

Modelación Matemática de la Propagación del SARS-CoV-2 en la Ciudad de Bogotá Tercera Versión, **EN REVISIÓN**

Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

1 de Junio de 2020

Resumen

En este documento se utilizan datos globales y regionales de la pandemia del COVID-19 (SARS-CoV-2) en conjunción con un modelo compartimental determinístico tipo *SEIR* para explicar la dinámica de transmisión del SARS-CoV-2. El modelo se construye a partir de información documentada en artículos académicos y criterio de expertos médicos. Adicionalmente, se busca evaluar el potencial impacto de las medidas de aislamiento preventivo obligatorio decretadas.

1. Introducción

En diciembre de 2019 se identificó en Wuhan, provincia de Hubei, República Popular de China, casos de neumonía viral a causa de coronavirus, los cuales se esparcieron rápidamente dentro y fuera de la provincia, causando alerta en los organismos sanitarios internacionales. Posteriormente, el 12 de enero de 2020 la Organización Mundial de la Salud indicó que la neumonía viral presentada en Hubei era producto de un nuevo coronavirus el cual se denominó oficialmente como SARS-CoV-2. El 11 de marzo se declara la pandemia por parte de la OMS dada la afección en número de contagios y muertos en 114 países.

El 6 de marzo de 2020 se diagnosticó el caso índice de COVID-19 en la ciudad de Bogotá: Se trató de una mujer procedente de la ciudad de Milán. Más tarde, el 20 de marzo del mismo año entró en vigencia en la capital el decreto 090 de 2020 el cual limitaba totalmente la libre circulación de vehículos y personas en el territorio de la capital desde el día jueves 19 de marzo de 2020 a las 23:53 horas hasta el 23 de marzo de 2020 a las 23:53 horas. Días

después, el 22 de marzo, mediante el decreto 457, el gobierno nacional amplió a todo el territorio nacional la orden de aislamiento preventivo obligatorio hasta las cero horas del 13 de abril. Posteriormente, mediante el decreto 531 del 8 de abril de 2020 se amplió la medida de aislamiento preventivo obligatorio hasta las cero horas del 27 de abril de 2020. A partir del 27 de abril, se iniciaba una apertura paulatina de la economía por medio del decreto 593 del 24 de abril, que introducía excepciones para la libre circulación de personas, relacionadas con actividades de obras de construcción de edificaciones, cadena de manufactura, juegos de azar y suerte (loterías y chances) y casas de cambio, así como el sector de bicicletas y parqueaderos públicos para vehículos. Posteriormente, el gobierno nacional expide el decreto 749 del 28 de mayo de 2020, el cual extiende la orden de aislamiento preventivo obligatorio pero que introduce 43 excepciones relacionadas con la activación económica.

En el presente documento se reportan los resultados de un modelo dinámico compartimental determinista que clasifica a la población en once categorías (algunas no observables): susceptibles, expuestos, infecciosos moderados, infecciosos que requerirán hospitalización, pacientes en hospitalización general que se recuperarán, pacientes en UCI que se recuperarán, pacientes en cama de recuperación post-UCI, pacientes en hospitalización general que fallecerán, pacientes en UCI que fallecerán, recuperados y muertos. Esto con el fin de brindar un aproximado de los requerimientos de recursos sanitarios en diversos escenarios.

2. Epidemiología del SARS-CoV-2

En Diciembre 30 de 2019, tres muestras de lavado broncoalveolar se recolectaron de un paciente con neumonía de etiología desconocida en el hospital Jinyintan de Wuhan. Dichas muestras fueron positivas para pan-Betacoronavirus; utilizando secuenciamiento por síntesis y por nanoporos se obtuvo la secuencia completa del genoma del virus. Un análisis bioinformático indicó que el virus poseía características típicas de la familia coronavirus y que pertenecía al linaje 2B Betacoronavirus [7]. El SARS-CoV-2 se esparció dentro y fuera de la provincia de Wuhan, incluso a otros países causando temor generalizado, muertes y duras consecuencias económicas. A la fecha del 1 de junio de 2020 el coronavirus se encuentra presente en 213 países y territorios, posee más de 6 millones de casos confirmados en todo el mundo y ha causado más de 300 mil decesos.

La información acerca del COVID-19 aún posee incertidumbre. Sin embargo, la mayoría de las publicaciones sitúan en número básico de repro-

ducción R_0 entre 2,0 y 3,0 [8]. Se sabe que un porcentaje significativo de los infectados nunca desarrolla síntomas: Un estudio conducido en el crucero Diamond Princess estimó que el 17,9% de los casos totales son asintomáticos; el mismo estudio, presenta los resultados de un análisis de sensibilidad reportando que la proporción de asintomáticos puede variar entre 20,6% y 39,9% [5]. Otro estudio conducido en los japoneses evacuados de la provincia de Wuhan, reveló que el porcentaje de asintomáticos era 41,6% (IC: 16,7%; 66,7%) y con un supuesto adicional se estableció que esta proporción podía estar al rededor del 33,3% (IC: 8,3; 58,3%) [6]. Adicionalmente, según [4], la mediana del tiempo de incubación del virus es 5,1 días (IC 95%: 4.5 ; 5.8 días).

El documento de la misión conjunta de la OMS y China [7] señala que al rededor del 80% de los casos confirmados en laboratorio en el país asiático presentan síntomas leves y moderados; lo cual incluye casos de no-neumonía y neumonía. Que el 13,8% presentan síntomas severos lo cual incluye disnea, frecuencia respiratoria mayor a 30/mín (taquipnea), saturación de oxígeno en la sangre menor o igual a 93% (hipoxia), razón entre la presión arterial de oxígeno sobre la fracción inspirada de oxígeno menor de 300 mm Hg y/o infiltrados pulmonares de más del 50% del campo pulmonar dentro de las 24 a 48 horas. Finalmente, el documento reporta que un 6,1% de los casos son críticos; lo cual incluye falla respiratoria (que requiere ventilación mecánica), shock séptico y/o falla multiorgánica.

En cuanto a la mortalidad de pacientes críticos, un estudio observacional descriptivo donde se observaron a 24 pacientes admitidos en UCI, con una media de edad de 64 años e inicio de síntomas 7 días antes de la admisión donde el 75% de los pacientes requirieron ventilación mecánica [1], reporta que el 50% de los pacientes fallecieron durante el periodo de seguimiento. Otro estudio observacional descriptivo retrospectivo conducido en Wuhan, que tuvo en cuenta 52 pacientes adultos en estado crítico con una media de edad de 59,7 años, reportó que el 61,5% de estos individuos fallecieron [9].

La siguiente sección del presente documento introduce el modelo básico para la simulación de escenarios y explica los supuestos del mismo; la sección 4 reporta los resultados y la sección 5 recolecta las conclusiones, limitaciones y trabajo futuro.

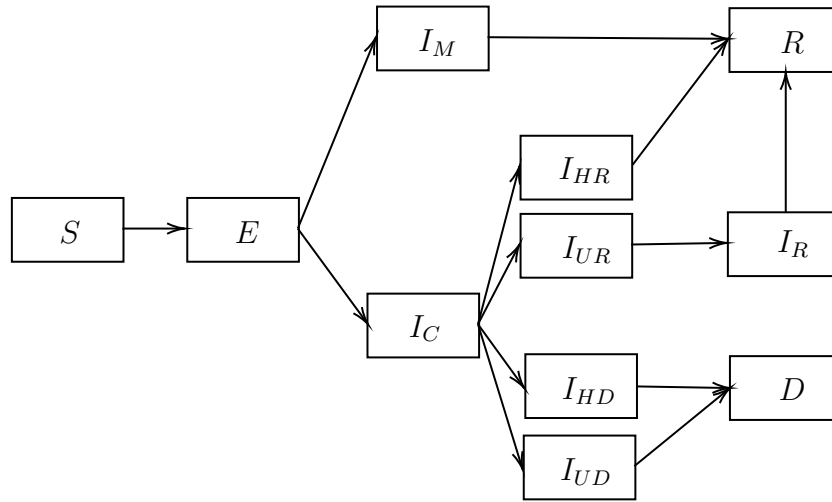


Figura 1: Diagrama del modelo SEIHR.

3. Modelo

3.1. Estructura

La estructura del modelo aquí presentada es una adaptación del modelo presentado en <https://mrc-ide.github.io/global-lmic-reports/parameters.html>, que nos permite realizar simulaciones basándonos en métodos de ecuaciones diferenciales ordinarias. La figura 1 exhibe el diagrama del modelo SEIHR.

Los compartimentos en los cuales se divide la población se describen a continuación:

1. Susceptibles (S): Aquellos individuos que no han sido infectados por el patógeno y es posible que sean infectados por el mismo.
2. Expuestos (E): Aquellos individuos que se encuentran en el periodo de latencia. Es decir, han sido inoculados por el patógeno pero aún no son infecciosos.
3. Infecciosos Moderados (I_M): Aquellos individuos de la población que han sido inoculados por el virus, son infecciosos pero que no requieren ni requerirán cuidados hospitalarios.
4. Infecciosos Pre-Hospitalarios (I_C): Aquellos individuos de la población que han sido inoculados por el virus, son infecciosos, que no se encuentran hospitalizados, pero requerirán cuidados hospitalarios.

5. Pacientes en Hospitalización General que se Recuperarán (I_{HR}).
6. Pacientes en UCI que se Recuperarán (I_{UR}).
7. Pacientes en Hospitalización General que Fallecerán (I_{HD}).
8. Pacientes en UCI que Fallecerán (I_{UD}).
9. Pacientes en Cama de Recuperación Post-UCI (I_R).
10. Recuperados (R): Aquellos individuos que se recuperan de la infección, habiendo desarrollado anticuerpos de tal manera que no se vuelven a infectar.
11. Muertos (D): Aquellos individuos que no superan la infección y fallecen.

Una vez definidos los compartimentos, se procede a evaluar la transición entre los mismos (ver figura 1). Una persona solo puede ser infectada por alguno de los individuos en los compartimentos de individuos infecciosos I . Al ser inoculado por el patógeno, el individuo pasa al grupo de expuestos (E). Pasado un tiempo conocido como periodo de latencia, la persona en el estado de expuestos tiene dos posibilidades:

1. Ingresar al compartimento de infecciosos moderados (I_M): Aquellos que se recuperarán sin requerir ningún tipo de cuidado hospitalario.
2. Ingresar al compartimento de infecciosos pre-hospitalarios (I_C): Aquellos individuos que requerirán hospitalización.

Una vez termina el periodo infecciosos de un individuo en el compartimento I_M , este se mueve al compartimento de los recuperados (R) independientemente de si aún presenta algunos síntomas leves. Por otro lado, después de un tiempo en el compartimento, los individuos pre-hospitalarios seguirán uno de los siguientes cuatro caminos

1. Ingresar al compartimento de los hospitalizados que se recuperarán (I_{HR}).
2. Ingresar al compartimento de los individuos que requieren UCI y sobrevivirán (I_{UR}).
3. Ingresar al compartimento de los individuos que requieren hospitalización y fallecerán (I_{HD}).

4. Ingresar al compartimento de los individuos que requieren UCI y fallecerán (I_{UD}).

En este momento vale la pena mencionar que los estados I son latentes. Esto es: En la práctica no es posible determinar en que compartimento se encuentra cada individuo dado que no es posible saber con certeza el desenlace de cada infección. Una forma adecuada de entender este detalle es en términos de probabilidades. Una vez un individuo en I_{HR} es dado de alta, este se mueve al compartimento de recuperados. Para los individuos en el compartimento I_{UR} existe un paso intermedio: Antes de pasar al grupo de los recuperados, estos se mueven a una cama de recuperación post-UCI (I_R). Los individuos en los compartimentos I_{HD} e I_{UD} lamentablemente fallecen después de un periodo de estancia en cada uno de los compartimentos. Esto es, ingresan al compartimento D .

Para tratar el modelo con los métodos numéricos estándar y la teoría de sistemas dinámicos se realizan los siguientes supuestos usuales:

- (S1) Todas las personas de la población se comportan de la misma manera. Es decir, los individuos tienen y acogen hábitos similares.
- (S2) Todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser susceptibles a una enfermedad dada.
- (S3) Todas las personas se relacionan con otras personas de manera aleatoria.

Gracias a estos supuestos, es posible simular los escenarios haciendo uso de los métodos de ecuaciones diferenciales ordinarias. Las ecuaciones del modelo se describen a continuación (note que por facilidad en la interpretación, el tamaño de cada compartimento se presenta con la misma notación que en la figura 1 y N simboliza el tamaño de la población). Se recomienda consultar [2] para un tratamiento amplio de modelización de infecciones agudas.

$$\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= -S(\beta_M(t)I_M + \beta_C(t)I_C + \beta_{HR}(t)I_{HR} + \beta_{UR}(t)I_{UR} + \\
&\quad \beta_{HD}(t)I_{HD} + \beta_{UD}(t)I_{UD} + \beta_R(t)I_R)/N \\
\frac{dE}{dt} &= S(\beta_M(t)I_M + \beta_C(t)I_C + \beta_{HR}(t)I_{HR} + \beta_{UR}(t)I_{UR} + \\
&\quad \beta_{HD}(t)I_{HD} + \beta_{UD}(t)I_{UD} + \beta_R(t)I_R)/N - \omega E \\
\frac{dI_M}{dt} &= \delta_M \omega E - \gamma_M I_M \\
\frac{dI_C}{dt} &= (1 - \delta_M) \omega E - \sigma_C I_C \\
\frac{dI_{HR}}{dt} &= \delta_{HR} \sigma_C I_C - \gamma_{HR} I_{HR} \\
\frac{dI_{UR}}{dt} &= \delta_{UR} \sigma_C I_C - \nu I_{UR} \\
\frac{dI_{HD}}{dt} &= \delta_{HD} \sigma_C I_C - \sigma_{HD} I_{HD} \\
\frac{dI_{UD}}{dt} &= (1 - \delta_{HR} - \delta_{UR} - \delta_{HD}) \sigma_C I_C - \sigma_{UD} I_{UD} \\
\frac{dI_R}{dt} &= \nu I_{UR} - \gamma_R I_R \\
\frac{dR}{dt} &= \gamma_M I_M + \gamma_{HR} I_{HR} + \gamma_R I_R \\
\frac{dD}{dt} &= \sigma_{HD} I_{HD} + \sigma_{UD} I_{UD} \\
\frac{dN}{dt} &= -(\sigma_{HD} I_{HD} + \sigma_{UD} I_{UD})
\end{aligned}$$

Donde

1. $\beta_i(t)$ es la tasa de transmisión en el momento t para un individuo en el compartimento I_i con $i \in \{M, C, HR, UR, HD, UD, R\}$. Esta tasa se interpreta como la cantidad de infectados que genera un individuo en el compartimento correspondiente por día.
2. ω es el recíproco del periodo de latencia.
3. δ_M es la probabilidad de ingresar al compartimento de los infecciosos moderados.
4. γ_M es el recíproco del periodo infeccioso para un individuo en el compartimento I_M .

5. σ_C , es el recíproco del tiempo promedio de estadía en el compartimento I_C .
6. δ_{HR} es la probabilidad de ingresar al compartimento I_{HR} para un individuo que sale del compartimento I_C .
7. γ_{HR} es el recíproco del tiempo medio de estadía en hospitalización general para un individuo que se va a recuperar.
8. δ_{UR} es la probabilidad de ingresar al compartimento I_{UR} para un individuo que sale del compartimento I_C .
9. γ_{UR} es el recíproco del tiempo medio de estadía en unidad de cuidados intensivos para un individuo que se va a recuperar.
10. ν es el recíproco del tiempo promedio de estadía en UCI antes de pasar a cama de recuperación.
11. δ_{HD} es la probabilidad de ingresar al compartimento I_{HD} para un individuo que sale del compartimento I_C .
12. σ_{HD} es el recíproco del tiempo al fallecimiento promedio para los individuos en hospitalización general.
13. σ_{UD} es el recíproco del tiempo medio al fallecimiento para los individuos en unidad de cuidados intensivos.
14. γ_R es el recíproco del tiempo medio en cama de recuperación post-UCI.

3.2. Parámetros

En esta subsección se presenta la adaptación de los parámetros reportados en <https://mrc-ide.github.io/global-lmic-reports/parameters.html> adaptados a la demografía bogotana.

3.2.1. Probabilidades

Las probabilidades de severidad estimadas son calculadas usando teoría de probabilidad, de acuerdo a la información que se lista a continuación y teniendo en cuenta la estructura etaria de Bogotá reportada por el DANE para 2019.

Adicional a estos valores, asumimos una probabilidad de muerte para pacientes críticos de 50% independientemente del grupo etario que se encuentre.

Grupo Etario	Tamaño	Probabilidad de Requerir Hospitalización	Probabilidad de Caso Crítico	Probabilidad de Morir Caso No Crítico
[0, 5)	486341	0,000744192	0,05022296	0,0125702
[5, 10)	477908	0,000634166	0,05022296	0,0125702
[10, 15)	492552	0,001171109	0,05022296	0,0125702
[15, 20)	562016	0,002394593	0,05022296	0,0125702
[20, 25)	718131	0,005346437	0,05022296	0,0125702
[25, 30)	724454	0,010289885	0,05022296	0,0125702
[30, 35)	651833	0,016234604	0,05022296	0,0125702
[35, 40)	599112	0,023349169	0,05321494	0,01336115
[40, 45)	519983	0,028944623	0,05974426	0,01510469
[45, 50)	470334	0,038607042	0,07460288	0,01916412
[50, 55)	465196	0,057734879	0,10361242	0,02747752
[55, 60)	423099	0,072422135	0,14942799	0,04176211
[60, 65)	336100	0,101602458	0,2237773	0,06853166
[65, 70)	246821	0,116979814	0,30698592	0,10530232
[70, 75)	173019	0,146099064	0,38577955	0,14930573
[75, 80)	112227	0,176634654	0,46121786	0,20349534
[80, ∞)	133745	0,180000000	0,70944444	0,5804312

Cuadro 1: Tamaño de los grupos etarios y probabilidades de severidad condicional.

En este punto es pertinente especificar el significado de las cantidades reportadas. La primera columna, **probabilidad de requerir hospitalización**, se refiere a la probabilidad de requerir hospitalización dado que se pertenece a un grupo etario (notación: $P(H|G_i)$). Por ejemplo, la probabilidad de requerir algún tipo de cuidado hospitalario dado que se tiene entre 35 y 40 años es aproximadamente 2,3 %.

La segunda columna, **probabilidad de caso crítico**, indica la probabilidad de ser caso crítico dado que se requiere hospitalización y se pertenece a un grupo etario $P(C|H \cap G_i)$. La tercera columna reporta la probabilidad de morir dado que se es caso no crítico (i.e. caso de hospitalización general) y pertenece a un grupo de edad dado $P(D|G \cap G_i)$. Por último, se estima que la probabilidad de morir dado que se es un caso crítico y se pertenece a un grupo etario particular $P(D|C \cap G_i) = 0,5$. Definiendo los siguientes eventos, es posible determinar las siguientes probabilidades condicionales de severidad para una persona (que reside en Bogotá) seleccionada al azar y contagiada por el SARS-CoV-2.

1. G_i : La persona infectada pertenece al i -ésimo grupo etario.
2. H : La persona infectada requiere hospitalización (hospitalización general o UCI).

3. G : La persona infectada requiere hospitalización general.
4. C : La persona infectada requiere cuidados críticos.
5. D : La persona infectada fallece.

Con estas definiciones es posible calcular las siguientes probabilidades:

1. $P(H) = \sum_{i=1}^N P(H|G_i)P(G_i) = 0,034421523$.
2. $P(C|H) = \sum_{i=1}^N P(C|H \cap G_i)P(H|G_i)P(G_i)/P(H) = 0,245132997$.
3. $P(G|H) = 1 - P(C|H) = 0,754867003$.
4. $P(D|G) = \sum_{i=1}^N P(D|G \cap G_i)P(G|H \cap G_i)P(H|G_i)P(G_i)/P(G) = 0,07719566$.
5. $P(D|C) = \sum_{i=1}^N P(D|C \cap G_i)P(C|H \cap G_i)P(H|G_i)P(G_i)/P(C) = 0,5$.

Así, podemos calcular los parámetros δ :

$$\begin{aligned}\delta_M &= 1 - P(H) = 0,965578477, \\ \delta_{HR} &= P(G|H) \times (1 - P(D|G)) = 0,696594546, \\ \delta_{UR} &= P(C|H) \times (1 - P(D|C)) = 0,122566499, \\ \delta_{HD} &= P(G|H) \times P(D|G) = 0,058272457.\end{aligned}$$

3.2.2. Tiempos de Estadía

Se asumen los mismos tiempos de estadía en los compartimentos del modelo referenciado anteriormente.

Notación	Interpretación	Valor (Días)
$\frac{1}{\psi}$	Tiempo promedio de latencia	4,6
$\frac{1}{\gamma_M}$	Tiempo promedio en el compartimento I_M	2,1
$\frac{\sigma_C}{\gamma_C}$	Tiempo promedio infeccioso de un infeccioso que requerirá hospitalización	4,5
$\frac{1}{\gamma_{HR}}$	Tiempo promedio en hospitalización general antes de recuperarse	9,5
$\frac{1}{\gamma_{UR}}$	Tiempo promedio en UCI antes de pasar a cama de recuperación	11,3
$\frac{1}{\gamma_R}$	Tiempo promedio en cama de recuperación antes de ser dado de alta	3,4
$\frac{\sigma_{HD}}{\gamma_D}$	Tiempo promedio en hospitalización general antes de fallecer	7,6
$\frac{1}{\sigma_{UD}}$	Tiempo promedio en unidad de cuidados intensivos antes de fallecer	10,1

Cuadro 2: Tiempos promedio de permanencia en cada uno de los compartimentos

3.2.3. Tasas de Transmisión

La tasa de transmisión se define como la cantidad promedio de casos secundarios que un caso primario genera por día durante el periodo infeccioso. Para un escenario sin mitigación asumimos un número básico de reproducción $R_0 = 3,0$. Asumimos un contagio intra-hospitalario pequeño pero existente, esto se incluye en el modelo como $\beta_i(t) = \beta_H := 0,01$ para $i \in \{HR, UR, HD, UD, R\}$. Para los estados infecciosos restantes asumimos una función definida de la siguiente manera:

$$\beta_M(t) = \beta_C(t) = (1 - A(t))\beta_0 + A(t)\beta_1,$$

donde β_0 es la tasa de transmisión para un individuo que circula en la población sin restricciones y β_1 es la tasa de transmisión para un individuo que limita sus contactos únicamente a las personas con las que convive. Es posible mostrar esta tasa de transmisibilidad como $\beta_1 = -\kappa_1 \times \log(1 - c)$ [3, p. 18], donde κ_1 es la tasa de contactos diaria y c es la probabilidad de contagio; tomando $c = 0,01$ y $\kappa_1 = 1,98$ estimamos que $\beta_1 = 0,019899665$. Finalmente, asumiendo $A(t) = 0$, $R_0 = 3,0$ y las tasas de de transmisión previamente especificadas, es posible estimar β_0 ; el valor estimado es $\beta_0 = 1,375$.

4. Resultados de la Simulación

Se consideran tres escenarios: El primer escenario asume que no se tomaron acciones e inicia la simulación desde el 15 de marzo. Los últimos dos escenarios asumen un $A(t)$ obtenido a partir de un índice de movilidad hasta junio primero. A partir del primero de junio, el segundo y tercer escenario asumen un distanciamiento social del 40 % y 60 % respectivamente.

Adicionalmente, Los resultados aquí presentados son simulaciones de un escenario hipotético y no un pronóstico del curso de la epidemia.

4.1. Escenario Sin Acciones de Mitigación

Los resultados de la proyección por cada semana se muestran a en el cuadro 3. En este escenario se impone que $A_0(t) = A_1(t) = 0$ para todo t . En este escenario se asume una cantidad inicial de 243,00 expuestos, 78,21 infecciosos leves, 2,79 infectados que requerirán hospitalización y un individuo en hospitalización general que se recuperará. Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se reporta la suma $I_{HR} + I_{HD} + I_R$ como la

demanda de hospitalización general; análogamente $I_{UR} + I_{UD}$ es la demanda de unidades de cuidado intensivo.

Fecha	Susceptibles	Síntomas	Requerirán	Requieren	Requieren	Fallecidos	Recuperados	Acumulado Infectados	R_t
		Leves y Moderados	Hospitalización	Hospitalización General	UCI				
15/03/2020	7592546,00	78,21	2,79	1,00	0,00	0,00	0,00	324,00	3,00
22/03/2020	7590743,04	347,48	19,20	9,12	2,82	0,58	596,45	2126,96	3,00
29/03/2020	7582341,59	1621,71	90,94	47,34	15,47	4,69	3370,49	10528,41	3,00
05/04/2020	7543302,26	7543,30	423,55	223,56	73,48	24,74	16301,78	49567,74	2,98
12/04/2020	7365987,38	34427,90	1938,84	1033,68	340,03	118,18	75887,80	226882,62	2,91
19/04/2020	6637542,44	144478,45	8244,03	4567,38	1503,27	540,17	336668,55	955327,56	2,62
26/04/2020	4567679,66	444135,90	26669,63	17042,06	5619,78	2246,19	1271688,82	3025190,34	1,79
03/05/2020	2061256,01	666629,89	45880,94	41529,83	13779,52	7280,98	3257003,37	5531613,99	0,81
10/05/2020	926060,05	456801,06	38856,15	57850,55	19465,04	16177,16	5246352,85	6666809,95	0,36
17/05/2020	594049,95	200976,67	21156,94	52830,28	18199,26	25862,19	6352314,86	6998820,05	0,23
24/05/2020	495109,88	74012,18	9218,63	37510,27	13355,10	33480,58	6814713,94	7097760,12	0,20
31/05/2020	463353,39	25629,11	3587,00	23025,53	8545,39	38424,79	6990890,10	7129516,61	0,18
07/06/2020	452766,00	8714,65	1314,49	12963,96	5051,92	41292,07	7057413,25	7140104,00	0,18
14/06/2020	449177,21	2954,04	466,30	6923,26	2850,04	42847,28	7083125,19	7143692,79	0,18
21/06/2020	447949,30	1003,56	162,56	3577,25	1563,20	43657,51	7093416,99	7144920,70	0,18
28/06/2020	447525,60	342,50	56,20	1810,30	842,89	44069,53	7097696,89	7145344,40	0,18
05/07/2020	447377,87	117,66	19,38	904,23	449,84	44276,07	7099544,27	7145492,13	0,18
12/07/2020	447325,63	40,78	6,69	448,05	238,62	44378,78	7100369,17	7145544,37	0,18
19/07/2020	447306,81	14,31	2,33	220,98	126,14	44429,65	7100748,44	7145563,19	0,18
26/07/2020	447299,86	5,11	0,82	108,73	66,56	44454,80	7100927,09	7145570,14	0,18
02/08/2020	447297,21	1,86	0,29	53,45	35,09	44467,24	7101012,88	7145572,79	0,18
09/08/2020	447296,17	0,70	0,11	26,29	18,50	44473,39	7101054,72	7145573,83	0,18
16/08/2020	447295,74	0,27	0,04	12,94	9,76	44476,43	7101075,38	7145574,26	0,18
23/08/2020	447295,55	0,11	0,02	6,38	5,15	44477,94	7101085,67	7145574,45	0,18
30/08/2020	447295,47	0,05	0,01	3,15	2,72	44478,69	7101090,84	7145574,53	0,18
06/09/2020	447295,43	0,02	0,00	1,56	1,44	44479,06	7101093,45	7145574,57	0,18
13/09/2020	447295,41	0,01	0,00	0,78	0,76	44479,25	7101094,78	7145574,59	0,18
20/09/2020	447295,41	0,00	0,00	0,39	0,40	44479,34	7101095,45	7145574,59	0,18

Cuadro 3: Resultados de la proyección en el escenario sin cuarentena. R_t simboliza el número efectivo de reproducción y fue calculado con el método de la matriz de siguiente generación.

En esta simulación se tiene una demanda máxima de unidades de cuidados intensivos de 19745,95 el 12 de mayo de 2020 y una demanda máxima de hospitalización general de 58350,06 en la misma fecha. Con los parámetros actuales se estiman 44479,43 fallecidos y un acumulado de 5621568,17 infectados en total. Se alcanzan los requerimientos de 300, 500, 1000, 5000 y 10000 unidades de cuidados intensivos el 12, 14, 18, 26 y 30 de abril respectivamente.

4.2. Escenario con Distanciamiento Social del 40%

En este escenario se establece $A(t)$ a partir de un índice de movilidad hasta el primero de junio, a partir de esta fecha se asume $A(t) = 0,4$. Adicionalmente, se inicia la simulación el 12 de abril con 1018,685 expuestos, 983,62 infecciosos moderados, 36,91 infecciosos que requerirán hospitalización, 107,91 pacientes en hospitalización general que se recuperarán, 23,5 pacientes en unidad de cuidado intensivo que se recuperarán, 9,03 pacientes en hospitalización general que fallecerán, 23,5 pacientes en unidad de cuidados intensivos que fallecerán y 49 individuos fallecidos. En el cuadro 4 puede

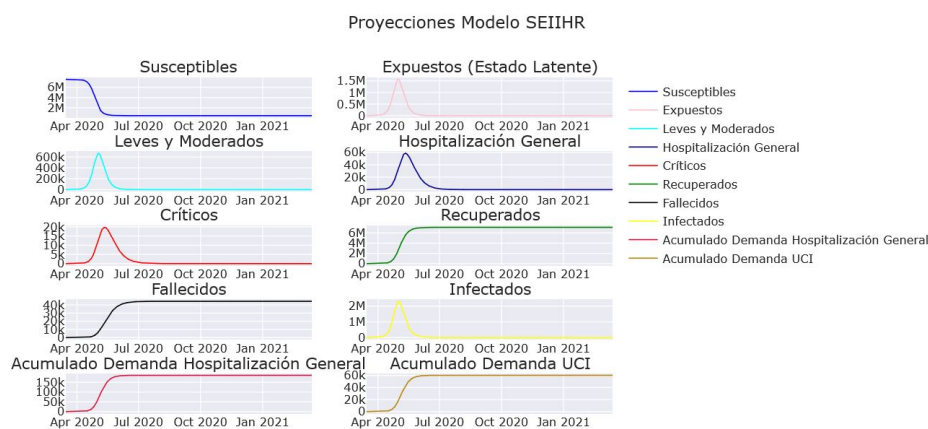


Figura 2: Simulación a un año del escenario sin intervención. El eje de las abscisas corresponde al número de días a partir del 15 de marzo y el eje de las ordenadas corresponde al número de personas en el compartimento.

ver un resumen de los resultados.

Vemos que la cantidad de infectados, requerimientos hospitalarios y fallecidos disminuye significativamente; adicionalmente, note que las demandas máximas de recursos sanitarios tienen lugar en un momento posterior comparado al primer escenario y que la epidemia dura una mayor cantidad de tiempo.

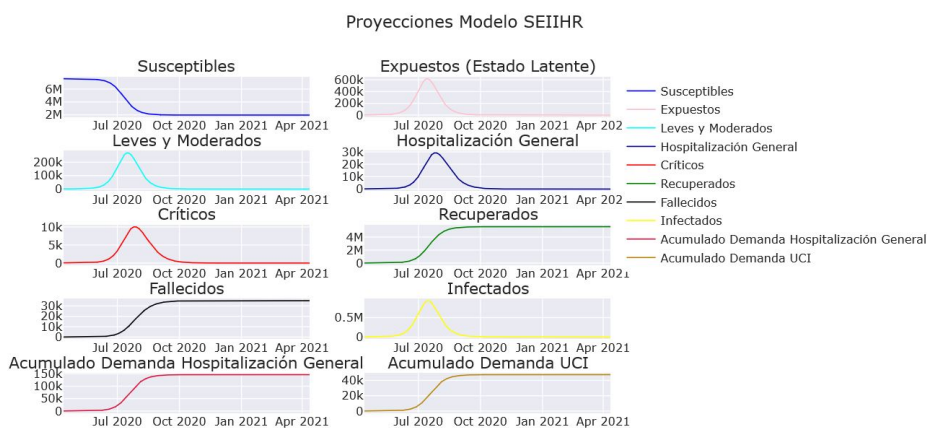


Figura 3: Simulación a un año del escenario con distanciamiento social del 40 %

En este escenario se tiene una demanda máxima de unidades de cuidados intensivos de 10071,92 el 27 de julio de 2020 y una demanda máxima de hos-

Fecha	Susceptibles	Síntomas Leves y Moderados	Requerirán Hospitalización	Requieren Hospitalización General	Requieren UCI	Fallecidos	Recuperados	Acumulado Infectados	R_t
12/04/2020	7590618,78	983,62	36,91	117,00	47,00	49,00	0,00	1233,53	1,00
19/04/2020	7587710,17	714,81	48,54	95,45	36,21	69,54	2483,68	4142,14	1,05
27/04/2020	7583779,98	930,59	65,50	95,73	34,77	88,90	5640,65	8072,33	1,42
4/05/2020	7578568,31	1314,46	90,89	113,58	40,02	106,91	9408,22	13284,01	1,51
11/05/2020	7569991,02	2074,55	139,30	153,27	52,87	129,53	14990,99	21861,30	1,66
18/05/2020	7554682,67	3590,92	236,79	235,66	80,16	162,25	24335,50	37169,64	1,65
25/05/2020	7527530,14	6396,41	418,63	395,93	133,60	215,36	40773,92	64322,17	1,63
1/06/2020	7479663,58	11308,23	740,48	690,72	232,23	306,88	69920,69	112188,73	1,79
8/06/2020	7381931,02	22251,64	1425,80	1256,51	421,46	469,52	124198,07	209921,29	1,77
15/06/2020	7192078,52	43680,57	2801,43	2421,59	810,55	776,86	231703,89	399773,80	1,72
22/06/2020	6841358,23	81870,21	5299,88	4663,84	1560,16	1371,73	437916,38	750494,08	1,64
29/06/2020	6252951,50	141123,35	9302,95	8594,39	2877,72	2492,71	808727,58	1338900,81	1,50
6/07/2020	5409314,97	212075,78	14425,99	14540,04	4881,06	4467,60	1405994,01	2182537,34	1,30
13/07/2020	4436597,58	262988,25	18769,01	21626,41	7294,42	7585,70	2222397,44	3155254,73	1,06
20/07/2020	3557298,80	261742,59	19891,11	27383,26	9306,86	11833,94	3131696,18	4034553,52	0,85
27/07/2020	2914029,10	212583,97	17316,69	29308,33	10071,92	16735,54	3953249,01	4677823,22	0,70
3/08/2020	2506424,37	147736,10	12850,02	26967,23	9404,25	21554,81	4575405,16	5085427,95	0,60
10/08/2020	2267950,80	92529,75	8497,27	21944,10	7791,86	25688,62	4990365,20	5323901,51	0,55
17/08/2020	2133769,69	54405,87	5202,48	16250,39	5892,28	28872,62	5245515,31	5458082,63	0,51
24/08/2020	2059626,73	30854,90	3033,42	11216,22	4162,58	31133,57	5395008,05	5532225,59	0,50
31/08/2020	2018999,32	17154,64	1716,81	7348,54	2796,07	32645,27	5480222,36	5572852,99	0,49
7/09/2020	1996822,48	9437,16	954,74	4631,96	1808,99	33612,15	5528054,49	5595029,83	0,48
14/09/2020	1984737,57	5163,25	525,65	2836,41	1137,76	34210,62	5554671,69	5607114,74	0,48
21/09/2020	1978156,35	2817,29	287,82	1699,32	700,29	34572,08	5569409,69	5613695,97	0,48
28/09/2020	1974572,76	1535,35	157,14	1001,17	423,86	34786,39	5577545,89	5617279,56	0,48
5/10/2020	1972621,17	836,35	85,67	582,24	253,17	34911,68	5582029,19	5619231,14	0,48
12/10/2020	1971558,08	455,57	46,68	335,17	149,62	34984,11	5584496,61	5620294,24	0,48
19/10/2020	1970978,79	248,20	25,44	191,38	87,66	35025,63	5585853,42	5620873,52	0,48
26/10/2020	1970663,04	135,25	13,86	108,57	51,00	35049,26	5586599,06	5621189,28	0,47
2/11/2020	1970490,87	73,73	7,55	61,27	29,49	35062,64	5587008,64	5621361,44	0,47
9/11/2020	1970396,97	40,20	4,12	34,43	16,97	35070,17	5587233,54	5621455,35	0,47
16/11/2020	1970345,73	21,93	2,25	19,28	9,72	35074,40	5587357,00	5621506,58	0,47
23/11/2020	1970317,77	11,96	1,22	10,76	5,55	35076,77	5587424,75	5621534,54	0,47
30/11/2020	1970302,51	6,53	0,67	5,99	3,16	35078,09	5587461,93	5621549,80	0,47
7/12/2020	1970294,18	3,56	0,36	3,33	1,79	35078,82	5587482,33	5621558,14	0,47
14/12/2020	1970289,63	1,95	0,20	1,85	1,01	35079,23	5587493,52	5621562,69	0,47
21/12/2020	1970287,14	1,06	0,11	1,02	0,57	35079,46	5587499,66	5621565,17	0,47
28/12/2020	1970285,78	0,58	0,06	0,57	0,32	35079,58	5587503,03	5621566,53	0,47
4/01/2021	1970285,04	0,32	0,03	0,31	0,18	35079,65	5587504,88	5621567,28	0,47
11/01/2021	1970284,63	0,17	0,02	0,17	0,10	35079,69	5587505,89	5621567,68	0,47

Cuadro 4: Resumen de resultados de simulación para el escenario con 40% de distanciamiento social

pitalización general de 29312,25 el 26 de julio. Se estiman 35079,74 fallecidos y un acumulado de 5621568,17 infectados en total. Se alcanzan los requerimientos de 300, 500, 1000, 5000 y 10000 unidades de cuidados intensivos el 5, 10, 18 de junio, 7 y 25 de julio. En este escenario, al levantar las medidas de distanciamiento social, no se tendría un segundo brote.

4.3. Escenario con Distanciamiento Social del 60%

En este escenario se imponen los mismos supuestos que en la simulación anterior en cuanto a los valores iniciales y la evolución de $A(t)$ antes del primero de junio. A partir del primero de junio se asume $A(t) = 60\%$. En el cuadro 5 se puede apreciar un resumen de los resultados de este escenario.

En este escenario se tiene una demanda máxima de unidades de cuidados intensivos de 2081,28 el 31 de agosto de 2020 y una demanda máxima de hospitalización general de 5963,66 el 30 de agosto. Se estiman 17154,05 fallecidos y un acumulado de 2742880,12 infectados manteniendo estos niveles

Fecha	Susceptibles	Síntomas		Requerirán		Requieren		Requieren UCI	Fallecidos	Recuperados	Acumulado Infectados	R_t
		Leves y Moderados	Hospitalización	Hospitalización	Hospitalización General							
12/04/2020	7590618,78	983,62	36,91	117,00	47,00	49,00	0,00	1233,53	1,00			
19/04/2020	7587710,17	714,81	48,54	95,45	36,21	69,54	2483,68	4142,14	1,05			
26/04/2020	7584281,04	899,76	63,15	94,51	34,51	86,49	5193,99	7571,28	1,12			
03/05/2020	7579328,96	1256,84	86,74	109,89	38,87	104,14	8783,34	12523,35	1,21			
10/05/2020	7571388,10	1938,12	130,32	145,59	50,35	125,85	14019,14	20464,21	1,42			
17/05/2020	7557581,46	3329,28	219,47	220,14	75,00	156,63	22666,24	34270,85	1,72			
24/05/2020	7532415,37	5892,92	385,76	366,40	123,74	205,95	37808,97	59436,95	1,63			
31/05/2020	7488255,15	10429,59	682,81	637,39	214,37	290,47	64677,30	103597,17	1,62			
07/06/2020	7433617,43	14322,91	998,79	1056,90	355,55	436,00	107634,94	158234,88	1,20			
14/06/2020	7368522,25	17401,03	1244,38	1484,88	502,15	655,16	161334,67	223330,06	1,19			
21/06/2020	7290504,61	20934,19	1507,10	1908,92	649,11	946,23	226378,06	301347,71	1,18			
28/06/2020	7198257,95	24877,07	1798,51	2352,87	803,43	1310,59	304232,14	393594,37	1,17			
05/07/2020	7090901,42	29128,16	2115,16	2830,08	969,28	1753,06	396130,50	500950,89	1,15			
12/07/2020	6968234,92	33521,10	2446,62	3340,55	1146,69	2279,51	502868,49	623617,39	1,13			
19/07/2020	6830974,43	37821,25	2776,85	3872,58	1331,91	2894,71	624567,90	760877,88	1,11			
26/07/2020	6680915,54	41738,65	3085,17	4404,44	1517,71	3600,45	760457,74	910936,77	1,08			
02/08/2020	6520959,30	44959,43	3348,32	4906,45	1694,14	4394,07	908730,13	1070893,01	1,06			
09/08/2020	6354953,82	47192,81	3543,61	5344,30	1849,48	5267,36	1066530,54	1236898,50	1,03			
16/08/2020	6187351,17	48223,57	3652,82	5683,77	1971,92	6206,20	1230120,69	1404501,15	1,00			
23/08/2020	6022737,60	47954,97	3665,64	5896,24	2051,38	7191,10	1395208,64	1569114,71	0,98			
30/08/2020	5865339,40	46427,87	3581,74	5963,66	2081,24	8198,63	1557389,58	1726512,91	0,95			
06/09/2020	5718614,43	43809,83	3410,63	5881,81	2059,54	9203,54	1712603,86	1873237,89	0,93			
13/09/2020	5585006,59	40358,52	3169,55	5660,68	1989,16	10181,23	1857514,69	2006845,73	0,91			
20/09/2020	5465885,13	36372,37	2880,09	5322,23	1877,19	11109,97	1989737,93	2125967,18	0,89			
27/09/2020	5361639,66	32143,05	2564,50	4896,18	1733,51	11972,55	2107904,18	2230212,65	0,87			
04/10/2020	5271872,95	27920,59	2242,82	4415,13	1569,21	12757,18	2211578,08	2319979,36	0,86			
11/10/2020	5195630,76	23894,96	1931,02	3910,17	1395,04	13457,52	2301084,92	2396221,56	0,84			
18/10/2020	5131621,42	20192,63	1640,37	3407,83	1220,35	14072,12	2377299,02	2460230,90	0,83			
25/10/2020	5078398,28	16883,34	1377,69	2928,46	1052,43	14603,46	2441437,16	2513454,03	0,82			
01/11/2020	5034494,87	13991,87	1146,07	2485,90	896,40	15056,87	2494883,46	2557357,44	0,82			
08/11/2020	4998514,91	11511,08	945,86	2088,14	755,33	15439,43	2539056,66	2593337,41	0,81			
15/11/2020	4969184,88	9413,49	775,54	1738,36	630,63	15759,13	2575319,41	2622667,43	0,81			
22/11/2020	4945378,72	7660,55	632,49	1436,26	522,40	16024,10	2604923,43	2646473,60	0,80			
29/11/2020	4926123,39	6209,31	513,58	1179,13	429,89	16242,23	2628982,09	2665728,93	0,80			
06/12/2020	4910592,68	5016,86	415,55	962,92	351,79	16420,75	2648462,22	2681259,63	0,80			
13/12/2020	4898094,44	4042,91	335,27	782,90	286,55	16566,17	2664188,10	2693757,88	0,80			
20/12/2020	4888054,80	3251,26	269,88	634,23	232,51	16684,15	2676852,69	2703797,52	0,79			
27/12/2020	4880001,84	2610,24	216,83	512,27	188,05	16779,56	2687032,10	2711850,48	0,79			
03/01/2021	4873549,96	2092,79	173,95	412,75	151,70	16856,52	2695201,20	2718302,35	0,79			
10/01/2021	4868385,65	1676,12	139,39	331,91	122,11	16918,45	2701748,79	2723466,66	0,79			
17/01/2021	4864255,04	1341,25	111,58	266,47	98,11	16968,20	2706991,42	2727597,27	0,79			
24/01/2021	4860953,19	1072,54	89,26	213,65	78,72	17008,12	2711855,80	2730899,13	0,79			
31/01/2021	4858315,07	857,20	71,35	171,12	63,09	17040,10	2714539,35	2733537,25	0,79			
07/02/2021	4856208,06	684,79	57,01	136,94	50,51	17065,71	2717219,24	2735644,26	0,79			
14/02/2021	4854525,75	546,86	45,54	109,51	40,41	17086,19	2719359,92	2737326,57	0,79			
21/02/2021	4853182,85	436,59	36,36	87,53	32,31	17102,56	2721069,30	2738669,46	0,79			
28/02/2021	4852111,10	348,48	29,03	69,93	25,82	17115,65	2722433,92	2739741,21	0,79			
07/03/2021	4851255,89	278,10	23,17	55,84	20,62	17126,10	2723523,09	2740596,43	0,79			
14/03/2021	4850573,53	221,91	18,49	44,59	16,47	17134,44	2724392,26	2741278,78	0,79			
21/03/2021	4850029,16	177,05	14,75	35,59	13,15	17141,10	2725085,78	2741823,15	0,79			
28/03/2021	4849594,90	141,24	11,77	28,40	10,49	17146,42	2725639,08	2742257,41	0,79			
04/04/2021	4849248,50	112,67	9,39	22,66	8,37	17150,66	2726080,48	2742603,81	0,79			
11/04/2021	4848972,20	89,87	7,49	18,08	6,68	17154,05	2726432,58	2742880,12	0,79			

Cuadro 5: Resumen de resultados de simulación para el escenario con 40% de distanciamiento social

de distanciamiento social en el largo plazo. Se alcanzan los requerimientos de 300, 500 y 1000 unidades de cuidados intensivos el 5, 14 de junio y 7 de julio. En este escenario, al levantar las medidas de distanciamiento social, se esperaría un segundo brote.

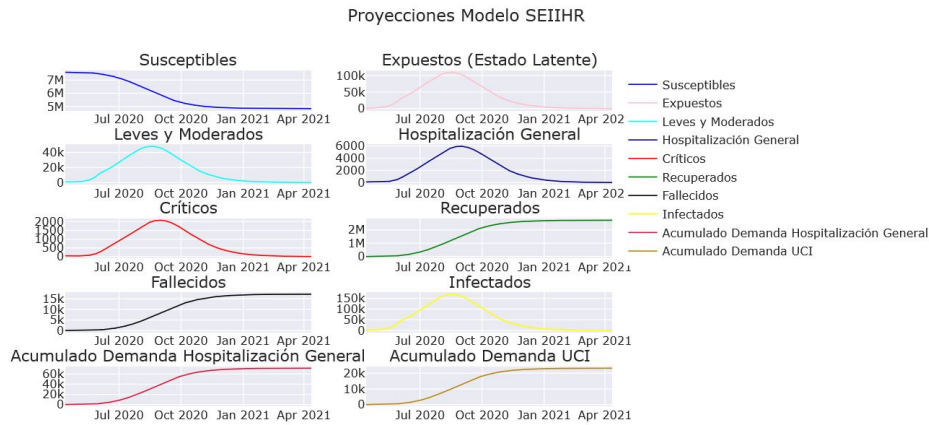


Figura 4: Simulación a un año del escenario con distanciamiento social al 60 %

5. Conclusiones, Limitaciones y Trabajo Futuro

Se ha desarrollado un modelo simple que puede capturar el efecto de la infecciosidad promedio en una población heterogénea y el efecto de las políticas de distanciamiento social para controlar la pandemia del COVID-19. El modelo se puede utilizar para evaluar el impacto de las medidas de aislamiento en la ciudad de Bogotá. Si bien las políticas de aislamiento son una forma de reducir la tasa de transmisión, otras medidas de prevención y autocuidado podrían tener un efecto similar. Se puede apreciar que sin medidas de mitigación, la epidemia del COVID-19 podría colapsar fácilmente el sistema sanitario de la capital. Por lo tanto, las medidas de mitigación son necesarias para evitar la saturación del sistema de salud.

Si bien este es un modelo conceptualmente adecuado para simular una epidemia como la del COVID-19, la incertidumbre en diversos parámetros hacen de este modelo una herramienta para la evaluación cualitativa de las acciones de intervención, más no como un modelo para pronosticar la cantidad de casos futuros. Conforme exista mejor calidad en la información, se podrán refinar los escenarios presentados, cuantificar la incertidumbre y obtener simulaciones que se encuentren más cercanas a la realidad.

Comparando las demandas máximas en cada uno de los escenarios se puede ver que esta cantidad responde en gran medida a cambios en la tasa de transmisibilidad, la cual está fuertemente asociada con el número efectivo de reproducción R_t . Por lo tanto, reducir y monitorear esta última cantidad es uno de los medios para dar un manejo adecuado a la pandemia.

En los resultados se puede ver que para disminuir la demanda de UCIs a una cantidad cercana a las 2000 unidades, es necesario un nivel de aislamiento sostenido del 60 %. Dado que es económicamente inviable mantener al 60 % de la población aislada, se requiere una buena adherencia a las medidas de autocuidado y prevención por parte de la ciudadanía. Dada la complejidad práctica de medir el efecto de las medidas de auto cuidado en una ciudad como Bogotá, este tipo de intervenciones está por fuera del alcance del presente estudio.

Referencias

- [1] P. Bhatraju, B. Ghassemieh, M. Nichols, R. Kim, K. Jerome, A. Nalla, A. Greninger, A. Pipavath, M. Wurfel, L. Evans, P. Kritek, T West, A. Luks, A. Gerbino, C. Dale, J. Goldman, S. O’Mahony, and C. Mikacenic. *Covid-19 in Critically Ill Patients in the Seattle Region — Case Series*. The New England Journal of Medicine, 2020.
- [2] F. Brauer and C. Castillo-Chavez. *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Springer, New York, 2000.
- [3] Matt Keeling, Pejman Rohani, and Babak Pourbohloul. Modeling infectious diseases in humans and animals. *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 47:864–865, 10 2008.
- [4] S. Lauer, Grantz K., Bi Q., Jones F., Zheng Q., Meredith H. Azman A., Reich N., and J. Lessler. *The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application*. Annals of Internal Medicine, 2020.
- [5] K. Mizumoto, K. Kagaya, A. Zarebski, and G. Chowell. *Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020*. Eurosurveillance, 2020.
- [6] H. Nishiura, T. Kobayashi, Miyama T., A. Suzuki, S. Jung, K. Hayashi, R. Kinoshita, Y. Yang, B. Yuan, A. Akhmetzhanov, and N. Linton. *Estimation of the asymptomatic ratio of novel coronavirus infections (COVID-19)*. Osaka Institute of Public Health, 2020.
- [7] World Health Organization. *Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)*. 2020.
- [8] M. Park, A. Cook, J. Lim, Y. Sun, and B. Dickens. *A Systematic Review of COVID-19 Epidemiology Based on Current Evidence*. Journal of Clinical Medicine, 2020.
- [9] X. Yang, Y. Yu, J. Xu, H. Shu, J. Xia, H. Liu, Y. Wu, L. Zhang, Z. Yu, T. Fang, M. Yu, Y. Wang, S. Pan, X. Zou, S. Yuan, and Y. Shang. *Clinical course and outcomes of critically ill patients with SARS-CoV-2 pneumonia in Wuhan, China: a single-centered, retrospective, observational study*. The Lancet, 2020.