

OSEJO-BUCHELI, CAMILO 2019. Procesos de simulación, para el uso de pronósticos de utilización de la capacidad instalada combinada en los hospitales de la ciudad de Pasto, Colombia, con la epidemia del COVID-19. Revista Sigma, 15 (2). Páginas. 1–17

REVISTA SIGMA

Departamento de Matemáticas

Universidad de Nariño

Volumen XV N°2 (2019), páginas 1–17

Procesos de simulación, para el uso de pronósticos de utilización de la capacidad la ciudad de Pasto, Colombia, con la epidemia del COVID-19.

Osejo-Bucheli, Camilo ¹

“The greatest shortcoming of the human race is our inability to understand the exponential function.”²

Albert Allen Bartlett

Abstract: The following paper, uses simulation method in order to derive an estimate of how long the combined capacity is available at the hospitals in Pasto Colombia prior to the COVID-19 epidemic, using data from medical journals around the world that describe the behavior in contagion of the disease caused by the aforementioned virus. The paper was written and published on march 27 2020. The simulation method uses the montecarlo technique, and combined hospital capacity is reported by the local health institute.

Keywords. Capacity, Simulation, Scenario planning, Epidemiology, COVID-19.

Resumen: El siguiente artículo pretende construir una secuencia de procesos de simulación, desde el mas elemental y abstracto hasta unos un poco mas realistas, usando los datos reportados por publicaciones recientes sobre el virus COVID-19 y el conocimiento de la capacidad instalada de los centros hospitalarios de la ciudad de Pasto, al 17 de marzo de 2020. Lo anterior, con el fin de encontrar con cuántos días se puede contar con capacidad disponible en los centros hospitalarios, siguiendo las condiciones de propagación que el virus ha seguido en las poblaciones de mayor contagio de China y Europa. Para conseguir eso, se optó por montar procesos simples de simulación con la técnica Montecarlo, dentro del marco de la planificación por escenarios. Para llegar a la conclusión de un rango de días y un promedio disponible para cada uno de estos. Los resultados son hipotéticos y lo único que persiguen es dar una idea de la disponibilidad de capacidad en función de un control muy bajo o nulo de la propagación del virus.

Palabras Clave. Capacidad instalada, Simulación, Escenarios, Epidemiología, COVID-19.

¹MSc en Administración, Universidad del Valle, Profesor Tiempo Completo de la Universidad de Nariño. Correspondencia: calle 18 # 50-100, bloque 3, piso 4º, Departamento de Administración de Empresas. Email: camiloosejo@udenar.edu.co

²“La mas grande limitación de la raza humana es su incapacidad para entender la función exponencial”: traducción propia.

1. Introducción

En los primeros días de diciembre de 2019 aparecieron los primeros casos de neumonía en la ciudad de Wuhan (China), los cuales se volvieron más frecuentes en los últimos días del mismo mes. Enero 1 de 2020 se cierra el mercado de comida de mar de Huanan en la población de Wuhan, debido a la sospecha de que el virus se había originado ahí, especulando que se trataba de un virus zoonótico. En enero 7 del 2020 se declaró una nueva enfermedad, SARS2-nCOVID-19, que es la neumonía ocasionada por el virus novel-Coronavirus, en enero 21 los casos de la neumonía asociada al virus sumaban más de 100, en enero 22 sobrepasaron los 250, por lo que el gobierno local, decidió que no podía controlarse con medidas médicas, y que debían tomarse medidas “no-médicas”, y en enero 23 de 2020 se toma la decisión de cerrar la ciudad de Wuhan, en enero 24 los casos de neumonía asociada con el virus fueron más de 600 según el Centro de Control de Enfermedades Chino. (China CCDC, 2020)[6], y cobra la atención de la Organización Mundial de la Salud. (OMS). El 21 de enero de 2020 la OMS genera el primer reporte situacional del COVID-19 y anuncia que el virus está presente en China, Japón, la República de Corea, y Thailandia.(World Health Organization, 2020c)[27] en tan solo 30 días el virus se esparció de una sola ciudad a toda China(Wu & McGoogan, 2020)[30].

En marzo 7 de 2020 aparecen 5 nuevos países en el reporte de la OMS, entre ellos, Colombia. Entre el 7 al 14 de marzo, Colombia reporta casos, todos de ellos “importados”, que quiere decir, que eran nacionales o extranjeros que contrajeron la enfermedad fuera del país e ingresaron con ella.(World Health Organization, 2020a)[25]

En marzo 15, en el reporte de la OMS, se alcanzan 24 casos en Colombia y aparece por primera vez la etiqueta “transmisión local”, que quiere decir que entre los contagiados, aparecen personas que contrajeron el virus sin viajar.(World Health Organization, 2020b)[26]

En las **estadísticas de severidad de casos** (Zunyou Wu, MD, PhD1; Jennifer M. McGoogan, PhD1, 2020) [30] encontraron que la enfermedad presenta el siguiente espectro: con un ($N = 44\,415$), los casos con síntomas *Leves* son el: 81 % (36 160 casos), los casos con síntomas *Severos* reportan: 14 % (6168 cases), y los casos con síntomas *Críticos* : 5 % (2087 cases).

La **capacidad instalada** en instituciones hospitalarias. En este momento, en Pasto se reportan 739 camas, en 19 centros de atención hospitalaria. Es de esperarse que no en todos, sea posible atender pacientes y que, en muchos casos, se maximice la atención con camas improvisadas. La capacidad según Taha, se puede expresar en función de las horas de mano de obra y máquina disponibles, inventario en proceso, etc. (TAHA, 2012)[21], y puede definirse cómo Capacidad la “Salida” o número de unidades que puede tener, recibir, almacenar o producir una instalación en un periodo determinado. (Render & Heizer, 2004)[18].

La **tasa de contagio**: la tasa de contagio, número productor (*productive number*),o en el modelo de Kermack-McKendrick el humbral epidemiológico(Weisstein, 2020)[24]: R_0 , R_0 o R_0 , es el factor de contagio con el que se cataloga un virus, es decir la capacidad de transmitir el virus que tiene un sujeto portador a otros que no lo tienen. Es satisfactorio entenderlo como el número promedio de personas que se contagiarán partiendo de un solo portador (Chang, Yan, & Wang, 2020) [5].

La **carga viral**: en el artículo *Coronavirus Disease 2019 : Coronaviruses and Blood Safety* los autores, Chang, Yan y Wang, explican cómo la carga viral (*viral load*) determina la duración del episodio infeccioso, y son determinantes, de la fuerza con la que afecta al anfitrión la enfermedad causada por el virus. Es decir, si una persona sana, estuviera sometida a una

transmisión por contacto directo, en gran cantidad de secreciones contaminadas provenientes de un paciente infectado, —cómo es el caso de los profesionales de la medicina en los entornos hospitalarios—, el cuerpo recibe gran cantidad de las partículas del virus inicialmente, y la enfermedad es también más severa y más fuerte. Por el contrario, si una persona se contamina indirectamente, por que tocó una superficie contaminada, con partículas del virus que han sido degradadas por otras sustancias de limpieza, el material de la superficie, el sol, etc. recibirá una carga viral mucho más baja, y el cuerpo del anfitrión que se contagia tendrá suficiente tiempo para reaccionar, construir anticuerpos y lidiar con la enfermedad, lo que finalmente se traducirá en un episodio infeccioso menos severo, según lo explican (Chang et al., 2020)[5]. ¿Por qué es importante la carga viral para esta simulación?: por que influye la variable de casos que son proporcionalmente más leves, y su paso por las instalaciones hospitalarias será menos largo, lo que, en este artículo, en la parte de simulación, se llamará “*recuperación*”. Este caso puede evidenciarse en el reporte de la Organización Mundial de la Salud, citado por (Wu & McGoogan, 2020)[30], donde se reporta que el 63% de los profesionales del cuidado de la salud en Wuhan, contrajeron la enfermedad y el 14% fueron hospitalizados con casos severos y críticos.

Sobre los **tiempos de recuperación**. El CDC, el centro para el control y prevención de enfermedades de los Estados Unidos, presenta en una serie de artículos informativos, —constantemente actualizados—, diagnóstico, control y tratamiento de la enfermedad COVID-19. En el artículo “Guía Clínica Interina para la administración de Pacientes con la enfermedad del coronavirus confirmada (COVID-19)”, presenta un tiempo de hospitalización promedio de 8 días (CDC “Center for Disease Control and Prevention,” 2020)[4].

Hasta el 17 de marzo de 2020, el Ministerio de Salud Nacional confirmó 65 casos de contagio de COVID-19, no se ha reportado ningún caso en Pasto. El 4 de abril, Colombia reporta 1485 casos.

La red nacional de seguridad en el cuidado de la salud (NHSN), usa activamente **el modelo Kermack-McKendrick o modelo SIR** de Radio de Infección estandarizado (SIR) como el principal modelo resumen para la medición y seguimiento de las infecciones asociadas con la salud (HAIs). En marzo del 2019 publicó la actualización a la guía del modelo. (Standardized, Ratio, Healthcare, Network, & Nhsn, 2019)[20]. En la guía se presenta una explicación de cómo entender y aplicar el modelo SIR para enfermedades infecciosas. El modelo SIR tiene la posibilidad de incluir dentro de este, factores como el coeficiente de transmisión, el coeficiente de recuperación y la probabilidad de contagio, entre otras. En esta actualización del artículo, se incluye una simulación adaptada a la población objeto de estudio con este modelo.

La **hipótesis** para el siguiente artículo será que, de aparecer contagio del virus, sin la influencia de otras variables, el escenario de contagio, se comportará de forma análoga a los casos que se han publicado en el resto del mundo.

Este estudio tiene interés de difusión para que pueda estimarse la disponibilidad de la capacidad instalada de los centros hospitalarios en la ciudad de Pasto, y con los mismos métodos, de cualquier otra población análoga. La simulación del caso particular podrá servir para evaluar las tasas de contagio R_o , estimadas y calculadas por diferentes autores que se citarán más adelante.

2. Metodología.

2.1. Sujeto.

2.1.1. Etiquetado de casos.

Los casos se clasifican en casos confirmados y casos reales, siendo los confirmados aquellos que han sido sometidos a una prueba clínica confiable que evidencie que el paciente es portador del virus. Este trabajo no tiene en cuenta la diferencia entre los anteriores tipos de pacientes. Dado que se opera desde la perspectiva de los reportes estadísticos de casos severos y críticos, no se tiene en cuenta las proyecciones del CCDC dónde comparan la proporción de casos reales versus la proporción de casos confirmados con prueba de laboratorio.

2.1.2. Población.

Para la población se toma la población total de la Ciudad de Pasto, de acuerdo con lo publicado por la *Alcaldía de Pasto*, según aparece en su página de información estadística, y se presenta un total de 455.678 habitantes.³ (Alcaldía Municipal de Pasto, 2020)[1]. Para efectos de lectura de los resultados se redondeará a 500.000.

2.2. Protocolo.

2.2.1. Simulación.

Es satisfactorio definir simulación como “el acto de reproducir el comportamiento de un proceso usando un modelo que describe cada paso” según cómo lo describen Krajewski et al. (Lee J. Krajewski, Larry P. Ritzman, 2013)[11], en este proceso de simulación se usará la técnica de simulación *Montecarlo*. Para Osejo et al. en *Tecnologías de la Administración*, por la UniValle, los procesos de simulación permiten predecir, comparar y optimizar los resultados de lo que se simula, (UniValle, 2018)[22].

Simulación Montecarlo. La simulación de Monte Carlo es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad que tienen las computadoras para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos. (Carro, 2009)[3].

Variables y el modelo matemático. Variable aleatoria. La variable aleatoria será para este modelo, la tasa de contagio, R_0 , que según (Wu & McGoogan, 2020)[30] fluctúa entre 1.4 y 2.5. a pesar de que se discutirá otros resultados obtenidos por equipos de investigación médicos.

Generación de variables aleatorias en la transmisión. En los modelos en donde aplique, se usarán las variables aleatorias para la transmisión, sin embargo, debido a que las tasas de contagio están influenciadas por hábitos sociales, se ajustarán la tasa de transmisión a una curva normal. Así las cosas, se equiparará la media de la tasa de transmisión a la mediana del rango de la tasa R_0 propuesta por la CDC. Y se estimará una desviación estándar, para construir la curva según (Mora, 2016)[14].

Limitaciones del estudio. Los modelos de simulación generalmente tienen en cuenta los siguientes pasos: determinación de la variable aleatoria, determinación la relación entre las variables, determinar las medidas de desempeño, y estimación las distribuciones de probabilidad (Eppen, Gould, Schmidt, Moore, & Weatherford, 2000)[8]. Debido a que este estudio

³La *Alcaldía De Pasto*, presenta el dato para para el año 2018, aunque se estima que la población real supere el número citado.

solo pretende determinar el tiempo que le toma el virus con la tasa de contagio antes mencionada saturar el sistema hospitalario, se obviarán los pasos mencionados anteriormente, y se aplicará solo lo necesario para obtener los resultados que se buscan.

Si se contara con **datos** en forma de distribuciones documentadas empíricamente, se debería utilizar la prueba Chi-Cuadrado para determinar si se ajusta a las distribuciones tradicionales (Landau & Crc, n.d.)[10]. En este caso no se aplicará por dos razones. Primera: se sabe que el comportamiento del contagio de los virus sigue una normal, pero también se sabe que, en la realidad, se espera que las personas tomen medidas para que no se cumpla ese caso. Segunda: por que dependiendo de las medidas que se han tomado en casos anteriores y según la velocidad de reacción de los estados, se ha logrado cambiar la distribución.

Una **limitación del estudio** es que trabaja, —como ya se dijo antes—, con datos estimados de contagio, y no tiene en cuenta la experiencia de los casos de China citados por la CCDC en Wo y McGoogan, de casos reales y casos confirmados.

Finalmente, la limitación más importante será el que se trata de un **modelo descriptivo**, por el cual solo se pretende mostrar el funcionamiento de un sistema, a diferencia de un modelo prescriptivo, que pretende indicar que decisiones tomar.

2.2.2. EL Modelo S.I.R. de Kermack-McKendrick.

El modelo Kermack-McKendrick es un modelo SIR que calcula el número de personas infectadas con una enfermedad contagiosa en una población en el tiempo. Se creó para lograr el modelo que refleje el aumento y decremento del número de pacientes infectados en epidemias como la peste negra o el cólera. El modelo supone una población fija (no aumenta ni disminuye) y homogénea (sin diferencias de edad, espacio, o diferencias sociales); no tiene en cuenta el periodo de incubación del virus, y la infectividad dura el mismo tiempo que la enfermedad. (Weisstein, 2020)[24].

El modelo consiste un sistema de tres ecuaciones diferenciales no lineales ordinarias acopladas.

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\beta SI \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I\end{aligned}$$

Donde t es el tiempo, $S(t)$ es el número de personas susceptibles, $I(t)$ es el número de personas infectadas, $R(t)$ es el número de casos resueltos, es decir personas que se han recuperado y desarrollado inmunidad a la infección o han fallecido, β es la tasa de infección, y γ es la tasa de recuperación.

El valor que rige la evolución en el tiempo de estas ecuaciones el llamado *umbral epidemiológico*.

$$R_0 = \frac{\beta S}{\gamma}$$

2.2.3. Planificación de escenarios.

La planificación por escenarios tiene especial importancia para determinar cómo reaccionará en el futuro un sistema productivo. El Dr. Shardul Phadnis ha escrito sobre cómo la técnica de planificación de escenarios puede ser usada para anticiparse a los efectos futuros sobre una estrategia, que ejercen los factores externos. (Perez-Franco, 2016)[16].

Los escenarios que se planearon en este estudio van aumentando su realismo y complejidad, de tal suerte que comienza con un escenario menos real y más sencillo, y termina con el escenario en el que se consideró el mayor número de variables y en el que se incluyó la mayor realidad posible que permite la metodología. Los escenarios que se planearon para este estudio fueron los siguientes:

Escenario 1. *Sobrepasa la población.* La primera regla que se aplicará en la simulación es determinar cuándo, en la sábana de simulación, el número de contagiados supera la población. en este punto se evaluará el contagio solamente.

Escenario 2. *Escenario de hospitalización de casos severos y críticos.* Se plantea la simulación según dos parámetros: (1) la hospitalización de los casos severos y críticos, y (2) la capacidad instalada disponible de camas para atender pacientes en instituciones públicas en Pasto.

Escenario 3. *Escenario de recuperación.* En este escenario, los casos que requieren atención hospitalaria se recuperan, y son dados de alta luego de un periodo promedio de recuperación, y la capacidad que liberan puede ser usada por otros afectados. Para este escenario, también se planea un periodo de recuperación según la normal. El *European Respiratory Journal*, en un artículo por Menéndez et. al. explica que el tiempo de hospitalización para enfermos de neumonía de clases de I, II y III, fue de 5 días; y de Clases IV y V fue de 7. Siendo la clase I la más leve y la V la más severa. (Menéndez, Ferrando, Valléz, Martínez, & Perpiñá, 2001)[12].

Escenario 4. *Tasa de contagio normal.* En este escenario se establece la tasa de contagio R_o del rango establecido por el estudio de (Wu & McGoogan, 2020)[30], pero se lo ajusta a una normal. Con esa información se plantea la tasa de transmisión según la normal, y se hacen 1000 corridas. Es decir, se corre la simulación 1000 veces. El ejercicio anterior dará la población potencialmente contagiada, a ese número, se le estima el porcentaje de casos severos o graves y se filtran las 1000 corridas según la capacidad instalada de la ciudad. Finalmente se conceptúa sobre el promedio de días que toma saturar la capacidad instalada de los hospitales de la ciudad.

Escenario 5. *Aplicación del modelo de Kermack-McKendrick.* En este escenario se aplica el modelo SIR de Kermack-McKendrick con el fin de ingresar en el estudio general la dinámica de los sujetos no contagiados, los contagiados y los casos resueltos. Los escenarios subsiguientes, se construirán sobre la base de este escenario, por lo que se denomina *línea base*.

Introducción a Escenarios sobre el modelo Kermack-McKendrick. *Influencia sobre las variables de contagio.* En el modelo, aparecen las variables que en el modelo de MSExcel tienen los nombres de a, b, p, q . Las variables responden a los coeficientes de transmisión, coeficiente de recuperación, probabilidad de contacto y probabilidad de enfermarse. De estas, el coeficiente de transmisión (a) está en función de la probabilidad de contacto (p) y la probabilidad de enfermarse (q), por lo tanto, no es manipulable en sí mismo. El coeficiente

de recuperación (b) depende mucho de la población, factores como grupo etario, hábitos previos del paciente y comorbilidades; adicionalmente, por el momento, no hay tratamiento conocido para el virus, por lo que simplemente se estabiliza al paciente y se espera que el sistema inmunológico supere por sí mismo la enfermedad, por lo tanto, tampoco es modificable, sin embargo las otras dos variables si tienen posibilidad de modificarse con estrategias no-médicas de mitigación, y esa es la base de los escenarios siguientes.

Escenario 6. *Afectando la variable (p).* La variable es la probabilidad de contacto, y se interpreta como la probabilidad de encontrarse con una persona enferma. Siendo la población de 500.000 habitantes, la probabilidad de encontrarse con el infectado será de $1/500.000$. El escenario explora la posibilidad de disminuir esa proporción a $1/2.500.000$.

Escenario 7. *Afectando la variable (q).* la variable es la probabilidad de enfermarse. Esta variable se interpreta como la probabilidad de enfermarse habiendo entrado en contacto. En este escenario se simula con una probabilidad del 20%. La línea base que se usó para el escenario, fue el **Escenario 5**.

Escenario 8. *Disminuyendo el coeficiente de recuperación (b).* el coeficiente de recuperación se interpreta como los días que le toma a un paciente crítico el recuperarse durante el tiempo de atención hospitalaria. En la línea base (**Escenario 5**) se usó un tiempo de recuperación de 2 semanas, o 14 días. Para este escenario se disminuye el tiempo de recuperación a 5.

2.3. Instrumentos.

Para la aplicación de las técnicas antes mencionadas se usará la hoja de cálculo en MSExcel, y se aplicarán mapas de calor condicionados para identificar el comportamiento en los gráficos, aplicando los datos de tasas de contagio, porcentajes de casos severos y graves; y se usará la fórmula "NORM.INV" para el ajuste a la normal, con la función "RAND" para la aplicación de la variable aleatoria, según lo requiera el escenario. Se graficarán curvas obtenidas con la media aritmética, en MSExcel, con la función: "AVERAGE" y la función contar condicionadamente: "COUNTIF".

2.4. Análisis de datos.

Debido a que el objetivo del artículo es estimar el tiempo que toma el copar la capacidad instalada en las instituciones hospitalarias según las tasas de contagio posibles R_0 y los casos severos y críticos que se generan y requerirán hospitalización, Solo se interpretarán los resultados entregando el rango definido como el dato máximo y mínimo en el que se satura la capacidad, y un promedio entre ellos con el fin de conceptuar sobre el escenario con un solo resultado. Como se dijo antes, debido a que los casos *reales* y los casos *confirmados* son diferentes, se presentarán **solo** los casos *reales* como una estimación. El comportamiento según el artículo de (Wu & McGoogan, 2020)[30] es equivalente en ambos casos.

Para el análisis de datos, se usarán los datos presentados por Wu, y McGoogan, con respecto a los porcentajes de casos Críticos y Severos, para determinar el punto de saturación de la capacidad hospitalaria en la ciudad.

3. Resultados.

Escenario 1. *Sobrepasa la población.* En este escenario, se evalúa el rango de tasas de contagio R_0 , y cuánto le tomará a la población total contagiarse, *es un escenario hipotético y*

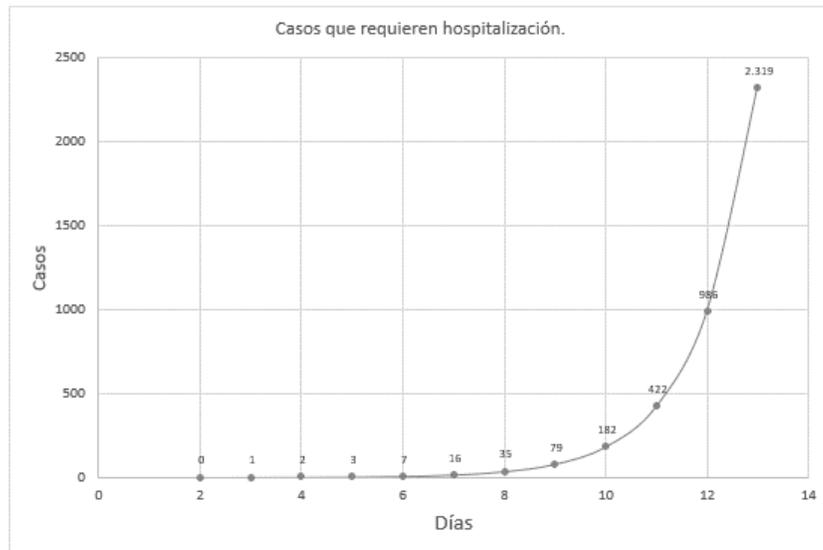
Escenario 2. *Escenario de hospitalización de casos severos y críticos.* En este escenario, se asume que requieren hospitalización los casos severos y críticos, se presentan en gris oscuro en la figura 2.

CASOS QUE REQUIEREN HOSPITALIZACIÓN.

Día D	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
Día D+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Día D+2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Día D+3	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3
Día D+4	1	1	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7
Día D+5	1	1	2	2	4	5	6	8	10	12	15	19
Día D+6	1	2	3	3	6	9	12	16	22	28	36	46
Día D+7	2	3	5	5	12	17	24	34	47	65	87	116
Día D+8	3	5	8	8	21	32	49	72	104	149	209	290
Día D+9	4	7	13	13	38	61	97	151	229	342	502	725
Día D+10	5	11	21	21	68	116	195	317	505	787	1.205	1.812
Día D+11	8	16	33	33	122	221	389	666	1.110	1.810	2.891	4.530
Día D+12	11	25	53	53	220	421	778	1.398	2.442	4.164	6.939	11.325
Día D+13	15	37	86	86	396	799	1.556	2.935	5.373	9.577	16.653	28.312
Día D+14	21	55	137	137	712	1.518	3.113	6.163	11.821	22.026	39.968	70.781
Día D+15	30	83	219	219	1.282	2.884	6.226	12.943	26.007	50.661	95.923	176.951
Día D+16	41	125	350	350	2.307	5.480	12.452	27.181	57.216	116.520	230.215	442.378
Día D+17	58	187	561	561	4.153	10.413	24.904	57.080	125.875	267.995	552.516	1.105.946
Día D+18	81	281	897	897	7.476	19.784	49.807	119.867	276.925	616.389	1.326.038	2.764.864
Día D+19	114	421	1.436	1.436	13.456	37.590	99.615	251.721	609.235	1.417.694	3.182.491	6.912.160
Día D+20	159	632	2.297	2.297	24.222	71.421	199.229	528.615	1.340.316	3.260.696	7.637.979	17.280.399
Día D+21	223	948	3.675	3.675	43.599	135.700	398.459	1.110.092	2.948.695	7.499.601	18.331.149	43.200.998
Día D+22	312	1.422	5.880	5.880	78.478	257.830	796.918	2.331.192	6.487.130	17.249.082	43.994.757	108.002.496
Día D+23	436	2.132	9.408	9.408	141.261	489.876	1.593.836	4.895.504	14.271.685	39.672.889	105.587.416	270.006.240
Día D+24	611	3.198	15.053	15.053	254.269	930.765	3.187.671	10.280.558	31.397.708	91.247.645	253.409.798	675.015.599
Día D+25	855	4.798	24.085	24.085	457.685	1.768.453	6.375.342	21.589.171	69.074.957	209.869.584	608.183.514	1.687.538.997

25 22 19 19 16 14 13 13 12 11 11 11

(a)



(b)

Figura 2: Hospitalización de casos severos y críticos.

Fuente: Esta investigación.

Resultado E2. En este escenario, se asume que requieren hospitalización los casos severos y críticos, así las cosas, deja de haber capacidad disponible entre 11 y 25 días —dependiendo de la tasa de contagio—, con una media de 15.5 días.

Escenario 3. *Escenario de recuperación.* Para este escenario, debió haberse estimado una tasa de recuperación como lo indicaron Menéndez et al.[12], según una curva normal.

Resultado E3. Aun tomando el tiempo mínimo de recuperación según lo indicado por Menéndez et al, la tasa de recuperación más optimista no logra aumentar la capacidad instalada de los hospitales, y el resultado es igual al **Resultado E2**.

Escenario 4. *Tasa de contagio normal.* La tasa de transmisión R_o varía aleatoriamente entre 1.4 y 2.5 manteniendo una distribución normal. Por lo tanto, para generar la definición de la curva, se requerirá la media μ y la desviación estándar σ . La media se equiparará a la media aritmética.

$$\mu R_o = \frac{2,5 - 1,4}{2} = 0,51888 + 1,4$$

Para la desviación estándar, se usará la *desviación típica* lo que deja solo un 0,2 % fuera de la curva, así se obtiene:

$$\sigma R_o = \frac{1,0377...}{6} = 0,17296283...$$

Resultado E4. Aplicando la normalización de la tasa de contagio R_o , con μ , σ como se citó antes se hicieron 1000 corridas de simulación. Solo en 1 evento de las 1000 corridas, la capacidad disponible superó los 70 días, y solo en 1 evento fue de menos de 14. Siendo el tiempo promedio de saturación de la capacidad, cerca de 30 días.

En la gráfica 3 muestra algunos cientos de corridas:

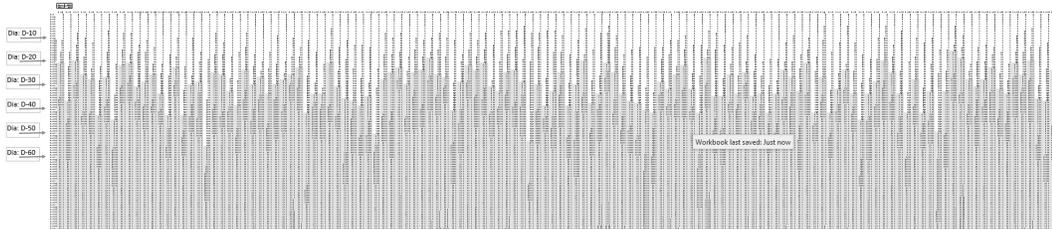


Figura 3: Simulación contagio normal A.
Fuente: esta investigación.

En la figura 3 puede verse cómo se usó MSEXcel, para la simulación.

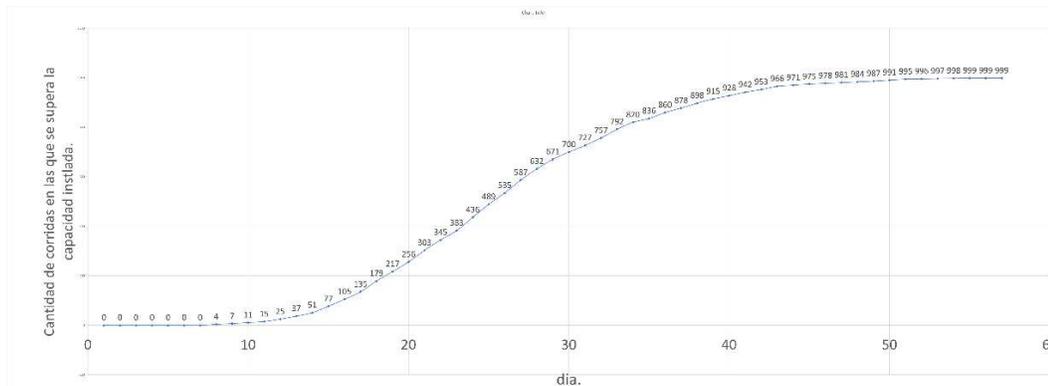
La figura 4 muestra, el comportamiento de la totalidad de las 1000 corridas en la simulación. La figura muestra las corridas 1^a a 1000^a en forma de barras grises, para presentar gráficamente cuándo se copa la capacidad instalada de las instituciones hospitalarias.

En la figura es posible interpretar gráficamente que aproximadamente en cerca de 30 días la capacidad instalada de los hospitales de Pasto tardará en coparse de pacientes del COVID-19 exclusivamente, usando los parámetros publicados por los doctores de los doctores (Wu & McGoogan, 2020)[30].

Resultado 4.a. Usando la simulación anterior, al construir un conteo del número de corridas, en las que en la simulación supera la capacidad instalada, se obtiene la curva de la figura 5:



Figura 4: Simulación a un total de mil corridas.
Fuente: Esta investigación.



Procesos de simulación, para el uso de pronósticos de utilización de la capacidad instalada combinada en los hospitales de la ciudad de Pasto, Colombia, con la epidemia del COVID-19.

de esta actualización del artículo; el coeficiente de transmisión (a) será el producto entre la probabilidad de contacto (p) y la probabilidad de contraer la enfermedad habiendo estado en contacto (q); siendo $p = 1/500.000$, y $q = 50\%$; y finalmente (b) es el coeficiente de recuperación, el cual es equivalente a los días que tarde en recuperarse el paciente enfermo, para esta simulación es de: 14, y el tiempo estará dado en días.

Con los datos anteriores, se tiene:

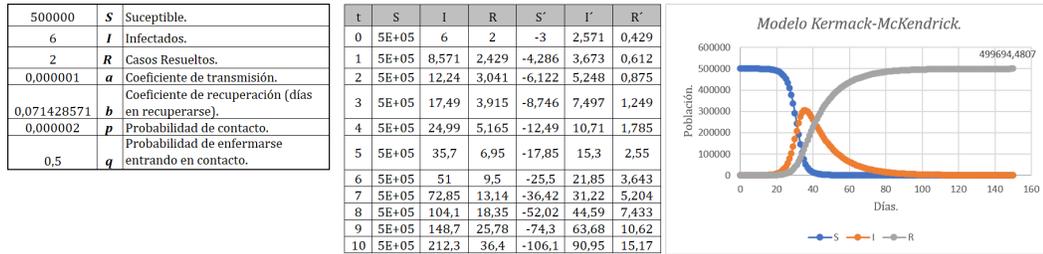


Figura 6: Modelo Kermack-McKendrick para este estudio.
Fuente: Esta investigación.

Las gráficas de la figura 6 indican, que, dadas las condiciones antes descritas, de no tomarse ninguna medida para cambiar las condiciones iniciales, el pico de contagio sucederá aproximadamente a los 35 días, con 300.000 personas contagiadas. Y la población alcanzará inmunidad, en aproximadamente un 90 % a los 50 días de iniciado el contagio.

Escenario 6. *Afectando la variable (p).* La variable es la probabilidad de contacto, y se interpreta como la probabilidad de encontrarse con una persona enferma. Siendo la población de 500.000 habitantes, la probabilidad de encontrarse con el infectado será de $1/500.000$. El escenario explora la posibilidad de disminuir esa proporción a $1/2.500.000$.

Resultado E6. En la Figura 7 se ven las condiciones iniciales del escenario, las primeras 10 corridas, y la gráfica. En este escenario se ve que los contagios se aplanan tanto que se pierde la forma de la línea base. Aunque no se alcanza a apreciar, si existe un aumento en los contagios, y se muestra cómo en el día 140, la cantidad de infectados sube a aprox. 930.

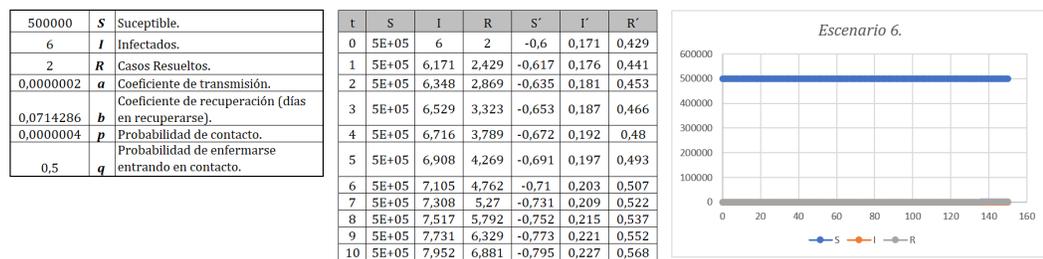


Figura 7: Escenario 6. cambio en la probabilidad de contacto.
Fuente: esta investigación.

Escenario 7. *Afectando la variable (q).* la variable es la probabilidad de enfermarse. Esta variable se interpreta como la probabilidad de enfermarse habiendo entrado en contacto. En este escenario se simula con una probabilidad del 20 %. La línea base que se usó para el **Escenario 5**.

Resultados E7. En la Figura 8, se ven las condiciones iniciales, las primeras 10 corridas de simulación y la gráfica. En este escenario se ve que hay un desplazamiento importante del pico de contagios, del día 30 que era el día del escenario de línea base, al día 100, y que el pico de contagios disminuye de 300.000, a aproximadamente 140.000.

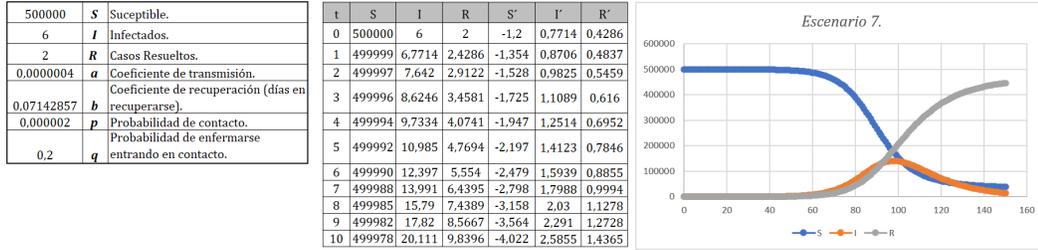


Figura 8: Afectando la probabilidad de contraer la enfermedad.
Fuente: esta investigación.

Escenario 8. *Disminuyendo el coeficiente de recuperación (b).* el coeficiente de recuperación se interpreta cómo los días que le toma a un paciente crítico el recuperarse durante el tiempo de atención hospitalaria. En la línea base (**Escenario 5**) se usó un tiempo de recuperación de 2 semanas, o 14 días. Para este escenario se disminuye el tiempo de recuperación a 5.

Resultado. En la Figura 9 se ve el cuadro de condiciones iniciales, las primeras 10 corridas de la simulación y la gráfica del escenario. En la gráfica se ve cómo se disminuye dramáticamente el pico de la curva de contagio, aproximadamente disminuye a un 33% de la curva de la línea base, pero además se retrasa el pico de contagios 10 días. Sin embargo, en relación con la capacidad hospitalaria, aunque el pico ha disminuido, se requeriría una capacidad instalada de casi 15 veces la capacidad actual.

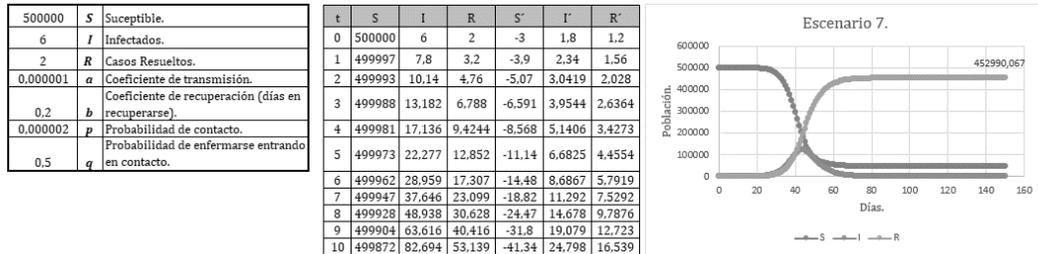


Figura 9: Cambiando el coeficiente de recuperación.
Fuente: esta investigación.

4. Conclusiones y discusión.

Conclusión 1. Factores Epidemiológicos: El resultado obtenido anteriormente en el Escenario 5. Es mucho más alentador de lo que muestran los escenarios más abstractos, y sin embargo, pareciera no coincidir con lo reportado por los medios de comunicación, con respecto a las tasas de llegada de pacientes a los hospitales en algunas partes del mundo, a pesar de esto, según la CDC[4], la tasa de contagio se cambia, disminuyendo de forma importante, aumentando el aseo general, y cambiando los hábitos sociales.

Conclusión 2. *Estrategias no-médicas de mitigación:* La determinación precisa de casos depende mucho de la posibilidad de los países y sus sistemas de salud de hacer pruebas masivas para saber si las personas son portadores del virus, de forma que los casos identificados se acerquen a los reales, y con eso poder ofrecer atención hospitalaria rápida. Ese no es el caso de los países latinoamericanos. Razón por la cual dependen de estrategias no-médicas para enfrentar la contingencia. La estrategia más usada es la disminución del contacto social, y el condicionamiento cultural con respecto a los comportamientos sociales.

Discusión. En algunos artículos publicados recientemente, en entre otros por el PhD Eisenberg, J. del Michigan Health lab, dice que se estima que el COVID-19 tiene un R_o de 1.4 a 3.5 lo que ampliaría dramáticamente la velocidad de contagio y por tanto disminuiría dramáticamente la disponibilidad de la capacidad de las instituciones hospitalarias. (Eisenberg, 2020)[7] por otro lado, (Zhao et al., 2020)[29] publicaron en enero 24 de 2020 en que la tasa de contagio R_o para el COVID-19 podría ser de 3.3 a 5.5, de cualquier forma lo más probablemente es que sea por encima de 3 y por debajo de 5. Lo que daría validez a la intuición de que la capacidad instalada para el caso del que se ocupa este artículo estaría disponible por menos tiempo de los resultados obtenidos. Finalmente, un grupo británico publicó en enero 27 de 2020 que un valor promedio de R_o de 3.8. Este resultado usando una muestra significativamente mayor a las anteriores, debido a que se cuenta cada vez con más datos disponibles (Read, Bridgen, Cummings, Ho, & Jewell, 2020)[17].

Conclusión 3. El rango tan grande de las tasas de contagio R_o calculadas y estimadas evidencia lo poco que se conoce de la enfermedad en el momento, o lo mucho que ha cambiado el virus según las poblaciones dónde se aloja, o lo importante que son las dinámicas sociales en la trasmisión del virus.

Discusión. La capacidad instalada de los centros hospitalarios no se mide usualmente en camas disponibles por ciudad, sino en camas disponibles por cada 1000 habitantes, así las cosas, en este estudio, el resultado de camas por habitante en Pasto es de poco más de 1,6 camas. Lo que está muy por debajo de países como Estados Unidos, 2.8, China: 4.3, Francia: 6.0, Alemania 8.0, o Corea del Sur 12.3. Sin embargo, Colombia es de los países en América Latina con mayor número de camas por habitante: 1.8. según lo indica la OCDE (OECD-Data., 2020)[15] Por otro lado, en la ciudad objeto de estudio, se está por debajo de la media colombiana, según reportes.

Conclusión 4. *Factor estadístico.* Si se examinan con cuidado las primeras simulaciones, la tasa de contagio de $R_o = 1.9$, es una de las tasas de contagio que más rápido copa la población total y la capacidad instalada, sin embargo, en el proceso de simulación que se ajusta a una normal (Escenario 4), a pesar de que la media es 1.9, la capacidad instalada tiene mayor tiempo de disponibilidad en comparación con las simulaciones previas. Posiblemente esto se deba al fenómeno de **agrupación del riesgo**, (risk pooling). Algo similar a lo que sucede cuando en un almacén minorista, se hace una sola cola para todas las cajas, dónde, al alimentar de clientes los servidores desocupados, mientras otros están saturados, **disminuye** el tiempo general en la fila de todos los compradores, según se explica en (MIT Center for Transportation & Logistics, 2019)[13].

Discusión. (Escenario 6.) Estrategias para modificar la variable (p): una de las opciones para afectar la variable, es permitir la movilidad de las personas en grupos. Por ejemplo, si se divide en 5 la población actual, y se permite el contacto de forma alternada es equivalente a multiplicar por 5 la población para cada uno de los individuos, ya que, para cada individuo, el 80 % de la población estará por fuera de su posibilidad de contacto. En este escenario, ya que el pico de contagios es de 940, es decir aproximadamente 200 camas más que la capacidad

instalada, en 140 días, lo que daría suficiente tiempo para aumentar la capacidad instalada. Estas estrategias se evalúan, por Gudi et al. entre otras en el artículo, de sobre preparación y lecciones aprendidas de la enfermedad Novel Coronavirus. (Gudi & Tiwari, 2020)[9]. Por otro lado en el artículo: “investigación de tres clusterse de COVID-19 en Singapur...”, el equipo de investigación sobre la epidemia del Novel-Coronavirus de Singapur (20 autores), evalúan el comportamiento y la transmisión de la enfermedad entre clústeres de personas. De tal suerte que se valida la hipótesis de esta discusión con respecto a la segregación y confinamiento controlado. (Singapore 2019 Novel Coronavirus Outbreak Research Team., 2020)[19].

Discusión. (Escenario 7). Las estrategias para modificar la variable (q), es decir la probabilidad de contagio, —teniendo en cuenta que en este escenario no se contempla estrategias médicas—, serían permitir el contacto minimizando el riesgo de contacto riesgoso. O lo que es lo mismo, tomando precauciones como el uso universal de máscaras faciales y ampliando la distancia entre personas, de forma que la transmisión de aerosoles se disminuya al mínimo posible. En un meta-estudio publicado en 2016 por Barasheed et al. Con una muestra conjunta de 12710 participantes, se evidenció una protección significativa por el uso de las máscaras faciales, (tapabocas) contra enfermedades respiratorias, sin embargo, frente algunas enfermedades en particular sus resultados no han sido probados. (Barasheed, y otros, 2016)[2]. Por otro lado, con respecto a la medicina social, se han adelantado investigaciones sobre los cambios culturales y sociales que toman lugar con el uso generalizado de las máscaras faciales, y encontró en un estudio por Zhang et al, que involucra que suceden cambios con respecto a la responsabilidad social de evitar el contagio de la epidemia [en el estudio, la de H1N1], a la percepción de la severidad de la epidemia, a las guías sociales para el uso (el estudio encontró que entre más gente usara la máscara, había un menor rechazo individual al uso de la misma), y un aumento percibido de los beneficios. (Zhang, y otros, 2019)[28], Por otro lado, Wang et al. En un estudio llevado a cabo en Arabia Saudita, sobre la prevención del contagio de enfermedades virales respiratorias durante las procesiones del Hajj en Mina, Mecca, A.S., proveyó evidencia valiosa de la eficacia en la prevención de este tipo de enfermedades. (Wang, y otros, 2015)[23]

Discusión (Escenario 8). Este escenario contempla una solución médica. Es de esperarse que los países que están lidiando con la epidemia desde hace más tiempo, estén sistemáticamente experimentando y construyendo estudios experimentales con medicamentos conocidos. Podría existir la posibilidad de que algún medicamento paliativo permita cortar el ciclo de la enfermedad. El **Escenario 8** se trabaja sobre esos supuestos. El resultado muestra que el desplazamiento no es significativo, pero el pico de contagios disminuyó de forma importante, con respecto a la capacidad hospitalaria, es insuficiente el cambio para afrontar de manera eficiente la falta de capacidad, es por esto que la solución médica, debe ser más dramática, cómo, por ejemplo, una vacuna, que en teoría, disminuiría el tiempo de recuperación a algo muy cercano a cero.

Referencias

- [1] Alcaldía Municipal de Pasto. (16 de 03 de 2020). *Estadísticas - Municipio de Pasto*. Obtenido de Alcaldía de Pasto, página oficial:<https://www.pasto.gov.co/index.php/nuestro-municipio/estadisticas-municipio-de-pasto> 4
- [2] Barasheed, O., Alfelali, M., Mushta, S., Bokhary, H., Alshehri, J., Attar, A. B., & Rashid, H. (2016). Uptake and effectiveness of facemask against respiratory infections at mass gatherings: a systematic review. *International Journal of infectious diseases.* , 105-111. 15
- [3] Carro, R. (2009). *INVESTIGACION DE OPERACIONES EN ADMINISTRACION*. Mar del Plata: Pincu. 4

- [4] CDC “Center for Disease Control and Prevention.” (2020). Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Interim Clinical Guidance for Management of Patients with Confirmed Coronavirus Disease (COVID-19). *CDC, 2019*, 1–6. Retrieved from <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/clinical-guidance-management-patients.html> 3, 13
- [5] Chang, L., Yan, Y., & Wang, L. (2020). Coronavirus Disease 2019: Coronaviruses and Blood Safety. *Transfusion Medicine Reviews*, (September 2012), 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.tmr.2020.02.003> 2, 3
- [6] China CCDC. (20 de 02 de 2020). *Novel Coronavirus Pneumonia Emergency Response Epidemiology Team. Vital surveillances: the epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19)—China*. Obtenido de <http://weekly.chinacdc.cn>: <http://weekly.chinacdc.cn/en/article/id/e53946e2-c6c4-41e9-9a9b-fea8db1a8f51> 2
- [7] Eisenberg, J. (17 de 03 de 2020). *How Scientists Quantify the Intensity of an Outbreak Like COVID-19*. Obtenido de Michigan Health Lab: <https://labblog.uofmhealth.org/author/joseph-eisenberg-phd-mph> 14
- [8] Eppen, G. D., Gould, F. J., Schmidt, C. ., Moore, J. H., & Weatherford, L. R. (2000). *Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa*. (Quinta Ed.). Mexico: PEARSON / Prentice Hall. 4
- [9] Gudi, S., & Tiwari, K. (2020). Preparedness and Lessons Learned from the Novel Coronavirus Disease. *The international journal for occupational and environmental medicine* , 108-112. 15
- [10] Landau, S., & Crc, H. (n.d.). *A Handbook of Statistical Analyses using SPSS*. 5
- [11] Lee J. Krajewski, Larry P. Ritzman, M. K. M. (2013). *Operations management: processes and supply chains* (10th ed.). New Jersey 07458.: Prentice Hall. 4
- [12] Menéndez, R., Ferrando, D., Valléz, J. M., Martínez, E., & Perpiñá, M. (2001). Initial risk class and length of hospital stay in community-acquired pneumonia. *European Respiratory Journal*, (18), 151–156. Retrieved from <https://erj.ersjournals.com/content/erj/18/1/151.full.pdf> 6, 9
- [13] MIT Center for Transportation & Logistics. (2019). CTL . SCx – *MicroMasters in Supply Chain Management Key Concepts Document for SCx Courses 0-4* (winter 201). Cambridge, MA: MIT Center for Transportation & Logistics. 14
- [14] Mora, W. (2016). *Introducción a los Métodos Numéricos*. (2016th ed.). San José: Revista digital Matemática. 4
- [15] OECD-Data. (17 de 03 de 2020). *Hospital beds*. Obtenido de OECD.org.: <https://data.oecd.org/healthqt/hospital-beds.htm> 14
- [16] Perez-Franco, R. (2016). *rethinking your supply chain strategy* (first; M. S. C. S. Lab., ed.). Cambridge. 6
- [17] Read, J. M., Bridgen, J. R. E., Cummings, D. A. T., Ho, A., & Jewell, C. P. (2020). Novel coronavirus 2019-nCoV: early estimation of epidemiological parameters and epidemic predictions. *Medrxiv, 2020*(December 2019), 11.<https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2020.01.23.20018549> 14
- [18] Render, B., & Heizer, J. (2004). *Principios de administracion de operaciones* (Quinta). Mexico: PEARSON EDUCACIÓN. 2
- [19] Singapore 2019 Novel Coronavirus Outbreak Research Team. (2020). Investigation of three clusters of COVID-19 in Singapore: implications for surveillance and response measures. *Lancet.*, 1039-1046. 15
- [20] Standardized, T., Ratio, I., Healthcare, N., Network, S., & Nhsn, A. (2019). *THE NHSN STANDARDIZED INFECTION RATIO (SIR)*. (March), 1–49. 3

- [21] TAHA, H. A. (2012). *Investigación de operaciones* (Novena edi). México,: PEARSON EDUCACIÓN. 2
- [22] Univalle. (2018). *Las nuevas tecnologías y los desafíos para la administración* (1.; A. B. Duque, R. D. E. Romero, C. A. R. Rivillas, & A. R. Orejuela, eds.). Santiago de Cali.: Universidad del Valle. 4
- [23] Wang, M., Barasheed, O., Rashid, H., Booy, R., Bashir, H., Haworth, E., . . . Heron, L. (2015). A cluster-randomised controlled trial to test the efficacy of facemasks in preventing respiratory viral infection among Hajj pilgrims. *Journal of Epidemiology and Global Health.*, 181-189. 15
- [24] Weisstein, E. W. (2020). Kermack-McKendrick Model. *MathWorld*, 4-5. 2, 5
- [25] World Health Organization. (2020a). *Coronavirus disease 2019 (COVID-19)* (Vol. 2019). Retrieved from https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200307-sitrep-47-covid-19.pdf?sfvrsn=27c364a4_4_2
- [26] World Health Organization. (2020b). *Coronavirus disease 2019 (COVID-19)* (Vol. 55). 2
- [27] World Health Organization. (2020c). *Novel Coronavirus (2019-nCoV)*. Retrieved from https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200121-sitrep-1-2019-ncov.pdf?sfvrsn=20a99c10_4_2
- [28] Zhang, C., Chung, P., Liu, J., Chan, D., Hagger, M., & Hamilton, K. (2019). Health Beliefs of Wearing Facemasks for Influenza A/H1N1 Prevention: A Qualitative Investigation of Hong Kong Older Adults. *Asia-Pacific Journal of Public Health.*, 246-256. 15
- [29] Zhao, S., Ran, J., Musa, S. S., Yang, G., Lou, Y., Gao, D., & Yang, L. (2020). Preliminary estimation of the basic reproduction number of novel coronavirus (2019-nCoV) in China , from 2019 to 2020 : A data-driven analysis in the early phase of the outbreak. *International Journal of Infectious Diseases*, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2020.01.23.91639514>
- [30] Zunyou Wu, M. P., & Jennifer M. McGoogan, P. (24 de 02 de 2020). *Characteristics of and Important Lessons From the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in China*. Obtenido de JAMA Network: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2762130> 2, 3, 4, 6, 7, 10