

Modelación Matemática de la Propagación del SARS-CoV-2 en la Ciudad de Bogotá Segunda Versión

Autor: Mejía Becerra, Juan Diego ^{*}
Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

Revisión y Discusión: Cucunubá, Zulma M.
Imperial College of London

De la Hoz Restrepo, Fernando
Universidad Nacional de Colombia

Londoño Trujillo, Darío
Universidad de los Andes Colombia

Moyano Romero, Diane
Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

4 de Abril 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 **SEI3RD** 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 impacto de las medidas de aislamiento preventivo obligatorio decretadas.

^{*}El autor agradece a Jorge Galindo Alfonso (ESADEEcPol, Universidad Ramon Llull de España) Jorge Gallego (Tic Tank, Universidad del Rosario de Colombia) por sus importantes comentarios.

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 de Hubei, causando alerta a 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 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 presentó el caso índice de SARS-CoV-2 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. Finalmente, 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. El 31 de marzo del mismo año, con una cifra de 906 casos confirmados en toda Colombia (la mayoría de estos casos importados de España e Italia o derivados de un contacto con un caso importado), el ministro de salud y protección declaró oficialmente que Colombia entraba a la fase de mitigación de la epidemia.

Una de las características más llamativas de este patógeno es que un porcentaje considerable de infectados muestran síntomas muy leves o ninguno lo cual complica el diagnóstico de la enfermedad y facilita su propagación. En el presente documento se reportan los resultados de un modelo dinámico compartimental que clasifica a la población en ocho categorías: susceptibles, expuestos, asintomáticos, sintomáticos moderados, sintomáticos severos, críticos, recuperados y muertos. Esto con el fin de otorgar a los tomadores de decisiones una herramienta que permita planear en diferentes escenarios y entender el efecto de las medidas de aislamiento obligatorio.

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 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 7 de abril de 2020 el coronavirus se encuentra presente en 209 países y territorios, con más de un millón de casos confirmados y más de 80,000 fallecimientos.

La información que se conoce del SARS-CoV-2 aún posee incertidumbre. Sin embargo, la mayoría de las publicaciones sitúan en número básico de reproducción 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; un análisis de sensibilidad reveló que la proporción de asintomáticos podía variar de 20,06 % a 39,9 % [5]. Otro estudio conducido en los japoneses evacuados de la provincia de Wuhan, reveló que el porcentaje de asintomáticos era de 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 y/o infiltrados pulmonares mayor 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, 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]. Este estudio 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 y trabajo futuro.

3. Modelo

El modelo $SEI3RD$ es un sistema dinámico compartimentalizado determinístico desarrollado para simular la transmisión y evolución de infecciones agudas. Se asume que el patógeno (en este caso el virus SARS-CoV-2) causa una infección seguida de una inmunidad de por vida o fallecimiento. Este modelo, categoriza en el tiempo a los individuos de una población en ocho compartimentos (ver figura 1).

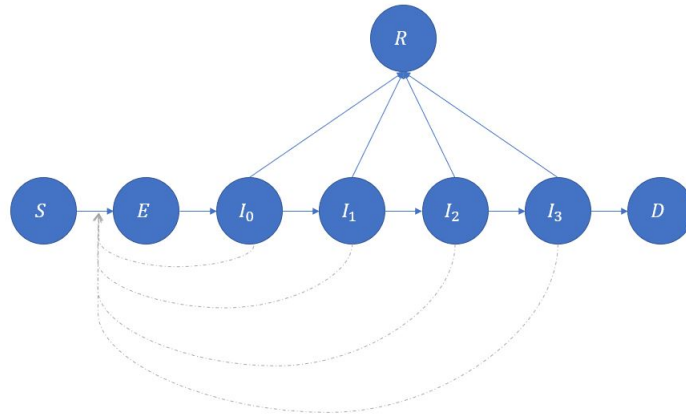


Figura 1: Diagrama del modelo SEI3RD.

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

1. Susceptibles (S): Aquellos individuos que no han sido expuestos al patógeno y son susceptibles a ser 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 Asintomáticos (I_0): Aquellos individuos de la población que han sido inoculados por el virus, son infecciosos pero no han desarrollado síntomas. Los infectados en este compartimento rara vez se enteran de que han sido infectados.

4. Infecciosos con síntomas moderados (I_1): Aquellos individuos de la población que son infecciosos y presentan síntomas leves o moderados. Son aquellas personas a las que se les puede dar manejo de la enfermedad en casa.
5. Infecciosos con síntomas severos (I_2): Aquellos individuos de la población que son infecciosos y presentan síntomas severos pero no críticos. Los individuos presentes en este compartimento requieren hospitalización.
6. Infecciosos con síntomas críticos (I_3): Aquellos individuos de la población que son infecciosos y presentan síntomas críticos. Los individuos de este compartimento requieren una unidad de cuidados intensivos.
7. Recuperados (R): Aquellos individuos que se recuperan de la infección, habiendo desarrollado anticuerpos de tal manera que no se pueden volver a infectar.
8. 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). Esto es: una persona solo puede ser infectada por uno de los individuos pertenecientes a alguno de los compartimentos de infectados I_j , $j = 0, 1, 2, 3$. 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 pasa a ser infeccioso asintomático (compartimento I_0). Una vez la persona está en el compartimento I_0 , existen dos resultados posibles: Empeoramiento del estado clínico (pasar al compartimento de los infectados leves/moderados I_1) o recuperación (R). Si la persona empeora el estado clínico, es decir presenta síntomas leves o moderados, decimos que el individuo entra al compartimento I_1 . Si la persona se recupera, entra al compartimento absorbente (R). Una lógica similar aplica para un individuo que entra a los compartimentos I_j , $j = 1, 2, 3$. Se entiende que un individuo del compartimento I_3 empeora su condición clínica si fallece (i.e. entra al estado D).

Adicionalmente, se hacen los supuestos habituales para tratar el modelo con los métodos numéricos estándar y la teoría de sistemas dinámicos:

- (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.

Las ecuaciones del modelo dinámico se describen a continuación (S , E , I_i , R y D simbolizan la proporción de individuos de la población en cada uno de los estados que llevan la misma letra). Se recomienda al lector consultar [2] para un tratamiento amplio de modelización de infecciones agudas.

$$\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= -S(\beta_0(t)I_0 + \beta_1(t)I_1 + \beta_2I_2 + \beta_3I_3) \\
\frac{dE}{dt} &= S(\beta_0(t)I_0 + \beta_1(t)I_1 + \beta_2I_2 + \beta_3I_3) - \omega E \\
\frac{dI_0}{dt} &= \omega E - \delta_0\gamma_0I_0 - (1 - \delta_0)\sigma_0I_0 \\
\frac{dI_1}{dt} &= (1 - \delta_0)\sigma_0I_0 - \delta_1\gamma_1I_1 - (1 - \delta_1)\sigma_1I_1 \\
\frac{dI_2}{dt} &= (1 - \delta_1)\sigma_1I_1 - \delta_2\gamma_2I_2 - (1 - \delta_2)\sigma_2I_2 \\
\frac{dI_3}{dt} &= (1 - \delta_2)\sigma_2I_2 - \delta_3\gamma_3I_3 - (1 - \delta_3)\sigma_3I_3 \\
\frac{dR}{dt} &= \delta_0\gamma_0I_0 + \delta_1\gamma_1I_1 + \delta_2\gamma_2I_2 + \delta_3\gamma_3I_3 \\
\frac{dD}{dt} &= (1 - \delta_3)\sigma_3I_3
\end{aligned}$$

Donde

1. ω es el recíproco del periodo medio de latencia. Según criterio del experto, se establece el supuesto de que el tiempo medio de latencia es de un día (i.e. $\frac{1}{\omega} = 1$).
2. $\beta_i(t) = (1 - A_i(t))\beta_{i0} + A_i(t)\beta_{i1}$, $i = 0, 1$ es la tasa de transmisibilidad (ver siguiente ítem para una mejor explicación de este concepto), que varía con el tiempo, para los individuos asintomáticos y sintomáticos moderados. β_{i0} y β_{i1} son las tasas de transmisibilidad para un individuo asintomático ($i = 0$) o moderado ($i = 1$) que circula libremente dentro de la población y un individuo que se queda en su vivienda respectivamente. Finalmente, $A_i(t)$, $i = 1, 2$, es la proporción del compartimento I_i que circula libremente en la población. Se tienen los siguientes valores:

- $\beta_{00} = 0,3271875$ (tasa de transmisibilidad de un individuo asintomático que circula libremente en la población) se estima de tal manera que en ausencia de intervención (es decir $A_0(t) = A_1(t) = 0$) el número básico de reproducción R_0 ¹ equivale a 2,6.
 - $\beta_{01} = -2,98 \log(1 - 0,01)$. Esto es, se asume que las personas asintomáticas que se quedan en casa tienen contacto efectivo en promedio con 2,98 personas al día (promedio calculado con la encuesta multipropósito de 2017 de la secretaría distrital de planeación)² y se asume, según criterio de expertos médicos, una probabilidad de contagio del 1 % por cada contacto efectivo. Es decir, por cada 100 contactos efectivos de un susceptible con un asintomático infeccioso en la población, se genera un nuevo caso en promedio.
 - $\beta_{10} = -10 \log(1 - 0,015)$ Esto es, se supone que las personas con síntomas moderados que circulan libremente en la población tienen contacto efectivo con 10 personas al día. En concordancia con los supuestos de [3], la probabilidad de un contagio dado el contacto entre un individuo susceptible y otro sintomático es 50 % más alta que la probabilidad de contagio dado el contacto entre un individuo susceptible y otro asintomático. En consecuencia, se asume que por cada contacto efectivo se tiene una probabilidad de contagio de 1,5 %. Esto es, por cada 200 contactos efectivos entre un sintomático y un individuo sintomático moderado se generan en promedio 3 nuevos casos.
 - $\beta_{11} = -2,98 \log(1 - 0,015)$. Es decir, se estima que un individuo sintomático que se queda en casa solo tiene contacto con las personas del hogar.
3. β_i , $i = 2, 3$, es la tasa de transmisibilidad de un individuo en el compartimento I_i . La fórmula para la tasa de transmisibilidad es $\beta_i = -\xi_i \log(1 - c_i) \approx \xi_i c_i$, donde ξ_i es la tasa de contactos efectivos diarios promedio para un individuo del compartimento I_i (i.e. cuántos contactos tiene una persona del compartimento en un día) y c_i es la probabilidad de contagio dado un contacto efectivo con un individuo del grupo de los susceptibles.

¹En algunos contextos epidemiológicos también se conoce esta cantidad como tasa de infección secundaria o razón de contagio

²Según la encuesta, el número promedio de personas en un hogar es 2,98. Es decir que en promedio se tienen 1,98 contactos diarios. Se asume que en promedio se tiene un contacto adicional diario con una persona externa al hogar.

- $\beta_2 = -2 \log(1 - 0,01)$ Se asume que un hospitalizado (sintomático severo) tiene en promedio dos contactos efectivos diarios, con una probabilidad de contagio de 1 % por cada contacto efectivo (criterio experto médico). Se tiene esta probabilidad menor a la asumida para un sintomático moderado pues se suponen medidas de bioseguridad.
 - $\beta_3 = -2 \log(1 - 0,01)$ Se asume que una persona en cuidados intensivos tiene también en promedio dos contactos efectivos (criterio experto médico).
4. δ_i , $i = 0, 1, 2, 3$, es la probabilidad de que un individuo del grupo I_i se recupere sin empeorar su condición clínica. En este ítem utilizamos teoría básica de probabilidad básica para calcular las cantidades δ_i .
- $\delta_0 = \frac{3}{10}$ Por criterio médico experto y en concordancia con los hallagos de [5, 6]; se establece que 30 % de los casos son asintomáticos y que estos rara vez se reportan por las autoridades. En consecuencia, el 70 % de los casos restantes son sintomáticos.
 - $\delta_1 = \frac{4}{5}$ Según el reporte de la organización mundial de la salud [7], el 80 % de los casos reportados (los cuales se asumen casi todos sintomáticos) son leves y moderados. Este supuesto implica que el 80 % de los casos sintomáticos (que se asumen muy parecidos en magnitud al de los casos reportados) se recuperan sin empeorar su condición. Esto implica que los casos que siguen la trayectoria expuesto, asintomático, sintomático moderado y recuperado constituyen el 56 % del **total** de infectados.
 - $\delta_2 = \frac{5}{7}$ Esto significa que 5 de cada 7 casos con síntomas severos se recuperan. Esto significa que de los casos sintomáticos, aproximadamente el 14,3 % (similar al 13,8 % reportado por [7]) tienen síntomas severos y se recuperan. Análogamente, esto significa que el 10 % del **total** de los casos siguen la trayectoria: expuesto, asintomático, sintomático moderado, sintomático severo y recuperado.
 - $\delta_3 = \frac{1}{2}$ Este supuesto es el mismo realizado por [3] y es acorde a lo reportado en [1]. Quiere decir que un individuo que entra al estado crítico, tiene 50 % de probabilidad de recuperarse. Esto es, el 2 % del **total** de los casos lamentablemente fallecen.
5. γ_i , $i = 0, 1, 2, 3$ es el recíproco del tiempo medio de recuperación, sin empeorar su estado clínico, de un individuo en la clase I_i .

- $\gamma_0 = \frac{1}{10}$ Es decir, un individuo infectado que nunca desarrolla síntomas es infeccioso durante 10 días. Supuesto establecido a partir del criterio del experto médico.
 - $\gamma_1 = \frac{1}{8}$ Una persona con síntomas moderados se recupera en promedio al octavo día del inicio de síntomas. Supuesto establecido a partir del criterio del experto médico.
 - $\gamma_2 = \frac{1}{8}$ Una persona ocupa una cama de hospitalización general 8 días antes de recuperarse. Este supuesto es el mismo realizado por [3].
 - $\gamma_3 = \frac{1}{10}$ Se estima que una persona dura diez días en cuidados intensivos antes de recuperarse. Este supuesto es el mismo realizado en [3].
6. σ_i , $i = 0, 1, 2, 3$ es el recíproco del tiempo medio de complicación de un paciente en el estado I_i .
- $\sigma_0 = \frac{1}{4,1}$ Esto es, después del periodo de latencia, un individuo tarda en desarrollar síntomas 4,1 días (teniendo en cuenta el periodo de latencia, esto significa que el periodo de incubación es 5,1 días, en concordancia con [4])
 - $\sigma_1 = \frac{1}{5}$ Esto es, desde el momento que un individuo desarrolla síntomas moderados, tarda 5 días en requerir cuidados de hospitalización. Este supuesto es el mismo realizado en [3].
 - $\sigma_2 = \frac{1}{6}$ Antes de pasar a UCI un sintomático severo pasa en promedio seis días en una cama de hospitalización general. Este supuesto es el mismo realizado en [3].
 - $\sigma_3 = \frac{1}{10}$ Se estima que una persona dura diez días en cuidados intensivos antes de fallecer. Este supuesto es el mismo realizado en [3].

Los supuestos aquí planteados se ilustran en el cuadro 2 y representan algunos de los estimados más conservadores (más pesimistas) de la literatura académica. Conforme nueva evidencia se vaya presentando, estos valores se ajustarán.

Dado que existe un periodo entre la fecha de inicio de síntomas y la fecha de diagnóstico, tomamos los casos confirmados existentes al 15 de marzo: un hospitalizado y 115 sintomáticos moderados.

1. $I_1(0) = \frac{115}{7413000}$

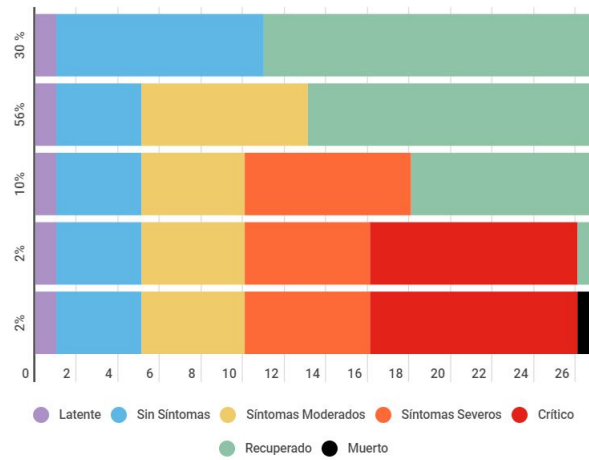


Figura 2: Resumen de los supuestos planteados.

$$2. I_2(0) = \frac{1}{7413000}$$

$$3. I_3(0) = 0$$

$$4. R(0) \approx 0$$

$$5. D(0) = 0$$

Es muy complejo saber los valores $E(0)$, $I_0(0)$ por la naturaleza de los mismos. Se calibra el modelo de tal manera que al 31 de marzo existan al rededor de 6 fallecimientos. De esta manera se estima que

$$1. E(0) = \frac{200}{7413000}$$

$$2. I_0(0) = \frac{225}{7413000}$$

4. Resultados de la Simulación

Se consideran tres escenarios: El primer escenario asume que no se tomaron acciones. El segundo escenario asume que existe un aislamiento del 30% desde el 15 de marzo hasta el 20 de marzo, a partir de esta fecha se asume que existe un aislamiento del 60% hasta el 27 de abril, a partir de donde se mantiene un aislamiento del 30% para los susceptibles y un 50% para los sintomáticos moderados. Finalmente, el tercer escenario asume que existe un aislamiento del 30% desde el 15 de marzo hasta el 20 de marzo, posteriormente se asume un aislamiento al 70% por tres meses: Desde el 20 de marzo

hasta el 20 de junio y un aislamiento del 30 % para los asintomáticos y 50 % para los sintomáticos a partir de esta fecha.

Los resultados aquí presentados se ven como simulaciones de un escenario hipotético y no como un pronóstico de lo que va a suceder. Se observa que, después del 28 de abril, los conteos de casos moderados, severos y críticos son elevados por la falta de una estructura etaria y los supuestos (S1) - (S3), especialmente el supuesto de mezcla aleatoria de la población (S3). Conforme se tenga nueva evidencia se ajustaran los parámetros del modelo.

4.1. Escenario Sin Cuarentena

Asumiendo una población de 7413000, los resultados a corto plazo de la proyección en el primer escenario se muestran a en el cuadro 1. En este escenario se coloca que $A_0(t) = A_1(t) = 0$ para todo t . Se aprecia un número elevado de muertes, casos severos y de pacientes críticos que seguramente habrían saturado el sistema de salud a partir del 14 de abril.

| Día | Susceptibles | Expuestos | Asintomáticos | Moderados | Severos | Críticos | Recuperados | Muertos | R_t |
|------------|--------------|-----------|---------------|-----------|----------|----------|-------------|---------|-------|
| 7/04/2020 | 7390210,25 | 3126,18 | 8728,50 | 5006,27 | 678,45 | 123,55 | 5092,19 | 34,61 | 2,59 |
| 14/04/2020 | 7344217,40 | 9337,63 | 26171,55 | 15056,55 | 2047,13 | 377,45 | 15677,95 | 114,32 | 2,58 |
| 21/04/2020 | 7209021,79 | 27197,56 | 77112,24 | 44766,99 | 6124,09 | 1136,45 | 47285,32 | 355,56 | 2,53 |
| 28/04/2020 | 6832921,66 | 73685,44 | 215996,13 | 128741,46 | 17921,32 | 3368,65 | 139289,42 | 1075,91 | 2,40 |

Cuadro 1: 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.

Es posible resolver el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias más allá del 28 de abril con el fin de establecer un escenario basal para los resultados con intervención (ver figura 3). En este escenario hipotético, se tiene una demanda máxima de hospitalización general de 306370 el 30 de mayo de 2020 y un pico máximo de casos críticos el 7 de Junio (124346 casos críticos). Además, la enfermedad llegaría a un 90,5 % de la población, dejando un saldo de 283532 muertes.

4.2. Escenario con Cuarentena Hasta el 27 de Abril

En este escenario se colocan las siguientes funciones que representan la orden de aislamiento preventivo obligatorio decretado hasta el 27 de abril. Se puede observar que en los primeros cinco días (15 al 20 de marzo) existe un nivel de aislamiento del 30 %; esto se debe al cierre de colegios, universidades y eventos con aglomeración de personas. A partir del 20 de marzo, hasta el

Proyecciones Modelo SEI3RD

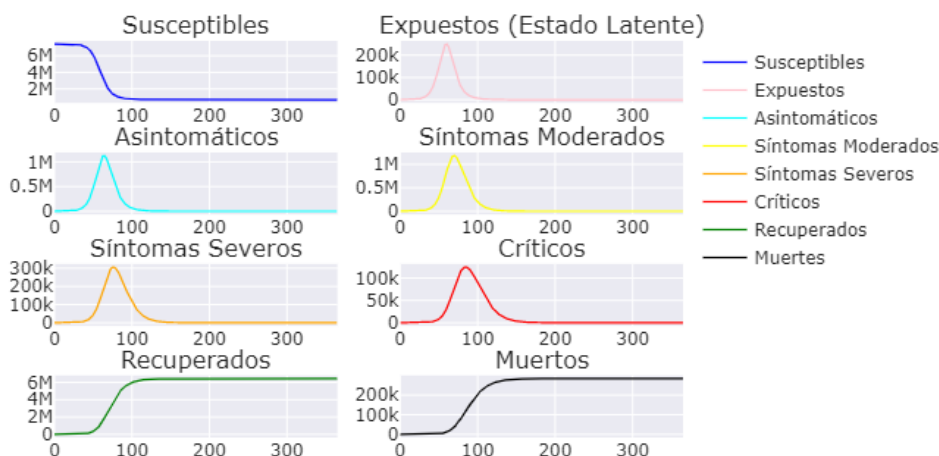


Figura 3: Simulación a un año del escenario sin intervención. El eje de las abscisas corresponde al número de días a partir del 15 de marzo y el eje de las ordenadas corresponde al número de personas en el compartimento.

27 de abril (43 días) se tiene un nivel de aislamiento del 60% como consecuencia de los decretos de aislamiento preventivo y a partir del 27 de abril un nivel de aislamiento del 30% para los asintomáticos y del 50% para los sintomáticos moderados. Los resultados de este escenario se observan en el cuadro 2. Observamos que las medidas reducen drásticamente la demanda de recursos hospitalarios en comparación al escenario sin intervención. También se estima que el número de reproducción efectivo es menor al escenario basal.

$$A_0(t) = \begin{cases} 0,3 & 0 \leq t < 5, \\ 0,6 & 5 \leq t < 43, \\ 0,3 & 43 \leq t. \end{cases}$$

$$A_1(t) = \begin{cases} 0,3 & 0 \leq t < 5, \\ 0,6 & 5 \leq t < 43, \\ 0,5 & 43 \leq t. \end{cases}$$

En este escenario hipotético se tiene una disminución sustancial de las demandas de recursos sanitarios en el máximo pico de la epidemia y un apla-

| Día | Susceptibles | Expuestos | Asintomáticos | Moderados | Severos | Críticos | Recuperados | Muertos | R_t |
|------------|--------------|-----------|---------------|-----------|---------|----------|-------------|---------|-------|
| 7/04/2020 | 7410025,31 | 147,32 | 631,98 | 623,35 | 140,10 | 40,93 | 1373,05 | 17,96 | 1,33 |
| 14/04/2020 | 7408827,28 | 185,52 | 794,32 | 784,74 | 182,28 | 59,46 | 2130,90 | 35,50 | 1,32 |
| 21/04/2020 | 7407318,53 | 233,59 | 999,89 | 987,56 | 231,70 | 79,65 | 3089,30 | 59,78 | 1,32 |
| 28/04/2020 | 7405292,29 | 375,18 | 1301,63 | 1245,66 | 292,52 | 102,96 | 4298,14 | 91,62 | 1,83 |

Cuadro 2: Resultados a corto plazo de la proyección en el escenario con cuarentena hasta el 27 de abril.

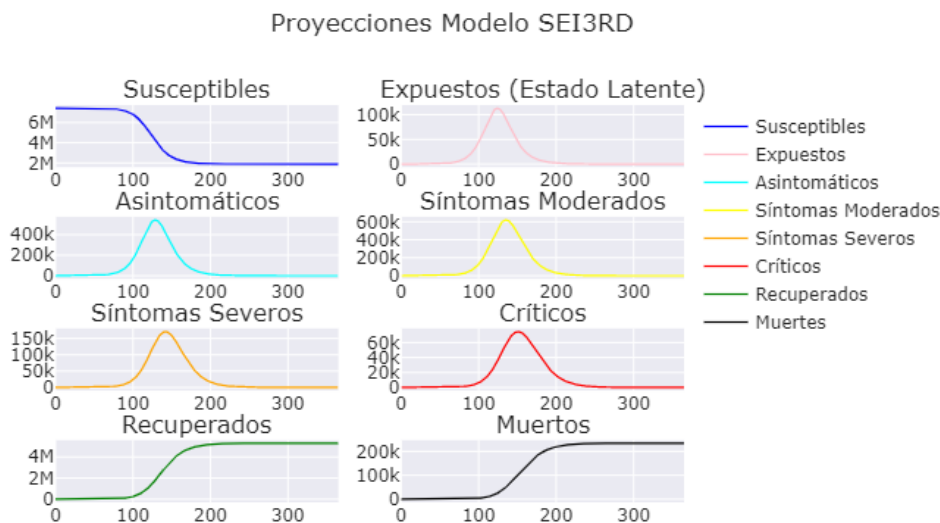


Figura 4: Simulación a un año del escenario con cuarentena hasta el 27 de abril.

zamiento del mismo en comparación al escenario anterior. Se estima que se superan los 300 casos críticos el 19 de mayo; la cantidad de individuos que presentan síntomas severos en este escenario ascienden a 170913 casos el 4 de agosto y a 74520 casos críticos el 13 de agosto. Se aprecia que la disminución en los casos se da en mayor magnitud por las medidas que perduran en el tiempo; el aplazamiento de la demanda de recursos sanitarios tiene lugar en mayor medida gracias a el aislamiento preventivo obligatorio. En este escenario, el virus afecta a aproximadamente un 75,5% de la población dejando 233352 fallecidos.

4.3. Escenario con Cuarentena Hasta el 20 de Junio

En este escenario se colocan las siguientes funciones que siguen una lógica análoga a las del escenario anterior; solamente se incrementa la longitud del aislamiento preventivo obligatorio hasta el 20 de junio y se aumenta la efectividad del mismo (al 70 %). El cuadro 3 muestra los resultados hasta el 28 de abril de este escenario. La diferencia entre este escenario y el anterior radica en el aplazamiento de la máxima demanda de recursos sanitarios, manteniendo las demandas máximas en niveles similares: 170416 casos severos el 30 de septiembre, 74318 casos críticos el 9 de octubre, se superan los 300 casos críticos el 14 de julio y la epidemia afecta a aproximadamente un 75,5 % de la población, dejando 233270 fallecidos.

$$A_0(t) = \begin{cases} 0,3 & 0 \leq t < 5, \\ 0,7 & 5 \leq t < 97, \\ 0,3 & 97 \leq t. \end{cases}$$

$$A_1(t) = \begin{cases} 0,3 & 0 \leq t < 5, \\ 0,7 & 5 \leq t < 97, \\ 0,5 & 97 \leq t. \end{cases}$$

| Día | Susceptibles | Expuestos | Asintomáticos | Moderados | Severos | Críticos | Recuperados | Muertos | R_t |
|------------|--------------|-----------|---------------|-----------|---------|----------|-------------|---------|-------|
| 7/04/2020 | 7410673,79 | 86,21 | 408,82 | 461,26 | 115,53 | 36,62 | 1200,71 | 17,05 | 1,11 |
| 14/04/2020 | 7410038,72 | 93,30 | 440,60 | 498,31 | 131,24 | 48,07 | 1717,82 | 31,95 | 1,11 |
| 21/04/2020 | 7409351,41 | 100,98 | 476,38 | 538,28 | 144,20 | 57,09 | 2281,24 | 50,41 | 1,11 |
| 28/04/2020 | 7408607,49 | 109,30 | 515,48 | 582,02 | 156,76 | 64,60 | 2892,61 | 71,74 | 1,11 |

Cuadro 3: Resultados a corto plazo de la proyección en el escenario con cuarentena hasta el 20 de junio.

5. Conclusiones y Trabajo Futuro

Se ha elaborado una herramienta para entender la dinámica de la transmisión de una enfermedad como el SARS-CoV-2 en la ciudad de Bogotá y los efectos de las políticas de aislamiento. Si bien este modelo es conceptualmente adecuado para explicar la dinámica de la transmisión de una enfermedad como el coronavirus, la incertidumbre de diversos parámetros sensibles y la falta de una estructura de grupos de edad hacen de este modelo una herramienta para la evaluación cualitativa de las acciones de intervención en escenarios hipotéticos mas no como un modelo para pronosticar la cantidad

Proyecciones Modelo SEI3RD

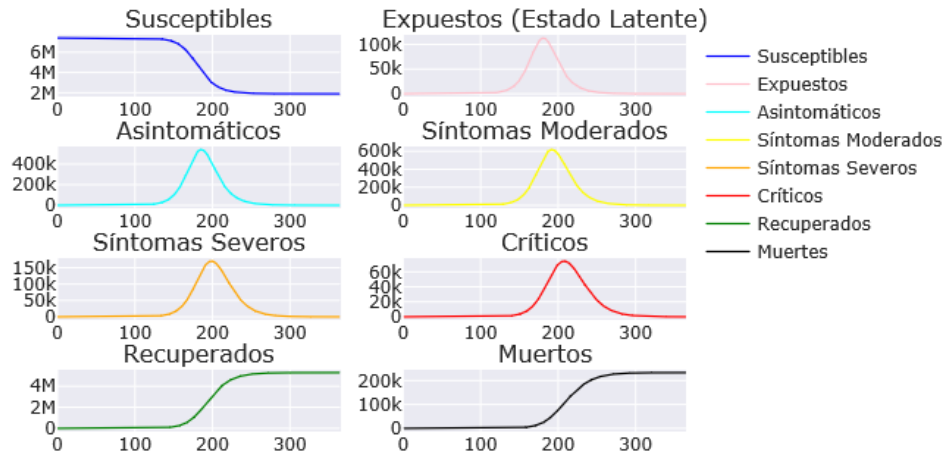


Figura 5: Simulación a un año del escenario con cuarentena hasta el 20 de junio.

de casos futuros. Una vez se disponga de mejor calidad en la información, será posible cuantificar la incertidumbre del modelo, establecer intervalos de predicción y estimar estadísticamente los parámetros.

Con la información disponible se puede concluir que el SARS-CoV-2 es un desafío para las autoridades sanitarias internacionales. Que es una epidemia que potencialmente puede saturar los servicios de salud de la capital y que las medidas de aislamiento son necesarias para evitar que el sistema de salud colapse prematuramente de tal manera que se logre aumentar la capacidad instalada e implementar alternativas menos costosas de mitigación. Finalmente, los resultados del modelo SEI3RD indican que las medidas que perduran en el tiempo son las que contribuyen en mayor medida a disminuir la demanda de recursos sanitarios durante la vida de la epidemia.

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. Mika-

- enic. *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] N. Ferguson, D. Laydon, G. Nedjati-Gilani, N. Imai, K. Ainslie, M. Baguelin, S. Bhatia, A. Boonyasiri, Z. Cucunubá, G. Cuomo-Dannenburg, A. Dighe, I. Dorigati, H. Fu, K. Gaythorpe, W. Green, A. Hamlet, W. Hinsley, L. Okell, S. Elsland, H. Thompson, R. Verity, E. Volz, H. Wang, Y. Wang, P. Walker, C. Walters, P. Winskill, C. Whittaker, C. Donnelly, S. Riley, and A. Ghani. *Impact of non-pharmaceutical interventions to reduce COVID-19 mortality and Healthcare Demand*. Imperial College of London, 2020.
- [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. *Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020*. 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.