

# **Estudio de recursos sanitarios de hospitalización general generados por la pandemia de SARS-CoV-2**

Felipe Segundo Abril Bermúdez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Matemáticas.

## 1. Introducción

---

La secretaría distrital de salud (SDS) es la organización responsable de garantizar el ejercicio efectivo del derecho a la salud de toda la población de Bogotá. En este orden de ideas, la SDS ha sido la organización encargada de establecer medidas de control y mitigación del virus SARS-CoV-2 en la ciudad desde su llegada el 6 de marzo de 2020 y que a la fecha del 8 de septiembre de 2021 ha reportado más de 1.444.000 casos en la ciudad. En la toma de medidas se han hecho intervenciones farmacológicas (IF) [1], como protocolos de bioseguridad, la ampliación de recursos sanitarios en la ciudad, instalar puntos de pruebas para detección de casos sospechosos y positivos y estrategias de vacunación masiva, sin embargo, debido a la limitación de no poder expandir indefinidamente los recursos sanitarios, se ha alcanzado un alto porcentaje de ocupación (del orden de 98% en la tercera ola vivida en Bogotá), generando un alto estrés en el sistema de salud en largos períodos de tiempo. Esto ha llevado a restricciones totales en la movilidad y cuarentenas sectorizadas a nivel de localidades y unidades de planeamiento zonal (UPZ), así como toques de queda y pico y cédula generalizado que han tenido efectos desfavorables en otros ámbitos como la economía de la ciudad de tal manera que la ciudadanía se encuentre cada vez más agotados de estas restricciones. Además, la introducción de variantes biológicas desde abril de 2021, aproximadamente, ha implicado una mayor propagación del virus a lo largo del país que llama la atención de las diferentes entidades sanitarias [2,3]. Por lo demás, actualmente, a la fecha del 8 de septiembre de 2021, la ciudad se encuentra finalizando una tercera ola de SARS-CoV-2 que llegó a saturar los recursos sanitarios de la ciudad instalados hoy en día.

En particular, la SDS ha destinado un equipo de físicos, estadísticos y matemáticos del grupo de Análisis de Situación de Salud (ASIS-FEM) para hacer la implementación y despliegue de un clúster que funcione para realizar múltiples simulaciones de dos modelos matemáticos escogidos y cuyos datos queden estructurados en un lago de datos de un proyecto de Google Cloud Platform (GCP). De hecho, en la ejecución de esta labor se han implementado también procesos de scraping y automatización de procesos que permitan una actualización diaria de bases de datos de la SDS.

Para realizar lo anterior se debe tener en cuenta que cualquier tipo de modelación matemática del virus SARS-CoV-2 debe contemplar aspectos como la heterogeneidad en el contacto para contemplar diferentes escenarios en la toma de medidas en la ciudad, por ejemplo, en la reapertura de colegios y universidades es útil considerar el número de contactos promedio entre

<sup>1</sup> [fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

individuos menores a 25 años para saber qué porcentaje de presencialidad se puede implementar en estos lugares [4]. También, es necesario contemplar aspectos como el aumento de la movilidad por la reapertura económica en la ciudad o movilizaciones, la vacunación masiva y la introducción de variantes biológicas. Así, se propone implementar 2 modelos matemáticos que contengan en su mayoría los aspectos anteriormente mencionados y que permitan realizar múltiples escenarios de proyección que se acerquen a la realidad vivida en la ciudad. Específicamente, los modelos se escogen para realizar proyecciones de potenciales escenarios futuros de la ocupación de hospitalización general o UCI teniendo en cuenta diferentes medidas que puedan decidir los tomadores de decisiones y el plan de expansión hospitalaria. En particular, se propone utilizar dos modelos denominados *Squire* y *A Framework for Reconstructing Epidemic Dynamics* (FRED) [5,6]. Estos modelos se caracterizan por ser modelos compartimentales y estocásticos con heterogeneidad en el contacto a través de matrices de contacto entre grupos etarios ordenados por quinquenios y por casos índices y susceptibles. En este punto, vale la pena mencionar que el aspecto estocástico en ambos modelos implica la necesidad de un alto número de simulaciones para proyectar un comportamiento promedio del total de simulaciones, sin embargo, en términos de tiempos el modelo Squire es mucho más rápido computacionalmente pero no contempla aspectos como vacunación y variantes biológicas mientras que el modelo FRED puede considerar estas dos características con una desagregación espacial a nivel de localidades o UPZ. A partir de estos modelos, escogidos por las dinámicas propias de la ciudad y respaldados por la opinión de expertos epidemiológicos [4], se calibran los parámetros utilizando el método de máxima verosimilitud (MLE) utilizando los datos reportados por la SDS y el método de Latin hypercube sampling (LHS) [7]. Por último, considerando el llamado de atención sanitario por la llegada de la variante delta a Colombia [3], se proyectan 2 escenarios que tengan en cuenta la introducción de la variante delta en la ciudad en 3 fechas diferentes, a saber, 15 de abril, 15 de mayo y 15 de junio de 2021. Es importante aclarar que las proyecciones realizadas deben ser evaluadas por lo menos cada dos semanas para tener fiabilidad de los resultados y colaborar a los tomadores de decisiones en medidas de mayor efectividad en la mitigación del SARS-CoV-2.

## 2. Conjunto de datos

---

Las variables de entrada o los datos de entrenamiento para tener en cuenta son:

- Serie histórica de casos hospitalizados y porcentaje de ocupación en hospitalización general para pacientes diagnosticados con SARS-CoV-2/Covid-19 en Bogotá. A la fecha son del orden de 475 datos a los que se tiene acceso.
- Serie histórica de casos en UCI y porcentaje de ocupación en UCI para pacientes diagnosticados con SARS-CoV-2/Covid-19 en Bogotá. A la fecha son del orden de 507 datos a los que se tiene acceso.
- Serie histórica de casos fallecidos por fecha de muerte para pacientes que fueron diagnosticados con SARS-CoV-2/Covid-19 en Bogotá. A la fecha son del orden de 524 datos a los que se tiene acceso.

Aquí vale la pena aclarar que estos datos son de actualización diaria y por temas de confidencialidad no se comparten estos datos a terceros. Además, todos los datos son de

<sup>1</sup>[fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

importancia para el problema para establecer de forma óptima los parámetros de ajuste del modelo. Por último, para las matrices de contacto se considera una matriz estándar para la ciudad dada por la recopilación de datos demográficos y encuestas [8], y que se modifica de acuerdo con datos al porcentaje de aumento o decremento de movilidad recopilados de *Google Mobility* [9].

### 3. Características y procesamiento de datos

---

Dentro de los conjuntos de datos utilizados en este trabajo se destaca que la mayoría son de actualización diaria luego de un proceso de recolección de datos hecho por el Observatorio de Salud Pública (OSP) y cuyo reporte se asume sin errores. Para ello, el proceso que se realiza es la actualización de diferentes bases de datos en Google Cloud de forma diaria y que por motivos de tratamiento de datos privados sólo se especifica su existencia en Google Cloud.

Por otra parte, en la calibración de parámetros de ambos modelos cuando se escoge los datos de fechas de muerte (fallecidos diarios) se desecha las últimas dos semanas (21 días) de datos puesto que estos datos son sensibles a cambio por la confirmación de nuevos reportes de defunción por SARS-CoV-2 una vez se terminan de procesar algunas pruebas de diagnóstico para Covid-19 en Bogotá, así como la posible demora de las instituciones prestadoras de salud (IPS) en reportar un fallecimiento en clínica.

### 4. Modelos y técnicas

---

**LHS:** Dado que existe una limitación de presupuesto y número de simulaciones que simultáneamente se realicen al tiempo, entonces se opta por un muestreo de parámetros para correr las diferentes simulaciones escogido de una manera lo suficientemente apropiada mediante el método de Latin hypercube sampling (LHS) [7].

**SQUIRE:** Teniendo en cuenta los requerimientos que puede tener la SDS, es necesario un modelo de respuesta relativamente rápida para las proyecciones de Covid-19 en la ciudad. En ese orden de ideas, se decide utilizar el modelo epidemiológico Squire [5] que aun cuando tiene muchas ventajas como la heterogeneidad entre grupos etarios carece de aspectos que se han acentuado a partir de la tercera ola como lo es la introducción de variantes biológicas en la ciudad, los potenciales efectos de la vacunación masiva y no desagregación espacial a nivel de localidades o UPZ.

**FRED:** Teniendo en cuenta los requerimientos que puede tener la SDS a niveles muy específicos para la toma de medidas que no entorpezcan el proceso de reactivación económica, es necesario un modelo de respuesta focalizada para las proyecciones de Covid-19 en la ciudad. En ese orden de ideas, se decide utilizar el modelo de agentes FRED [6], que incluye aspectos como la heterogeneidad entre grupos etarios, introducción de variantes biológicas en la ciudad, el potencial efecto de la vacunación masiva, desagregación espacial a nivel de localidades o UPZ, entre otros. Sin embargo, vale la pena mencionar que, dado que FRED es un modelo de alta complejidad computacional, muchas veces requiere de especificaciones de computo elevadas como lo pueden ser una memoria de por lo menos 25 GB RAM para cada simulación, un espacio aproximado de 4 GB por simulación, entre otros.

<sup>1</sup>[fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

**Slurm:** Enfatizando el aspecto estocástico en los modelos escogidos y por tanto de un alto número de simulaciones, se hace necesario poder ejecutar de forma simultánea múltiples simulaciones de cada tipo de modelo que permita una actualización cada dos semanas de diferentes escenarios de proyección. Para este fin, se diseña y despliega un clúster de 1.000 nodos de máquinas virtuales en Google Cloud mediante la utilización del servicio *Slurm* [10].

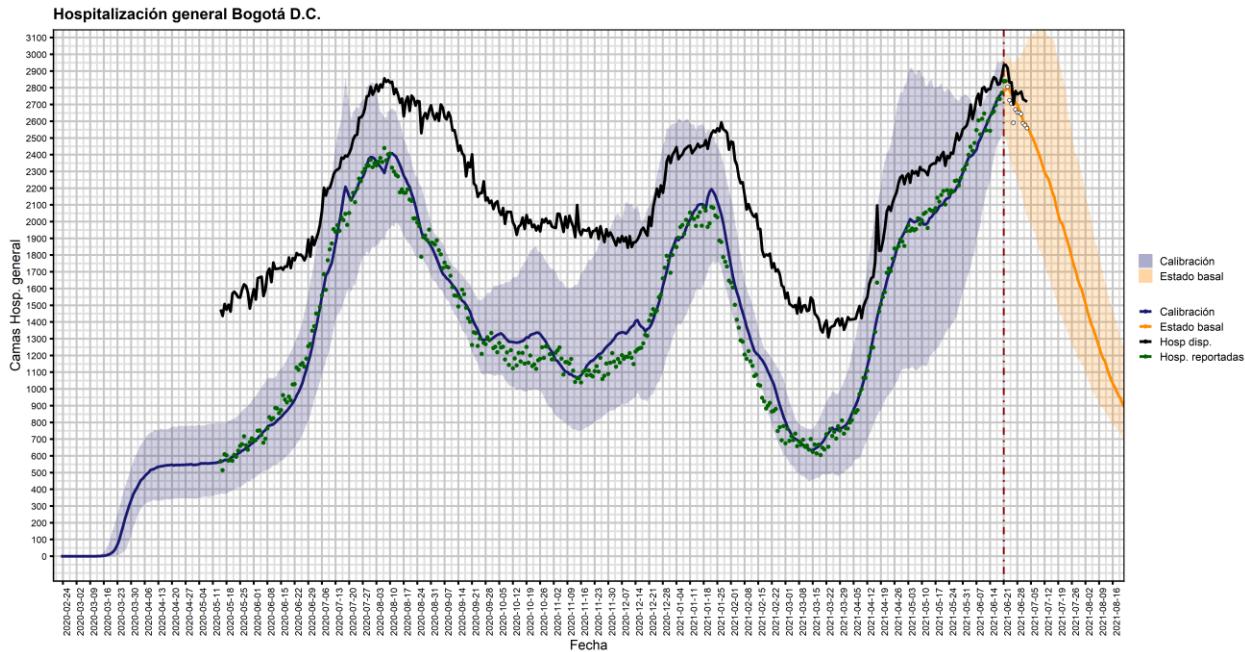
## 5. Resultados

---

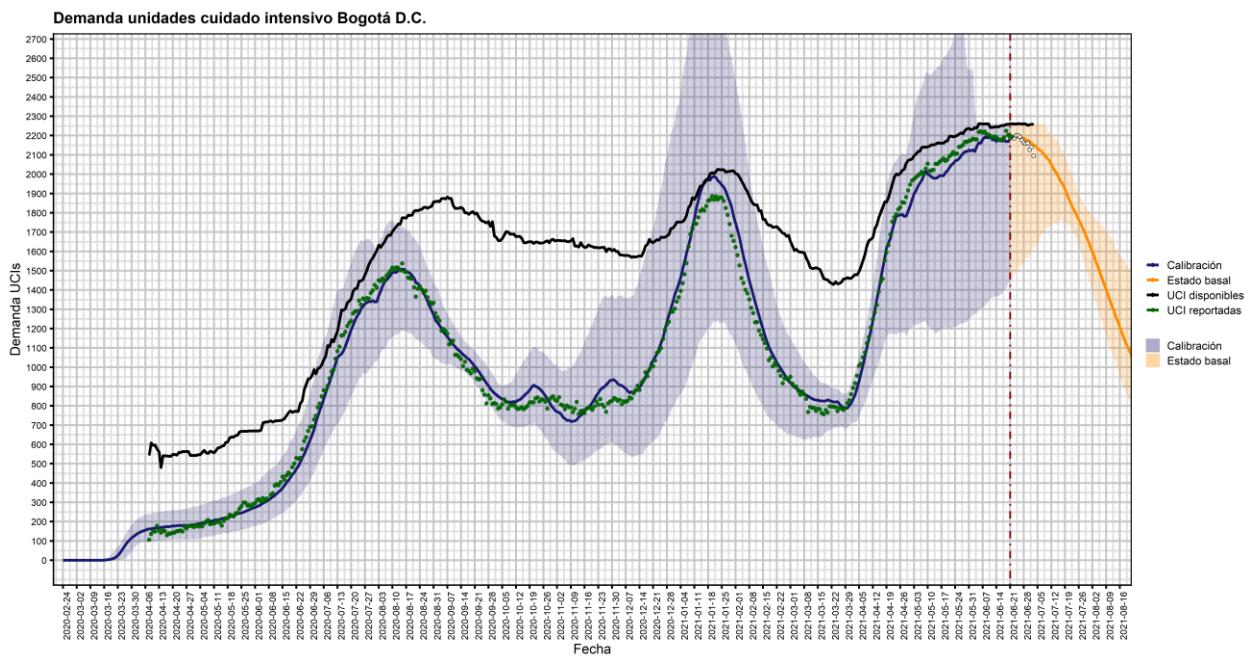
A partir de los procesos de calibración de ambos modelos se logra proyectar el estado basal del modelo mostrado en las figuras 1, 2, 3 y 4 para diferentes compartimentos y para cada uno de los dos modelos escogidos donde por razones del transcurso que ha tomado la pandemia en Bogotá, las proyecciones más actualizadas se hacen con el modelo FRED. En general, para ambos modelos se observa una buena calibración con los datos reportados por la SDS de tal manera que la franja de incertidumbre, que contiene el 95% de las simulaciones, contiene cada uno de los datos reportados. En la figura 1 se observa la demanda de camas de hospitalización general para el estado basal del modelo Squire calibrado hasta el 21 de junio de 2021. En la figura 2 se observa la demanda de camas de UCI para el estado basal del modelo Squire calibrado hasta el 21 de junio de 2021. De hecho, se observa en las figuras 1 y 2 una supresión temporal a finales de junio de 2021 que coincide con lo que se vivió en la ciudad en dicho periodo. Aquí vale la pena mencionar que en los picos de la pandemia se ha evidenciado una disminución en el tiempo de estancia en hospitalización general y UCI para pacientes con Covid-19. Por otra parte, en las figuras 3 y 4 se observan los fallecidos diarios y la demanda de camas de UCI para el estado basal del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021. Es importante aclarar que estos resultados obtenidos con el modelo FRED son resultados preliminares y que siguen en revisión con diferentes expertos epidemiológicos.

A partir de estos resultados del estado basal del modelo, se realizan proyecciones únicamente con el modelo FRED (que contempla la introducción de variantes biológicas) sobre dos potenciales escenarios que incluyan el potencial efecto de la introducción de la variante Delta en Bogotá a partir del 15 de mayo de 2021 (escenario Delta media) y 15 de junio de 2021 (escenario Delta tardía) mostrados en las figuras 5, 6, 7 y 8 para fallecimientos diarios y demanda de solicitudes de camas UCI. En todas las figuras se evidencia un potencial cuarto pico no tan severo como las 3 olas ya vividas en la ciudad, pero que se diferencia por el momento del año en que podría presentarse.

<sup>1</sup>[fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

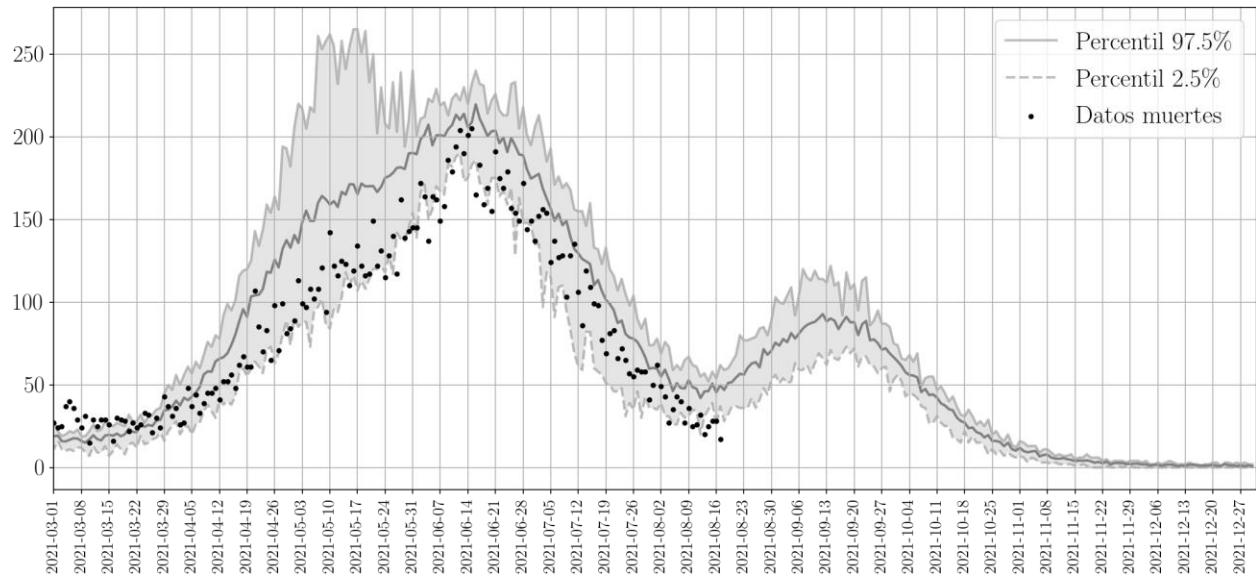


**Figura 1:** Demanda de camas de hospitalización general para el estado basal del modelo Squire calibrado hasta el 21 de junio de 2021.

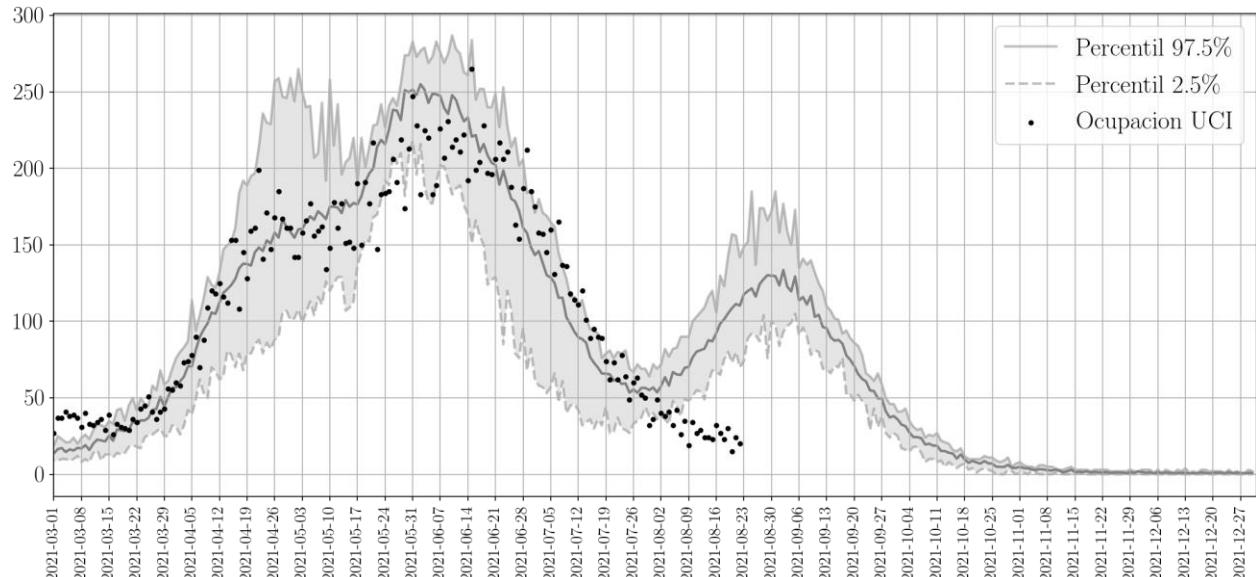


**Figura 2:** Demanda de camas de UCI para el estado basal del modelo Squire calibrado hasta el 21 de junio de 2021.

<sup>1</sup> [fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

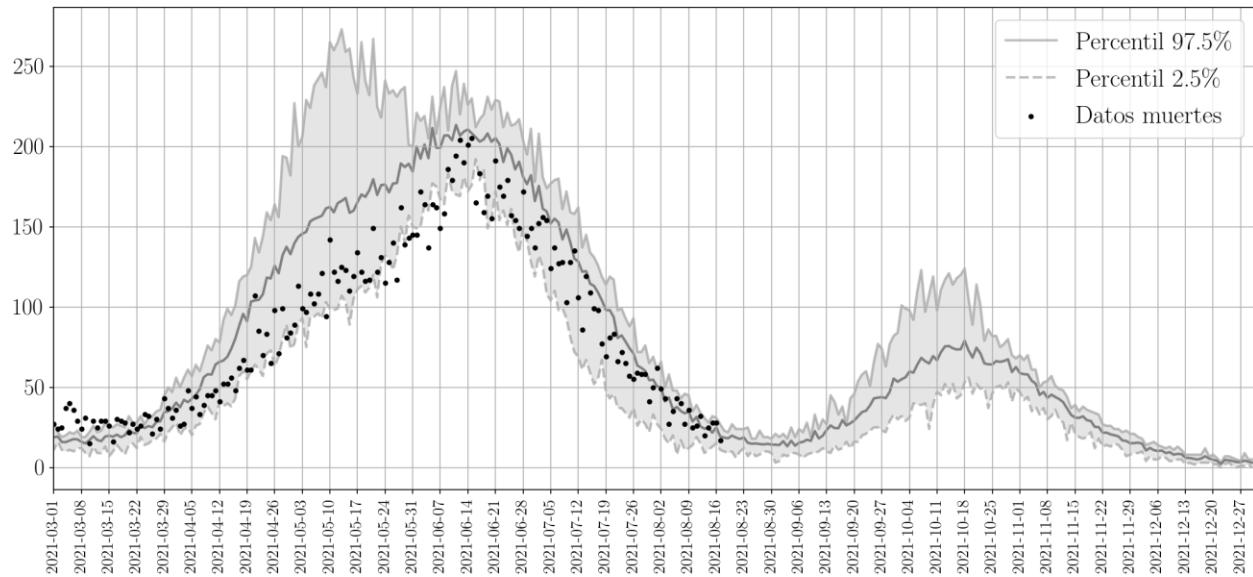


**Figura 3:** Fallecidos diarios para el estado basal del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.

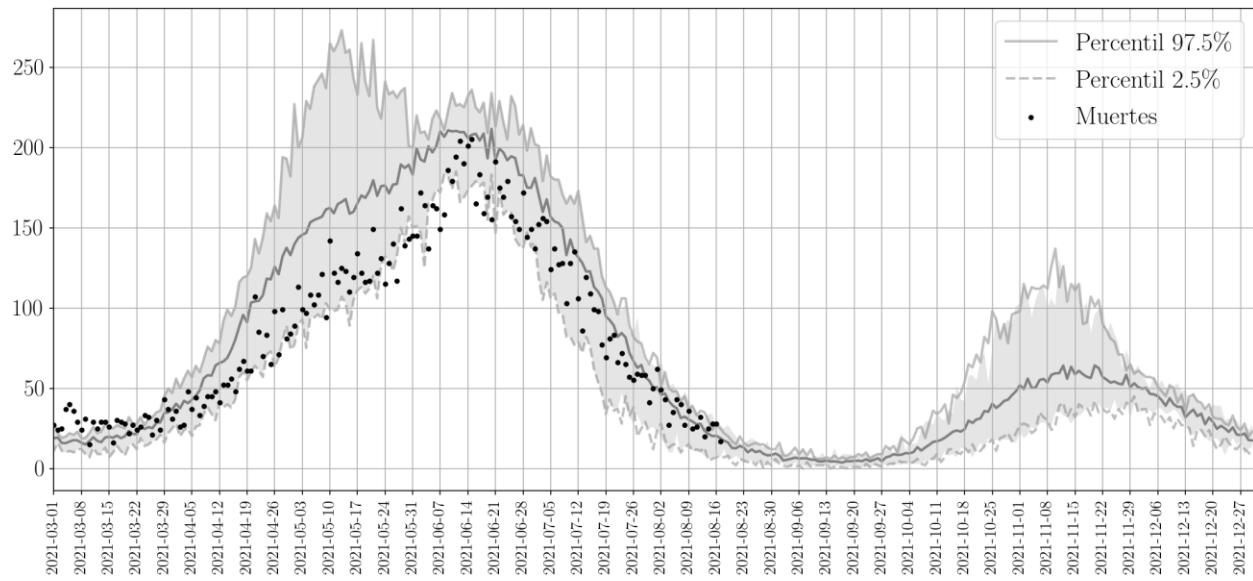


**Figura 4:** Demanda de camas de UCI para el estado basal del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.

<sup>1</sup> [fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

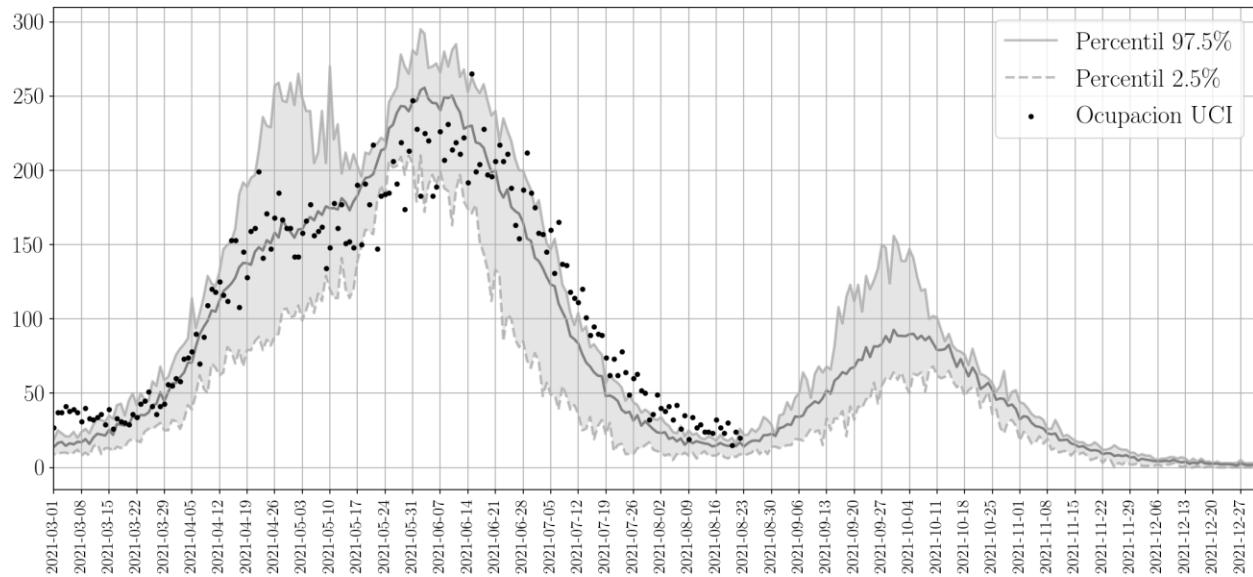


**Figura 5:** Proyección de fallecidos diarios para el escenario Delta media del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.

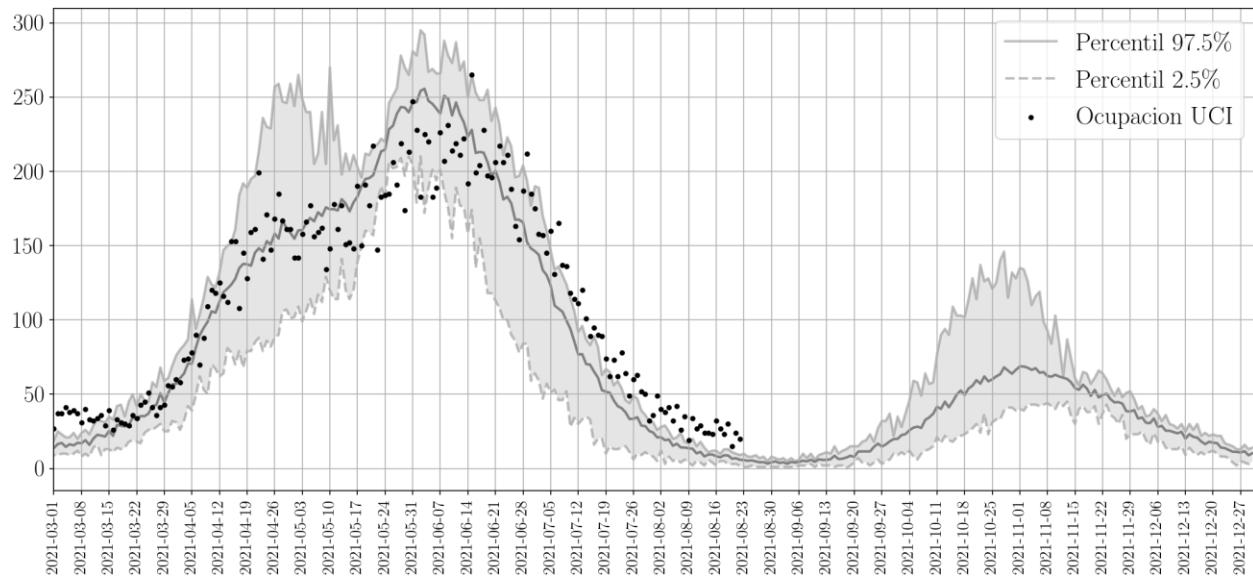


**Figura 6:** Proyección de fallecidos diarios para el escenario Delta tardía del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.

<sup>1</sup> [fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).



**Figura 7:** Proyección de solicitudes de camas UCI diarias para el escenario Delta media del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.



**Figura 8:** Proyección de solicitudes de camas UCI diarias para el escenario Delta tardía del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.

## 6. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede evidenciar que cada uno de los dos modelos escogidos tiene ventajas y desventajas que deben ser considerados al momento de realizar cualquier tipo de proyección y posibles escenarios de proyección. Por ejemplo, es claro que con el modelo Squire que no contempla la introducción de variantes de variantes biológicas poseería problemas para proyectar la introducción de la variante Delta en la ciudad. Sin embargo, a partir

<sup>1</sup>[fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

de este modelo se logra proyectar la demanda de camas de hospitalización general una vez se calibra correctamente el modelo.

Las proyecciones realizadas con el modelo FRED muestran que se podría presentar un potencial cuarto pico de Covid-19 en Bogotá entre los meses de octubre o noviembre de 2021 debido a la introducción de la variante delta en la ciudad. Sin embargo, estos resultados preliminares deben seguir siendo evaluados para poder entender el escenario más factible de los anteriormente propuestos.

## 7. Referencias

---

- [1] National Institutes of Health. *Covid – 19 Treatment Guidelines. Pharmacologic Interventions*. (8 de julio de 2021). Recuperado el 8 de septiembre de 2021 de <https://www.covid19treatmentguidelines.nih.gov/management/critical-care/pharmacologic-interventions/>.
- [2] Instituto Nacional de Salud. *Covid – 19 en Colombia. Genoma*. (21 de agosto de 2021). Recuperado el 8 de septiembre de 2021 de <https://www.ins.gov.co/Noticias/Paginas/coronavirus-genoma.aspx>.
- [3] El Espectador. *Variantes Alfa, Gamma, Delta y las otras 59 que circulan en Colombia*. (25 de agosto de 2021) Recuperado el 8 de septiembre de 2021 de <https://www.elespectador.com/salud/variantes-alfa-gamma-delta-y-las-otras-59-que-circulan-en-colombia/>.
- [4] G. España, Z. Cucunubá, H. Díaz, et al. *The impact of school reopening on COVID-19 dynamics in Bogotá, Colombia*. Preprint (2021). DOI: <https://doi.org/10.31219/osf.io/ebjx9>.
- [5] G. T. Walker, C. Whittaker, O. J. Watson, et al. *The impact of covid-19 and strategies for mitigation and suppression in low- and middle-income countries*. Science, 369 413 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abc0035>.
- [6] J. J. Grefenstette, S. T. Brown, R. Rosenfeld, et al. *FRED (A Framework for Reconstructing Epidemic Dynamics): an open-source software system for modeling infectious diseases and control strategies using census-based populations*. BMC Public Health 13, 940 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-940>.
- [7] B. Tang. *Orthogonal Array-Based Latin Hypercubes*. Journal of the American Statistical Association, 88:424 (1993), 1392-1397, DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1993.10476423>.
- [8] K. Prem, A. R. Cook, M. Jit. *Projecting social contact matrices in 152 countries using contact surveys and demographic data*. PLOS Computational Biology 13, 9 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005697>.
- [9] Google. *Informes de Movilidad Local sobre el COVID-19*. (8 de septiembre de 2021). Recuperado el 8 de septiembre de 2021 de <https://www.google.com/covid19/mobility/>.
- [10] SchedMD. *Slurm Support and Development*. (26 de agosto de 2021). Recuperado el 8 de septiembre de 2021 de <https://www.schedmd.com/>.
- [11] R. Verity, L. C. Okell, I. Dorigatti, et. al. *Estimates of the severity of coronavirus disease 2019: a model-based analysis*. The Lancet Infectious Diseases 20, 6 (2020), 669 - 677. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30243-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30243-7).

<sup>1</sup> [fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

[12] S. Lauer, K. Grantz, Q. Bi, et. al. *The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application*. Annals of Internal Medicine (2020). DOI: <https://doi.org/10.7326/M20-0504>.

## Apéndice: Especificaciones adicionales utilizadas en los modelos matemáticos.

En este apéndice se suministra una explicación un poco más detallada del funcionamiento compartimental en cada uno de los modelos y valores adicionales utilizados como las probabilidades de hospitalización y fallecimiento para diferentes grupos etarios y también los tiempos de estancia entre compartimentos. Aún así, es importante resaltar que por los temas de alcance de este trabajo no se especifica otros aspectos como la distribución de tiempos entre compartimentos y otros aspectos de interés que pueden ser consultados directamente en la implementación de Squire [5] y FRED [6].

Desde el punto de vista matemático, un modelo compartimental es un modelo de cajas donde los individuos o agentes permanecen determinado tiempo antes de pasar a otro compartimento de acuerdo con una probabilidad y según una ley de evolución que contemple la tasa de cambio instantáneo entre compartimentos, es decir, mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales o un conjunto de ecuaciones en diferencia finita. En el contexto epidemiológico, esta transición en compartimentos es usual hacerla con un modelo SEIR (susceptible, expuesto, infectado, recuperado) que salvo modificaciones como lo puede ser la inclusión de otro tipo de infecciosos como infecciosos leves, infecciosos críticos (que requerirán hospitalización o UCI), la inclusión de reinfecciones o la inclusión de vacunación, su dinámica se gobierna por un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales cuyos parámetros de ajuste son los tiempos de estancia entre compartimentos. De forma más precisa, por lo general, el término no lineal se puede pensar como una interacción entre casos susceptibles S con casos índices o infectados I y donde también se puede introducir la heterogeneidad en el contacto mediante matrices de contacto como lo hace Squire y FRED [5,6].

La tabla 1 representa el tamaño de los grupos etarios según la población de Bogotá y adaptando las probabilidades de severidad mostradas en [11] para la ciudad.

Grupo etario	Tamaño	Probabilidad de requerir hospitalización	Probabilidad de caso crítico	Probabilidad de morir caso no crítico
[0,5)	486341	0,000840764	0,181354223	0,012553468
[5,10)	477908	0,001182411	0,181354223	0,013979635
[10,15)	492552	0,001662887	0,181354223	0,015567823
[15,20)	562016	0,002338607	0,137454906	0,016454101
[20,25)	718131	0,003288907	0,121938236	0,017999605
[25,30)	724454	0,004625365	0,122775613	0,020063626
[30,5)	651833	0,006504897	0,136057441	0,022686491
[35,40)	599112	0,009148183	0,160922182	0,026012496
[40,45)	519983	0,012865577	0,196987378	0,030268714
[45,50)	470334	0,018093546	0,242011054	0,035709645

<sup>1</sup> [fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).

[50,55)	465196	0,025445917	0,289368845	0,042416637
[55,60)	423099	0,035785947	0,326537862	0,049842448
[60,65)	336100	0,050327683	0,337229819	0,056400332
[65,70)	246821	0,0707785	0,309082553	0,060249095
[70,75)	173019	0,099539573	0,243794865	0,122602446
[75,80)	112227	0,1399878	0,160480254	0,184472303
[80, $\infty$ )	133745	0,233470395	0,057084366	0,340529746

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

La tabla 2 muestra el tiempo de estancia promedio entre diferentes compartimentos de los modelos extraídos de la literatura [12]. Aún así, vale la pena mencionar que los tiempos de estancia en hospitalización y UCI se calibran dentro del barrido de parámetros del modelo.

Interpretación	Valor (días)
Tiempo promedio de latencia	4.6
Tiempo promedio infeccioso de un caso moderado	2.1
Tiempo infeccioso promedio de un infeccioso prehospitalizado	4.5
Tiempo promedio en hospitalización general antes de recuperarse	9.0
Tiempo promedio en UCI antes de pasar a cama de recuperación	14.8
Tiempo promedio en cama de recuperación antes de ser dado de alta	3.0
Tiempo promedio en hospitalización general antes de fallecer	9.0
Tiempo promedio en unidad de cuidados intensivos antes de fallecer	11.1

Tabla 2: Tiempos promedio de permanencia en cada uno de los compartimentos.

<sup>1</sup>[fsabrilb@unal.edu.co](mailto:fsabrilb@unal.edu.co).