

Figura S1: Nuevas infecciones (A-C) y número de contactos por día (D-F) predichos por el modelo SEIR-HL con distintos valores de H y L . Todas las simulaciones se realizaron para una población de 1 millón con 100 infectados iniciales, dividida en una subpoblación de 200.000 con tasa de contactos mayor y 20 infectados iniciales, y otra de 800.000 con tasa de contactos menor y 80 infectados iniciales. Parámetros: $p = 0,06$, $\sigma = 0,2$, $\gamma = 0,0714$. Los valores de H y L fueron elegidos de manera que se mantenga la misma tasa de contacto promedio (3,67) en todas las simulaciones. Las nuevas infecciones se calcularon usando la Ec. (8) (ver Métodos). El número de contactos por día se calculó como el número de individuos infectados multiplicado por la tasa de contacto.

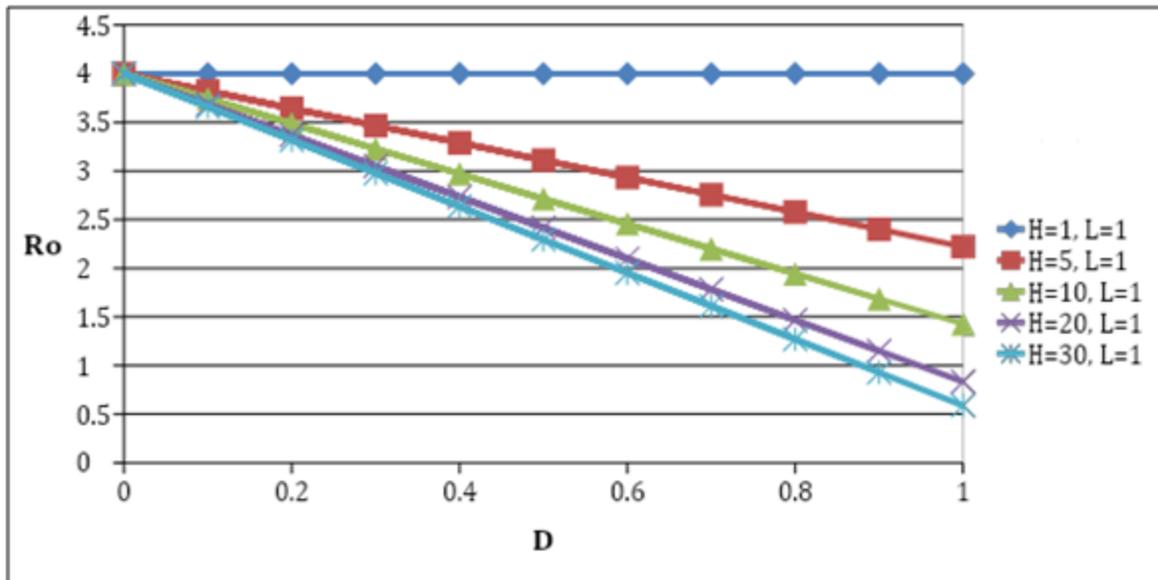


Figura S2: Tasa básica de reproducción R_0 (calculada como $R_0 = \frac{\beta_0 Q}{\gamma}$), en función de la tasa de desplazamiento D , para distintos valores de H ($\beta_0=0,8$).

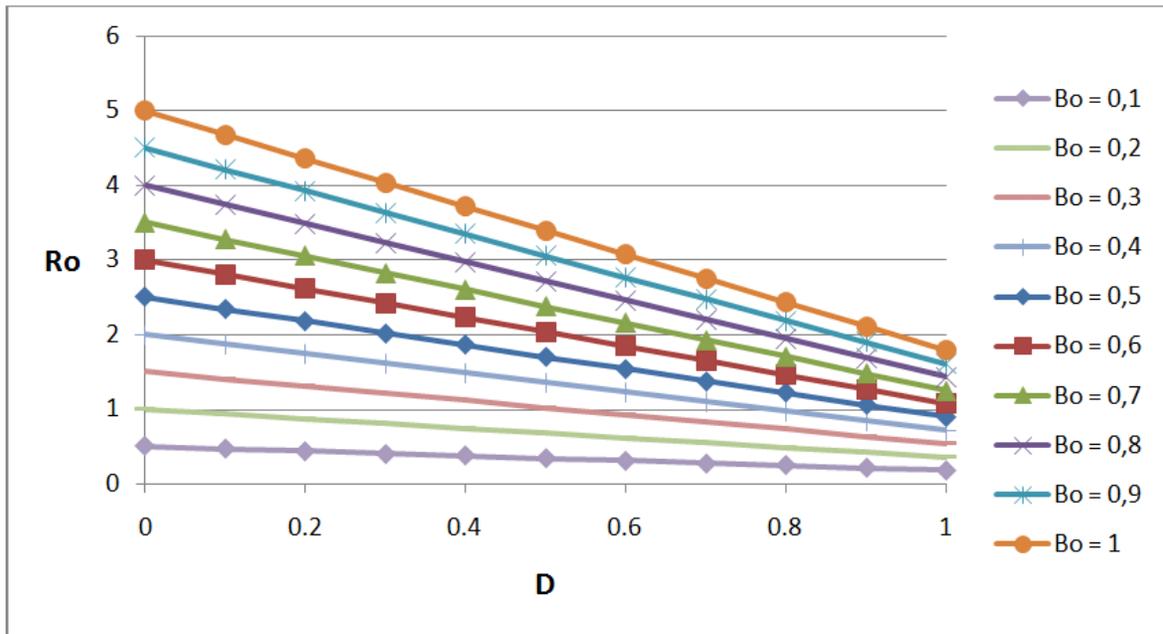


Figura S3: Tasa básica de reproducción R_0 (calculada como $R_0 = \frac{\beta_0 Q}{\gamma}$), en función de la tasa de desplazamiento D , para distintos valores de β_0 ($H = 10$, $L = 1$).

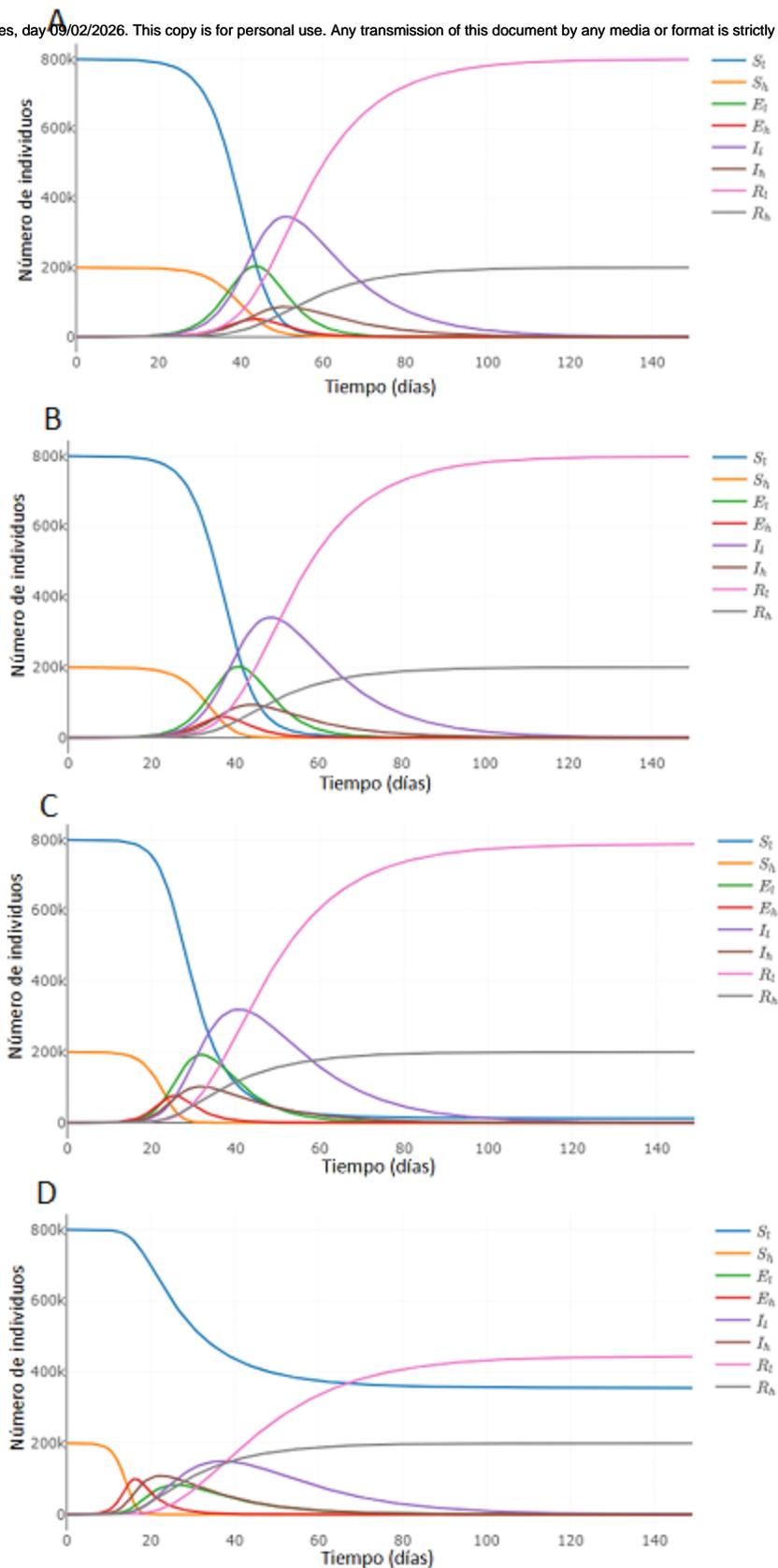


Figura S4: Curvas H y L de susceptibles, expuestos, infecciosos y recuperados en función del tiempo, para distintas combinaciones de H y L con tasa de contacto promedio de 10, para una población de 1 millón con 100 infectados iniciales, dividida en una subpoblación de 200.000 con tasa de contactos mayor y 20 infectados iniciales, y otra de 800.000 con tasa de contactos menor y 80 infectados iniciales. Parámetros: $p = 0,06$, $\sigma = 0,2$, $\gamma = 0,0714$. A: $H = 10, L = 10$. B: $H = 18, L = 8$. C: $H = 30, L = 5$. D: $H = 46, L = 1$.

EJEMPLOS DE USO

Todos los gráficos presentados en los siguientes ejemplos fueron generados mediante la aplicación disponible en <https://ecm.famaf.unc.edu.ar/>

Ejemplo de uso 1:

Población de interés: Usuarios de medios de transporte

Pregunta: ¿Cuáles de las siguientes medidas tendría un mayor efecto sobre la propagación de SARS-CoV-2 entre usuarios de medios de transporte?

1. Incentivar el uso de la bicicleta sobre el colectivo
2. Reducir el número de contactos entre usuarios de colectivo (aumentando la frecuencia)

Situación y datos:

Se consideran 5 medios o modos de transporte: subte, colectivo, bicicleta, peatonal y tren. Para cada medio de transporte, se estima el número promedio de contactos por usuario a partir del flujo total de pasajeros y del tamaño de la flota.

Subpoblación	Número de individuos	Número promedio de contactos diarios
Subte (A)	200	20
Colectivo (B)	500	10
Bicicleta (C)	100	2
Peatonal (D)	200	1
Tren (E)	0	10
subte	1000	9,4

Prevalencia de COVID-19 en la población: 0,1%

Determinación de valores iniciales:

$$I_0 = N * Prevalencia = 1000 * 0,001 = 1$$

(Nota: se asume que el primer infectado ocurre entre usuarios de subte)

Subpoblación	S	E	I	R
A	199	0	1	0
B	500	0	0	0
C	100	0	0	0
D	200	0	0	0
E	0	0	0	0
N	999	0	1	0

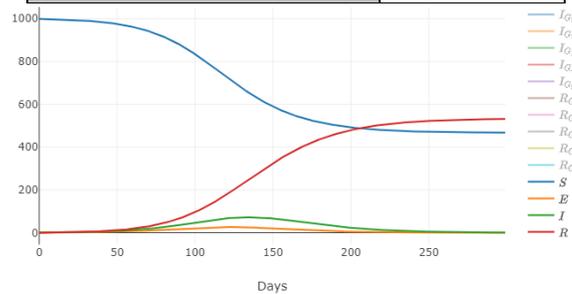
Predicción para la situación pre-intervención:

Cálculo de R_0 :

Grupo	Nc	c	Nc*c	N	1000
A	200	20	4000	p	0,01
B	500	10	5000	gama	0,07
C	100	2	200	Sumatoria	9400
D	200	1	200	R0	1,316
E	0	10	0		

Evolución de la epidemia:

Pico de infectados	72 (134 días)
Número de infectados	531
Número de hospitalizados	27
Número de fallecidos	12



(Nota: se asume una tasa de hospitalización del 5% y una tasa de letalidad del 2,3%)

Predicción para la medida 1 (incentivar que 100 usuarios de colectivo pasen a usar bicicleta):

Cálculo de R_0 :

Grupo	Nc	c	Nc*c	N	1000
A	200	20	4000	p	0,01
B	400	10	4000	gama	0,07
C	200	2	400	Sumatoria	8600
D	200	1	200	R nuevo	1,204
E	0	1	0		

Evolución de la epidemia:

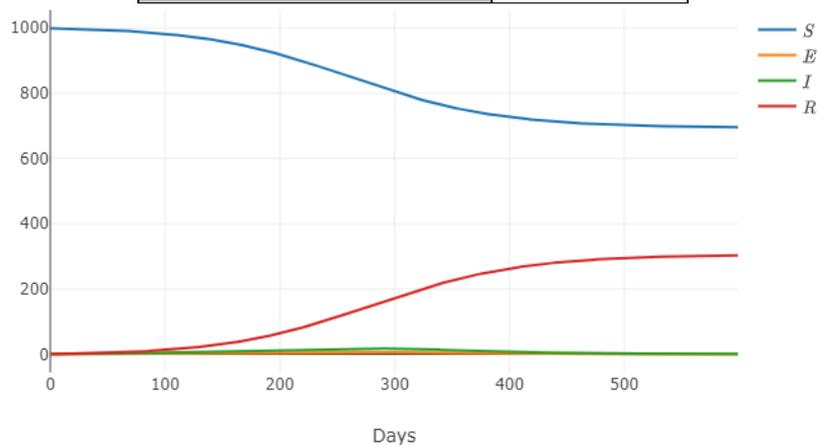
Pico de infectados	67 (130 días)
Número de infectados	484
Número de hospitalizados	24
Número de fallecidos	11

Cálculo de Ro:

Grupo	Nc	c	Nc*c	N	
A	0	20	0	p	0,01
B	600	10	6000	gama	0,07
C	150	2	300	Sumatoria	8400
D	250	1	200	R nuevo	0,917
E	0	1	0		

Evolución de la epidemia:

Pico de infectados	17 (278 días)
Número de infectados	303
Número de hospitalizados	15
Número de fallecidos	7



(Nota: aquí se asume que el primer individuo infectado aparece entre los usuarios de colectivo)

Conclusión:

La medida 3 es la más efectiva en limitar la propagación de la epidemia en la población de interés.

Ejemplo de uso 2:

Población de interés: Clientes y empleados de supermercado en una localidad

Pregunta: ¿Cuáles de las siguientes medidas tendría un mayor efecto sobre la propagación de SARS-CoV-2 entre clientes y empleados?

3. Disminución del número de empleados
 - a. Disminución del número de repositores
 - b. Disminución del número de supervisores
 - c. Disminución del número de empleados de seguridad
 - d. Disminución del número de empleados de panadería y carnicería
 - e. Disminución del número de cajeros
4. Disminución del número de contactos de los empleados
5. Disminución del número de clientes

Situación y datos:

Existen 10 supermercados en la localidad. Inicialmente cada supermercado cuenta con 25 empleados (6 repositores, 4 supervisores, 3 empleados de seguridad y 12 cajeros) y recibe 200 clientes por día. Se asume que cada cliente sólo entra en contacto, en promedio, con una sola persona (cajero/a). Se realiza una encuesta a los distintos empleados para determinar con cuántas personas entran en contacto en una jornada laboral.

Población total: 2250

Subpoblaciones (número de individuos; número de contactos diarios):

Subpoblación	Número de individuos	Número promedio de contactos diarios
Clientes (A)	2000	1
Repositores (B)	60	3
Supervisores (C)	40	3
Empleados de seguridad (D)	30	1
Cajeros (E)	120	20
Total (N)	2250	2,1

Prevalencia de COVID-19 en la población: 0,1%

Determinación de valores iniciales:

$$I_0 = N * Prevalencia = 2250 * 0,001 = 2,25 \approx 2$$

(Nota: se asume que ninguno de los empleados ha sido infectado)

Subpoblación	S	E	I	R
A	1998	0	2	0
B	60	0	0	0
C	40	0	0	0
D	30	0	0	0
E	120	0	0	0
N	2250	0	2	0

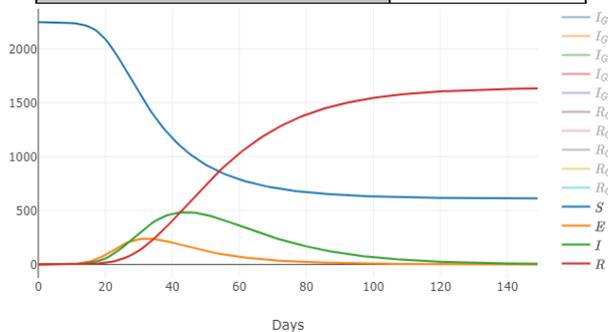
Predicción para la situación pre-intervención:

Cálculo de Ro:

Grupo	Nc	c	Nc*c	N	2250
A	2000	1	2000	p	0,097
B	60	3	180	gama	0,07
C	40	3	120	Sumatoria	4730
D	30	1	30	R0	2,91
E	120	20	2400		

Evolución de la epidemia:

Pico de infectados	485 (44 días)
Número de infectados	1632
Número de hospitalizados	82
Número de fallecidos	38



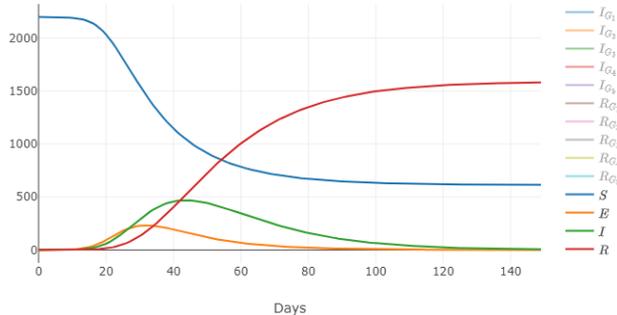
Predicción para la medida 1.a (disminuir el número de repositores a 10, uno por supermercado):

Cálculo de Ro:

Grupo	Nc	c	Nc*c	N	2200
A	2000	1	2000	p	0,097
B	10	3	30	gama	0,07
C	40	3	120	Sumatoria	4580
D	30	1	30	R nuevo	2,82
E	120	20	2400		

Evolución de la epidemia:

Pico de infectados	469 (44 días)
Número de infectados	1580
Número de hospitalizados	79
Número de fallecidos	36



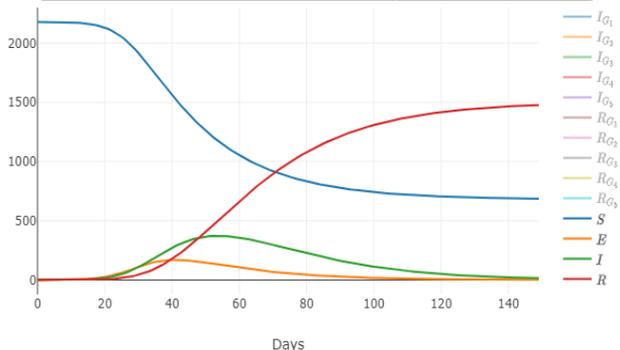
Predicción para la medida 1.e (disminuir el número de cajeros a 50, cinco por supermercado):

Cálculo de R_0 :

Grupo	Nc	c	$Nc \cdot c$	N	
A	2000	1	2000	p	0,097
B	60	3	30	gama	0,07
C	40	3	120	Sumatoria	3180
D	30	1	30	R nuevo	2,05
E	50	20	1000		

Evolución de la epidemia:

Pico de infectados	373 (54 días)
Número de infectados	1477
Número de hospitalizados	74
Número de fallecidos	34



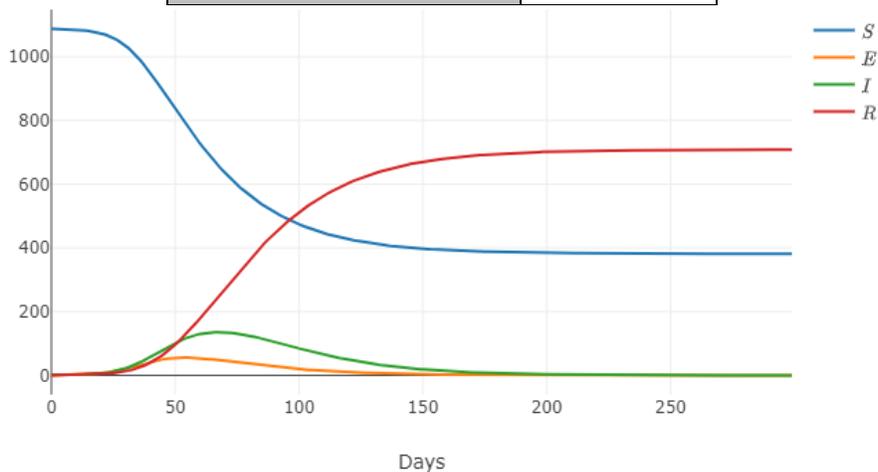
Predicción para la medida 1.a/1.e/3 (disminuir el número de repositorios y cajeros a 10, reducir el número de clientes a la mitad):

Cálculo de R_0 :

Grupo	N_c	c	$N_c \cdot c$	N	
A	1000	1	1000	p	0,097
B	10	3	30	gama	0,07
C	40	3	120	Sumatoria	1380
D	30	1	30	R_0	0,85
E	10	20	200		

Evolución de la epidemia:

Pico de infectados	136 (68 días)
Número de infectados	708
Número de hospitalizados	35
Número de fallecidos	16



Conclusión:

La combinación de medidas 1.a/1.e/3 es la más efectiva en limitar la propagación de la epidemia en la población de interés.

Ejemplo de uso 3 (con tasa de letalidad según grupo etario):

Suponiendo que en el ejemplo 1 (caso pre-intervención) supiéramos la composición etaria de las distintas subpoblaciones, podríamos hacer estimaciones más exactas del número de fallecidos, empleando tasas de letalidad específicas para cada grupo etario.

Grupo etario	Tasa de letalidad (%)*
0-29	0
30-39	0,2
40-49	0,9
50-59	2,1
60-69	6,1
70-79	12,6
>80	19,3

*Datos reportados para CABA (Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, 2020)

Subpoblación	Grupo etario						
	0-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	>80
Subte (A)	0,2	0,5	0,2	0,05	0,04	0,009	0,001
Colectivo (B)	0,2	0,5	0,2	0,05	0,04	0,009	0,001
Bicicleta (C)	0,5	0,22	0,2	0,05	0,03	0	0
Peatonal (D)	0,5	0,22	0,2	0,05	0,03	0	0
Tren (E)	0	0	0	0	0	0	0

La aplicación permite obtener el número total de infectados para cada subpoblación. Suponiendo que dentro de los individuos infectados la composición etaria se mantiene, puede calcularse el número de infectados y fallecidos por grupo etario por subpoblación, y a partir de esto una mejor estimación del número total de fallecidos:

Subpoblación	Infectados totales	Grupo etario						
		0-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	>80
Subte (A)	174	34,8	87	34,8	8,7	6,96	1,566	0,174
Colectivo (B)	319	63,8	159,5	63,8	15,95	12,76	2,871	0,319
Bicicleta (C)	18	9	3,96	3,6	0,9	0,54	0	0
Peatonal (D)	19	9,5	4,18	3,8	0,95	0,57	0	0
Tren (E)	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	530	117,1	254,64	106	26,5	20,83	4,437	0,493

Grupo etario	Infectados	Fallecidos
0-29	117,1	0
30-39	254,64	0,50928
40-49	106	0,954
50-59	26,5	0,5565
60-69	20,83	1,27
70-79	4,437	0,5590
>80	0,493	0,0951
Total	530	3,94

Ejemplo de uso 4 (con tasas de contacto desglosadas):

Usando datos sobre la estructura etaria de la población y disgregando el número de contactos según el contexto en que se dan, se puede evaluar el efecto de eliminar o disminuir el contacto en determinadas actividades.

Por ejemplo, suponiendo que la población argentina tiene la siguiente composición etaria, y en cada grupo etario predominan los siguientes tipos de contactos:

Grupo etario	Población ^a	Contactos totales ^b	Contactos (casa) ^b	Contactos (trabajo) ^b	Contactos (escuela) ^b	Contactos (transporte) ^b	Contactos (recreación) ^b	Contactos (otros) ^b
0-3	3735000	10	8	0	0	1	1	0
4-20	11655000	26	4	0	15	6	1	0
21-30	7200000	19	2	7	1	7	1	1
31-60	15930000	17	2	7	0	6	1	1
60+	6480000	6	2	0	0	2	1	1
Total	45000000							

^aDatos adaptados de INDEC, 2010.

^bDatos adaptados de Mossong et al., 2008

Podría estimarse para esta situación basal el R_0 :

Grupo	Nc	c	Nc*c	N	45000000
0 a 3	3735000	10	37350000	p	0,01
4 a 20	11655000	26	303030000	gama	0,07
21 a 30	7200000	19	136800000	Sumatoria	786870000
31 a 60	15930000	17	270810000	R0	2,498
Más de 60	6480000	6	38880000		

Así como el impacto de, por ejemplo, el aislamiento total de individuos en los grupos etarios de 0 a 3 años y mayores de 60 años, junto con el cierre de escuelas, la cancelación de eventos de recreación masivos y la maximización de medidas de protección en trabajo y transporte:

Nc	c (casa)	c (trabajo)	c (escuela)	c (transporte)	c (recreación)	c (otros)	c (total)
3735000	8	0	0	0	0	0	8
11655000	4	0	0	1	0	0	5
7200000	2	2	0	1	0	1	6
15930000	2	2	0	1	0	1	6
6480000	2	0	0	0	0	0	2

Nc	C	Nc*c	N	45000000
3735000	8	29880000		
11655000	5	58275000		
7200000	6	43200000	Sumatoria n	239895000
15930000	6	95580000	R nuevo	0,76
6480000	2	12960000		

Ejemplo de uso 5:

Es posible emplear la definición general de Ro en función de las tasas de contacto,

$$R_0 = \frac{p}{\gamma N} \sum_{c=0}^{N-1} c * N_c$$

para predecir el efecto de medidas sanitarias que tengan como blanco redes sociales específicas, para un número más amplio de subpoblaciones. Por ejemplo, suponiendo conocida la cantidad de trabajadores esenciales y no esenciales, con trabajos de alto o bajo contacto, y el número de desempleados, así como las tasas de contacto para cada grupo en diferentes contextos (contactos en la casa, en el trabajo, en el vecindario, en el transporte, etc.), puede calcularse el Ro resultante del impacto de alguna intervención particular.

En la siguiente tabla se muestran los valores de Ro predichos para una situación previa a la intervención, en base a información sobre número de trabajadores y tasas de contacto, y para una intervención donde se mantiene a toda la población en casa, excepto a trabajadores esenciales, y se minimizan los contactos en contextos de trabajo y transporte. Los cálculos fueron realizados asumiendo los siguientes valores para los parámetros epidemiológicos: $p = 0,01$, $\gamma = 0,07$.

Situación pre-intervención						
Grupo	Población	Contacto domiciliario	Contacto vecinal	Contacto transporte	Contacto laboral	Contacto total
TEAC	1000	1	3	2	36	7
TEBC	1000	2	3	2	9	38
TNAC	20000	1	3	2	36	12
TNBC	3000	2	3	2	9	11
ST	6500	2	3	2	7	2
Ro = 3,80						
Situación pos-intervención						

Grupo etario	Población	Contacto domiciliario	Contacto vecinal	Contacto transporte	Contacto laboral	Contacto total
TEAC	1000	1	0	1	15	17
TEBC	1000	2	0	1	2	5
TNAC	20000	1	0	0	0	1
TNBC	3000	2	0	0	0	2
ST	6500	2	0	0	0	2
$R_0 = 0,28$						

TEAC: trabajador esencial, alto contacto; TEBC: trabajador esencial, bajo contacto; TNAC: trabajador no esencial, alto contacto; TNBC: trabajador no esencial, bajo contacto; ST: sin trabajo

También existe la posibilidad de calcular el grado o la intensidad de una intervención, necesario para producir un R_0 igual a uno. En la situación hipotética de la tabla, por ejemplo, podría calcularse el número máximo de contactos totales que debería tener la población de trabajadores no esenciales de alto contacto, para que el R_0 sea igual o menor a uno a partir de la fórmula generalizada del R_0 :

$$c_{TNAC} = \frac{\gamma N}{p} - \frac{[N_{TEAC}c_{TEAC} + N_{TEBC}c_{TEBC} + N_{TNBC}c_{TNBC} + N_{ST}c_{ST}]}{N_{4-20}}$$

Donde N_x y c_x representan el número de individuos y la tasa de contactos correspondientes al grupo x (TEAC: trabajador esencial, alto contacto; TEBC: trabajador esencial, bajo contacto; TNAC: trabajador no esencial, alto contacto; TNBC: trabajador no esencial, bajo contacto; ST: sin trabajo). Usando esta fórmula puede determinarse que para el ejemplo de la tabla sería necesario que la tasa de contactos totales del grupo TNAC baje a 5,15 para que el R_0 baje a 1, sin alterar las tasas de contacto de los demás grupos. Se puede ensayar cuál es la C o el N que darían un R_0 igual a 1.

Alternativamente, también podría calcularse cuál debería ser la tasa media de contactos laborales que produciría un R_0 igual a 1, a partir de la fórmula:

$$\bar{c}_l = \frac{\gamma}{p} - \frac{\sum N_x * c_{x,nol}}{N}$$

Donde \bar{c}_l es la tasa media de contactos en transporte, ponderada por grupo, y $c_{x,nol}$ es la suma de las tasas de cada tipo de contacto, excepto los laborales, para el grupo x . En el caso del ejemplo de la tabla, sería necesario que la tasa media de contactos laborales baje a 0,67 para que el R_0 baje a 1, sin alterar las tasas de contacto en otros contextos.

Referencias:

Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. Actualización de los casos de coronavirus en la Ciudad. Disponible en: <https://www.buenosaires.gob.ar/coronavirus/noticias/actualizacion-de-los-casos-de-coronavirus-en-la-ciudad-buenos-aires>. Consultado: 18/06/2020.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC), República Argentina. Población total por país de nacimiento, según sexo y grupo de edad. Año 2010. Disponible en: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-CensoNacional-999-999-Censo-2010>.

Mossong J, Hens N, Jit M, et al. Social contacts and mixing patterns relevant to the spread of infectious diseases. PLoS Med. 2008;5(3):e74. doi:10.1371/journal.pmed.0050074