

I N S T I T U T O D E E C O N O M Í A



MAGÍSTER en ECONOMÍA

2020

Efectividad de la política de cuarentenas para combatir el Covid-19 en Chile

Andrés Reyes S.

www.economia.uc.cl



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
INSTITUTO DE ECONOMÍA
MAGÍSTER EN ECONOMÍA

TESIS DE GRADO
MAGÍSTER EN ECONOMÍA

Reyes, Silva, Andrés Eduardo

Diciembre, 2020



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
INSTITUTO DE ECONOMÍA
MAGÍSTER EN ECONOMÍA

**EFFECTIVIDAD DE LA POLÍTICA DE CUARENTENAS PARA COMBATIR
EL COVID-19 EN CHILE**

Reyes Silva, Andrés Eduardo

Comisión

Jaime Casassus

Javier Turén

Santiago, Diciembre de 2020

EFFECTIVIDAD DE LA POLÍTICA DE CUARENTENAS PARA COMBATIR EL COVID-19 EN CHILE*

Andrés Reyes Silva[†]

Diciembre, 2020

Abstract

¿Ha sido efectiva la política de cuarentenas en Chile para combatir la propagación del COVID-19? El presente trabajo explora esta pregunta utilizando un modelo económico-epidemiológico dinámico en el que un planificador central puede implementar cuarentenas como estrategia de control de la pandemia. El dilema que surge en este contexto nace por la diferencia de intereses entre las autoridades y una ciudadanía heterogénea, debido a que el resguardo de vidas humanas conlleva un costo económico como lo es una caída en la producción agregada. Los resultados de la investigación, una vez que el modelo es calibrado para el caso de Chile, señalan que la inexistencia de cuarentenas provoca una propagación acelerada del virus, una cantidad mayor de infectados y fallecidos, junto con una mayor duración e intensidad que se prolonga por más tiempo. Sin embargo, la implementación de cuarentenas resulta efectiva solo a medida que el planificador central adopte un enfoque preventivo y siempre que la población presente altas tasas de cumplimiento e internalice el efecto de sus decisiones en la salud de los demás. En este contexto, a lo largo de 2 años, las cuarentenas podrían salvar cerca de 19.000 vidas a costa de una caída en la producción agregada en torno al 12 %. Finalmente, otro de los hallazgos del modelo es que al replicar de forma aproximada los niveles de confinamiento que ha presentado Chile, se puede predecir un rebrote de infectados cerca de la semana 40 después del primer caso confirmado de COVID-19. En suma, los resultados sugieren que la flexibilidad que tuvo el Gobierno chileno en aplicar cuarentenas en comparación a la política de cuarentena óptima del modelo solo tiene una efectividad moderada provocando un resultado número subóptimo de muertes registradas a expensas de una contracción no tan aguda de la actividad económica.

Palabras clave: Pandemia COVID-19, política de cuarentenas, bienestar intertemporal, confinamiento.

*Tesis escrita como estudiante de Magíster en Economía en el Instituto de Economía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Agradezco a mis guías de Tesis Jaime Casassus y Javier Turén por sus valiosos comentarios y constante apoyo a lo largo de la investigación. Agradezco también a mis padres, familia y amigos que me acompañaron en este arduo proceso de aprendizaje constante. Todos los errores u omisiones son de mi exclusiva responsabilidad.

[†]Comentarios: aereyes1@uc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La pandemia COVID-19 ha presentado un importante desafío para más de 180 países en el mundo con cifras que superan los 60 millones de contagios y más de 1,6 millones de vidas pérdidas ([Organización Mundial de la Salud, 2020a](#)). El enfoque que han adoptado las economías para combatir el avance de la enfermedad varía acorde con las características propias de cada una. Sin embargo, la tarea principal se encuentra en el ámbito sanitario, donde prima el resguardo de la vida humana. Ante la gravedad de esta situación, una de las principales medidas tomadas por los Gobiernos ha sido la implementación de cuarentenas prolongadas, que desafortunadamente generan una fuerte tensión entre las dimensiones sanitarias y económicas actuales ([Banco Interamericano de Desarrollo, 2020](#)).

La implementación de cuarentenas es una representación clara de cómo los Gobiernos han tratado de comprender y gestionar la pandemia de la mejor forma posible en un contexto adverso donde se ven enfrentados al siguiente dilema: *“la contención del virus mediante las cuarentenas implica costos no deseables que se traducen en desempleo, falta de ingresos y una potencial crisis económica”*. Una pieza clave para abordar esta disyuntiva es comprender la existencia de interacciones entre las decisiones económicas de las personas y las decisiones del Gobierno, dado que si no consideramos dichas interacciones, la efectividad de las políticas de cuarentena se verá limitada e incluso pueden incrementar las dificultades que atraviesan los países en esta lucha ([Eichenbaum, Rebelox y Trabandt, 2020](#)).

Las evidentes diferencias conductuales entre la población, que bien pueden ser ocasionadas por la edad, los recursos con los que cuentan, las expectativas y creencias sobre la probabilidad de contagio o cercanía con el virus, cobran relevancia para las autoridades en la toma de decisiones y afectan significativamente los tiempos de confinamiento y su gradualidad. Esto lo podemos ver, por ejemplo, en los altos niveles de incumplimiento de cuarentenas por parte de la población joven, la sobreexposición al virus por parte de las familias más vulnerables o la incapacidad de poner en cuarentena a toda la población por las implicancias económicas que esta medida conlleva ([Gollier, 2020](#); [Glover, Heathcote, Krueger y Ríos-Rull, 2020](#); [Kaplan, Moll y Violante, 2020](#); [OMS, 2020b](#)). Las situaciones descritas anteriormente, que generan conflicto entre Gobierno y los intereses de una población, las resumiremos en lo que denominamos el *Dilema del Bienestar Intertemporal*, de forma similar a lo que señalan [Chang y Velasco \(2020\)](#).

Frente a este contexto, el objetivo de esta Tesis es modelar la dinámica de una economía conformada por agentes heterogéneos y un Gobierno que debe elegir la política óptima de cuarentenas en cada periodo. En particular, la investigación se centra en estudiar el conflicto de intereses entre estos actores económicos que abordaremos gracias a la inclusión de interacciones entre las decisiones económicas de la población y las tasas de infección del virus. Adicionalmente, se estudia como la política óptima elegida por el Gobierno puede verse afectada negativamente a medida que la población presente altas tasas de incumplimiento o favorecida a medida que la población logra altos niveles de distanciamiento. Una vez desarrollado el modelo, se calibrará para su aplicación al caso de Chile utilizando las cifras oficiales de infectados de COVID-19 ([Ministerio de Salud de Chile, 2020a](#)). Bajo este contexto, se podrá evaluar el avance de la pandemia en diversos escenarios que han sido de interés tanto para la comunidad científica como económica.

Como punto de partida, se adopta una variación del modelo epidemiológico SIR presentado en [Atkeson \(2020\)](#), [Piguillem y Shi \(2020\)](#) y [Brotherhood, Kircher, Santos y Tertilt \(2020\)](#). Segmentamos la población en dos grupos, jóvenes y adultos mayores, quienes enfrentan un problema de optimización intertemporal en el que deben decidir sus niveles de trabajo, consumo y ahorro, pero cuyas decisiones afectan a toda la población. Tanto la incertidumbre que genera la presencia del COVID-19 como la interacción entre ambos agentes económicos, se aborda a través de las probabilidades de contagio del virus, la productividad en el trabajo y su estado de salud en cada periodo (susceptibles, febriles, infectados leves, infectados graves, recuperados o fallecidos). Luego, consideramos incorporamos a un Gobierno o planificador central que debe tomar la decisión de instaurar o levantar cuarentenas a lo largo del tiempo considerando dos objetivos principales: i) “minimizar la tasa de transmisión del COVID-19 desde agentes infectados a agentes susceptibles para evitar más contagios y muertes” y ii) “minimizar la caída en la producción que genera el confinamiento”.

Para el caso en que la dinámica de la pandemia se logra de forma descentralizada, es decir cuando el Gobierno no interviene con cuarentenas, se presentan dos hipótesis principales: i) el óptimo no será Pareto eficiente debido a que las personas infectadas, especialmente los jóvenes, no internalizan completamente el efecto de sus decisiones en la propagación del virus, y ii) que será óptimo para la economía en el largo plazo, sacrificar una mayor cantidad de vidas para evitar una recesión económica severa. Por otra parte, bajo un escenario centralizado, donde el Gobierno intercede en la economía, conjeturamos que si política de cuarentena óptima es masiva y adquiere un carácter preventivo al inicio de la pandemia, entonces no será necesario que sea prolongada. Por el contrario, una cuarentena inicial débil y flexible será más duradera y tendrá un mayor costo sanitario. Finalmente,

se realizará un análisis de bienestar en el modelo, en donde se analizará el impacto de la probabilidad de testeo y los niveles de incumplimiento de las cuarentenas, además del efecto que puede tener el distanciamiento social entre ambos grupos que conviven en la población.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se realiza una revisión de la literatura sobre el dilema del bienestar intertemporal expuesto anteriormente entre el Gobierno y la población. La Sección 3 describe el modelo tanto para los casos descentralizado y centralizado. La Sección 4 presenta la calibración del modelo para el caso chileno. La Sección 5 informa los resultados del modelo en ambos escenarios y también presenta la dinámica que adquiere la economía cuando se replica de forma aproximada la política de cuarentenas del Gobierno de Chile. La Sección 6 explora la sensibilidad del modelo mediante la afectación de la probabilidad de testeo, cambios en el cumplimiento de las cuarentenas, modificaciones en el porcentaje de interacción entre la población joven y anciana y el impacto sanitario que provocaría la llegada de una vacuna. Finalmente, la Sección 7 concluye.

2. EL DILEMA DEL BIENESTAR INTERTEMPORAL

La emergencia sanitaria a causa del COVID-19 ha despertado el interés tanto del área epidemiológica como económica que intentan dar respuesta a los acontecimientos que hemos podido presenciar durante este último tiempo. Bajo este escenario, es importante comprender cómo interactúa la pandemia y la economía y las dificultades que estas provocan en la formulación de políticas públicas. Podemos pensar que la imposición de cuarentenas puede provocar una comprensible reacción en la población que crea tensiones en la sociedad, ya que muchas personas no han podido regresar a su trabajo y continuar su vida como de costumbre. A lo largo del tiempo, esta tensión se vuelve cada vez más fuerte debido al surgimiento de otras dificultades como lo es la falta de ingresos en los hogares. A esta problemática, la denominaremos *Dilema del Bienestar Intertemporal*, de forma similar a lo que señalan [Chang y Velasco \(2020\)](#). Estos autores analizan como el impacto en la salud que trae el virus no es del todo exógeno mediante un modelo económico en que las decisiones individuales de cumplir (o no) con las medidas de salud pública relacionadas con el virus dependen de variables e incentivos económicos que responden a la política económica existente. Sus resultados nos permiten cimentar nuestra investigación: debido a que las políticas afectan la velocidad de transmisión del virus a través de incentivos, las medidas de salud pública y las políticas económicas pueden complementarse entre sí. Además, la credibilidad de las políticas anunciadas por los gobiernos es clave para descartar tanto las expectativas pesimistas autocumplidas como los problemas de inconsistencia temporal.

El enfoque clásico que ha adoptado la literatura epidemiológica para estudiar la aparición del COVID-19, se basa en la aplicación de modelos compartimentales determinísticos que permiten capturar diversas características de este tipo de brotes infecciosos. En estos modelos, la población es categorizada acorde con un estado de salud, por ejemplo susceptible, infectado, recuperado, de forma tal que se relacionan las variaciones de dichos grupos a través de la tasa de infección y el período infeccioso promedio. Adicionalmente, este tipo de modelación ha sido ampliamente utilizada para predecir las características de propagación de la enfermedad, su prevalencia o la duración de esta (Rojas, 2020; Guerrero-Nancuante y Manríquez, 2020; Wangping, Ke, Yang, Wenzhe, Shengshu, Shanshan, Jianwei, Fuyin, Penggang, Jing, Miao y Yao, 2020).

Como primera aproximación a estos modelos, consideramos el trabajo de Cooper, Mondal y Antonopoulos (2020). Los autores desarrollan el modelo epidemiológico Susceptible-Infectado-Recuperado (SIR) el cual proporciona un marco teórico para investigar la propagación del virus dentro de una comunidad. En particular, investigan como la evolución temporal de diferentes poblaciones y monitoreo de diversos parámetros es clave para varias comunidades de China, Corea del Sur, India, Australia, Italia y el estado de Texas en Estados Unidos. El modelo en cuestión proporciona información y predicciones sobre la propagación del virus en comunidades en que los datos registrados por sí solos no pueden. Se concluye que el virus COVID-19 puede estar bajo control en todas las comunidades consideradas, si se implementan las restricciones adecuadas y se implementan políticas sólidas para controlar las tasas de infección de manera temprana.

Por su parte, Tuan, Mohammadi y Rezapour (2020) extienden el modelo SIR clásico, para evaluar la propagación de la pandemia en base al modelo Susceptible-Expuesto-Sintomático-Asintomático-Recuperados (SEIAR). En este trabajo, se evidencia como la caracterización del avance de la pandemia es limitado debido a la inexistencia de mecanismos de control y la inclusión de otras variables que afectan a la población. Asimismo, consideramos el trabajo de Giordano, Blanchini, Bruno, Colaneri, Filippo, Mateo y IRCCS Force (2020) quienes presentan uno de los modelos epidemiológicos más complejos que esta literatura ha presentado. El modelo SIDARTHE (por sus siglas en inglés: Susceptible- Infectado asintomático no detectado- Infectado sintomático no detectado- Infectado asintomático detectado- Infectado sintomático detectado- Tratados- Recuperado- Fallecidos) permite analizar la dinámica de la pandemia de COVID-19 discriminando entre 8 compartimentos que entregan mayor realismo al análisis. Sin embargo, a pesar de la complejidad de estos modelos, persiste la limitación que nace producto de no considerar las decisiones económicas. Dado este problema, la literatura ha sido bastante clara en exacerbar la necesidad de esta integración.

Como forma de solucionar la falta de interacción entre la pandemia y las decisiones económicas de los agentes, la academia dio paso a modelos que incorporan elecciones conductuales de equilibrio. Por ejemplo, modelos en que se consideran agentes racionales que maximizan su utilidad y que pueden controlar su exposición al virus reduciendo su oferta laboral o bien afectar la demanda por consumo debido a que las actividades asociadas a este son vistas como puntos de exposición al virus. En general, esta línea investigativa ha documentado la presencia de una externalidad negativa provocada por la poca prevención por parte de algunos agentes económicos que no internalizan los costos de transmisión a otros y por ende, que dificultan la toma de decisiones de los Gobiernos para combatir la propagación del virus (Farboodi, Jarosch y Shimer, 2020; McAdams, 2020; Acemoglu, Chernozhukov, Werning y Whinston, 2020). En este contexto, destacamos el estudio de Eichenbaum, Rebelo y Trabandt (2020) quienes señalan que dichas externalidades son aún más fuertes cuando el sistema de salud se ve colapsado y pueden ser capturadas asumiendo que la tasa de muerte por el virus es una función convexa y creciente de cuántas personas están infectadas.

En el trabajo de Kucharski, Russell, Diamond, Liu, Edmunds, Funk, Eggo, Sun, Jit, Munday, Davies, Gimma, Zandvoort, Gibbs, Hellewell, Jarvis, Clifford, Quilty, Bosse & Flasche (2020), se estima para el caso de la población en China, como la tasa de reproducción básica de COVID-19, R_0^1 , cayó de 2,35 a 1,05 una vez que el Gobierno intervino e implementó restricciones de movilidad. En particular, la prohibición de volar en avión. Por otro lado, en el artículo de Toxvaerd (2020) se presenta un modelo económico para la pandemia en el que los individuos susceptibles enfrentan un costo por aplicar distanciamiento social para evitar infectarse. En el caso de una toma de decisiones no cooperativa y con visión de futuro, el distanciamiento social de equilibrio surge de forma endógena alrededor del auge de la pandemia, cuando la prevalencia de la enfermedad alcanza un umbral crítico determinado por las preferencias. Como resultado principal, encuentran que en equilibrio el distanciamiento social se detiene una vez que se establece la inmunidad colectiva, pero actúa para extender la duración de la epidemia más allá del punto de referencia de un modelo epidemiológico no conductual como el modelo SIR.

¹En epidemiología, el número básico de reproducción (a veces llamado ritmo básico de reproducción, ratio reproductiva básica o tasa de reproducción básica, denotado por R_0 , es el número promedio de casos nuevos que genera un caso dado a lo largo de un período infeccioso. Esta métrica es útil debido a que ayuda a determinar cuándo una enfermedad infecciosa puede dar lugar a un brote epidémico serio. En general, el umbral de este parámetro es 1, donde un valor mayor a 1 representa que la propagación aún es peligrosa y un valor menor a 1 representa que la propagación puede ser controlada, alcanzar niveles mínimos o incluso extinguirse.

Garobaldi, Moen y Pissarides (2020) desarrollan un modelo económico que se basa en el modelo de búsqueda y emparejamiento de Mortensen-Pissarides (1994). En él, muestran que existe una solución de equilibrio bien definida en la que los incentivos juegan un papel central en la determinación de las transiciones de la enfermedad y que además existen externalidades que justifican la intervención del Gobierno en la forma de imponer más restricciones a la movilidad cuyo origen es el de un escenario de equilibrio descentralizado. Desde su perspectiva teórica, concluyen que es probable que el equilibrio epidémico descentralizado sea subóptimo. Debido a la existencia de cuatro tipos de externalidades que dependen del tipo de contexto. Para el caso estático en un horizonte de corto plazo, se produce una externalidad en la probabilidad de transición del estado susceptible al infectado y cómo se relaciona con la distancia social entre los agentes y en el efecto de congestión de la hospitalización cuando un gran número se infecta. En un contexto dinámico, las externalidades surgen de cambios en las poblaciones de personas susceptibles e infectadas, ya que afectan el contagio y la inmunidad colectiva. Finalmente, los autores argumentan que al comparar el equilibrio privado y social, solo la externalidad de la inmunidad colectiva proporciona incentivos al planificador central para acelerar la propagación del virus y lograr la inmunidad colectiva.

En Krueger, Uhlig y Xie (2020) se estudia cómo los cambios endógenos en el comportamiento del consumo privado entre sectores de la economía pueden actuar como un potente mecanismo de mitigación durante una epidemia o cuando la economía se reabre después de un confinamiento temporal. Los autores amplían el marco teórico propuesto por Eichenbaum, Rebelo y Trabandt (2020) y distinguen los bienes por el grado en que pueden consumirse en el hogar y no en un contexto social (y por lo tanto posiblemente contagioso). Demuestran que dejar que la pandemia se desarrolle sin la intervención del Gobierno y permitir que los agentes cambien su comportamiento por sí mismos puede conducir a una mitigación de los costos económicos y humanos del COVID-19 de mejor forma que en el caso en que los sectores son homogéneos. Para diferentes configuraciones de parámetros que capturan el distanciamiento social y actividades de higiene voluntarias, muestran que las infecciones pueden disminuir completamente por sí mismas, simplemente debido a la reasignación racional individual de la actividad económica.

Una vez que internalizamos las decisiones económicas de los agentes, también nos encontramos interesados en la heterogeneidad de la población, puesto que en muchas ocasiones los Gobiernos implementan medidas que se diferencian, por ejemplo, según la edad o situación económica de la ciudadanía. Bajo esta premisa, Brotherhood, Kircher, Santos y Tertilt (2020) investigan el rol de las pruebas de COVID-19 para el caso de una economía compuesta por agentes de distintas edades. A través de una extensión del modelo

epidemiológico estándar (SIR) evalúan como las personas que tienen síntomas de COVID-19 pero no están seguras de si contrajeron el virus, son examinadas acorde con la disponibilidad de pruebas. Los resultados muestran que una mayor disponibilidad de pruebas de COVID-19 reducen el tiempo de incertidumbre. Además, señalan que las personas más jóvenes tienen menos probabilidades de morir, lo que aumenta su disposición a asumir riesgos e imponer externalidades a las personas mayores.

En particular, cuando consideramos la implementación de cuarentenas, la literatura nos presenta algunas investigaciones como las de [Alvarez, Argente y Lippi \(2020\)](#), quienes estudian la política de confinamiento óptima para un planificador que quiere controlar las muertes de una pandemia mientras minimiza los costos de salida de dicha medida. Los autores utilizan el modelo epidemiológico SIR y una economía lineal para formalizar el problema de control dinámico del planificador, donde la política óptima depende de la fracción de infectados y susceptibles en la población. El análisis cuantitativo que realizan identifica las características que dan forma a la intensidad y duración de la política de confinamiento, pero se ven limitados por la no inclusión de las decisiones de los individuos y al solo considerar las decisiones del planificador.

En esta línea, [Janiak, Machado y Turén \(2020\)](#) evalúan el impacto de los protocolos sanitarios impuestos a las empresas con el objetivo de prevenir la propagación de COVID-19 para los periodos posteriores a los confinamientos. Para esto, utilizan un modelo SIR extendido, calibrado para el caso de Chile, que permite la retroalimentación entre los contagios y la actividad económica, y la heterogeneidad de la industria y las empresas. Mientras que los protocolos imponen una carga adicional a la estructura de costos de las empresas, también evitan que los trabajadores abandonen temporalmente la fuerza laboral, lo que beneficia a la producción agregada. Los autores demuestran que los protocolos operativos empresariales, si se orientan adecuadamente a sectores clave, pueden mejorar simultáneamente los resultados económicos y de salud, sin tener que se deba extender indefinidamente el confinamiento estricto. Los hallazgos cuantitativos más importantes de su investigación sugieren que en general, es preferible aplicar protocolos estrictos a unos pocos sectores a aplicar protocolos más suaves a un mayor número de sectores, tanto en términos de beneficios económicos como para la salud. Además, encuentran que (i) es probable que exista una segunda ola de infecciones en ausencia de protocolos; (ii) los protocolos dirigidos a algunos sectores de la economía pueden reducir las muertes y, al mismo tiempo, mejorar las condiciones económicas y (iii) que los protocolos aplicados ampliamente tienen un efecto negativo en la economía.

Finalmente, presentamos la investigación de [Fajgelbaum, Khandelwal, Kim, Mantovani y Schaal \(2020\)](#). Los autores estudian también una política del tipo bloqueo como lo son las cuarentenas para combatir el COVID-19 dentro de una red de transporte. Su marco analítico integra epidemiología espacial canónica y modelos económicos ampliamente reconocidos, y se aplica a ciudades con una propagación viral inicial variable: Seúl, Daegu y el Metro de la ciudad de Nueva York. Uno de sus principales resultados es que los confinamientos espaciales logran pérdidas de ingresos sustancialmente menores que los confinamientos uniformes, y que requieren de análisis diferenciados en los cuales se desagrega la política y se pierde el concepto de centralidad. Además, para los casos de Daegu y el metro en Nueva York, concluyen que ante grandes shocks iniciales, el bloqueo óptimo restringe las entradas a los distritos centrales antes de la relajación gradual, mientras que en localidades como Seúl se debe imponer un bloqueo de corta duración pero de gran alcance.

Hemos señalado las limitaciones de los modelos epidemiológicos a la hora de estudiar las políticas de cuarentena y como la inclusión de las decisiones de los agentes económicos nos entregan un mejor panorama al respecto. Sin embargo, un aspecto que enriquecería aún más la literatura económica-epidemiológica del COVID-19, y que es justamente lo que desarrolla este documento, es la participación simultánea de la población y el Gobierno a la hora de estudiar el avance de la pandemia. Bajo esta premisa, la contribución que realiza esta investigación a la literatura económica-epidemiológica es presentar un modelo dinámico en contexto de COVID-19, que permite la interacción de agentes económicos (población joven y anciana) con un Gobierno que puede intervenir a lo largo del tiempo en la economía con una política de confinamiento heterogénea.

3. MODELO

La configuración general de nuestro modelo está basada en el trabajo presentado por [Brotherhood et al. \(2020\)](#) y [Alvarez et al. \(2020\)](#). Consideramos una economía en tiempo discreto poblada por un continuo de agentes idénticos de dos tipos, jóvenes y ancianos, que enfrentan un problema de maximización de la utilidad intertemporal, donde la trayectoria a un equilibrio se resuelve de forma descentralizada. Ante la llegada del COVID-19, se genera incertidumbre sobre el estado de salud de la población y su productividad en el trabajo, de forma tal que las probabilidades de transición asociadas con el virus dependen de las decisiones económicas de los agentes, en particular de la decisión de cuánto tiempo dedicar a trabajar. Surge entonces un Gobierno con información imperfecta que no conoce las funciones de utilidad de la población, pero que se encuentra interesado en evaluar periodo a periodo dos variables agregadas relevantes: la probabilidad agregada promedio de contagio

y la variación en la producción agregada. Inicialmente, dicha autoridad debe implementar cuarentenas en base al avance de la pandemia resolviendo un problema de minimización de pérdidas que pondera en cada periodo las dos variables mencionadas anteriormente. Acá, se produce una disyuntiva para el Gobierno ya que intervenir en la economía mediante la aplicación de cuarentenas restringe el tiempo disponible para el trabajo y por tanto afecta la producción. Junto con esto, el modelo permite diferenciar entre la política óptima elegida y la política óptima que debiese existir si se internaliza el comportamiento irresponsable de los agentes que representamos a través del porcentaje de la población que efectivamente obedece la cuarentena y no se convierte en agentes infecciosos o bien en agentes susceptibles a contraer el virus por hacer caso omiso al mandato del planificador.

3.1. ECONOMÍA DESCENTRALIZADA PREVIA AL COVID-19

Consideramos una economía poblada por un continuo de agentes ex ante de dos tipos, ancianos o y jóvenes y , tal que la edad $a \in \{y, o\}$ y cuya masa agregada se normaliza a 1. Previo a la pandemia, el problema de los agentes consiste en maximizar la siguiente función objetivo:

$$U^a = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t^a, l_t^a)$$

donde β^t denota el factor de descuento intertemporal efectivo de cada agente y c_t^a y l_t^a denotan el consumo y horas de ocio, respectivamente. Por simplicidad asumimos que las preferencias pueden ser representadas por la siguiente función de utilidad:

$$u(c, n) = \log(c) + \psi \log(l)$$

tal que ψ representa el peso del ocio en la utilidad del agente. Suponemos que existe una restricción de tiempo en la cual los individuos cuentan con una unidad de tiempo en cada periodo que pueden utilizar en trabajo n_t^a y ocio l_t^a . Por otra parte, los agentes pueden ahorrar en las empresas a través de la inversión i_t^a . Asumimos también que los agentes son los dueños de las firmas, por lo que perciben como ingreso la producción y_t^a . Así, los individuos se enfrentan a las siguientes restricciones de tiempo y de presupuesto, respectivamente en su problema de maximización:

$$n_t^a + l_t^a = 1 \tag{1}$$

$$c_t^a + i_t^a = y_t^a \tag{2}$$

3.1.1. PRODUCCIÓN

Caracterizamos la producción en esta economía en base a un continuo de empresas representativas competitivas, por tipo de agente, cuya masa es igual a 1. La producción agregada por tipo de agente corresponde a la suma de la producción de los agentes Y_t^a , la cual puede ser utilizada en bienes de consumo C_t^a o en inversión I_t^a , tal que $Y_t^a = C_t^a + I_t^a$. Por otra parte, los factores de producción de este modelo contemplan las horas trabajadas por cada agente, N_t^a , el capital que ingresa a las firmas como inversión, K_t^a , y una tecnología $e^{z_{t,a}}$ que cobrará importancia una vez que la pandemia se desate. Así, tenemos que la producción viene dada por:

$$Y_t^a = e^{z_{t,a}} (K_t^a)^\gamma (N_t^a)^{1-\gamma} \quad (3)$$

donde $z_{t,a}$ es un shock que afecta la productividad de las firmas en cada periodo y γ representa la sustitución de factores o importancia relativa de cada factor en la producción. Destacamos que la función presentada en la ecuación (3) posee las propiedades usuales: retornos constantes a escala, rendimientos positivos y decrecientes, y satisface las condiciones de INADA². Junto a esto, el capital se determina acorde con la siguiente ecuación de movimiento:

$$K_{t+1} = (1 - \delta_k) K_t + I_t$$

con δ_k igual a la tasa de depreciación del capital, que consideramos constante e igual para ambos tipos de firmas representativas. Las firmas elegirán entonces las horas trabajadas y capital para maximizar sus beneficios en cada periodo. Dichos beneficios estarán dados por:

$$\Upsilon_t^a = e^{z_{t,a}} (K_t^a)^\gamma (N_t^a)^{1-\gamma} - w_t^a N_t^a - r K_t^a$$

3.1.2. EQUILIBRIO DESCENTRALIZADO PRE-INFECCIÓN

El equilibrio descentralizado corresponde al estado estacionario alcanzado por la economía previa al COVID-19. Este será nuestro punto de partida para estudiar como la pandemia afecta el comportamiento de la población, el Gobierno, y las variables agregadas. Caracterizamos entonces los niveles trabajo, capital, consumo, ratio capital-trabajo y ratio consumo-trabajo con las ecuaciones que se presentan a continuación:

²Las condiciones de INADA corresponden a las condiciones sobre la forma de una función de producción que garantizan la ruta de estabilidad de un crecimiento económico en el modelo de crecimiento neoclásico. Las seis condiciones relevantes son: 1) el valor de la función en 0 es 0, 2) la función es continuamente diferenciable, 3) la función es estrictamente creciente en sus argumentos, 4) la derivada de la función es decreciente (por lo tanto la función es cóncava), 5) el límite de la derivada cercana a 0 es infinito positivo y 6) el límite de la derivada hacia el infinito positivo es 0.

$$\begin{aligned}
\frac{k^*}{n^*} &= \left[\frac{(\frac{1}{\beta} - 1 + \delta_k)}{\gamma} \right]^{(\frac{1}{\gamma-1})} \\
\frac{c^*}{n^*} &= \left[\frac{(\frac{1}{\beta} - 1 + \delta_k)}{\gamma} \right]^{(\frac{\gamma}{\gamma-1})} - \delta_k \left[\frac{(\frac{1}{\beta} - 1 + \delta_k)}{\gamma} \right]^{(\frac{1}{\gamma-1})} \\
n^* &= \left[\frac{1}{1 + \psi \frac{c^*}{n^*} (1 - \gamma) (\frac{k^*}{n^*})^\gamma} \right] \\
k^* &= \left[\frac{(\frac{1}{\beta} - 1 + \delta_k)}{\gamma} \right]^{(\frac{1}{\gamma-1})} \left[\frac{1}{1 + \psi \frac{c^*}{n^*} (1 - \gamma) (\frac{k^*}{n^*})^\gamma} \right] \\
c^* &= \left[\left[\frac{(\frac{1}{\beta} - 1 + \delta_k)}{\gamma} \right]^{(\frac{\gamma}{\gamma-1})} - \delta_k \left[\frac{(\frac{1}{\beta} - 1 + \delta_k)}{\gamma} \right]^{(\frac{1}{\gamma-1})} \right] \left[\frac{1}{1 + \psi \frac{c^*}{n^*} (1 - \gamma) (\frac{k^*}{n^*})^\gamma} \right]
\end{aligned}$$

tal que observamos que $n_t^a = N_t^a$, $i_t^a = I_t^a$, $y_t^a = Y_t^a$ y $c_t^a = C_t^a$.

3.2. APARICIÓN DEL COVID-19 EN LA ECONOMÍA DESCENTRALIZADA

Como señalamos anteriormente, la llegada COVID-19 en la economía descentralizada, repercutirá en las decisiones económicas de los agentes las cuales serán fundamentales para estudiar el avance de la pandemia. La interacción entre el virus y las acciones de la población provocaría modificaciones en la probabilidades de contagio agregada y por tanto afectará la dinámica y convergencia del modelo. Esto lo podemos ver por ejemplo, en los niveles de trabajo resultantes en cada periodo y los niveles de infectados, o también en como el nivel de ahorro que posean los agentes modificarán la percepción sobre la cercanía con el virus.

En presencia de la enfermedad, denotaremos el estado de salud de cada agente como j . Inicialmente, un agente sano o susceptible se denota por $j = h$. Posteriormente, incorporamos un estado de salud $j = f$ en el cual los agentes presentan síntomas de fiebre que indicaría un posible contagio de COVID-19 u otra enfermedad como una gripe común. Estos agentes pueden realizarse un examen PCR³ para saber si están contagiados con probabilidad ξ o con probabilidad $(1 - \xi)$, los agentes no se realizan el test y, por lo tanto, no están seguros de la fuente de sus síntomas.

³El examen PCR, por sus siglas en inglés de ‘Reacción en Cadena de la Polimerasa’, es una prueba que permite detectar un fragmento del material genético de un patógeno o microorganismo para el diagnóstico de una enfermedad, en este caso de COVID-19

Una vez que un individuo se realiza el examen PCR sabe con certeza si está infectado por COVID-19 o no. Si el agente está infectado, será categorizado como $j = i$. A partir de este escenario, los agentes contagiados podrían desarrollar síntomas más severos o graves que los inhabilitan para trabajar ya que deben quedarse en casa o bien hospitalizarse. En cuyo caso denominaremos a los agentes graves con $j = s$. El desarrollo de estos síntomas ocurre con probabilidad α^a . Asimismo, si el agente desarrolla síntomas graves, su deceso puede ocurrir con probabilidad δ_t^a , distinta de la probabilidad de muerte natural $\bar{\delta}^a$ en ausencia de la pandemia⁴. Un agente fallecido es categorizado en el estado $j = d$. Por otra parte, el agente puede recuperarse de la enfermedad con probabilidad $\phi^{j,a}$ que depende de su edad y estado de salud previo (infectado leve o grave). Si el agente se recupera, suponemos que se vuelve inmune (o resistente) a futuras infecciones. En dicho escenario, el agente es categorizado como $j = r$. Por lo tanto, tenemos que a lo largo de la pandemia, la población puede transitar entre diversos estados de salud, tal que $j \in \{h, f, i, s, r, d\}$.

La heterogeneidad de la población también provoca que los agentes descuenten del futuro de distinta forma. En principio, ambos grupos cuentan el futuro con un factor de descuento común $\tilde{\beta}$, pero dado que la supervivencia natural se da con una probabilidad $\Delta(a) = 1 - \bar{\delta}^a$, específica para cada grupo, el factor de descuento efectivo será de $\beta^a = \tilde{\beta}\Delta(a)$.

3.2.1. EL TRABAJO Y LAS PROBABILIDADES DE CONTAGIO

En esta economía, el contagio puede ocurrir durante las horas en que los agentes trabajan, dado que asumiremos que el tiempo de ocio elegido por los agentes será gastado dentro de la casa, de forma racional, como una medida de prevención. Tendremos entonces que un mayor nivel de trabajo implicará más riesgo de contagio ya que existirá más interacción entre los agentes. Dicho riesgo varía según el tipo de agente, tal que denominaremos la probabilidad de infectarse como π^a y estará representada por:

$$\pi_t^a(n_t^a, \Pi_t) = n_t^a \Pi_t$$

donde Π_t corresponde a la probabilidad agregada promedio de contagio de la economía, que dependerá de la cantidad de infectados y que desarrollaremos de forma más detallada en la sección 3.2.4 de agregación. Por otra parte, también existe el caso en que el agente presente síntomas de fiebre pero que sean causado por un contagio de gripe común. Esto ocurre con probabilidad:

$$\pi_t^{\star a}(n_t^a) = n_t^a \Pi^{\star}$$

⁴Siguiendo la lógica de Brotherhood et al. (2020), no agregamos el proceso de nacimientos, ya que es poco probable que sea importante durante el período de COVID-19. En este sentido, la tasa de mortalidad se incluye principalmente para tener en cuenta las diferencias en factores de descuento entre los jóvenes y los ancianos.

con Π^* que refleja la probabilidad agregada de contraer una gripe, igual para toda la economía. Con estas probabilidades exhibidas, decimos que cada agente puede contraer alguna enfermedad (COVID-19 o gripe) con probabilidad:

$$\pi_{t,f}^a(n, \Pi^a) = n_t^a(\pi_t^a + \pi_t^{\star a}) = n_t^a(\Pi_t + \Pi^*)$$

En caso de que un agente presente síntomas pero se desconozca la fuente de estos (no se realiza el examen PCR), se asignará una probabilidad $\Pi_t/(\Pi_t + \Pi^*)$ a que sea COVID-19 y una probabilidad $\Pi^*/(\Pi_t + \Pi^*)$ a que sea gripe.

3.2.2. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DESCENTRALIZADO

Para resolver el problema de los agentes, utilizaremos la metodología de ecuaciones de Bellman en línea con los autores en que basamos el modelo. [Bellman \(1952\)](#) demostró que un problema de optimización dinámica en tiempo discreto como en el que nos encontramos se puede plantear de forma recursiva mediante inducción hacia atrás escribiendo la relación entre la función de valor en un período y la función de valor en el período siguiente. La relación entre estas dos funciones de valor se denomina “Ecuación de Bellman”. En este enfoque, la política óptima se especifica de antemano como una función del valor de la variable de estado en ese momento, mientras que el valor óptimo resultante de la función objetivo se expresa en términos de ese valor de la variable de estado. Esto implica que las decisiones de cada período se tomarán reconociendo explícitamente que todas las decisiones futuras serán tomadas de manera óptima. En un entorno determinista, como lo es la Economía previa al COVID-19, se pueden utilizar diversas técnicas además de las ecuaciones de Bellman. Sin embargo, las ecuaciones de Bellman son a menudo una de las metodologías más convenientes para resolver problemas estocásticos como el que enfrentan los agentes con la llegada de la pandemia.

A continuación se presentan las funciones de valor asociadas a cada agente. Explicitamos acá el uso de restricciones adicionales de No-negatividad en el consumo y de No-trabajo en estado de salud grave.

La función de valor para agentes sanos ($j = h$) viene dada por:

$$\begin{aligned} V_t^a(k, n, z; h) = & \max_{c, n, k'} \log(c) + \psi \log(1 - n) \\ & + \beta^a [1 - \pi_{t,f}^a + \pi_t^{\star a} \xi^a] V_{t+1}^a(k, n, z; h) \\ & + \beta^a [\xi^a \pi_t^a] V_{t+1}^a(k, n, z; i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$+\beta^a[(1-\xi^a)\pi_{t,f}^a]V_{t+1}^a(k,n,z;f)$$

sujeto a (1) y (2).

La primera línea captura la utilidad del consumo y el ocio. Posteriormente, el agente puede continuar sano el siguiente periodo, infectarse, o bien encontrarse en un estado febril.

De forma similar, la función de valor asociada a los agentes infectados ($j = i$) que no han desarrollado síntomas graves está dada por:

$$V_t^a(k,n,z;i) = \max_{c,n,k'} \log(c) + \psi \log(1-n) \quad (5)$$

$$+\beta^a[(1-\phi^{i,a})(1-\alpha^a)]V_{t+1}^a(k,n,z;i)$$

$$+\beta^a[(1-\phi^{i,a})\alpha^a]V_{t+1}^a(k,n,z;s)$$

$$+\beta^a[\phi^{i,a}]V_{t+1}^a(k,n,z;r)$$

sujeto a (1) y (2).

Acá, a partir de la segunda línea se capturan los valores de continuación del agente infectado en caso de seguir infectado en el siguiente periodo, presentar síntomas graves o recuperarse.

Para la función de valor del agente que presenta síntomas, consideramos un valor de continuación ponderado según su verdadero estado de salud. Con una determinada probabilidad los síntomas se deben a una gripe común, en cuyo caso el valor de continuación corresponderá al caso del agente sano ($j = h$). Con la probabilidad complementaria, los síntomas son debido al contagio de COVID-19, por lo que el valor de continuación corresponde al de una persona infectada ($j = i$). Por lo tanto, podemos escribir el problema de este agente de la siguiente manera:

$$V_t^a(k,n,z;f) = \max_{c,n,k'} \log(c) + \psi \log(1-n) + \left[\frac{\Pi^*}{(\Pi_t + \Pi^*)} V_{t+1}^a(k,n,z;h) + \frac{\Pi_t}{(\Pi_t + \Pi^*)} V_{t+1}^a(k,n,z;i) \right] \quad (6)$$

sujeto a (1) y (2).

La función de valor asociada a los agentes infectados que desarrollan síntomas grave ($j = s$) la caracterizaremos como:

$$\begin{aligned}
V_t^a(k, n, z; s) = & \max_{c, n, k'} \log(c) + \psi \log(1 - n) \log(c) + \psi \log(1 - n) \\
& + \beta^a [\phi^{s,a}] V_{t+1}^a(k, n, z; r) \\
& + \beta^a [(1 - \phi^{s,a})(1 - \delta_t^a)] V_{t+1}^a(k, n, z; s)
\end{aligned} \tag{7}$$

sujeto a (1) y (2).

Para este tipo de categorización, asumimos un valor de continuación en caso de fallecer igual al del estado fallecido $j = d$ de cero, y una utilidad dada principalmente por el consumo, ya que el agente no puede trabajar y el tiempo de ocio del que dispone, no es realmente disfrutado⁵. Por otro lado, si el agente logra la recuperación puede volver a decidir el tiempo que dedica al trabajo y disfrutar del valor de continuación de un agente recuperado.

Finalmente, una vez que el agente se ha recuperado de COVID-19 y se vuelve resistente al virus o al menos puede continuar con su vida de forma habitual si repercusiones relevantes⁶ la función de valor que será asociada a este viene dada por:

$$\begin{aligned}
V_t^a(k, n, z; r) = & \max_{c, n, k'} \log(c) + \psi \log(1 - n) + \beta^a V_{t+1}^a(k, n, z; r)
\end{aligned} \tag{8}$$

sujeto a (1) y (2).

3.2.3. LEY DE MOVIMIENTO DE LOS AGENTES

La Ley de movimiento de los agentes corresponde a un mapeo entre el vector de estado y las acciones de equilibrio, y de las tasas de infección en cada periodo t y el número de agentes de cada tipo en el período siguiente. Sea T dicho mapeo, entonces la proporción de agentes en el siguiente periodo viene dada por:

$$\Omega_{t+1} = T(\Omega_t, \mathcal{L}_t, \Pi_t) \tag{9}$$

⁵En este punto, cabe cuestionarnos sobre la utilidad que realmente aporta el ocio en una persona gravemente enferma, dado que en este tipo de escenarios, el tiempo disponible se gasta en general en hospitalización o al estar postrado en cama.

⁶Como aclaración, dado lo reciente de la pandemia, no podemos afirmar con seguridad si efectivamente el agente retomará sus actividades habituales, ya que podrían presentarse secuelas que limiten su capacidad de trabajar, consumir, etc.

donde Ω_t corresponde al número de agentes en el periodo actual, \mathcal{L}_t representa todas las asignaciones de equilibrio en el periodo actual y Π_t refleja la probabilidad agregada de contagio de equilibrio de los agentes. El cumplimiento de la ecuación (8), significa que la suma de la población en cada estado y en cada periodo debe ser igual a 1, lo que corresponde a la masa total.

Destacamos que la definición presentada para la Ley de movimiento de la economía nos permite diferenciar dentro del estado febril, entre aquellos agentes quienes en realidad tienen COVID-19 y los que presentan una gripe común y que por tanto, son considerados como sanos. A estos estados los llamaremos febril-infectado (f_i) y febril-saludable (f_h). Dicha diferenciación será útil para representar de mejor manera la proporción de individuos en cada estado. De esta forma, el número total de agentes febriles en el siguiente periodo está dada por:

$$\Omega_{t+1}(f, a) = \Omega_{t+1}(f_i, a) + \Omega_{t+1}(f_h, a)$$

donde $\Omega_{t+1}(f_i, a)$ es el número de agentes febriles-infectados que son aquellos que presentan síntomas, no son testeados pero efectivamente contrajeron el virus:

$$\Omega_{t+1}(f_i, a) = \Omega_t(h, a) \left[(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \xi^a) \pi_{t,f}^a \frac{\Pi_t}{\Pi_t + \Pi^*} \right] + \Omega_t(f_h, a) \left[(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \xi^a) \pi_{t,f}^a \frac{\Pi_t}{(\Pi_t + \Pi^*)} \right]$$

mientras que $\Omega_{t+1}(f_h, a)$ es el número de agentes febriles-saludables quienes presentan síntomas, no son testeados y solo tienen gripe común:

$$\Omega_{t+1}(f_h, a) = \Omega_t(h, a) \left[(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \xi^a) \pi_{t,f}^a \frac{\Pi^*}{\Pi_t + \Pi^*} \right] + \Omega_t(f_h, a) \left[(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \xi^a) \pi_{t,f}^a \frac{\Pi^*}{(\Pi_t + \Pi^*)} \right]$$

Dada la expresión anterior, el número de agentes sanos en el periodo siguiente es caracterizado como:

$$\Omega_{t+1}(h, a) = \Omega_t(h, a) \left[(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \pi_{t,f} + \pi_t^* \xi^a) \right] + \Omega_t(f_h, a) \left[(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \pi_{t,f} + \pi_t^* \xi^a) \right]$$

donde el primer componente al lado derecho de la igualdad representa a la proporción de agentes sanos del periodo actual mientras que el segundo componente corresponde a la proporción de individuos en estado febril, que efectivamente tienen gripe y no COVID-19 y que estarán sanos en el siguiente periodo.

Por otro lado, el número de personas infectadas en la economía en el siguiente periodo contempla a aquellas personas que en el periodo actual se encuentran sanos o con fiebre, se realizan el examen para detectar el virus y resultan infectadas, y también aquellos individuos

quienes ya están infectados en el periodo actual, no desarrollan síntomas graves, pero tampoco se recuperan en el siguiente periodo. Es decir, siguen infectados:

$$\begin{aligned}\Omega_{t+1}(i, a) &= \Omega_t(h, a) [(1 - \bar{\delta}^a)\xi^a\pi_t^a] + \Omega_t(f_h, a) [(1 - \bar{\delta}^a)\xi^a\pi_t^a] \\ &+ [\Omega_t(f_i, a) + \Omega_t(i, a)][(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \phi^{i,a})(1 - \alpha^a)]\end{aligned}$$

Para el caso de la población que desarrolla síntomas graves, consideramos a aquellas personas que entraron en el último período infectadas o infectadas con fiebre y no se recuperan, sino que desarrollan síntomas más graves, así como las personas con síntomas graves del período anterior que no mueren ni se recuperan:

$$\Omega_{t+1}(s, a) = [\Omega_t(f_i, a) + \Omega_t(i, a)][(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \phi^{i,a})(\alpha^a)] + \Omega_t(s, a)[(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \delta_t^a)(1 - \phi^{s,a})]$$

Por su parte, el número de personas recuperadas en el periodo siguiente corresponde a aquellos individuos que están en calidad de infectados y febriles-infectados que se recuperaron, a quienes que presentaban síntomas graves y se recuperaron y quienes una vez recuperados, permanecen así.

$$\Omega_{t+1}(r, a) = [\Omega_t(f_i, a) + \Omega_t(i, a)][(1 - \bar{\delta}^a)(\phi^{i,a})] + \Omega_t(s, a)[(1 - \bar{\delta}^a)\phi^{s,a}] + \Omega_t(r, a)(1 - \bar{\delta}^a)$$

Finalmente, el número de agentes fallecidos producto del COVID-19 en el periodo siguiente está dado por las nuevas muertes del periodo actual y las muertes en periodos previos:

$$\Omega_{t+1}(d, a) = \Omega_t(d, a) + \Omega_t(s, a)[(1 - \bar{\delta}^a)(1 - \phi^{s,a})(\delta_t^a)]$$

Una vez descrita la Ley de movimiento de cada estado, el mapeo agregado T será el vector de cada mapeo para todos los estados j y edades a , como se señaló en la ecuación (8). Con esto, podremos distribución de la población y analizar la propagación del virus⁷.

3.2.4. AGREGACIÓN

El modelo nos permite medir la producción de toda la economía y la probabilidad agregada de contagio. Estas variables son de gran interés para cuantificar la intervención del Gobierno una vez que sea incorporado en la dinámica de la economía.

⁷Como señalamos antes, asumimos que el tiempo de trabajo se utiliza fuera de la casa. Por lo tanto, el tiempo dedicado al trabajo también representa la probabilidad de ingresar a un espacio común donde existe un potencial foco infeccioso.

Expresamos la producción de cada grupo, en cada periodo t , tal como sigue:

$$Y_t^a = \sum_j e^{z_{t,a}} (K_t^{a,j})^\gamma (N_t^{a,j})^{1-\gamma}$$

Así, la producción agregada estará dada por:

$$Y_t = \sum_a Y_t^a \Omega_t(j, a) \quad (10)$$

Por otra parte, aproximamos el avance de la pandemia en base a la probabilidad agregada promedio de contagio de COVID-19 en la economía (en adelante probabilidad de contagio en t), que puede ser representada por:

$$\Pi_t = \Pi_0 \sum_{a,j \in \{f_i, i, s\}} N_t^{a,j} \Omega_t(j, a) \quad (11)$$

donde Π_0 denota la probabilidad de contagio por encuentro con individuos infectados, N_t^a representa la cantidad de trabajo ofrecida en la economía por cada agente y $\Omega_t(j, a)$ corresponde a la Ley de Movimiento de los agentes. Para efectos de interpretación, Π_t puede entenderse mediante la siguiente explicación: “si asumimos una cantidad unitaria de espacio común donde los agentes se distribuyen uniformemente, en cada subunidad de espacio un individuo se relaciona con un número de personas infectadas representadas por las sumatorias de la ecuación (11) que transmiten el virus a la tasa Π_0 . En este sentido, Π_t corresponde a la probabilidad de infectarse cuando el número de infectados es cercano a cero, lo que sucede si el número ponderado de personas infectadas a lo largo del tiempo es bajo”. Debido a que el número reducido de personas infectadas ocurre particularmente al comienzo de la pandemia, para mantener dicha probabilidad Π_0 se debe mantener relativamente alto.

3.2.5. EQUILIBRIO PANDÉMICO DESCENTRALIZADO

La metodología utilizada de ecuaciones de Bellman y el cumplimiento de las condiciones que contempla, nos permite encontrar un equilibrio en el modelo. El equilibrio pandémico descentralizado corresponderá a una secuencia de tasas de infección, muertes y asignaciones equilibrio a lo largo del tiempo $\{\Pi_t^a, \delta_t, n_t^{a,j}\}_{t=0}^\infty$ tal que estas asignaciones son parte de las soluciones a los problemas de optimización individuales presentados en las ecuaciones (4) a (8) y la Ley de movimiento agregada presentada en la ecuación (9).

En relación con las variables reportadas por el modelo, la incorporación de las decisiones económicas en la trayectoria de la pandemia provocarán una recesión más aguda que la que sufriría la economía sin estas (Alvarez et al., 2020). Destacamos en este modelo que el equilibrio implica una irremediable pérdida de vidas, pero también se genera una situación en que una proporción suficientemente alta de la población se infecta y logra recuperarse adquiriendo inmunidad o bien, que ya no presenta complicaciones en caso de volver a infectarse. Por último, el modelo supone la no existencia de otras medidas para combatir la pandemia como lo son las cuarentenas implementadas por los Gobiernos. Este tipo de medidas serán modeladas en el siguiente apartado.

3.3. ECONOMÍA CENTRALIZADA

Como una forma de aproximarnos a la realidad de los diversos países, en particular a Chile, permitimos la incorporación de un Gobierno o planificador central que interviene en la economía mediante la implementación de cuarentenas. En esta línea, previo a la presentación del modelo, debemos clarificar la diferencia entre los distintos tipos de cuarentena que se han evidenciado a lo largo del mundo: la cuarentena voluntaria, la cuarentena obligatoria y la cuarentena no discriminatoria total.

- CUARENTENA VOLUNTARIA

Este tipo de cuarentena es sugerida para personas de alto riesgo, como son los ancianos, pacientes con enfermedades crónicas o con alguna inmunodeficiencia. Adicionalmente, se considera dentro de este tipo de cuarentena a aquellos individuos que han estado en contacto con alguien diagnosticado con COVID-19, pero que actualmente no están enfermos. Por esta razón, se sugieren medidas como permanecer en el hogar, evitar el uso del transporte público, evitar el contacto con familiares o solicitar atención médica domiciliaria en caso de necesitarla.

- CUARENTENA OBLIGATORIA POR INFECCIÓN

La cuarentena obligatoria corresponde al aislamiento que se impone a personas que sean diagnosticados con COVID-19. En estos casos, el período de cuarentena es de 14 días. Este periodo en particular se relaciona con el período máximo de incubación de la enfermedad, que son 12 días, a los que se agregan 2 días como margen de seguridad. También se aplica esta categoría a personas que viven en un área geográfica que haya sido declarada de alto riesgo por la autoridad sanitaria.

- CUARENTENA NO DISCRIMINATORIA TOTAL

Corresponde a una de las medidas más restrictivas que pueden imponer las autoridades sanitarias a la población. La cuarentena total implica la prohibición de salida de los hogares a toda hora por un periodo determinado para la mayoría de las personas⁸. Las excepciones

⁸Como veremos más adelante, el Gobierno no puede implementar una cuarentena en la que el 100 % de la población se mantenga en casa ya que hay sectores de la economía que no pueden dejar de funcionar

típicas en este tipo de contextos son el abastecimiento de alimentos, la asistencia a centros de salud y trabajos denominados como esenciales.

Desagregado el tipo de cuarentena que se puede implementar, a continuación presentamos el problema de optimización del Gobierno. Los objetivos que se encuentran asociados a este y que se contraponen entre sí, son los siguientes:

- *“Minimizar la probabilidad de contagio de COVID-19 desde agentes infectados a agentes susceptibles mediante la implementación de cuarentenas para evitar la pérdida de vidas en la población”.*
- *“Minimizar la caída en la producción generada por las cuarentenas y evitar la pérdida de riqueza en la población y un aumento en la pobreza”.*

Como forma de representar los objetivos mencionados, construimos una función de pérdida que pondera la probabilidad de contagio agregada de COVID-19 y la caída en la producción. El primer componente lo entenderemos como un *“criterio sanitario”* donde se desea evitar el aumento en la probabilidad de contagio. Bajo este criterio, la función de pérdida del Gobierno aumenta si aumentan los niveles de trabajo, lo que se traduce en mayor interacción entre los agentes. El segundo componente corresponde al *“criterio económico”* de la autoridad el cual castiga la caída en la producción a lo largo del tiempo provocada por la disminución de los niveles de trabajo en la economía (insumo necesario para producir) a causa de las cuarentenas. De esta forma, se trata de evitar que la economía se desplome y la pobreza aumente a niveles indeseables provocando hambruna, desempleo excesivo y un retroceso económico que pueda ser irreparable ([Banco Mundial, 2020](#); [CIPER Chile, 2020](#)).

Dado lo anterior, el problema del Gobierno consistirá en minimizar la siguiente función de pérdidas para un periodo t :

$$G_t(\theta_t) = \lambda (\Pi_{t-1}\theta_t) + (1 - \lambda)\theta_t \left(\frac{Y_{t-1} - Y_{t-2}}{Y_{t-2}} \right) \quad (12)$$

que pondera el criterio sanitario (ecuación (11)) y el criterio económico (variación de la ecuación (10)) mediante el parámetro λ e incorpora la elección de cuarentena total del Gobierno dada por θ_t . Debido a la imposibilidad de las autoridades para prever el avance de la pandemia, las decisiones de cuarentenas presentan un retraso de un periodo bajo el siguiente razonamiento: a final de cada periodo, el planificador central recibe la información sobre el número de personas infectadas, susceptibles, graves, fallecidas y recuperadas y estudia la probabilidad de contagio agregada y la variación de la producción. Luego, resuelve su problema de optimización encontrando la fracción de la población joven y anciana que

debería estar confinada para minimizar la pérdida que obtuvo en dicho periodo. Una vez elegidos los niveles de confinamiento, estos comenzarán a implementarse en el periodo posterior.

Debido al comportamiento heterogéneo de la población y también a la política diferenciada de confinamiento que elige el gobierno, podemos reescribir el problema de optimización desagregando la elección de cuarentenas por tipo de agente (θ_t^y y θ_t^o) tal como sigue:

$$G_t(\theta_t^y, \theta_t^o) = \lambda \Pi_0 \left(\sum_{j \in \{f, i, s\}} \theta_t^y N_{t-1}^{y,j} \Omega_{t-1}(j, y) + \sum_{j \in \{f, i, s\}} \theta_t^o N_{t-1}^{o,j} \Omega_{t-1}(j, o) \right) \quad (13)$$

$$+ (1 - \lambda) \left((1 - \varphi) \left(\frac{Y_{t-1}^y - Y_{t-2}^y}{Y_{t-2}^y} \right) \theta_t^y + \varphi \left(\frac{Y_{t-1}^o - Y_{t-2}^o}{Y_{t-2}^o} \right) \theta_t^o \right)$$

donde φ corresponde a la fracción de la población anciana.

3.3.1. SUPUESTOS Y CONSIDERACIONES DEL MODELO CENTRALIZADO

A continuación discutimos brevemente los supuestos clave que requiere el modelo económico centralizado:

1. El Gobierno se ve imposibilitado de implementar una cuarentena obligatoria total a toda la población. Esto significa que $\theta_t \in [0, \bar{\theta}]$, con $\bar{\theta} \leq 1$. Este supuesto refleja la existencia de sectores de la economía que no pueden dejar de producir incluso si la mayor parte de la población se encuentra confinada. Por ejemplo, consideramos el sector salud, los servicios básicos de producción y distribución de alimentos, entre otros.
2. El parámetro $\lambda \in [0, 1]$ captura la tensión entre la dimensión sanitaria y económica del modelo. Este parámetro permite balancear la decisión de cuarentena a lo largo de la pandemia. En un extremo, un λ cercano a 1 representa a una autoridad que a fin de evitar fallecimientos, está dispuesta a incurrir en altos costos económicos con cuarentenas estrictas y masivas. Por el contrario, un λ cercano a 0 representa a una autoridad que con la finalidad de evitar el desplome de la producción, pone en riesgo a la población, permitiéndoles movilizarse y trabajar sin problemas.
3. Al igual que en el caso descentralizado, los agentes con síntomas graves no pueden trabajar, lo que para efectos del Gobierno es equivalente al establecimiento de una cuarentena obligatoria por infección. Esto implica el no poder salir a trabajar hasta que se encuentren recuperados. En principio, esta primera forma de cuarentena trata de garantizar que los individuos puedan trabajar en un ambiente con el menor riesgo de contagio posible.

4. Se mantiene el supuesto del modelo descentralizado en que los agentes recuperados son inmunes al virus.
5. Para efectos de igualación entre el horizonte temporal del Gobierno y la población, suponemos que todos los agentes económicos tienen una vida infinita, a excepción del riesgo de morir por causa natural o por contraer COVID-19. Esta simplificación es aceptable dado el horizonte temporal del problema.
6. Suponemos que implementación de cuarentenas se realiza con un periodo de desfase. Es decir, el Gobierno observa las variables de interés en el periodo t y en base a su criterio de minimización de pérdidas aplica la política óptima de cuarentenas que habría instaurado en dicho periodo, pero lo hace para el periodo $t + 1$.
7. Consideramos a agentes miopes que no logran anticipar las cuarentenas futuras que implementará el Gobierno. Bajo este contexto, tenemos que los agentes no aumentarían sus niveles de trabajo en aquellos periodos previos a que la pandemia alcance altos niveles de contagios.
8. El problema centralizado incorpora dos tipos de costos económicos. El primero corresponde a la actividad económica perdida durante la cuarentena de los agentes saludables e infectados. El segundo, la pérdida económica que ocasiona la muerte de la población⁹.

3.3.2. EQUILIBRIO PANDÉMICO CENTRALIZADO

El equilibrio pandémico centralizado corresponderá a una secuencia de tasas de infección, muertes, asignaciones equilibrio y decisiones de cuarentena a lo largo del tiempo $\{\Pi_t^a, \delta_t, n_t^{a,j}, \theta_t^y, \theta_t^o\}_{t=0}^\infty$ tal que las decisiones del Gobierno y las asignaciones resultantes son parte de las soluciones del problema de optimización presentado en la ecuación (12) y la Ley de movimiento agregada presentada en la ecuación (9).

La recuperación de la economía y la política óptima de cuarentenas implementada por el Gobierno dependerán de diversos factores que incidirán en la duración, intensidad y prevalencia de la pandemia. En este contexto, el éxito de esta medida está sujeto a interpretación y opinión del lector, quien puede considerar como exitosa una estrategia de cuarentenas prolongadas sostenidas o bien drásticas cuarentenas por un corto plazo. Cabe destacar que la elección de una función de pérdidas a optimizar nace por el desconocimiento que tiene el Gobierno sobre cómo la población maximiza su utilidad. Bajo esta premisa, podemos señalar

⁹Debemos notar que dado el horizonte infinito de los agentes, la muerte de una persona infectada implica un costo económico equivalente al valor presente de la producción, lo que sobreestima el costo económico de una muerte.

que nos encontramos en un contexto de información imperfecta al permitir que los agentes infectados febriles tengan la opción de continuar realizando sus actividades y transmitir el virus de forma involuntaria, de modo que la presencia de un síntoma sea un indicador imperfecto del estado de salud de la población a la hora de encontrar la política de confinamiento óptima.

4. CALIBRACIÓN: EL CASO DE LA ECONOMÍA CHILENA

Esta sección describe cómo disciplinamos los parámetros del modelo a la economía chilena. Desde el inicio de la pandemia en marzo de 2020, esta economía se ha caracterizado por tener una situación epidemiológica diversificada dentro de sus fronteras, siendo la Región Metropolitana (Capital de Chile), y algunas regiones al norte (Arica y Parinacota; Antofagasta) y sur (Magallanes y la Antártica Chilena; Los Lagos) del país quienes se han visto mayormente afectadas. Es por esta razón, que si bien el impacto del COVID-19 ha sido heterogéneo en cuanto a la propagación, consideramos a toda la población como una única unidad y se realiza una diferenciación principalmente por grupo etario (ancianos y jóvenes).

La calibración del modelo se realiza principalmente entorno a las cifras oficiales de agentes infectados por COVID-19 en Chile¹⁰. Dicha información es elaborada y exhibida por el Ministerio de Salud de Chile ([MINSAL, 2020a](#)), el Departamento de Estadísticas e Información de Salud de Chile y la Mesa Social COVID-19¹¹. Se consideran también reportes y otros documentos que permitirán establecer ciertos parámetros, entregados por el Banco Central de Chile ([BCCh, 2019](#)), Instituto Nacional de Estadística de Chile ([INE Chile, 2020](#)), la Organización Mundial de la Salud ([OMS, s.f.](#)), la Organización Panamericana de la Salud en Chile ([OPSch, s.f.](#)), la Dirección del Trabajo de Chile ([DTChile, s.f.](#)) y literatura de referencia presentada por [Brotherhood et al. \(2020\)](#), [Krueger et al. \(2020\)](#), [Alvarez et al. \(2020\)](#) y [Garibaldi et al. \(2020\)](#).

¹⁰Adicionalmente, se utiliza información sanitaria sobre la población recuperada, fallecida, asintomáticos, positividad diaria, media móvil de exámenes PCR, casos probables, casos activos, capacidad hospitalaria y disponibilidad de residencias sanitarias, siendo estas últimas una estrategia para controlar la propagación del COVID-19. Está dirigida a las personas que han sido diagnosticadas con la enfermedad y que no pueden realizar una cuarentena efectiva en su domicilio, porque no cuentan con las condiciones adecuadas, o bien porque no son residentes en la ciudad donde fueron diagnosticados y no tienen un lugar donde permanecer mientras dura su período de cuarentena. Las residencias sanitarias son gratuitas. En ellas se ofrece alimento y monitoreo de salud mientras dura el periodo de cuarentena (14 días desde el inicio de los síntomas).

¹¹La Mesa Social COVID-19 se constituye como una instancia de diálogo, coordinación y colaboración para enfrentar de forma unida los difíciles tiempos de pandemia que atraviesa el país. La Submesa de Datos COVID-19 es una instancia que se creó al alero de la Mesa Social COVID-19, y que trabaja bajo los mismos principios de unidad. Refleja un momento en el cual la comunidad de investigación está volcada en una misión de búsqueda de nuevo conocimiento para enfrentar la pandemia y de poner esos conocimientos al servicio de las personas.

Es importante precisar que la data relevante para calibrar el modelo inicia el 2 de marzo de 2020, pero no tiene una fecha de término específica dado que la investigación se realiza durante la pandemia. Sin embargo, la fecha de término establecida es el 1 de noviembre de 2020. En consecuencia al paralelismo entre el presente documento y las cifras oficiales de infectados por COVID-19, todos los resultados cuantitativos expuestos deben interpretarse con cuidado. Para efectos de la trayectoria de la economía en el modelo, se establece una duración de 96 semanas, tal que la ventana de la modelación contempla desde el 2 de marzo de 2020 hasta el 28 de febrero de 2022. Se espera que con el transcurso de los meses, la disponibilidad de más y mejores datos permita un mejor modelamiento de esta crisis sanitaria.

Establecemos una frecuencia semanal en los datos. La proporción de agentes jóvenes y ancianos se calcula en base a la información del INE y su proyección sobre la población al 2020. Para el inicio de la pandemia, fijamos una población de 19.107.216 de habitantes donde la cantidad de ancianos (sobre 60 años) se cuantifica en 2.260.222. Dado esto, el porcentaje de adultos mayores presentes en el país es de 11,83%. Por otra parte, en base a la información presentada por la OMS y OPSCh, la población promedio contrae gripe entre 2 a 4 veces al año, con una duración de 1 semana cada una. Ante esto, se establece un valor de 3 gripes por año lo que implica una tasa de infección semanal de $\frac{3 \times 7}{365} = 0,058$. Luego, acorde con [Brotherhood et al. \(2020\)](#), la infecciosidad semanal vendrá dada por: $\Pi^* = 1 - (1 - C)^{\frac{1}{52}}$, siendo C la fracción de la población que contrae gripe en un año acorde con la tasa semanal señalada anteriormente. Esto permite obtener $\Pi^* = 0,107$. Respecto a la probabilidad de contagio por encuentro con agentes infectados, Π_0 , esta viene dada por su relación con el número reproductivo básico del COVID-19 (R_0). Para efectos del análisis, dicha variable queda implícita y corresponde a un promedio del nivel de trabajo, Π_0 y la estimación de la probabilidad de pasar de un estado infeccioso leve a infeccioso grave al inicio de la pandemia. Dada una semana de 168 horas y descontando las horas dedicadas a dormir/descansar (56 horas), obtenemos un total de 112 horas disponibles para trabajar. Luego, acorde con DT Chile, se establece una jornada laboral de 45 horas tal que la fracción de tiempo dedicada al trabajo será de $\frac{45}{112} = 0,401$. Junto a lo anterior, el MINSAL estableció un R_0 de 3 en marzo de 2020 y una probabilidad promedio de transitar del estado infeccioso leve a grave de 18%. Todo esto nos permite obtener un $\Pi_0 = 3 \times 0,4017 \times 0,18 = 0,217$.

Suponemos que los agentes infectados que no se recuperan en 1 periodo, tienen una probabilidad de desarrollar síntomas graves $\alpha^a = 1$. Respecto a la probabilidad de testeo ξ , utilizaremos un criterio conservador tal que asignaremos un 50% de probabilidad a que cualquiera de los dos agentes se realice un test PCR en caso de presentar síntomas.

Esta probabilidad que en principio permanece fija, podría ser modificada a medida que la población comience a adecuar sus conductas a lo largo del tiempo o a medida que el Gobierno incentive la toma de muestras. En tanto, para las probabilidades de recuperación en caso de síntomas leves, éstas fueron fijas acorde con el ratio de pacientes recuperados jóvenes y ancianos sobre el número de infectados totales. Así, las probabilidades serán $\phi^{i,y} = 97,6\%$ y $\phi^{i,o} = 94\%$, respectivamente. En los reportes presentados por el MINSAL, se informa que los pacientes con síntomas graves fueron dados de alta después de un promedio de 17,5 días o 2,5 semanas en el caso de los jóvenes y aproximadamente 3,2 semanas en el caso de los ancianos. Esto permite calcular $\phi^{s,y} = 1/2,5 = 0,4$ y $\phi^{s,o} = 1/3,2 = 0,31$. En relación con la tasa semanal de muerte, las cifras oficiales de COVID-19 reportan el porcentaje de fallecidos por grupo etario, tal que un 16,47% corresponde a jóvenes y un 83,53% a ancianos. Dado esto, tenemos que $\delta^y = 0,0753$ y $\delta^o = 0,94$. Por último, acorde con [Brotherhood et al. \(2020\)](#), se establece una tasa anual de supervivencia de 0,92 para ancianos y 0,964 para jóvenes. Luego, la tasa de supervivencia semanal para agentes ancianos será $0,92^{1/52} = 0,998$ y $0,964^{1/52}$ para los jóvenes que fijamos en 1. Todos los parámetros relacionados con las infecciones y la salud discutidos anteriormente se resumen en el Cuadro 1.

Para la calibración de los parámetros económicos y de preferencias, si bien no existe una única información en Chile sobre el factor de descuento de los agentes, nos respaldamos en la literatura vista a lo largo del documento para establecer un factor de descuento común $\beta = 0,96$, tal que $\beta^y = 0,96$ y $\beta^o = 0,95$. Respecto a la producción de la economía, consideramos una tasa de depreciación semanal del capital de $\delta_k = 0,006$ y la importancia relativa del capital se fija en $\gamma = 0,4$. En cuanto a los shocks a la productividad, consideramos un vector $e^z = \{1; 0,75; 0,5; 0; 1; 0\}$ para el caso descentralizado, donde los agentes febriles perciben una reducción de su productividad en un 25%, mientras que los infectados pueden continuar trabajando con solo un 50% de su productividad¹². Para el caso centralizado, tanto los agentes infectados y graves no producen y los agentes susceptibles y recuperados mantienen su productividad íntegramente. En cuanto a la ponderación entre el criterio sanitario y económico que establece el Gobierno, consideramos un valor de $\lambda = 0,5$, que refleja una autoridad igualmente preocupada por la vida de las personas y que no se desplome la economía. Finalmente, la importancia relativa del trabajo en la función de utilidad de los agentes se consideró como un parámetro libre para lograr el mejor ajuste entre la proporción de infectados del modelo y la proporción de infectados que se presentan en Chile. Dicho procedimiento permitió obtener un parámetro $\psi = 2,79$. Todos los parámetros relacionados con las preferencias y la tecnología se resumen en el Cuadro 2.

¹²Esta reducción viene dada por que los agentes infectados podrían continuar trabajando pero deben dedicar tiempo a su cuidado personal, realización de exámenes, entre otras cosas que limitan su capacidad productiva.

Cuadro 1: Calibración - Parámetros Sanitarios

Parámetro	Valor	Definición
-	0,1183	Población adulta mayor (%)
Π^*	0,107	Infeciosidad Gripe común
Π_0	0,217	Infeciosidad COVID-19
α^y	1	Probabilidad de desarrollar síntomas graves, jóvenes
α^o	1	Probabilidad de desarrollar síntomas graves, ancianos
ξ^y	0,500	Probabilidad de Testeo, jóvenes
ξ^o	0,500	Probabilidad de Testeo, ancianos
$\phi^{i,y}$	0,976	Probabilidad de recuperación, síntomas leves jóvenes
$\phi^{i,o}$	0,940	Probabilidad de recuperación, síntomas leves ancianos
$\phi^{s,y}$	0,400	Probabilidad de recuperación, síntomas graves jóvenes
$\phi^{s,o}$	0,310	Probabilidad de recuperación, síntomas graves ancianos
δ^y	0,075	Tasa de mortalidad semanal de pacientes críticos jóvenes
δ^o	0,940	Tasa de mortalidad semanal de pacientes críticos ancianos
Δ^y	1	Supervivencia semanal, jóvenes
Δ^o	0,998	Supervivencia semanal, ancianos

Cuadro 2: Calibración - Parámetros Económicos

Parámetro	Valor	Definición
β	0.96	Factor de descuento común
β^y	0.96	Factor de descuento efectivo, jóvenes
β^o	0.95	Factor de descuento efectivo, ancianos
γ	0.40	Importancia relativa del capital
δ_k	0.006	Tasa de depreciación semanal del capital
λ	0,5	Importancia relativa del criterio sanitario para el Gobierno
ψ	2,79	Importancia relativa del trabajo en la función de utilidad

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la modelación. Debido a que las cifras oficiales de infectados semanales obtenidas para calibrar el modelo corresponden a un contexto en que se han implementado cuarentenas, comenzamos exhibiendo en la sección 5.1 la trayectoria de las principales variables relevantes para el Gobierno tanto para el caso de la economía centralizada que enfrenta el COVID-19, que en adelante consideramos como nuestro modelo de base, como para el caso descentralizado¹³. A continuación, la sección 5.3 presenta los resultados económicos y sanitarios que nos entrega el modelo cuando la política de cuarentena no se obtiene mediante la resolución del problema de minimización de la función de pérdidas del Gobierno, sino que se obtiene a través de una réplica de la política implementada en Chile.

Para efectos de la comparación entre ambos escenarios expuestos en la sección 3, el conjunto de parámetros óptimos obtenidos al calibrar los infectados semanales para el modelo centralizado también son utilizados para analizar la propagación del virus bajo un contexto descentralizado. Declaramos que este ejercicio puede considerarse incompleto o injusto para el segundo escenario debido a que los parámetros que le son impuestos pueden no ser los óptimos en ausencia de las políticas de cuarentena. Sin embargo, la razón de esta decisión surge debido a que el contexto de los datos recopilados se condice con el caso en que si se implementan medidas de confinamiento, por lo que no nos hace sentido realizar una calibración de datos con cuarentenas a un modelo en que no se apliquen estas medidas. Así, dada la inexistencia de un contrafactual que nos permita calibrar el caso descentralizado, los resultados obtenidos podrían estar supeditados a la diferencia que podrían presentar los parámetros óptimos en ambos casos.

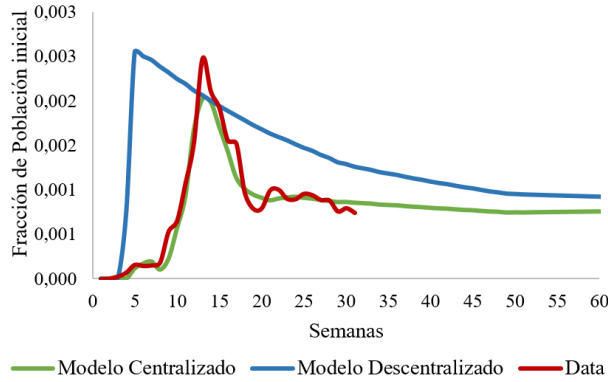
5.1. CUANTIFICANDO EL IMPACTO DE LAS CUARENTENAS

La Figura 1 a continuación presenta los resultados sanitarios obtenidos. Para cada gráfico, se exhibe además la trayectoria de las cifras oficiales de COVID-19 en Chile reportadas por el Ministerio de Salud y los resultados del caso centralizado y descentralizado. Este último escenario corresponde al caso en que el Gobierno solo está presente en la economía como un espectador que enfrenta pérdidas dadas por la variación en la producción y los aumentos en la probabilidad de contagio, pero que no participa activamente en las decisiones de confinamiento. Así, el caso descentralizado podemos interpretarlo como nuestro contrafactual para

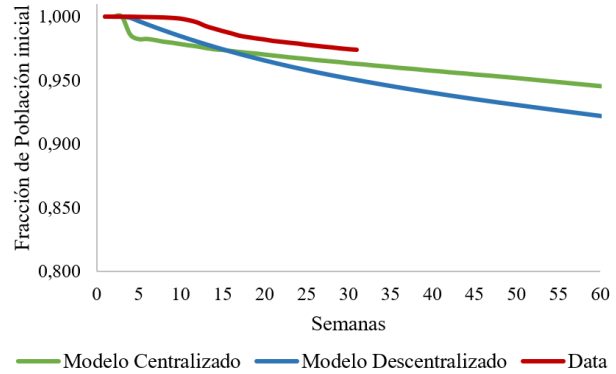
¹³En el modelo, la población puede ser categorizada en los compartimentos Susceptibles, Febriles, Infectados, Graves, Fallecidos y Recuperados. Sin embargo, en línea con la data entregada por el Ministerio de Salud de Chile, omitimos en las gráficas que siguen el estado febril. Esta decisión se realiza en post de comparar la data y el modelo de forma que el lector pueda visualizar de buena forma la dinámica capturada por el modelo y como se asemeja a la dinámica chilena.

cuantificar el impacto de la cuarentenas. Debemos señalar que dado el enfoque del modelo en replicar la curva de infectados semanales en Chile, las trayectorias de los otros estados de salud que se presentan (susceptibles, graves, fallecidos y recuperados) vienen dados por la Ley de Movimiento de los agentes. Por lo tanto, nos interesa capturar la dinámica de las curvas por sobre el número exacto de personas en cada estado a lo largo del tiempo.

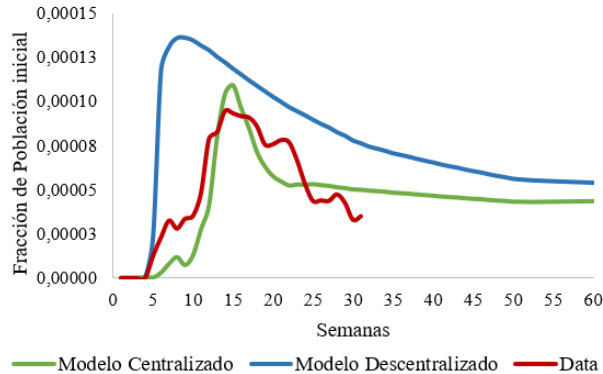
Figura 1: Variables sanitarias agregadas: Modelo Centralizado vs Descentralizado



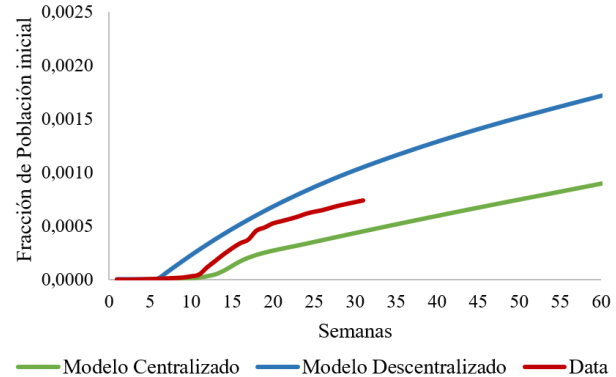
(a) Agentes Infectados



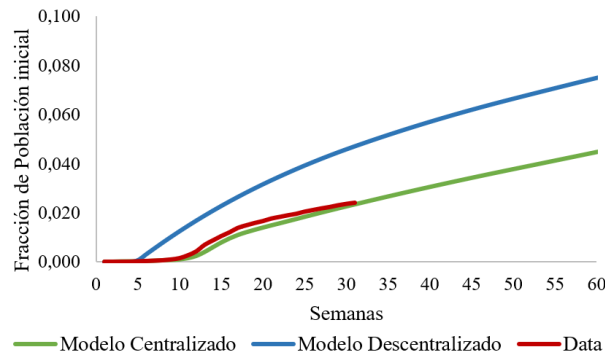
(b) Agentes Susceptibles



(c) Agentes Graves



(d) Agentes Fallecidos



(e) Agentes Recuperados

El gráfico (a) permite evidenciar el avance de infectados respecto a la población total inicial. El máximo de contagios semanal corresponde a 40.143 personas en la semana 13 (primera semana de junio de 2020) que luego converge a cerca de 10.000 personas o bien 1.428 contagios diarios en la semana 60. Sin medidas de confinamiento, podemos observar un aumento en la intensidad de los contagios y un aceleramiento en el máximo contagio semanal. El máximo en este caso se alcanza en la semana 5 con 46.472 infectados, lo que representa cerca del 0,3% de la población y una mayor persistencia a lo largo del tiempo bordeando las 2.000 personas contagiadas semanalmente.

En el gráfico (b), que corresponde a la fracción de la población que no contrae el virus, el modelo señala que para la semana 60 existirían 849.745 personas contagiadas y ya para la semana 95 (marzo de 2022) esta cifra alcanzaría 1.394.826 personas contagiadas. En comparación al caso descentralizado, el modelo nos señala que en la semana 60 dicha cifra alcanza 1.461.715 personas y para la semana 95 aumentaríamos a aproximadamente 1.961.867 contagios. En este caso, vemos que la cuarentena provocó una disminución de 567.041 infectados.

Por su parte, el gráfico (c) evidencia la evolución de pacientes en estado crítico a lo largo del tiempo. Respecto a este, es importante señalar que el máximo de pacientes graves del modelo se condice con el de la data chilena, alcanzado en la semana 14 de la pandemia (segunda semana de junio 2020). Como se puede ver, los niveles de agentes graves se mantienen a lo largo del tiempo a partir de la semana 25 convergiendo a 780 personas que semanalmente requerirán atención hospitalaria. En este sentido, es importante considerar la capacidad hospitalaria del sistema de salud de Chile que debe ser capaz de brindar atención a esta fracción de la población que requiere cuidados especiales. Al analizar las cifras con nuestro contrafactual, este nos reporta una cantidad de personas graves considerablemente mayor que en el caso centralizado. El máximo de agentes graves se alcanza en la semana 9 (primera semana de mayo de 2020) lo que equivale a 2.498 personas que requieren de cuidados intensivos (cerca de 356 personas en promedio por día) convergiendo a 900 personas hacia el final de la semana 60 y hasta la semana 95. Esta cifra representa un aumento en el mediano plazo de 120 personas por semana a los dos años de la aparición del virus.

Para el caso de los fallecimientos, en el gráfico (d) vemos que la fracción de fallecidos reportada por el modelo centralizado es considerablemente menor a las cifras chilenas. Concretamente, hasta el 1 de noviembre de 2020, Chile ha registrado 14.032 fallecimientos, mientras que el modelo reporta solo 8.604 decesos. Para finales de la ventana de modelación, se predice una cantidad acumulada de 24.818 fallecimientos. Respecto al caso descentralizado, el modelo predice una cifra acumulada de fallecidos de 18.267 personas hasta el

1 de noviembre de 2020 y que alcanza niveles sistemáticamente mayores en comparación al escenario base. A lo largo del tiempo, el avance de la pandemia sin implementación de cuarentenas provocaría un total de 43.881 decesos, lo que representa 19.063 vidas que se podrían salvar debido a las cuarentenas. Este punto apoya nuestra hipótesis sobre la efectividad de las cuarentenas, debido a que éstas si cumplen con uno de los objetivos del Gobierno: *“resguardar la vida de la población”*.

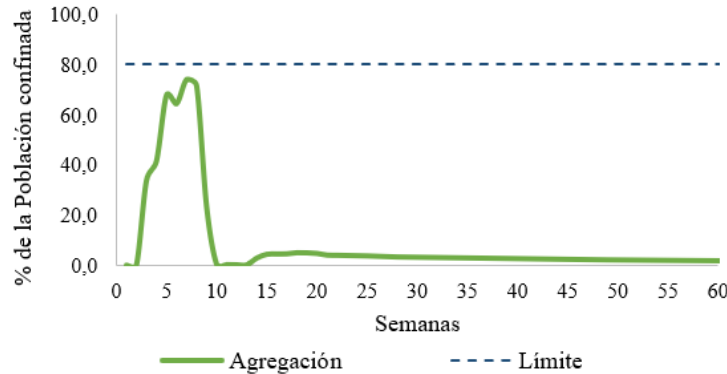
Finalmente, el gráfico (e), nos presenta la trayectoria de la población recuperada. Como se puede apreciar, para el caso centralizado existe menores niveles de recuperación debido a que hay una menor fracción de la población que contrajo el virus. Por lo tanto, se debe tener cuidado con la interpretación de las curvas en ambos contextos ya que, por ejemplo, una fracción de 0,05 de la población infectada que se recuperada ante un contexto de cuarentenas, es menor que en el caso sin cuarentenas.

Continuamos ahora con la presentación de los resultados del problema de optimización que enfrenta el Gobierno, que permiten establecer una política óptima de cuarentenas. Como se mencionó más arriba, nuestro modelo de referencia (centralizado) considera un planificador central o Gobierno que debe elegir cuarentenas para minimizar sus pérdidas. Sin embargo, debido a la imposibilidad de las autoridades para anticipar el comportamiento futuro de los agentes y de la pandemia, las decisiones sobre qué fracción de la población debe estar confinada contemplan la siguiente lógica: a final de cada periodo, el planificador central recibe la información sobre el número de personas infectadas, susceptibles, graves, fallecidas y recuperadas. Luego, resuelve su problema de optimización encontrando la fracción de la población joven y anciana que debería estar confinada para minimizar las pérdidas que obtuvo en dicho periodo. Una vez elegidos los niveles de confinamiento, estos comenzarán a implementarse en la población en el periodo posterior. En este sentido, podemos señalar que existe un retraso de una semana en la toma de decisiones sobre confinamiento, que podría abordarse mediante alguna aproximación diferente de la que realizamos en esta investigación.

La Figura 2 presenta los resultados obtenidos sobre la fracción de la población que el Gobierno debe confinar para minimizar su función de pérdidas. En términos agregados, podemos señalar que el modelo no logra alcanzar el nivel máximo de cuarentena establecido previamente (80 %). Sin embargo, como veremos en la sección de desagregación de resultados, esta restricción a la aplicación de cuarentenas si se mantiene activa para ambos grupos en distintos momentos del tiempo, es decir, la decisión de cuarentena en cada periodo provoca un confinamiento agregado menor al 80 %, a pesar de que se alcance este límite de forma desagregada. La importancia de estos resultados es que la máxima fracción de la población que

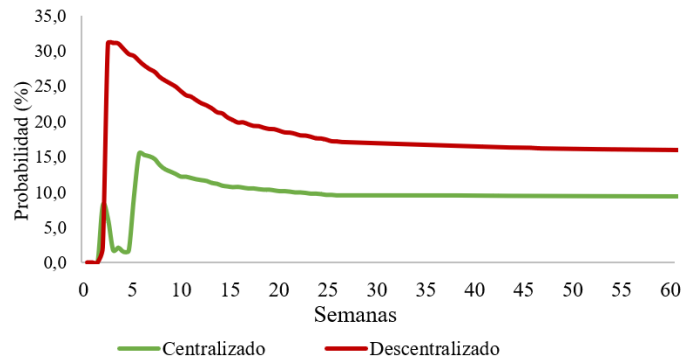
efectivamente se logra confinar alcanza un 73,83 %, es decir, se establecen cuarentenas que afectan a aproximadamente 14 millones de chilenos, lo que permite que cerca de 5 millones de agentes sigan desempeñándose y tomando decisiones sin verse directamente afectadas por esta medida.

Figura 2: Política óptima de Cuarentena



Con los niveles establecidos de cuarentenas, continuamos estudiando el comportamiento de la principal variable que representa el “*criterio sanitario*” en nuestro modelo: la probabilidad agregada de contagio existente en un espacio común donde los agentes se distribuyen uniformemente. La Figura 3 presenta la trayectoria de dicha probabilidad a lo largo del tiempo. Inicialmente, podemos ver que esta parte de 0 y crece hasta un 9,9% en la semana 4, en línea con el periodo en que la población joven alcanza sus niveles máximos de confinamiento. Posteriormente, vemos una disminución de esta variable hasta niveles cercanos al 2,3 % para luego aumentar hasta un 15,45 %. El incremento de dicha probabilidad se condice con el periodo en que se levanta la cuarentena en la población lo que nos permite afirmar que este primer componente de la función de pérdidas del Gobierno, efectivamente se relaciona de forma negativa con este tipo de medidas. Es importante destacar que el mecanismo del modelo no provoca que la probabilidad llegue a 0, sino que alcance un valor considerablemente bajo tal que la economía evite tanto la pérdida de vidas como una recesión. En el mediano plazo, la economía podría retornar a sus niveles de producción pre COVID-19, aun cuando enfrente una probabilidad de 9,6 %. Si nos enfocamos en el caso descentralizado, vemos que esta variable alcanza un máximo de 31,16 % en la semana 6 (segunda semana de abril de 2020), para luego disminuir gradualmente hasta un 15,9 % en la semana 95. Todo lo anterior nos indica que en un horizonte temporal de dos años, la pandemia continuará presente en Chile, y que las medidas de cuarentena lograrán disminuir la probabilidad de contagio en 6,3 puntos porcentuales en el mediano plazo.

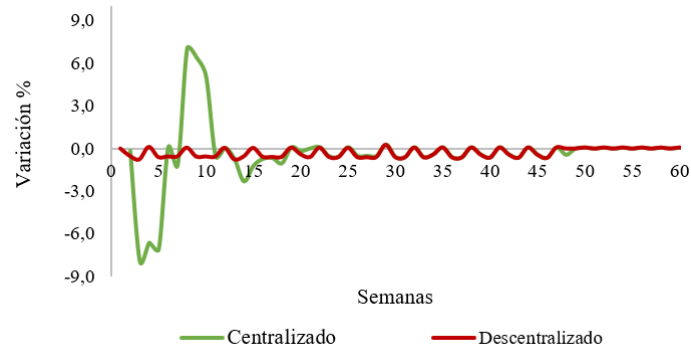
Figura 3: Probabilidad de contagio agregada



Presentamos ahora los resultados de la principal variable económica de interés del Gobierno ya que representa el “*criterio económico*” en su función de pérdidas: la variación en la producción agregada¹⁴. Como se puede ver en la Figura 4, la economía chilena centralizada atraviesa por un periodo de recesión en los primeros 2 meses y medio (marzo, abril y hasta la segunda semana de mayo) desde la llegada del COVID-19. Esto provoca una caída acumulada del 11,6 % en la producción siendo los episodios más críticos durante la semana 4 donde se obtuvo una caída del 9,96 % respecto a la semana 3. En este punto, podemos señalar que las autoridades sí tomaron decisiones donde prevaleció el resguardo a la vida por sobre una caída del producto debido a la implementación de cuarentenas rigurosas. Sin embargo, tras dos meses de recesión, el modelo nos señala que el Gobierno levanta las cuarentenas en su totalidad para el caso de los jóvenes con la finalidad de evitar una recesión más abrupta y restablecer gradualmente los niveles de producción. Esto quiere decir que el cumplimiento del objetivo sanitario se ve limitado por el criterio económico, de forma tal que la economía estaría dispuesta a sacrificar producto a cambio de vidas, pero no de forma indefinida, más bien por un corto plazo. En contraste, para el caso de la economía descentralizada, se puede ver una variación en la producción mucho menos dramática. Tras 48 semanas de pandemia, se percibe una caída acumulada de 14,59 % en la producción, mientras que las caídas semanales fluctúan en torno al 0,56 %. Estos resultados nos indican que durante el periodo de recesión del caso centralizado, se obtiene una caída en el producto 9,45 veces mayor en comparación al contexto descentralizado.

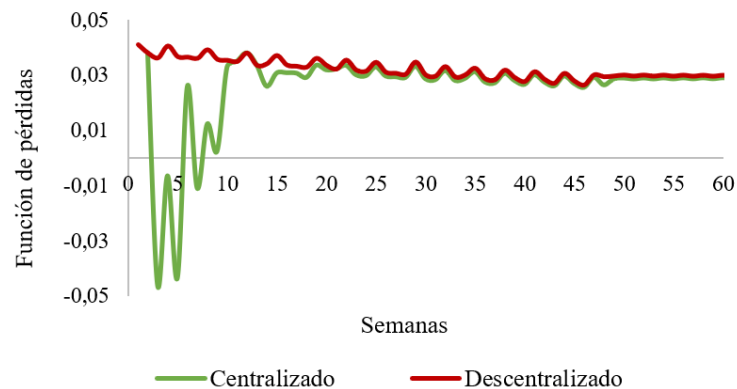
¹⁴Debido a que la investigación se centra en las decisiones de cuarentena del Gobierno, la trayectoria de otras variables económicas para el caso centralizado y por grupo etario, tal como el trabajo, capital, consumo y utilidades se presentan en el Apéndice 1. Cabe destacar que si bien se puede profundizar en los resultados obtenidos de dichas variables, esto podría modificar el enfoque del documento, dado que pueden desprenderse otro tipo de conclusiones que pueden estar fuera del marco en el que nos encontramos.

Figura 4: Variación de la producción en la economía



Finalmente, presentados los resultados tanto sanitarios como económicos relevantes en el estudio, la Figura 5 exhibe el comportamiento de la función de pérdidas que enfrentan las autoridades tanto cuando participan activamente en la economía tomando decisiones de confinamiento como en el caso en que se comportan como espectadoras de la pandemia. A modo general, estos resultados indican que una combinación equitativa entre el criterio sanitario y económico provocaría una oscilación de las pérdidas, siendo estas minimizadas cuando se implementan cuarentenas estrictas. Lo anterior nos permite concluir que si bien el Gobierno no descuida la producción agregada, la rápida propagación del virus lo obliga a *'preferir'* cuarentenas estrictas para que en el mediano y largo plazo se logre retornar a niveles aceptables de producción con una mortalidad baja a causa del virus. Concretamente, el Gobierno solo es capaz de disminuir sus pérdidas en el corto plazo con las cuarentenas, dado que una vez superado el periodo en que se alcanzan los mayores niveles de contagios, el levantamiento del confinamiento provoca una convergencia en las pérdidas hacia un nivel de largo plazo que podemos interpretar como el nivel de pérdidas que se obtienen en un contexto en que la economía aprende a convivir con el virus.

Figura 5: Trayectoria de la Función de Pérdidas del Gobierno

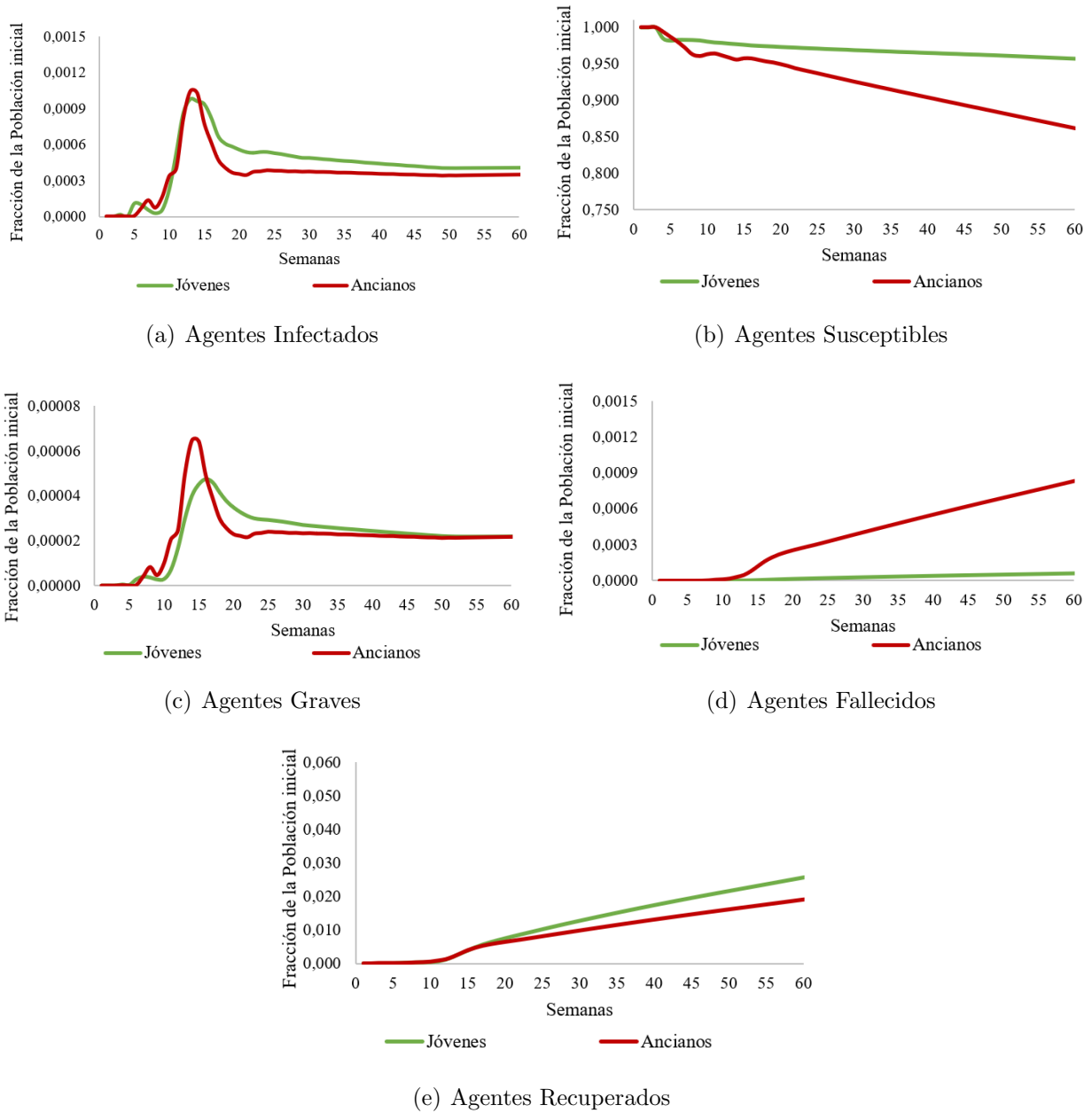


5.1.1 DESAGREGACIÓN DE RESULTADOS POR TIPO DE AGENTE

En este apartado se presentan los resultados de las variables relevantes de nuestro modelo una vez que diferenciamos entre agentes jóvenes y ancianos. La Figura 6 presenta la trayectoria de la población para el caso centralizado. El gráfico (a) nos permite concluir que a lo largo de la pandemia, la población joven es la que presenta mayores niveles de contagio en comparación a los ancianos, donde destaca la brecha que se produce entre ambos grupos en las semanas posteriores al nivel máximo de contagios alcanzados (semana 14). En este punto, señalamos que una posible explicación a esta diferencia viene dada por la rigurosidad que tuvieron las cuarentenas para ambos grupos y que analizaremos más adelante. En el gráfico (b), podemos ver claramente como la pandemia tiene un efecto heterogéneo en la población. Para el caso de los jóvenes, la población que se mantiene susceptible luego de dos años desde la llegada del COVID-19 es de 95,4 % mientras que la población anciana libre del virus en el mismo periodo solo alcanza el 77,07 %, es decir, de 1.394.826 personas que si contrajeron el virus, 1.050.616 son jóvenes y 344.210 son ancianos.

A continuación, el gráfico (c) nos presenta uno de los resultados más importantes de nuestro modelo. Ambos grupos etarios se ven expuestos al desarrollo de síntomas graves siendo los ancianos los que proporcionalmente requieren cuidados intensivos. En particular, el máximo de individuos en estado grave es de 1.188 ancianos y 874 jóvenes. Acá, realizamos una primera reflexión en torno a la interacción de ambos grupos etarios: *¿qué tan importante es que los agentes jóvenes internalicen el efecto de sus conductas en la salud de la población anciana?*. En línea con lo anterior, el gráfico (d) nos presenta de forma clara el impacto diferenciado del virus en la población. Del total de muertes que traería la crisis sanitaria dos años después de su aparición (24.818 fallecimientos), más de 20.000 corresponden a ancianos, mientras que cerca de 5.000 son jóvenes. Por lo tanto, resulta importante el resguardo de la población anciana debido al mayor riesgo de muerte que presentan. Finalmente, como contrapartida de los fallecimientos, el gráfico (e) presenta la trayectoria de recuperados. Como se puede ver, la población joven es la que alcanza mayor porcentaje de recuperación a lo largo del tiempo, en línea con los resultados de los decesos.

Figura 6: Variables sanitarias desagregadas: Caso Centralizado



Para el caso descentralizado, la Figura 7 nos permite señalar lo siguiente: tanto jóvenes como ancianos alcanzan un mayor nivel de contagios en menos tiempo que en el caso centralizado (semana 5 vs semana 13) y la proporción de contagiados en cada población se comporta de forma similar. Para el caso de los agentes susceptibles (gráfico (b)), a la semana 60 el porcentaje de jóvenes y ancianos que no contrajeron la enfermedad es de un 96,1% y 87,4%, respectivamente. Esto equivale a un aumento respecto al caso centralizado de cerca de 200.000 agentes infectados en el país.

Al analizar la trayectoria de los agentes que desarrollan síntomas graves, en la semana 10 donde se alcanza el máximo nivel en esta categoría, se contabilizan 3.377 jóvenes y 719 ancianos. En comparación al caso centralizado, los niveles de población en estado grave se alcanzan en la semana 13 acumulando un total de 2.508 jóvenes y 550 ancianos. Esto evidencia en parte el alivio que implica la implementación de cuarentenas para el sistema de salud chileno ya que se evita que 1.038 personas se agraven y eventualmente requieran cuidados intensivos y hospitalización. A la hora de analizar el número de fallecidos en un contexto sin confinamiento, el gráfico (d) nos muestra cómo la población anciana se ve fuertemente afectada con el virus. Del total de 43.881 muertes acumuladas a dos años, 39.961 corresponde a ancianos mientras que 3.920 son jóvenes. Por último, el gráfico (e) presenta la trayectoria de recuperados donde se puede apreciar que la fracción de ancianos que se logra recuperar termina siendo menor que la de los agentes jóvenes.

Figura 7: Variables sanitarias desagregadas: Caso Descentralizado

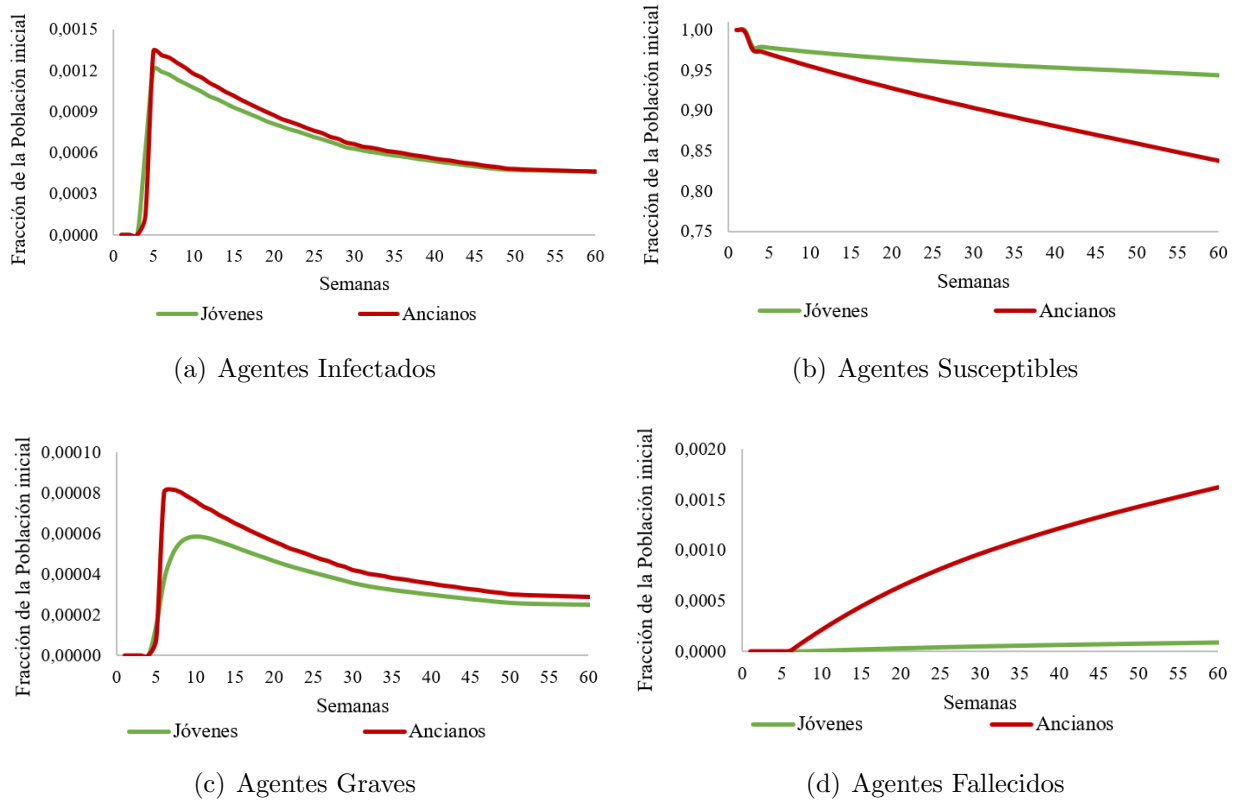
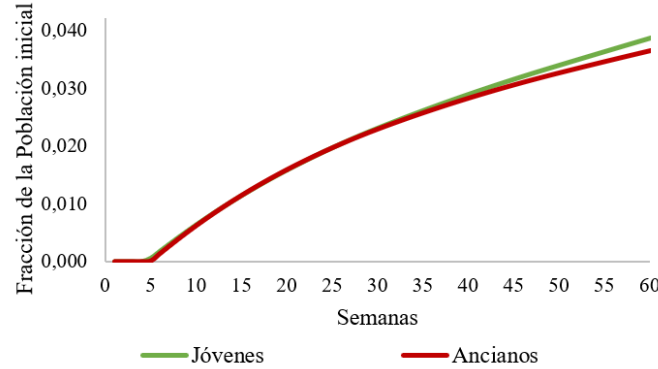


Figura 7 (Continuación): Variables sanitarias desagregadas: Caso Descentralizado

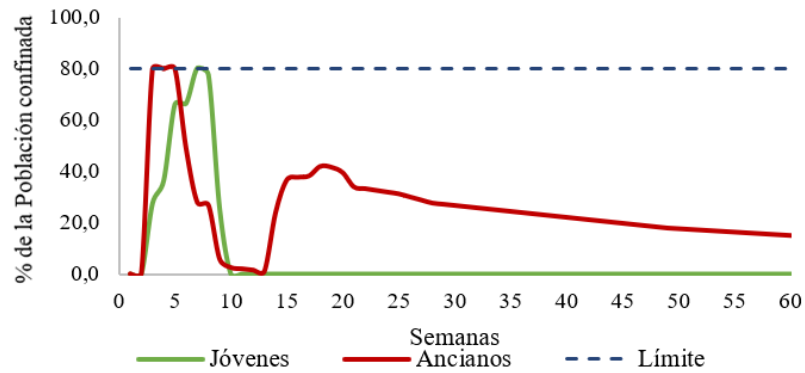


(e) Agentes Recuperados

En cuanto a los resultados sobre la política de cuarentena implementada por el Gobierno, la Figura 8 evidencia la heterogeneidad que caracteriza nuestro modelo. Como hemos señalado anteriormente, permitirle a las autoridades tomar decisiones de forma heterogénea, les entrega mayor libertad a la hora de confinar a la población. En este sentido, nuestro modelo busca la combinación óptima de confinamiento de jóvenes y ancianos en cada periodo que logren alcanzar la menor pérdida posible. Los resultados nos muestran que tanto la población joven como la de ancianos alcanzan el nivel máximo de confinamiento establecido por el modelo (80 %) en las primeras semanas de la pandemia. Esto refleja un nivel de confinamiento riguroso en los primeros dos meses de exposición al virus siendo más restrictivo para los ancianos desde el principio y luego para los jóvenes en la semana 9.

Un hallazgo importante de estos resultados es que dada la función de pérdidas utilizada, el óptimo para combatir la pandemia contempla un confinamiento único y estricto para los jóvenes por alrededor de 2 meses. Esto demuestra la importancia de la implementación de medidas restrictivas e incluso consideradas como “*extremas*” al inicio de la crisis sanitaria donde se intenta evitar el contacto de más del 70 % de la población para evitar un número de fallecimientos subóptimo. Por otro lado, para el caso de la población anciana, el modelo nos arroja un primer periodo de cuarentena estricto a partir de la semana 2 y hasta la semana 5, para luego disminuir gradualmente hasta alcanzar un nivel 0 en la semana 14. Sin embargo, el modelo presenta un segundo periodo de cuarentena que alcanza su máximo en la semana 18 (41,9 % de confinamiento) para luego disminuir gradualmente a lo largo del tiempo hasta un porcentaje en torno al 12 % a partir de la semana 60 hasta la semana 95. Esto quiere decir que a dos años de la llegada del COVID-19 en la economía centralizada, los ancianos deberían mantener un confinamiento parcial para disminuir su mortalidad a causa del virus.

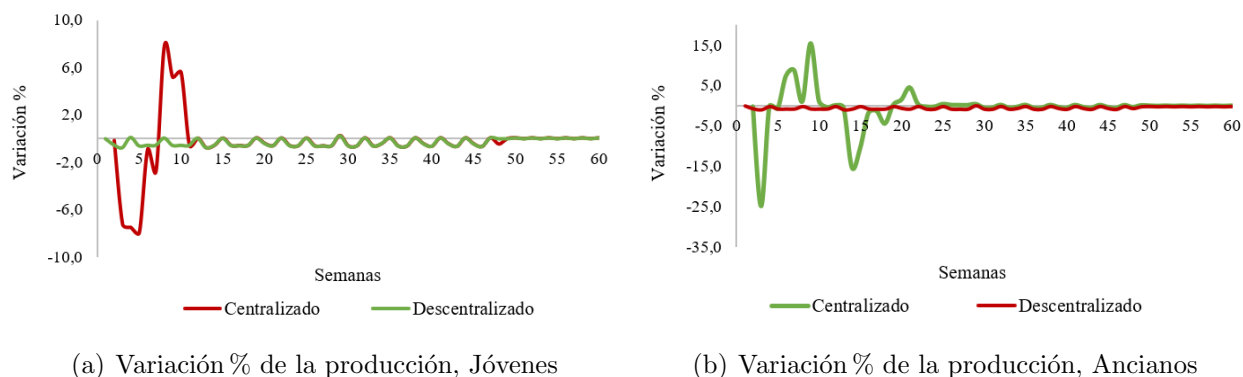
Figura 8: Política óptima de Cuarentena



La Figura 9 presenta la variación porcentual de la producción de la población joven y anciana¹⁵. Para el caso de los jóvenes, la implementación de cuarentenas les provoca una caída en la producción que alcanza un 8,6 % acumulado hasta la semana 6, donde se percibe que la semana 4 se alcanza la variación negativa más extrema de un 8,53 % respecto a la semana 3 para luego entrar en una recuperación una vez que se aplica el desconfinamiento. La convergencia del modelo implica un crecimiento del 0,16 % promedio posterior a la semana 48. Respecto a los ancianos, estos son los agentes más afectados con las decisiones de cuarentena establecidas por el Gobierno. Como se ve en el gráfico (b), la variación en la producción alcanza un límite inferior cercano a -25 % y uno superior en torno al 15 %. Los dos periodos en que se percibe la mayor caída en la producción respecto al periodo anterior son aquellos en que el Gobierno decide implementar cuarentenas en esta población, es decir a comienzos de la semana 3 y luego en la semana 14. Entre estos confinamientos, la producción recupera en parte la caída sufrida con la primera cuarentena para luego converger a un crecimiento de 0,1 % a partir de la semana 48.

¹⁵Como la calibración del modelo se realizó en torno a los niveles de contagios de CODI-19 en la economía, capturamos el cambio en la producción y no los niveles reales de producción chilenos. Esto quiere decir, por ejemplo, que un nivel de 1,2 en la primera semana de marzo de 2020 en la producción no es informativo por sí solo, sino que requiere de conocer el nivel alcanzado en la segunda semana del mismo mes para estudiar el cambio.

Figura 9: Variación de la producción en la economía



El modelo propuesto nos ayuda a comprender el impacto de las cuarentenas en las variables sanitarias y económicas para el caso chileno. En principio, esta información nos permite dar respuesta de forma parcial a la pregunta de investigación en la que se basa este documento: *¿ha sido efectiva la política de cuarentenas en Chile para combatir la propagación del COVID-19?* En términos generales, la respuesta es que la implementación de cuarentenas si es efectiva para combatir la propagación del virus. Como pudimos ver, en un escenario centralizado, si se obtienen menores niveles de contagios y fallecimientos que en un contexto descentralizado sin cuarentenas. Por lo tanto, concluimos que la implementación de esta política pública cumple con el objetivo de evitar el avance de la pandemia. Junto a esto, destacamos que los costos económicos que sufre la economía no deben ser despreciados o ignorados por las autoridades sino que deben ser considerados a la hora de encontrar un equilibrio entre el resguardo a la vida y una crisis económica.

A pesar de que logramos dar una respuesta general a la pregunta central que nos planteamos, aún nos falta analizar si la política de cuarentenas implementada por el Gobierno de Chile ha cumplido con su objetivo, y de ser así, si esta ha sido óptima. Para esto, en el siguiente apartado discutiremos los resultados de nuestro modelo cuando replicamos de forma aproximada las decisiones reales de confinamiento que fueron aplicadas en Chile por las autoridades gubernamentales.

5.2. EFECTIVIDAD DE LAS CUARENTENAS ESTABLECIDAS EN CHILE

En esta sección analizamos cómo la trayectoria del modelo centralizado cuando las decisiones de cuarentena no se obtienen mediante la resolución del problema de minimización de pérdidas del Gobierno, sino que se incorporan de forma exógena al replicar las decisiones de confinamiento que ha tomado el Gobierno chileno.

Acorde con las proyecciones de la población que fueron presentadas en la sección 4, en 2020 el territorio nacional contempla 19.107.206 individuos que se distribuyen en 346 comunas¹⁶. Desde el 25 de marzo de 2020, momento en que se el Ministerio de Salud anuncia las primeras cuarentenas para 7 comunas de Chile (MINSAL, 2020b) se inicia un proceso de confinamiento progresivo en que diariamente se declaraban comunas que eran afectas a esta política y otras que dejaban de estarlo según diversos criterios sanitarios como lo son el número de casos activos (capaces de transmitir la infección), el aumento de la incidencia de casos activos, la concentración de casos activos por kilómetro cuadrado y la capacidad asistencial de la red integrada COVID-19.

A partir del 19 de julio del mismo año, el Gobierno chileno implementa un “*Modo COVID*” en el cual se establece un *Plan Paso a Paso* que consiste en una estrategia gradual para enfrentar la pandemia según la situación sanitaria de cada zona en particular. Se trata de 5 escenarios o pasos graduales, que van desde la Cuarentena hasta la Apertura Avanzada, con restricciones y obligaciones específicas¹⁷. En este contexto, el avance o retroceso de un paso particular a otro está sujeto a indicadores epidemiológicos, red asistencial y trazabilidad¹⁸. El avance de las comunas acorde con dicho plan es informado diariamente a través de diversos medios de comunicación.

Para poder replicar el confinamiento realizado en Chile, se realiza un seguimiento sobre el estado sanitario de 72 comunas chilenas cuyas poblaciones agregadas representan aproximadamente 15 millones del total de la población (equivalente a un rastreo del 78,5%)¹⁹. En esta línea, decidimos establecer como cuarentena solo cuando las comunas se encuentran en el Paso 1 del *Plan Paso a Paso*. Gracias a lo anterior, desde la tercera semana de marzo y hasta finales de octubre de 2020 logramos obtener la fracción de la población que enfrenta cuarentenas y por lo tanto extraer la política que el Gobierno chileno consideró óptima en casa momento. Para el caso particular de la población anciana, las autoridades sanitarias decretaron cuarentena obligatoria para todos aquellos individuos mayores a 75 años desde

¹⁶Las comunas son una división administrativa menor y básica de Chile. Corresponde a lo que en otros países se conoce como municipio. A partir de 1976 y como resultado del proceso de regionalización, las comunas pasaron a reemplazar a las subdelegaciones del Gobierno en sus funciones y atribuciones político-administrativas, como entidad subnacional de carácter local. Un conjunto de comunas conforman una provincia. Las comunas pueden ser de carácter urbano, rural o combinar ambas. En el territorio de una comuna, puede haber más de un centro urbano sea este: ciudad (más de 5000 habitantes), pueblo (entre 2001 y 5000 habitantes, o de 1000 a 2001 si el 50 % de la población se dedica a las actividades económicas secundarias o terciarias), u otra localidad o forma de asentamiento humano; así mismo un centro urbano puede estar dividido en varias comunas.

¹⁷Para mayor detalle sobre esta iniciativa gubernamental, véase el Apéndice 2.

¹⁸La trazabilidad corresponde al seguimiento que se hace a las personas contagiadas y a sus contactos estrechos, para luego aislarlos y evitar la propagación del virus.

¹⁹Para conocer el listado de comunas seleccionadas para el seguimiento, véase el apéndice 3.

el día 22 de marzo de 2020 hasta el 30 de agosto del mismo año, para luego adecuarse a las cuarentenas que se establecieran en las comunas donde se encontraban habitando. Dado esto, extrapolamos esta iniciativa y suponemos que dicha medida afecta a todo el grupo de ancianos de nuestro modelo.

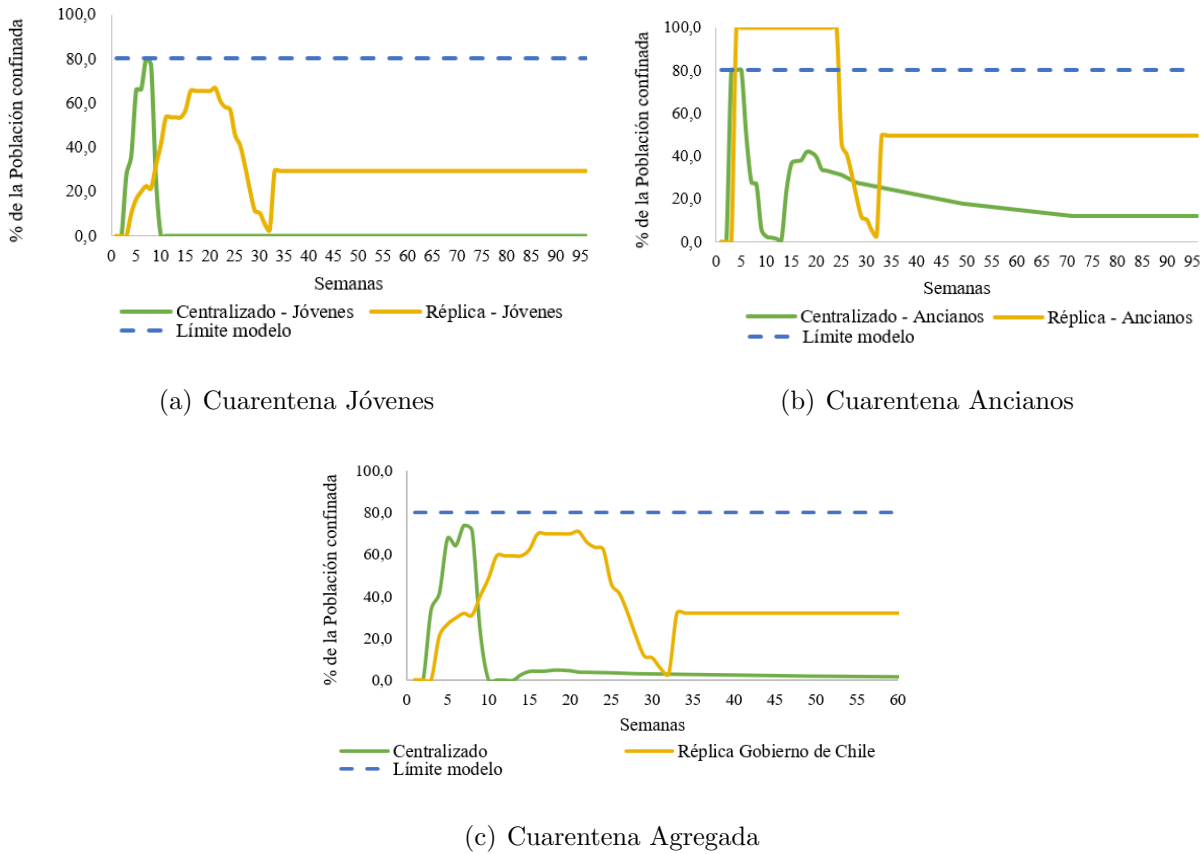
Debido a que la política encontrada solo se puede obtener hasta el 1 de noviembre de 2020 y nuestro modelo presenta la trayectoria de la economía hasta febrero del año 2022 (semana 95), suponemos por criterio conservador que la fracción de la población que seguirá en cuarentena una vez que el seguimiento de las comunas termina, corresponderá a un promedio de la población que estuvo efectivamente confinada hasta dicha fecha. Este supuesto permite dar mayor realismo a las futuras decisiones del Gobierno sobre confinamiento ya que establecer cuarentena 0 a partir del momento en que se acaba la data podría sesgar fuertemente nuestros resultados.

El cuadro 3 a continuación, presenta los resultados de la estrategia adoptada para replicar la política de cuarentenas. Por su parte, la Figura 10 nos muestra el comportamiento de la política de cuarentena de los jóvenes, ancianos y a nivel agregado que se obtienen del Cuadro 3 y el comportamiento de las cuarentenas que se obtuvieron en el apartado 5.1. Como se puede ver, el Gobierno chileno tomo medidas de confinamiento menos estrictas pero más prolongadas en la población joven mientras que en la población anciana fue mucho más severo, incluso más que lo permitido inicialmente en nuestro modelo. En términos agregados, los resultados centralizados nos señalan que una cuarentena estricta durante los primeros 2 meses para toda la población sería suficiente para lograr evitar un desplome en la economía y una pérdida de vidas subóptima. Sin embargo, los resultados de la réplica señalan que la decisión de las autoridades sanitarias fue comenzar con cuarentenas rígidas pasado dos meses y medio desde el inicio de la crisis sanitaria. En este punto, nos realizamos la siguiente pregunta: *¿Puede considerarse efectiva esta política de cuarentenas?* A nuestra consideración, probablemente no lo sea.

Cuadro 3: Réplica de la Política de cuarentenas en Chile

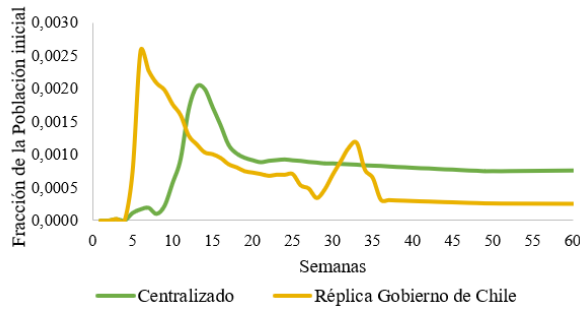
<i>Año</i>	<i>Mes</i>	<i>Semana</i>	<i>% Jóvenes en cuarentena</i>	<i>% Ancianos en cuarentena</i>
2020	Marzo	1	-	-
		2	-	-
		3	-	100,00
		4	10,21	100,00
2020	Abril	5	16,67	100,00
		6	20,01	100,00
		7	22,57	100,00
		8	21,55	100,00
2020	Mayo	9	32,06	100,00
		10	41,42	100,00
		11	53,68	100,00
		12	53,68	100,00
2020	Junio	13	53,68	100,00
		14	53,68	100,00
		15	57,08	100,00
		16	65,59	100,00
2020	Julio	17	65,59	100,00
		18	65,59	100,00
		19	65,59	100,00
		20	65,59	100,00
2020	Agosto	21	66,85	100,00
		22	61,10	100,00
		23	58,22	100,00
		24	57,18	100,00
2020	Septiembre	25	45,64	45,64
		26	41,09	41,09
		27	31,73	31,73
		28	20,77	20,77
2020	Octubre	29	11,46	11,46
		30	10,46	10,46
		31	5,44	5,44
		32	2,81	2,81

Figura 10: Implementación de Cuarentenas: Modelo Centralizado vs Réplica

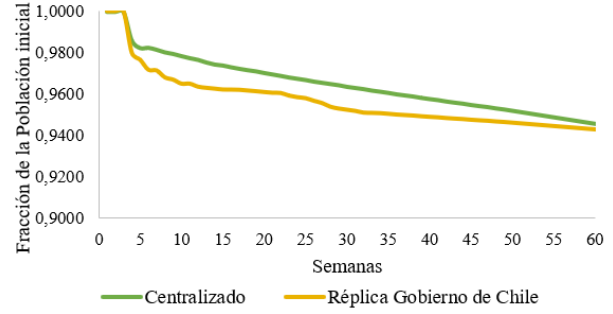


La Figura 11 presenta la trayectoria de las variables sanitarias obtenidas tras la réplica de la política del Gobierno. Para el caso de los infectados, el modelo reporta un máximo nivel de contagios en la semana 6, mientras que de forma centralizada este se alcanzaría en la semana 14, ambos momentos se diferencian en cerca de 4000 individuos siendo la réplica la que un mayor número de afectados. Adicionalmente, podemos ver que pasada la semana 10 la curva de contagios de la réplica cae considerablemente hasta la semana 27 donde luego se genera un nuevo aumento en las cifras hasta la semana 35. Por otro lado, el caso descentralizado se caracteriza por una trayectoria con un nivel más alto de agentes enfermos pero sin nuevas alzas. En este sentido, nuestro modelo señala que siguiendo la estrategia adoptada por las autoridades chilenas, a partir de octubre de 2020 se evidenciaría un rebrote cuyo máximo se encontraría en la semana 34 (segunda semana de noviembre) y se prolongaría al menos hasta la semana 37 (primera semana de diciembre) para luego retornar su trayectoria.

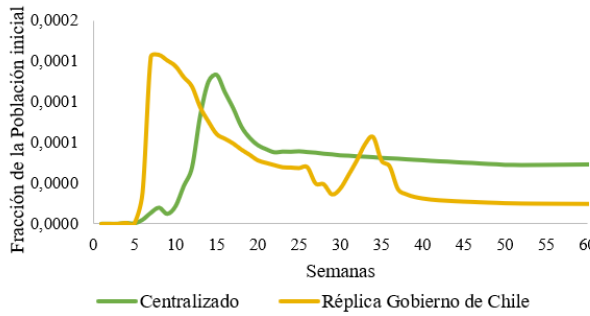
Figura 11: Variables sanitarias agregadas: Modelo Centralizado vs Réplica



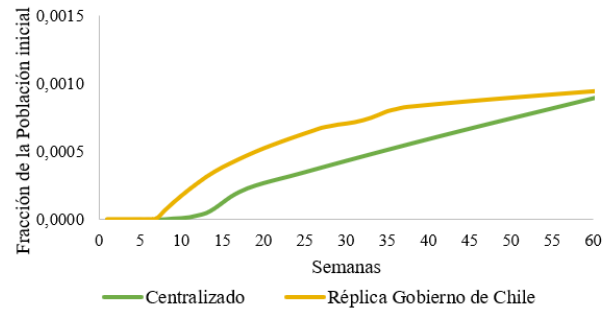
(a) Agentes Infectados



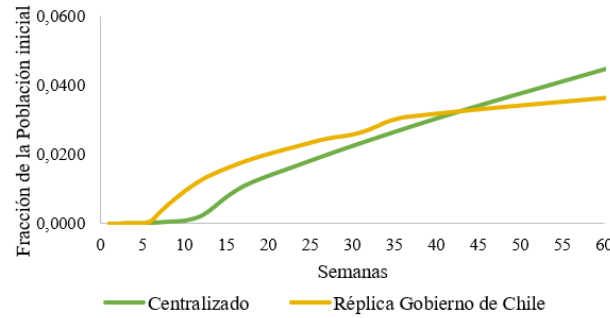
(b) Agentes Susceptibles



(c) Agentes Graves



(d) Agentes Fallecidos



(e) Agentes Recuperados

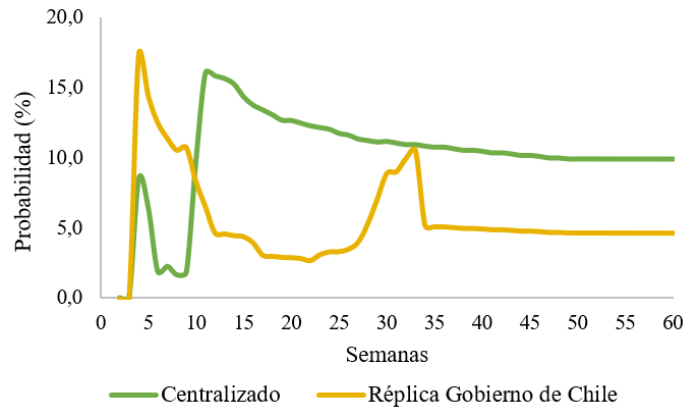
Nuestro modelo destaca la existencia de un rebrote en el cual el número de infectados semanales alcanza una cifra de 22.456 lo que equivale a 3.208 nuevos casos diarios. Para efecto de las conclusiones que podemos extraer de esto, el análisis a realizarse con bastante cuidado. En principio, este rebrote podría ser menor o acrecentarse dependiendo de la política óptima de cuarentenas que proyectamos pasada la semana 31. En el extremo, si a partir de esta fecha se eliminaran las cuarentenas, la cifra de nuevos infectados en época de rebrote superaría las 30.0000 personas semanales (más de 4.000 personas detectadas diariamente), mientras que si las cuarentenas continuarán siendo estrictas (por sobre el

promedio establecido), se alcanzaría un rebrote cercano a las 10.000 personas semanales o cerca de 1.300 nuevos contagiados diarios. Esto quiere decir, que ante la incertidumbre sobre la decisiones futuras de confinamiento de las autoridades sanitarias, un mal escenario significaría desatar casi en su totalidad una nueva ola de contagios similar a la primera.

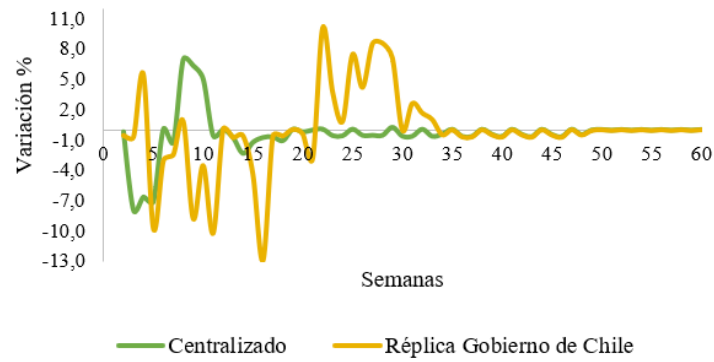
Para la dinámica de las otras variables sanitarias, observamos que tanto los agentes expuestos al virus como la población que desarrolla síntomas graves, disminuye notoriamente respecto al modelo base. Sin embargo, al analizar el caso de los fallecidos y recuperados, se desprenden algunas reflexiones interesantes. Para el caso de las muertes, nuestro modelo señala que el Gobierno chileno enfrentaría un total de fallecidos hasta la semana 50 de 14.275 personas, mientras que la cifra solo llegaría a 13.784 decesos bajo la forma centralizada. Es decir, la estrategia real del Gobierno estaría costando cerca de 500 vidas adicionales. A partir de la semana 50, se produce un cruce entre ambas curvas, lo que interpretamos como el efecto rezagado de mantener una cuarentena promedio versus eliminar la cuarentena en los jóvenes y establecer una cuarentena menor al 15 % para la población anciana.

Exhibidos los resultados sanitarios, nos resta presentar la trayectoria de las variables relevantes para el Gobierno. En el gráfico (a) de la Figura 12, se muestra el comportamiento de la probabilidad de contagio agregada que enfrentan los agentes en cada periodo. En línea con la dinámica percibida por los infectados, dicha probabilidad alcanza un máximo de 17,29 % siendo 1,84 puntos porcentuales más alta que la probabilidad alcanzada en el caso centralizado, para luego converger a un valor de entorno al 4,61 % desde la semana 60, lo que representa una disminución de 4,99 puntos porcentuales respecto a la probabilidad a la cual converge nuestro modelo de base. Para el caso de la variación en la producción agregada (gráfico (b)), podemos notar que la estrategia del Gobierno genera una mayor volatilidad en el producto, provocando episodios con caídas semanales cercanas al 13 % pero también aumentos en torno al 11 %. A pesar de que posterior a la semana 21 desde el inicio de la pandemia la economía entra en fase de recuperación, cabe cuestionarnos a que costo se logran dicho proceso. Al comparar la evolución de infectados, las cuarentenas y la producción, podemos ver que dicha mejora comienza en el momento en que se decide desconfinar a la población, pero que pasadas 2 semanas, surge el rebrote que fue abordado anteriormente. Esto manifiesta la cuantitativamente el dilema del Gobierno... *¿Estamos dispuestos a enfrentar un rebrote a cambio de recuperar los niveles de producción?, ¿hasta qué punto podemos soportar una recesión para salvar vidas a causa del COVID-19?*

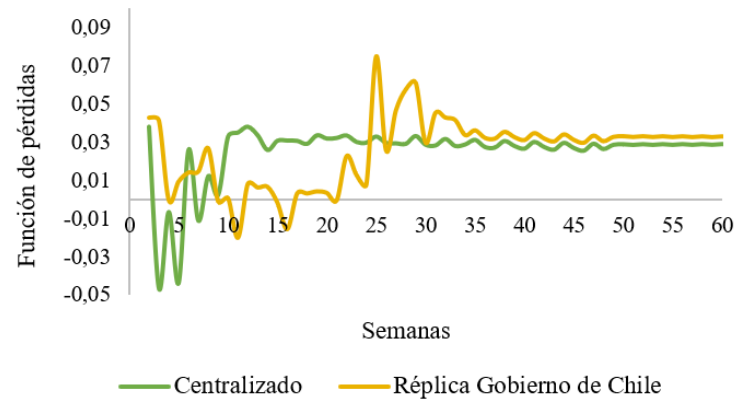
Figura 12: Variables relevantes para el Gobierno: Modelo Centralizado vs Descentralizado



(a) Probabilidad de contagio agregada



(b) Variación % de la producción



(c) Función de pérdidas del Gobierno

5.2.1 ¿CUARENTENA PREVENTIVA O CUARENTENA ASISTENCIAL?

El análisis comparativo realizado entre el modelo centralizado y réplica del caso chileno, nos permite afirmar que la implementación de cuarentenas si es efectiva para combatir la propagación del COVID-19, sin embargo, también aseveramos que la estrategia adoptada por el Gobierno de Chile, logra un nivel de efectividad moderado en cuanto adquiere un enfoque del tipo “*cuarentena asistencial*” por sobre un enfoque de “*cuarentena preventiva*”, como lo que observamos en nuestro modelo de base. Por lo tanto, nuestra conclusión principal es que la decisión del Gobierno chileno puede considerarse como subóptima y tardía en cuanto a la cantidad de vidas perdidas y la volatilidad de la economía.

Una estrategia del tipo asistencial consiste en tomar decisiones a medida que se observa la trayectoria de la pandemia. En este tipo de estrategias, es común ver que las autoridades sanitarias realizan diversas acciones como el aumento de camas para pacientes críticos en los hospitales o bien aumentos graduales en la compra insumos de atención médica. En línea con esto, el informe presentado por la Sociedad Chilena de Medicina Intensiva ([SOCHIMI, 2020](#)) señala que, debido al enfoque adoptado por el Gobierno chileno, para junio de 2020 se llegó a niveles que bordearon los límites de atención del sistema de salud y que medidas asistenciales como las mencionadas anteriormente lograron fortalecer el mismo. Sin embargo, apenas se logró dar abasto con la cantidad de pacientes que se debieron atender en ese periodo. Así, se lograron alcanzar niveles de ocupación de camas críticas a nivel nacional de 89% y de 96% en la región Metropolitana, con cerca de 350 pacientes que requerían ventilación mecánica y que fueron atendidos fuera de las unidades de pacientes críticos, reflejando que en la práctica existió saturación del sistema. Por el contrario, nuestro modelo de base presenta una estrategia preventiva en la cual un elemento primordial para combatir la pandemia es el confinamiento temprano. De esta forma, se disminuye el contacto entre la población que inicialmente contrae el virus y que son quienes terminan propagando la enfermedad.

6. ESCENARIOS ALTERNATIVOS

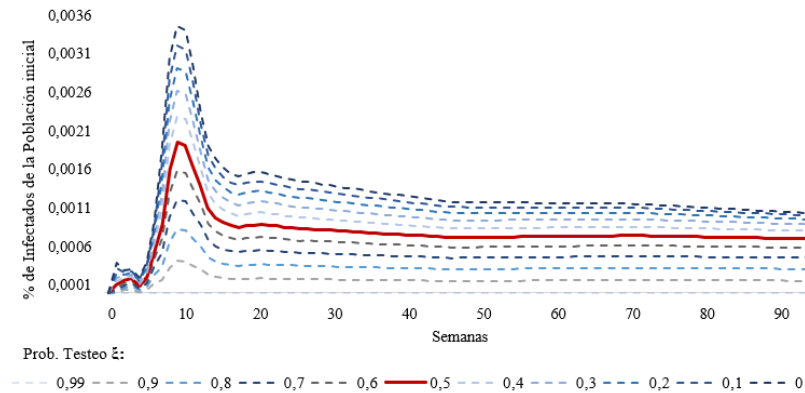
En esta sección usaremos nuestro modelo calibrado de base para realizar una serie de análisis sobre diversos factores que afectan la propagación del virus. Por practicidad, se exhibe principalmente la dinámica de infectados y declaramos que el comportamiento de otras variables relevantes sigue la lógica que hemos presentado hasta ahora. Como primer análisis, la sección 6.1 presenta la dinámica de los infectados ante cambios en la probabilidad de testeo. La sección 6.2 explora los niveles de contagios semanales ante diversas tasas de

cumplimiento de la cuarentena, es decir, estudiamos como puede cambiar la efectividad de las decisiones de confinamiento del Gobierno cuando parte de la población ignora las restricciones impuestas y sigue tomando decisiones de forma descentralizada. La sección 6.3 incorpora en el modelo de base la eventual llegada de una vacuna para finales de la semana 60 (primera semana de junio, 2021) a través de un cambio en la probabilidad de desarrollar síntomas graves. La sección 6.4 analiza las decisiones de cuarentenas óptimas que puede implementar el Gobierno ante distintos límites al confinamiento. Finalmente, la sección 6.5 estudia la importancia del distanciamiento entre la población. En particular, nos centramos en cómo evolucionan las variables sanitarias y en algunos escenarios las variables económicas cuando la población de ancianos y jóvenes logra ciertos niveles de interacción.

6.1. VARIACIÓN EN LA PROBABILIDAD DE TESTEO

En nuestro modelo de base, establecimos la probabilidad de testeo o realización de exámenes PCR en 50 %, a razón de mantener un criterio conservador. Exploramos ahora la sensibilidad de la trayectoria de los contagios una vez que permitimos una variación de dicha probabilidad tal que alcancemos valores que van desde el 0 % hasta un 99 %. La Figura 13 presenta los resultados obtenidos:

Figura 13: Trayectoria de infectados antes cambios en la probabilidad de testeo



Como podemos observar, para el set de parámetros calibrados, una disminución en la probabilidad de testeo provoca un desplazamiento hacia arriba en la curva de infectados, en el cual el nivel máximo de contagio semanal representa aproximadamente un 58 % más que en nuestro escenario de base (curva roja). Esto quiere decir que se produciría un aumento de hasta 30.000 personas adicionales alcanzando cifras cercanas a los 70.000 infectados semanales. Por el contrario, también podemos notar que ante una mayor probabilidad de testeo, se lograría reducir fuertemente la propagación del virus. Cabe destacar que a pesar

de la modificación de este parámetro, la fecha en la que se alcanza el máximo nivel de contagios semanales permanece intacta.

¿De qué manera el Gobierno puede afectar dicha probabilidad? Como una estrategia complementaria a las cuarentenas, el Gobierno puede generar una serie de campañas informativas que permitan a la población conocer más sobre las circunstancias bajo las cuales es conveniente realizarse un examen PCR, sin tener que esperar la aparición de síntomas. A modo general, el Test PCR debe realizarse en casos de individuos con sospecha de contagio que hayan presentado alguna sintomatología como fiebre, disnea o dificultad respiratoria, dolor torácico, entre otros. Así, en caso de presentar alguno de los síntomas, serán considerados casos altamente sospechosos de COVID-19 y deben seguir las recomendaciones del Ministerio de Salud. Por otra parte, para las autoridades es sumamente importante que la población que ha tenido contacto estrecho con alguna persona diagnosticada con el virus también verifique su estado de salud mediante la toma de este examen, por lo que se requiere un esfuerzo por parte de la población para lograr una mejor detección.

Otro aspecto importante que no debemos olvidar sobre cómo modificar la probabilidad de testeo, es la disponibilidad de exámenes PCR. Para efectos del modelo, enfrentar una restricción en la cantidad de exámenes a realizar, puede provocar una disminución en los infectados, pero un aumento en los agentes que se encuentran en un estado febril-infectado. Afortunadamente, Chile se ha destacado ampliamente dentro de los países Latinoamericanos por ser una de las naciones que realiza más exámenes. Al día 17 de octubre de 2020, se registró la realización de 3.857.820 exámenes PCR llegando así a una tasa de 196.660 test por millón de habitantes. Dicha cifra es cercana a la que presentan los países desarrollados ([MINSAL, 2020c](#)). Podemos concluir entonces, que una política de cuarentenas combinada con campañas informativas puede ser una buena opción para evitar la propagación del virus. Sin embargo, este tipo de medidas pueden ser aún más efectiva si se combinan con otras como lo son los incentivos a quedarse en casa, el uso de mascarillas y mantener el distanciamiento social.

6.2. INCUMPLIMIENTO DE LA POLÍTICA DE CUARENTENAS

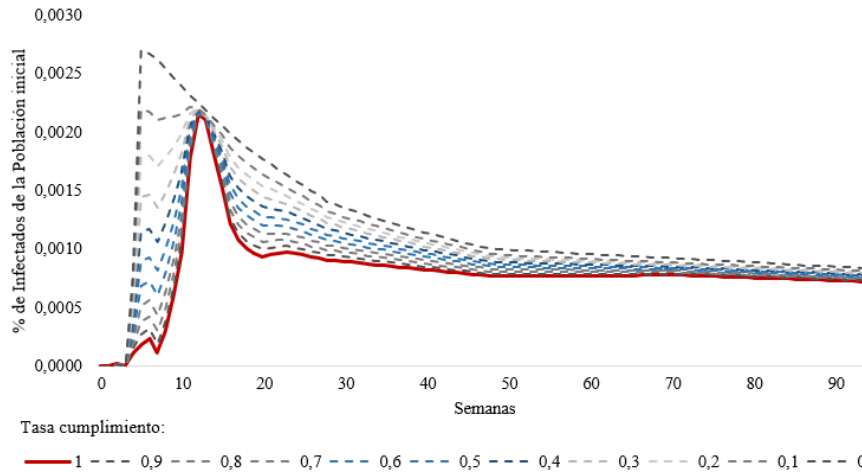
Hasta ahora, una suposición clave mantenida en el modelo es que las personas que son puestas en cuarentena cumplen con dicha medida y no salen de sus hogares. En la realidad, existe diversas situaciones que provocan incumplimiento de una cuarentena, ya sea por desobediencia y poca empatía o bien por necesidad. En Chile, para aquellas zonas que se encuentran en Fase 1 (cuarentena), se permite la salida de los hogares principalmente en

caso de trabajar en una empresa o sector considerado como esencial o bien para suplir necesidades básicas. Esto lo internalizamos en nuestro modelo a través de la población que no es puesta bajo cuarentenas (existencia de un límite al confinamiento que fue establecido en el inciso 3.3). Concretamente, suponemos que este tipo de individuos son aquellos que solicitan un permiso temporal que es entregado en la página web de Carabineros de Chile²⁰. Si bien la inmensa mayoría de la población cumple responsablemente con las medidas de confinamiento, existe un importante grupo de personas que no cumplen con estas cuarentenas poniendo en riesgo su propia salud y también la salud y la vida de todos los demás (MINSAL, 2020d). Esta población es parte importante de la economía debido a que corresponde a aquellos agentes que no internalizan el efecto de sus acciones y que por lo tanto, pueden ser vectores de contagio durante la pandemia. Todo este tipo de situaciones, nos llevan a pensar que la tasa de cumplimiento de esta política pública no es de un 100 % como supone nuestro modelo, sino que alcanza un porcentaje menor.

La Figura 14 presenta la trayectoria de los casos semanales de contagio ante diversos niveles de incumplimiento por parte de la población. Para simplificar el análisis, consideramos tasas de incumplimiento homogéneas entre los agentes, sin perjuicio de un futuro estudio que analice dichas tasas por tipo de agente. La curva roja representa nuestro escenario base en el cual las decisiones de cuarentenas que toma el Gobierno son cumplidas por toda la población. En el otro extremo, podemos observar una dinámica como la presentada en el contexto descentralizado. Esto quiere decir que un contexto sin Gobierno es equivalente a un contexto en el que el Gobierno no tiene autoridad suficiente para lograr que la ciudadanía obedezca sus decisiones. Para los niveles de cumplimiento intermedio, podemos ver que a medida que exista mayor transgresión a lo que dictamina el Gobierno, se adelanta la fecha del máximo nivel de contagios. Adicionalmente, uno de los aspectos más preocupantes que se pueden concluir es que para los rangos intermedios se perciben dos momentos con altos contagios siendo el más crítico el que se produce ante una tasa de incumplimiento del 90 %.

²⁰Carabineros de Chile es la policía que integra las Fuerzas de Orden y Seguridad en Chile. Esta institución, creada el 27 de abril de 1927, se encuentra encargada de dar eficacia al derecho siendo su finalidad garantizar, mantener el orden público y la seguridad pública interior en todo el territorio de la República y cumplir las demás funciones que le encomiendan la Constitución y las leyes.

Figura 14: Trayectoria de infectados antes cambios en la tasa de cumplimiento



¿Hasta qué nivel de incumplimiento nuestro modelo nos permite interpretar resultados?

Como se señaló en la sección de resultados principales, el modelo fue calibrado para reconstruir la curva de infectados presentada por el Ministerio de Salud de Chile. Sin embargo, la Figura 14 nos muestra claramente como esta curva difiere cada vez más de la curva obtenida con la calibración (curva roja). Producto de esta variación, nos preguntamos hasta qué punto nuestros resultados son fiables para analizar la efectividad de las cuarentenas chilenas. Consideramos que todos los análisis realizados previamente son aceptados y mantienen su validez siempre que la tasa de incumplimiento no supere el 20 %. Es decir, establecemos un punto crítico en dicho porcentaje en el que una vez superado la trayectoria de la pandemia en el modelo se comporta de manera distinta a la presentada en los datos. La importancia de este hallazgo es que en si bien el modelo de base concluye que se alcanza un nivel máximo de confinamiento del 73,83 %, ante un 20 % de incumplimiento, la población que efectivamente se lograría poner en cuarentenas alcanzaría un 59 %, lo que equivale a cerca de 11 millones de chilenos.

6.3. LLEGADA DE UNA VACUNA PARA COMBATIR EL COVID-19

¿Qué tan realista es la incorporación de una vacuna en la economía modelada?

Durante el año 2020 se han estado desarrollando más de 169 vacunas candidatas contra el COVID-19, de las cuales 9 se encuentran en fase de ensayos finales en seres humanos y han mostrado una alta efectividad (OMS, 2020). Estas corresponden a las vacunas: 1) BNT162 (Pfizer y BioNTech), 2) mRNA-1273 (Moderna), 3) AZD1222 (Universidad de Oxford y AstraZeneca), 4) CoronaVac (Sinovac), 5) Sputnik V (Centro Gamalaya de Investigación en Epidemiología y Microbiología), 6) JNJ-78436735 (Johnson & Johnson), 7) NVX-CoV2373

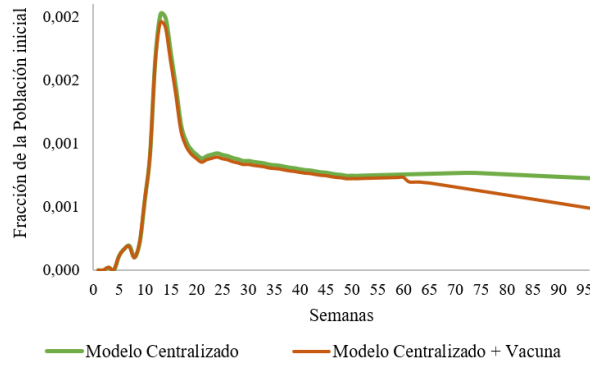
(Novavax), 8) Ad5-nCoV (CanSino) y 9) Covaxin (Bharat Biotech)²¹. Gracias al arduo trabajo entre científicos, empresas y organizaciones de salud internacionales, a la fecha de esta investigación ya se han registrado vacunaciones en diversos países del mundo, por lo que no nos debe sorprender el análisis de este apartado.

Con el riesgo latente de un eventual rebrote de COVID-19 en Chile, las autoridades sanitarias han manifestado interés por adquirir vacunas que permitan disminuir la mortalidad que ha presentado el virus, especialmente en la población anciana. Ante esto, exploramos el impacto de la presencia de una vacuna mediante una disminución en las probabilidades de desarrollar síntomas graves una vez que un agente se infecta y en las probabilidades de contagio desde agentes infectados a susceptibles. En principio, nos cuestionamos sobre el impacto de la vacuna en diversos aspectos sanitarios, y si bien con el tiempo se podrá evaluar si existen efectos adicionales a los que consideramos en este apartado, de momento la vacunación nos permitirá evitar muertes y también disminuir la capacidad de los agentes infectados para contagiar a otros ([CNN, 2020](#)).

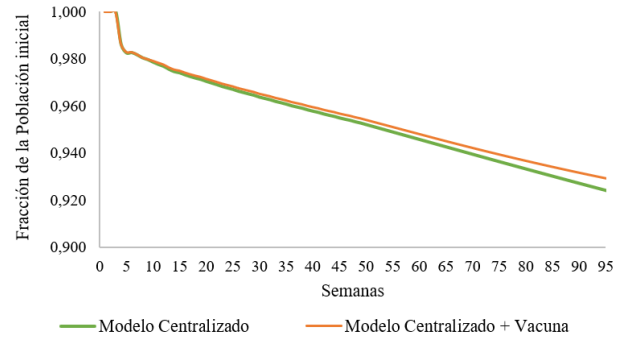
Acorde con la información entregada por el [MINSAL \(2020e\)](#), en Chile ya se han logrado firmar acuerdos para la adquisición de las vacunas Pfizer, Sinovac, Johnson & Johnson, AstraZeneca, entre otras y se espera que lleguen al territorio nacional en enero de 2021. Sin embargo, la vacunación masiva se pronostica para finales del primer semestre de dicho año. En el modelo base, la probabilidad de presentar síntomas graves luego de dos periodos de infección es de 100 %, dado que la ventana de tiempo señalada sería suficiente para evaluar si el agente se podrá recuperar sin mayor problemas o pasará a un estado de salud crítico. Ante la incertidumbre en la que nos encontramos, suponemos que con la llegada de una vacuna, la probabilidad de desarrollar síntomas graves disminuye a un 50 % dado que existen otros factores sanitarios en la población que impiden alcanzar valores menores, como por ejemplo, otras patologías de base. Por su parte, la probabilidad agregada promedio de contagio disminuirá gradualmente a partir de los periodos en que inicie la vacunación para caracterizar que dicha medida no logra ser masiva desde un principio. La Figura 15 presenta la trayectoria de las variables sanitarias relevantes:

²¹Para mayor detalle sobre las vacunas candidatas para combatir el COVID-19, véase el apéndice 4.

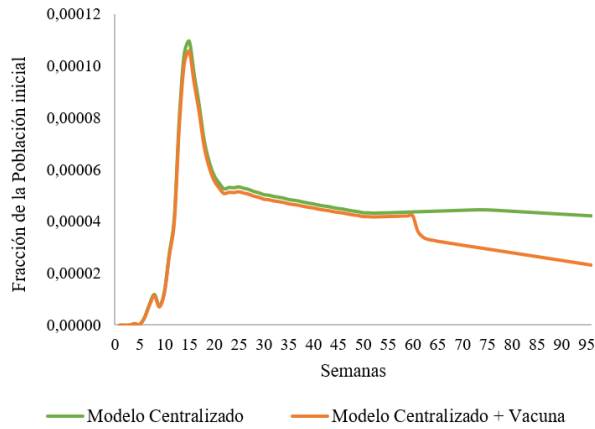
Figura 15: Variables sanitarias agregadas ante la aparición de una vacuna



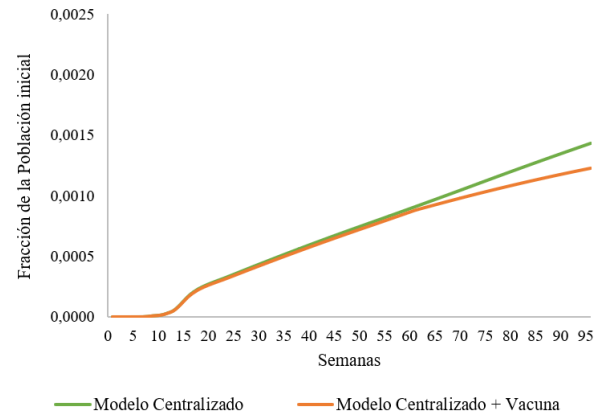
(a) Agentes Infectados



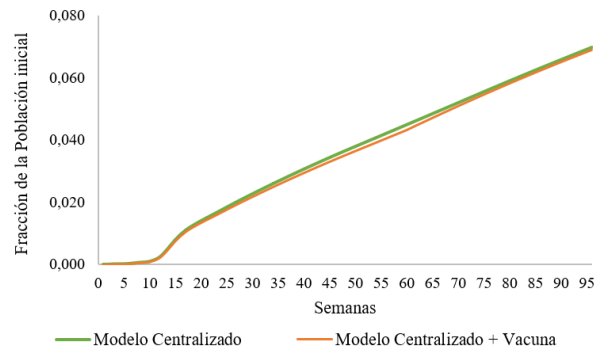
(b) Agentes Susceptibles



(c) Agentes Graves



(d) Agentes Fallecidos



(e) Agentes Recuperados

Los resultados obtenidos permiten cuantificar el impacto de la vacuna en la población agregada. El gráfico (a) evidencia el efecto de la vacunación en la trayectoria de los infectados. Lo interesante en este punto es que a pesar de que inicialmente señalamos que solo modificaríamos las probabilidades de desarrollar síntomas graves, de igual forma se puede

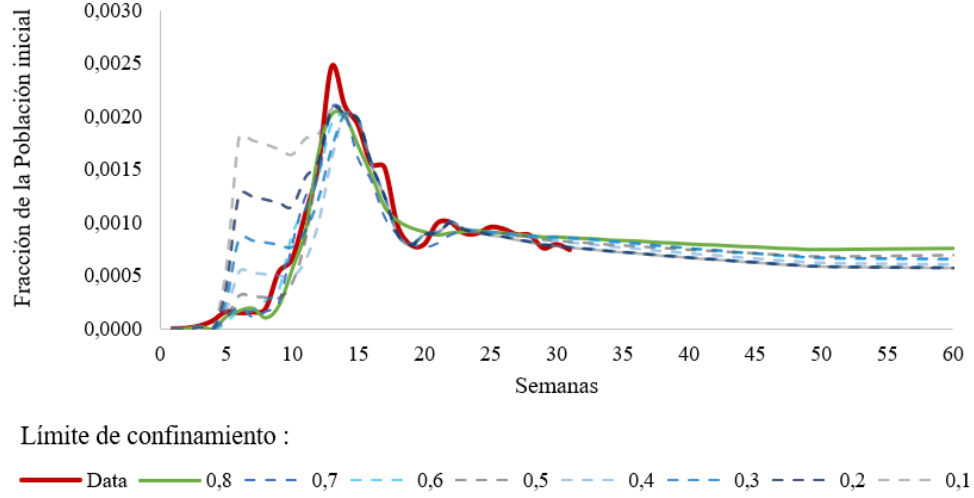
observar una pequeña disminución en el nivel de contagios a partir de la semana 61. Por su parte, en el gráfico (b), podemos ver claramente como la vacuna no provoca cambios significativos en la población que termina contagiada al final de la semana 95. En el gráfico (c) observamos directamente el impacto de la llegada de una vacuna a nuestra economía centralizada. A partir de la semana 61, rápidamente disminuye la fracción de agentes que desarrollan síntomas graves y permanece a un nivel menor hasta la semana 95. En términos hospitalarios, de 955 personas que requieren cuidados intensivos, la vacuna reduciría dicha cifra a 628 personas liberando 327 cupos de atención. A causa de esta disminución, también se produce una caída en los fallecimientos. Para la semana 95, de los 24.818 decesos predichos para el caso centralizado, la vacuna provocaría una cantidad acumulada de 22.040, por lo que en el mediano plazo se lograrían salvar aproximadamente 2.778 vidas. Cabe destacar que en ningún caso la vacuna elimina la mortalidad a causa del virus sino que atenúa su impacto en la población.

6.4. LÍMITES AL CONFINAMIENTO

Uno de los principales supuestos que implementamos en el modelo centralizado, es que el Gobierno se ve imposibilitado de implementar una cuarentena obligatoria toda la población. Esto significa que asumimos un límite al confinamiento, igual para cada grupo etario, de $\theta_t \in [0, \bar{\theta}]$, con $\bar{\theta} = 0,8$ (80%). Este supuesto refleja la existencia de sectores de la economía que no pueden dejar de producir incluso si la mayor parte de la población se encuentra confinada. Por ejemplo, consideramos el sector salud, los servicios básicos de producción y distribución de alimentos, entre otros.

Resulta interesante estudiar como afectarían los cambios de dicho límite a las decisiones de cuarentenas que implementan las autoridades. En particular, si recordamos los resultados obtenidos en el inciso 5.1, donde para cada grupo etario esta restricción se considera activa en ciertos momentos, pero a nivel agregado nunca se alcanza. En este sentido, dicha cota superior juega un rol clave para el Gobierno, ya que puede afectar directamente la intensidad y duración de esta política pública. Ante esto, realizamos el siguiente ejercicio: Provocamos una variación de $\bar{\theta}$, tal que $\bar{\theta} \in [0, 1; 0, 8]$, es decir, caracterizamos brevemente la política confinamiento óptima ante distintos umbrales. La Figura 16 presenta los resultados obtenidos de la calibración de infectados semanales en nuestro modelo:

Figura 16: Variables relevantes para el Gobierno: Modelo Centralizado vs Descentralizado

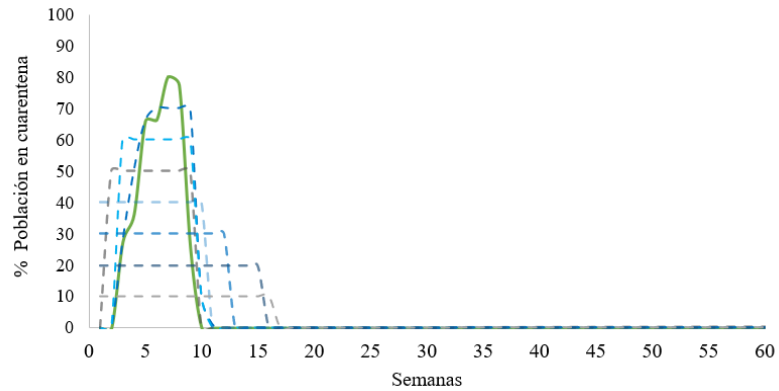


(a) Probabilidad de contagio agregada

La curva verde continua presenta nuestro escenario de referencia con $\bar{\theta} = 0,8$, mientras que la curva roja corresponde a la data recopilada. A partir de este caso, una disminución en el porcentaje de la población que el Gobierno puede poner en cuarentena provoca una modificación en la curva de infectados de forma similar a las conclusiones obtenidas en el apartado de diversas tasas de incumplimiento por parte de la población. En este caso, nuestro modelo nos permite calibrar la curva de infectados de buena manera siempre que $0,6 \leq \bar{\theta} \leq 0,8$, es decir, para los casos en que las autoridades solo pudieran confinar a menos del 60% de la población, no sería posible mejorar nuestra calibración. Una posible razón de estas conclusiones se debe a que si no se logran evitar los contactos entre la población, la efectividad de esta política disminuye. Debemos señalar que en caso de una fuerte restricción, de igual forma se sugiere implementar cuarentenas, ya que tal como respondimos anteriormente, las cuarentenas sí ayudan a combatir la propagación del virus incluso aunque la elección de estas pueda ser subóptima. Si las autoridades no son capaces de frenar las interacciones entre los agentes de la economía, poco a poco retornamos a una trayectoria como la del caso descentralizado. Por lo tanto, un aspecto importante en estos resultados es que el Gobierno debe tener claridad sobre aquellos sectores económicos que puedan considerarse como indispensables para el funcionamiento del país, ya que una mayor cantidad de empresas y rubros considerados como esenciales, puede entenderse como un menor límite al confinamiento.

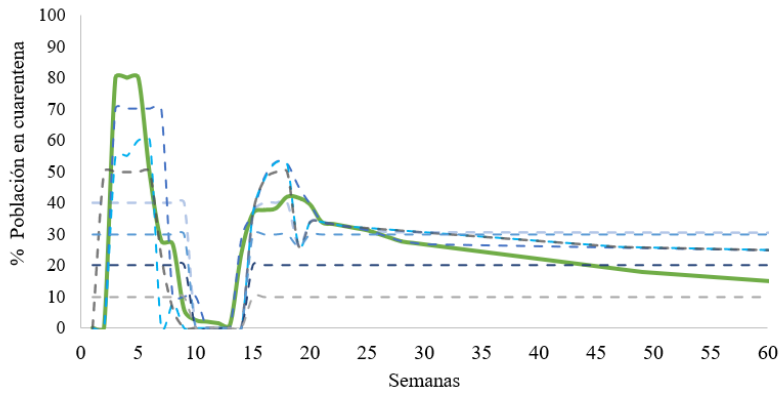
Acorde con la calibración expuesta anteriormente, la Figura 17 exhibe las cuarentenas óptimas para jóvenes y ancianos y a nivel agregado, para cada límite de confinamiento:

Figura 17: Variables relevantes para el Gobierno: Modelo Centralizado vs Descentralizado



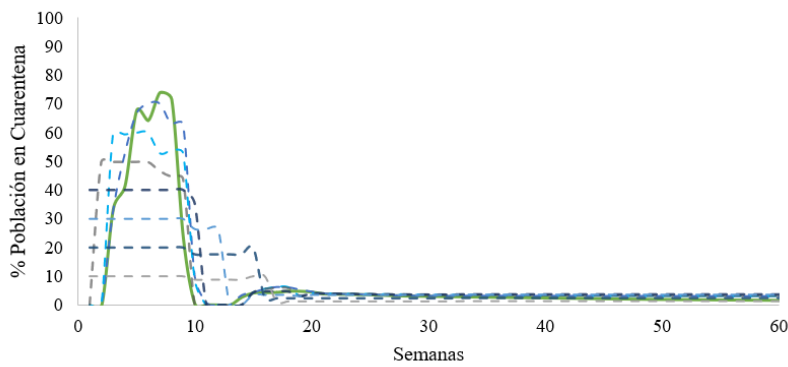
Límite de confinamiento :
— 0,8 - - - 0,7 - - - 0,6 - - - 0,5 - - - 0,4 - - - 0,3 - - - 0,2 - - - 0,1

(a) Cuarentena Jóvenes



Límite de confinamiento :
— 0,8 - - - 0,7 - - - 0,6 - - - 0,5 - - - 0,4 - - - 0,3 - - - 0,2 - - - 0,1

(b) Cuarentena Ancianos



Límite de confinamiento :
— 0,8 - - - 0,7 - - - 0,6 - - - 0,5 - - - 0,4 - - - 0,3 - - - 0,2 - - - 0,1

(c) Cuarentena Agregada

En general, podemos ver que a medida que el Gobierno enfrente a una mayor restricción a la hora de tomar decisiones de cuarentenas, estas se caracterizarán por iniciar antes de lo que obtuvimos en nuestro escenario base (curva verde continua), y también presentarán una mayor duración en el tiempo. Por ejemplo, ante un $\bar{\theta} = 0,6$, el máximo porcentaje de la población confinada se obtiene 4 semanas antes respecto al caso de referencia. En particular, el gráfico (a) de la Figura 17 presenta cómo cambia la política óptima para los jóvenes en la cual podemos señalar lo siguiente: para todos los límites, la restricción siempre es activa en algún momento del tiempo. Sin embargo, a límites cada vez más bajos, estos se alcanzan con más persistencia. Adicionalmente, podemos observar que este grupo etario presenta una única cuarentena a lo largo del tiempo que varía entre las 8 semanas (curva verde continua) y que puede llegar hasta las 16 semanas (curva gris segmentada) si solo se pudiera confinar al 10 % de la población.

El gráfico (b) presenta la política óptima resultante para el caso de los ancianos. Podemos señalar que también se alcanzan dichos límites dentro de las primeras 10 semanas desde la llegada del virus siendo más persistente este alcance a medida que disminuye dicho límite. De este gráfico, destacamos dos resultados principales: (i) observamos dos grandes episodios de confinamiento, uno durante las primeras semanas de pandemia y el segundo en torno a la semana 17, con un desconfinamiento casi absoluto entre la semana 10 y 14. (ii) A partir de la semana 14, a medida que el Gobierno puede poner en cuarentena a un menor porcentaje de ancianos, la restricción se vuelve activa a lo largo del tiempo provocando una cuarentena permanente para esta población. Podemos concluir entonces que debido a las características propias de este grupo, lo recomendable es aplicar cuarentenas prolongadas y lo más estricta posibles.

Finalmente, el gráfico (c) presenta los resultados del confinamiento agregado de nuestro modelo. A diferencia de nuestro hallazgo principal presentado en la sección 5.1 (Figura 2), basta con que el límite para implementar cuarentenas sea menor al 80 % para que a nivel agregado esta restricción también se encuentre activa. Esto apoya la noción de que el Gobierno debe implementar cuarentenas lo más rigurosas posibles al inicio de la pandemia para suavizarlas a lo largo del tiempo. Así, a medida que disminuya la rigurosidad, esto se verá compensado con una mayor persistencia de esta política a lo largo del tiempo.

6.5. INCENTIVANDO EL DISTANCIAMIENTO SOCIAL EN LA POBLACIÓN

El último análisis que realizamos para evaluar la sensibilidad de nuestro modelo a la hora de replicar la curva de infectados en Chile, consiste en explorar otro de los supuestos implícitos que ha estado presente en la economía centralizada: *la interacción*

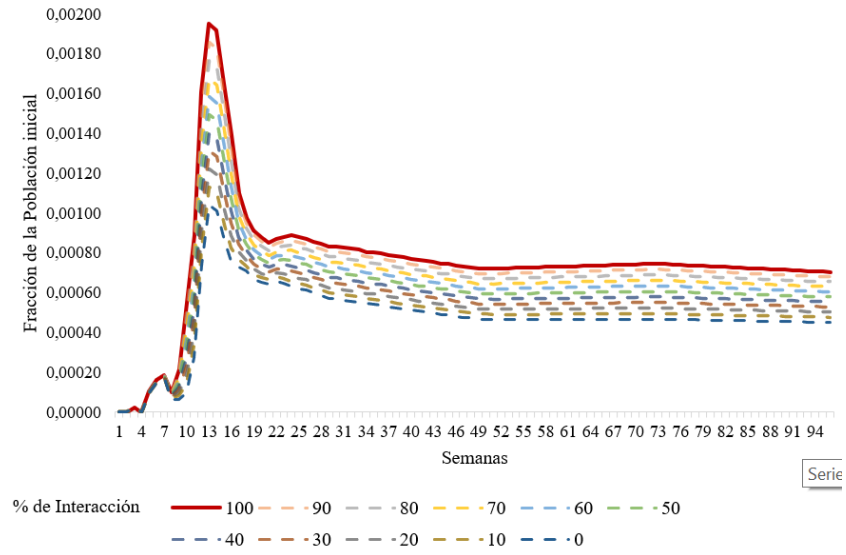
entre la población. Como se desarrolló en la sección (3), las interacciones entre los agentes se manifiesta a través de la probabilidad de contagio agregada. Esto quiere decir, por ejemplo, que a mayores niveles de trabajo que presenten los jóvenes, mayor será la probabilidad de contagio percibida por los ancianos. Esto pone en manifiesto la externalidad negativa que existe en la economía en la cual los jóvenes pueden ser considerados como vectores de contagio hacia los ancianos, quienes terminan falleciendo en una mayor cantidad. Al respecto cabe cuestionarnos lo siguiente: *¿Cómo se comportaría la pandemia si el Gobierno fuese capaz de separar a la población?, ¿qué tan factible puede ser esta medida?*

Para abordar esta situación, realizamos el siguiente ejercicio: a partir de nuestro modelo base en que existe completa interacción, suponemos ahora que tanto los agentes jóvenes como los ancianos pueden evitar relacionarse con el grupo opuesto. A saber, analizamos los resultados acumulados de la cantidad de infectados, fallecidos y perdidas que se acumulan desde el inicio de la pandemia hasta la semana 95, junto con el comportamiento de la producción para cada tasa de interacción que va desde 0 % a 100 %. La Figura a continuación presenta de forma gráfica los resultados de las principales variables sanitarias. Como se puede ver en la primera gráfica, a medida que la población joven y anciana logra distanciarse y evitar la interacción, la fracción de la población infectada se reduce considerablemente. Junto con esto, del gráfico (b) concluimos que la mortalidad causada por la pandemia disminuye a medida que la personas internalizan el impacto de sus decisiones en la salud del resto de la población.

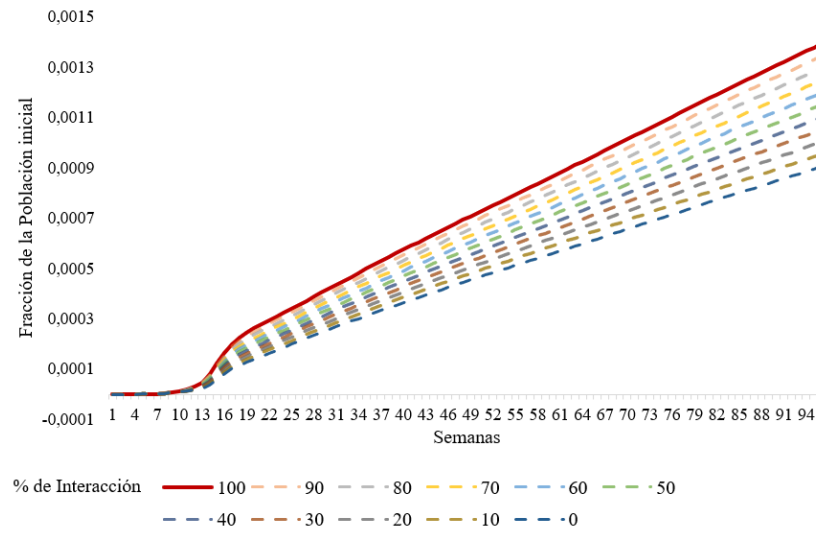
Para concluir este apartado, el Cuadro 4 a continuación exhibe el comportamiento de las principales variables de interés del Gobierno una vez que nos posicionamos en la semana 95. Es decir, resume el impacto sanitario (en términos de contagios y vidas perdidas) y económico (comportamiento de la producción) que tuvo la pandemia en la economía centralizada ante distintos niveles de interacción de la población.

Como se puede ver en la columna 2 y 3, los menores niveles de interacción provocan una menor cantidad de decesos y una menor cantidad de contagios, por lo que el fomento al distanciamiento social entre los agentes sería uno de los factores claves para salvar vidas. En cuanto a lo económico, la separación de los agentes no provoca grandes cambios en la economía en el mediano plazo. Más bien se mantiene relativamente estable el comportamiento de la producción. Sin embargo la inevitable caída en la producción se hace notar independientemente de la separación que se logre aplicar. Dejamos pendiente para futuras investigaciones el análisis de los mecanismos que provocan una mejora en las cifras de crecimiento acumulado de la producción cuando se produce un mayor distanciamiento. Es interesante este punto, debido a que creemos que el distanciamiento social potencia la política de cuarentenas.

Figura 18: Trayectoria de la pandemia ante cambios en la interacción de la población



(a) Agentes Infectados



(b) Agentes Fallecidos

Cuadro 4: Variables Sanitarias y Económicas de interés ante cambios en el % de interacción

% de Interacción	Número de Fallecimientos Acumulados	Número de Infectados Acumulados	Variación % promedio de la Producción	Variación % Acumulada de la Producción	Pérdidas Acumuladas
100	26584	1961867	-0,19752	-12,9502	2,54162
90	25657	1328240	-0,19750	-12,9492	2,54170
80	24730	1278121	-0,19748	-12,9482	2,54178
70	23801	1227928	-0,19746	-12,9471	2,54186
60	22871	1177663	-0,19745	-12,9461	2,54194
50	21940	1127324	-0,19743	-12,9451	2,54202
40	21008	1076912	-0,19741	-12,9440	2,54210
30	20075	1026427	-0,19739	-12,9430	2,54218
20	19140	975869	-0,19737	-12,9420	2,54226
10	18205	925237	-0,19735	-12,9409	2,54234
0	17268	874532	-0,19733	-12,9399	2,54242

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICA PÚBLICA

En esta investigación hemos ampliado el modelo epidemiológico SIR estándar mediante la incorporación de decisiones económicas de una población heterogénea y de un planificador central, para evaluar analizar los costos sanitarios y económicos que la propagación del COVID-19 conlleva. La principal conclusión que se desprende del trabajo realizado es que una economía que implementa medidas de confinamiento, si logra una disminución en los contagios y los fallecimientos, a costa de una caída en la producción. Sin embargo, en términos relativos, el retraso en la toma de decisiones de cuarentena y la adopción de un enfoque asistencial por sobre uno preventivo genera resultados subóptimos en cuanto a la volatilidad que se produce en la producción y el número de decesos.

En cuanto a los resultados de los escenarios alternativos presentados, podemos señalar que la combinación de políticas públicas adicionales a la cuarentena pueden traer consecuencias positivas para el país completo. En concreto, consideramos que las campañas informativas y la transparencia en la entrega de la información, en conjunto con un aumento en las sanciones en caso de incumplimiento del confinamiento e incentivos a mantener el distanciamiento social también deben ser consideradas como prioritarias para las autoridades. Ciertamente, si bien nos enfocamos en las labores del Gobierno, el esfuerzo debe ser de toda la ciudadanía. Así, a medida que la información sobre estos temas se endurezca, se evitaren episodios de rebrote como el que se evidencia al replicar la estrategia chilena o bien como lo que se ha visto en las últimas semanas en diversos lugares en el mundo.

Nos permitimos realizar recomendaciones a las autoridades gubernamentales a raíz del trabajo desarrollado. Realizar una comparación de cómo se ha desatado la pandemia entre

países, será útil solo a medida que se conozcan los mecanismos adoptados por cada uno de estos para combatir la propagación del virus. Por ejemplo, países con baja mortalidad e impacto moderado en la economía, podrían estar adoptando una estrategia en la que se fortalezca el rastreo o trazabilidad de los infectados, más que por la implementación de cuarentenas estrictas. En línea con esto, mantenemos un especial interés en la heterogeneidad presente en la población dado que la vida de población anciana debe prioridad durante la crisis. A pesar de esto, si bien nuestro modelo implementa una cuarentena preventiva para los jóvenes poco prolongada pero estricta, creemos que la externalidad presente en este grupo no logra ser del todo capturada, por lo que la imposición de límites a la movilidad de los jóvenes puede ser una mejor opción hacia el futuro.

Comprendemos la existencia de algunas limitaciones en el modelo, por lo que las predicciones cuantitativas deben interpretarse con cautela. En primer lugar, abstraemos las rigideces nominales de tienen las economías. Estas podrían jugar un rol importante en el desarrollo de la pandemia. En segundo lugar, no se estudian los efectos que podría tener la interacción de las cuarentenas con otras políticas públicas como la restricción de movilidad interregional, para un contexto de confinamiento espacial, entrega de beneficios a la población por parte del Gobierno como bonos en dinero, mejoras en el sistema de salud, entre otras. En tercer lugar, asumimos que un agente se ha recuperado, es inmune a nuevas infecciones. Esta es una suposición importante, que permite que la inmunidad se desarrolle en la población y que la propagación del virus alcance niveles cada vez más bajo en el mediano y largo plazo. Finalmente, basamos nuestro modelo en un contexto de información imperfecta y agentes miopes, en el cual el planificador no logra conocer cómo los agentes toman decisiones ni tampoco el estado de salud exacto de ellos, mientras que los mismos no son capaces de anticiparse a las decisiones de esta autoridad. Eventualmente, a medida que la población tenga la capacidad de anticiparse a los confinamientos, la efectividad de las cuarentenas cambiará.

Dado que la pandemia de COVID-19 todavía está cobrando muchas vidas en todo el mundo, nos queda preguntarnos cuál es el mejor enfoque para limitar el impacto de este virus en la población. Hasta ahora, la falta de un tratamiento para combatir el COVID-19 o de una vacuna eficaz que pueda ser distribuida en todas las naciones, sumado a los problemas sociales y económicos que hemos observado, dificultan aún más esta lucha. Estamos escépticos en cuanto a la pronta salida de la pandemia, pero confiamos en que la gran parte de la población y las autoridades sanitarias están haciendo grandes esfuerzos para mantener a la economía en pie y evitar a toda costa una disminución abrupta en el bienestar de la ciudadanía.

REFERENCIAS

- ACEMOGLU, D., CHERNOZHUKOV, V., WERNING, I., & WHINSTON, M.D. (2020). “A multi-risk SIR model with optimally targeted lockdown”. NBER working paper 27102. Recuperado de <https://econpapers.repec.org/paper/nbrnberwo/27102.htm>
- ALVAREZ, F., ARGENTE, D. & LIPPI, F. (2020). A Simple Planning Problem for COVID-19 Lockdown. *SSRN Electronic Journal- Working paper*. 10.2139/ssrn.3569911.
- ATKESON, A. (2020). What Will be the Economic Impact of COVID-19? Rough Estimates of Disease Scenarios. Recuperado de 10.21034/sr.595.
- BANCO CENTRAL DE CHILE. (2019). Cuentas Nacionales de Chile: Evolución de la actividad económica tercer trimestre de 2019. Recuperado de <https://cutt.ly/ghAUNrJ>
- BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. (2020). La política pública frente al Covid-19: Recomendaciones para América Latina y el Caribe. Recuperado de <https://publications.iadb.org/es/la-politica-publica-frente-al-covid-19-recomendaciones-para-america-latina-y-el-caribe>.
- BANCO MUNDIAL. (2020). La COVID-19 (coronavirus) hunde a la economía mundial en la peor recesión desde la Segunda Guerra Mundial. Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/06/08/covid-19-to-plunge-global-economy-into-worst-recession-since-world-war-ii>
- BBC. (2020). Vacunas contra el coronavirus: las fortalezas y debilidades de las nueve candidatas más adelantadas. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-55027519>
- BELLMAN, R. (1952). On the Theory of Dynamic Programming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 38(8), 716–719. <https://doi.org/10.1073/pnas.38.8.716>
- BROTHERHOOD, L., KIRCHER, P., SANTOS, C., & TERTILT, M. (2020). “An Economic Model of the Covid-19 Epidemic: The Importance of Testing and Age-Specific Policies”. CRC TR 224 Discussion Paper Series crctr224_2020_175, University of Bonn and University of Mannheim, Germany. Recuperado de <https://www.iza.org/publications/dp/13265/an-economic-model-of-the-covid-19-epidemic-the-importance-of-testing-and-age-specific-policies>
- CHANG, R. & VELASCO, A. (2020). Economic Policy Incentives to Preserve Lives and Livelihoods. *National Bureau of Economic Research*. Edición N°27020. Recuperado de <https://www.nber.org/papers/w27020>

CIPER CHILE. (2020). La política económica frente al COVID-19 en Chile y el mundo: una invitación a ampliar las fronteras de lo posible. Recuperado de <https://www.ciperchile.cl/2020/05/24/la-politica-economica-frente-al-covid-19-en-chile-y-el-mundo-una-invitation-a-ampliar-las-fronteras-de-lo-posible/>

CNN ESPAÑOL. (2020). Es “posible” que alguien vacunado aún pueda transmitir covid-19, dice “Fauci”. Recuperado de <https://cnnespanol.cnn.com/2020/12/07/es-posible-que-alguien-vacunado-aun-pueda-transmitir-covid-19-dice-fauci/>

COLEGIO MÉDICO DE CHILE. (2020). Género y Salud en tiempos de COVID.19. Recuperado de <http://www.colegiomedico.cl/dpto-de-genero-y-salud-presenta-documento-sobre-covid-19/>

COOPER, I., MONDAL, A. & ANTONOPOULOS, C. (2020). A SIR model assumption for the spread of COVID-19 in different communities. *Chaos, Solitons & Fractals*. 139.110057. Recuperado de <https://cutt.ly/qhAOeU7>

DIRECCIÓN DEL TRABAJO CHILE. (s.f.). [Página web]. Recuperado de <https://www.dt.gob.cl/portal/1628/w3-propertyvalue-22094.html>

EICHENBAUM, M., REBELO, S., & TRABANDT, M. (2020). “The Macroeconomics of a Pandemic”. NBER Working Paper 26882. Recuperado de <https://www.nber.org/papers/w26882>

FAJGELBAUM, P., KHANDELWAL, A., KIM, W., MANTOVANI, C. & SCHAAL, E. (2020). Optimal lockdown in a commuting network. Recuperado de <https://ideas.repec.org/p/upf/upfgen/1727.html>

FARBOODI, M., JAROSCH, G. & SHIMER, R. (2020). “Internal and External Effects of Social Distancing in a Pandemic”. Working paper. Recuperado de <https://www.nber.org/papers/w27059>

GAROBALDI, P., ESPEN, M. & PISSARIDES, C. (2020). “Modelling contacts and transitions in the SIR epidemics model”. Covid Economics 5 (April): 1–20. Recuperado de <https://n9.cl/8jau>

GIORDANO, G., BLANCHINI, F., BRUNO, R., COLANERI, P., FILIPPO, A., MATTEO, A., COLANERI, M. & THE IRCCS SAN MATTEO PAVIA TASK FORCE. (2020). A SIDARTHE Model of COVID-19 Epidemic in Italy. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/340114744_A_SIDARTHE_Model_of_COVID-19_Epidemic_in_Italy

GOBIERNO DE CHILE. (2020). [Página web]. Recuperado de <https://www.gob.cl/coronavirus/pasoapaso/>

GOLLIER, C. (2020). “If the objective is herd immunity, on whom should it be built?”. Working Paper. https://www.econpol.eu/publications/policy_brief_29

GOOD, C., HERNANDEZ, I., & SMITH, K. (2020). Interpreting COVID-19 Test Results: a Bayesian Approach. *Journal of general internal medicine*, 35(8), 2490–2491. <https://doi.org/10.1007/s11606-020-05918-8>

GUERRERO-NANCUANTE, C. & MANRÍQUEZ, R. (2020). Proyección epidemiológica de COVID-19 en Chile basado en el modelo SEIR generalizado y el concepto de recuperado. doi: 10.5867/med-wave.2020.04.7898

INE CHILE. (2020). Adultos mayores en Chile: ¿Cuántos hay? ¿Dónde viven? ¿Y en qué trabajan?. Recuperado de <https://www.ine.cl/prensa/2020/04/15/adultos-mayores-en-chile-cu%C3%A1ntos-hay-d%C3%B3nde-viven-y-en-qu%C3%A9-trabajan>

JANIAK, A., MACHADO, C., & TURÉN, J. (2020). Covid-19 contagion, economic activity and business reopening protocols. *Journal of Economic Behavior & Organization*, Volume 182, Pages 264-284, ISSN 0167-2681. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167268120304753>

KAPLAN, G., MOLL, B., & VIOLANTE, G. (2020). “Pandemics According to HANK”. Working paper. Recuperado de <https://n9.cl/1cln>

KRUEGER, D., UHLIG, H. & XIE, T. (2020). “Macroeconomic Dynamics and Reallocation in an Epidemic: Evaluating the ‘Swedish Solution’”. NBER Working Papers 27047, NBER Inc. Recuperado de <https://ideas.repec.org/p/nbr/nberwo/27047.html>

KUCHARSKI, A., RUSSELL, T., DIAMOND, C., LIU, Y., EDMUNDS, J., FUNK, S., EGGO, R., SUN, F., JIT, M., MUNDAY, J., DAVIES, N., GIMMA, A., ZANDVOORT, K., GIBBS, H., HELLEWELL, J., JARVIS, C., CLIFFORD, S., QUILTY, B., BOSSE, N. & FLASCHE, S. (2020). Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study. *The Lancet Infectious Diseases*. 20. 10.1016/S1473-3099(20)30144-4.

KYPRAIOS, T., NEAL, P., & PRANGLE, D. (2016). A tutorial introduction to Bayesian inference for stochastic epidemic models using Approximate Bayesian Computation. *Mathematical Biosciences*. 287. 10.1016/j.mbs.2016.07.001.

MCADAMS, D. (2020). Nash SIR: An Economic-Epidemiological Model of Strategic Behavior During a Viral Epidemic. Recuperado de <https://n9.cl/xiro2>

MINISTERIO DE SALUD DE CHILE. (2020a). Cifras Oficiales COVID-19. Recuperado de <https://www.gob.cl/coronavirus/cifrasoficiales/>

MINISTERIO DE SALUD DE CHILE. (2020b). Gobierno anunció cuarentena total para siete comunas de la RM. Recuperado de <https://www.minsal.cl/ministro-de-salud-anuncio-cuarentena-total-para-siete-comunas-de-la-rm/>

MINISTERIO DE SALUD DE CHILE. (2020c). Chile lidera Latinoamérica en tasa de test PCR por millón de habitantes. Recuperado de <https://www.minsal.cl/chile-lidera-latinoamerica-en-tasa-de-test-pcr-por-millon-de-habitantes/>

MINISTERIO DE SALUD DE CHILE. (2020d). Subsecretaria de Salud Pública anuncia drásticas sanciones por incumplimiento de medidas para contener COVID-19. Recuperado de <https://www.minsal.cl/subsecretaria-de-salud-publica-anuncia-drasticas-sanciones-por-incumplimiento-de-medidas-para-contener-covid-19/>

MINISTERIO DE SALUD DE CHILE. (2020e). Presidente Piñera por Plan Nacional de Vacuna contra el Covid-19: “Nuestra meta es iniciar el proceso de vacunación durante el primer trimestre del próximo año”. Recuperado de <https://www.minsal.cl/presidente-pinera-por-plan-nacional-de-vacuna-contra-el-covid-19-nuestra-meta-es-iniciar-el-proceso-de-vacunacion-durante-el-primer-trimestre-del-proximo-ano/>

MORTENSEN, C. & PISSARIDES, A. (1994). Job Creation and Job Destruction in the Theory of Unemployment. *The Review of Economic Studies*, Vol. 61, No. 3, pp. 397-415. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/2297896>

OMS. (2020a). Actualización de la estrategia frente a la COVID-19. Recuperado de https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/covid-strategy-update-14april2020_es.pdf

OMS. (2020b). Older people & COVID-19. Recuperado de <https://www.who.int/teams/social-determinants-of-health/covid-19>

OMS. (2020c). La carrera por una vacuna contra la COVID-19. Recuperado de <https://www.who.int/es/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/covid-19-vaccines>

OMS. (s.f.). [Página web]. Recuperado de <https://www.who.int/es>

OPS CHILE. (s.f.). [Página web]. Recuperado de <https://www.paho.org/es/chile>

PIGUILLEM, F. & SHI, L. (2020). “Optimal COVID-19 Quarantine and Testing Policies”. EIEF Working Papers Series 2004, *Einaudi Institute for Economics and Finance (EIEF)*. Recuperado de <https://ideas.repec.org/p/eie/wpaper/2004.html>

QUERCIOLI, E., & SMITH, L. (2006). “Contagious Matching Games”. Technical Report. Working paper. Recuperado de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3621657

ROJAS, S. (2020). The epidemiological SIR model on coronavirus COVID-19 pandemic data. Recuperado de <https://cutt.ly/VhAIVNE>

SOCHIMI. (2020). Encuesta nacional sobre ocupación de unidades críticas durante contingencia COVID19. Recuperado de https://medicina-intensiva.cl/site/covid/img/noticias/informe_11JUN2020.pdf

TALAWAR, A., & AUNDHAKAR, U. (2016). Parameter estimation of SIR epidemic model using MCMC methods. 12. 1299-1306. Recuperado de <https://n9.cl/izkx>

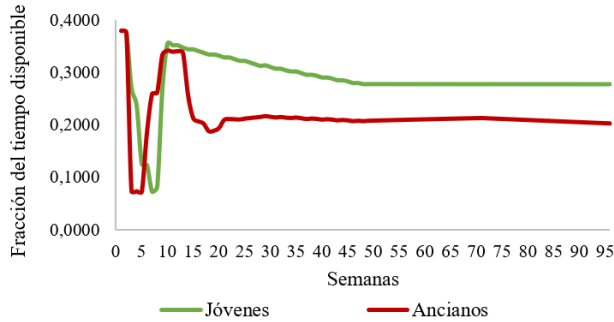
TOXVAERD, F. (2020). “Equilibrium Social Distancing”. Cambridge Working Papers in Economics 2021, Faculty of Economics, University of Cambridge. Recuperado de <https://ideas.repec.org/p/cam/camdae/2021.html>

TUAN, N., MOHAMMADI, H. & SHAHRAM, R. (2020). A mathematical model for COVID-19 transmission by using the Caputo fractional derivative. *Chaos Solitons Fractals*. N°110107. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/342882361_A_mathematical_model_for_COVID-19_transmission_by_using_the_Caputo_fractional_derivative

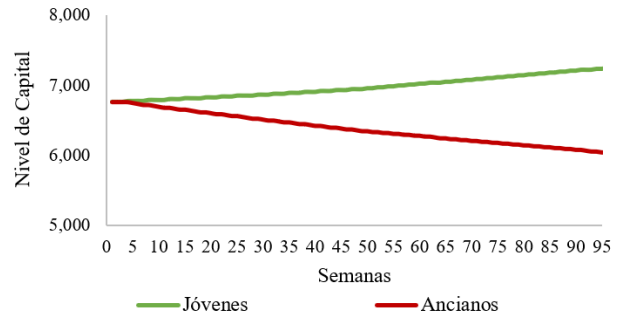
WANGPING, J., KE, H., YANG, S., WENZHE, C., SHENGSHU, W., SHANSHAN, Y., JIANWEI, W., FUYIN, K., PENGANG, T., JING, L., MIAO, L., & YAO, H. (2020). Extended SIR Prediction of the Epidemics Trend of COVID-19 in Italy and Compared With Hunan, China. *Frontiers in medicine*, 7, 169. <https://doi.org/10.3389/fmed.2020.00169>

APÉNDICE

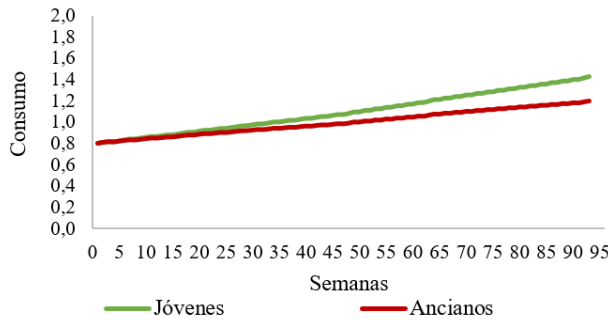
APÉNDICE 1: TRAYECTORIA DE VARIABLES ECONÓMICAS EN LA ECONOMÍA DESCENTRALIZADA



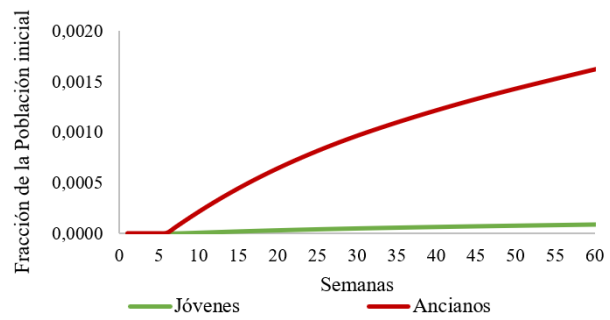
(c) Trabajo



(d) Niveles de Capital



(e) Niveles de Consumo



(f) Utilidad

APÉNDICE 2: PLAN “Paso a Paso Chile”

Desde que se conoció la existencia del Covid-19, el Gobierno ha liderado un conjunto de iniciativas para proteger a la población, a través del Plan de Acción Coronavirus, que involucra una gran cantidad de medidas, como el reforzamiento del sistema de salud, la creación de múltiples instrumentos de apoyo a las familias, la instauración de restricciones a las actividades y a la movilidad, el desarrollo de una estrategia de testeo, trazabilidad y aislamiento, entre muchos otros esfuerzos, que han impactado la vida de todos los chilenos. Las medidas se han ido incrementado en la medida que los riesgos sobre la población se fueron incrementando.

A nueve meses del primer caso de coronavirus en Chile, y después de un gran esfuerzo de todos, podemos ver que las medidas de prevención, autocuidado y operación en Modo Covid surten efecto y generan una reducción gradual de las tasas de contagio. Si bien el avance es diverso en las distintas regiones y comunas del país, en aquellas con mejor evolución se pueden levantar algunas restricciones, para permitir recuperar la movilidad y el desarrollo de algunas actividades.

Por ello, se estableció una estrategia gradual de desconfinamiento, que sirve de marco en esta etapa y que permite entregar visibilidad y transparencia a la ciudadanía respecto a lo que significa avanzar o retroceder y los próximos pasos que iremos enfrentando. Durante todo este periodo de confinamiento hemos ido adaptándonos a nuevas costumbres y formas de realizar nuestras actividades habituales, lo que hacia adelante debe transformarse en un nuevo Modo Covid de vivir. El mundo post Covid no será igual que el anterior, al menos mientras no tengamos ampliamente disponible una vacuna o tratamiento, y por ello es fundamental tener una estrategia que nos ayude a vivir esta nueva realidad. El presente apéndice desarrolla las principales ideas de este plan maestro en cada una de sus fases:

- Paso 1: Cuarentena

Se refiere al estado más estricto de confinamiento de una comuna o territorio, ya que restringe la movilidad de las personas, para disminuir al mínimo la interacción y por lo tanto la expansión del virus. Esto significa que sólo se pueden realizar algunas actividades para las cuales se requiere un permiso (personal o colectivo). Las actividades permitidas y la forma de obtener los permisos se encuentran regulados por el “Instructivo de Desplazamiento del Ministerio del Interior y Seguridad Pública”. Esta medida se ha aplicado a nivel de comuna completa o parcial. El detalle de las actividades de esta etapa está en los anexos 1 y 3.

- Paso 2: Transición

Las comunas que están en cuarentena por mucho tiempo sufren de la privación de muchas actividades además de la ansiedad que significa una alta tasa de contagio en su territorio. Esto aumenta la necesidad inherente en su población de salir para retomar sus actividades personales, laborales y sociales. Pero, aunque sea muy comprensible y natural, un retorno brusco a este tipo de interacciones de personas o grupos de personas, puede llevar a un rebrote rápido que signifique volver atrás al estado de cuarentena. Es por eso por lo que se define esta fase de Transición, para que, antes de pasar a ser comuna sin cuarentena, se retomen paulatinamente las interacciones que conllevan menor riesgo de contagio o que se pueden hacer asegurando el distanciamiento físico, como las actividades comerciales o laborales. En Transición, el objetivo es que se pueda retomar parte de las actividades, pero reducir la probabilidad de contagios. Así, en esta etapa se permite el libre desplazamiento de lunes a viernes, pero se mantiene la cuarentena -con la correspondiente restricción de movilidad- los fines de semana y festivos, con lo que se busca reducir las reuniones sociales y recreativas, que representan alto riesgo de contagio y propagación. El detalle de las actividades de esta etapa está en los anexos 1 y 3. Estas restricciones, acompañadas del reforzamiento del uso de mascarilla, obligatorio en todo espacio cerrado, vía pública, espacios públicos y transporte público; con la adaptación de los espacios de acceso público en la ciudad; con la adaptación de los lugares de trabajo; y el seguimiento estricto de los protocolos de funcionamiento, ayudarán a reducir los riesgos de contagio.

- Paso 3: Preparación

Actualmente, la mayoría de las comunas del país no están en cuarentena y su confinamiento no

está determinado por la limitación a la movilidad de las personas, sino que por las restricciones sanitarias a ciertas actividades específicas. En caso de que una comuna que pasó de Cuarentena a Transición presente buen comportamiento epidemiológico durante esa fase, podrá pasar a ser una comuna sin cuarentena, si así lo determina la autoridad sanitaria. El mayor cambio respecto a la etapa anterior es que no restringe la movilidad de las personas ningún día de la semana, permitiendo las reuniones sociales y recreativas cualquier día de la semana, manteniendo las restricciones asociadas al número máximo de convocados. El detalle de las actividades de esta etapa está en los anexos 1 y 3. Es decir, en esta etapa se mantienen vigentes las restricciones sanitarias, que, como fue expuesto anteriormente, promueven que vayamos adoptando en nuestra vida cotidiana el distanciamiento físico, la higiene permanente y el autocuidado, y que no asistamos a instancias o actividades que conllevan el mayor riesgo de contagio.

- Pasos 4 y 5: Apertura Inicial y Apertura Avanzada

En caso de que un territorio presente buen comportamiento epidemiológico prolongadamente fuera del estado de Cuarentena, éste podrá iniciar la reapertura gradual de sus actividades habituales. Esta apertura gradual permite retomar actividades cotidianas suspendidas desde marzo, pero no como las conocíamos, sino que en Modo Covid. Se considera un avance muy gradual, para identificar y corregir a tiempo errores o problemas específicos, con monitoreo y sentido de alerta para tomar decisiones a tiempo y con prudencia. Además, es reversible, ya que su avance gradual permite el retroceso responsable si es necesario, de acuerdo a indicadores sanitarios. Es un retorno de largo plazo, considerando que la pandemia seguirá vigente por mucho tiempo, hasta el desarrollo de una vacuna o tratamiento. La apertura gradual se realizará en fases, y se avanzará en ellas de acuerdo con la evolución de los criterios epidemiológicos. Las actividades que se van permitiendo en cada fase se definen de acuerdo con su nivel de riesgo y exposición al contagio. Lo que se mantiene siempre obligatorio son las medidas obligatorias de Modo Covid: uso de mascarillas, ya que está demostrado que es la medida de autocuidado más eficiente, el distanciamiento físico, la higiene permanente, y la información de autocuidado. De esta manera, en la Apertura Inicial, se permitirá retomar ciertas actividades en lugares cerrados (sin ventilación natural) que significan menor riesgo de contagio y minimizando al máximo las aglomeraciones y contacto físico entre los asistentes. La Apertura Avanzada descansa en que la población de a poco se va acostumbrando a las actividades cotidianas en Modo Covid, por lo que, gracias a esta actitud de autocuidado, se permite aumentar el aforo de ciertas actividades permitidas en la fase anterior, asumiendo que, complementado con las medidas de autocuidado, estas reducen su riesgo de contagio. El detalle de las actividades de esta etapa está en los anexos 1 y 3.

Figura 19: Esquema del Plan “Paso a Paso Chile”



APÉNDICE 3: COMUNAS SELECCIONADAS PARA SEGUIMIENTO DE CUARENTENAS

Comuna	
Alto hospicio	Parque Hurtado
Antofagasta	Pedro Aguirre Cerda
Arica	Peñaflor
Buin	Peñalolén
Calama	Machalí
Calera de Tango	Macul
Cerrillos	Maipú
Cerro Navia	Mejillones
Chiguayante	Melipilla
Chillán	Ñuñoa
Chillán viejo	Providencia
Colina	Punta Arenas
Concepción	Puerto Williams
Conchalí	Pudahuel
Coquimbo	Puente alto
Curacaví	Puerto Montt
Curicó	Quilicura
El bosque	Quinta Normal
Estación central	Rancagua
Graneros	Recoleta
Hualpén	Renca
Huechuraba	San Antonio
Independencia	San Bernardo
Iquique	San Felipe
La Cisterna	San Joaquín
La Florida	San José de Maipo
La Granja	San Miguel
La Pintana	San Ramón
La Reina	Santiago
La Serena	Talagante
Lampa	Talcahuano
Las Condes	Temuco (Araucanía)
Lo Barnechea	Tocopilla
Lo Espejo	Valparaíso
Lo Prado	Viña del mar
Los Andes	Vitacura

APÉNDICE 4: VACUNAS CANDIDATAS PARA COMBATIR EL COVID-19

A continuación se realiza una breve descripción de las 9 vacunas que han presentado los mejores resultados durante el segundo semestre de 2020 acorde con [BBC \(2020\)](#).

1. BNT162 (Pfizer y BioNTech)

Por lo que se sabe hasta el momento, la vacuna BNT162 es una de las más avanzadas y debería ser aprobada por Estados Unidos en las próximas semanas.

Esta utiliza la tecnología conocida como ARN: es decir, contiene una pequeña secuencia genética creada en el laboratorio que “enseña” a las propias células del cuerpo humano a producir proteínas similares a SARS-CoV-2. A partir de ahí, el sistema inmunológico reconoce la amenaza y crea una respuesta que protege al cuerpo de futuras infecciones. Cabe destacar que los resultados anunciados por Pfizer y BioNTech aún necesitan ser publicados en alguna revista científica y evaluados por expertos independientes. Pero si son consistentes, representarán un cambio de paradigma en la ciencia, pues la suya sería la primera vacuna genética de la historia.

¿Cuál es la ventaja de esto? Primero, son mucho más fáciles y rápidas de producir. Luego, los requisitos de laboratorio y equipo son menores en comparación con los inmunizadores que tenemos hasta ahora. El mayor inconveniente es la necesidad de mantener las dosis a una temperatura inferior a -70°C para evitar que la sustancia pierda su efecto. Esto puede convertirse en un obstáculo importante en regiones remotas o muy cálidas. Otro problema sería la disponibilidad de este inmunizador en los países en desarrollo. Por ahora, por ejemplo, y a pesar de la participación de Brasil en las pruebas, no existe ningún arreglo para la compra o transferencia de tecnología al país. E incluso si el gobierno brasileño y las dos empresas cierran un acuerdo, las primeras dosis solo llegarían a Brasil a partir del primer trimestre de 2021, pues otras naciones ya se han garantizado los primeros lotes.

2. mRNA-1273 (Moderna)

Esta candidata también forma parte del grupo de vacunas basadas en ARN. El reciente anuncio de Moderna, por su parte, se basó en 95 participantes en ensayos clínicos diagnosticados con covid-19. Los resultados muestran que 90 de ellos eran del grupo placebo, lo que sugiere una tasa de efectividad del 94 %.

También hay otras buenas noticias relacionadas con este primer informe: el inmunizador no causó ningún evento adverso notable y generó una respuesta constante del sistema inmunológico incluso en los ancianos o en personas con enfermedades crónicas. También parece prevenir casos graves que requieren hospitalización e intubación.

Comparado con el competidor Pfizer y BioNTech, el producto de Moderna tiene la ventaja de almacenarse a menos de 20°C . Esta es una temperatura mucho más fácil de garantizar con los congeladores que tenemos actualmente. No hay mucha información sobre la posible llegada de

esta vacuna a los países en desarrollo. Una forma de obtener el producto puede ser el Fondo Global de Acceso a Vacunas para Covid-19 (Covax), creado por la Organización Mundial de la Salud con el objetivo de distribuir dosis a países menos desarrollados. Numerosos países latinoamericanos son parte de esta iniciativa.

3. AZD1222 (Universidad de Oxford y AstraZeneca)

También probada en Brasil, esta candidata pertenece al equipo de vacunas de vectores virales no replicantes. Esto quiere decir que se construyó a partir de un adenovirus, un tipo de virus que no daña nuestra salud. En su interior, los científicos insertaron algunos genes de Sars-CoV-2 para provocar una reacción del sistema inmunológico. A la vacuna le ha ido bien en ensayos clínicos: la información completa del estudio de Fase II se publicó el 19 de noviembre en The Lancet y confirmó que el inmunizador es seguro y no causa efectos secundarios graves, incluso en ancianos. Otro punto a destacar es que produjo anticuerpos, una gran señal. El 23 de noviembre de 2020, los desarrolladores de la vacuna divulgaron los resultados preliminares de la Fase III de ensayos clínicos.

De acuerdo con el análisis de 131 casos de covid-19, esta vacuna demostró ser un 70,4 % efectiva al combinar datos obtenidos de un régimen de dos dosis administradas. Los investigadores estiman, sin embargo, que dicha eficacia pueda llegar al 90 % si se ajusta la dosis. Las fortalezas y debilidades de AZD1222 están en su originalidad: hasta el momento, no existe una vacuna aprobada que utilice este tipo de metodología. Por un lado, esto puede funcionar y revolucionar el conocimiento en el campo. Por otro, es necesario esperar pacientemente los resultados definitivos sobre la efectividad y seguridad del producto.

Una ventaja de la vacuna de la Universidad de Oxford y AstraZeneca está en su disponibilidad. Entre otros, Brasil, Argentina y México ya tienen convenios para la compra y transferencia de tecnología.

4. CoronaVac (Sinovac)

Esta vacuna china copó titulares la semana pasada, luego de la suspensión de las pruebas clínicas en Brasil por la muerte de un voluntario. La Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria (Anvisa) y el Instituto Butantan intercambiaron críticas en una serie de notas y entrevistas colectivas. Pero pocos días después se aclaró que la muerte no había tenido nada que ver con la vacuna y se retomó el estudio con normalidad.

Dejando a un lado la polémica, la farmacéutica Sinovac también apuesta por la estrategia del virus inactivado. Los científicos utilizaron algún método, como calor o productos químicos, para desactivar el Sars-CoV-2 y que no cause infección ni se reproduzca dentro del cuerpo. Aun así, cuando se aplica en una vacuna, el virus es reconocido por el sistema inmunológico, creando una respuesta protectora.

El punto fuerte aquí es la fiabilidad. La ciencia ha estado trabajando con vacunas de virus inactivados durante casi siete décadas. Por eso ya sabemos muy bien cómo producirlas y los principales problemas que pueden aparecer por el camino. En la dirección opuesta, el punto débil es el retraso. La fabricación requiere un rigor extremadamente alto y una planta industrial muy bien equipada. La formulación tampoco rinde mucho en dosis por litro. El producto se encuentra en la Fase III de prueba y pronto espera completar la cantidad mínima de eventos (voluntarios infectados con covid-19) para calcular su tasa de efectividad, como sucedió recientemente con Pfizer / BioNTech y Moderna. La refrigeración no parece ser un problema, ya que otras vacunas de virus inactivados pueden guardarse en un refrigerador convencional. Otro punto positivo es el acuerdo entre Sinovac y el Instituto Butantan, en Sao Paulo, que debería facilitar el acceso a CoronaVac en Brasil y América Latina.

5. Sputnik V (Centro Gamalaya de Investigación en Epidemiología y Microbiología)

Durante mucho tiempo, la palabra que mejor definió a la vacuna Sputnik V fue misterio. Las primeras noticias de Rusia, donde se encuentra el Instituto de Investigación Gamalaya, decían que ya se encontraba en una etapa avanzada de investigación. Poco después, fue aprobada por el gobierno. Los especialistas estaban muy preocupados porque las pruebas clínicas que garantizan la confiabilidad del proceso de investigación no habían sido registradas ni publicadas en ninguna revista científica. Desde entonces, ha surgido mucha información: la vacuna se basa en el vector viral no replicante (del mismo tipo en la Universidad de Oxford / AstraZeneca) y se está probando en unos 40.000 voluntarios en países como Rusia, Emiratos Árabes Unidos, Venezuela y Bielorrusia. Con base en uno de estos análisis preliminares, los investigadores de la Sputnik V anunciaron una efectividad del 92 %, basándose en 20 eventos registrados. Hay que esperar a que el estudio evolucione un poco más para que este ritmo se consolide.

6. JNJ-78436735 (Johnson & Johnson)

Sudáfrica, Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Estados Unidos, México y Perú son los países donde actualmente se prueba la vacuna de Johnson & Johnson. Hay más de 60 mil voluntarios en estos países. Basada en la tecnología del vector viral no replicante (el mismo utilizado por la Universidad de Oxford / AstraZeneca y la Sputnik V), parece estar un poco retrasada, ya que la farmacéutica no ha hecho anuncios de análisis preliminares. Se espera que suceda en las próximas semanas. La principal ventaja estaría en los números: parte de los estudios de Fase III evalúa una sola aplicación de la vacuna. Los otros competidores necesitan dos dosis para tener efecto. Si este esquema funciona, podría significar ahorros de miles de millones de dólares.

7. NVX-CoV2373 (Novavax)

Este es el representante más avanzado de la clase de vacunas de subunidades de proteínas. En lugar de utilizar todo el virus, se desarrolló a partir de un pequeño fragmento de Sars-CoV-2 capaz de activar una respuesta inmunitaria. En relación con los competidores enumerados anteriormente, el desempeño de Novavax tardará más en conocerse. Parte de los estudios de

Fase III se llevan a cabo en el Reino Unido con 15.000 voluntarios y se esperan resultados preliminares en enero o febrero de 2021. Hay otra parte de esta investigación que se realizará con decenas de miles de participantes en Estados Unidos. Se espera que la etapa comience a fines de noviembre o principios de diciembre. Como el producto de Novavax es parte de Covax (ese consorcio de la OMS para la compra y distribución de dosis a países menos desarrollados), es posible que llegue a América Latina en algún momento, si todo va bien

8. Ad5-nCoV (CanSino)

También elaborada a partir de un vector viral que no se replica (como los candidatos de la Universidad de Oxford / AstraZeneca, Sputnik V y Johnson Johnson), fue aprobada de emergencia para su uso por personal militar chino, incluso antes de importantes estudios de seguridad y eficacia. En las pruebas de Fase III, la Ad5-nCoV se aplica actualmente a más de 40.000 voluntarios de Pakistán, Arabia Saudita y México. Hay poca información sobre esta vacuna así que es necesario esperar nuevos anuncios por parte de los responsables.

9. Covaxin (Bharat Biotech)

Desarrollada en India, es una de las últimas candidatas en entrar en la Fase III de ensayos clínicos. Al igual que CoronaVac, también utiliza virus inactivados en su formulación. Como se mencionó anteriormente, existe una gran experiencia mundial en el uso de esta tecnología, aunque es costosa y requiere mucho tiempo en comparación con los métodos más modernos. Para los ensayos, los responsables pretenden reclutar a más de 25.000 participantes en territorio indio. Según un informe de Reuters, se espera que la distribución de dosis comience a partir de febrero de 2021.