



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**DISEÑO DE ESTRATEGIAS TTA EN COLEGIOS: DEFINICIÓN DE
POLÍTICAS DE TESTEO, TRAZABILIDAD Y AISLAMIENTO PARA
PLANIFICAR ASISTENCIA PRESENCIAL SEGURA A CLASES,
MEDIANTE SIMULACIÓN Y USO DE MODELOS MATEMÁTICOS.**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

JOAQUÍN TOMÁS SIEBERT SANDOVAL

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OSVLADO OLIVARES ACUÑA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SUSANA VERÓNICA MONDSCHHEIN PRIETO
PATRICIO TOMÁS FONCEA ARANEDA

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
GESTIÓN DE OPERACIONES
POR: **JOAQUÍN TOMÁS SIEBERT SANDOVAL**
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: MARCELO OSVALDO OLIVARES ACUÑA

**DISEÑO DE ESTRATEGIAS TTA EN COLEGIOS: DEFINICIÓN DE
POLÍTICAS DE TESTEO, TRAZABILIDAD Y AISLAMIENTO PARA
PLANIFICAR ASISTENCIA PRESENCIAL SEGURA A CLASES,
MEDIANTE SIMULACIÓN Y USO DE MODELOS MATEMÁTICOS.**

A principios del 2020 la OMS declaró alerta sanitaria a nivel mundial, debido a la pandemia por el virus SARS-CoV-2 [1]. Los colegios, en todo el mundo, estuvieron obligados a cerrar sus establecimientos como medida de mitigación de brotes, y tuvieron que adoptar, en lo posible, clases con modalidad en línea. Por su parte, el gobierno de Chile posterior al cierre total de todos los establecimientos del país, tuvo varios intentos fallidos, tanto en 2020 como a inicios del 2021, de retomar la presencialidad escolar. Con esto en consideración, se decidió realizar un estudio que brindara apoyo científico a los tomadores de decisiones, evaluando riesgos y beneficios de distintas políticas para abrir los establecimientos, resguardando siempre la salud de las personas.

En el estudio se buscó analizar el rendimiento de distintas políticas de mitigación de brotes. Para esto, se simularon redes de contagios a partir de un modelo de agentes, donde distintos establecimientos fueron modelados a partir de grafos, representando como nodo a cada persona dentro de una institución y como enlace a las relaciones entre personas dentro de ésta. En términos de propagación del virus, se modelaron probabilidades de infección externas e internas a la red, considerando distintos factores como carga viral, susceptibilidad y contagiosidad de las personas, entre otras. Las políticas de mitigación consideradas fueron políticas de testeo, distintas políticas de aislamiento, alternación de asistencia y reducción de aforo en las salas, midiendo el impacto de éstas en el número de contagios, el R efectivo, el porcentaje de clases online debido a cuarentenas, entre otras.

Los resultados obtenidos del estudio fueron robustos para los distintos colegios simulados, mostrando que la política de reducción de aforo de salas reduce cerca del 45 % de contagios, mientras que testear semanalmente generó una reducción mayor al 50 %, y en ambos casos el porcentaje de clases online está por debajo del 10 %. Por otra parte, considerando una política más agresiva como reducción de aforos y alternancia en la asistencia, generan una reducción que asciende por sobre el 80 %, pero el porcentaje de clases online queda por sobre el 50 %. Por último, reduciendo los aforos en conjunto con un plan de testeo semanal a toda la comunidad, se genera una reducción cercana al 75 %, pero manteniendo un bajo porcentaje de clases online, menor al 5 %. Así, se concluye que existen políticas que son considerablemente más efectivas que otras en reducción de contagios, pero que pueden conllevar a costos muy altos para los colegios, además existen políticas que son dominadas por otras en costo-efectividad, y dependiendo de los recursos de cada colegio, se pueden buscar aquellas medidas que les sean beneficiosas acorde a su realidad, permitiendo un retorno a clases seguro.

*Dedicado a mi tatita Nano,
hermanito Tomás, amiga Isi y perrito Simón
que me cuidan desde el más allá.*

Agradecimientos

Quisiera partir agradeciendo a mi familia, pues han sido quienes me han acompañado durante este extenso viaje. A mi *viejita*, quien me ha bancado cada locura que se me ha ocurrido, apoyándome en las interminables noches de estudio, en los quejidos de estrés y en las caídas que me he pegado. A mi *viejo*, que se le infla el pecho con mis logros y siempre me ha inculcado a seguir adelante para sacar mis estudios, a veces con retos y otras veces con tonos más amenos. A mi abuelita *Pichita*, que se ha preocupado siempre por mi bienestar, por mi rendimiento y por mi salud mental. A mi *hermano*, quien ha sido mi referente desde que tengo memoria, quien se ha tomado siempre el tiempo de ayudarme en mis dudas y con sus interminables consejos me ha guiado por un camino del cual no puedo estar más agradecido y orgulloso. Además, junto con mi cuñada querida *Beggi*, agradezco darme el honor de ser padrino de la hermosa *Emma Sofía*. También a mi perrito *Tadeo*, por mirarme como si fuese la mejor persona del mundo, realmente espero algún día llegar a ser cómo él piensa que soy.

Me gustaría seguir agradeciéndole a mis amigos y amigas. Por un lado a mis cabros del colegio, mi grupo de amigos de toda la vida, que gracias a las interminables anécdotas juntos han marcado mi forma de ser y forjado parte de mi carácter. Dentro de mi grupo del colegio no puedo dejar de mencionar a mi más loca y apañadora amiga *Pine*, tkm. Por otra parte, mi grupo más cercano de la U: *The Fipe's*, grupo del cual me siento completamente orgulloso por sus logros y del cual he aprendido mucho desde primer año. Fueron un pilar fundamental para adaptarme rápidamente en la U y si bien a algunos los conozco hace más tiempo, el momento en que conocí a cada uno por separado fue perfecto. Mención honrosa a mis mosqueteros. También, agradecerle a los mejores de mi paso en industrias: *PG10*, *SM*, *Falcao*, *Pipo e Ignasi*. A los dos primeros les tengo un cariño especial, nuestro espacio conocido como la *OFipe* y recuerdos que no se olviarán nunca.

Para mis MGO amigas *Magdalena Badal* y *Florencia Cristensen*, agradecerles por hacerme mucho más ameno y llevadero este último pasaje de mi formación académica. Por esos estudios eternos junto a la Magda, donde una mitad era llorar por no entender nada y la otra ponerle un talento que no sospechábamos que teníamos. Por esos apañes infinitos con la Flo, guiando desde la experiencia en tutoría MGO y esas esperas interminables por las UB's.

También quiero agradecer a *Denis Sauré*, que gracias a él tuve mi primera experiencia en investigación y en la docencia universitaria, bancándome/chaqueteándome desde el minuto 1'. A *Willy Durán*, quien me inició en la investigación en una de las cosas que más me apasiona, el fútbol. Quiero agradecer a mi profesor guía *Marcelo Olivares*, quien me ha bancado infinito en todo los trabajos que hemos hecho en conjunto, me ha dado la confianza de tomar desafíos enormes y me ha enseñado muchísimo en poco tiempo. Agradecer a todo el apoyo que me ha dado en mi tesis, su ayuda cuando las cosas se complican y esa increíble comprensión

al momento de mandarme alguna embarrada, sin dudas ha sido un tremendo mentor y el mejor profe que pude escoger para guiar mi tesis. Agradecer a mi profesora co-guía *Susana Mondschein*, que es seca, y si bien nunca nos hemos conocido en persona, ha sido capaz de enseñarme a ser más riguroso, más explicativo y le tengo un respeto y admiración enormes, aún inclusive cuando me llamaba los domingos en la tarde para resolver dudas de los modelos. Gracias al *Pato Foncea*, con quien en primera instancia tuve la suerte de ser alumno en *Introducción al Álgebra*, y luego reencontrarme con él investigando juntos 5 años después para mi tesis. En más de una ocasión me salvó de todo tipo de dudas, desde las más sencillas hasta las más difíciles, pero siempre con la mejor disposición. A *Fernanda Melis* y a *Linda Valdés* agradecerles por paciencia y buena disposición para guiarme en temas de postgrado.

Por último, no quisiera dejar de lado a personas importantísimas en mi vida: mis padrinos *Pancho* y *Ale*, a la *Rosi*, *Olquita*, *Manu* y *Felipe* (bachiamigos). Si bien no interactuamos tan seguido, son personas que las llevo conmigo con los mejores recuerdos y cariño. Y también a aquellas personas que se fueron quedando en el camino, pero que tuve la suerte de conocer, encariñarme y aprender mucho de ellas.

Espero, de todo corazón, haber retribuido en alguna medida todo lo que han hecho por mí cada una de las personas que aquí fueron, explícita o implícitamente, aludidas.

Joaquín Siebert S.
Noviembre 2021

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Contexto de cierre y apertura de colegios en Chile	1
1.2. Motivación del trabajo realizado	2
1.2.1. Problemática a abordar	3
1.2.2. Metodología del estudio	3
2. Contexto pandemia por SARS-CoV-2	4
2.1. Modelo epidemiológico del virus SARS-CoV-2	4
2.1.1. Carga viral	4
2.1.2. Infecciosidad	6
2.1.3. Período infeccioso	7
2.1.3.1. Período contagioso	8
2.1.3.2. Período no contagioso	9
2.2. Estrategias de Trazabilidad, Testeo y Aislamiento	9
3. Red de contagios: Caso colegios	11
3.1. Red de personas	11
3.2. Red de contagios	12
3.3. Descripción general del modelo	12
3.4. Metodología	13
3.4.1. Modelo matemático	13
3.4.2. Estados de cada nodo y transmisión de la enfermedad	15
3.4.2.1. Estados de un nodo	15
3.4.2.1.1. Flujo entre estados	15
3.4.3. Políticas TTA	16
3.4.3.1. Testeo	16
3.4.3.2. Trazabilidad	17
3.4.3.3. Aislamiento	18
3.4.4. Limitaciones del modelo	18
4. Resultados de distintos escenarios simulados	19
4.1. Calibración de parámetros iniciales	19
4.1.1. Distribución de contactos externos fuera de la red	19
4.1.2. Calibración del parámetro R_0 e infecciosidad	19
4.1.3. Calibración de infecciosidad de familiares	20
4.2. Escenarios simulados	21
4.2.1. Parámetros externos a la red de contagios	21
4.2.2. Parámetros de la red	22

4.3. Análisis de rendimiento de estrategias TTA	22
5. Piloto plan de testeo a colegios en Chile	27
5.1. Obtención de datos	27
5.2. Agregación de resultados de simulaciones con datos reales	28
5.3. Propuesta de medición de impacto	29
5.3.1. Diseño de piloto e implementación de intervención en política de testeo y aislamiento	29
5.3.2. Selección de la muestra y duración de la evaluación	30
5.3.3. Selección de tamaño muestral	30
6. Conclusiones	32
Bibliografía	35
Anexo A.	38
A.1. Resultados para distintos escenarios simulados	38
A.2. Resultados para básica	40
A.3. Análisis de poder estadístico y tamaño de la muestra	41
A.4. Recursos de implementación propuesta	43
A.5. Colegios candidatos a testear	44

Índice de Tablas

3.1.	Estados posibles de un nodo de la red.	15
3.2.	Flujo de información entre estados.	16
4.1.	Tabla con parámetros externos a la red.	21
4.2.	Tabla con parámetros de la red.	22
5.1.	Resultados basados en análisis de simulación.	28
5.2.	Selección preliminar de colegios para piloto.	31
A.1.	Tabla de distintos resultados de simulaciones para colegio de media.	38
A.2.	Tabla de distintos resultados de simulaciones para colegio de básica.	39
D.3.	Tabla de recursos de implementación del piloto.	43
E.4.	Tabla con colegios candidatos a ser testeados separados por región.	44

Índice de Ilustraciones

2.1.	Evolución de carga viral de un individuo en el tiempo.	6
2.2.	Período infeccioso de una persona contagiada con coronavirus.	8
2.3.	Sensibilidad de test de antígenos y PCR, según evolución temporal de carga viral.	10
3.1.	Red de personas, cursos de 20, 30 y 35 alumnos.	11
3.2.	Descripción de posibles transiciones entre estados de infección de un individuo.	16
3.3.	Umbrales de detección de test rt-PCR y Antígenos	17
4.1.	Gráfico reducción de aforos de sala y variando asistencia.	23
4.2.	Gráficos testeo semanal.	24
4.3.	Gráficos combinación cápsulas y testeo semanal.	25
6.1.	Rendimientos de políticas de mitigación.	33
B.1.	Gráficos básica reducción de aforos y variación en asistencia.	40
B.2.	Gráficos básica testeo semanal.	40
B.3.	Gráficos básica combinación cápsulas y testeo semanal.	41
C.4.	Análisis de diseño experimental para distintos niveles de poder.	42

Capítulo 1

Introducción

A inicios del 2020 se declaró alerta sanitaria a nivel mundial por la OMS [1], debido a la pandemia por el virus SARS-CoV-2, la cual ha causado a la fecha más de 100 millones de contagios y 3 millones de muertes al rededor del mundo [2]. Debido a la facilidad de propagación que tiene el virus, muchas industrias se vieron forzadas a adoptar sus actividades mediante teletrabajo, reducir el número de empleados e inclusive a cerrar por no poder solventar sus costos fijos [3]. Por otra parte, los colegios se vieron en la obligación de cerrar sus establecimientos en todos los países como medida de control de brotes [4], y adoptar - en lo posible - modalidad de enseñanza online por un tiempo, trayendo consigo muchas consecuencias negativas a largo plazo, tanto en la formación como en la salud mental de las futuras generaciones [5, 6].

A medida que se ha sabido más sobre el virus, se han ido re-abriendo colegios, como es el caso de Alemania, Estados Unidos y Reino Unido, y diversos estudios han concluido que los colegios no han sido un gran foco de aumento en la transmisión de Covid-19 [7, 8], esto en parte debido a las medidas de contención que se han implementado en los establecimientos de dichos países. Sin embargo, la evidencia indica que sí han surgido brotes en colegios y que es importante mantener medidas de mitigación en las instituciones educacionales para evitar un aumento en las infecciones. Actualmente, existe consenso internacional sobre la necesidad de reanudar las clases presenciales, utilizando distintas medidas que ayuden a prevenir brotes como protocolos de higiene, reducir aforos en las salas de clase, políticas de aislamiento ante casos confirmados, combinar clases presenciales/online y testeo a asintomáticos.

1.1. Contexto de cierre y apertura de colegios en Chile

A mediados del mes de Marzo del 2020, el gobierno de Chile anunció que se cerrarían, entre otras cosas, todos los establecimientos educacionales a lo largo del país [9]. Éstos permanecieron cerrados durante varios meses, sin embargo, durante el 2020, el ministro de educación en reiteradas ocasiones impulsó fechas tentativas para el retorno a clases ¹, donde planteaba tener las medidas necesarias para asegurar un retorno seguro para los estudiantes. Aquellas medidas constaban de distanciamiento social de más de un metro de distancia, higienización

¹ Cabe señalar que la re-apertura a clases siempre fue voluntaria para los colegios, e inclusive, si el colegio estaba abierto y una familia no quería mandar a sus hijos se respetaba y permanecían en clases online.

de manos y en caso de haber un caso confirmado, aislamiento del curso y los contactos estrechos del infectado [10]. Durante ese año, no se impulsaron más medidas y el retorno a clases fue un fracaso, debido a la baja concurrencia de alumnos a colegios que voluntariamente decidieron abrir [11].

Para el año 2021, el ministerio de salud priorizó a profesores para recibir vacunación de manera inmediata, sin importar edad, en el mes de Febrero [12], por su parte el ministerio de educación formuló un protocolo de apertura de colegios, el cual brindaba una pauta que debía seguir cada colegio. En el protocolo se señalaba, entre otras cosas, bajo qué condiciones sanitarias territoriales era posible la apertura de un establecimiento ², qué hacer frente a un caso confirmado de Covid-19 (para el caso de profesor/auxiliar de aseo y para alumnos), cómo debían configurarse las salas de clases para permitir distanciamiento social, definiciones de: contacto estrecho, caso probable, caso sospechoso, entre otros. Si bien el protocolo fue una buena pauta para instruir a los colegios, no incluyó cambios sustanciales a las medidas que se adoptaron en los intentos de apertura el año 2020, no se impulsó testeo en ningún caso (ni profesores ni a alumnos), no se evaluó alternar asistencia entre semanas y se apeló a que la vacunación ayudaría a contener posibles brotes, porque el vector de contagio serían los profesores [12].

Si se observa el caso de Estados Unidos o Reino Unido, el testeo es una medida elemental para la re-apertura de los colegios, es más, hay estudios [13] que señalan que el testeo es una de las medidas más efectivas para controlar la pandemia, y que incluir testeo en la comunidad escolar tiene un gran efecto para contener brotes. Además, se ha propuesto que una medida efectiva para reactivar la economía en pandemia es que alternar asistencia al trabajo, con ventanas de días seguidos, teniendo un significativo impacto en cortar la línea de transmisión del virus [14]. Esto último se puede replicar en el contexto de asistencia escolar, alternando la presencialidad entre cursos. En fin, existen muchas medidas, con sustento científico, que fueron adoptadas en otras partes del mundo y que permitieron tener abiertos los colegios, inclusive si los contagios en dichos países estuviesen muy altos. Por el contrario, en Chile se optó por tener medidas básicas de mitigación, lo cual decantó en nuevos intentos fallidos de apertura total de colegios.

1.2. Motivación del trabajo realizado

Como en Chile hubo varios intentos fallidos de retorno a clases, la incertidumbre sobre un retorno seguro a clases incrementó y esto afectaba directamente a miles de familias en el país. Por un lado, los daños en el aprendizaje de los niños y jóvenes aumentaron desde inicios del 2020, afectando a su vez su salud mental por el encierro, mientras que los padres y apoderados tenían que encontrar alguna forma de trabajar y acompañar a los estudiantes, inclusive si sus trabajos eran de manera presencial. Con esto en consideración, las condiciones impuestas por el ministerio de educación del país para que un colegio abriera o cerrara dependía mucho de la situación de la comuna en la que estaban³, e incluso se priorizaba,

² A los colegios se les permitía abrir desde fase transición del plan Paso a Paso del ministerio de salud. En la sección de Anexos se detallan las fases del plan Paso a Paso.

³ Los colegios hasta Junio del 2021 solamente podían abrir desde Fase 2 en adelante, según el plan Paso A Paso del MINSAL.

por parte del gobierno, la apertura de otros rubros como Malls o Restaurantes antes que los colegios.

1.2.1. Problemática a abordar

Con los antecedentes mencionados anteriormente, se decidió realizar un estudio que brindara apoyo tanto a los tomadores de decisiones, como a colegios con deseos de abrir sus dependencias, con la consigna de que los colegios fueran los primeros establecimientos en abrir - a medida que la evolución de la pandemia mejorara -, y los últimos en cerrar, en caso de que las condiciones sanitarias empeoraran. El estudio buscó evaluar distintas precauciones que pueden tomar colegios para mitigar brotes, como brindar solamente medidas de autocuidado (como uso de mascarilla, distanciamiento social y lavado de manos), aislamientos preventivos, reducción de clases presenciales, variación de aforos en salas, testeo a asintomáticos, entre otros. Combinando estas medidas se esperaba evaluar cuáles eran mejores en términos de contagios generados, R efectivo del colegio, porcentaje de clases presenciales por alumno y más medidas que permitan dar una guía sobre cuáles políticas son mejores de tomar según el contexto de cada colegio⁴. En la misma línea, se esperaba hacer un balance de costo-efectividad, que mostrara qué medidas son más efectivas que otras, qué costo tiene una por sobre otra y cuál es el trade-off de realizar una política en vez de otra.

1.2.2. Metodología del estudio

En el estudio se simularon redes de contagios a partir de un modelo de agentes, donde distintos establecimientos fueron modelados a partir de grafos, siendo los nodos las personas del establecimiento, y los enlaces las relaciones entre personas en un horizonte temporal definido. En términos de propagación del virus, se consideraron dos probabilidades de infección: una probabilidad externa a la red, representando una incidencia diaria de contagios, y una probabilidad interna a la red, modelando contagios entre nodos que interactúan entre sí dentro del colegio. Esta última probabilidad se calculó simulando distintas curvas de carga viral para cada individuo contagiado, siguiendo la metodología de [13], además consideró factores de contagiosidad y susceptibilidad según el rango etario del individuo infectado.

Este estudio rescató distintas investigaciones que se realizaron desde el inicio de la pandemia, recogiendo modelos de transmisión del virus, períodos de contagio, susceptibilidad de individuos, calibración de parámetros para obtener simulaciones representativas de la realidad, entre otros, buscando analizar un entorno muy afectado por el Covid-19 a nivel mundial, y ver de qué manera, y a qué costo, se pueden contener contagios, manteniendo los establecimientos educacionales abiertos, para que las futuras generaciones no se viesan tan afectadas por la pandemia.

⁴ El contexto de cada colegio podría considerar la infraestructura del colegio, los recursos de los alumnos, la disponibilidad de profesores y auxiliares de aseo, entre otras componentes más

Capítulo 2

Contexto pandemia por SARS-CoV-2

2.1. Modelo epidemiológico del virus SARS-CoV-2

El SARS-CoV-2 (*Severe Acute Respiratory Syndrom Coronavirus 2*) es un virus altamente contagioso, que se propaga por vía respiratoria de un individuo contagiado a uno susceptible. Una persona infectada puede contagiar a otras hasta 2 días antes de presentar síntomas [15] o incluso nunca presentar síntomas y aún así contagiar, por lo que resulta de suma importancia identificar tempranamente a las personas infectadas, y así poder controlar posibles brotes aislando oportunamente a contagiados.

Para entender mejor cómo una persona infectada contagia a otra, es necesario estar familiarizado con los conceptos de carga viral, infecciosidad y período infeccioso. Dichos conceptos están relacionados y en base a ellos se podrá entender mejor el comportamiento del virus.

2.1.1. Carga viral

La carga viral se define como la cantidad de partículas virulentas en el organismo de una persona, y ésta varía en el tiempo. En el caso del SARS-CoV-2, mientras más alta sea la carga viral de un contagiado, mayor será la probabilidad de contagiar a otro al momento de la interacción [13]. Una persona (asumiendo que no tiene complicaciones mayores como hospitalización o defunción) que contrae coronavirus comenzará con bajos niveles de carga viral en su cuerpo, pero a medida que pasan los días esa carga comenzará a subir hasta alcanzar su peak, para posteriormente disminuir hasta recuperarse. Según estudios [13], una persona infectada no es contagiosa inmediatamente después de enfermarse, sino cuando la concentración de virus en su cuerpo está sobre el umbral de 10^6 de carga viral, alcanzándose luego de 4-5 días, en promedio, desde su contagio [15, 13]. Además, el peak de carga viral en el organismo de una persona sintomática se alcanza incluso antes de presentar síntomas [15, 13, 16], por ende resulta vital lograr aislar a una persona contagiada antes de su peak, ya que esto corta la cadena de transmisión del virus y contiene posibles brotes. Una vez alcanzado el peak de carga viral, la concentración de virus en el organismo de un individuo comienza a bajar, dejando de ser contagioso al bajar del umbral señalado anteriormente, hasta recuperarse. La concentración de carga viral en el tiempo será distinta para cada persona,

y su evolución estará relacionada con la presencia o ausencia de síntomas ⁵.

Para poder detectar si una persona tiene activa una infección por coronavirus 19 existen dos tipos de tests de diagnóstico: test moleculares y test de antígenos. Las muestras para tests de diagnóstico son, en su mayoría, tomadas mediante isopos en la garganta o nariz, o por tomas de saliva al escupir en un tubo [17]. Los tests moleculares estudian la presencia de ARN de virus y tienen alta sensibilidad y especificidad, siendo el rt-PCR el test molecular más utilizado. Por otra parte, los tests de antígenos detectan la presencia de específicas proteínas de virus en las muestras, y en general tienen similar nivel de especificidad, pero menor nivel de sensibilidad que un test molecular [18]. La sensibilidad de un test de diagnóstico tendrá relación directa con la carga viral en el organismo de una persona, *i.e.*, se espera que en una persona con altos niveles de carga viral en su organismo sea más fácil de reaccionar positivo a un test de diagnóstico.

Sea V_{nt} el \log_{10} de carga viral del individuo n en el día t de su período de infección, luego se modeló a V_{nt} replicando al metodología de [13], determinándose a partir de tres puntos, de la forma (t_s, V_s) , generados de manera aleatoria, donde $t_s \in T_i$ será un tiempo aleatorio del período infeccioso T de la persona i , y V_s la carga viral en dicho instante.

Los puntos (t_s, V_s) generados correspondieron a $(t_0, 3)$, (t_{peak}, V_{peak}) y $(t_f, 6)$, donde el umbral $V_s = 3$ es el \log_{10} de la carga viral suficiente para que un test rt-PCR detecte la enfermedad, mientras que $V_s = 6$ será el mínimo umbral para que una persona pueda contagiar a otra, *i.e.*, luego del peak de carga, traspasar el umbral de 6 [$\frac{cp}{ml}$] implica el inicio del período de recuperación de una persona. Los puntos se generan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} t_0 &\sim Unif(2.5, 3.5) \\ V_{peak} &\sim Unif(7, 11) \\ t_{peak} - t_0 &\sim min(3, 0.5 + Gamma(1.5)) \end{aligned}$$

Ahora, para diferenciar las curvas de carga viral entre individuos con y sin síntomas, se generó otro tiempo aleatorio en el primer caso (t_{sint}), incidiendo en que la bajada de la curva desde el peak será más atenuada que en el caso de contagiado asintomático. Luego, para el caso de un individuo sintomático se tuvo:

$$\begin{aligned} t_{sint} - t_{peak} &\sim Unif(0, 3) \\ t_f - t_{sint} &\sim Unif(4, 9) \end{aligned}$$

Mientras que en un infectado asintomático el último punto se generó como sigue:

$$t_f - t_{peak} \sim Unif(4, 9)$$

En la Figura 2.1 se observa, en gris, una serie de cargas virales simuladas para el caso de

⁵ Una persona asintomática presentará un tramo descendente de carga viral más empinado que una sintomática, *i.e.*, una persona sintomática será contagioso más días (en promedio) que una asintomática. [13]

un individuo sintomático. Los puntos verdes, sobre la curva negra, representan los puntos que generan dicha curva de carga viral, mientras que el punto fucsia representa el tiempo en que dicho individuo presentó síntomas. Además, se muestran los umbrales de detección tanto de test rt-PCR como de antígenos.

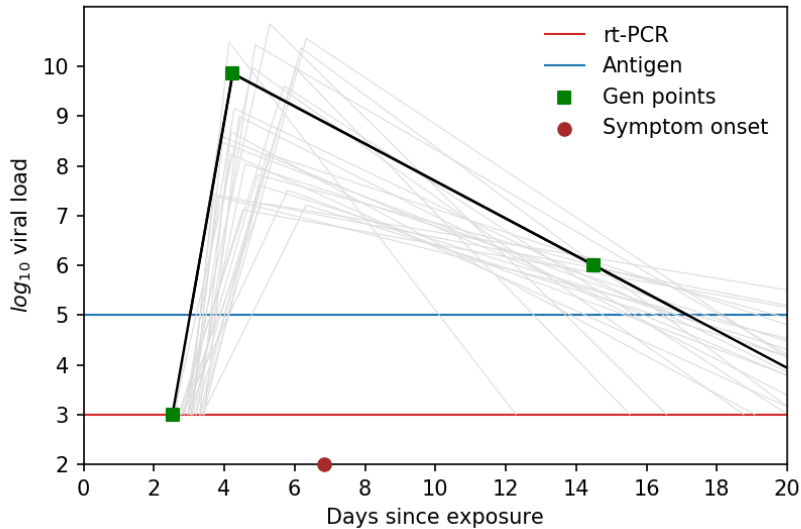


Figura 2.1: Evolución de carga viral de un individuo en el tiempo.

Cada estudiante que se infectó dentro de una simulación, tuvo una carga viral distinta, representando las distintas reacciones que tiene cada organismo a la infección. Además, se consideró que el 50% de las personas que se infectan no presentaron síntomas, por lo que su aislamiento dependía de dos posibles eventos: test positivo o aislamiento preventivo.

2.1.2. Infecciosidad

Asumamos que dos personas, digamos i, j , interactúan en un tiempo t , donde i está contagiada en dicho instante, y j susceptible. Luego, se define infecciosidad como la probabilidad de que la persona i contagie a j en el tiempo t , donde t estará dentro del período infeccioso de i . Llamemos a p_{it} a la probabilidad de que i contagie a otra en el tiempo t , ésta estará directamente relacionada con la carga viral de i en el instante t , *i.e.*, mientras mayor sea su carga viral en el organismo, más alta será la probabilidad de contagiar a otra persona con la que estuvo en contacto. Cabe señalar que si bien infecciosidad y carga viral están relacionados, la probabilidad de transmisión del virus no queda únicamente determinado por el nivel de carga viral, pero si es un factor que permite explicarla [19].

$$p_{it} = \alpha \cdot V_{it} \tag{2.1}$$

La carga viral en el organismo de un individuo (CV) se medirá en partículas de ARN viral por mililitro (pt/ml) [13], y se relacionará con la infecciosidad según la Ecuación 2.1. Donde:

$$V_{it} \equiv \log(CV_{it})$$

y p_{it} es la infecciosidad de i en el tiempo t de su período infeccioso, como fue señalado anteriormente.

Así, se podrá entender que una persona, inicialmente susceptible, se contagiará al estar en contacto con alguien infectado (dentro de su período contagioso⁶), digamos i , con una probabilidad p_{it} .

Para efectos del estudio, la infecciosidad se modeló como siguiendo el siguiente esquema matemático.

$$P_t(i \xrightarrow{p} j) = \frac{V_{it}}{\alpha_z}, \quad i, j \in N, \forall t \in T_i, \forall z \in Z \quad (2.2)$$

donde T_i es el intervalo de tiempo desde que la persona i se infecta hasta que se recupera, y el conjunto Z son los distintos R_0 ⁷ que se desean simular. Por otra parte, V_{it} será el \log_{10} de la carga viral de la persona i en su día t de infección. El cálculo de la infecciosidad de cada individuo en el tiempo se computa a partir de la curva de carga viral descrita anteriormente, normalizando a ésta última - para obtener un valor dentro del intervalo $(0, 1)$ - por un factor α_z , que dependerá de qué tan agresiva se ajusta la transmisión del virus, como parámetro inicial de la simulación. Este ajuste se explicará en la Sección 4.1.2.

2.1.3. Período infeccioso

El tiempo que una persona esté infectada corresponderá a su período infeccioso, el cual será diferente para cada individuo, y puede dividirse en distintos tramos definidos por eventos que ocurren a lo largo de la infección. Los tiempos entre eventos no están definidos de manera determinista, y dependerán de cómo reaccione el organismo de cada contagiado, por lo que los sucesos seguirán un orden determinado, pero el largo de los intervalos entre ellos no será fijo.

El período infeccioso de una persona puede ser dividido en tres intervalos, que ocurren secuencialmente (traslapándose en el caso de los dos primeros)⁸ [13, 19, 16]:

- 1) **Período de incubación:** Este período inicia cuando una persona susceptible tiene contacto con el virus y se contagia. Durante unos días, dicha persona infectada comienza a aumentar su carga viral hasta presentar síntomas (en caso de ser caso sintomático), finalizando con este evento.

⁶ Una persona infectada con coronavirus tendrá períodos en los cuales no podrá contagiar, debido a bajas concentraciones de carga viral en su organismo, y se entenderá como período no contagioso.

⁷ Entiéndase R_0 como el promedio de personas infectadas por el primer contagiado.

⁸ Para estas definiciones se consideran aquellos paciente que no tienen mayores complicaciones con la infección por coronavirus.

- 2) **Período contagioso:** Este período es el más peligroso del virus en términos de propagación, pues es la ventana de tiempo en el que una persona puede contagiar a otra. El inicio y término de este período - para el caso del SARS-CoV-2 - se determina por estar sobre el umbral de 10^6 de partículas de ARN viral en el organismo.
- 3) **Recuperación:** Una vez que la carga viral en el organismo de una persona baja del umbral contagioso, comienza el período de recuperación. Este intervalo se caracteriza por la generación de anticuerpos y mejoras en los cuadros de sintomatología.

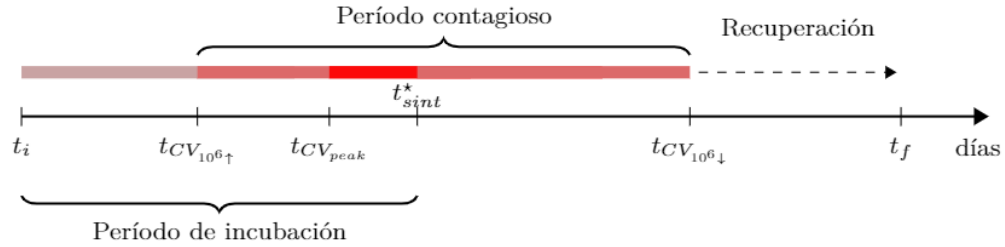


Figura 2.2: Período infeccioso de una persona contagiada con coronavirus.

Inicialmente, una persona se infecta (t_i) y comienza a incubar el virus dentro de su organismo. Luego de unos días, el organismo comienza a presentar concentraciones más altas de partículas virulentas, superando el umbral contagioso ($t_{CV_{10^6 \uparrow}}$) hasta llegar a su peak de carga viral (t_{peak}). Posteriormente, las concentraciones de carga viral disminuirán hasta estar por debajo del umbral contagioso ($t_{CV_{10^6 \downarrow}}$), para finalmente recuperarse (t_f). Si el individuo es sintomático, presentará síntomas posterior a su peak (t_{sint}^*) [15]. El esquema de la Figura 2.2 ilustra el orden temporal de los eventos descritos anteriormente, y a su vez destaca con color rojo la ventana de tiempo en que mayor es el riesgo de contagio por una persona.

Para efectos del modelo, el período infeccioso también fue aleatorio, y su duración se consideró desde el tiempo de exposición al virus, hasta la recuperación del individuo infectado, *i.e.*, finalizó cuando el umbral de carga viral en el organismo fue menor a 10^6 posterior a su peak. Si bien este período varió según cada individuo, tanto en duración como en comportamiento, siguió un patrón similar en cada caso, el cual se caracterizó, entre otras cosas, por un período contagioso y un período no contagioso.

2.1.3.1. Período contagioso

Este período considera desde el día en que una persona supera el umbral de 10^6 [$\frac{cp}{ml}$] de carga viral de manera ascendente, hasta que sus concentraciones bajan por debajo de dicho umbral. Dentro de este período estará el peak de partículas virulentas en el organismo de una persona, por consiguiente es el período más peligroso en términos de exparcimiento del virus. Como ha sido evidenciado en estudios [15, 16], una persona sintomática presentará algún malestar posterior al tiempo de máxima concentración de virus en su cuerpo, por lo que no es posible de mitigar el período en que la infecciosidad es más alta sin un test - para

identificar un caso confirmado - o aislamiento preventivo, para cortar la transmisión. Más aún, en caso de nunca presentar síntomas, el individuo será un potencial vector de contagio para las personas con las cuales se relacione, y además dificultará la trazabilidad de los contagios que se generen a partir de éste, al no poder identificarse oportunamente como caso índice.

2.1.3.2. Período no contagioso

Este período corresponde a los días en que una persona infectada con coronavirus no supera el umbral de $10^6 \left[\frac{cp}{ml}\right]$, ya sea en días previos o posteriores a alcanzar su peak. Lo ideal es que una persona sea identificada como caso confirmado en su período no contagioso previo a su peak de carga viral, pues de esa manera al aislarse no alcanza a estar en contacto con otras personas en los días que efectivamente puede transmitir el virus. Por otra parte, si identificamos a un caso confirmado en su período no contagioso posterior a su peak, este individuo podría haber estado en contacto con otras personas sin saber de su enfermedad en sus días contagiosos y, por consiguiente, haber transmitido la enfermedad a otras personas.

2.2. Estrategias de Trazabilidad, Testeo y Aislamiento

Desde el inicio de la pandemia por SARS-CoV-2, hasta la actualidad las estrategias TTA han sido una importante herramienta de contención de brotes utilizadas al rededor del globo. Éstas consisten en tres políticas de mitigación que se interrelacionan:

- i)* **Testeo:** A individuos pre-sintomáticos, sintomáticos y asintomáticos, mediante el uso de test de amplificación de ácidos nucleicos (NAATs), o por test antígenos [20].
- ii)* **Trazabilidad:** Detectar y contactar a contactos estrechos de un caso confirmado de Covid-19.
- iii)* **Aislamiento:** Tanto a casos confirmados (aislamiento directo), sospechosos y contacto estrechos (aislamiento preventivo)⁹. El tiempo de aislamiento - tanto para caso confirmado, sospechoso o estrecho - será de 11 días, y se deberá efectuar desde el día de inicio de síntomas o de un test con resultado positivo del caso índice.

⁹ El caso sospechoso de Covid-19 será aquel individuo que presente algún síntoma de coronavirus, o que esté hospitalizado presentando una infección respiratoria aguda grave [21]

Estas estrategias están directamente relacionadas, y su correcta adopción es en integral, *i.e.*, son herramientas que se potencian entre sí y el mal uso de una, interfiere el buen funcionamiento de la otra. Por ejemplo, frente a un caso confirmado por algún test, se aísla inmediatamente al individuo, luego se realiza una trazabilidad tanto a contactos que estén en riesgo de contraer la enfermedad, como al posible índice del caso confirmado, para aislarlos y así minimizar el riesgo de un brote mayor.

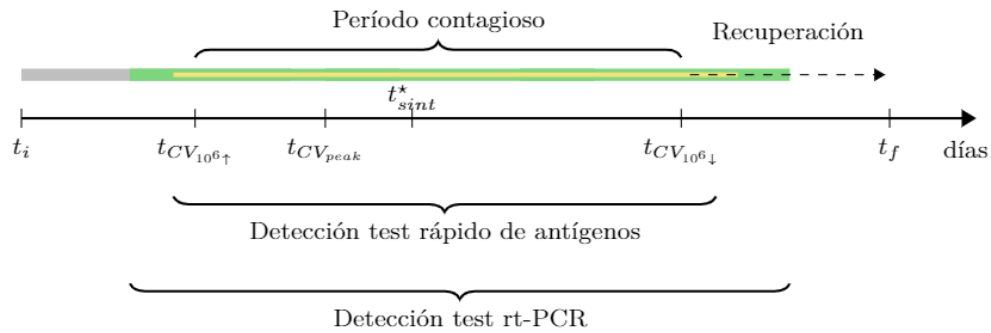


Figura 2.3: Sensibilidad de test de antígenos y PCR, según evolución temporal de carga viral.

En la Figura 2.3 se observan aquellos períodos donde cada test es capaz de detectar la presencia del virus, si bien el test rt-PCR tiene un período mayor de detección, el tiempo en que se demora obtener un resultado genera una desventaja al momento de aislar, por su parte el test de antígenos tiene resultados inmediatos, teniendo la ventaja de poder aislar inmediatamente a un enfermo contagioso, sin esperar uno o dos días, como en el caso del test rt-PCR.

Capítulo 3

Red de contagios: Caso colegios

3.1. Red de personas

Se definirá a una red de personas como un conjunto de individuos que pueden (o no) interactuar entre sí durante un horizonte temporal definido. Si una persona interactúa con otra en un determinado instante, existirá relación entre ellos. Dicha relación quedará representada por un enlace entre ambos. Por el contrario, si dos personas no interactúan entre sí en ningún instante del horizonte, luego no existirá un enlace que los relacione.

Ahora, se puede representar una red de personas como un grafo dirigido, donde las personas son los nodos y sus relaciones aristas. Así, se podrán modelar, usando grafos, distintos contextos cotidianos mediante el uso de redes, *e.g.*:

- i)* Una casa donde vive una familia de cuatro integrantes. En este caso, la estructura de la red serían cuatro nodos, donde cada nodo estará interconectado con todos los demás.
- ii)* Un curso de 20, 30 o 35 alumnos, que interactúan entre sí día a día en la sala de clases.

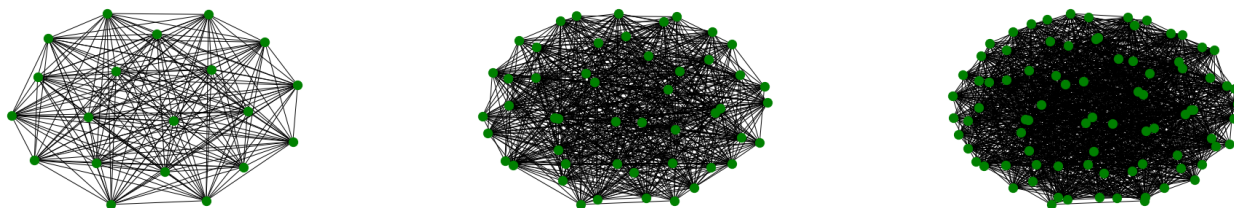


Figura 3.1: Red de personas, cursos de 20, 30 y 35 alumnos.

En la Figura 3.1 se representan redes de personas cotidianas mediante grafos completos dirigidos - donde si el nodo i se relaciona con j , j se relacionará con i - modelando las interacciones entre tres tipos distintos de cursos en un colegio. Se puede ver cómo crece la complejidad del grafo a medida que se agregan más agentes a la red. Además, como en las tres situaciones hay relación permanente entre los individuos, todos estarán interconectados entre ellos.

3.2. Red de contagios

Como fue descrito anteriormente, el SARS-CoV-2 es un virus que se propaga por vía respiratoria, por ende, una persona tendrá que estar en contacto con el virus para poder contagiarse. Dicho esto, existirán dos principales fuentes de contagio para una persona susceptible al contagio [22]:

- i)* Infección por tocar una superficie con virus, y luego tocarse boca, nariz u ojos con las manos sin desinfectar.
- ii)* Estar en contacto - a menos de dos metros de separación - con otra persona que esté infectada, inhalando los aerosoles del contagiado.

Para el presente estudio, se aborda el caso en que la transmisión es entre un individuo susceptible que estuvo en contacto con otro infectado, y se considera una probabilidad diaria de contagio, según una incidencia diaria.

Si se considera una red que represente las interacciones de un grupo de personas en el tiempo, se tendrá una red interna - que dependerá solamente de las interacciones entre individuos de la red - y sucesos externos a esta red, que tendrán incidencia en el comportamiento de la red en el tiempo, pero serán ajenos a ella. La red interna puede ser modelada como un grafo, mientras que los sucesos externos a la red pueden englobarse en variables que modelen un comportamiento esperado en el tiempo.

Para una red de contagios, se tendrá que la contención o el esparcimiento de un virus, dependerá de la composición de la red y de cómo se comportará ésta a lo largo del tiempo. En términos generales, una persona infectada solamente podrá contagiar a personas con las que tenga relación en el tiempo, *i.e.*, el contagio existirá solamente si hay una arista entre una persona infectada y una susceptible. Por lo tanto, si no es posible disminuir las interacciones en una red determinada, será necesario tomar otras medidas que aseguren una menor probabilidad de contagios.

3.3. Descripción general del modelo

Para modelar la red de contagios dentro de un colegio es necesario incorporar a las personas que interactúan dentro de éste, y sus relaciones en el tiempo. Así, se puede pensar un colegio como un grafo, donde cada nodo represente a las personas de la institución, mientras que las aristas modelarían las interacciones de dichas personas en un horizonte temporal definido. Bajo esta lógica, los alumnos de un mismo curso estarían todos interconectados con sus compañeros y con los profesores que visiten ese curso, pudiendo representar a cada curso como un grafo completo. Por otra parte, se tiene que incluir en el modelo las interacciones de nodos fuera de su curso, como es el caso de familiares dentro del colegio, amigos entre personas de distintos cursos, cursos de educación diferenciada ¹⁰, entre otros. De esta forma, un colegio será un grafo dirigido, compuesto por un conjunto de subgrafos completos - representando a

¹⁰ Estas clases vendrían siendo aquellas donde se mezclan alumnos de distintos cursos, como es el caso de electivos de música o arte, especialización diferenciada (*e.g.*: científico o humanista). O también actividades extraprogramáticas.

cada curso - y relaciones externas entre cada curso, representando las situaciones descritas anteriormente. Esta red puede variar según la composición de cada colegio y su complejidad dependerá de qué tan grande es el establecimiento, cuántas relaciones entre cursos existirán y la configuración que éste tenga.¹¹

Teniendo una estructura en forma de red ya definida, se deben incluir los factores infecciosos relacionados a Covid-19. Para esto, se toma en consideración tres conceptos, anteriormente explicados, que estarán directamente relacionados entre sí: carga viral, infecciosidad y período infeccioso. Estas tres componentes se modelarán a partir de simulaciones estocásticas, que representarán comportamientos individuales de cada persona que contraiga la enfermedad. Inicialmente, se contagiará a una persona al azar dentro de un colegio, y ésta intentará infectar a otras en el tiempo, según la evolución de su infección y sus contactos dentro de la red.

Con esto en mente, a medida que pasa el tiempo y surjan contagios, aquellos nodos infectados van a ir contagiando a otros que estén relacionados con éstos (pudiendo ser dentro o fuera de su curso), modelando así brotes que, según qué políticas se adopten, representará a lo que pasaría en la realidad.

3.4. Metodología

Para representar distintos colegios, se realizaron simulaciones computacionales, utilizando un modelo matemático parametrizado, que fuese lo suficientemente versátil para representar distintas redes (entendiéndose como configuración de un colegio “tipo” a estudiar), distintos niveles de incidencia de contagios externos a la red (intentando modelar contagios que surgirían fuera del establecimiento según la incidencia de contagios territorial), diferencias en las infecciosidades de niños y adolescentes, distintas políticas de mitigación como modalidades de asistencia, aforos en las salas, frecuencia de testeo, entre otras.

Cada simulación consistió en 300 réplicas de un escenario en particular, obteniéndose métricas como número de contagios, R efectivo del colegio, porcentaje de asistencia presencial a clases por alumno, entre otras, las cuales se promediaron para obtener un valor estimado de cada output. Los resultados de cada escenario fueron comparados con otros, para así evaluar la costo-efectividad de escoger un escenario por sobre otro.

3.4.1. Modelo matemático

Consideremos un grafo $G(N, A)$, donde N representa el conjunto de nodos del grafo y A representa el conjunto de aristas. Definimos ahora $n \in N$ como cada persona dentro de la institución, y sea $a_{ij} \in A$ las relaciones entre personas $i, j \in N$, *e.g.*: si el nodo n_1 y el nodo n_2 interactúan en el horizonte temporal (con $n_1, n_2 \in N$) habrá una arista entre ellos (*i.e.*, $a_{n_1, n_2} \in A$), mientras que si no interactúan (digamos el caso de un alumno de media con uno de segundo básico sin relación alguna) no habrá enlace entre ellos. Luego, como fue descrito

¹¹ *E.g.* : un colegio de 300 alumnos puede configurarse como niveles de tres cursos (A, B y C) o de 2 (A, B) u otra manera, y en función de ello, el grafo cambiará en su estructura.

anteriormente, un curso será un grafo completo dirigido, por lo tanto, un colegio quedará representado por un grafo compuesto por $|C|$ subgrafos completos dirigidos, donde C es el conjunto de cursos que tiene el colegio. Así, cada curso cumplirá con la siguiente igualdad:

$$L_c = P_c(P_c - 1), \quad \forall c \in C \quad (3.1)$$

donde L_c es el número de enlaces - representando las relaciones - en el curso c , y P_c su número de alumnos. Por ende, tendremos que el número de enlaces en el colegio será:

$$L \geq \sum_{c \in C} (P_c(P_c - 1)) \quad (3.2)$$

donde L es el número total de enlaces en el colegio y P_c el número de alumnos del curso c , con $c \in C$. Ahora, si consideramos un caso en que no hay cruces entre cursos, *i.e.*, no existen hermanos de cursos distintos, no hay amistades fuera de la salas de clase y no hay cruces entre alumnos de distintos grupos, luego el número de relaciones que existirán dentro del colegio será:

$$L = \sum_{c \in C} (P_c(P_c - 1)) \quad (3.3)$$

Para tener un orden de magnitud, si consideramos un colegio con estructura de enseñanza básica y media, con tres cursos por nivel y cada curso de 20 alumnos, tendremos que:

$$L = 36(20(20 - 1)) = 13.860 \quad (3.4)$$

Luego, en un colegio de 720 estudiantes, donde solamente hay interacción entre individuos del mismo curso, existirán diariamente 13.860 enlaces en el colegio. Como este caso no es representativo a la realidad, es necesario considerar los contactos externos a cada curso. Para esto, sea Y_c el número de relaciones ajenas al curso c , luego se cumplirá que:

$$L = \sum_{c \in C} (M_c(P_c(P_c - 1)) + \frac{Y_c}{2}) \quad (3.5)$$

Así, dependiendo de cuántas relaciones ajenas a un curso existan, la complejidad de la red aumentará y consigo el riesgo de ésta frente a brotes por coronavirus. Como los establecimientos educacionales resultan ser redes de personas complejas, es necesario tener buen control de las relaciones que existan, pues basta que no se identifiquen unos cuantos contactos de una persona contagiada para que los contagios se transmitan en otros cursos y, en consecuencia, desencadenar un brote dentro de sus dependencias.

Ahora, para cada persona n existirá un conjunto E de estados posibles - descritos en la Tabla 3.1 - los cuales representarán la situación actual del individuo. Además, diremos que cuando un nodo n se contagia permanecerá contagiado un tiempo aleatorio de T_n días, $\forall n \in N$, generado como se explica en la Sección 2.1.3.

Sea $n_1, n_2 \in N$ tales que existe interacción $a_{n_1, n_2} \in A$ entre ellos, luego - sin pérdida de generalidad - si n_1 se contagia en el tiempo \bar{t} , éste intentará infectar a n_2 durante un intervalo de tiempo T_{n_1} , con una probabilidad $p_{n_1 t}$, con $t \in T_{n_1}$ - en función de la carga viral presente en dicho instante - a menos que no se encuentren en contacto directo (ya sea por ser fin de semana, o porque n_1 fue aislado oportunamente). Como hay días del período infeccioso de un

contagiado en el que no puede transmitir la enfermedad, consideraremos que dichos días el individuo intentará contagiar a otros con probabilidad 0, *i.e.*, en dichos intervalos una persona infectada no podrá contagiar a otra.

3.4.2. Estados de cada nodo y transmisión de la enfermedad

Para poder modelar la transmisibilidad del virus dentro de distintas redes, se consideró que cada nodo - representando a personas de la red - tendría distintos estados y un respectivo flujo entre éstos para representar la cadena de transmisión entre personas.

3.4.2.1. Estados de un nodo

Entenderemos a los estados de un nodo como la situación infecciosa actual del un individuo en particular. Dichos estados desencadenarán una serie de eventos que podrán suceder a lo largo del tiempo, y conocer el estado de las personas permitirá tomar una serie de medidas que permitan contener la transmisión del virus. Por ejemplo, si se considera el caso de un colegio, en el que está la política de que frente a un alumno confirmado de covid-19 se aísla al individuo y a su curso, luego su estado pasará de infectado (I) a estar aislado (Q), lo cual desencadenará una serie de cambios de estados en otros agentes de la red del infectado, generando que aquellos alumnos que no se contagiaron pasarán de estar susceptibles (S) a aislamiento preventivo (SQ), mientras que aquellos alumnos que se contagiaron por el caso índice, seguirán el mismo curso que éste ($I \rightarrow Q$). En la Tabla 3.1 se encontrarán los posibles estados considerados en el modelo, en conjunto con su explicación.

Tabla 3.1: Estados posibles de un nodo de la red.

Estado (E)	Simbología	Descripción
Susceptible	S	La persona no está infectada y puede ser contagiada.
Infectado	I	La persona está infectada.
Aislado	Q	La persona está infectada, pero aislada en su casa.
Aislado preventivo	$SQ - RQ$	La persona está aislada de manera preventiva, sin estar infectada o estando recuperada.
Recuperado	R	La persona está recuperada.

3.4.2.1.1. Flujo entre estados

El modelo matemático utilizado contiene distintas transiciones entre los estados que se detallaron en la sección anterior, pero estas transiciones solamente se desencadenan a partir de eventos específicos, *e.g.*, aislamiento preventivo por algún caso confirmado, recuperación al cumplir el período infeccioso, entre otros. En la Figura 3.2 se puede observar un diagrama que conecta los estados, junto con sus respectivas transiciones posibles. La descripción de cada transición se encuentra en la Tabla 3.2.

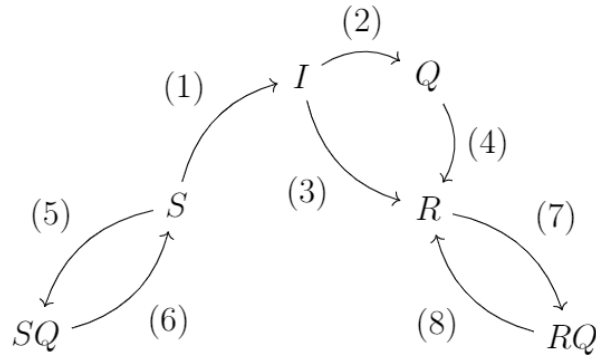


Figura 3.2: Descripción de posibles transiciones entre estados de infección de un individuo.

Tabla 3.2: Flujo de información entre estados.

Transición	-	Descripción
$(S \rightarrow I)$	(1)	Un individuo se contagia, ya sea por contagio externo a la red, o por un contagio dentro del colegio.
$(I \rightarrow Q)$	(2)	Un individuo contagiado es aislado, ya sea por presentar síntomas, por test positivo o estar contagiado y ser aislado por cuarentena preventiva.
$(I \rightarrow R)$	(3)	Un individuo infectado asintomático nunca fue aislado hasta finalizar su respectivo período infeccioso.
$(Q \rightarrow R)$	(4)	Un individuo que está contagiado y aislado completa su período infeccioso.
$(S \rightarrow SQ)$	(5)	Un individuo susceptible es aislado de manera preventiva.
$(SQ \rightarrow S)$	(6)	Un individuo aislado de manera preventiva termina los 11 días de cuarentena.
$(R \rightarrow RQ)$	(7)	Un individuo que se contagió y recuperó, es aislado preventivamente.
$(RQ \rightarrow R)$	(8)	Un individuo recuperado y aislado preventivamente termina los 11 días de cuarentena.

3.4.3. Políticas TTA

Las políticas TTA consideradas en el modelo incluyeron testeo semanal a toda la comunidad, trazabilidad de un nodo infectado y aislamiento preventivo frente a un caso confirmado, ya sea por el resultado positivo de un test o presencia de síntomas asociados a coronavirus.

3.4.3.1. Testeo

Para modelar el testeo, se consideró la sensibilidad de un test rápido de antígenos, *i.e.*, el umbral de detección es de $10^5 \left[\frac{cp}{ml} \right]$, con un resultado inmediato ¹². Por ende, este test logra

¹² Emulando la detección de 15-30 minutos que tiene este test.

detectar aquellos infectados que están en períodos de contagio, y su ventaja por sobre el test rt-PCR - cuyo umbral de detección es de $10^3 \left[\frac{cp}{ml}\right]$ - es su inmediatez en el resultado.

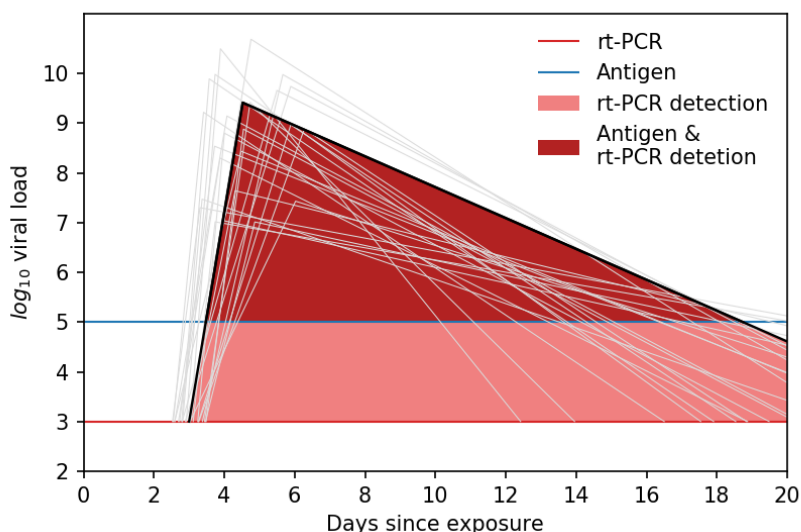


Figura 3.3: Umbrales de detección de test rt-PCR y Antígenos

Se consideró que la sensibilidad del test es de 100 %, siempre y cuando la carga viral de la persona testada está por sobre el umbral de detección. Además, al igual que en [13], se atribuyó un 10 % de probabilidad de falso negativo, inclusive si el umbral de detección era superado, modelando así alguna contaminación de muestra, examen mal tomado o falla del propio test.

En la Figura 3.3 se observa el área de cobertura para la detección de cada test. Si bien el test rt-PCR tiene mayor sensibilidad que el test de antígenos, la demora en los resultados dificulta un aislamiento efectivo de una persona contagiada, por lo que resulta más valioso un test de resultados más rápidos con menor sensibilidad, como se señala en [13].

Las dos frecuencias de testeo utilizadas fueron sin test y test semanal. Con estos dos escenarios se buscó observar el efecto que tiene un test para controlar brotes. Además, el testear o no en conjunto con otras políticas permite ver qué combinaciones de políticas permiten igualar el efecto de un test, y qué costos asociados vienen con eso. Esto se detalla más en la Sección 4 de Resultados.

3.4.3.2. Trazabilidad

El modelo utilizado consideró una trazabilidad perfecta para familiares dentro del colegio, y una detección del 10 % de contactos externos al curso de un individuo que no fuesen familiares. Por lo tanto, frente a un caso confirmado de coronavirus, tanto los compañeros de curso y profesores de sala, como los hermanos del caso índice y el 10 % de otros contactos fuera del curso serían identificados como potenciales nodos de riesgo.

3.4.3.3. Aislamiento

El tiempo de aislamiento se estableció como un período de 11 días, según las indicaciones de aislamiento del Ministerio de Salud de Chile [21]. Como se vio en la Figura 3.2, un alumno o profesor puede aislarse por infección o de manera preventiva. En el primer caso, la persona confirmada, ya sea por presentar síntomas o por un test positivo, inicia un período de 11 días de cuarentena, donde pasa a estar aislada (Q), mientras que en el segundo caso, frente a un alumno como caso confirmado se aísla su curso completo y los profesores que visitaron su sala, mientras que frente a un profesor contagiado se aísla a todos los cursos que visitó, por lo que aquellos individuos que no alcanzaron a contagiarse comienzan una cuarentena preventiva por 11 días, cambiando su estado a aislamiento preventivo (SQ), y aquellos que sí cambian su estado a aislado (Q).

3.4.4. Limitaciones del modelo

Si bien se utiliza una estructura de grafos para modelar un colegio, éste es estático en el tiempo, *i.e.*, las relaciones externas de un individuo no varían una vez simulado el grafo inicial. A su vez, todos los cursos son del mismo tamaño, el cual es establecido inicialmente como parte del escenario a simular.

Además, las interacciones entre nodos de una red (ya sea compañeros de curso, profesor o contactos fuera del curso) son diarias, no se asigna riesgo de transmisión por tiempo de contacto, sino que un nodo infectado intentará contagiar diariamente a los otros nodos de su red interna y externa.

Por último, se considera que los profesores son asignados a una cantidad fija de hasta 4 cursos, lo cual puede ser menor a la cantidad de cursos que un profesor asiste realmente.

Capítulo 4

Resultados de distintos escenarios simulados

4.1. Calibración de parámetros iniciales

El modelo utilizado estaba parametrizado de tal manera que permitió considerar distintos escenarios, los cuales se configuraron al inicio de cada simulación. Siguiendo la metodología de [13], se normalizaron las curvas de cargas virales, con el fin de obtener valores entre (0,1) que modelaran la probabilidad de contagiar a otro, sujeto a la carga viral del infectado en dicho instante. Para poder obtener una curva de infecciosidad se calibró el parámetro R_0 , y a partir de este parámetro, la probabilidad de contagiar a otro en el tiempo, dado una curva de carga viral.

4.1.1. Distribución de contactos externos fuera de la red

Para tener una red que representara las interacciones dentro de un colegio, se consideraron dos tipos de contactos externos al curso: familiares y otros cruces¹³. Para tener una red de familiares, se consideró la distribución familiar real de un colegio con el que se trabajó en conjunto en el proyecto¹⁴, y se replicó dicha distribución para cada colegio simulado. Por otra parte, los contactos externos que no fuesen familiares, se calcularon como 0.1 contactos fuera del curso por estudiante.

Así, se tendrían ambas redes externas, en donde la red de no familiares tendría igual peso en interacción que las relaciones dentro del curso, mientras que la red de hermanos tendría un peso ajustado según se señala en la Sección 4.1.3

4.1.2. Calibración del parámetro R_0 e infecciosidad

El parámetro R_0 es el número de contagios esperados que se generan a partir del *caso 0*¹⁵. Para calibrar este número se simuló una red de contagios, correspondiente a un colegio con

¹³ Correspondiente a amigos de otros cursos, relaciones de pareja, entre otros.

¹⁴ El colegio facilitó la lista de alumnos, profesores y staff, en conjunto con la lista de familias con sus respectivos cursos.

¹⁵ El *caso 0* se entenderá como el primer contagiado de la simulación, el cual fue infectado de manera aleatoria al inicio del horizonte de estudio.

alumnos de enseñanza media (lo que correspondería a alumnos con infecciosidad y susceptibilidad igual que un adulto), con un total de 300 estudiantes, divididos en 10 cursos de 30 alumnos, a cada sala asiste un solo profesor, y cada 10 nodos (sea estudiante o profesor), en esperanza, hay un cruce externo¹⁶. Además, se consideró una política sin test y de aislamiento solamente al infectado (auto aislamiento), donde el 50 % de infectados desarrollaría síntomas y con una incidencia diaria de contagios externos de 10 cada 100.000 habitantes. Luego, se normalizó el \log_{10} de la carga viral del individuo infectado, por un factor α_z , de manera tal de obtener un R_0^z , correspondiente al valor $z \in Z$ del factor que se buscaba obtener, donde $Z = \{1, 1.5, 2.0\}$. Los R_0 objetivos se obtuvieron mediante una búsqueda binaria del factor α_z , la cual se detenía al alcanzar un valor \bar{z} lo suficientemente cercano a los valores del conjunto Z ¹⁷.

Así, se obtienen tres valores distintos de R_0 , los cuales reflejan distintos panoramas de transmisión de coronavirus, evaluando así distintas transmisiones posibles dentro de un colegio. Una vez escogida una red a simular, los valores obtenidos por cada R_0 simulado son promediados para un escenario en particular, obteniéndose las métricas de interés de dicho escenario.

4.1.3. Calibración de infecciosidad de familiares

Asumiendo que dentro de los establecimientos existe un correcto uso de medidas de autocuidado, un nodo tenga contacto diario con un compañero de clases es distinto al contacto diario con sus familiares, donde probablemente al verse en la casa no usen mascarilla y el contacto sea más directo, y por ende, más fácil contagiarse entre ellos [23]. En consecuencia, se calibró un parámetro inicial que destinaba un peso mayor a un arco entre familiares de la red, y así hacer más probable la transmisión entre dos nodos familiares, que entre dos nodos de un mismo curso. Para calibrar este peso se siguió un análisis respecto a la probabilidad de que un nodo infectado contagie a otro, sujeto a una exposición de T días. Para esto, sea p_t la probabilidad de contagiar en el tiempo t , y sea A_t el evento de que una persona infectada contagia a otra en el tiempo t (determinada por la curva de infecciosidad de la Sección 2.1.2), luego se tendremos que la probabilidad de contagiarse en t , dado un tiempo de exposición T será:

$$\mathbb{P}(A_t t = T) = 1 - \prod_{t=1}^T (1 - p_t) \quad (4.1)$$

Para el modelo, consideramos un 30 % de probabilidad de contagiar a un familiar en un tiempo de exposición de 7 días, por lo que se tuvo que cumplir que:

$$0.3 = 1 - \prod_{t=1}^7 (1 - p_t) \quad (4.2)$$

Donde la probabilidad p_t era distinta en cada día t de infección, por lo tanto, se simularon 10.000 curvas de cargas virales¹⁸, y se ponderó la probabilidad p_t obtenida por un factor γ

¹⁶ Esto quiere decir que cada nodo se cruza con 0.1 nodos fuera de su curso, por ende, el número esperado de cruces fuera de un curso de 30 alumnos sería 3.

¹⁷ Los valores reales de R_0 obtenidos fueron de 0.95, 1.51 y 1.95

¹⁸ Considerando que en el 50 % de los casos la curva seguía una infección asintomática.

que permitiese cumplir la igualdad de la Ecuación 4.2.

4.2. Escenarios simulados

El modelo se parametrizó considerando factores internos a la red y externos a ella. Todos los escenarios parametrizados se desglosan tanto en la Tabla 4.1, como en la Tabla 4.2, y se simularon todas las combinaciones posibles de ambos conjuntos de parámetros, con el objetivo de evaluar múltiples escenarios.

4.2.1. Parámetros externos a la red de contagios

Con el propósito de intentar evaluar distintos grados de control de la pandemia a nivel territorial, se consideraron 4 incidencias de contagios externos. Por otra parte, como hay evidencia que asegura que niños menores de 14 años contagian menos que adultos [8], y a su vez se contagian menos [24], se consideró un escenario donde niños, de primero a octavo básico, tenían la mitad de contagiosidad (β_h) y susceptibilidad (S_h) que un alumno de media.

Tabla 4.1: Tabla con parámetros externos a la red.

	Tipo de parámetro	Criterio	Escenarios
Parámetros externos a la red	Parámetros de infección	Incidencia de contagios externos	5 casos cada 100,000 hab. 10 casos cada 100,000 hab. 20 casos cada 100,000 hab. 30 casos cada 100,000 hab.
		Contagiosidad y susceptibilidad	$\beta_h = 0.5$ $\beta_h = 1$ $S_h = 0.5$ $S_h = 1$
	Parámetros de mitigación	Política de testeo	Sin test durante todo el período de estudio. Test semanal a toda la comunidad.
		Política de aislamiento	Aislamiento preventivo de todo el curso, hermanos y el 10% de contactos fuera del curso frente a un caso confirmado

4.2.2. Parámetros de la red

Como parámetros internos de la red se consideró la estructura del colegio, *i.e.*, el nivel de enseñanza, el tamaño de salas, la cantidad de cursos por nivel y los profesores por sala. Los colegios con nivel de enseñanza básica consistieron en 8 niveles, mientras que en media 4, y como se señaló anteriormente, la susceptibilidad y contagiosidad de alumnos de básica es la mitad que la de alumnos de media y profesores. Por otra parte, el tamaño de salas correspondieron a salas normales (cursos más grandes) y aforos reducidos (cursos más pequeños).

Tabla 4.2: Tabla con parámetros de la red.

	Criterio	Escenarios
Parámetros de la red	Nivel de enseñanza	Enseñanza básica Enseñanza media
	Tamaño de salas	15 alumnos por sala 20 alumnos por sala 30 alumnos por sala 40 alumnos por sala
	Cursos por nivel	1 curso por nivel 2 cursos por nivel 1 curso por nivel 2 cursos por nivel 3 curso por nivel 6 cursos por nivel 5 curso por nivel 10 cursos por nivel
	Profesores por sala	Cada profesor visita 3 salas, cada sala es visitada por 3 profesores. Cada profesor visita 4 salas, cada sala es visitada por 4 profesores.

Además, al igual que los tamaños de sala, se consideraron tres escenarios relativos tanto para salas sin reducción de aforos, como con reducción de aforo. Los escenarios con salas normales son los valores de la izquierda del criterio Cursos por nivel de la Tabla 4.2, mientras que los aforos reducidos son los ubicados a la derecha del mismo criterio. Por último, se consideraron dos escenarios para la cantidad de profesores que visitan una sala, y salas que visitaban los profesores.

4.3. Análisis de rendimiento de estrategias TTA

Los resultados obtenidos en el estudio son robustos para los distintos escenarios. Métricas de distintos escenarios simulados se despliegan en las Tablas A.1 y A.2 de la sección A.1 de Anexos, y a continuación se realiza un análisis para un escenario en particular.

Considerando un horizonte temporal de 90 días, una fracción de infecciones sintomáticas del 50 % y un escenario de colegio de enseñanza media, donde la incidencia diaria de contagios es de 10 cada 100.000 habitantes, cada sala será visitada por 4 profesores y cada profesor a su vez visitará 4 salas, se analizan métricas en tres políticas a estudiar: reducción de aforos en las salas, alternancia en asistencia presencial a clases y política de testeo semanal con antígenos. Los resultados son analizados para dos colegios “tipo” distintos, obteniéndose resultados

robustos para cada política analizada.

Al reducir los aforos en las salas, como se ilustra en la Figura 4.1, se observa una reducción en los contagios mayor a un 40 %, en ambos colegios. En la práctica, una reducción de aforos en la sala con asistencia semanal, implicaría ampliar la cantidad de salas y profesores del colegio - en caso de tener los recursos para que todos los alumnos asistan durante el mismo turno - o utilizar los mismos recursos, tanto en salas como profesores, pero haciendo distintos turnos de asistencia, *e.g.* la mitad del colegio asiste en la mañana, mientras que el resto asiste en la tarde, sin solaparse. Si a la reducción de aforos se le agrega alternancia semanal a la asistencia, los contagios, en ambos colegios, se reducen en más de un 80 %, sin embargo, el porcentaje de clases online asciende sobre un 52 %. En este escenario, la mitad del curso asistiría presencial una semana, mientras que el resto estaría virtual, y a la semana siguiente se cambian las modalidades. Si bien, esta última política es bien agresiva en mitigar contagios, existe un costo en la cantidad de clases online por alumno, afectándolos en su aprendizaje por no tener presencialidad total.

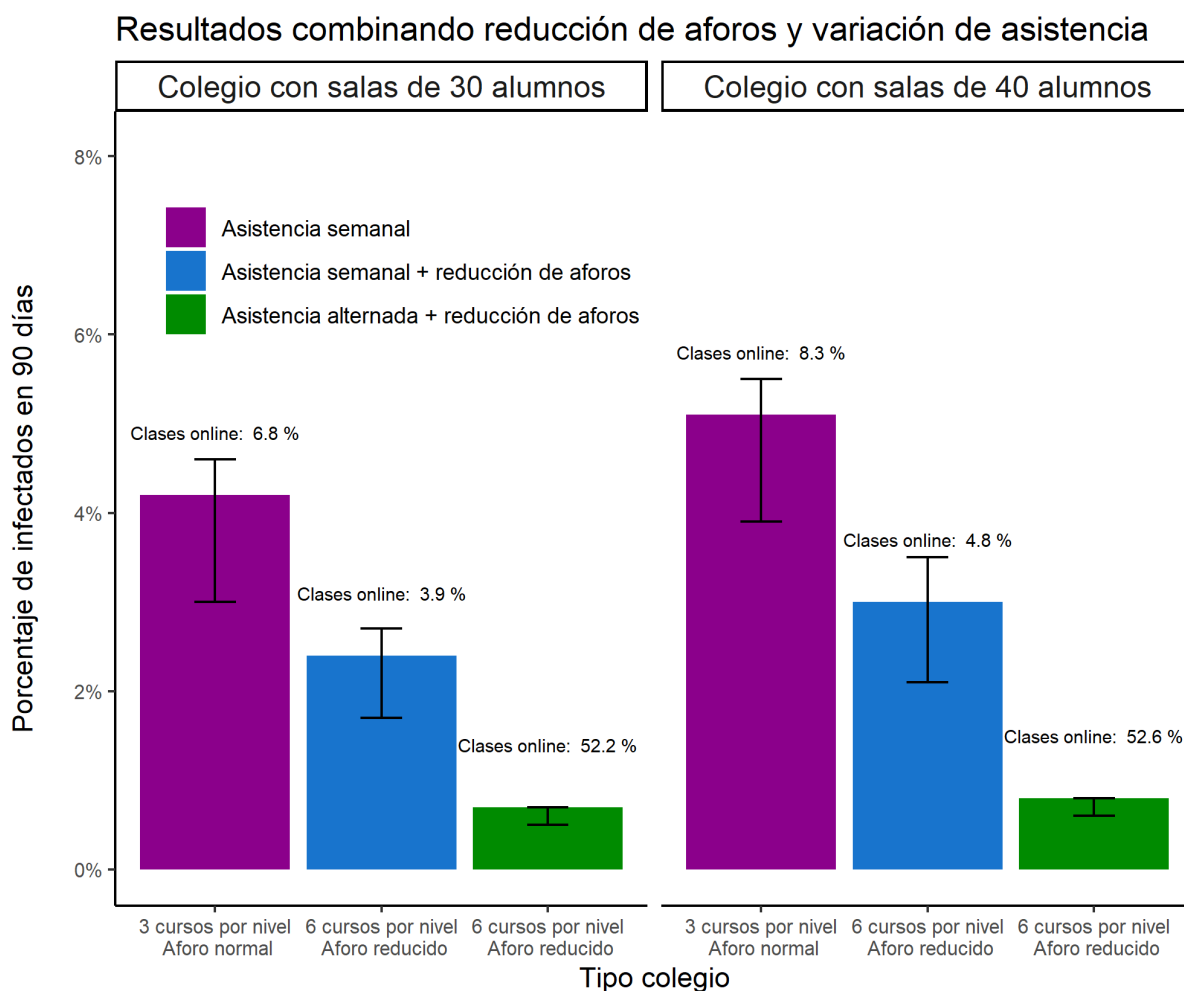


Figura 4.1: Gráfico reducción de aforos de sala y variando asistencia.

Centrando el análisis de ambos colegios en testeo, se puede observar que al realizar un test semanal a toda la comunidad educativa (alumnos, profesores y auxiliares) los contagios disminuyen en más de un 55%, como se puede ver en la Figura 4.2, dominando, en control de contagios, la estrategia de reducción de aforos. Por otra parte, el porcentaje de clases online aumenta, pero en menor medida que al alternar la asistencia, siendo así una medida intermedia entre la reducción de aforos y la alternancia semanal con cursos más pequeños. Si bien realizar un test semanal implica un costo monetario, se ha demostrado que es una medida efectiva para contener contagios en establecimientos [25], y en este contexto, permite contener brotes manteniendo una asistencia regular por alumno a clases, lo cual resulta beneficioso para los estudiantes. Un buen plan de monitoreo por test de antígenos en colegios podría ayudar a mantener un control de brotes, y dada la rapidez de los resultados, permite tomar acción rápidamente frente un caso confirmado.

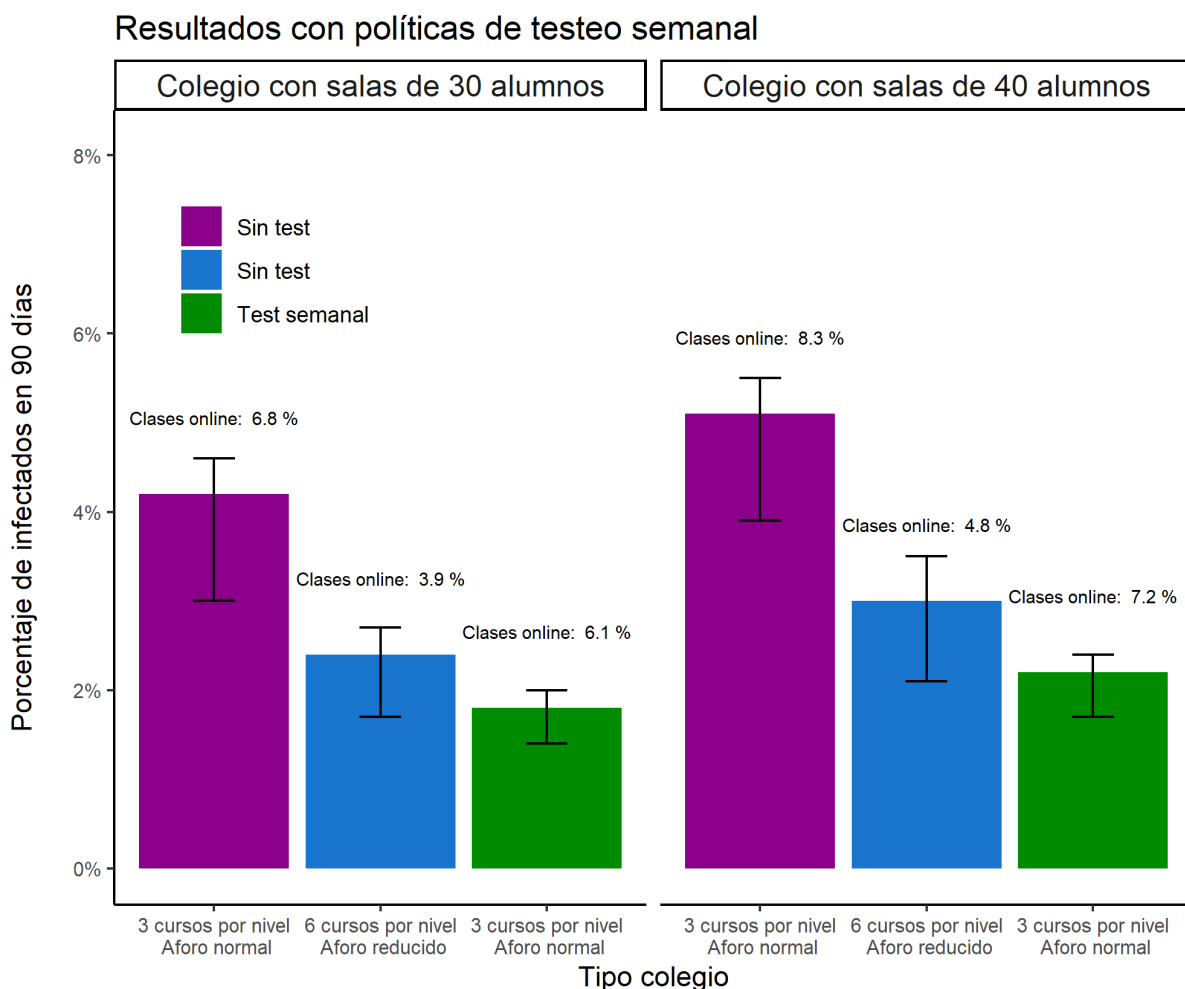


Figura 4.2: Gráficos testeo semanal.

Al combinar la estrategia de reducción de aforos, con una política de testeo semanal, como se observa en la Figura 4.3, se obtiene que los contagios se reducen, en ambos colegios, cerca de un 75%, manteniendo el porcentaje de clases online rondando el 4%. Esta estrategia, en

términos de contención de brotes, es la más cercana a la reducción de aforos y asistencia alternada, pero tiene la ventaja de mantener una considerablemente mejor asistencia presencial por alumno. Este escenario involucra una redistribución de recursos en cada colegio, sumado a un gasto monetario en compra y toma de test, sin embargo, permite que los colegios operen con buena asistencia presencial, protegiendo a su vez la salud de toda su comunidad educativa.

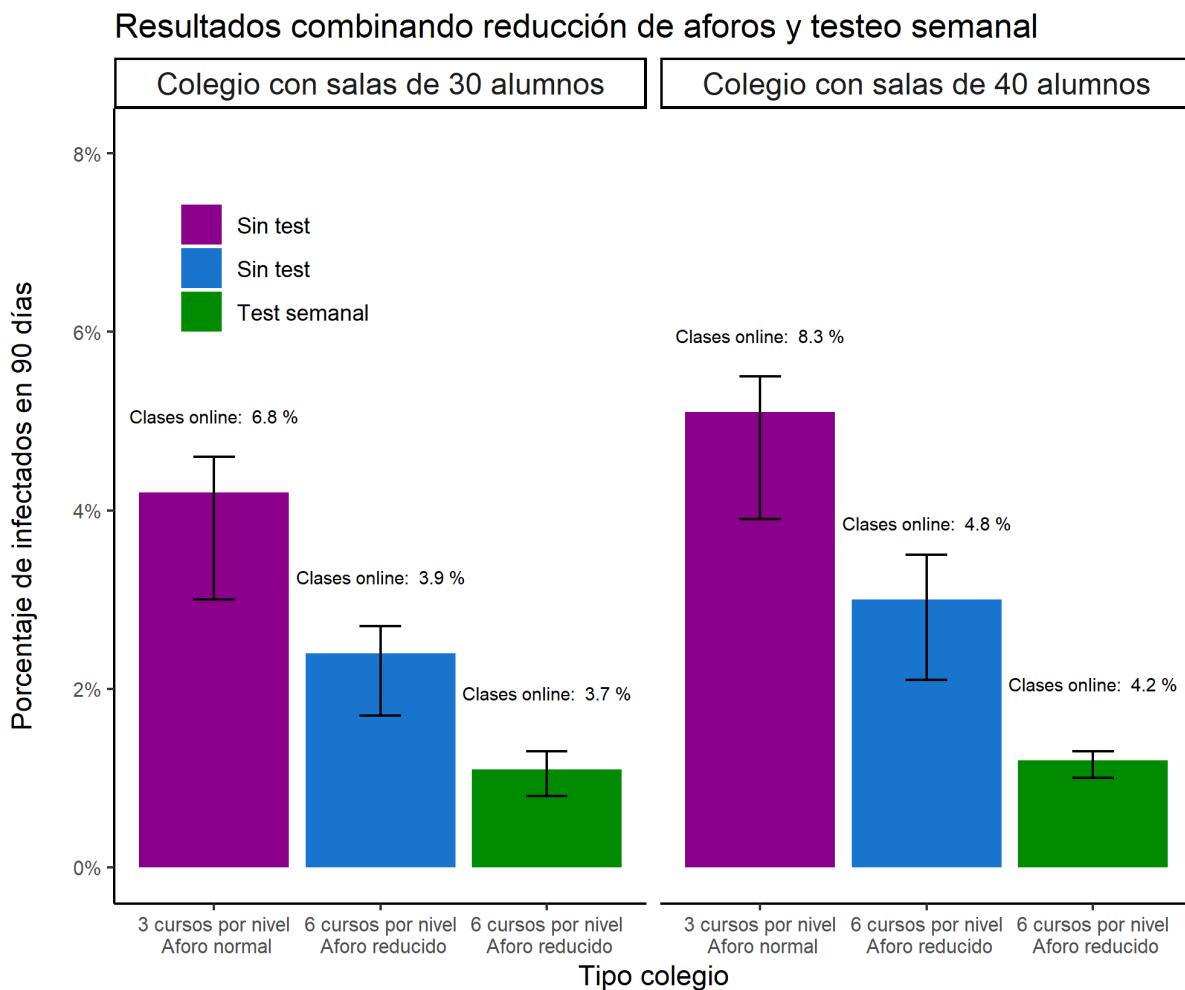


Figura 4.3: Gráficos combinación cápsulas y testeo semanal.

Si bien estos análisis son robustos para los otros escenarios simulados, para el caso de enseñanza básica los porcentajes de contagios fueron más bajos debido a la baja susceptibilidad y contagiosidad de los niños. De hecho, los valores para los escenarios analizados anteriormente para básica no superaron el umbral del 2% en contagios, en ninguno de los dos colegios tipo. Sin embargo, las reducciones relativas a los escenarios simulados resultaron similares. Si bien todas las medidas de mitigaciones estudiadas produjeron distintas reducciones a los escenarios menos conservadores, los contagios se mantuvieron bajos, debido el comportamiento infeccioso de este grupo etario, por lo que si hubiese que priorizar para utilizar medidas de mitigación en media o básica, se priorizaría enseñanza media, puesto que es más beneficioso controlar en este segmento. Los resultados de básica para los escenarios analizados se encuentran en la Sección A.2 de Anexos.

El análisis sugiere que existen distintas estrategias para mitigar brotes, unas más efectivas que otras, y que cada una tiene costos asociados. Por una parte, al no tomar medidas extras al autocuidado y aislamiento preventivo, los costos se observarán en el número de contagios que surjan, mientras que realizar testeo implica costos monetarios y crear un esquema de obtención de muestras. En el caso de la reducción de aforos, los recursos necesarios pasan a ser de disponibilidad de personal y espacio, mientras que alternar la asistencia implica que los alumnos tengan menos clases presenciales, y por ende, dificultades en su aprendizaje.

El estudio brinda un esquema de qué puede realizar cada colegio si quiere mantener su establecimiento abierto, y permite evaluar qué medidas les conviene tomar según su realidad. Un colegio con pocos recursos puede apuntar a disminuir el aforo de sus salas, logrando un efecto similar que un colegio con la opción de testear, en lugar de reducir aforos.

Capítulo 5

Piloto plan de testeo a colegios en Chile

Para poder priorizar la apertura de los colegios a lo largo del país, el Ministerio de Educación chileno solicitó un programa de testeo y monitoreo de síntomas a nivel nacional, que fuese capaz de brindar un análisis de costo-beneficio al adoptar mayores políticas de control de brotes.

Como gran parte del trabajo que se realizó, tuvo como objetivo analizar y cuantificar el efecto de medidas de mitigación, en particular, realizar test de antígenos semanales y monitoreo diario de síntomas a la comunidad escolar, se desarrolló un piloto para evaluar el impacto de estas medidas en terreno. De esta forma, se esperaba apoyar la toma de decisiones sobre qué medidas escalar a nivel nacional para controlar posibles brotes. Siguiendo la evidencia presentada en [26], se propuso diseñar una estrategia de mitigación en capas, que pudiese ser adaptada acorde a cómo evolucionaba la pandemia. Para esto se obtuvieron datos reales de establecimientos, brindados por el Mineduc, y se cruzaron con los resultados de las simulaciones realizadas.

En la propuesta se hizo una comparación entre escenarios que no consideraban testeo y otros que sí, de manera semanal. El modelo base (sin testear) consideraba un 50% de infectados sintomáticos que se auto-aíslan el mismo día en que manifiestan síntomas. Los asintomáticos solo se aislaban cuando se les ordena porque algún compañero de curso es un caso confirmado. Por otra parte, en el caso de testeo semanal el tiempo de detección se reduce, al igual que el aislamiento de los infectados pre-sintomáticos y asintomáticos, reduciendo por esta vía la transmisión en el colegio. La sensibilidad del test se modeló como se explicó en la Sección 3.4.3.1

5.1. Obtención de datos

Para la propuesta se consideraron los datos reales de incidencia diaria de contagios a nivel comunal, con el objetivo de segmentar sectores del país según esta métrica. A su vez, se re utilizaron datos del tamaño y ubicación de cada colegio, para posteriormente relacionarlos con la incidencia comunal en la que se ubicaran. Los datos de incidencia por comuna se obtuvieron del producto 18 de GitHub Minciencia [27], tomando el promedio de las últimas 5 semanas. Mientras que el número de estudiantes por colegio y su ubicación se recopilaron

de [28].

5.2. Agregación de resultados de simulaciones con datos reales

Se simularon 864 escenarios considerando distintos tamaños de colegio, parámetros de infecciosidad, patrones de contacto entre profesores/alumnos, con y sin testeo, para luego calcular la disminución en el número de contagios bajo la estrategia de testeo. El horizonte de simulación fue de 90 días y consideró solo los colegios con alumnos de enseñanza media con asistencia presencial de lunes a viernes, pues era el grupo etario que presenta mayor riesgo de contagio.

Los resultados del análisis de simulación, cruzados con los datos reales del Mineduc, se resumen en la Tabla 5.1, donde se consideraron las tasas de incidencia real de las tres últimas semanas de mayo y las primeras dos de junio 2021. Las comunas se agruparon según su incidencia promedio en el período considerado. Así, existieron 174 comunas con incidencia mayor a 30, 70 con incidencia entre 20 y 30, y 22 con una incidencia entre 10 y 20 contagios por 100,000 habitantes.

Tabla 5.1: Resultados basados en análisis de simulación.

Incidencia comunal	Cantidad de comunas	Cantidad alumnos	Total infectados Caso Base	Porcentaje reducción con testeo	Tests necesarios por contagio evitado
Sobre 30	174	531,407	48,146	52.4 %	273
Entre 20 y 30	70	185,922	12,995	53.2 %	349
Entre 10 y 20	22	49,954	2,222	55.0 %	531

La incidencia de casos en el período anteriormente señalado, indicó que había un alto porcentaje de alumnos que estaban ubicados en zonas con niveles de transmisión comunitaria críticos, con incidencia por sobre los 30 contagios diarios/ 100,000 habitantes, correspondiendo a 174 comunas y un total de 531,407 estudiantes de enseñanza media.

En las simulaciones del caso base que replicó la situación actual de los colegios (sin testeo), se observó que - en promedio - se infectaba un 4-9 % de la comunidad en un plazo de 90 días. Estas estimaciones de tasa de infecciones fueron consistentes con lo observado a finales de 2020 y Marzo de 2021 en Chile. Notar que durante ese periodo la transmisión comunitaria era menor, y por lo tanto la estimación de contagios reportada en la tabla fue conservadora.

Para todos los colegios ubicados en zonas con incidencia mayor o igual a 10, se estimó una reducción de 52-55 % en los contagios internos del colegio si se aplicaban los testeos semanales.

En términos de costo efectividad, para los colegios ubicados en zonas con alta incidencia (sobre 30) el costo de evitar un contagio es de 273 tests. La costo efectividad iba disminuyendo

a medida que se reduce la incidencia de casos en la comuna.

5.3. Propuesta de medición de impacto

Se propuso el siguiente plan piloto para evaluar el impacto de la estrategia de testeo antes de un eventual escalamiento.

5.3.1. Diseño de piloto e implementación de intervención en política de testeo y aislamiento

La implementación del piloto consideraba un grupo tratamiento donde se implementaba la intervención de medidas de mitigación y un grupo control comparable para poder evaluar el impacto de la intervención. La intervención en el grupo tratamiento incorporó una implementación con “capas” de mitigación. La evidencia empírica reportada en [26] propone dos “capas” de protección:

- Capa 1: Monitoreo diario de síntomas

- Mediante una encuesta diaria realizada en formato digital, los apoderados de alumnos entregan información de síntomas de los niños y en el hogar, y posibles contacto estrechos que hayan ocurrido.
- La información es procesada en un servidor centralizado guardando la privacidad de la información.
- En base a las respuestas y a un protocolo establecido (por definir), se dan indicaciones a las familias sobre cómo proceder dado los síntomas u otros indicadores de riesgo. Este protocolo incluye la posibilidad de realizar tests de antígeno a alumnos con síntomas

- Capa 2: Testeo recurrente semanal a asintomáticos

- Se realiza un test de antígeno nasal por semana a profesores, funcionarios y alumnos de enseñanza media. El proceso de testeo se detalla en Anexos y sería liderado en cada colegio por una persona calificada (Enfermera o TENS) y voluntarios de la comunidad escolar (profesores, funcionarios y apoderados).
- Se establece un protocolo de trazabilidad y aislamiento cuando se detectan casos positivos.

Para medir impacto del piloto, los colegios seleccionados en la muestra se agrupan en tres categorías:

- Grupo Control: no se hacen intervenciones.
- Grupo Intervención A: Se implementa Capa 1.
- Grupo Intervención B: Se implementa Capa 1 y Capa 2.

En la siguiente sección se detalla la selección de colegios para cada grupo. Para todos los colegios se debió recopilar información semanal de contagios en la comunidad escolar (profesores, funcionarios, alumnos y de ser posible, apoderados). Los indicadores a monitorear durante el piloto fueron los siguientes:

- Número de casos confirmados totales en la comunidad escolar, detallando profesores/-funcionarios y alumnos.
- Para cada caso confirmado, se realiza un estudio de trazabilidad para tratar de identificar si el contagio fue externo o dentro del colegio (esto es un brote). Este estudio puede ser realizado por el propio colegio (con la debida capacitación) y/o por la SEREMI respectiva.
- Para los Grupos de Intervención A y B, se mide la adopción del sistema de monitoreo de síntomas, indicando el número de encuestas respondida por cada familia.

Se propuso realizar un análisis semanal de los datos recopilados para analizarlos y realizar los test estadísticos pertinentes.

5.3.2. Selección de la muestra y duración de la evaluación

Para consolidar una base de datos con colegios candidatos a ser monitoreados mediante tests, se descargó información de todos los colegios de Chile desde la página web “Datos abiertos” del Mineduc [28]. De ahí se seleccionaron los datos correspondientes a las matrículas vigentes del año 2020. Se filtraron a colegios con enseñanza media, correspondientes a colegios municipales y particulares subvencionados, eligiendo colegios con más de 3 cursos por nivel y más de 30 alumnos por curso (los cuales propiciaban mayor facilidad de que surja un brote, según nuestros análisis hechos a partir de los resultados de las simulaciones).

Utilizando datos de los informes epidemiológicos de Minsal [27], se calculó la incidencia de contagios diarios para las comunas donde se ubicaba cada colegio. Cabe señalar que estas incidencias eran dinámicas en el tiempo, por lo que dichas asignaciones irían variando según la evolución de la pandemia. Así, se obtuvo una base de datos con establecimientos candidatos a testear, separados por región para facilitar posteriores análisis territoriales que se deseen realizar. La base de datos consta de un total de 95 colegios a lo largo del país, los cuales se desglosan según la Tabla E.4 de Anexos.

5.3.3. Selección de tamaño muestral

Para lograr un efecto significativo en la reducción empírica de contagios a partir de testeo y monitoreo de síntomas, se estimó - mediante un análisis de poder estadístico - un total de 45.000 alumnos destinados a los tres grupos de estudio: grupo control, grupo intervención A (control periódico de síntomas) y grupo intervención B (control periódico de síntomas y testeo semanal), con una duración de 4 a 6 semanas de estudio. Este tamaño de muestra se calculó asumiendo un tamaño de efecto (effect size) de 20 % para los grupos intervenidos y un poder estadístico de 80 %. En la Sección A.3 de Anexos se pueden ver más detalles sobre este análisis. En base a este análisis y a la preselección de colegios antes descrito, se propuso realizar el estudio en las regiones detalladas en la Tabla 5.2. En cada región se dividieron los colegios en los tres grupos a intervenir.

Tabla 5.2: Selección preliminar de colegios para piloto.

Región	Número de colegios	Número total de estudiantes
Antofagasta	22	15,080
Coquimbo	12	6,662
Metropolitana	26	16,850
O'higgins	8	4,716
Bio-bío	9	5,580
Total	77	48,888

Los recursos para la implementación del piloto se detallan en la Sección A.4 de Anexos.

Capítulo 6

Conclusiones

La re-apertura de los colegios ha sido un problema común al rededor del mundo, y ha generado brechas entre países que han logrado mantenerlos abiertos, y países que aún no logran hacerlo. Es por esto, que estudiar distintas medidas de contención de brotes crea valor para poder facilitar la re-apertura de colegios que no han tenido dicha posibilidad, ya sea por no tener los recursos necesarios o por temor a generar brotes dentro de sus dependencias. Según los resultados del estudio, hay varias medidas que permiten a los colegios tomar acción. Estas medidas se resumen en la Figura 6.1

Por una parte, si un colegio tiene la capacidad de ampliar la cantidad de salas y el personal educativo, reducir aforos permitiría mantener el colegio funcionando a su capacidad normal, con contagios bajo un umbral del 3%, y sus alumnos tendrían menos del 5% de sus clases online producto de aislamiento preventivo o infección. Esta política implica un buen plan de trazabilidad, para evitar demasiados cruces entre cursos, ya sea evitando almuerzos con mucha gente en un casino, actividades masivas en espacios cerrados, entre otros. Ahora, si un colegio quiere velar por minimizar los contagios, agregarle a dicha política alternancia semanal en la asistencia, permitiría mantener los contagios en los establecimientos bajo al 1%, pero con más de la mitad de las clases de manera remota. Este escenario implica un costo para los estudiantes, familias y colegio. Los estudiantes tendrían desventaja en sus aprendizajes, como se mencionó anteriormente, producto de la gran cantidad de clases online, por su parte, las familias tendrían que tener la capacidad de brindar internet y computadores a todos sus hijos con clases online y, en caso de ser necesario, alguien que los cuide. Por parte del colegio, esto implicaría tener una modalidad híbrida de clases, teniendo que adaptar su enseñanza a dicha modalidad. Esta estrategia, según el modelo, es la más agresiva para contención de brotes, pero adoptarla involucra mucha re-estructuración al sistema educativo del colegio, y además tiene una baja tasa de presencialidad.

Por otra parte, si un colegio tuviese los recursos para poder realizar una política de testeo semanal, los contagios estarían cercanos al 2%, y la asistencia presencial sobre un 92%, siendo una mejor política que la reducción de aforos en la primera componente, y moderadamente peor en asistencia presencial. Esta política implica costos en adquirir los tests, y tener que organizar un sistema que permita realizar el testeo de manera semanal, pero posibilita mantener el colegio funcionando con bajos contagios y alto control de aislamiento, pues como se ha señalado, en test de antígenos tiene la ventaja de tener resultados inmediatos, que permiten tomar acción directa al detectar casos, por ende, esta política es versátil para detectar

y aislar a las personas que corresponden. Aunque esta política no sea la más efectiva de las estudiadas en contención de brotes, es una medida que se ha instaurado en distintos países en el mismo contexto, y a permitido que los establecimientos funcionen de manera regular, a un costo relativamente bajo¹⁹.

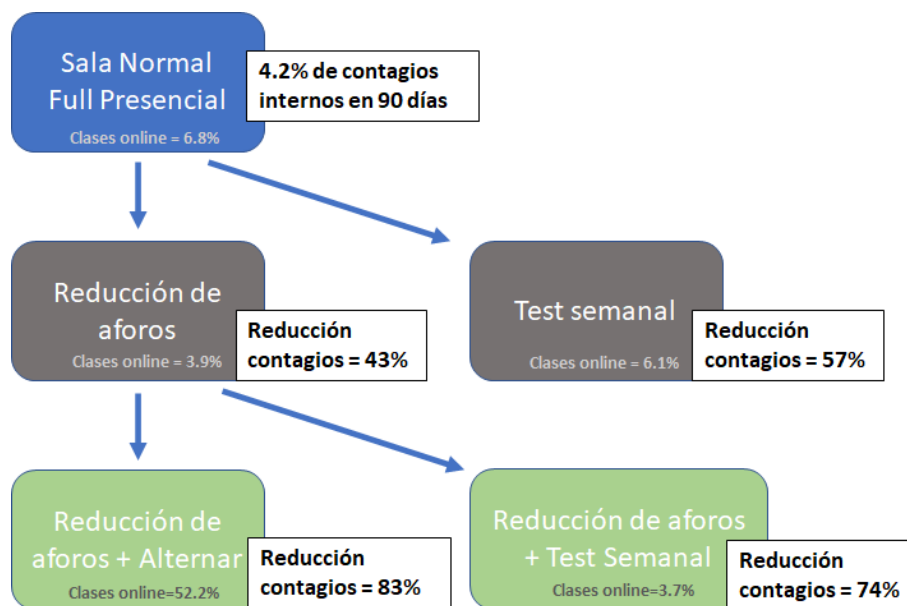


Figura 6.1: Rendimientos de políticas de mitigación.

Además, el modelo sugiere que si un colegio pudiese combinar la reducción de aforos con la política de testeo semanal, se lograría una presencialidad cercana al 95 %, con contagios en un 1 %, lo cual es bastante cercano en contención de brotes a la política más agresiva, pero con la ventaja de tener una alta presencialidad, luego es una política agresiva en contener brotes, y efectiva para mantener a los alumnos asistiendo regularmente a clases. Probablemente, esta política sea la más costosa de implementar, porque involucra los costos de ambas políticas combinadas, y además implica una muy buena organización por parte de los establecimientos que lo adopten, pues necesitan monitoreo constante por test de antígenos, re-estructuración de salas y cuerpo académico. Sin embargo, su rendimiento en ambas dimensiones estudiadas es bastante atractiva.

Por último, producto del estudio realizado, se realizó una propuesta de testeo y monitoreo de síntomas al Ministerio de Educación de Chile, con el objetivo de priorizar la apertura de establecimientos educacionales, asegurando presencialidad a clases de manera segura, y a su vez, poder medir empíricamente el efecto de testear y monitorear semanalmente a comunidades educativas. Luego de los análisis realizados, se concluyó que implementar un testeo rápido de antígenos semanal reduciría aproximadamente a la mitad el número de contagios internos en el colegio, comparado con un caso base en donde no se testea pero se mantienen otras medidas de mitigación (uso de mascarillas, ambientes ventilados y aislamiento del curso ante

¹⁹ Un test de antígenos, con baja sensibilidad, ronda el valor de \$5 dólares por test.

un contagio). Considerando un costo de US\$5 por test, la costo-efectividad de la estrategia de testeo semanal fue de US\$1,450 por contagio reducido, cuando se testeaba en colegios con 30 o más alumnos por sala ubicados en zonas con incidencia igual o mayor a 20 casos diarios cada 100,000 habitantes. Los resultados antes mencionados fueron conservadores ya que: (1) asumieron una infecciosidad relativamente baja (entre 1 y 2 contagios en el curso de un alumno infectado), y (2) se asumió que el curso operaba como una burbuja, sin contactos entre alumnos de distintos cursos. Para parámetros de infecciosidad más altos (por ejemplo, producto de variantes o poca ventilación de salas) o con contactos entre alumnos de distintos cursos, la costo efectividad del testeo sería aún mayor.

A modo de discusión, el presente estudio incorporó múltiples opciones de políticas para mitigar brotes, las cuales se compararon para brindar un estudio de costo-efectividad al adoptar una medida por sobre otra. Tanto en Chile como en el mundo, existen distintas realidades en cada colegio, y los recursos que cada colegio tenga permitirá adoptar más o menos medidas para mitigar contagios.

Probablemente en el caso de un colegio de bajos recursos, instaurar una política de testeo no sea posible, y una opción sería reducir aforos para contener brotes, utilizando espacios del establecimiento para adoptar más salas y permitir que éste opere con la misma capacidad normal, pero con más salas y menos alumnos en ellas, o acortando jornadas educativas y hacer un esquema de turnos, donde una mitad de los alumnos asistan en el primer turno, y el resto en el segundo. Por otra parte, un colegio con mayores recursos, podría preferir incurrir en gastos monetarios para realizar tests semanales, conteniendo brotes y asegurando una alta tasa de presencialidad a clases.

Existen muchas medidas que los colegios pueden adoptar para mantenerse abiertos, y posiblemente el efecto de muchas de éstas no son conocidas por los tomadores de decisiones, y la posibilidad de abrir sus dependencias se vea lejana. Si bien este estudio analizó las métricas dentro de los colegios, no incluyó análisis de externalidades positivas que las estrategias pueden tener. Por ejemplo, en el caso de testear semanalmente, identificar alumnos infectados permitiría una detección más eficiente de posibles brotes en el hogar, lo cual facilitaría un aislamiento temprano y por esta vía cortar la cadena de transmisión comunitaria fuera del colegio, o que dada la alta transmisibilidad en el hogar [23], evitar el contagio de un alumno se traduciría en evitar que una familia completa que contagie y dejar en aislamiento.

Por último, cabe mencionar que con ayudas gubernamentales la brecha entre colegios con más y menos recursos podría disminuir, permitiendo que exista la posibilidad de testear semanalmente, en todo aquel colegio que se requiera. La propuesta realizada al Ministerio de Educación, incorporó criterios de incidencias territoriales y tamaños de colegios para realizar un plan dinámico de testeo en colegios de bajos recursos. Tomar las medidas propuestas en este plan, e incorporar otras estrategias de mitigación podrían permitir que los colegios, efectivamente, sean los primeros en abrir, y los últimos en cerrar.

Bibliografía

- [1] “Coronavirus declared global health emergency by who.” <https://www.bbc.com/news/world-51318246>. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [2] “Who coronavirus (covid-19) dashboard.” <https://covid19.who.int/>. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [3] “Crisis covid: el 20 % de las empresas de la región metropolitana cerró o está en proceso para terminar su operación.” <https://www.latercera.com/pulso/noticia/crisis-covid-el-20-de-las-empresas-de-la-region-metropolitana-cerro-o-esta-en-proceso-para-terminar-su-operacion/4GRECXZDTRDKDMBCTNEQ3EK7FE/>, Jun 2020. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [4] “Covid-19 government response tracker.” www.bsg.ox.ac.uk/research/research-projects/covid-19-government-response-tracker. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [5] M. Kuhfeld, J. Soland, B. Tarasawa, A. Johnson, E. Ruzek, and J. Liu, “Projecting the potential impact of covid-19 school closures on academic achievement,” *Educational Researcher*, vol. 49, no. 8, pp. 549–565, 2020.
- [6] UNESCO, “Adverse consequences of school closures.” <https://en.unesco.org/covid19/educationresponse/consequences>. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [7] M. A. Honein, L. C. Barrios, and J. T. Brooks, “Data and Policy to Guide Opening Schools Safely to Limit the Spread of SARS-CoV-2 Infection,” *JAMA*, vol. 325, pp. 823–824, 03 2021.
- [8] ECDC, “Covid-19 in children and the role of school settings in transmission.” <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/children-and-school-settings-covid-19-transmissioncopy-to-clipboard>, Aug 2020. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [9] Minsal, “Presidente anuncia suspensión de clases y reduce actos públicos,” Mar 2020. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [10] Minsal, “Protocolo de vigilancia epidemiológica, de investigación de brotes y de medidas sanitarias en establecimientos educacionales en contexto de pandemia covid-19.” <https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2021/03/ORD-799-04-03-2021.pdf>. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [11] Cooperativa.cl, “En medio de críticas y con baja asistencia, reabren los colegios en pelarco.” <https://cooperativa.cl/noticias/sociedad/salud/coronavirus/en-medio-de-criticas-y-con-baja-asistencia-reabren-los-colegios-en/2020-09-29/110535.html>. Accessed: 2 de diciembre de 2021.

- [12] Mineduc, “Inicia vacunación de trabajadores de establecimientos educacionales.” <https://www.mineduc.cl/inicia-vacunacion-de-trabajadores-de-establecimientos-educacionales/>, Feb 2021. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [13] D. B. Larremore, B. Wilder, E. Lester, S. Shehata, J. M. Burke, J. A. Hay, M. Tambe, M. J. Mina, and R. Parker, “Test sensitivity is secondary to frequency and turnaround time for covid-19 screening,” *Science advances*, vol. 7, no. 1, p. eabd5393, 2021.
- [14] U. Alon and E. Yashiv, “10-4: How to reopen the economy by exploiting the coronavirus’s weak spot,”
- [15] X. He, E. H. Lau, P. Wu, X. Deng, J. Wang, X. Hao, Y. C. Lau, J. Y. Wong, Y. Guan, X. Tan, *et al.*, “Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of covid-19,” *Nature medicine*, vol. 26, no. 5, pp. 672–675, 2020.
- [16] T. R. Mercer and M. Salit, “Testing at scale during the covid-19 pandemic,” *Nature Reviews Genetics*, vol. 22, pp. 415–426, Jul 2021.
- [17] “Coronavirus disease 2019 testing basics.” <https://www.fda.gov/consumers/consumer-updates/coronavirus-disease-2019-testing-basics>, Sep 2021. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [18] “Overview of testing for sars-cov-2 (covid-19).” <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/testing-overview.html>, Aug 2021. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [19] T. C. Jones, G. Biele, B. Mühlemann, T. Veith, J. Schneider, J. Beheim-Schwarzbach, T. Bleicker, J. Tesch, M. L. Schmidt, L. E. Sander, F. Kurth, P. Menzel, R. Schwarzer, M. Zuchowski, J. Hofmann, A. Krumbholz, A. Stein, A. Edelmann, V. M. Corman, and C. Drosten, “Estimating infectiousness throughout sars-cov-2 infection course,” *Science*, vol. 373, no. 6551, 2021.
- [20] “Test for current infection.” <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/testing/diagnostic-testing.html>, May 2020. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [21] “Tipos de caso y contacto covid19.” <https://saludresponde.minsal.cl/tipos-de-caso-y-contacto-covid19/>, May 2020. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [22] CDC, “Scientific brief: Sars-cov-2 transmission.” <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html>. Accessed: 2 de diciembre de 2021.
- [23] S. Hu, W. Wang, Y. Wang, M. Litvinova, K. Luo, L. Ren, Q. Sun, X. Chen, G. Zeng, J. Li, L. Liang, Z. Deng, W. Zheng, M. Li, H. Yang, J. Guo, K. Wang, X. Chen, Z. Liu, H. Yan, H. Shi, Z. Chen, Y. Zhou, K. Sun, A. Vespignani, C. Viboud, L. Gao, M. Ajelli, and H. Yu, “Infectivity, susceptibility, and risk factors associated with sars-cov-2 transmission under intensive contact tracing in human, china,” *Nature Communications*, vol. 12, p. 1533, Mar 2021.
- [24] R. M. Viner, O. T. Mytton, C. Bonell, G. J. Melendez-Torres, J. Ward, L. Hudson, C. Waddington, J. Thomas, S. Russell, F. van der Klis, A. Koirala, S. Ladhani, J. Panovska-Griffiths, N. G. Davies, R. Booy, and R. M. Eggo, “Susceptibility to SARS-CoV-2 Infection Among Children and Adolescents Compared With Adults: A Systematic Review and Meta-analysis,” *JAMA Pediatrics*, vol. 175, pp. 143–156, 02 2021.
- [25] A. D. Paltiel, A. Zheng, and R. P. Walensky, “Assessment of SARS-CoV-2 Screening

Strategies to Permit the Safe Reopening of College Campuses in the United States,” *JAMA Network Open*, vol. 3, pp. e2016818–e2016818, 07 2020.

- [26] J. Lessler, M. K. Grabowski, K. H. Grantz, E. Badillo-Goicoechea, C. J. E. Metcalf, C. Lupton-Smith, A. S. Azman, and E. A. Stuart, “Household covid-19 risk and in-person schooling,” *Science*, vol. 372, no. 6546, pp. 1092–1097, 2021.
- [27] M. de Ciencias y Tecnología, “Datos-covid19.” <https://github.com/MinCiencia/Datos-COVID19>.
- [28] Mineduc, “Datos abiertos.” <https://datosabiertos.mineduc.cl/>.

Anexo A

A.1. Resultados para distintos escenarios simulados

Tabla A.1: Tabla de distintos resultados de simulaciones para colegio de media.

Tamaño sala	Cursos por nivel	Asistencia	Política de testeo	% infectados	% clases online	Reducción infectados
30 alumnos	1 cursos	Semanal	Sin test	6.3	9.3	0.0
15 alumnos	2 cursos	Semanal	Sin test	3.6	5.6	42.9
30 alumnos	1 cursos	Semanal	Semanal	2.8	8.6	55.6
15 alumnos	2 cursos	Semanal	Semanal	1.6	5.4	74.6
30 alumnos	1 cursos	Alternada	Sin test	1.5	55.5	76.2
30 alumnos	1 cursos	Alternada	Semanal	1.1	56.5	82.5
15 alumnos	2 cursos	Alternada	Sin test	1.0	53.2	84.1
30 alumnos	3 cursos	Semanal	Sin test	4.2	6.8	0.0
15 alumnos	6 cursos	Semanal	Sin test	2.4	3.9	42.9
30 alumnos	3 cursos	Semanal	Semanal	1.8	6.1	57.1
30 alumnos	3 cursos	Alternada	Sin test	1.2	53.9	71.4
15 alumnos	6 cursos	Semanal	Semanal	1.1	3.7	73.8
15 alumnos	6 cursos	Alternada	Sin test	0.7	52.2	83.3
30 alumnos	3 cursos	Alternada	Semanal	0.7	54.4	83.3
30 alumnos	5 cursos	Semanal	Sin test	3.9	6.3	0.0
15 alumnos	10 cursos	Semanal	Sin test	2.4	3.9	38.5
30 alumnos	5 cursos	Semanal	Semanal	1.6	5.3	59.0
30 alumnos	5 cursos	Alternada	Sin test	1.1	53.5	71.8
15 alumnos	10 cursos	Semanal	Semanal	1.0	3.4	74.4
15 alumnos	10 cursos	Alternada	Sin test	0.6	52.1	84.6
30 alumnos	5 cursos	Alternada	Semanal	0.6	53.9	84.6

Tabla A.2: Tabla de distintos resultados de simulaciones para colegio de básica.

Tamaño sala	Cursos por nivel	Asistencia	Política de testeo	% infectados	% clases online	Reducción infectados
30 alumnos	1 cursos	Semanal	Sin test	1.1	4.8	0.0
15 alumnos	2 cursos	Semanal	Sin test	0.6	2.8	45.5
30 alumnos	1 cursos	Semanal	Semanal	0.5	5.8	54.5
15 alumnos	2 cursos	Semanal	Semanal	0.3	3.6	72.7
30 alumnos	1 cursos	Alternada	Sin test	0.3	53.3	72.7
15 alumnos	2 cursos	Alternada	Sin test	0.2	52.0	81.8
30 alumnos	1 cursos	Alternada	Semanal	0.2	54.3	81.8
30 alumnos	3 cursos	Semanal	Sin test	0.8	4.0	0.0
15 alumnos	6 cursos	Semanal	Sin test	0.5	2.3	37.5
30 alumnos	3 cursos	Semanal	Semanal	0.4	4.6	50.0
30 alumnos	3 cursos	Alternada	Sin test	0.3	52.7	62.5
15 alumnos	6 cursos	Semanal	Semanal	0.3	2.8	62.5
15 alumnos	6 cursos	Alternada	Sin test	0.2	51.6	75.0
30 alumnos	3 cursos	Alternada	Semanal	0.2	53.4	75.0
30 alumnos	5 cursos	Semanal	Sin test	0.8	3.8	0.0
15 alumnos	10 cursos	Semanal	Sin test	0.5	2.3	37.5
30 alumnos	5 cursos	Semanal	Semanal	0.4	4.3	50.0
15 alumnos	10 cursos	Semanal	Semanal	0.2	2.8	75.0
30 alumnos	5 cursos	Alternada	Sin test	0.2	52.5	75.0
15 alumnos	10 cursos	Alternada	Sin test	0.1	51.6	87.5
30 alumnos	5 cursos	Alternada	Semanal	0.1	53.2	87.5

A.2. Resultados para básica

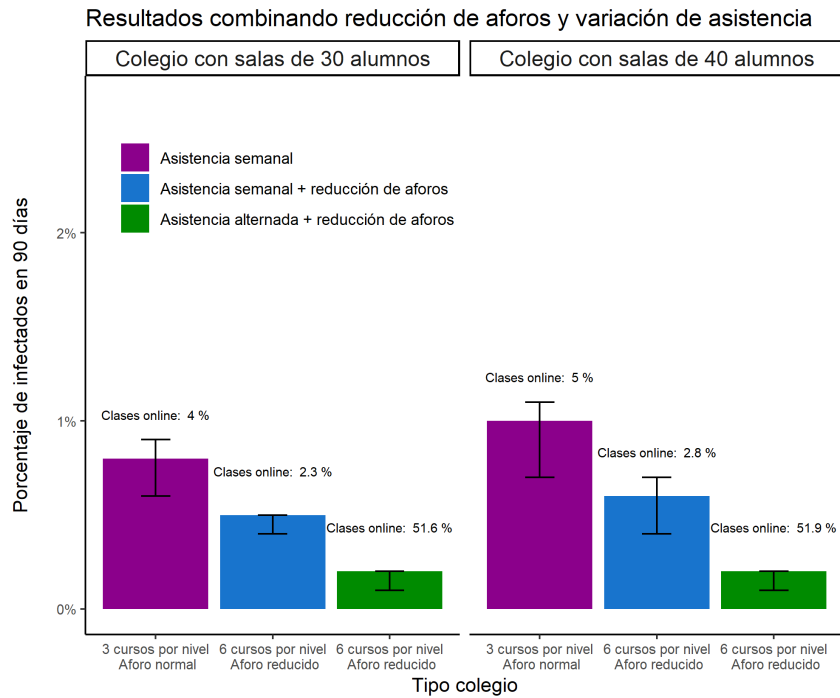


Figura B.1: Gráficos básica reducción de aforos y variación en asistencia.

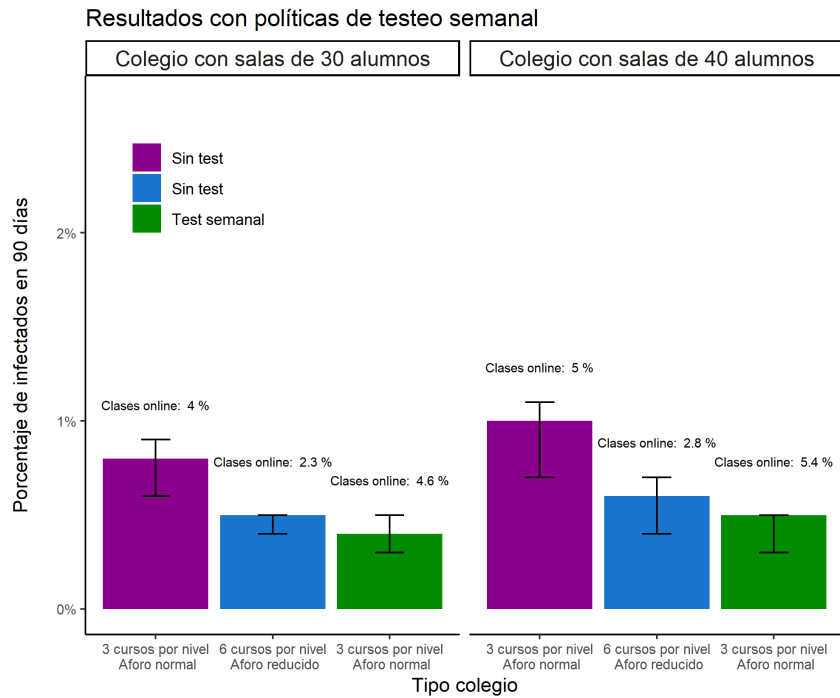


Figura B.2: Gráficos básica testeo semanal.

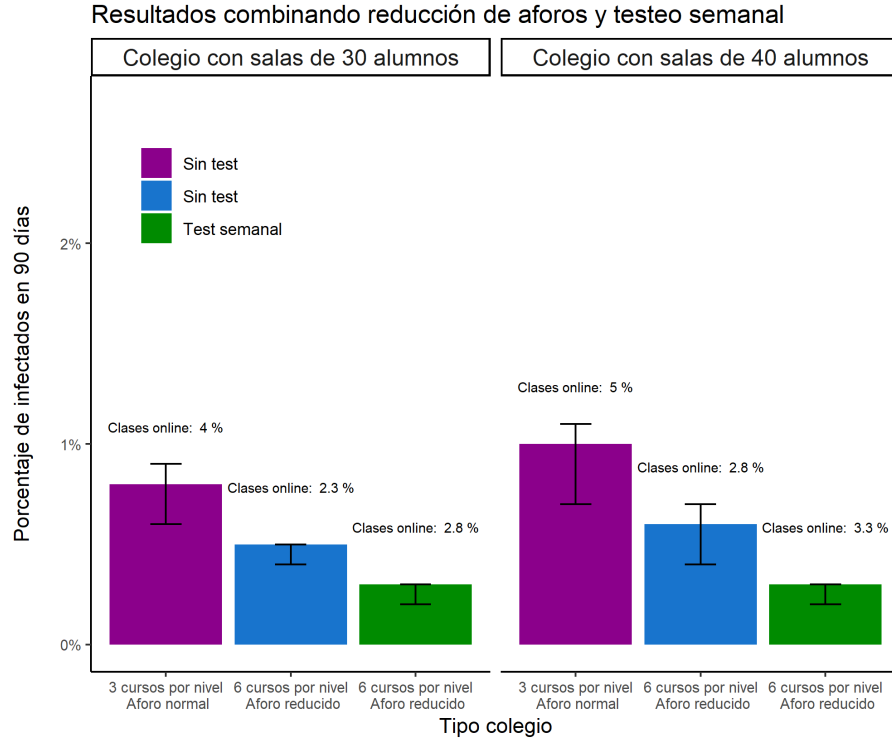


Figura B.3: Gráficos básica combinación cápsulas y testeo semanal.

A.3. Análisis de poder estadístico y tamaño de la muestra

Se definió a t como el número de semanas transcurridas de experimento, n el número de alumnos en grupo control y grupo tratamiento ($2n$ es el número de alumnos). El parámetro r como la probabilidad de que alguien se contagie durante una semana. El porcentaje de personas que se contagia en el periodo $[0, t]$ es:

$$p(t) = 1 - (1 - r)^t$$

Sean $X_0(t)$ y $X_1(t)$ los contagios hasta la semana t en grupo control (0) y grupo tratamiento, respectivamente. El objetivo fue realizar un test estadístico en base a estos datos para evaluar si $p_1(t) \neq p_2(t)$. El test que se utilizó es un test de proporciones $X_k(t)/n$, eligiendo n y t de tal forma de alcanzar un poder $1 - \beta$ y nivel de significancia en este test. Este análisis requirió suponer un effect size $\rho \in (0, 1)$ definido como:

$$p_1^* = (1 - \rho)p_0^*$$

en donde p^* representó la probabilidad real con que el individuo se contagia en ese periodo.

Al hacer un experimento más corto (t chico), se tendrá un $p_{(t)}$ pequeño y por lo tanto se requiere un n mayor para lograr el mismo poder estadístico (para un effect size dado). A continuación, se realizó un análisis para evaluar este trade-off y de esta forma determinar el número de alumnos requerido para lograr el poder necesario para un horizonte de tiempo razonable.

En la Figura C.4 se observa un gráfico con curvas en donde para distintos largos del estudio (medido en semanas), se calculó el número de alumnos necesarios (en cada grupo, control y tratamiento) para lograr el poder estadístico deseado. Se consideraron dos niveles de poder, 0.7 y 0.8, representados por distintas curvas en cada gráfico. También, se consideraron distintos valores del parámetro de tasa de contagio semanal (r , medido con probabilidad de contagio semanal) y del effect size.

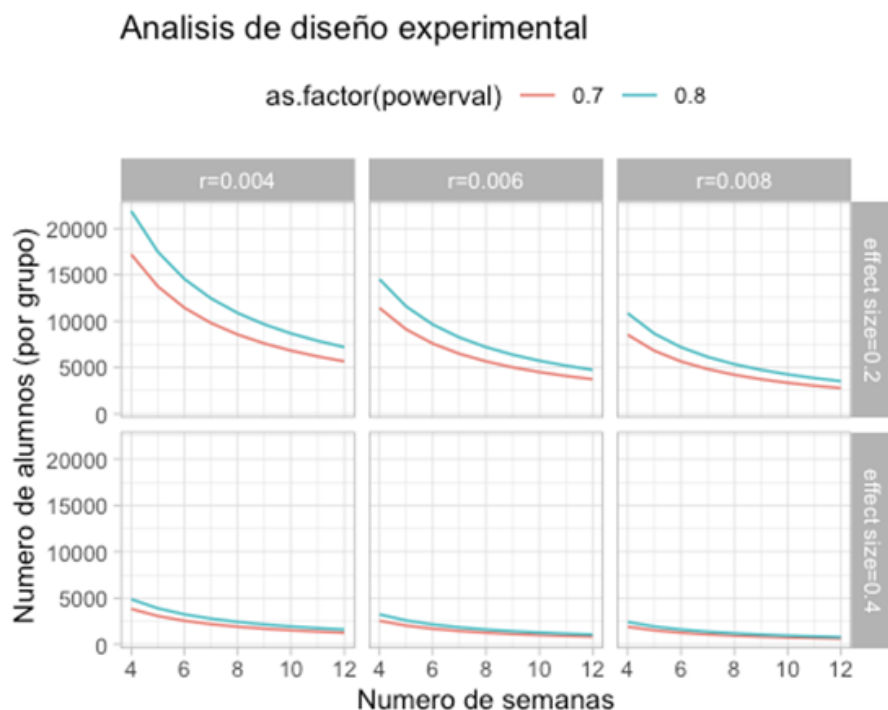


Figura C.4: Análisis de diseño experimental para distintos niveles de poder.

A.4. Recursos de implementación propuesta

La implementación del plan piloto se propuso realizar en conjunto con el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, a través de un convenio de colaboración sin transferencia de recursos. Los insumos para realizar la implementación si requirieron aportes incrementales, calculados para los grupos de colegios donde se realizan las intervenciones, durante un periodo de 6 semanas. En la Tabla D.3 se desglosa cada ítem en conjunto con su explicación y costo. De esta forma se detalló aquellos insumos a considerar y qué efectos y costos vendrían asociados a ellos.

Tabla D.3: Tabla de recursos de implementación del piloto.

	Costos	Comentarios
Test de Antígenos	90.000 unidades (15 mil alumnos, profesores y funcionarios, 6 semanas)	Tests podrían ser aportados por Minsal.
Capacitación uso test de antígenos	TENS o voluntarios de TTA para cada colegio	Mineduc y Minsal pueden coordinar capacitación, con ISCI apoyando el diseño del proceso.
Aplicación para seguimiento de síntomas	Depende de aplicación a utilizar. Como referencia se incluye presupuesto de aplicación móvil Cuidémonos de Unholster, 750 UF (30 mil alumnos, profesores y funcionarios, para todo el estudio).	Aplicación “Cuidémonos” ha sido implementada en varios colegios y organizaciones, y sería administrada por completo por Unholster y los datos analizados por ISCI. Como alternativa, Mineduc podría implementar su propia encuesta o aplicación.
Diseño del piloto, análisis de datos y evaluación de impacto	Aportado por ISCI a través de convenio con Mineduc (sin transferencia de recursos)	Participan investigadores e ingenieros de ISCI/U de Chile.

A.5. Colegios candidatos a testear

Conforme a un análisis exploratorio realizado, según los tamaño de colegios, ubicación territorial, tipo de enseñanza y recursos, se obtuvo una lista con colegios candidatos a ser testeados. Dichos colegios se observan en la Tabla E.4

Tabla E.4: Tabla con colegios candidatos a ser testeados separados por región.

Región	Número de colegios	Número total de alumnos
Antofagasta	22	15,028
Atacama	2	808
Bío-bío	9	5,580
Coquimbo	12	6,662
O'Higgins	8	4,716
La Araucanía	1	522
Los Lagos	6	2,668
Maule	1	400
Metropolitana	26	16,850
Ñuble	2	1,080
Tarapacá	1	715
Valparaíso	5	2,038