

EFFECTOS DE LA AUTOMATIZACION EN EL EMPLEO EN CHILE

EFFECTS OF AUTOMATION ON EMPLOYMENT IN CHILE

TIARE RIVERA TAIBA*

Universidad Alberto Hurtado

Abstract

This paper analyzes the effects of new technologies oriented to automation in the Chilean labor market. A general equilibrium model is used, in which the investment in robotic capital and the investment in traditional capital are considered separately, allowing the study of the effects of complementarity and substitution that are verified in relation to the labor factor. In particular, the model treats robotic capital as a direct substitute for labor, while incorporating traditional capital as complementary to it. By subjecting the economy to shocks in robotic capital prices, the effects on consumption, employment, wages and GDP can be studied. The results indicate that a fall in the international purchase price of robotic capital has a negative impact on employment as well as on the product. The exercises carried out in this study indicate that a decrease in the international price of robotic capital by 1%, under conditions of high replacement rates between employment and robots, produces a drop in employment and wages of 0.05% if the change is transitory and of 0.25% if it is permanent due to an increase in imports of robotic capital.

Keywords: *Automation, labor, jobs, technology, robots, productivity.*

JEL Classification: *E12, E32, E37, F41, O33, J24.*

* Master of Arts in Economics de Georgetown University y Magíster en Economía de la Universidad Alberto Hurtado.

Se agradece el valioso aporte y comentarios a Carlos J. García y el apoyo de Pedro Cárcamo. Todos los errores son responsabilidad de la autora.

E-mail: tar63@georgetown.edu

Resumen

El presente trabajo analiza los efectos de la automatización en el mercado laboral chileno. Se emplea un modelo de equilibrio general, en el que se considera separadamente la inversión en capital robótico y la inversión en capital tradicional, permitiendo el estudio de los efectos de complementariedad y sustitución que se verifican en relación con el factor trabajo. En particular, el modelo trata el capital robótico como un sustituto directo del trabajo, mientras que incorpora al capital tradicional como complementario a este. Al someter a la economía a shocks en los precios de capital robótico, se puede estudiar los efectos en el consumo, el empleo, los salarios y el PIB. Los resultados indican que una caída en el precio de compra internacional de capital robótico produce un impacto negativo en el empleo como también en el producto. Los ejercicios realizados en este estudio indican que una disminución en el precio internacional de capital robótico en 1%, en condiciones de altas tasas de sustitución entre empleo y robots, produce una caída en el empleo y los salarios de 0,05% si el cambio es transitorio y de 0,25% si es permanente por un aumento en las importaciones de capital robótico.

Palabras clave: *Automatización, empleo, tecnología, robots, productividad.*

Clasificación JEL: *E12, E32, E37, F41, O33, J24.*

1. INTRODUCCION

La más reciente ola de innovación tecnológica centrada en la automatización ha reavivado el debate –tanto a nivel académico y profesional como del público en general– acerca de los efectos que tendrá en el mundo del empleo y el trabajo humano. Este debate no es nuevo, ciertamente, sino que se origina con la revolución industrial y ha resurgido con cada ciclo de la aparición de nuevas tecnologías fundamentales, el vapor, la electricidad, la información. En el lado pesimista del debate se encuentran los que pronostican una reducción neta de la demanda por trabajo, con el consiguiente desempleo y reducción en los salarios. En el otro lado, el optimista, están los que argumentan que los cambios tecnológicos siempre han resultado en un beneficio para el factor trabajo y que al menos en el largo plazo lo mismo ocurrirá esta vez (Lin & Weise, 2018). Pero aun aquellos que ven el largo plazo con optimismo, reconocen un cierto grado de incertidumbre, ya que las olas tecnológicas recientes, basadas en robótica, tecnología de la información e Inteligencia Artificial (IA), representan un tipo de progreso tecnológico diferente a todo lo que se haya visto anteriormente.

Entre los elementos novedosos que se aprecian en la actualidad está la incorporación de las nuevas tecnologías en tareas que antes requerían niveles cognitivos mayores y que son poco repetitivas, por lo que se suponían del ámbito exclusivo de personas, incluso con formación técnica o profesional. A esto se suma el que el mejoramiento que experimentan estas tecnologías ha sido extraordinariamente acelerado y persistente, en gran medida gracias a lo que se denomina la Revolución Digital (Brynjolfsson & McAfee, 2012). Ya en el pasado y sobre todo en los países hoy desarrollados, la incorporación masiva de tecnología a los procesos productivos generó un desplazamiento del trabajo humano desde los sectores productivos –incluyendo la agricultura– al de los servicios. La ola contemporánea de cambios comenzó a gestarse cuando las tecnologías comenzaron a desempeñar con creciente eficiencia tareas del dominio de los servicios.

Asociado a esto, se evidencia que en algunos ámbitos los trabajos disponibles se han polarizado, concentrándose por un lado entre aquellos que subsisten por quedar bajo el nivel en que es eficiente invertir capital para automatizar (ocupaciones elementales) y por otro entre aquellos en que el nivel de especialización y cognitivo es suficientemente elevado para quedar fuera de las capacidades que ofrece el nivel actual que alcanzan estas tecnologías (Gallipoli & Makridis, 2018). Ejemplo de los primeros son los repartidores a domicilio, los peones de construcción, los auxiliares de bodega y los reponedores de supermercado. Aunque igualmente el día de mañana es probable que la masificación de tecnología por efectos de escala los vaya haciendo desaparecer gradualmente, así como en su momento ocurrió con los ascensoristas, las telefonistas y las digitadoras. Sin embargo, hay ocupaciones que por sus características particulares tenderán a permanecer en un plazo mayor entre las no automatizables y que en términos relativos han sido favorecidas por el proceso de polarización: se trata de los servicios personales, que son trabajos que involucran asistir o cuidar de otras personas, como auxiliares de enfermería, preparadores de alimentos, guardias de seguridad, encargados de mantención de edificios, cosmetólogas y peluqueros (David & Dorn, 2013).

En cuanto a los empleos de alta calificación y requerimiento cognitivo, son ejemplos la mayoría de las profesiones liberales, como ingenieros, médicos, abogados y arquitectos, todos estos crecientemente requieren complementarse con tecnología avanzada para desempeñarse adecuadamente, pero se considera que lo esencial de su calificación no está amenazada en el corto plazo. Los más recientes avances en Inteligencia Artificial, sin embargo, si bien no apuntan a sustituir a los profesionales mismos, sí ejecutan ya algunas de sus tareas que se consideraban de patrimonio exclusivamente humano, ya que necesitan capacidades cognitivas especializadas, como el diagnóstico médico de imágenes (Paiva & Prevedello, 2017) o el diseño de estructuras complejas en ingeniería (Salehi & Burgueño, 2018).

Los efectos del proceso de cambio y desplazamiento del trabajo se experimentan de forma diferente no solamente según el nivel educativo o socioeconómico al que pertenecen los afectados, sino también varía según el género. Se observa que las

mujeres, en promedio, ejecutan más tareas rutinarias y codificables que los hombres, en todos los sectores y ocupaciones, por lo que tienden a ser las primeras en ser desplazadas por la automatización. De igual manera, las mujeres tienden a estar subrepresentadas en los sectores de la Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, que coincidentemente son aquellos con mayor complementariedad con el desarrollo de nuevas tecnologías y donde se generan más oportunidades de nuevos empleos (Brussevich *et al.*, 2018).

La velocidad de sustitución del trabajo humano por sistemas automatizados también se ve afectada por la demografía. Por una parte, se espera que para 2050 sobre un tercio de la población mundial supere los 50 años de edad, indicador que solamente cubría a 17,5% de la población mundial en 1950. Por otra, según los análisis publicados, esas personas de más de 50 años tienen grandes limitaciones al efectuar tareas complejas con participación de tecnología, siendo ampliamente superados por personas de menores rangos de edad. Esto es consistente con que estudios recientes (Acemoglu & Restrepo, 2018c) apunten a concluir que mientras más envejecida la población de un país, ocurra una mayor aceleración en la adopción de sistemas automatizados. Esto último explicaría por qué, en términos relativos, países como Estados Unidos y el Reino Unido se encuentran retrasados en robótica industrial respecto de Alemania, Japón y Corea del Sur, donde el ritmo de envejecimiento es mayor.

Hay consenso, por tanto, en que el trabajo humano, para bien o para mal, está experimentando una transformación profunda, que se acentuará en las próximas décadas y que tendrá un impacto equivalentemente importante en la estructura de todas las sociedades. Debido a su importancia, este fenómeno está siendo abordado desde diversos puntos de vista, el sociológico, el psicológico y el de los agentes productivos, preeminentemente, los que intentan dimensionarlo, pronosticar su evolución y poner remedio a los problemas que derivan de él. Para estudiar este fenómeno desde el punto de vista de la economía, a nivel de los países, e intentar predecir su desarrollo e impacto al menos en el futuro cercano, es preciso formular modelos que incorporen el ciclo económico en su conjunto, con todos los elementos que forman parte.

La creciente ansiedad de los agentes económicos, los gobiernos y las personas en general ante las evidencias observables de cambios en el mercado laboral y la transformación del empleo asociada al desarrollo y difusión de nuevas tecnologías, ha llevado a la realización de estudios tendientes a pronosticar cuáles y en qué cantidad serán los puestos de trabajo y las profesiones que están en riesgo de ser desplazadas o transformadas. Frey & Osbornme (2017) plantearon un modelo para estimar cuán susceptibles son las ocupaciones actuales a los avances tecnológicos ocurridos en los últimos años, asumiendo que como consecuencia de los avances en Inteligencia Artificial prácticamente cualquier tarea cuya ejecución pudiera especificarse como un procedimiento estructurado. Bajo este supuesto, concluyeron que 47% del empleo en Estados Unidos presentaba alto riesgo de ser automatizado. Sin embargo, posteriores estudios condujeron a otros autores a considerar que estos valores están sobreestimados, por cuanto al hacer un análisis más integral de los puestos de trabajo, no restringido

a la porción automatizable de sus tareas, se concluye que contiene además muchas otras que son más difíciles de automatizar.

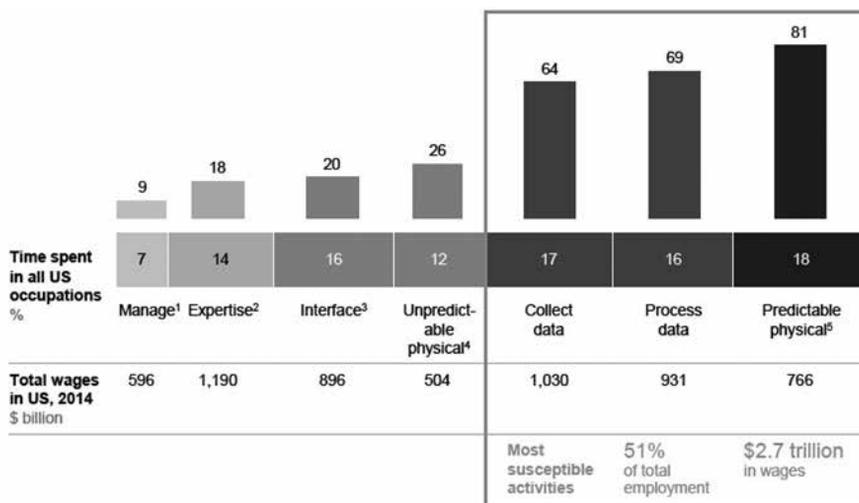
Estos hallazgos son acordes con la literatura, donde las tareas rutinarias son más susceptibles a ser automatizadas, mientras que las tareas que involucran interacciones sociales o cognitivas no rutinarias presentan menos riesgos de ser sustituidas, lo que se puede observar en la Figura 1.

Nuevos estudios que tomaban en cuenta estos factores llevaron a reestimar los puestos de trabajo susceptibles de perderse por ser automatizados es solamente alrededor de 9%, pero reconociendo a la vez que muchas de las actividades individuales que envuelven las ocupaciones existentes (Manyika, 2017) son automatizables a base de la tecnología actual, tendiendo a variar sustancialmente la forma en que se efectúa el trabajo hacia una mayor interacción entre personas y máquinas o personas y sistemas.

En definitiva, la pérdida de puestos de trabajo puede bien ser un número intermedio entre ambos extremos de 9% y 45% que mencionan los estudios, pues las tareas automatizables de diversos puestos de trabajo tienden a organizarse como unidades coherentes, induciendo también a una reorganización de las tareas efectuadas por los humanos, que concentran funciones y actividades antes asignadas a varias personas Brynjolfsson *et al.* (2018). Asimismo, dicha pérdida puede ser parcialmente compensada por la generación de nuevos puestos de trabajo surgidos de la necesidad de efectuar

FIGURA 1

TIME SPENT ON ACTIVITIES THAT CAN BE AUTOMATED BY ADAPTING CURRENTLY DEMONSTRATED TECNOLOGY



Fuente: US Bureau of Labor Statistics; McKinsey Global Institute Analysis.

nuevas tareas, funciones o actividades donde el trabajo presenta ventajas comparativas respecto de sistemas automatizados (Acemoglu & Restrepo, 2018a).

Ciertamente, algunas personas serán desplazadas de su trabajo por la automatización, pero el crecimiento económico general inducido por ella les permitirá, eventualmente, encontrar otro. El efecto que va a producirse será similar al fenómeno de desplazamiento laboral que se observa, sobre todo en USA, desde la agricultura y la manufactura a otras fuentes de empleo generadas en industrias diferentes que en gran medida no habían sido previstas (Manyika, 2017). En otros casos, lo que ocurrirá es que las personas se enfrentarán a una transformación sustancial de sus puestos de trabajo, siendo necesario que los empleadores efectúen una reingeniería de los procesos y una reorganización de las tareas. Los investigadores, gerentes y empresarios debieran focalizar su atención no solamente hacia la automatización sino también al rediseño de los puestos de trabajo.

Las perturbaciones al bienestar de las personas generadas por el proceso de transformación de los mercados laborales requieren enfrentarse mediante soluciones creativas y multivariadas, que ya se han ido poniendo en práctica paulatinamente en algunos países, a veces de manera tentativa y experimental. Estas soluciones incluyen, por un lado, el reestudio de los esquemas educativos, de entrenamiento y de capacitación de los actuales y futuros trabajadores (Bravo, García & Schlechter, 2018). Las personas necesariamente deberán acostumbrarse a trabajar en entornos cada vez más automatizados, conviviendo con maquinaria avanzada o robots y deberá desarrollar nuevas habilidades que sean demandadas en ese entorno.

Por otro lado, en varios países del mundo desarrollado se está experimentando y evaluando los resultados de iniciativas para establecer un “Ingreso Universal Básico” que se combinan con el fortalecimiento y la consolidación de las redes de protección social, juntamente con el desarrollo de programas de incremento de la empleabilidad y de apoyo a la reconversión laboral. Todas estas estrategias de solución son igualmente válidas para los países en desarrollo, donde el debate ya se encuentra instalado, pero su puesta en práctica posiblemente será diferida en el tiempo.

El proceso de transformación del trabajo se enmarca en el desarrollo de la economía mundial, altamente globalizada, donde se aprecian múltiples polos de desarrollo, cada uno con su propia dinámica pero con un elevado nivel de interdependencia entre ellos. Los factores primarios que mueven estas economías siguen siendo el capital y el trabajo, pero lo que en último término parece estar en juego es la participación relativa de cada uno, donde algunos ven que en ciertos sectores el factor trabajo se ve amenazado de disminuir en importancia hasta casi desaparecer.

El motor del proceso transformativo en la producción de bienes y servicios es la productividad y esta requiere inlfujos crecientes de capital, que solo existe en la abundancia necesaria en las economías que han generado un nivel suficiente de riqueza. Por este motivo, la generación y adopción de tecnologías de automatización ocurre primero en estas economías más desarrolladas, donde la productividad ya era mayor, con lo que el resultado es que la brecha de productividad tiende

a amplificarse, incrementando la desigualdad en el desarrollo económico de las naciones (Zeira, 1998).

Los modelos de análisis existentes, por las razones anotadas, se han aplicado preferentemente a países ya desarrollados, donde la innovación tecnológica es permanente y acelerada. Considerando el alto grado de interdependencia de las economías, resultante del proceso de globalización creciente ocurrido en las décadas recientes, las economías de los países emergentes, particularmente los de América Latina, aunque exhiben un retraso relativo en cuanto a automatización productiva, se ven indirectamente afectados por las inversiones en automatización y robotización que efectúan los países desarrollados, los que incrementan diferencialmente su productividad en segmentos donde los países en desarrollo exhibían anteriormente ventajas comparativas por menores precios de la mano de obra (Micco *et al.*, 2019).

El objetivo que se plantea en este artículo es aplicar estos modelos en una economía como la de Chile, que presenta un nivel de desarrollo intermedio, que es muy vulnerable a las fluctuaciones de los mercados internacionales y altamente dependiente para su desarrollo de los flujos de inversión desde el exterior y que muestra sectores muy disímiles en cuanto inversión de capital, a su grado de automatización y su productividad.

2. LITERATURA RELACIONADA

Los procesos de automatización se han abordado desde diversos enfoques teniendo en consideración los efectos que estos generan, más que sus causas. Una referencia importante para el desarrollo de este estudio ha sido el trabajo de Lin & Weise (2018). El desarrollo de su investigación postula un modelo de análisis de tres factores, donde se separa del capital “tradicional”, que es complementario al trabajo humano, del capital “robótico”, que se define como un sustituto neto. Se combinan esos tres factores –trabajo, capital robótico y capital tradicional– en una función de producción CES (de elasticidad de sustitución constante) anidada.

Siendo el capital un sustituto neto del trabajo, su acumulación reduce el aporte neto del trabajo a la producción y puede también resultar en una reducción neta de los salarios. Pero este modelo además de tomar en cuenta este efecto, incorpora además dos canales en los que esa tendencia se contrarresta de manera indirecta. El primero es que la introducción de nueva maquinaria al proceso productivo aumenta el producto marginal de tipos complementarios de capital físico, lo que induce a incorporar inversión en capital tradicional, que es complementario al trabajo humano, el que en consecuencia tiende a aumentar la participación laboral. Segundo, en el modelo los robots utilizan la misma función de producción que el capital y los bienes de consumo. Esto provoca que una inversión en capital robótico aumente la demanda de trabajo humano para ser utilizado como insumo en su propia producción.

La complementariedad y sustitución de factores que consecuentemente producen un efecto de desplazamiento y de producción ha sido ampliamente estudiado por Acemoglu y Restrepo. Específicamente, el trabajo de Acemoglu & Restrepo (2018a) emplea un modelo de análisis que enfatiza el efecto de desplazamiento desde el trabajo humano al automatizado, lo que reduce la demanda por trabajo y los salarios, pero tiene como contrapartida un efecto de productividad, resultante del ahorro de costo por automatización, el que incrementa la demanda por trabajo en tareas no automatizadas. El efecto de productividad es complementado por una acumulación adicional de capital y la profundización de la automatización por medio de la mejora en la maquinaria existente, resultando en un mayor incremento de la demanda por trabajo. Pero a pesar de estos efectos, la automatización incrementa la producción individual en mayor proporción que los salarios y reduce la participación del trabajo en el ingreso nacional.

El enfoque usual parte por establecer funciones de producción que consideran el capital y el trabajo como las variables fundamentales. En este caso los autores optan por una aproximación diferente, donde la unidad productiva básica es la “tarea” y cada tarea requiere ya sea solamente trabajo o bien trabajo y capital. Las variables trabajo y capital presentan, además, ventajas comparativas para la ejecución de las tareas, por lo que la productividad del trabajo es variable según las diferentes tareas. A partir de este enfoque, se conceptualiza la automatización como la ampliación del conjunto de tareas que se ejecutan con una componente de capital. Según si el precio y la productividad marginal del capital son los adecuados, se podrá observar la sustitución de trabajo por capital en esas tareas, originando el efecto de desplazamiento.

Dentro de un marco de análisis en que el proceso productivo se descompone en tareas, Acemoglu & Restrepo (2018b) muestran cómo se puede observar empíricamente el rol que desempeñan los cambios en el contenido de tareas de un proceso, debido a la automatización. Un proceso de producción conlleva varias tareas que pueden ser realizadas tanto por trabajo humano como por una máquina o un *software*, es decir, por capital. La automatización permite que aquellas labores realizadas por humanos ahora sean efectuadas por medio de capital, reduciendo la demanda por trabajo. Esta distribución de tareas a los factores productivos lo denominan “contenido de tareas de un proceso” para una actividad específica.

Con los años, este efecto es contrabalanceado a raíz de la aparición de nuevas tareas que surgen como necesarias, como el caso de personal especializado para mantención de los robots. De esta manera los procesos de automatización y avances en las industrias han dado paso a la creación de nuevas ocupaciones y al incremento de la demanda por trabajo humano. Un claro ejemplo lo podemos ver en la era digital que irrumpió a finales del siglo XX, la que ha impulsado la creación de nuevos trabajos, como creadores de sitios y aplicaciones *web*, programadores (y *hackers*), controladores de seguridad de redes, analistas de redes sociales, optimización *web* y *marketing* digital, todos ellos especializándose en una amplia gama de tareas que antes eran inexistentes. Acemoglu & Restrepo (2018b) lo denominan “efecto

de reincorporación”, es decir, se reincorpora el factor trabajo a un rango de tareas más amplio, cambiando el contenido de tareas de producción a favor del empleo y con esto aumentando la participación del trabajo y la demanda laboral. Esta distinción de tareas también permite levantar un supuesto respecto de las tecnologías aumentadoras de capital o de trabajo en la función de producción $Y_t = F(A^k K, A^L L)$, ya que supone un aumento uniforme de productividad en todas las tareas y no se distingue por tareas específicas.

Una metodología conveniente ha sido la creación de medidores o índices que permitan conocer el grado de automatización por industria. Este ha sido el trabajo de Acemoglu & Restrepo (2017). Utilizando un modelo en el que los robots compiten contra el trabajo humano en la ejecución de tareas, los autores muestran que los avances en tecnología robótica pueden reducir el empleo y los salarios y que el impacto en el mercado local de empleo puede estimarse haciendo una regresión de las variaciones de estos factores utilizando un índice de exposición a robots en ese mercado.

La ecuación de exposición a robots está compuesto por una participación del empleo base multiplicado por un índice ajustado de penetración a robots (APR) para una industria determinada i . Esto hace que la medida de exposición a robots sea parecido a un instrumento Bartik. Este instrumento se utiliza originalmente para medir la tasa de crecimiento del empleo local, interactuando la participación del empleo a nivel de industria local con las tasas de crecimiento del empleo a nivel de industria nacional. La data utilizada por Acemoglu y Restrepo pertenece a la International Federation of Robotics (IFR) para 50 países desde 1993 a 2014, el que incluye *stock* de robots por industria, país y año. Estos datos, de carácter reservado, se complementan con los obtenidos por EUKLEMS para la creación del índice.

Un marco de referencia alternativo, también elaborado por Acemoglu y Restrepo (2018d), consiste en diferenciar la automatización según el nivel de calificación laboral que requieren las tareas a las que sustituyen. La motivación para esto surge a partir del reconocimiento que las innovaciones más recientes de la Inteligencia Artificial generan tecnologías que automatizan tareas cada vez más complejas y de un nivel cognitivo en el rango de habilidades de alto nivel, que antes se encontraban circunscritas al trabajo humano, protegidas por un grado insuficiente de avance en las tecnologías de automatización y las capacidades de los robots.

El objetivo en este caso es plantear un modelo que permita estudiar diferenciadamente el efecto en el mercado laboral de los dos tipos de tecnología de automatización, extendiendo los modelos tradicionales de sustitución y estableciendo un esquema amplio de ventajas comparativas de productividad para tareas que puedan realizarse ventajosamente sea con trabajo o sea con capital (automatización) y que incluyen actividades que requieren un alto nivel de calificación. El modelo muestra que ambos tipos de automatización crean los dos tipos de impactos: el efecto de desplazamiento y el efecto de productividad. El efecto desplazamiento reasigna tareas desde el trabajo al capital, con la consiguiente reducción en la demanda y los salarios mientras el efecto de productividad tiende a incrementar la demanda y la renta de ambos factores.

El efecto neto producido depende de cuál es el efecto dominante, el que en el largo plazo resulta ser el efecto productividad. La razón intuitiva de esto es debido a que en el corto plazo la demanda de capital que se ve incrementada por las potenciales ventajas de usarlo para sustituir trabajo –capital que al inicio es más barato en términos relativos– termina por encarecerse por efecto del incremento en la demanda, lo que echa a perder los potenciales incrementos de productividad que se esperaban, en cambio en el largo plazo el precio del capital es estable, teniendo efecto los incrementos esperados en la productividad.

Una investigación específica en el ámbito de las tareas que requieren calificación elevada fue elaborada por Frey & Osborne (2017), quienes investigan qué tan susceptibles son los trabajos a la computarización. Existen diversas dificultades que las máquinas aún no pueden superar a la hora de desarrollar labores humanas y son divididas en tres categorías o tareas: las de percepción o manipulación, de inteligencia social y de inteligencia creativa. A medida que estas habilidades pueden ser sujetas a algoritmos y estandarizaciones, más cercano estará el capital robótico de reemplazar el trabajo no rutinario humano.

Utilizando la base de datos laboral norteamericana O*NET les permitió *rankear* las ocupaciones basadas en las habilidades y conocimientos requeridos. Con la información descriptiva pudieron clasificar 70 ocupaciones asignando 1 si es automatizable y 0 de caso contrario. Luego, mediante un modelo de clasificación probabilística la transforman a una variable continua. Con estos porcentajes, a mayor valor, mayor será la probabilidad de computarización. También se analizó funciones de probabilidad no paramétricas por medio de procesos gaussianos para lograr mayor precisión.

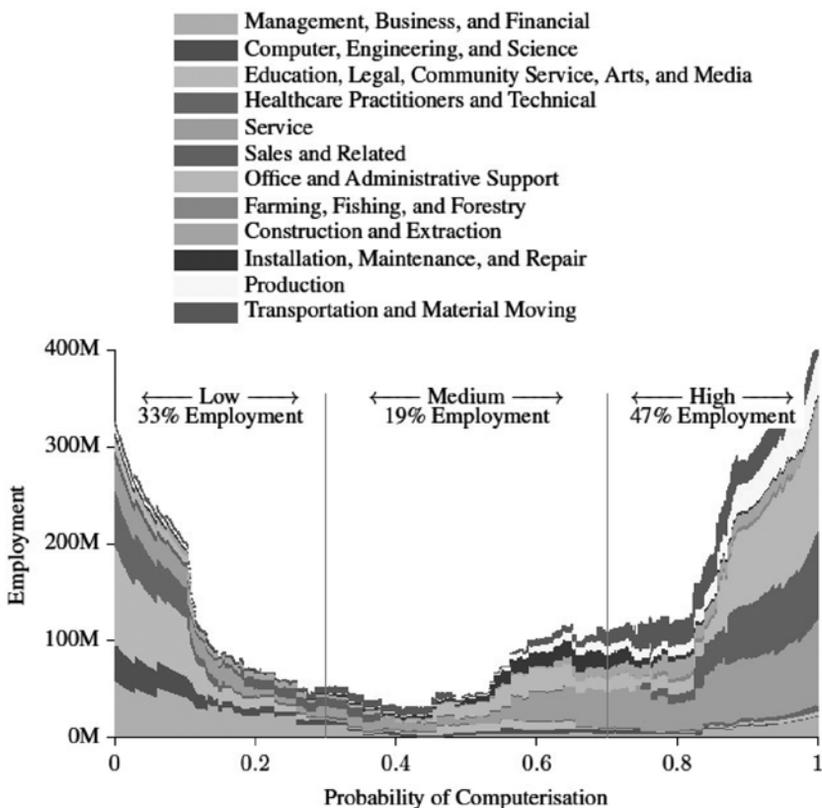
Los resultados nos llevan a la siguiente gráfica (Figura 2), el que separa las ocupaciones por su nivel de riesgo de ser computarizado en alta, media y baja. En el eje x tenemos las probabilidades de computarización, siendo 0.3 y 0.7 los umbrales.

Otros autores plantean modelos que introducen variaciones y efectos para tomar en cuenta aspectos que eran pasados por alto en estudios anteriores con el fin de refinar los resultados o ampliar el análisis de escenario. Berg *et al.* (2018) introducen dos supuestos claves: que el capital robótico es diferente al capital tradicional en cuanto al grado en que se sustituye trabajo humano y que el ahorro solamente se produce en los trabajadores de alta calificación y entre los dueños del capital. A partir de eso elaboran variantes que ratifican el impulso al ingreso derivado de la automatización y el efecto negativo para la equidad. Las rentas de los trabajadores tienden a reducirse en el corto plazo para recuperarse después en el largo, pero el tiempo transcurrido antes de la recuperación puede ser excesivamente extenso.

El rápido desarrollo de las tecnologías de Inteligencia Artificial introduce también otros potenciales impactos que requieren tomarse en cuenta en los estudios, introduciendo variaciones en los modelos. El crecimiento económico inducido por las nuevas tecnologías requiere ser proyectado introduciendo consideraciones a nivel de la organización de las empresas y la estructura de los mercados. Algunos consideran que el potencial disruptivo de estas nuevas tecnologías será mucho mayor que el

FIGURA 2

THE FUTURE OF EMPLOYMENT: HOW SUSCEPTIBLE ARE JOBS TO COMPUTERISATION?



Fuente: Frey & Osborne (2017).

previsto en los modelos, en tanto el propio proceso de generación de nuevas ideas y tecnologías se verá retroalimentado por ellas mismas, llegando potencialmente a crear singularidades tecnológicas (donde algunos sistemas superen las capacidades cognitivas humanas) que potencialmente generen cambios de magnitud sin precedentes en la evolución de la economía. Un estudio del National Bureau for Economic Research (Aghion *et al.*, 2017) especula a este respecto, mostrando el potencial de encontrar efectos inesperados y proponiendo diversos escenarios para futuros análisis.

Además de los efectos directos sobre el empleo y los beneficios en términos de mayor productividad, donde se focalizan la mayoría de los estudios, las tecnologías

de Inteligencia Artificial plantean beneficios y oportunidades que van mucho más allá. Las empresas, cada vez más, podrán ir mejorando la calidad y ajustando sus productos a la conveniencia y satisfacción de los consumidores. La IA puede reducir el tiempo que las personas gastan en tareas de bajo valor y hace más fluido el proceso de consumo, todo ello incrementa la demanda por los bienes y servicios producidos.

Un estudio de PwC (2018), al incorporar la perspectiva de los efectos en el consumo, pretendió presentar una imagen más clara del potencial económico global de las tecnologías de IA, explorando las consecuencias del incremento en el valor del trabajo y la productividad más allá de la sustitución del empleo por capital. El estudio también permitió diferenciar geográficamente y por sectores la distribución relativa de los impactos de la difusión de estas tecnologías. El modelo concluye que norteamérica y China son las regiones que obtendrán porcentualmente los mayores beneficios económicos provenientes de las tecnologías de Inteligencia Artificial, ambas en primer lugar por su liderazgo en investigación, y en el caso de China, por los incrementos en la productividad, mientras que en USA el impulso lo proporciona la notable disposición a innovar y la velocidad de difusión de nuevas tecnologías, sea por vía de reemplazo o de incremento.

Un estudio del FMI (Peralta-Alva & Agustin, 2018) efectúa un análisis focalizado en los factores de automatización y de caída en los precios de los bienes de capital, identificándolos como los factores claves que afectan el crecimiento futuro y la evolución de la desigualdad. El factor de automatización se define como un incremento en la elasticidad de sustitución entre capital y trabajo. Para ilustrar el impacto de ambos factores utilizan un modelo de equilibrio general dinámico estocástico (DSGE, en inglés). El modelo se basa en dos ingredientes claves: en primer lugar la economía produce tres bienes diferentes: manufactura, servicios de baja calificación y servicios de alta calificación (*low-skill* y *high-skill*). En segundo lugar, los consumidores tienen preferencias no homotéticas respecto de esos bienes, reflejando la participación creciente del gasto en servicios cuando crece el ingreso, característico de la información de USA.

El modelo asume que el capital es un sustituto del trabajo de media y baja calificación y que, en cambio, el capital y el trabajo de alta calificación son complementarios. También asume que la distribución de la calificación laboral en la economía es exógena y constante. El modelo es calibrado a base de los datos de USA y permite ilustrar los potenciales *trade off* entre el crecimiento y la desigualdad. Usando el modelo se analizan los impactos en el estado estacionario de dos fuentes posibles de cambio tecnológico, modelando *shocks* tecnológicos sea como un incremento en la elasticidad de sustitución entre el capital y el trabajo (automatización) o bien sea como una baja en el precio de los bienes de capital. En ambos casos el *shock* tecnológico impulsa la productividad y el ingreso mientras muestra un impacto no uniforme entre los distintos grupos de trabajadores dependiendo de su calificación, favoreciendo el trabajo de mayor evaluación y desfavoreciendo el de baja valoración. Posteriormente, el modelo es usado para evaluar el impacto relativo de políticas correctivas de los efectos identificados. Dependiendo de las preferencias de cada sociedad respecto del

ingreso versus la mitigación de la desigualdad, los gobiernos pueden querer distribuir las ganancias derivadas de la tecnología más uniformemente.

Ciertas políticas si son bien diseñadas pueden mitigar el *trade off* entre ambos objetivos. Por ejemplo, simulaciones ilustrativas muestran que un mayor gasto en educación no solo permite a los trabajadores menos calificados participar en las ganancias del cambio tecnológico sino también resultan en un incremento productivo. Esto es válido aun asumiendo que este mayor gasto requerirá tasas mayores de impuestos.

2.1. Evidencia para Chile

Los estudios realizados para Chile están basados en la polarización del empleo mediante el nivel de rutina de las tareas. Almeida *et al.* (2017) analizan específicamente los *softwares* complejos y su impacto en la polarización del empleo en el mediano plazo. Sus resultados indican un aumento en las tareas manuales y una reducción en las tareas abstractas o no rutinarias, lo que redistribuye un trabajador calificado a trabajos administrativos o de producción no calificada.

La Comisión Nacional de Productividad ha utilizado un Índice de Intensidad de Rutina (IIR) para desglosar el impacto de la automatización a nivel sectorial por medio de su informe “Formación de Competencias para el Trabajo en Chile” (Carrillo, 2018). Sobre la base de la encuesta PIACC 2015 y con datos de la Nueva Encuesta Nacional de Empleo (NENE) y CASEN han podido determinar que 61% del empleo tiene riesgo medio y alto de automatización, concentrándose a 24% con IIR alto. El sector de agricultura, silvicultura y pesca posee el índice más alto de rutina (3,07 puntos), sin embargo, el sector comercio tiene mayor participación en el empleo, lo que lo vuelve altamente susceptible a procesos de automatización por su rutina en los procesos. Los operadores de instalaciones y máquinas obtienen el puntaje más alto de intensidad de rutina (3,20 puntos), mientras que los directores y gerentes están dentro de los promedios más bajos (1,89 puntos).

A su vez, Álvarez (2016) analiza el impacto de las Tecnologías de Información y Comunicación (ICT) en las industrias de servicios gracias a su desarrollo en I+D y productividad, siendo más importante la inversión en ICT (Tecnologías de Información y Comunicación) que la de I+D (Investigación y Desarrollo) para dicho sector. Se considera ICT como un determinante de innovación a la hora de reducir costos y mejorar la producción. Otras versiones lo involucran directamente como insumo para el desarrollo de nuevos productos, obteniendo un impacto positivo en la productividad de las firmas. Estos resultados se vieron reflejados tanto a nivel de servicios como a nivel agregado.

2.2. Elasticidades de sustitución y costos de ajuste

Para medir el efecto de reemplazo de trabajadores por tecnología robótica, tendremos dos importantes elementos a considerar: la elasticidad de sustitución entre

TABLA 1

ELASTICIDADES DE SUSTITUCION ENTRE TRABAJO HUMANO Y CAPITAL ROBOTICO

Trabajo de investigación	Elasticidad de sustitución
(J. DeCanio, 2016)	2,798
(Acemoglu & Restrepo, 2017)	0,72
(Lin & Weise, 2018)	5,0
(Gallipoli & Makridis, 2018)	Manufactura: 1,72 Servicios 1,24 Valor base: 3,6
(Berg, F. Buffie, & Zanna, 2018)	Moderadamente baja: 2,5 Moderadamente alta: 5 Muy alta: 10, 20
Promedio	2.513

Fuente: Elaboración propia.

trabajador y capital robótico ϵ y los costos de ajuste. Los costos de ajuste se definen como el costo en reemplazar e implementar nueva maquinaria, o para estos efectos, en capital robótico. Para este trabajo se determinará que un valor pequeño implica mucho costo de ajuste, mientras que cantidades altas significarán poco costo de ajuste. Para elasticidades de sustitución bajas, es decir, poca sustitución entre capital robótico y trabajo y además altos costos de ajuste, no se produciría un efecto de caída de empleo y salarios, ya que no se deseará reemplazar maquinaria robótica por trabajadores. Por tanto, para reemplazar de forma rápida capital robótico por trabajadores se necesitaría reducir los costos de ajuste y aumentar la elasticidad de sustitución. Estos supuestos se verán sujetos a los *shocks* de precio y de TFP, de los que analizaremos sus efectos.

En la literatura es posible encontrar diversos valores utilizados para determinar las elasticidades de sustitución entre trabajo y capital robótico, detallados a continuación en la Tabla 1.

3. EL MODELO

Se desarrolla un modelo de equilibrio general estocástico dinámico (DSGE) para una economía pequeña y abierta como es el caso de Chile. La principal característica del modelo es que la economía no produce bienes robóticos sino que los importa directamente, es decir, es una economía dependiente de los desarrollos tecnológicos que ocurren en las economías desarrolladas. Así, esta economía demandará más robots solo si el precio internacional de estos productos cae.

La separación de la inversión en tecnología robótica (IT) y tradicional (non-IT) será de suma importancia a la hora de determinar el grado de susceptibilidad a

la automatización, estos se dividirán en capital robótico A_t y capital tradicional k_t . Se establecerá un supuesto de tipo de cambio real $e_t = 1.0$, considerando que la ley de un solo precio se cumple en el largo plazo, también se supone libre movilidad de capitales.

3.1. Familias

El hogar representativo maximiza la siguiente función de utilidad, sujeto a la restricción presupuestaria:

$$\max_{\{c_t, n_t, b_{t+1}\}_{t=0}^{\infty}} \mathbb{E}_0 \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\frac{1}{1-\sigma} \left(c_t - \frac{\theta n_t^{1+\nu}}{1+\nu} \right)^{1-\sigma} - 1 \right) \right\}$$

$$s.t. \quad c_t = \tilde{w}_t n_t + b_t^F - \frac{b_{t+1}^F}{R_t} + \frac{b_{t+1}^{F*}}{R_t^* \Omega_t} - b_t^{F*} - T_t + r_t^z k_t + P_t^e A_t + \tilde{D}_t - I_t - M_t \cdot P_t^a$$

Donde c_t es el consumo, \tilde{w}_t es el salario real, n_t es el trabajo, representado por el número de horas, \tilde{D}_t son los dividendos por tener la propiedad de las firmas, b_t es la deuda que mantienen las familias con el gobierno, I_t es la inversión tradicional o no robótica, M_t son las importaciones y el precio de compra internacional de la tecnología robótica se representa por P_t^a . Las tasas de interés reales locales y extranjeras se denominan R_t y R_t^* , respectivamente, es decir, son los retornos por los activos domésticos y extranjeros, en los que $R_t = (1+r_t)$ y $R_t^* = (1+r_t^*)$.

Al hablar de inversiones en economías emergentes se suelen considerar más riesgosas que en países desarrollados, pero, a su vez, con un retorno mayor. Existen diversas formas de medir el costo del capital invertido en economías emergentes, donde la regla general suele ser que el retorno sea la suma de todas las tasas libres de riesgo más la prima de riesgo país, la que es la recompensa del inversionista por colocar sus activos en un país emergente. En este modelo será representado por la variable Ω_t . Por tanto, la tasa de interés doméstica estará constituida por la tasa de interés internacional más una prima de riesgo $R_t = \Omega_t \cdot R_t^*$.

Además, en la restricción presupuestaria contamos con impuestos de suma fija (Lump sum) denominados por T_t y la descripción de capital tradicional k_t a su precio r_t^z a diferencia del capital robótico A_t con su precio de arriendo de P_t^e . Estos capitales tienen una tasa de depreciación δ^k y δ^A , respectivamente.

Las funciones de utilidad de un consumidor representativo suelen ser separables o no separables. Para el presente modelo utilizaremos la función no separable Greenwood-Hercowitz-Huffman (GHH). De acuerdo con Correira *et al.* (1995), este tipo de función replica de mejor manera la volatilidad de las pequeñas economías emergentes, pequeñas y abiertas, como el caso de la economía chilena, en comparación

con países desarrollados, como US, UK o EU, por citar algunos. En este caso los consumidores no restringidos (agentes optimizadores o ricardianos) pueden comprar o vender capital tradicional o robótico que acumulan y arriendan a las firmas.

\mathbb{E}_0 nos indica la expectativa que tenemos en el tiempo cero, que incluye tanto las variables actuales como las rezagadas. El parámetro θ nos indica la desutilidad de trabajar que será calibrado para ajustar que el trabajo en estado estacionario $n_{ss} = 1/4$. La variable empleo n_t tiene signo negativo precisamente para representar la desutilidad del agente frente al trabajo.

Finalmente, tendremos dos leyes de movimiento: las de capital tradicional $k_{t+1} = I_t \xi_t^k + (1 - \delta^k) k_t$ y las de capital robótico $A_{t+1} = \xi_t^A M_t + (1 - \delta^A) A_t$. Los *stocks* de capital serán de propiedad de las familias, por ese motivo se incluyen en la restricción presupuestaria como parte del ingreso. El *shock* ξ_t^k estará afectando la inversión de capital tradicional, mientras que ξ_t^A influirá en las importaciones de robots.

Reemplazando las leyes de movimiento en la restricción presupuestaria, el problema de las familias a maximizar es:

$$\max_{\{c_t, n_t, b_{t+1}\}_{t=0}^{\infty}} \mathbb{E}_0 \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\frac{1}{1-\sigma} \left(c_t - \frac{\theta n_t^{1+\nu}}{1+\nu} \right)^{1-\sigma} - 1 \right) \right\}$$

$$s.t. \quad c_t = \tilde{w}_t n_t + b_t^F - \frac{b_{t+1}^F}{R_t} + \frac{b_{t+1}^{F*}}{R_t^* \Omega} - b_t^{F*} - T_t + r_t^z k_t + P_t^e A_t + \tilde{D}_t - \frac{k_{t+1} + (1 - \delta^k) k_t}{\xi_t^k}$$

$$- P_t^a \left(\frac{A_{t+1} + (1 - \delta^A) A_t}{\xi_t^A} \right)$$

Condiciones de primer orden:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial c_t} : \left(c_t - \frac{\theta n_t^{1+\nu}}{1+\nu} \right)^{-\sigma} - \lambda_t = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial n_t} : - \left(c_t - \frac{\theta n_t^{1+\nu}}{1+\nu} \right)^{-\sigma} \cdot \theta n_t^\nu + \lambda_t \tilde{w}_t = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial b_{t+1}^F} : -\beta^t \lambda_t \frac{1}{R_t} + \mathbb{E}_t \left[\beta^{t+1} \lambda_{t+1} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial b_{t+1}^{F*}} : \beta^t \lambda_t \frac{1}{R_t^* \Omega} - \mathbb{E}_t \left[\beta^{t+1} \lambda_{t+1} \right] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial k_{t+1}} : -\beta^t \lambda_t \frac{1}{\xi_t^k} + \mathbb{E}_t \left[\beta^{t+1} \lambda_{t+1} \left(\frac{(1-\delta^k)}{\xi_{t+1}^k} + r_{t+1}^z \right) \right] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_{t+1}} : -\beta^t \lambda_t \frac{P_t^a}{\xi_t^A} + \mathbb{E}_t \left[\beta^{t+1} \lambda_{t+1} \left(\frac{(1-\delta^A)}{\xi_{t+1}^A} + P_{t+1}^e \right) \right] = 0 \quad (6)$$

Oferta de trabajo:

De la primera y segunda condición, podremos obtener la oferta de trabajo por parte de las familias:

$$\left(c_t - \frac{\theta n_t^{1+\nu}}{1+\nu} \right)^{-\sigma} \theta N_t^\nu = w_t \left(c_t - \frac{\theta n_t^{1+\nu}}{1+\nu} \right)^{-\sigma}$$

Finalmente, la oferta de trabajo es:

$$\theta n_t^\nu = w_t$$

Como es posible observar, se ha eliminado el efecto del consumo c_t para dejarlo solo en función del salario. En otras palabras, se ha sustraído el efecto riqueza, para aumentar la volatilidad del empleo. Además la elasticidad de Frisch es el inverso del parámetro ν .

Condiciones de Euler:

De la misma tercera ecuación, podemos obtener el Euler de consumo:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_t &= \left[\beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} R_t \right] = 1 \\ \mathbb{E}_t &= \left[\beta \frac{u_{t+1}^c}{u_t^c} R_t \right] = 1 \\ \mathbb{E}_t &= \left[\beta \frac{\left(c_{t+1} - \frac{\theta n_{t+1}^{1+\nu}}{1+\nu} \right)^{-\sigma}}{\left(c_t - \frac{\theta n_t^{1+\nu}}{1+\nu} \right)^{-\sigma}} R_t \right] = 1 \end{aligned}$$

Donde la tasa estocástica de descuento corresponde a:

$$\Lambda_{t,t+1} = \beta \frac{u_{t+1}^c}{u_t^c}$$

Así la ecuación de Euler del consumo también se puede expresar de la forma:

$$\mathbb{E}_t = \left[R_t \quad \Lambda_{t,t+1} \right] = 1$$

Luego, de la quinta condición de primer orden, podremos obtener la ecuación de Euler del capital tradicional.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_t \left[\beta \left(\frac{u_{t+1}^c}{u_t^c} \right)^{-\sigma} \left(r_{t+1}^z \cdot \xi_t^k + (1-\delta^k) \frac{\xi_t^k}{\xi_{t+1}^k} \right) \right] &= 1 \\ \mathbb{E}_t \left[\Lambda_{t,t+1} \left(r_{t+1}^z \cdot \xi_t^k + (1-\delta^k) \frac{\xi_t^k}{\xi_{t+1}^k} \right) \right] &= 1 \end{aligned}$$

De igual forma, para la ecuación de Euler del capital robótico tenemos con la sexta condición que:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_t \left[\beta \left(\frac{u_{t+1}^c}{u_t^c} \right)^{-\sigma} \left(\frac{\xi_t^A}{\xi_{t+1}^A} (1-\delta^A) + P_{t+1}^e \frac{\xi_t^A}{P_t^a} \right) \right] &= 1 \\ \mathbb{E}_t \left[\Lambda_{t,t+1} \left(\frac{\xi_t^A}{\xi_{t+1}^A} (1-\delta^A) + P_{t+1}^e \frac{\xi_t^A}{P_t^a} \right) \right] &= 1 \end{aligned}$$

Con el objeto de ganar realismo en las simulaciones se introducen costos de ajuste para la inversión, aunque bajos, por el supuesto que estamos analizando solo el ajuste de largo plazo de la economía, estos costos de ajuste nos permiten tener una medida más precisa del impacto de la inversión robótica sobre la economía (ver anexo A.3). Como es natural, la introducción de costos de ajustes genera dos “q” de Tobin para cada capital, y por tanto las inversiones dependen de estas variables.

3.2. Firma de bienes y servicios

Para este modelo contaremos con dos funciones de producción. La primera la denominaremos “Función de Producción Total” y la segunda será una “Función de

Producción Compuesta” que estará incluida en la primera. De esta forma tendremos una visión general de los grados de sustitución o complementariedad de los factores de trabajo (humano), capital robótico, importaciones no robóticas y capital tradicional o no robótico.

En la primera función de producción total tendremos z_t que corresponde a un *shock* tecnológico que mide los *shocks* a la productividad total de los factores (TFP). A su vez, contamos con el capital físico tradicional k_t , las importaciones no robóticas M_t^{NR} y la función de producción compuesta también llamada “contribución del empleo y capital robótico a la producción” \tilde{Y}_t . El parámetro ψ muestra los niveles de participación de cada factor.

$$Y_t = z_t^1 k_t^{\psi_1} \tilde{Y}_t^{\psi_2} M_t^{NR^{1-\psi_1-\psi_2}}$$

El *shock* de TFP seguirá un proceso estocástico de tipo AR (1):

$$\ln z_t = \rho_z \ln z_{t-1} + \xi_z$$

Ahora, la segunda función de producción \tilde{Y}_t estará compuesta por una función CES que analiza el nivel de sustitución entre trabajo N_t y capital robótico A_t , comprendiendo también un *shock* de productividad total de los factores (TFP) z^2 , básicamente suponemos que es constante, ayudándonos a calcular el estado estacionario (ver Anexo A.2). El parámetro ϵ es la elasticidad de sustitución entre trabajo y capital robótico dentro de una firma, que será clave para analizar qué sucede con el empleo cuando los grados de sustitución aumentan y se vuelve más efectivo el reemplazo por sistemas de automatización. Por último, el parámetro γ indica la participación de capital robótico y trabajo en la función de producción compuesta.

$$\tilde{Y}_t = z^2 \left(\gamma A_t^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} + (1-\gamma) N_t^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \right)^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}}$$

Condiciones de primer orden:

Mediante las primeras derivadas y derivadas cruzadas podremos obtener los efectos que existen entre las dos funciones de producción. En la primera derivada podemos ver cuál es el efecto de la contribución de empleo y capital robótico en la función de producción total:

$$\frac{\partial Y_t}{\partial \tilde{Y}_t} = \psi_2 \frac{Y_t}{\tilde{Y}_t}$$

La siguiente derivada nos permite ver el efecto del capital robótico en la función de producción compuesta:

$$\frac{\partial \tilde{Y}_t}{\partial A_t} = \gamma \tilde{Y}_t^{-1} A_t^{-\epsilon}$$

Por medio de las derivadas cruzadas (o regla de la cadena) podremos analizar el impacto del capital robótico sobre la función de producción compuesta \tilde{Y}_t y esta a su vez sobre la función de producción total.

$$\frac{\partial Y_t}{\partial \tilde{Y}_t} \cdot \frac{\partial \tilde{Y}_t}{\partial A_t} = \gamma \left(\frac{\tilde{Y}_t}{A_t} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}$$

$$\frac{\partial Y_t}{\partial \tilde{Y}_t} \cdot \frac{\partial \tilde{Y}_t}{\partial Y_t} = \psi_2 \gamma \frac{\tilde{Y}_t^{1-\epsilon}}{A_t^\epsilon} Y_t$$

Con lo que finalmente obtendremos que las demandas de capital robótico y trabajo:

$$A_t : \psi_2 \gamma \frac{Y_t}{\tilde{Y}_t} \cdot \left(\frac{\tilde{Y}_t}{A_t} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}$$

$$N_t : \psi_2 (1 - \psi) \frac{Y_t}{\tilde{Y}_t} \cdot \left(\frac{\tilde{Y}_t}{N_t} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}$$

3.3. Restricción de la economía

Las familias en economía abierta son deudores netos en el exterior b_t^{F*} , mientras que ellas son acreedoras netas a nivel local b_t^F , ofreciendo préstamos al gobierno.

$$c_t = \tilde{w}_t n_t + b_t^F - \frac{b_{t+1}^F}{R_t} + \frac{B_{t+1}^{F*}}{R_t^* \Omega_t} - b_t^{F*} + \frac{S_t P_t^c}{P_t} Q_t - T_t + r_t^z k_t + P_t^e A_t + \tilde{D}_t - I_t - M_t \cdot P_t^a$$

Donde S_{t+1} es el tipo de cambio nominal, el precio doméstico es P_{t+1} y los *commodities* están definidos como Q_t .

El tipo de cambio real, que para nuestros efectos será de $e_t = 1.0$ está compuesto por el tipo de cambio nominal S_t , el precio internacional P_t^* y el precio doméstico P_t .

$$e_t = \frac{S_t P_t^*}{P_t}$$

Además, tendremos como definición que:

$$\begin{aligned} &\rightarrow \frac{B_{t+1} S_t}{\Omega_t R_t^*} \\ &\rightarrow \frac{B_{t+1} S_t}{\Omega_t R_t^*} \cdot \frac{1}{P_t} \cdot \frac{P_{t+1}}{P_{t+1}} \cdot \frac{S_{t+1}}{S_{t+1}} \\ &\rightarrow \frac{b_{t+1}}{\Omega_t R_t^*} \cdot \frac{S_t}{P_t} \cdot \frac{P_{t+1}}{S_{t+1}} \end{aligned}$$

Por tanto

$$b_t = \frac{B_t}{P_t} \quad \text{además:} \quad b_{t+1} = \frac{B_{t+1}}{S_{t+1} P_{t+1}}$$

Con estas definiciones obtenemos:

$$c_t = \tilde{w}_t n_t + b_t^F - \frac{b_{t+1}^F}{R_t} + \frac{b_{t+1}^{F*}}{R_t^* \Omega} - b_t^{F*} - T_t + r_t^z k_t + P_t^e A_t + \tilde{D}_t - I_t - P_t^a M_t$$

Por parte del gobierno:

$$g_t + b_t^G + b_t^{G*} = T_t + \frac{b_{t+1}^G}{R_t} + \frac{b_{t+1}^{G*}}{R_t \Omega_t}$$

A nivel agregado sabremos que:

$$\begin{aligned} b_t^* &= b_t^{F*} + b_t^{G*} \\ b_t^F &= b_t^G \end{aligned}$$

Los dividendos, por su parte, estarán compuestos por los beneficios recibidos de la firma de bienes, los de capital tradicional y capital robótico:

$$\begin{aligned} \tilde{D}_t &= \Pi_t^B + \Pi_t^K + \Pi_t^A \\ \tilde{D}_t &= \left(y_t - \frac{W_t N_t}{P_t} - \frac{r_t^z K_t}{P_t} - \frac{P_t^e A_t}{P_t} \right) + \left(\frac{r_t^z K_t}{P_t} \right) + \left(\frac{P_t^e A_t}{P_t} \right) \\ \tilde{D}_t &= y_t - \tilde{w}_t n_t \end{aligned}$$

Al eliminar términos obtendremos:

$$c_t + g_t + I_t = y_t + \frac{b_{t+1}^*}{\bar{R}_t \Omega_t} - b_t^* - M_t \cdot P_t^a$$

$$PIB_t = y_t - M_t \cdot P_t^a$$

Finalmente el producto y estará compuesto por:

$$y_t = c_t + I_t + g_t + e_t x_t^B + e_t P_t^c Q_t$$

En donde $e_t x_t^B + e_t P_t^c Q_t$ son valores reales multiplicados por el tipo de cambio real. Si consideramos las exportaciones:

$$x_t^B = \left(\frac{P_{i,t}^*}{P_t} \right)^{-\epsilon} y_t^*$$

Al suponer que: $P_{i,t}^* = P_t^*$ la exportación de bienes será equivalente a la demanda externa:

$$x_t^B = y_t^*$$

3.4. Balanza de pagos

El equilibrio estaría compuesto por el consumo, el gasto público, la inversión, el PIB y la deuda extranjera.

$$c_t + g_t + I_t = PIB_t + \left(\frac{b_{t+1}^*}{\bar{R}_t \Omega_t} - b_t^* \right)$$

De esta ecuación podemos obtener la balanza de pagos:

$$0 = \underbrace{\left(x_t - P_t^a \cdot M_t \right)}_{\text{Balanza Comercial}} + \underbrace{\frac{b_{t+1}^*}{\bar{R}_t \Omega_t} - b_t^*}_{\text{Cuenta de Capitales}}$$

3.5. Datos para la calibración

Los datos utilizados para los parámetros han sido recopilados del Banco Central de Chile por medio de series empalmadas y desestacionalizadas y de la base de datos KLEMS para Latinoamérica <http://laklems.net/> entre 1995 y 2015.

Por intermedio del Banco Central hemos podido obtener los siguientes *ratios* de la Tabla 2:

TABLA 2

RATIOS DEL BANCO CENTRAL DE CHILE

Descripción	Ratio	Valor
Importaciones sobre PIB	$\frac{m_{ss}}{PIB}$	0,3092
Deuda externa sobre PIB	$\frac{b_{ss}}{PIB}$	0,43
Gasto Público sobre PIB	$\frac{g_{ss}}{PIB}$	0,1190
Precio commodity sobre PIB	$\frac{q_{ss}}{PIB}$	0,1581
Inversión total sobre PIB	$\frac{I_{ss}}{PIB}$	0,23

Fuente: Elaboración propia.

De la base de datos KLEMS hemos obtenido los siguientes parámetros de la Tabla 3:

TABLA 3

DATOS KLEMS PARA CHILE

Descripción	Valor
Participación del trabajo	0,5188
Inversión robótica sobre PIB	0,017299
Horas trabajadas sobre total	0,25

Fuente: Elaboración propia.

4. CALIBRACION Y RESULTADOS

4.1. Calibración

Considerando la naturaleza del problema, es decir, la introducción de una tecnología radicalmente nueva, no existe la posibilidad de obtener datos para hacer estimaciones econométricas de series de tiempo, por eso se optó por calibrar el modelo a base de la información disponible. Así, la modelación matemática aplicada en este estudio utiliza parámetros obtenidos de literatura además de los *ratios* calculados en el apartado anterior con datos del Banco Central de Chile y KLEMS. Cada periodo representa un trimestre realizando una simulación en Matlab y Dynare para un periodo total de 20 años.

Tasas de depreciación:

Definimos las tasas de depreciación para capital tradicional en $\delta^k = 0,0183$ y para capital robótico $\delta^A = 0,0515$. Eden & Gaggl (2015). Esta diferencia radica en el hecho que el capital robótico tiene un grado de obsolescencia más acelerada respecto del capital de maquinaria tradicional.

Proporción media de actividad laboral:

Utilizando datos para Chile, hemos definido la cantidad de horas trabajadas en estado estacionario como $n_{ss} = 1/4$. Se calculó como el promedio de horas trabajadas entre 1995 y 2015 dividido por el total de horas de un año utilizando la base de datos KLEMS.

Participación laboral (*Labour share*):

Obtenida a partir de datos KLEMS, se divide la remuneración por trabajador (*labour compensation*) dividida en el PIB, entre los años 1995 y 2015 alcanzando un valor de 0,5188.

Ratio inversión robótica sobre PIB:

El cálculo del *ratio* $\frac{I^R}{PIB}$ se realizó por medio de la base de datos LAKLEMS separando la variable de formación bruta de capital fijo en dos: el capital tradicional compuesto de equipo de transporte, otra maquinaria y equipos, inversión en construcción no residencial y residencial, mientras que para el capital robótico hemos considerado: equipos computacionales (IT), equipos comunicacionales (IC) y *software*. Estos tres últimos ítems divididos en el PIB trimestral desde 1995 al 2015 obtenidos por el Banco Central de Chile conforman la inversión de capital robótico sobre PIB.

Los demás parámetros utilizados en la literatura tradicional se describen a continuación en las Tablas 4 y 5:

TABLA 4
PARAMETRIZACION

Descripción	Parámetro	Valor
Tasa de descuento	β	0,99
Tasa de interés	r_{ss}	$\frac{1}{\beta} - 1$
Elasticidad intertemporal	σ	2,0
Tasa estocástica de descuento	Λ_{ss}	β
Elasticidad por prima de riesgo	δ	0,001
Inversa de elasticidad de oferta laboral de Frisch	ν	1,0
Elasticidad de sustitución entre capital robótico y humano	ϵ	(variable)

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 5
SHOCKS Y PERSISTENCIA

Descripción	Parámetro	Valor
Persistencia del <i>shock</i> fiscal	ρ_g	0,9
Persistencia del <i>shock</i> al precio de los <i>commodities</i>	ρ_{pc}	0,9
Persistencia del <i>shock</i> de producción de <i>commodities</i>	ρ_q	0,9
Persistencia del <i>shock</i> de tecnología (TFP)	ρ_z	0,9
Persistencia del <i>shock</i> al precio internacional de capital robótico	ρ_{pa}	0,9
Persistencia del <i>shock</i> de capital robótico	ρ_a	0,9
Persistencia del <i>shock</i> de capital no robótico	ρ_k	0,9
Persistencia del <i>shock</i> a la tasa de interés externa	ρ_r	0,9
Persistencia del <i>shock</i> de deuda externa	ρ_y	0,9

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Funciones impulso respuesta

Con el modelo especificado en la sección anterior analizaremos los efectos de un *shock* de tecnología (TFP) y tanto la disminución como aumento en el precio del capital robótico que terminarán afectando el consumo, la inversión total (que incluye la inversión robótica y tradicional), la deuda externa, la balanza comercial, el trabajo, el salario, las importaciones, la tasa de interés doméstica y finalmente la producción o PIB.

Para los escenarios 1 y 2 veremos cómo afecta un *shock* de TFP y una caída en el precio internacional de capital robótico en 1% para muy bajos costos de ajuste que son consistentes con el supuesto que el análisis considerado en este estudio es de largo plazo. Considerando esto, cambiaremos las elasticidades de sustitución entre trabajo y capital robótico de acuerdo con los valores indicados en la literatura, comprendiendo elasticidades bajas, medias y altas. Es importante recordar que en este modelo los costos de ajuste con valores bajos indicarán bajos grados de esfuerzo en reemplazar e instalar maquinaria robótica, que mantendremos fijos en un valor arbitrariamente bajo. El objetivo de este ejercicio es muy simple, consiste en ilustrar las diferencias entre un *shock* estándar de productividad y uno asociado a la importación de robots.

En el escenario 3, contrario a la segunda simulación, se aumenta el precio de compra de capital robótico. El objetivo de este ejercicio es clave para el estudio: indicando qué pasaría si hoy es más difícil la adquisición de maquinaria robótica que en el futuro, cuyo costo cae permanentemente hasta un nuevo valor de equilibrio. Por eso, adicionalmente, se realiza un aumento de la inversión robótica sobre PIB en el estado estacionario $\frac{I^R}{PIB}$ simultáneamente con las diferentes alternativas respecto de las elasticidades de sustitución entre trabajo y robots. Con esto, capturamos el aumento futuro y permanente de la demanda del insumo robótico mediante su elasticidad de sustitución. En otras palabras, supondremos que si cae el precio en 1%, la demanda por ese insumo aumentará ϵ veces. En resumen, en el escenario 3 se simula cómo la economía transita a un nuevo estado estacionario, en que los precios de los robots son más bajos y por tanto la inversión en robots sobre el PIB es más alta.

El eje x representa los periodos de los impulsos-respuestas para 20 años en trimestres. En el eje y veremos cómo un aumento de 1% del *shock* sobre su estado estacionario producirá variaciones porcentuales acumulativas en la variable de interés.

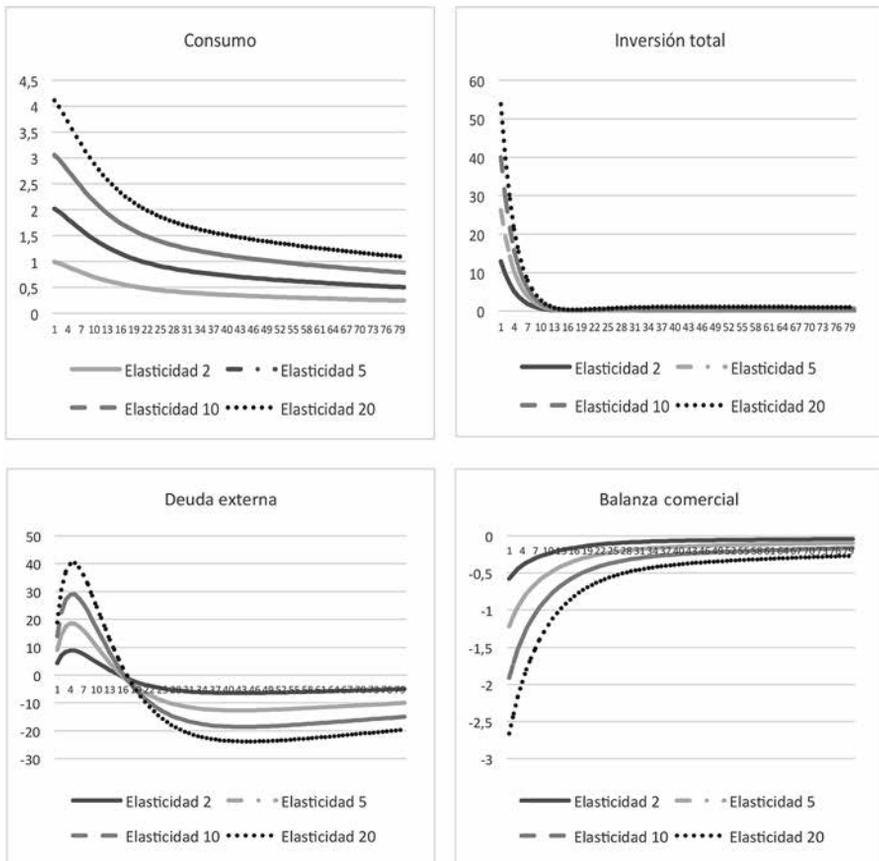
La productividad total de los factores TFP nos ayuda a medir qué tan eficiente y qué tan intensos son los factores de trabajo, capital (en nuestro caso tradicional y robótico) en la producción y crecimiento de un país. La literatura considera los *shocks* de TFP como exógenos al modelo, siendo la mayor causa de las fluctuaciones económicas. Otras investigaciones, como Comin & Gertler (2006), consideran el crecimiento de TFP como decisiones de innovación endógenas que afectan el modelo de ciclos reales.

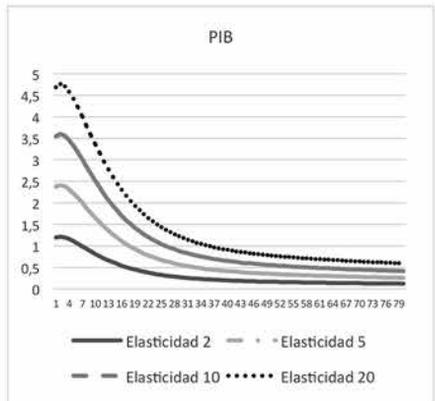
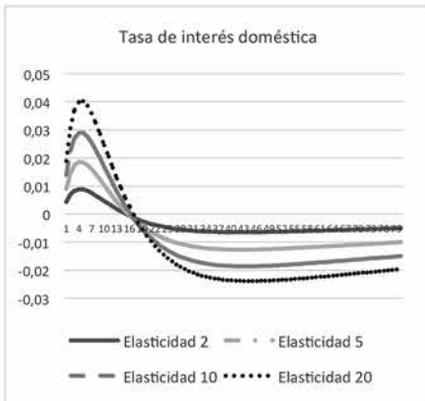
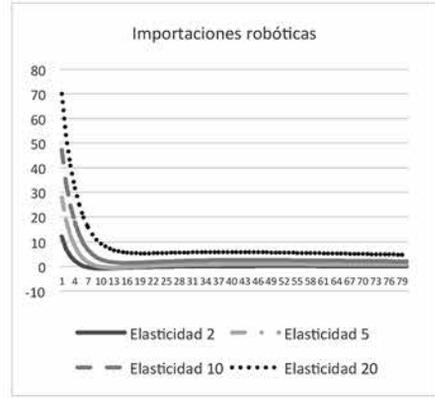
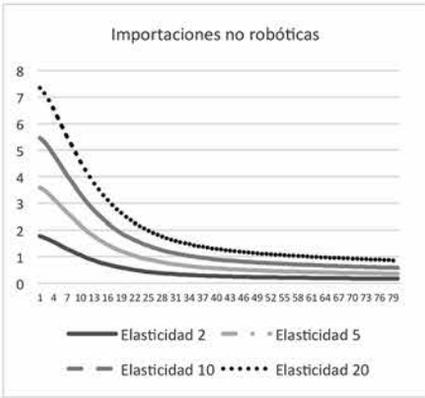
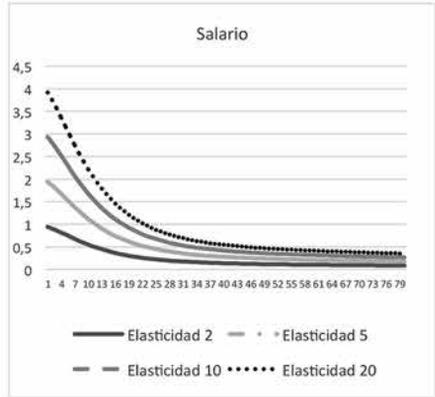
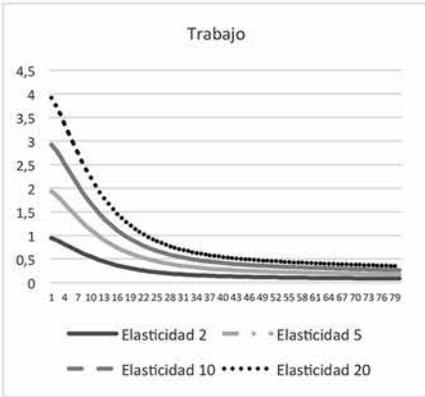
Como muestra la Figura 3, un alza de 1% en la productividad de los factores o TFP produce los efectos esperados de un *shock* tecnológico. Este produce un alza en el consumo con una tasa acumulativa de 4,7% por sobre el estado estacionario, mientras que acelera la inversión total dependiendo de los valores de la elasticidad de sustitución. Debemos recordar que la función de utilidad GHH elimina el efecto ingreso en la función de oferta laboral, es decir, se elimina la variable consumo c_t que suele contrarrestar las fluctuaciones en el empleo. Todo esto, para capturar el hecho que en economías pequeñas y abiertas los *shocks* producen más volatilidad en

FIGURA 3

IMPULSO-RESPUESTAS PARA ESCENARIO 1 CON SHOCK TFP DE 1%

Escenario 1: Shock tecnológico (TFP) de 1% con costos de ajuste bajos y elasticidades de sustitución de $\epsilon = 2$, $\epsilon = 5$, $\epsilon = 10$ y $\epsilon = 20$.





Fuente: Elaboración propia con base en el modelo del artículo.

el empleo que en economías cerradas. Además, al suponer un $\nu = 1,0$, la elasticidad de oferta laboral de Frisch es también unitaria, es decir, imponemos que los cambios del trabajo son iguales a los cambios en el salario $n_t = w_t$.

El alza en las importaciones tanto robóticas como no robóticas produce un aumento en la deuda externa, lo que termina con una balanza comercial neta negativa de hasta 2,7% para elasticidades altas. Las importaciones robóticas muestran un sustancial aumento comparado con las no robóticas, que solo suben a 7%. La tasa de interés se mantiene alta hasta en 0,04% para activar el consumo futuro. Este *shock* en la productividad local de los factores tiene un alto impacto en las importaciones robóticas llegando a una tasa acumulada de 70%, comparadas con las no robóticas que llegan a 7%. En definitiva, el alza del PIB se debe a la combinación de reacciones favorables en la economía, ya sea tanto por un aumento en el trabajo y el consumo como también un aumento considerable en la inversión total.

La figura 4 muestra una caída de 1% en el precio de importación de los robots, mostrando un escenario completamente distinto al primer *shock* de TFP dependiendo de las elasticidades de sustitución. La caída de 1% en el precio internacional del capital robótico produce importantes efectos en el empleo, corroborando la hipótesis planteada en este estudio dependiendo de la elasticidad de sustitución entre robots y trabajo. Primero, analicemos el consumo, el que comienza con una leve alza para elasticidades de sustitución bajas ($\epsilon = 2$), pero a medida que el grado de sustitución entre capital robótico respecto del trabajo humano aumenta, la caída en el consumo es más pronunciada llegando hasta -0,04% para elasticidades altas, diametralmente diferente al alza de 4,7% del escenario 1 con *shock* de TFP. Segundo, el alza en la tasa de interés doméstica produce una decisión intertemporal de postergar consumo inmediato para los periodos siguientes.

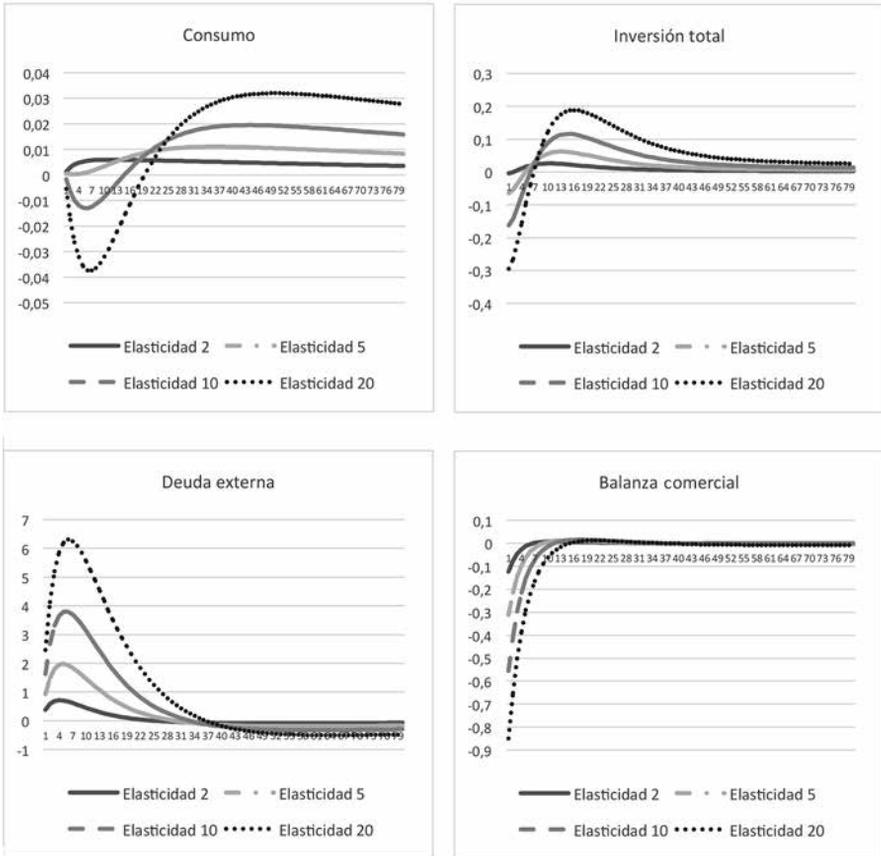
El permitir las importaciones de capital robótico, gracias a los bajos costos de ajuste y altas tasas de sustitución, provoca un alza en la deuda externa y una balanza comercial negativa, como es de esperar. Además de la entrada de capital robótico con alzas de hasta 70%, también se genera una caída en la inversión total de 0,3% que luego comienza a recuperarse en los periodos siguientes. Sin embargo, la caída en el consumo, en el trabajo y salarios termina por mostrar una baja en el PIB de la economía de 0,8%. Esto ocurre porque el PIB es una medida de producción doméstica, por tanto, si bien aumenta la producción hecha con insumos importados, la producción doméstica propiamente tal, descontando las importaciones, cae.

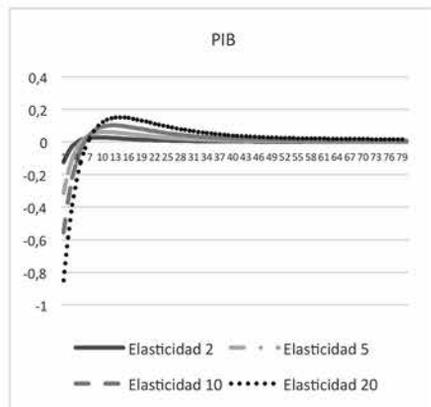
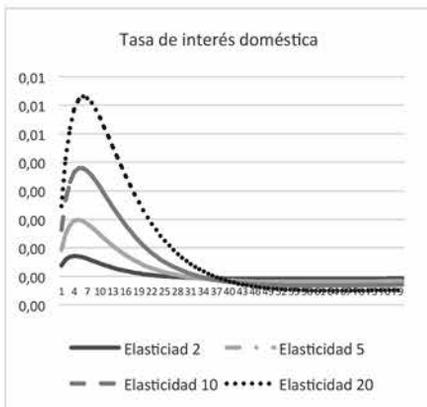
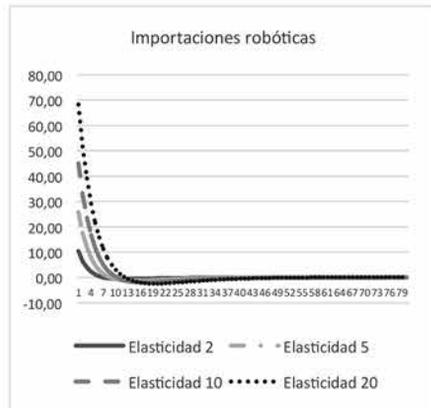
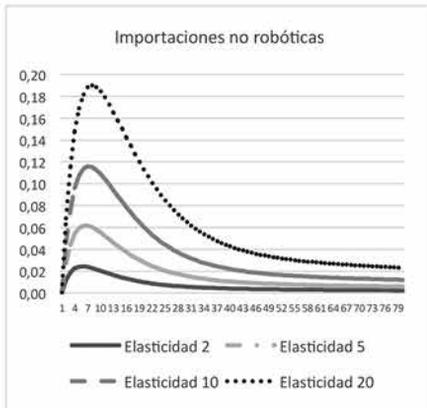
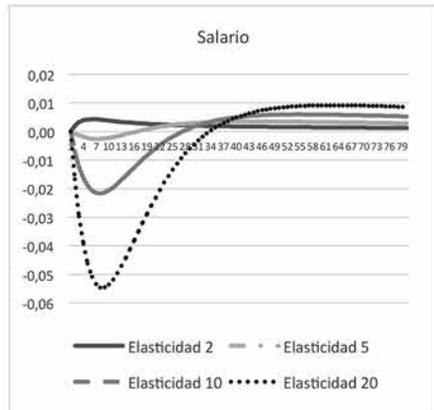
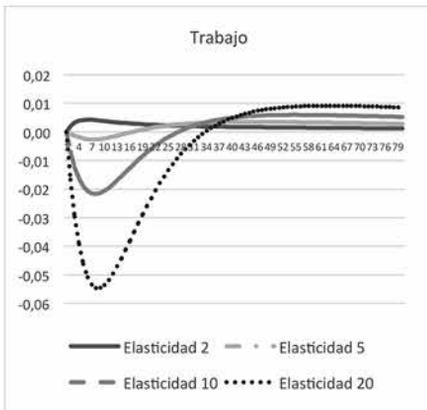
El aspecto más importante a considerar es el efecto en el trabajo, que muestra un comportamiento diferente a base de la elasticidad de sustitución aplicada y contraria a lo planteado en el escenario 1 (Figura 3). Para el caso de elasticidades bajas, es decir, poca capacidad de cambiar trabajo por tecnología robótica, el trabajo muestra una reacción positiva, permitiendo la entrada de más trabajadores al mercado laboral. Sin embargo, a medida que la elasticidad de sustitución crece $\epsilon = 5$ a $\epsilon = 20$ se comienza a observar una caída en el empleo de hasta 0,055% para un *shock* de disminución del precio internacional en 1%. Esta es directa consecuencia de la capacidad de sustituir

FIGURA 4

IMPULSO-RESPUESTAS PARA ESCENARIO 2, CON SHOCK DE DISMINUCION DEL PRECIO INTERNACIONAL DE COMPRA DE CAPITAL ROBOTICO DE 1%

Escenario 2: Shock de disminución del precio internacional de compra de capital robótico de 1% y elasticidades de sustitución de $\epsilon = 2$, $\epsilon = 5$, $\epsilon = 10$ y $\epsilon = 20$.





Fuente: Elaboración propia con base en el modelo del artículo.

capital robótico por trabajo, que sin embargo comienza a cambiar su tendencia a partir del segundo año (8° trimestre) para luego quedar estable en valores positivos bajo un nuevo estado estacionario permanente. Los bajos costos de ajuste permiten un rápido ingreso de capital robótico extranjero, produciendo estos efectos en el trabajo. Es interesante recordar que el salario muestra un comportamiento similar por aplicar una función GHH en las familias.

El análisis de la caída del PIB a 0,8% para altas elasticidades muestra en resumen los efectos provocados por la robotización. La caída en el empleo inicial produce a su vez una caída en el consumo con comportamiento cíclico en el PIB. No obstante, a partir del segundo año se genera un cambio de tendencia que genera un nuevo estado estacionario con una tasa de inversión sobre PIB más alta. Este escenario corrobora nuestra hipótesis de efectos adversos por la llegada masiva de material robótico que reemplace el trabajo humano, que expone a la fuerza laboral a procesos de adaptación en sus labores.

En este último escenario representado por la Figura 5 suponemos que el precio internacional por capital robótico es alto hoy, lo que dificulta la entrada al país de nueva tecnología robótica, pero que este caerá en el futuro hasta alcanzar un nuevo equilibrio permanente más bajo, situación contraria al ejercicio anterior. Como se mencionó anteriormente, para analizar este cambio permanente suponemos que en el largo plazo la inversión robótica va a aumentar con rapidez, convirtiéndose este valor en el nuevo estado estacionario.

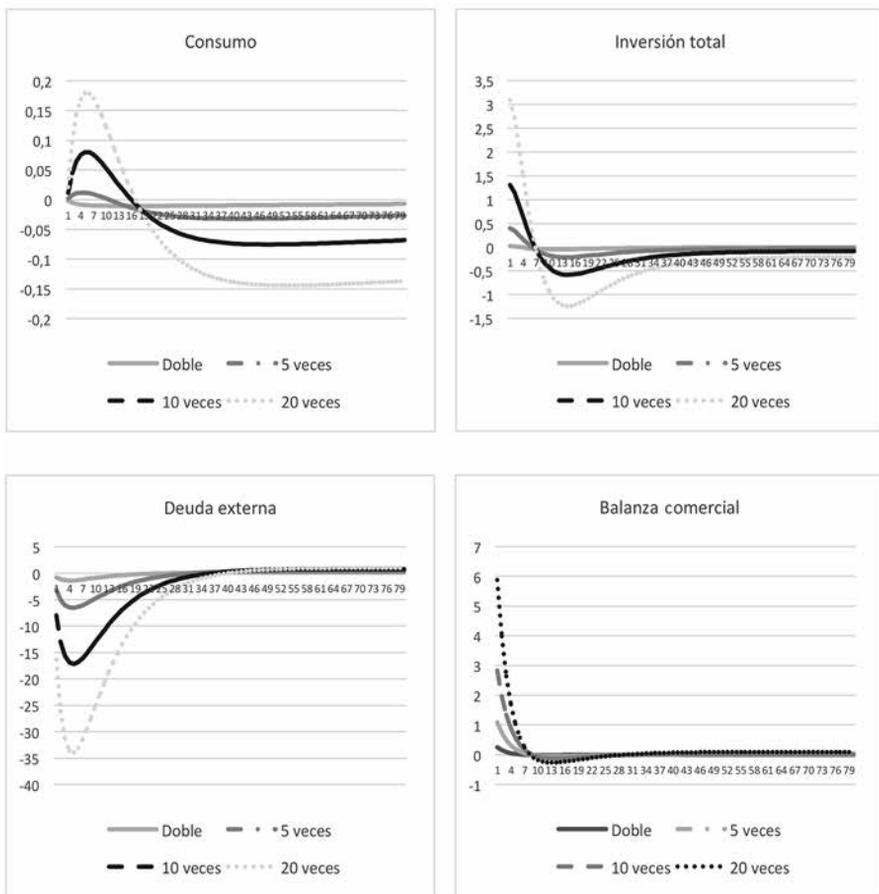
Observamos que antes que caigan los precios de los robots el PIB es 6% más alto que el equilibrio final, provocado por varios factores. Por un lado tenemos un consumo más alto, 0,18% para elasticidad alta, favorecido por una baja tasa de interés doméstica que a su vez incentiva la inversión total en 3% por sobre el estado estacionario final. La cantidad de importaciones no robóticas disminuye en 0,8%, sin embargo, las importaciones robóticas son bastante menores que el equilibrio final, hasta 50%, consecuentes con un precio internacional del capital robótico hoy más caro que el estado estacionario. Este efecto provoca una caída en la deuda externa de hasta 35%, por una balanza comercial con un saldo positivo de 6% por sobre el estado estacionario final.

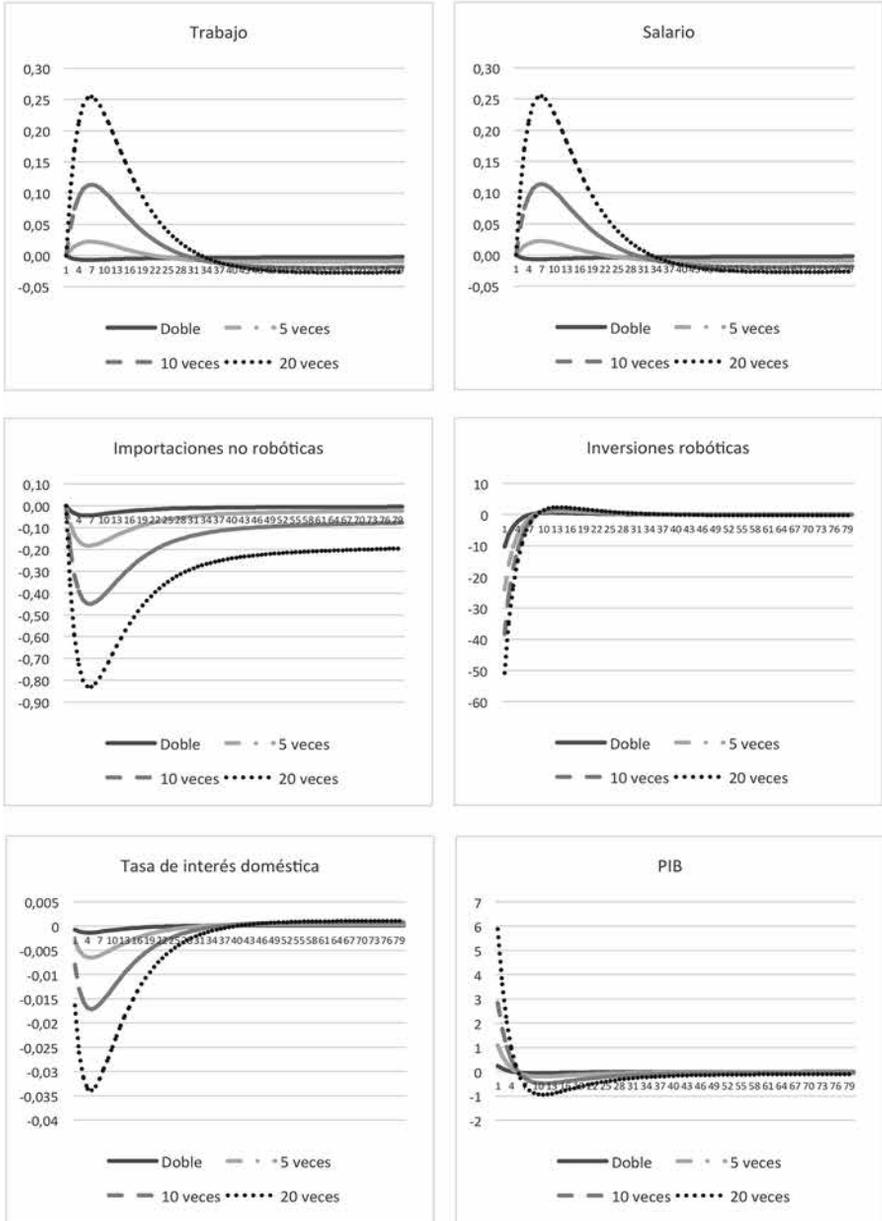
Finalmente, existe un considerable contraste en relación con el comportamiento del empleo. Cuando suponemos que los precios de los robots serán permanentemente más bajos en el futuro y con un aumento en forma constante de la inversión de robots sobre el PIB, el empleo es hasta 0,25% por sobre el nivel que alcanzará en el nuevo estado estacionario. En otras palabras, en la medida que el precio de los robots caiga en forma permanente en 1%, el empleo caerá también en 0,25%, resultado cinco veces más alto que si la caída en el precio de los robots es solo transitorio (escenario anterior). De manera congruente, los salarios se ajustarán a la baja en la medida que pasa el tiempo para asegurar el pleno empleo.

FIGURA 5

IMPULSO-RESPUESTAS PARA ESCENARIO 3, CON UN *SHOCK* POSITIVO DE 1% EN EL PRECIO DE COMPRA INTERNACIONAL DE CAPITAL ROBOTICO MAS ALZAS DE INVERSION ROBOTICA

Escenario 3: *Shock* de aumento en el precio internacional de capital robótico de 1% frente a un aumento de la inversión robótica sobre PIB y elasticidades de sustitución de $\epsilon = 2$, $\epsilon = 5$, $\epsilon = 10$ y $\epsilon = 20$.





Fuente: Elaboración propia con base en el modelo del artículo.

4.3. Conclusiones y limitaciones del estudio

El presente estudio tuvo por finalidad proyectar los efectos de una entrada masiva de capital robótico a la economía chilena, impulsada por una baja en el precio internacional de estas tecnologías. Esos efectos se manifiestan en alteraciones producidas en el mercado laboral a raíz de la inversión en sistemas automatizados que desplacen el trabajo humano a nivel local. Se elaboró un modelo macro de equilibrio general basado en Lin & Weise (2018) en el que se separó el capital en tradicional y robótico, mediante fuentes IT y non-IT de la base de datos KLEMS. Bajo tres simulaciones, se analizaron los efectos en la economía considerando un *shock* de productividad, de disminución y de aumento en el precio de compra de capital tecnológico.

La contribución del estudio es proponer un modelo macro de equilibrio general para una economía pequeña y abierta que no produce robots sino que los importa directamente del mercado internacional. Entonces, a diferencia de Lin & Weise (2018), la mayor demanda por robots ocurre por una caída del precio de este insumo productivo. Por tanto, los efectos dependen además de las elasticidades de sustitución entre trabajo y robots, de si el cambio en el precio de los robots es permanente, es decir, si este afecta o no el estado estacionario final de la economía por medio de la inversión de robots sobre el PIB.

Los ejercicios realizados en este estudio indican que una disminución en el precio internacional de capital robótico en 1%, en condiciones de altas tasas de sustitución, produce una caída en el empleo y los salarios de 0,05% si el cambio es transitorio y de 0,25% si es permanente, por un aumento en las importaciones de capital robótico.

Estos resultados pueden ser de gran interés a la hora de determinar políticas públicas para mitigar los efectos previstos, entre las que se encuentran programas de formación y capacitación laboral. También pueden derivarse orientaciones para el desarrollo profesional de los propios trabajadores, los que debieran tomar conciencia del nivel cognitivo que requieren y el grado de rutina que contienen las profesiones o actividades que eligen, y buscar alternativas para ampliar su espectro de competencias y ganar flexibilidad para enfrentar el mercado laboral en mejor forma, estando este marcado por la recurrente introducción de tecnologías que sustituyen o transforman las tareas que ejecutan.

Sin duda, todo este fenómeno será también un campo de nuevas oportunidades para las próximas generaciones, las que podrán desarrollar aplicaciones o servicios que den satisfacción a los requerimientos de estas tecnologías y así promuevan el surgimiento de nuevos negocios y empleos que impacten positivamente el crecimiento económico.

Finalmente, dentro de las limitaciones del modelo está el que no se encuentra segmentado por sectores ni tampoco distingue entre personal calificado y no calificado o por índice de rutina. Sin embargo, los resultados calibrados con datos para Chile sí muestran los efectos respecto del empleo y su importancia en políticas de regulación.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, R. (2016). *The impact of R&D and ICT investment on innovation and productivity in Chilean firms*. Tech. rep., Inter-American Development Bank.
- ACEMOGLU, D., & RESTREPO, P. (2018). *Artificial Intelligence, Automation and Work*. Working Paper, National Bureau of Economic Research.
- ACEMOGLU, D., & RESTREPO, P. (11 de 2018). Automation and New Tasks: The Implications of the Task Content of Production for Labor Demand. *Journal of Economic Perspectives*.
- ACEMOGLU, D., & RESTREPO, P. (2018). *Demographics and automation*. Tech. rep., National Bureau of Economic Research.
- ACEMOGLU, D., & RESTREPO, P. (2018). Low-skill and high-skill automation. *Journal of Human Capital*, 12, 204-232.
- ACEMOGLU, D., & RESTREPO, P. (2017). Robots and jobs Evidence from US labor markets. *NBER Working Papers*.
- AGHION, P., JONES, B. F., & JONES, C. I. (2017). *Artificial intelligence and economic growth*. Tech. rep., National Bureau of Economic Research.
- ALMEIDA, R., FERNANDES, A. M., VIOLLAZ, M., & ALMEIDA, R. K. (2017). Does the adoption of complex software impact employment composition and the skill content of occupations? evidence from Chilean firms. *World Bank*.
- BENAVENTE, J. M., BRAVO, D., & MONTERO, R. (2011). Wages and workplace computer use in Chile. *The Developing Economies*, 49, 382-403.
- BERG, A., F. BUFFIE, E., & ZANNA, L.-F. (5 de 2018). Should We Fear the Robot Revolution? (The Correct Answer is Yes). *IMF Working Papers*.
- BRAVO, J., GARCIA, M. A., & SCHLECHTER, H. (2018). *Automatización e Inteligencia Artificial, desafíos del Mercado Laboral*. Tech. rep., CLAPES UC.
- BRUSSEVICH, M., DABLA-NORRIS, E., KAMUNGE, C., KARNANE, P., KHALID, S., & KOCHHAR, K. (10 de 2018). Gender, Technology and the Future of Work. *IMF Staff Discussion notes*.
- BRYNJOLFSSON, E., & MCAFEE, A. (2012). *Race against the machine: How the digital revolution is accelerating innovation, driving productivity, and irreversibly transforming employment and the economy*. Brynjolfsson and McAfee.
- BRYNJOLFSSON, E., MITCHELL, T., & ROCK, D. (2018). What Can Machines Learn, and What Does It Mean for Occupations and the Economy? *AEA Papers and Proceedings*, 108, págs. 43-47.
- CARRILLO, F. (2018). *Formación de Competencias para el Trabajo en Chile*. Tech. rep., Comisión Nacional de Productividad.
- COMIN, D., & GERTLER, M. (2006). Medium-term business cycles. *American Economic Review*, 96, 523-551.
- CORREIA, I., NEVES, J. C., & REBELO, S. (1995). Business cycles in a small open economy. *European Economic Review*, 39, 1089-1113.
- DAVID, H., & DORN, D. (2013). The growth of low-skill service jobs and the polarization of the US labor market. *American Economic Review*, 103, 1553-97.
- EDEN, M., & GAGGL, P. (2015). *On the welfare implications of automation*. The World Bank.
- FREY, C. B., & OSBORNE, M. A. (2017). The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation? *Technological forecasting and social change*, 114, 254-280.
- GALLIPOLI, G., & MAKRIDIS, C. A. (2018). Structural Transformation and the Rise of Information Technology. *Journal of Monetary Economics*.
- J. DECANIO, S. (8 de 2016). Robots and Humans, Complements or Substitutes. *TJournal of Macroeconomics*.
- LIN, T. t., & WEISE, C. L. (2018). A New Keynesian Model with Robots Implications for Business Cycles and Monetary Policy. Available at SSRN 3064229.
- MANYIKA, J. (2017). A future that works: AI, automation, employment, and productivity. *McKinsey Global Institute Research, Tech. Rep.*
- MICCO, A., & others. (2019). The Impact of Automation in Developed Countries. *Santiago*.

- PAIVA, O. A., & PREVEDELLO, L. M. (2017). The potential impact of artificial intelligence in radiology. *Radiologia brasileira* , 50, V-VI.
- PERALTA-ALVA, A., & AGUSTIN, R. (9 de 2018). Technology and the Future of Work. *IMF Working Paper WP/18/207*.
- PwC. (2 de 2018). The macroeconomic impact of artificial intelligence. *PricewaterhouseCoopers reports*.
- ROJAS, A. (10 de 1997). Descomposicion del diferencial de tasas de interes entre Chile y el extranjero: 1992 a 1996. *Documentos de trabajo del Banco Central* , 1-13.
- SALEHI, H., & BURGUEÑO, R. (2018). Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering Structures* , 171, 170-189.
- ZEIRA, J. (1998). Workers, machines, and economic growth. *The Quarterly Journal of Economics* , 113, 1091-1117.

ANEXOS

Anexo A.1: Descripción de variables

TABLA 1

VARIABLES DEL MODELO

N°	Nombre	Variable
1	Consumo	c_t
2	Trabajo	n_t
3	Variable auxiliar	h_t
4	Tasa de interés real	r_t
5	Precio capital tradicional	r_t^z
6	Salario real	w_t
7	Producto	y_t
8	TFP	z_t
9	Capital tradicional	k_t
10	Capital robótico	A_t
11	Precio arriendo capital robótico	p_t^e
12	Inversión total	I_t
13	Gasto de gobierno	g_t
14	Exportaciones	x_t
15	Exportaciones de bienes	xb_t
16	Deuda externa	b_t
17	Tasa de interés internacional	r^*
18	Riesgo país	Ω
19	<i>Commodities</i>	q_t
20	Precio <i>commodity</i>	pc
21	Importaciones	m_t
22	Importaciones no robóticas	m_{nr}
23	Demanda externa	y^*
24	Precio de compra capital robótico	p_t^a
25	Contribución del trabajo y capital robótico a la producción	\tilde{y}_t
26	PIB	gdp
27	Q de Tobin robótico	qtb^r
28	Q de Tobin no robótico	qtb^{nr}
29	Balanza comercial	bot

Anexo A.2: Estados estacionarios en función de parámetros

Para resolver los estados estacionarios debemos tener en cuenta las dos ecuaciones correspondientes a los factores de producción:

$$Y_{ss} = z_{ss} k_{ss}^{\psi_1} \tilde{Y}_{ss}^{\psi_2} M_{ss}^{NR^{1-\psi_1-\psi_2}}$$

$$\bar{Y}_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} = \bar{z}_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \left(\gamma A_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} + (1-\gamma) N_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \right)$$

A.2.1) Capital robótico en estado estacionario:

Para comenzar, analizamos los datos que tenemos disponibles y vemos que mediante la base de datos KLEMS podemos realizar dos equivalencias, el primero es el capital robótico por su tasa de depreciación sobre PIB, que es lo mismo que inversión robótica sobre PIB:

$$\frac{\delta^A \cdot A_{ss}}{PIB_{ss}} = KLEMS = \frac{I_{ss}^R}{PIB_{ss}}$$

Con esta información podremos obtener el capital robótico en estado estacionario:

$$A_{ss} = \frac{I_{ss}^R}{PIB_{ss}} \cdot \frac{PIB_{ss}}{\delta^A}$$

A.2.2) θ en estado estacionario: El parámetro θ que captura la desutilidad de trabajar está presente tanto en la función de utilidad como en la oferta de trabajo, del que obtendremos un valor tal que nos permitirá que $n_{ss} = 1/4$. Pero antes definiremos un valor entregado por la base de datos KLEMS.

Labour Share:

$$LS = \frac{w_{ss} n_{ss}}{PIB_{ss}} = LabourShare$$

Con ello podremos crear la siguiente variable:

$$\tilde{L}S = w_{ss} w_{ss} = LS \cdot PIB$$

Además, esta modelación matemática incluye el supuesto que estamos eligiendo un z_{ss} tal que exista $y_{ss} = 1,0$, es decir, de una producción constante en estado estacionario. Con estas definiciones podremos comenzar a igualar la demanda con la oferta de empleo:

Demanda de empleo:

$$(1-\gamma) \cdot \psi_2 \cdot \tilde{Y}_{ss}^{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}} \cdot n_{ss}^{\frac{-1}{\epsilon}} = w_{ss}$$

Si asumimos que la elasticidad de sustitución es $\epsilon = 10$ obtendremos:

$$(1-\gamma) \cdot \psi_2 \cdot n_{ss}^{-1} \cdot 1 = w_{ss}$$

$$(1-\gamma) \cdot \psi_2 \cdot \frac{1}{n_{ss}} = w_{ss}$$

$$(1-\gamma) \cdot \psi_2 \cdot \frac{Y_{ss}}{n_{ss}} = w_{ss}$$

Por otra parte, la oferta de empleo:

$$\theta_{ss} n_{ss}^{\nu} = w_{ss}$$

Pero de acuerdo con la definición de $w_{ss} = \frac{\tilde{L}S}{n_{ss}}$. Uniendo ambas:

$$\theta_{ss} n_{ss}^{\nu} = \frac{\tilde{L}S}{n_{ss}}$$

Podremos finalmente encontrar un θ_{ss} tal que $n_{ss} = 1/4$

$$\theta_{ss} = \frac{\tilde{L}S}{n_{ss}^{\nu+1}}$$

$$\theta_{ss} = \frac{\tilde{L}S}{\left(\frac{1}{4}\right)^{\nu+1}} \quad ; \nu = 1.0$$

A.2.3) Participación de capital robótico y trabajo γ :

Si igualamos las productividades marginales de trabajo y capital robótico con los precios:

$$\frac{(1-\gamma) \cdot \psi_2 \cdot \tilde{Y}_{ss}^{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}} \cdot n_{ss}^{\frac{-1}{\epsilon}}}{\gamma \cdot \psi_2 \cdot \tilde{Y}_{ss}^{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}} \cdot A_{ss}^{\frac{-1}{\epsilon}}} = \frac{w_{ss}}{r_{ss} + \delta^a}$$

Pero recordando que $w_{ss} = \frac{\tilde{L}S}{n_{ss}}$ podemos obtener la siguiente equivalencia:

$$\frac{(1-\gamma) \cdot \psi_2 \cdot \tilde{Y}_{ss}^{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}} \cdot n_{ss}^{\frac{-1}{\epsilon}}}{\gamma \cdot \psi_2 \cdot \tilde{Y}_{ss}^{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}} \cdot A_{ss}^{\frac{-1}{\epsilon}}} = \frac{\tilde{L}S}{r_{ss} + \delta^a} \cdot \frac{1}{n_{ss}}$$

Se eliminan términos y se simplifica n_{ss} :

$$\frac{(1-\gamma)}{\gamma} \cdot \frac{n_{ss}^{1-1/\epsilon}}{A_{ss}^{-1/\epsilon}} = \frac{\tilde{L}S}{r_{ss} + \delta^a}$$

Al redistribuir términos hacia la derecha tendremos que:

$$\frac{(1-\gamma)}{\gamma} = \frac{\tilde{L}S}{r_{ss} + \delta^a} \cdot \frac{A_{ss}^{1-1/\epsilon}}{n_{ss}^{-1/\epsilon}}$$

Si definimos ϕ como todos los valores conocidos numéricamente ya obtenidos previamente:

$$\frac{(1-\gamma)}{\gamma} = \underbrace{\frac{\tilde{L}S}{r_{ss} + \delta^a} \cdot \frac{A_{ss}^{1-1/\epsilon}}{n_{ss}^{-1/\epsilon}}}_{\phi}$$

Nos quedaría:

$$\frac{(1-\gamma)}{\gamma} = \phi$$

Al redistribuir términos podremos determinar que la participación del capital robótico y trabajo γ en estado estacionario corresponde a:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \phi}$$

A.2.4) Función de producción compuesta \bar{Y}_{ss} y componente tecnológico \bar{z}_{ss} en estado estacionario:

Si vemos la función de producción compuesta en estado estacionario nuevamente:

$$\bar{Y}_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} = \bar{z}_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \left(\gamma A_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} + (1-\gamma) N_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \right)$$

De la productividad marginal del capital robótico obtenida anteriormente tendremos suficientes datos para despejar \bar{Y}_{ss} , considerando que \bar{z}_{ss} nos permitirá hacer el ajuste final para que se cumpla:

$$\bar{Y}_{ss} = \left[\frac{r_{ss} \delta^{\alpha}}{\gamma \psi_2 A_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}}} \right]^{\frac{\epsilon}{1-\epsilon}}$$

Por tanto, por medio de este \bar{z}_{ss} tal podremos cumplir la condición anterior.

$$\bar{z}_{ss} = \left(\frac{\bar{Y}_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}}}{\gamma \cdot A_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} + (1-\gamma) \cdot n_{ss}^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}}} \right)^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}}$$

A.2.5) Capital tradicional en estado estacionario k_{ss} :

Sabemos que el capital no robótico es:

$$\frac{\delta^k}{PIB} = \frac{I}{PIB} - \frac{I^R}{PIB}$$

$$k_{ss} = \left(\frac{I}{PIB} - \frac{I^R}{PIB} \right) \cdot PIB$$

A.2.6) Participaciones de capital tradicional, importaciones no robóticas y función de producción compuesta ψ_1 y ψ_2 :

Sabiendo los valores del capital no tradicional en estado estacionario podremos calcular ψ_1 :

$$\psi_1 \cdot \frac{Y_{ss}}{k_{ss}} = r_{ss} + \delta$$

$$\psi_1 = (r_{ss} + \delta^k) \cdot k_{ss}$$

Obtener ψ_2 :

Sabiendo que:

$$Y_{ss} = z_{ss} k_{ss}^{\psi_1} \tilde{Y}_{ss}^{\psi_2} M_{ss}^{NR^{1-\psi_1-\psi_2}}$$

Al momento de igualar las productividades marginales con sus precios de capital haremos dos supuestos, en donde tanto el tipo de cambio real y el precio del capital tendrán valores equivalentes a 1, reparando el hecho que en el largo plazo exista libre comercio de bienes y no existan aranceles.

$$(1 - \psi_1 - \psi_2) \cdot \frac{Y_{ss}}{M_{ss}^{NR}} = e_{ss} \cdot 1$$

Como tenemos el supuesto que el tipo de cambio real es $e_{ss} = 1,0$ y que $Y_{ss} = 1,0$

$$(1 - \psi_1 - \psi_2) \cdot Y_{ss} = M_{ss}^{NR}$$

$$(1 - \psi_1 - \psi_2) = M_{ss}^{NR}$$

Si lo dividimos por el PIB, tendremos las siguientes equivalencias:

$$\frac{(1 - \psi_1 - \psi_2)}{PIB} = \frac{M_{ss}^{NR}}{PIB} = \frac{M_{ss}}{PIB} - \frac{I_{ss}^R}{PIB}$$

$$(1 - \psi_1 - \psi_2) = \left(\frac{M_{ss}}{PIB} - \frac{I^R}{PIB} \right) \cdot PIB$$

Por tanto, el valor de ψ_2 es:

$$\psi_2 = (1 - \psi_1) - \left(\frac{M_{ss}}{PIB} - \frac{I^R}{PIB} \right) \cdot PIB$$

A.2.7) Obtener M_{ss} y $\frac{1}{PIB}$:

Si denominamos:

$$\phi_2 = \frac{M_{ss}}{PIB}$$

Veremos que este parámetro también corresponde a:

$$\phi_2 = \frac{M_{ss}}{Y_{ss} + M_{ss}}$$

Por simplicidad, al establecer que en estado estacionario $Y_{ss} = 1,0$

$$\phi_2 = \frac{M_{ss}}{1 + M_{ss}}$$

Con ello:

$$M_{ss} = \frac{\phi_2}{1 - \phi_2}$$

Con esto podremos establecer finalmente $\frac{1}{PIB}$ en estado estacionario:

$$\frac{1}{PIB} = \frac{1}{Y_{ss} + M_{ss}} = \frac{1}{1 + M_{ss}}$$

Anexo A.3: Resumen de Log linealizaciones

Para el desarrollo de estas log-linealizaciones, crearemos la siguiente variable auxiliar:

$$h_t = \left(c_t - \frac{\theta}{1 + \nu} n_t^{1+\nu} \right)$$

Euler de consumo:

$$1) \quad \hat{h}_t = \hat{h}_{t+1} - \frac{1}{\sigma} \hat{R}_t$$

Oferta de trabajo:

$$2) \quad v\hat{n}_t = \hat{w}_t$$

Oferta de capital no robótico y robótico (costos de ajuste representado por Φ)**No robótico:**

$$3) \quad \widehat{qtb}^{nr} = \beta E_t \left\{ \widehat{qtb}^{nr}_{t+1} \right\} + \left[1 - \beta(1 - \delta^k) \right] E_t \left\{ \hat{r}_{t+1}^z \right\} - \hat{r}_t$$

$$4) \quad \hat{i}_t - \hat{k}_t = \hat{\Phi}^{nr} \cdot \widehat{qtb}_t^{nr}$$

Robótico:

$$5) \quad \widehat{qtb}^r = \beta E_t \left\{ \widehat{qtb}^r_{t+1} \right\} + \left[1 - \beta(1 - \delta^A) \right] \cdot (P_{t+1}^e - P_t^a) - \hat{r}_t$$

$$6) \quad \hat{m}_t - \hat{A}_t = \hat{\Phi}^r \cdot \widehat{qtb}_t^r$$

Tasa de interés:

$$7) \quad \hat{r}_t = \left(\hat{r}_t^* + \hat{\Omega}_t \right)$$

Prima por riesgo:

$$8) \quad \hat{\Omega}_t = \delta \cdot \hat{b}_t$$

Funciones de producción:

$$9) \quad \hat{y}_t = \hat{z}_t + \psi_1 \cdot \hat{k}_t + \psi_2 \cdot \hat{Y}_t + (1 - \psi_1 - \psi_2) \cdot \hat{M}_t^{NR}$$

$$10) \quad \hat{Y}_t = \gamma \cdot \left(\frac{\hat{z}_{ss}}{\hat{z}_{ss}^e} \right)^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \cdot \left(\frac{\hat{A}_{ss}}{\hat{Y}_{ss}} \right)^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \cdot \hat{A}_t + (1 - \gamma) \cdot \left(\frac{\hat{z}_{ss}}{\hat{z}_{ss}^e} \right)^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \cdot \left(\frac{n_{ss}}{\hat{Y}_{ss}} \right)^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \cdot \hat{n}_t$$

Demanda de trabajo:

$$11) \quad \hat{w}_t = \left(\hat{y}_t - \hat{\tilde{y}}_t \right) + \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\hat{\tilde{y}}_t - \hat{n}_t \right)$$

Demanda de capital no robótico:

$$12) \hat{k}_t = \hat{y}_t - \hat{r}_t^z$$

Demanda de capital robótico:

$$13) P_t^a = (\hat{y}_t - \hat{y}_t) + \frac{1}{\epsilon} \cdot (\hat{y}_t - \hat{A}_t)$$

Demanda de importaciones no robóticas:

$$14) \hat{m}_t^{nr} = \hat{y}_t$$

Ley de movimiento de capital no robótico:

$$15) \hat{k}_{t+1} = (1 - \delta^k) \cdot \hat{k}_t + \delta^k \cdot \hat{i}$$

Ley de movimiento de capital robótico:

$$16) \hat{A}_{t+1} = (1 - \delta^A) \cdot \hat{A}_t + \delta^A \cdot \hat{m}$$

Restricción presupuestaria:

$$17) c_{ss} \cdot \hat{c} = \hat{y}_t - \hat{m}_{ss}^r \cdot (\hat{m}_t + \hat{P}_t^a - \hat{m}_{ss}^{nr} \cdot \hat{m}_{nr} - g_{ss} \cdot \hat{g}_t - \hat{i}_{ss}^k \cdot \hat{i}_t + \frac{b_{ss}}{r_{ss}} \cdot 1 \cdot (\hat{b}_t - (r^* + \hat{\Omega})))$$

PIB

$$18) gdp = \hat{y}_t - \hat{m}_{ss}^r \cdot (\hat{m}_t + \hat{P}_t^a) - (m_{ss}^{nr} \cdot \hat{m}^{nr})$$

Balanza comercial:

$$19) bot = x_{ss}^b \cdot \hat{x}b + (pc_{ss} \cdot q_{ss}) \cdot (\hat{q}_t + \hat{p}c_t) - (m_{ss}^r \cdot \hat{m}_t + \hat{P}_t^a + m_{ss}^{nr} \cdot \hat{m}^{nr})$$

Exportaciones totales:

$$20) \hat{x} = x_{ss}b \cdot \hat{x}b + (pc_{ss} \cdot q_{ss}) \cdot (\hat{q} + \hat{p}c)$$

Exportaciones de no commodities:

$$21) \hat{x}b = \hat{y}_t^*$$

Shock de demanda externa:

$$22) \hat{y}_t^* = \rho_y \cdot \hat{y}_{t-1}^* + \xi_y$$

Shock fiscal:

$$23) \hat{g}_t = \rho_g \cdot \hat{g}_{t-1} + \xi_g$$

Shock al precio de los commodities:

$$24) \hat{p}_c = \rho_{pc} \cdot \hat{p}_{c,t-1} + \xi_{pc}$$

Shock TFP:

$$25) \hat{z}_t = \rho_z \cdot \hat{z}_{t-1} + \xi_z$$

Shock al precio del capital robótico:

$$26) \hat{p}_t^a = \rho_{pa} \cdot \hat{p}_{t-1}^a - \xi_{pa}$$

Oferta de commodities:

$$27) \hat{q}_t = \rho_q \cdot \hat{q}_{t-1} + \xi_t^q$$

Shock a la tasa de interés externa:

$$28) \hat{r}_t^* = \rho_r \cdot \hat{r}_{t+1}^* + \xi_r^*$$

Variable auxiliar:

$$29) h_{ss} \cdot \hat{h}_t = c_{ss} \cdot \hat{c}_t - \theta \cdot n_{ss}^{1+\nu} \cdot n_{ss}$$

