



The SIRD epidemiological model applied to study the spread of the COVID-19 in the Peruvian region of Tacna

El modelo epidemiológico SIRD aplicado a estudiar la propagación de la COVID-19 en la región peruana de Tacna

Humberto B. Vargas-Pichón^{ID}, Edson A. Coayla-Teran^{ID} and Edgar Tejada-Vásquez^{ID}

Received, Dec. 10, 2021

Accepted, Mar. 02, 2022



How to cite this article:

Vargas-Pichón J, Coayla-Teran E, Tejada-Vásquez E. *El modelo epidemiológico SIRD aplicado a estudiar la propagación de la COVID-19 en la región peruana de Tacna*. *Selecciones Matemáticas*. 2022;9(1):137-144. <http://dx.doi.org/10.17268/sel.mat.2022.01.10>

Abstract

In the present paper, the SIR epidemiological model was used to study the behavior of the spread of the COVID-19 Pandemic in the Tacna Region. To determine the parameters of the model, the information published through social networks by the Regional Health Directorate of the Tacna Region of Peru was used, which was systematized in an EXCEL matrix and then exported to process the information in the System of Scientific Computing Mathematica. As a result, the graphs corresponding to the model referred to the Susceptible, Infected, Recovered and Deceased individuals from the COVID-19 Pandemic in the Tacna Region were obtained and then the graphs were interpreted in the time interval of the study.

Keywords . COVID-19, SIRD epidemiological model.

Resumen

En la presente investigación se usó el modelo epidemiológico SIRD para estudiar la propagación de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna. Para determinar los parámetros del modelo se usó la información que publicó a través de redes sociales la Dirección Regional de Salud de la Región de Tacna-Perú, la cual se sistematizó en una matriz EXCEL y luego se exportó para procesar la información en el Sistema de Computación Científica Mathematica. Como resultado se obtuvo los gráficos correspondientes al modelo referidos a los individuos Susceptibles, Infectados, Recuperados y Fallecidos de la Pandemia del COVID-19 en la Región de Tacna y luego se interpretó los gráficos en el intervalo de tiempo del estudio.

Palabras clave. COVID-19, modelo epidemiológico SIRD.

1. Introducción. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los coronavirus son una extensa familia de virus que pueden causar enfermedades tanto en animales como en humanos. En los humanos, se sabe que varios coronavirus causan infecciones respiratorias que pueden ir desde el resfriado común hasta enfermedades más graves como el síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS) y el síndrome respiratorio agudo severo (SARS). El coronavirus que se ha descubierto más recientemente, SARS-COV-2, causa la enfermedad denominada COVID-19. Tanto este nuevo virus como la enfermedad que provoca eran desconocidos antes de que estallara el brote en Wuhan (China) en diciembre de 2019. Actualmente la COVID-19 es una pandemia que afecta a casi todos los países. A finales de enero del 2020, se reportaron cerca de 80 000 casos de COVID-19 y 2 800 muertes en toda China, identificándose los primeros casos en Alemania, Italia y España, por lo que la Organización mundial de la Salud (OMS) declaró el brote de

*Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Av. Miraflores S/N, Tacna - Perú. (humberto.vargas@unjbg.edu.pe).

†Departamento de Matemáticas, UFBA, Av. Milton Santos S/N, Ondina, Salvador, Bahia, Brasil, 40170-110. Profesor Visitante en el Departamento Académico de Matemática y Estadística de la UNSAAC - Perú. (coayla@ufba.br).

‡Dirección Ejecutiva de Epidemiología - DIRESA, Tacna - Perú. (etejada.1@hotmail.com).

SARS-COV-2 como una emergencia de Salud Pública de Importancia Internacional (ESPII). Entre el 02 y el 10 de marzo, se pasó de 88 913 a 113 672 casos confirmados distribuidos en más de 100 países. La rápida expansión del virus por países del continente asiático, Europa, África, América y Oceanía hizo que la OMS declarase la pandemia global el 11 de marzo del 2020 [12].

El primer caso de la pandemia de COVID-19 en Perú fue confirmado el 06 de marzo de 2020 en la ciudad de Lima. Desde la víspera se especulaba en las redacciones la llegada del primer caso del coronavirus al Perú, tras las confirmaciones en los últimos días en Chile, Brasil y Ecuador, y es que solo eran horas para conocerse de un nuevo caso en la región, entre los que estaba el Perú. Tal como sucedió en otros países, el primer caso reportado en el Perú - dado a conocer por el ex presidente Vizcarra- fue de un viajero, se trató de un hombre de 25 años, que trabajaba como piloto de avión en Latam Airlines y que llegó de Europa, luego de viaje por vacaciones en España, Francia y República Checa. Según lo informado por el Ministerio de Salud, ingresó al Perú el 26 de febrero en un vuelo procedente de Europa, posiblemente España. La aerolínea Latam Airlines descartó que el ingreso haya sido usando una de sus aeronaves. El Ministerio de Salud detalló que la persona ingresó al Perú sin mostrar síntomas, y es recién el 29 de febrero del 2020 empezó a manifestar: fiebre, malestar general, tos, congestión nasal y dolor de cabeza. A partir de ahí, acudió a una clínica, no el mismo día, sino en los días siguientes, entre el 3 y 4 de marzo. En dicho establecimiento de salud se hicieron las evaluaciones y el 5 de marzo se puso en contacto con el Ministerio de Salud al mostrar los signos de un posible caso. El jueves 5 de marzo del mismo año un equipo de epidemiología tomó las muestras de la persona y en la madrugada del 6 de marzo se determinó como positivo para Covid-19. “Tras el resultado se aisló a la persona y se estuvo monitoreando a la familia”, comentó Manuel Loayza, director General de Epidemiología, Prevención y control de Enfermedades del Minsa de la época [8].

Las autoridades regionales de Tacna confirmaron el primer caso que fue diagnosticado positivo, para COVID-19 en la ciudad fronteriza. En conferencia de prensa en la que estuvieron presentes el gobernador regional, Juan Tonconi, y el director regional de Salud de ese entonces, Juan Cánepa, confirmaron que la paciente era una mujer de 38 años, que presentaba sintomatología leve relacionada con el virus desde el martes 24 de marzo del 2020. Se supo que esta persona se encontraba en aislamiento domiciliario, en el distrito Coronel Gregorio Albarracín Lanchipa, en el cono sur de esta ciudad. El jueves 26 de marzo del mismo año fue atendida en el Hospital de EsSalud, en el distrito de Calana, donde se le tomó la prueba correspondiente. El resultado de la prueba para COVID-19 llegó a Tacna el sábado 28 de marzo por la noche y fue dado a conocer el día domingo 29 de marzo, por las autoridades. Juan Cánepa, ex director regional de Salud de Tacna, señaló que se tomaron las medidas pertinentes en la región, y declaró: “ya se han activado los protocolos epidemiológicos, ella está en aislamiento desde el día 26 de marzo, recibe tratamiento sintomático, porque no hay complicación en la enfermedad”. La autoridad de Salud confirmó el desarrollo de la sintomatología en la paciente, “inició los síntomas el 24 de marzo, son síntomas respiratorios comunes, como tos, dolor de garganta, congestión nasal, malestar general, dolor de cabeza, dolor muscular. No presentó fiebre, la temperatura fue 37 grados centígrados”. El médico enfatizó que era necesario tomar muestras a todos los familiares, colegas, y personas que tuvieron contacto con la paciente para determinar otros casos probables de COVID-19 en Tacna, así como tratar de establecer el lugar donde la paciente contrajo la enfermedad. Se supo que la paciente habría tenido contacto con ciudadanos haitianos, quienes ingresaron ilegalmente al país, por la frontera con Chile, luego del cierre de fronteras decretado por el Perú. Al encontrarse con menores de edad, los extranjeros fueron trasladados a la Comisaría de Familia. Sin embargo, el director regional de Salud de ese entonces, el día 20 de marzo de ese mismo año, descartó que los extranjeros fueran portadores de COVID-19, pero manifestó que presentaban problemas respiratorios. Vale señalar que el Ministerio de Salud informó el día 29 de marzo del 2020 que a nivel nacional la cantidad de fallecidos por coronavirus (COVID-19) se incrementó a 18 y los casos confirmados sumaban 852 [5].

Otro momento importante fue el proceso de vacunación, la aplicación de vacunas contra la COVID-19 se inició el 19 de febrero de 2021 en la región de Tacna, en los establecimientos de salud de nivel I-4: San Francisco, La Esperanza y Ciudad Nueva, establecimientos de salud de nivel I-3: Metropolitano, Alto de la Alianza, Bolognesi, Pocollay, Augusto B. Leguía, Viñani y Natividad; así como, el hospital Hipólito Unanue: II-2 y otros [6].

La presente investigación tuvo por objetivo elaborar e interpretar la curva de Contagio Neto (Periodo 29 marzo 2020 al 26 de agosto 2021) y posibles escenarios de la dinámica de la evolución de la Pandemia COVID-19 (Periodo 29 marzo 2020 al 09 de febrero 2021) en la Región de Tacna, usando el modelo SIRD. Cabe mencionar que hay trabajos dedicados a estudiar la dinámica de la evolución de la Pandemia en la Región de Tacna, por ejemplo Coayla-Teran [4], en el que es usado el modelo SIRD con coeficientes dependientes del tiempo y con retardo para modelar el tiempo de incubación que ocurre desde el momento que una persona entra en contacto con el virus hasta el momento que realmente es declarada como infectada. Aquel trabajo tuvo por objetivo hacer pronósticos para periodos cortos de 7 días, a diferencia de aquel trabajo el presente usa coeficientes constantes y tiene por objetivo prever escenarios para 2 y 3 años. Otro trabajo

que mencionaremos aquí es Vergara et al. [13], los autores de ese trabajo aplican el modelo epidemiológico SIR para varias regiones del Perú incluyendo la de Tacna. A diferencia de este último el presente trabajo usa el modelo epidemiológico SIRD, la razón para esto es que al añadir el grupo de las personas difuntas (D) queremos estimar el impacto social en la región, recordando que las medidas restrictivas se hacen para evitar el colapso del sistema del sistema de salud lo cual puede incrementar los decesos.

El presente trabajo es organizado de la siguiente manera: en la sección 2 presentamos las definiciones, notación usada y el modelo SIRD que será usado en las secciones subsiguientes. En la sección 3 describimos los materiales y métodos usados. Finalmente en la sección 4 presentamos los resultados obtenidos: Curva de contagio neto y proyecciones de la dinámica de la evolución de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna, así como posibles escenarios para dos y tres años de la evolución de la epidemia en base a la información correspondiente al periodo 29 de marzo del 2020 al 09 de febrero del 2021.

2. Modelos epidemiológicos y preliminares. El trabajo pionero de Kermack y McKendrick[11] propone un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para la evolución de la propagación de una epidemia (este modelo es usualmente conocido por las iniciales *SIR*). Dicho modelo considera la población total de un entorno geográfico, N , afectada por una epidemia, la cual se divide en tres grupos: los susceptibles S que al contactarse con un infectado puede adquirir el virus, los infectados I que tienen el virus y los removidos R igual a los dados de alta más los decesos. La dinámica de este modelo matemático está dada por el siguiente sistema de tres ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\lambda S(t)I(t), \\ \frac{dI}{dt} &= \lambda S(t)I(t) - \gamma I(t), \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I(t).\end{aligned}\tag{2.1}$$

donde: λ es la tasa de *infección* o *transmisión*, γ es la tasa de *remoción* o *recuperación*, t es el tiempo en días, $S(t)$ es la cantidad de personas susceptibles en el día t , $I(t)$ es la cantidad de personas infectadas en el día t , $R(t)$ es la cantidad de personas removidas en el día t . Además, se cumple la ecuación: $S(t) + I(t) + R(t) = N$, para todo $t \geq 0$. N representa la población total, que asumimos que es constante. Esto es, no se han producido nacimientos ni muertos por causas diferentes a la epidemia, durante todo el periodo del estudio. El modelo *SIR* a pesar de su simplicidad sirvió para tener una idea de las posibles consecuencias de la epidemia, por ejemplo, fue usado por [13] para estudiar la evolución del COVID-19 en las regiones de Perú, incluyendo Tacna. Posteriormente muchas alternativas se han propuesto con la intención de mejorar el entendimiento de la epidemia, por ejemplo, se ha propuesto el modelo SIRD (ver Bailey [1]) en el cual la variable R ahora es usada para denotar los recuperados (altas epidemiológicas) y la variable D es usada para denotar los decesos; el modelo SIRD que adoptaremos es:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\lambda S(t)I(t), \\ \frac{dI}{dt} &= \lambda S(t)I(t) - \gamma I(t) - \mu I(t), \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I(t), \\ \frac{dD}{dt} &= \mu I(t).\end{aligned}\tag{2.2}$$

donde μ es la tasa de *defunción* y $S(t) + I(t) + R(t) + D(t) = N$, para todo $t \geq 0$. Cabe mencionar que para cualquier $T > 0$ el sistema (2.2) con sus respectivas condiciones iniciales tiene una única solución (S, I, R, D) en el intervalo $[0, T]$ con las adecuadas ordenes de derivada. Como ya es apuntado por varios trabajos (ver por ejemplo [13]) la interpretación para las ecuaciones en el sistema (2.2) es: en la primera ecuación el grupo de personas susceptibles disminuye proporcionalmente al “encuentro de susceptibles con infectados”, la segunda dice que el grupo de infectados aumenta en la misma proporción que pierden miembros los susceptibles, y pierden miembros para el grupo de recuperados y para el grupo de decesos. La tercera dice que los recuperados aumentan proporcionalmente al número de infectados. La cuarta afirma que los decesos son proporcionales al número de infectados. Como ya fue mencionado en el presente trabajo hemos preferido adoptar el modelo SIRD pues queremos tener una estimativa para los decesos a diferencia de [13] donde por haber adoptado el modelo SIR no hicieron dicha estimativa. Queremos recordar que una preocupación constante de las autoridades y los responsables del sistema de salud es con el número de decesos [9].

La siguiente definición es importante en el presente trabajo y será bastante usada.

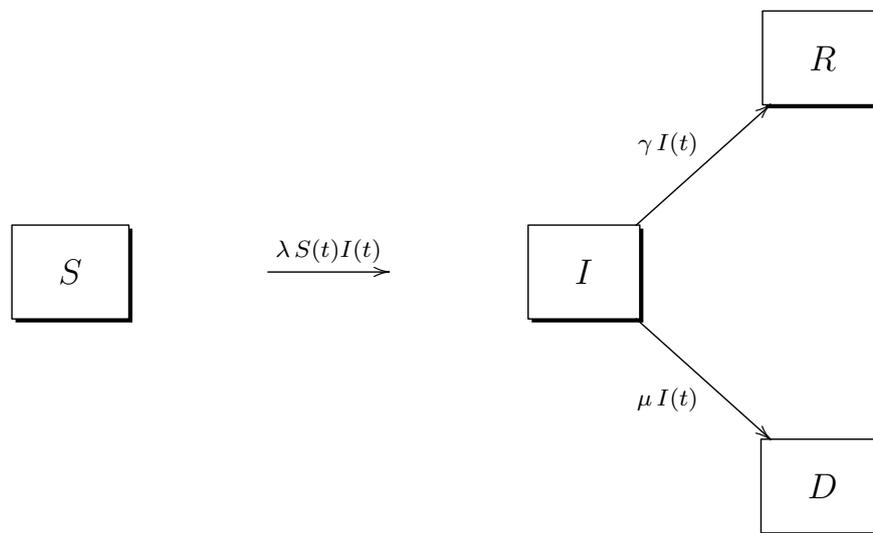


Figura 2.1: Diagrama epidemiológico del modelo SIRD.

Definición 2.1. (Contagio Neto) Definimos al Contagio Neto (CN) de la Pandemia del COVID 19 como: $CN(t) = I(t) - R(t) - D(t) - A(t)$. Donde $A(t)$ representa las personas aisladas y t es el tiempo en días, i.e. $CN(t)$ es la cantidad de personas con contagio neto en el día t .

3. Materiales y Métodos. Se trabajó con una población de $N = 370974$ habitantes para el año 2020 que fueron considerados como personas susceptibles en la Región de Tacna (ver [10]). Para determinar la tasa de infección, la tasa de recuperación y la tasa de defunción del modelo, se usó la información que publicó diariamente, a través de redes sociales, la Dirección Regional de Salud de la Región de Tacna del Perú-DIRESA (ver [7, 6]), la cual se sistematizó en una matriz EXCEL teniendo en cuenta la media y la mediana obtenida de ambos parámetros en el periodo de estudio. Luego se exportó dicha información en el Sistema de Computación Científica Mathematica para obtener los gráficos correspondientes a la curva de Contagio Neto y cuatro (04) posibles escenarios de la dinámica de la evolución de la Pandemia COVID-19 usando el modelo SIRD.

Como se mencionó, hemos trabajado con los datos publicados por DIRESA en la red social Facebook, por eso queremos observar lo siguiente; para los decesos el día 19 de noviembre de 2020 hubo una disminución de 31 personas en relación al día siguiente, esto generó que la tasa de defunción sea negativa por algunos días, pero como fue usada la media o mediana para los cálculos de dicha tasa se puede considerar los cálculos obtenidos para la elaboración del presente trabajo.

Finalmente, en el presente trabajo, además de la media, también fue tomado en cuenta la mediana para la obtención de los parámetros λ , γ y μ del modelo SIRD considerando el periodo de estudio del 29 marzo 2020 al 09 de febrero 2021.

4. Resultados. Usando el Sistema de Computación Científico Mathematica V 12 se obtuvo los siguientes resultados:

Interpretación:

El pico más alto en la primera ola de la curva de Contagio Neto ocurrió el 161avo día (04 setiembre 2020) con 403 personas con contagio neto del COVID-19. Del mismo modo, el pico más alto en la segunda ola del periodo de estudio ocurrió el 336avo día (27 de febrero 2021) con 413 personas con contagio neto del COVID-19. Finalmente, el pico más alto en la tercera ola del periodo de estudio ocurrió el 419avo día (21 de mayo 2021) con 379 personas con contagio neto del COVID-19 con tendencia a seguir bajando.

Por otro lado, posibles escenarios de la dinámica de la propagación de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna proyectada a dos (02) y tres (03) años considerando la media de los parámetros tasa de transmisión, tasa de recuperación y tasa de defunción obtenidos día a día durante el periodo de estudio: periodo 29 marzo 2020 al 09 febrero 2021 (318 días).

Interpretación: Teniendo en cuenta que los parámetros λ , γ y μ se obtuvieron al calcular la media de los parámetros obtenidos día a día durante el periodo de estudio 29 marzo 2020 al 09 de febrero 2021 y proyectado a dos (02) años, podemos interpretar que la infección por COVID-19 en la Región de Tacna, recién comenzará a reducirse aproximadamente desde el día 350, que contados desde el 29 de marzo del

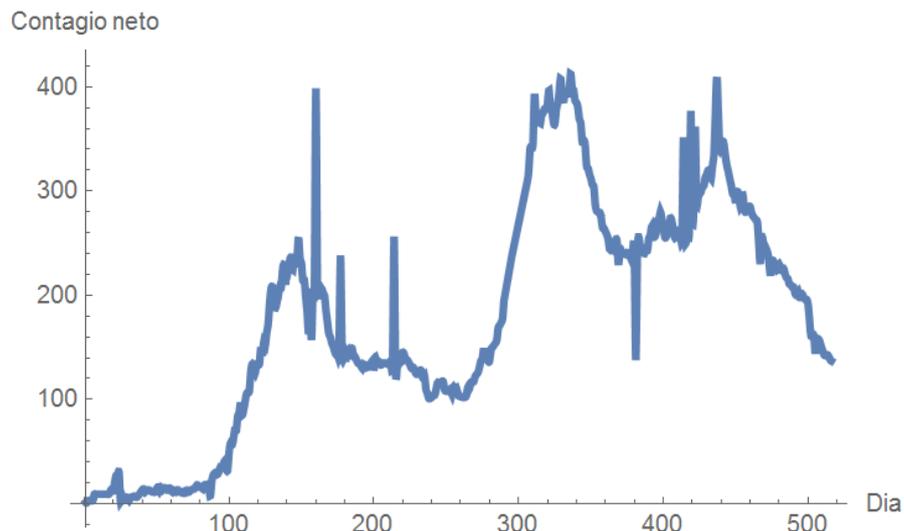


Figura 4.1: Comportamiento de la curva de contagio neto en la Región de Tacna, periodo 29 marzo 2020 al 26 de agosto 2021 (516 días).

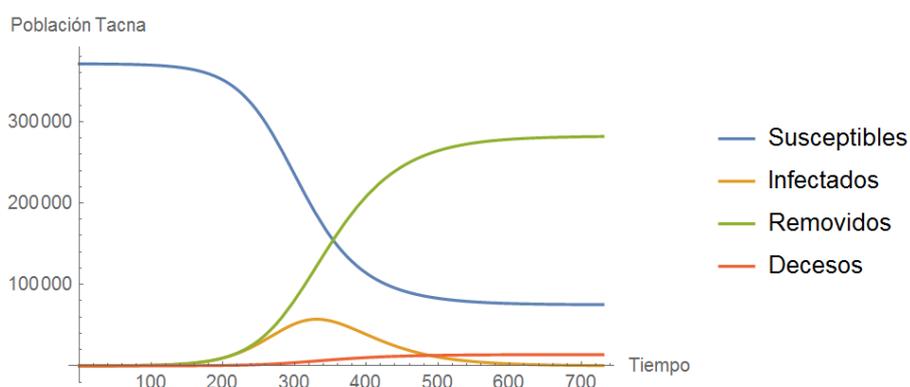


Figura 4.2: Escenario 01: Simulación de la evolución de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna, proyectado al periodo de 29 marzo 2020 al 28 marzo 2022 (730 días = 02 años) considerando las medias de una tasa de infección o transmisión $\lambda = 9,0013 \times 10^{-8}$, una tasa de recuperación $\gamma = 0,0106451$ y una tasa de defunción $\mu = 0,0005492$.

2020 viene a ser el día 13 de marzo del 2021. En éste escenario el número máximo de infectados (día 330 aproximadamente) estará por debajo de 50 mil personas y luego irá disminuyendo con el transcurrir de los días. Así, cuando se cumpla dos años posiblemente todos seamos inmunes. Finalmente, a partir del día 730 el número de decesos se mantendrá por debajo de las 20 mil personas.

Interpretación:

Teniendo en cuenta que los parámetros λ , γ y μ se obtuvieron al calcular la media de los parámetros obtenidos día a día durante el periodo de estudio 29 marzo 2020 al 09 de febrero 2021 y proyectado a tres (03) años, podemos interpretar que la infección por COVID-19 en la Región de Tacna, recién comenzará a reducirse aproximadamente desde el día 350, que contados desde el 29 de marzo del 2020 viene a ser el día 13 de marzo del 2021. En este escenario el número máximo de infectados (día 330 aproximadamente) estará por debajo de 50 mil personas y luego irá disminuyendo con el transcurrir de los días. Así, cuando se cumpla tres años posiblemente todos seamos inmunes. Finalmente, a partir del día 1095 el número de decesos se mantendrá por debajo de las 20 mil personas.

Finalmente, los posibles escenarios de la dinámica de la propagación de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna proyectada a dos (02) y tres (03) años considerando la mediana de los parámetros tasa de transmisión, tasa de recuperación y tasa de defunción obtenidos día a día durante el periodo de estudio: periodo 29 marzo 2020 al 09 febrero 2021 (318 días), y que se se proyectará a dos y tres años.

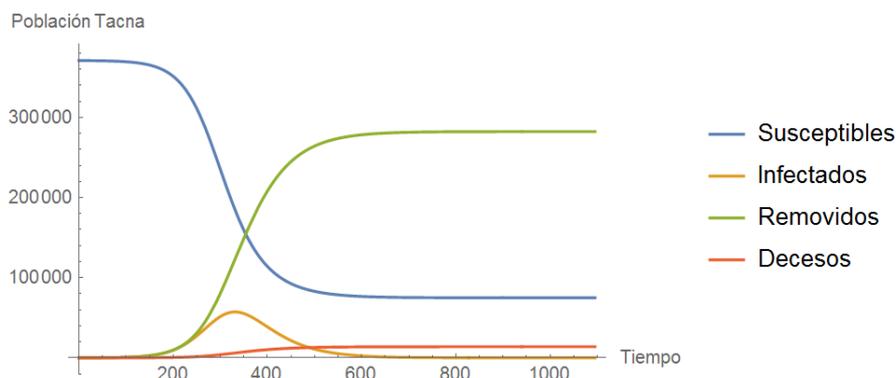


Figura 4.3: Escenario 02: Simulación de la evolución de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna, proyectado al periodo 29 marzo 2020 al 28 marzo 2023 (1095 días = 03 años) considerando las medias de una tasa de infección o transmisión $\lambda = 9,0013 \times 10^{-8}$, una tasa de recuperación $\gamma = 0,0106451$ y una tasa de defunción $\mu = 0,0005492$.

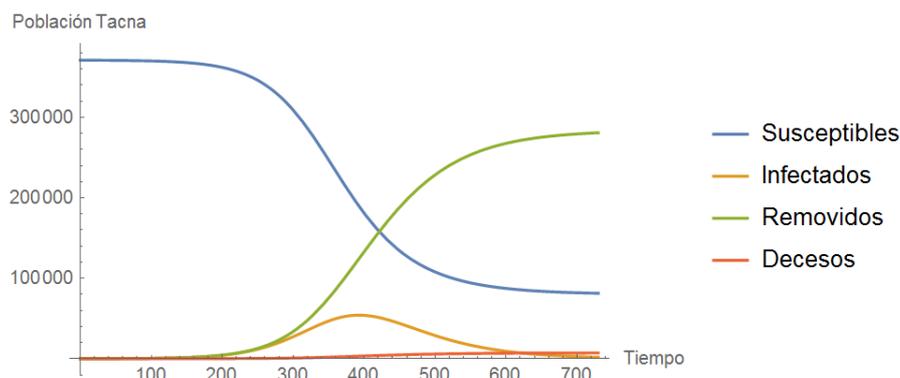


Figura 4.4: Escenario 03: Simulación de la evolución de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna, proyectado al periodo 29 marzo 2020 al 28 marzo 2022 (730 días = 02 años) considerando las medianas de una tasa de infección o transmisión $\lambda = 6,2022 \times 10^{-8}$, una tasa de recuperación $\gamma = 0,0070519$ y una tasa de defunción $\mu = 8,618 \times 10^{-5}$.

Interpretación:

Teniendo en cuenta que los parámetros λ , γ y μ se obtuvieron al calcular la mediana de los parámetros obtenidos día a día durante el periodo de estudio 29 marzo 2020 al 09 de febrero 2021 y proyectado a dos (02) años, podemos interpretar que la infección por COVID-19 en la Región de Tacna, recién comenzará a reducirse aproximadamente desde el día 400, que contados desde el 29 de marzo del 2020 viene a ser el día 02 de mayo del 2021. En este escenario el número máximo de infectados (día 400 aproximadamente) estará por debajo de 50 mil personas y luego irá disminuyendo con el transcurrir de los días. Así, cuando se cumpla dos años posiblemente todos seamos inmunes. Finalmente, a partir del día 730 el número de decesos se mantendrá por debajo de las 10 mil personas.

Interpretación:

Teniendo en cuenta que los parámetros λ , γ y μ se obtuvieron al calcular la mediana de los parámetros obtenidos día a día durante el periodo de estudio 29 marzo 2020 al 09 febrero 2021 y proyectado a tres (03) años, podemos interpretar que la infección por COVID-19 en la Región de Tacna, recién comenzará a reducirse aproximadamente desde el día 400, que contados desde el 29 de marzo del 2020 viene a ser el día 02 de mayo del 2021. En éste escenario el número máximo de infectados (día 400 aproximadamente) estará por debajo de 50 mil personas y luego irá disminuyendo con el transcurrir de los días. Así, cuando se cumpla tres años posiblemente todos seamos inmunes. Finalmente, a partir del día 1095 el número de decesos se mantendrá por debajo de las 10 mil personas.

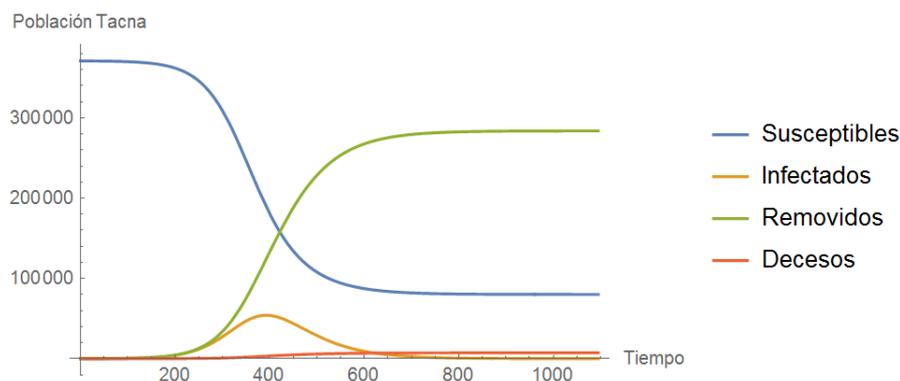


Figura 4.5: Escenario 04: Simulación de la evolución de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna, periodo 29 marzo 2020 al 28 marzo 2023 (1095 días = 03 años) considerando las medianas de una tasa de infección o transmisión $\lambda = 6,2022 \times 10^{-8}$, una tasa de recuperación $\gamma = 0,0070519$ y una tasa de defunción $\mu = 8,618 \times 10^{-5}$.

5. Discusión. Como mencionado por Brauer y Castillo-Chavez [3] la complejidad de la dinámica de una enfermedad infecciosa dicta el uso simplificado de modelos matemáticos para obtener alguna percepción sobre la propagación de la enfermedad, esto permitiría probar estrategias de control de la propagación. A diferencia de los resultados obtenidos por [13], en donde solo se trabajó con la media para obtener los parámetros λ , γ y μ , el periodo de estudio fue más corto (los dos primeros meses desde el paciente cero), en el presente trabajo, además de la media, también fue tomado en cuenta la mediana para la obtención de dichos parámetros y se consideró un periodo de estudio más amplio de más de diez meses desde el paciente cero (29 marzo 2020 al 09 de febrero 2021). La ventaja de usar la mediana respecto de la media es que la mediana es más robusta (más exacta).

6. Conclusiones.

- Se elaboró e interpretó la Curva de contagio Neto de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna en el periodo 29 de marzo 2020 al 26 de agosto del 2021.
- Se usó el modelo epidemiológico SIRD para determinar la propagación de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna en base a la información obtenida en el periodo 29 de marzo 2020 a 09 de febrero del 2021.
- Se obtuvo posibles escenarios de la dinámica de la propagación de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna proyectada a dos (02) y tres (03) años considerando la media y la mediana de los parámetros tasa de transmisión, tasa de recuperación y tasa de defunción obtenidos día a día durante el periodo de estudio: 29 de marzo del 2020 al 09 de febrero del 2021.
- Se obtuvo posibles escenarios de la dinámica de los decesos por causa de la Pandemia COVID-19 en la Región de Tacna proyectada a dos (02) y tres (03) años considerando la media y la mediana de los parámetros tasa de transmisión, tasa de recuperación y tasa de defunción obtenidos día a día durante el periodo de estudio: 29 de marzo del 2020 al 09 de febrero 2021.

7. Agradecimientos. El primer autor agradece a Dios por guiar sus pasos en la presente investigación. Asimismo, agradece a los estudiantes Jhoswel Abel Quispe Vilca, Rosselyn Yanela Apaza Rivera, Javier Jesús Tomás Calderón Barretón, Winder Ivan Condori Neira, Yhon Clinton Flores Callata y Ruth Apaza Romero de la Escuela Profesional de Matemática de la asignatura de Análisis Numérico II del año 2020 II de la UNJBG quienes colaboraron en la sistematización de la información. El segundo autor agradece al Profesor Marcelo Magalhães Taddeo del departamento de Estadística de la Universidade Federal da Bahia por las varias pláticas acerca de modelos epidemiológicos.

ORCID and License

Humberto B. Vargas-Pichón <https://orcid.org/0000-0003-4892-5275>

Edson A. Coayla-Teran <https://orcid.org/0000-0002-6329-4929>

Edgar Tejada-Vásquez <https://orcid.org/0000-0002-8471-5630>

This work is licensed under the [Creative Commons - Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Referencias

- [1] Bailey NTJ. The mathematical theory of infectious diseases and its applications. 2nd ed. London: Griffin, 1975.
- [2] Blackwood JC and Childs LM. An introduction to compartmental modeling for the budding infectious disease modeler. *Letters in Biomathematics*, 2018; 5(1): 195-221.
- [3] Brauer F. and Castillo-Chavez C. *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. New York: Springer-Verlag; 2001.
- [4] Coayla-Teran EA. A COVID-19 time-dependent SIRD model using functional differential equations. *Int. J. Ecol. Dev.* 2021; 36(3): 1-11.
- [5] El Comercio [Internet]. [updated 2022 Jan. 13; cited 2022 Jan. 13]. Available from: <https://elcomercio.pe/peru/tacna/tacna-confirman-el-primer-caso-de-coronavirus-en-la-region-coronavirus-covid-19-noticia/>
- [6] DIRESA - Tacna [Internet]. Dirección Regional de Salud de Tacna, [updated 2021 Dec. 23; cited 2021 Sept. 18]. Available from: <https://www.facebook.com/drstacna/photos/a.1414491718856581/2513966848909057>
- [7] DIRESA - Tacna [Internet]. Dirección Regional de Salud de Tacna, [updated 2021 Dec. 23; cited 2021 Sept. 18]. Available from: http://www.diresatacna.gob.pe/nuevo/sistema/documentos/epideomologia/documento_507838.pdf.
- [8] Gestión [Internet]. [updated 2022 Jan. 13; cited 2022 Jan. 13]. Available from: <https://gestion.pe/peru/primer-caso-de-coronavirus-en-peru-los-detalles-del-contagio-del-piloto-noticia/?ref=gesr>
- [9] Gestión [Internet]. [updated 2022 Jan. 13; cited 2022 Jan. 13]. Available from: <https://gestion.pe/peru/tacna-reportan-que-hospitalizados-por-covid-19-se-duplican-y-no-hay-camas-uci-disponibles-nndc-noticia/?ref=gesr>
- [10] INEI [Internet]. Instituto Nacional de Estadística e Informática [updated 2021 Dec. 23; cited 2021 Sept. 18]. Available from: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1715/libro.pdf
- [11] Kermack W, McKendrick A. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society A*, 1927; 115(772): 700-721.
- [12] OMS - Organización Mundial de la Salud [Internet]. Preguntas y respuestas sobre la enfermedad por coronavirus (COVID-19), 2021 [updated 2021 Sept. 18; cited 2021 Sept. 18]. Available from: <https://www.who.int/es/emergencias/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public/q-a-coronaviruses?gclid=CjwKCAiA65iBBhB-EiwAW253W04F8sFQAU3Q-TihXtf2XT64RWGGCy-9WxxaaT6d0tfQYk-mBgtDLxoCmGMQAvD.BwE>
- [13] Vergara ME, León NR, More AJ, Arteaga BD, Asmat UR, Peralta CJ, *et al.* Modelo básico epidemiológico SIR para el COVID-19: caso las Regiones del Perú. *Selecciones Matemáticas*, 2020;7(1):151-161.