y LEIBO, J. Z. (2020). *Deepmind lab2d*. arXiv preprint: 2011.07027.
- BECKER, G. S. (1994). *Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education*. University of Chicago Press.
- BLANCHARD, O. (2017). *Macroeconomics*. Pearson.
- BRYNJOLFSSON, E. y McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. W. W. Norton & Company.
- FAGIOLO, G., MONETA, A. y WINDRUM, P. (2007). A Critical Guide to Empirical Validation of Agent-Based Models in Economics: Methodologies, Procedures, and Open Problems. *Computational Economics*, 30(3), 195-226. doi:10.1007/s10614-007-9104-4.
- GARNELO, M. y SHANAHAN, M. (2019). Reconciling deep learning with symbolic artificial intelligence: representing objects and relations. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 29, 17-23. doi:10.1016/j.cobeha.2018.12.010.
- JORGENSEN, D. W. (1967). The Theory of Investment Behavior. En R. Ferber (Ed.), *Determinants of Investment Behavior*. National Bureau of Economic Research.
- KAMIEN, M. I. y SCHWARTZ, N. L. (1982). *Market Structure and Innovation*. Cambridge University Press.
- KIRMAN, A. (2010). *Complex Economics: Individual and Collective Rationality*. Routledge.
- KRUGMAN, P. y WELLS, R. (2018). *Macroeconomics*. Worth Publishers.

- LEE, D., SEO, H. y JUNG, M. W. (2012). Neural Basis of Reinforcement Learning and Decision Making. *Annual Review of Neuroscience*, 35(1), 287-308. doi:10.1146/annurev-neuro-062111-150512.
- LEIBO, J. Z., DUÑEZ-GUZMÁN, E. A., VEZHNEVETS, A. S., AGAPIOU, J. P., SUNEHAG, P., KOSTER, R., MATYAS, J., BEATTIE, Ch., MORDATCH, I. y GRAEPEL, T. (2021). *Scalable evaluation of multi-agent reinforcement learning with melting pot*. International Conference on Machine Learning, 6187-6199. PMLR. doi:10.48550/arXiv.2107.06857.
- LI, S. (2023). *Reinforcement Learning for Sequential Decision and Optimal Control*. Springer Verlag. doi:10.1007/978-981-19-7784-8.
- MANKIW, N. G. (2018). *Principles of Microeconomics*. Cengage Learning.
- MAS-COLELL, A., WHINSTON, M. D. y GREEN, J. R. (1995). *Microeconomic Theory*. Oxford University Press.
- MILGROM, P. R. y TADELIS, S. (2018). *How Artificial Intelligence and Machine Learning Can Impact Market Design*. National Bureau of Economic Research. Recuperado el 21/06/2025 de <http://www.nber.org/papers/w24282>.
- MISHKIN, F. S. (2019). *The Economics of Money, Banking, and Financial Markets*. Pearson.
- OpenRA (2025). *Open-source project licenced under the GPL3 license, that provides a common platform for rebuilding and reimagining classic 2D and 2.5D RTS games*. Release-20250303. Recuperado el 21/06/2025 de <https://github.com/OpenRA/OpenRA/>.
- OpenRA Documentation (2025). Release-20250303 Recuperado el 21/06/2025 de <https://docs.openra.net/en/release/traits/>.
- OpenRA Resource Center (2025). Release-20250303. Recuperado el 21/06/2025 de <https://resource.openra.net/>.
- PATEL, Y. (2018). *Optimizing Market Making using Multi-Agent Reinforcement Learning*. Recuperado el 21/06/2025 de <https://arxiv.org/abs/1812.10252>.
- PEPALL, L., RICHARDS, D. y NORMAN, G. (2008). *Industrial Organization: Contemporary Theory and Empirical Applications*. Wiley-Blackwell.
- PINDYCK, R. S. y RUBINFELD, D. L. (2018). *Microeconomía*. Pearson.
- QIAN, S. (2023). *Multi-Agent Deep Reinforcement Learning and GAN-Based Market Simulation for Derivatives Pricing and Dynamic Hedging*. Massachusetts Institute of Technology. Recuperado el 21/06/2025 de <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/150206/qian-samsonq-mfin-sloan-2023-file.pdf>.
- RODRIK, D. (2015). *Economics Rules: The Rights and Wrongs of the Dismal Science*. W. W. Norton & Company.
- RUSSELL, S. J. y NORVIG, P. (2010). *Artificial intelligence: a modern approach*. Prentice Hall.
- SAMUELSON, P. A. y NORDHAUS, W. D. (2010). *Economía*. McGraw-Hill.
- SHILLER, R. J. (2019). *Narrative Economics: How Stories Go Viral and Drive Major Economic Events*. Princeton University Press.

- TALEB, N. N. (2007). *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. Random House.
- THOMASON, R. (2024). *Logic-Based Artificial Intelligence*. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Recuperado el 03/07/2025 de <https://plato.stanford.edu/archives/spr2024/entries/logic-ai/>.
- TIETENBERG, T. y LEWIS, L. (2018). *Environmental and Natural Resource Economics*. Pearson.
- TILBURY, C. R. (2023). *Reinforcement Learning for Economic Policy: A New Frontier?* School of Informatics, University of Edinburgh. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.08781>.
- TODARO, M. P. y SMITH, S. C. (2020). *Economic Development*. Pearson.
- VAN OTTERLO, M. y WIERING, M. (2012). Reinforcement Learning and Markov Decision Processes. En *Reinforcement Learning. Adaptation, Learning, and Optimization* (p. 3-42). Springer. doi:10.1007/978-3-642-27645-3_1.
- VARIAN, H. R. (2010a). Computer Mediated Transactions. *American Economic Review*, 100(2), 1-10.
- VARIAN, H. R. (2010b). *Microeconomía intermedia: Un enfoque actual*. Antoni Bosch.
- ZHENG, S., TROTT, A., SRINIVASA, S., PARKES, D. C. y SOCHER, R. (2021). *The AI Economist: Optimal Economic Policy Design via Two-level Deep Reinforcement Learning*. Salesforce Research, Harvard University. Recuperado el 21/06/2025 de <https://arxiv.org/pdf/2108.02755>.