

Estimación de contagios por Covid19 en México

Contagion curve for Covid-19 in Mexico

María Beatriz Bernábe Loranca ^{1a} , Gerardo Martínez Guzman ¹, Mariano Larios Gómez , Alberto Carrillo Canan ²  y Carmen Cerón Garnica ¹ 

¹Facultad de Ciencias de la Computación,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

²Facultad de Filosofía y Letras, BUAP
Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Ciencias de la Información.
abeatriz.bernabe@gmail.com

PALABRAS CLAVE:

Análisis Multicriterio,
Covid19, Curva de
Contagio, Función
Logística, Predicción
Basadas en Datos,
Regresión Lineal.

RESUMEN

En este trabajo se propone una exploración de datos para la predicción del comportamiento de los contagios por la pandemia del año 2020 por el COVID-19, enfermedad causada por el Coronavirus SARS-COV2. La investigación realizada presenta una exploración los datos adquiridos por la base de datos de la OMS (Organización Mundial de la Salud) y del CEPCE (Centro Europeo para la Prevención y Control de Enfermedades). Se desarrollaron dos propuestas, la primera utiliza una función logística y la segunda una ecuación de regresión, ambas generan pronósticos con una buena aproximación. Con estas propuestas se lograron buenos resultados demostrables. Finalmente, se utilizó un modelo multicriterio que proporciona un resultado independiente de la función logística. Los resultados importantes arrojados por un algoritmo es que se estima que el mayor contagio ha sido desde el 5 de mayo durante 10 días críticos posteriores.

KEYWORDS:

Multicriteria Analysis,
Covid-19, Contagion
Curve, Logistic Function,
Data Prediction Based,
Linear Regression.

ABSTRACT

In this works, we proposed a data exploration to predict behavior of COVID-19 infections. Its disease caused by Coronavirus SARS-COV2, this research presents a data-exploration provide to WHO (World Health Organization) and ECDC (European Center for Disease Prevention and Control) data-based. Two proposals ware developed, first uses a logistic function and second uses a regression equation, both generate a diagnostic with a good approximation. Finally, we were used a multi-criteria model which provides an independent result of logistic function. Important results produced by an algorithm is estimated that greatest contagion has been since May 5 for ten critical days.

Recibido: 18 de enero de 2021 • Aceptado: 08 de abril de 2021 • Publicado en línea:

I. INTRODUCCIÓN

A partir de la aparición de un virus que se ha extendido a nivel mundial, el ya conocido hoy como Coronavirus SARS-COV2, brotó en China en diciembre de 2019 y provoca una enfermedad llamada Covid-19. Traducido por la capacidad y extrapolación de contagio, se extendió como pandemia y ha implicado una serie de medidas sanitarias alrededor del mundo. Por otro lado, muchas energías se han estado aplicando en encontrar alternativas para que la humanidad se encuentre protegida, donde epidemiólogos, virólogos y científicos en el área de la medicina, biología, matemáticas, computación etcétera, trabajan arduamente para conseguir no solo un tratamiento para el Covid-19, también se batalla en el desarrollo de una posible vacuna.

Existe una gran extensión en la literatura que aborda la estimación de contagios para epidemias y pandemias; intervenir en este punto implica una amplia investigación más allá de los alcances de este artículo.

Distintos enfoques de estimación sobre contagio de gripes pueden encontrarse en la literatura, por ejemplo, para la influenza H1N1 se ha aplicado el modelo SIR (Susceptible, Recuperada, Infectada) que en este trabajo aplicamos [1]. Respecto a los modelos para aproximar la curva de contagios de los Coronavirus, algunos estudios se centran en modelar el contagio de la gripe estacional con análisis de regresión [2]. En este escenario, científicos y académicos del área de matemáticas y computación proponen distintos enfoques para predecir el crecimiento de los contagios, determinar las condiciones en el punto máximo y posteriormente establecer el descenso, del mismo modo que los autores de este trabajo, quienes han calculado proyecciones de los contagios de Covid-19.

La estructura del artículo se describe de esta manera: la sección dos describirá de los antecedentes y surgimiento del Covid-19. La sección tres aborda la predicción de contagio con una función aproximada de la curva logística y de análisis de regresión; para ello se consideraron diferentes datos de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés: *World Health Organization*) y el Centro Europeo para la Prevención y Control de Enfermedades (ECDC, por sus siglas en inglés: *European Centre for Disease Prevention and Control*) [3, 4]. La sección 4 se ocupa de la presentación de un modelo de análisis multicriterio, la cual es una herramienta para la toma de decisiones muy útil en el área de computación y optimización. Finalmente se discuten los resultados en las conclusiones.

II. ANTECEDENTES

La familia Coronavirus CoV, incluye una amplia variedad.

Estos son patógenos reconocidos en humanos, mamíferos y aves. Los CoV son virus ARN grandes, con el genoma de mayor tamaño entre los virus ARN conocidos. Bajo el microscopio se observan unas espinas en la superficie del virus, tal forma recuerda a una corona y que da lugar al nombre del microorganismo [5].

En humanos, la infección por Coronavirus es muy frecuente y causan, por lo general enfermedades leves o moderadas del tracto respiratorio superior, conjuntivitis o trastornos gastrointestinales. Los Coronavirus humanos son los responsables del 40% de los resfriados o catarro común y de los trastornos digestivos. Desde 2003 se han descrito otros Coronavirus de origen animal que han infectado al ser humano causando síndromes respiratorios: SARS y MERS [5].

El síndrome respiratorio agudo grave (SRAG) o síndrome respiratorio agudo severo (SRAS) o SARS (*severe acute respiratory syndrome*), es una neumonía atípica que apareció por primera vez en noviembre de 2002 en la provincia de Cantón, China. Se propagó a las vecinas Hong Kong y Vietnam a finales de febrero de 2003, y luego a otros países a través de viajes por medio aéreo o terrestre de personas infectadas. La enfermedad ha tenido una tasa promedio de mortalidad global cercana a un 9.5%.

Se ha documentado que la historia del SARS comenzó con un profesor que se infectó en la provincia de Guangdong en el sureste de China. El 21 de febrero de 2003 este hombre estuvo en un hotel de Hong Kong, donde contagió por vía respiratoria a 12 huéspedes. Luego viajó a Hanói en Vietnam donde también transmitió el virus a otras 37 personas de las que cuatro fallecieron. El profesor volvió a Hong Kong e infectó a seis personas más y murió. Los 12 huéspedes infectados en el Hotel Metro-ple distribuyeron el virus por varios países, además 3 de ellos extendieron el virus a unas 111 personas por Hong Kong. Los otros nueve viajaron a Irlanda, Canadá, Estados Unidos, Singapur y Alemania donde diseminaron la infección viral en pocos días. Se pudo seguir la pista de la infección por este virus y comprobar que en solo seis semanas infectó a miles de personas en todo el mundo: cerca de 8.500 casos con unos 800 fallecidos en más de 30 países. Se detectó transmisión entre personas en China, Singapur, Vietnam y Canadá. En el resto de los países fueron casos aislados "importados" de personas que se habían infectado en estos países y viajaron en avión a otro país donde se les detectó la enfermedad, pero no la transmitieron a nadie, entonces la OMS declaró una alerta mundial sobre este virus de 2003 denominando Síndrome respiratorio grave de Oriente Medio (*Middle East Respiratory Syndrome*, MERS) [6].

El Coronavirus causante del MERS (MERS-CoV) se descubrió en 2012 en Arabia Saudita y a noviembre de 2019 se reportaron 2498 casos con un porcentaje del 80 en Arabia Saudí y el restante en 17 países distintos. La letalidad de MERS es del 34,5 % y se asume que su origen procede de los murciélagos dada su naturaleza zoonótica, sin embargo, también es posible que provenga de los dromedarios o el reservorio. Al parecer el brote continúa registrándose; el último caso se dio por Arabia Saudí y data del 22 enero de 2020 [6].

Una taxonomía de los Coronavirus puede verse en la figura 1 [7].

Fases hacia 2019-nCoV			
Taxonomía viral	Taxonomía de los coronavirus		
Orden • Nidovirales	Alphacoronavirus	Ganado bovino y porcino, animales de compañía, murciélagos.	Hombre hCoV-229E hCoV-NL63
Familia • Coronavirinae	Betacoronavirus		hCoV-OC43 hCoV-HKU1 SARS y MERS
Géneros • Alphacoronavirus • Betacoronavirus • Deltacoronavirus • Gammacoronavirus	Deltacoronavirus	Aves	
	Gammacoronavirus	Aves, grandes mamíferos marinos	
	Betacoronavirus	SARS	Síndrome respiratorio agudo grave Origen: Cantón, China, 2002 Casos: 8098 en 24 países Letalidad: 9,5% Brote cerrado en 2004
		MERS	Síndrome respiratorio grave asociado a Oriente Medio Origen: Arabia Saudita, 2012 Casos: 2506 (hasta ene/2020) en 27 países (>80% en la península arábiga) Letalidad: 34,4% Brote activo / recomendaciones a viajeros
		2019-nCoV	Datos provisionales 03/febrero/2020 Infección respiratoria por un nuevo coronavirus identificado en 2019 Origen: Wuhan, China Casos: 14,557 Letalidad: 305 (2,1%) Países afectados: China (14,411 casos), y en otros 23 países, 146 casos La OMS declara la PHEIC (30 enero)
Alpha- y betacoronavirus humanos hCoV-229E, hCoV-NL63, hCoV-OC43, hCoV-HKU1 Infecciones humanas (conjuntivitis, respiratorias, gastrointestinales) agudas y leves, frecuentes, de amplia difusión y distribución. https://vacunasaep.org/			

Figura 1. Taxonomía de coronavirus.

III. FUNCIÓN LOGÍSTICA: CURVA DEL CRECIMIENTO PARA MÉXICO

Técnicamente por ser un crecimiento amortiguado, la función que puede modelar el proceso de contagio del virus que produce la enfermedad COVID-19 es la conocida función logística FL. El comportamiento de la FL al principio es exponencial y después alcanza su nivel más alto cuando la mitad de la población ha sido infectada e iniciar un decrecimiento natural, precisamente porque la población es un conjunto finito y no podría seguir aumentando. Dicha función $F = FL$ alcanza su umbral cuando la totalidad de la población ha sido contagiada.

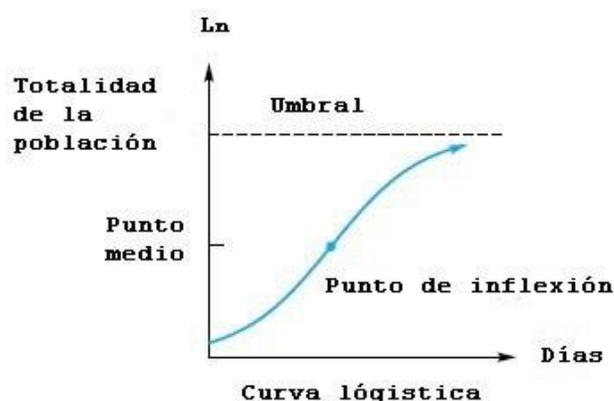


Figura 2. Expresión gráfica de la FL

El objetivo es encontrar el punto donde la cantidad de contagios se estabilice, es decir, que sea decreciente en el sentido matemático. Esta estabilización se logra cuando el factor de contagio tiende a 1.

Para ello tenemos la ecuación logística dada por $I_{n+1}(EP+I)$, donde I_{n+1} es el número de contagios del día actual y que es igual al número de contagios del día anterior I_n multiplicado por el factor de contagio, denotado por la expresión $F=EP+1$, donde E es la exposición pública de la población y P es la probabilidad de contagio. Esta probabilidad depende de las medidas de higiene de la población, entonces el reto es hacer que el término $EP \rightarrow 0$. Si $EP \rightarrow 0$, se alcanza $F=1$, y de este modo se logra la estabilización del número de contagios. Esto se consigue disminuyendo tanto E como P , es decir bajando la exposición pública (quedarse en casa) e implementar estrictas medidas de higiene tanto de las personas como en espacios libres.

Observe que $F = \frac{t_{n+1}}{t_n}$ es el cociente entre los contagios del día actual entre los contagios del día anterior. Por ejemplo,

en México el 26 de marzo hubo 585 contagios y el 27 de marzo hubo 717 contagios y el factor de contagios es de 1.23, entonces $717=585*1.23$.

Por otro lado, supongamos que $EP=0.5$, entonces $F=1.5$ y si el número de contagios el día 27 de marzo hubiera sido 585, el día posterior tendríamos $585*1.5=877$ contagios. Obsérvese también que el crecimiento de contagios es exponencial, por tanto, se insiste en evitar exponerse y mantener las medidas de higiene.

Aplicando la ecuación del factor de contagio (columna 2 de la tabla 1), y utilizando los datos de la ECDC-OMS, obtuvimos los siguientes resultados [3, 4]:

15/04/20	696.3019366	14/03/2020	45.3414408
14/04/20	644.8066461	13/03/2020	39.29022468
13/04/20	614.3856492	12/03/2020	33.99669098
12/04/20	578.4778018	09/03/2020	29.19718733
11/04/20	552.1561315	02/03/2020	24.96760923
		01/03/2020	21.52246785

Tabla 1. Cálculo de contagios por día de acuerdo con la FL

Fecha	Función logística de contagio $F_{n+1}=a_1(1+a)^F$	Fecha	No. Infectados
12/05/20	1305	10/04/2020	508.3327118
11/05/20	1343.55	09/04/2020	491.482805
10/05/20	1432.7175	08/04/2020	469.6603843
09/05/20	1503.709875	07/04/2020	443.6113266
08/05/20	1575.453394	06/04/2020	415.0196276
07/05/20	1580.485385	05/04/2020	383.0666835
06/05/20	1511.412577	04/04/2020	352.306681
05/05/20	1499.80069	03/04/2020	319.2606788
04/05/20	1482.280587	02/04/2020	295.821577
03/05/20	1462.288499	01/04/2020	269.5983404
02/05/20	1470.195224	31/03/2020	244.3085894
01/05/20	1463.41594	30/03/2020	229.412301
30/04/20	1400.953549	29/03/2020	214.6504558
29/04/20	1374.260517	28/03/2020	202.2528875
28/04/20	1295.921439	27/03/2020	188.4149543
27/04/20	1226.783223	26/03/2020	170.6527112
26/04/20	1188.26574	25/03/2020	150.7548045
25/04/20	1195.875879	24/03/2020	135.7915838
24/04/20	1179.844497	23/03/2020	125.1728463
23/04/20	1159.317823	22/03/2020	113.5969193
22/04/20	1094.770149	21/03/2020	102.4073814
21/04/20	1007.204627	20/03/2020	93.94627421
20/04/20	970.7239328	19/03/2020	83.60433308
19/04/20	918.4153429	18/03/2020	72.71368311
18/04/20	867.3530414	17/03/2020	66.15663065
17/04/20	804.7500852	16/03/2020	58.03313605
16/04/20	751.2375724	15/03/2020	51.57816564

Se puede apreciar que de acuerdo con la ecuación $I_{n+1}=I_n(EP+1)$, se tuvieron 1581 contagios el 7 de mayo, y se distingue un breve descenso en la gráfica de la figura 3.

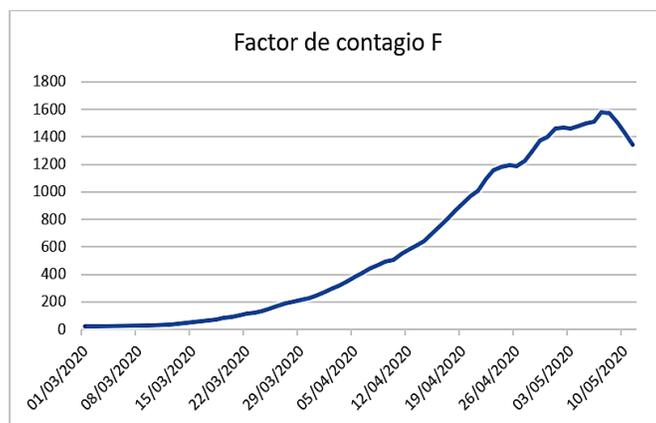


Figura 3. Contagios de acuerdo con la Función Logística

La siguiente figura 4 muestra el comportamiento de los contagios de acuerdo con el ECDC.

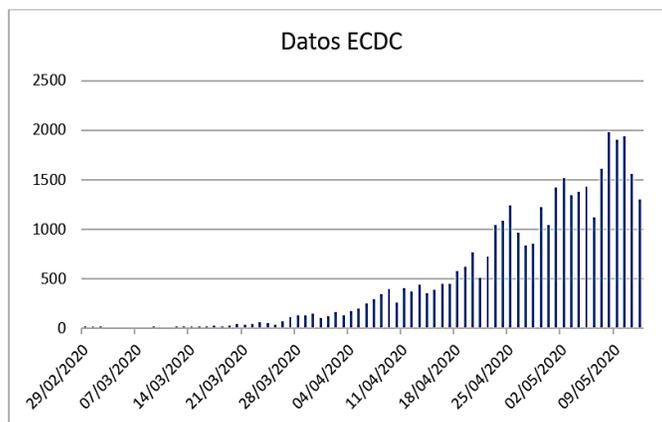


Figura 4. Contagios en México hasta el 9 de mayo

IV. ESTIMACIÓN CON REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Para estimar el factor de contagio a partir del 9 de mayo, se

aplicó regresión lineal simple y la función pronósticos de Excel.

La regresión lineal es expresada mediante la ecuación $Y = \beta_0 + \beta_1 X$, donde Y representa la variable dependiente y X indica la variable independiente (por ejemplo, mes 1, mes 2 etcétera). Los parámetros $\beta_0 + \beta_1$ representan el intercepto con el eje y y la pendiente de la relación lineal entre las variables X e Y . El modelo de regresión lineal simple con dos variables (X, Y) es el utilizado en esta sección. Aquí Y es la variable de respuesta, X es el regresor de Y . Se asume que existe una relación entre variables, de esta forma se puede decir que la variable Y es una variable explicada, y la variable X es la variable explicativa [8]. Los valores estimados de los parámetros se representan por $(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1)$ y se obtienen de acuerdo con $\hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$ $\hat{\beta}_1 = \bar{Y} - \hat{\beta}_0 \bar{X}$. Aquí \bar{Y} y \bar{X} , representan los valores promedios de las variables X e Y .

Estas ecuaciones se obtienen por el criterio de estimación de los parámetros denominado mínimos cuadrados ordinarios MCO, el cual consiste en estimar los parámetros β_0 y β_1 tales que la suma de los cuadrados de sus errores sea mínima [8]. Como medida de la incertidumbre del pronóstico realizado es necesario calcular los intervalos de confianza para la respuesta media y para la predicción.

Intervalo de confianza para la respuesta media $E(Y|X=X_0)$.

Los puntos extremos del intervalo $(1-\alpha)100\%$ para $E(Y|X=X_0)$ vienen dados por:

$$\beta_0 + \beta_1 X_0 \pm t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$$

(intervalo de confianza para la predicción Y_0).

Los puntos extremos del intervalo $(1-\alpha)100\%$ para el valor verdadero de Y_0 vienen dados por $\beta_0 + \beta_1 X_0 \pm$

$$t_{(\frac{\alpha}{2}, n-2)} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$$

Aplicando las ecuaciones anteriores a los datos de la ECDC y la función pronósticos, se consiguió la siguiente estimación que se muestra en la tabla 2 y las gráficas asociadas a estos datos se pueden ver en la figura 5.

Tabla 2. Estimación de contagios usando pronósticos

Fecha	Límite inferior	Límite superior
12/05/2020	1305	1305
13/05/2020	1453.708355	1754.220709
14/05/2020	1826.517652	2136.278718
15/05/2020	2130.672347	2456.227443
16/05/2020	2028.404929	2377.209393
17/05/2020	1968.308213	2348.099591
18/05/2020	1608.999115	2027.294708
19/05/2020	1408.511673	1872.309003
20/05/2020	1517.397147	2164.158509
21/05/2020	1890.206445	2583.758125
22/05/2020	2194.36114	2940.616773
23/05/2020	2092.093722	2896.584334
24/05/2020	2031.997006	2899.862912
25/05/2020	1672.687908	2608.695384
26/05/2020	1472.200465	2480.771591
27/05/2020	1581.08594	2768.173157
28/05/2020	1953.895237	3215.013195
29/05/2020	2258.049932	3597.307457
30/05/2020	2155.782514	3577.052009
31/05/2020	2095.685799	3602.623604

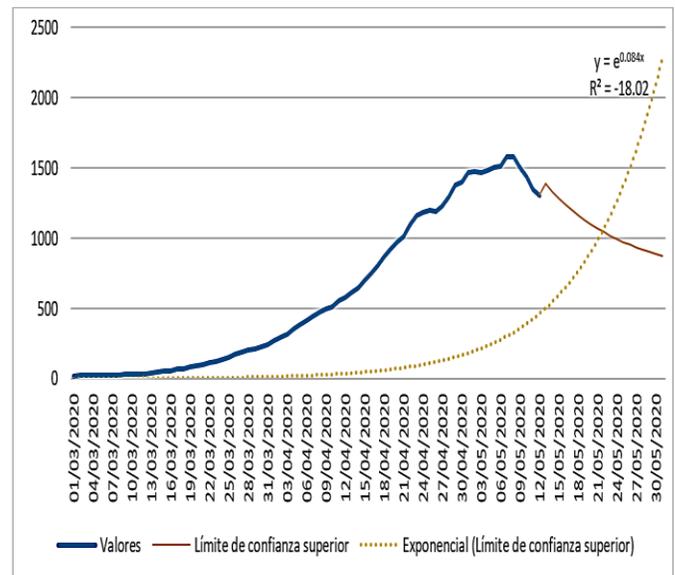


Figura 5. Estimación de contagio para el 31 de mayo 2020

Para efectos de comparación, se muestra la estimación usando la formula logística $F = \frac{I_{n+1}}{I_n}$ se muestra en la tabla 3 y figura 6.

Tabla 3. Estimación de contagios utilizando la formula logística

Fecha	$F = \frac{I_{n+1}}{I_n}$	Ajustes
12/05/2020	1305	1305.00
13/05/2020	1307.73685	1384.48
14/05/2020	1245.18864	1330.99
15/05/2020	1182.64042	1282.54
16/05/2020	1120.09221	1238.70
17/05/2020	1057.544	1198.82
18/05/2020	994.995787	1162.25
19/05/2020	932.447574	1128.52
20/05/2020	869.899361	1097.27
21/05/2020	807.351149	1068.22
22/05/2020	744.802936	1041.20
23/05/2020	682.254723	1016.03
24/05/2020	619.706511	992.61
25/05/2020	557.158298	970.82
26/05/2020	494.610086	950.60
27/05/2020	432.061873	931.87
28/05/2020	369.51366	914.57
29/05/2020	306.965448	898.65
30/05/2020	244.417235	884.06
31/05/2020	181.869023	870.77

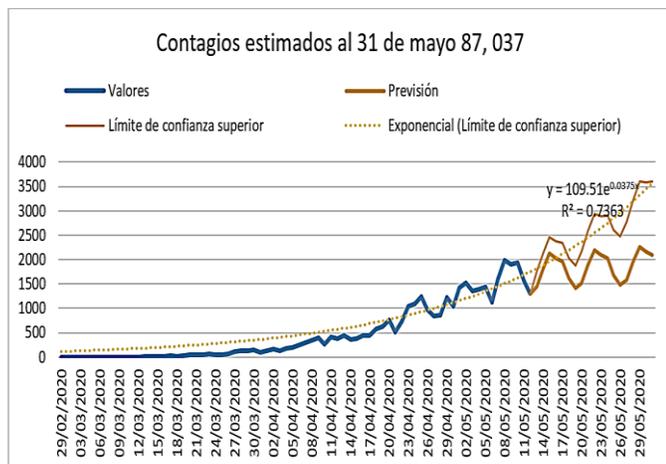


Figura 6. Estimación de acuerdo con la función logística

Estimar con regresión lineal simple

Para apoyar a la población que tenga interés en hacer este tipo de inferencias con Excel, se explica la secuencia general de instrucciones para realizar las operaciones asociadas a la regresión lineal en Excel:

1. Ingresar los datos a Excel e identificarlos como variables Y y X (previamente todos los parámetros de la ecuación de regresión con las respectivas formulas deben establecerse en las celdas).
2. Ingresar al análisis de datos y seleccionar regresión.
3. Se seleccionan como valores de Y los datos del número de contagios y como valores de X se seleccionan los valores de los días.
4. Con los resultados obtenidos se identifican los valores de $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ y con ellos se especifica la ecuación de regresión (Ver Figura 8).
5. Con la ecuación de regresión estimada se realiza el pronóstico deseado.
6. Se procede a estimar el intervalo de predicción ($\alpha=5\%$). Conviene en otra hoja de cálculo capturar nuevamente los valores originales.
7. Se crean dos columnas con los nombres $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ y \hat{Y}_i .
8. En la columna \hat{Y}_i se estiman los valores pronosticados para cada uno de los valores X_i .
9. La columna $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ se estima utilizando la función potencia, en la cual se resta el valor real de Y con el valor \hat{Y}_i y el resultado se eleva a al cuadrado.
10. Se realiza la sumatoria $\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ de la columna $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$.
11. De acuerdo con la fórmula para la construcción del intervalo de predicción se reemplazan los datos en $\beta_0 + \beta_1 \pm$

$$t_{X_0}(\frac{\alpha}{2}, n-2) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$$

El X_0 obtenido corresponde al mes pronosticado y se debe calcular el valor de la función de t-student para el valor dado en $X_0 - I$.

12. Se estima los límites inferior y superior del intervalo de predicción reemplazando los valores de los pasos anteriores.

PREDICCIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL CORONAVIRUS COVID-19 MEDIANTE ANÁLISIS MULTICRITERIO

El modelo SIR (iniciales de Susceptibles, Infectados y Recuperados) como se puede ver en la figura 7, es de gran beneficio para valorar el desarrollo de epidemias como la del Coronavirus [9].

Este modelo estudia una población en la que puede desarrollarse una epidemia, dividida en tres grupos: 1) Los Susceptibles: aquellos que podrían infectarse o contraer la enfermedad, cuya población se encuentra en el instante t y que se denota por S(t), 2) los infectados: personas que ya han sido infectados o contagiadas (parámetro cuya nomenclatura usual es L(t)) y 3) los recuperados: se identifican como los enfermos que se infectaron, han superado la enfermedad y teóricamente ya no transmiten el virus, etiquetado como R(t) (en este término se incluyen tanto los que se han recuperado o han sanado como los que fallecen por causa del virus. Dado que el objetivo del modelo SIR es predecir la evolución en cada una de las poblaciones, la inclusión de un sistema multicriterio permite relacionar la cantidad existente de miembros de cada tipo de población de modo que, el número de infectados aumenta por el contacto entre susceptibles y disminuye al crecer el número de recuperados [10].

fundamentales para extraer conclusiones correctas. Son estos datos los que permiten estimar los valores que aparecen en la definición del parámetro R_0 , y que, a su vez, ayudan a valorar la evolución de un brote infeccioso. Cada enfermedad tiene su propio número R_0 , que se entiende como el número promedio de contagios que genera una persona infectada en los tres grupos, es decir, R_0 es el número de personas que, en promedio, cada individuo infectado infecta. Cuando R_0 está por debajo del valor crítico de 1, la propagación comienza a detenerse.

La metodología para aplicar el modelo se centra en 3 consideraciones iniciales a) prioridades locales (la población, movilidad, morbilidad de la zona, cultura y economía), b) prioridades globales (impacto en otras zonas) y c) prioridades totales (casos confirmados, casos recuperados fallecimientos etc.) [11].

El procedimiento matemático es el método del auto vector basado en el teorema de Perron Frobenius, el cual proporciona las prioridades locales de los puntos de inflexión de pacientes infectados y susceptibles de ser infectados, además provee condiciones para obtener el punto de inflexión de pacientes recuperados e infectados. Esto se consigue resolviendo el sistema de ecuaciones $Aw = \lambda_{max} w$, con $\sum_j w_j = 1$, donde $A = (a_{ij})$ es la matriz recíproca de comparaciones par a par, λ_{max} es el autovalor principal de A, y $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ es el vector de prioridades locales medidas en escala de razón normalizada de la media geométrica por filas (la raíz n-ésima del producto de los elementos de la fila). Este valor coincide cuando $n \leq 3$, y genera valores aproximados para cualquier otro valor de $n > 3$. La matriz recíproca de comparaciones par a par, $W = (w_i/w_j)$, queda como:

$$\begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

Una forma sencilla de obtener el valor de λ_{max} si se conoce el valor exacto de w (o estimación) en forma normalizada, es sumar las columnas de A y multiplicar el vector resultante por el vector de prioridades w.

Una de las ventajas del modelo es que permite relajar las hipótesis y no exige la transitividad en las preferencias. Si la matriz de comparaciones pareadas lo es, es decir, si verifica que $a_{ij} a_{jk} = a_{ik} \forall i, j, k$, el modelo también permite evaluar el grado de consistencia del decisor a la hora de introducir los datos en las matrices recíprocas de

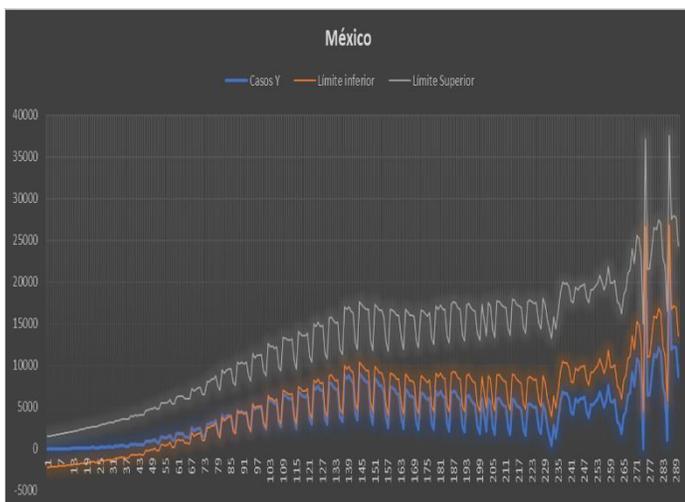


Figura 7. Comportamiento del modelo SIR

Los parámetros del modelo varían según las características propias de la infección, por ello conviene incorporar modelos matemáticos y computacionales combinados debido a que no son suficientes por sí solos para valorar el origen y extensión de una epidemia.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) insiste en que la recogida fiable y el tratamiento adecuado de datos son

comparaciones (la geografía, la economía, la cultura, la capacidad hospitalaria, antecedentes médicos del paciente etc.).

Para evaluar la consistencia del decisor, se calcula la razón de consistencia (RC), un índice no estadístico (en su propuesta inicial) que viene dado como el cociente entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatorio (ICA), esto es, $RC=IC/ICA(n)$. El proceso de cálculo termina al obtener los puntos de inflexión de los pacientes infectados y su recuperación. En la tabla 4 se determinan números para infectados, susceptibles, recuperados y fallecidos. El pronóstico se observa en la figura 8.

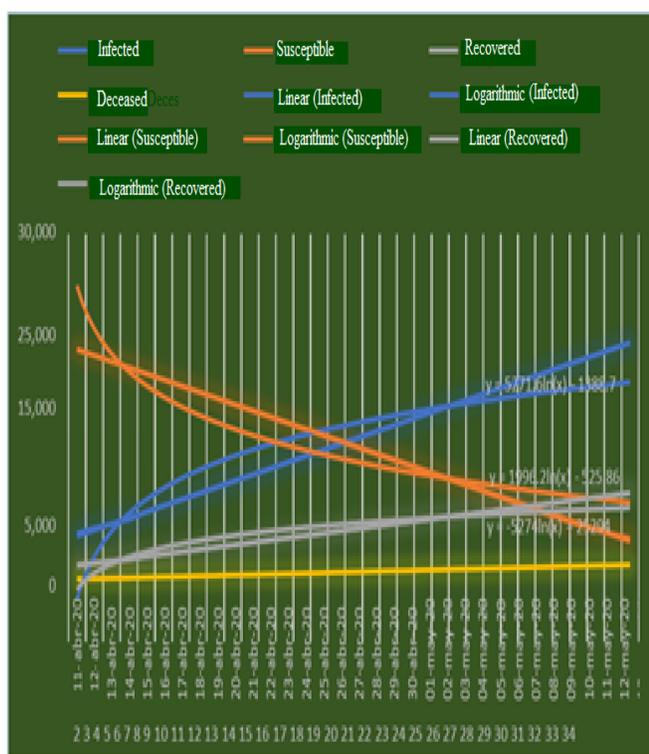


Figura 8. Resultados de la aplicación del modelo SIR

El proceso de cálculo termina al obtener los puntos de inflexión de los pacientes infectados y su recuperación. En la tabla 4 se determinan números para infectados, susceptibles, recuperados y fallecidos. El pronóstico se observa en la figura 8.

TABLA 4. Estimación de acuerdo con el modelo SIR

#	Fecha	Infectados	Susceptibles	Recuperados	Fallecidos
1	10-abr-20	3,844	20,392	1,456	302
2	11-abr-20	4,219	19,880	1,598	332
3	12-abr-20	4,661	19,367	1,765	367
4	13-abr-20	5,014	18,855	1,899	394
5	14-abr-20	5,399	18,342	2,044	425
6	15-abr-20	6,032	17,829	2,284	475
7	16-abr-20	6,552	17,317	2,481	515
8	17-abr-20	7,064	16,804	2,675	556
9	18-abr-20	7,577	16,292	2,869	596
10	19-abr-20	8,090	15,779	3,064	636
11	20-abr-20	8,602	15,266	3,257	677
12	21-abr-20	9,115	14,754	3,452	717
13	22-abr-20	9,628	14,241	3,646	757
14	23-abr-20	10,140	13,728	3,840	798
15	24-abr-20	10,653	13,216	4,034	838
16	25-abr-20	11,165	12,703	4,228	878
17	26-abr-20	11,678	12,191	4,422	919
18	27-abr-20	12,191	11,678	4,616	959
19	28-abr-20	12,703	11,165	4,810	999
20	29-abr-20	13,216	10,653	5,005	1,040
21	30-abr-20	13,728	10,140	5,199	1,080
22	01-may-20	14,241	9,628	5,393	1,120
23	02-may-20	14,754	9,115	5,587	1,161
24	03-may-20	15,266	8,602	5,781	1,201
25	04-may-20	15,779	8,090	5,975	1,241
26	05-may-20	16,292	7,577	6,169	1,282
27	06-may-20	16,804	7,064	6,363	1,322
28	07-may-20	17,317	6,552	6,558	1,362
29	08-may-20	17,829	6,032	6,751	1,403
30	09-may-20	18,342	5,527	6,946	1,443
31	10-may-20	18,855	5,014	7,140	1,483
32	11-may-20	19,367	4,661	7,334	1,524
33	12-may-20	19,880	4,219	7,528	1,564
34	13-may-20	20,392	3,844	7,722	1,604
					31,971

Se observa que la recuperación será a partir del 13 de mayo, con un máximo entre los días 26 al 28 de abril del 2020. Para

el 7 de mayo el número de infectados alcanzará los 17,317 y se desvanece en 14 meses.

CONCLUSIONES

De acuerdo con las cifras de la tabla 4 y con el modelo multicriterio, la recuperación sería a partir del 13 de mayo, con un máximo entre los días 26 al 28 de abril del 2020, para el 10 de mayo el número de infectados alcanzará los 18,855 y 1,483 fallecimientos, los cuales teóricamente disminuirán en los próximos 14 meses.

No tenemos anticuerpos contra el Covid-19, sin embargo, las conjeturas respecto a la inmunización continúan, y mientras esto sucede, los contagios persisten. El gobierno y los funcionarios de salud deben trabajar juntos para evitar la propagación de la infección, los hospitales se encuentran deficientes en su infraestructura física y humana y se es demasiado laxo en cuanto a la cuarentena obligatoria para todos los casos sospechosos, multas y condenas para aquellos que no respetan el aislamiento, cierre de escuelas, controles periódicos, etc. Si no se respetan las reglas del confinamiento e higiénicas, la epidemia no será domesticada ni a corto plazo.

Como resultado final, para el cálculo de estimación para fallecidos hasta diciembre 2020 para México y utilizando el análisis de regresión, se ocuparon los valores de los regresores β_0 y β_1 señalados en la Figura 8. Ahí también se observa el análisis de varianza, necesario para el cálculo de los intervalos de confianza.

El análisis se desarrolló con Excel con la herramienta “Análisis de datos”. Algunas instrucciones básicas para obtener la estimación se explicaron en la sección IV.

A continuación, en la tabla 5 y figuras 6 y 7 pueden verse los resultados de los parámetros de regresión para la inferencia de decesos hasta diciembre 2020.

Iniciando los valores de $\beta_0, \beta_1, y_i, \hat{y}_i, x_i, \bar{x}_i$. La distribución inversa, promedio DIA, coeficientes, grados de libertad y valor crítico como se muestran a continuación:

Variables y constantes:	
β_0	715.217325
β_1	24.7095859
$(y_i - \hat{y}_i)^2$	1822392262
α	0.85
$(x_i - \bar{x}_i)^2$	0.18928855
DISTR.T.INV	2032392.5
Promedio DIA x	145.5

Tabla 5. Obtención de coeficientes

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.63646524
Coefficiente de determinación R^2	0.405088
R^2 ajustado	0.40302234
Error típico	2515.50212
Observaciones	290

El análisis de varianza se observa en las figuras 9 y 10. Estos datos son resultados obtenidos de la base de datos que se trabajó.

Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	1	1240904950	1240904950	196.105215	2.44E-34
Residuos	288	1822392262	6327750.909		
Total	289	3063297212			

Figura 9. Grados de libertad y valor crítico

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	715.217325	296.196438	2.41467227	0.01637261	132.2330778	1298.20157	132.233078	1298.20157
Día X	24.7095859	1.76449688	14.0037572	2.4384E-34	21.23664104	28.1825307	21.236641	28.1825307

Figura 10. Obtención de coeficiente

En las tablas 11 y 12 se muestra la información a estimar y la estimación sobre el número de muertes. Se interpreta los números negativos de la columna E como aún no calculados dada la falta de datos para la ecuación, sin embargo, esos datos están actualmente disponibles en la OMS.

Debido a imprecisiones del formato con Excel, la “coma” debe pasarse una cifra a la derecha y aproximar para interpretar correctamente, por ejemplo, para el día 09/08/2020, se reportó para México al día 155 de la pandemia, 6495 casos de muertes. Con la ecuación, los autores de este trabajo estimaron 7262 fallecidos.

Para el día 17 de octubre, en julio ya se habían calculado las muertes a 110176. El intervalo de confianza fue de 94057 en el límite inferior y 126395 en el límite superior.

Los medios notificaron para el 21 de diciembre 289 fallecidos por Covid-19.

Se dividieron en 2 partes debido a la gran cantidad de datos

Fecha	Día X	Casos Y	\hat{y}_i	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$(x_i - \bar{x}_i)^2$	Límite inferior	Límite Superior
29/02/2020	1	1	739.926911	546012.979	20880.25	-2239.17819	3719.032008
01/03/2020	2	2	764.636497	581614.426	20592.25	-2214.46321	3743.736202
02/03/2020	3	2	789.346083	619913.854	20306.25	-2189.74827	3768.440433
09/03/2020	4	1	814.055668	661059.52	20022.25	-2165.03336	3793.144702
12/03/2020	5	3	838.765254	698503.56	19740.25	-2140.3185	3817.849008
13/03/2020	6	3	863.47484	740416.95	19460.25	-2115.60367	3842.553351
14/03/2020	7	2	888.184426	785322.837	19182.25	-2090.88888	3867.257732
15/03/2020	8	0	912.894012	833375.477	18906.25	-2066.17413	3891.96215
16/03/2020	9	1	937.603598	877226.299	18632.25	-2041.45941	3916.666606
17/03/2020	10	4	962.313184	918364.158	18360.25	-2016.74473	3941.371099
18/03/2020	11	2	987.022769	970269.856	18090.25	-1992.03009	3966.07563
19/03/2020	12	11	1011.73236	1001465.25	17822.25	-1967.31549	3990.780198
20/03/2020	13	28	1036.44194	1016955.15	17556.25	-1942.60092	4015.484803
21/03/2020	14	28	1061.15153	1067402.08	17292.25	-1917.88639	4040.189446
22/03/2020	15	61	1085.86111	1050340.3	17030.25	-1893.1719	4064.894126
23/03/2020	16	50	1110.5707	1124810.21	16770.25	-1868.45745	4089.598844
24/03/2020	17	36	1135.28028	1208417.14	16512.25	-1843.74303	4114.303599
25/03/2020	18	69	1159.98987	1190258.9	16256.25	-1819.02865	4139.008392
26/03/2020	19	97	1184.69946	1183090.11	16002.25	-1794.31431	4163.713222
27/03/2020	20	105	1209.40904	1219719.33	15750.25	-1769.60001	4188.41809
28/03/2020	21	148	1234.11863	1179653.67	15500.25	-1744.88574	4213.122995
29/03/2020	22	118	1258.82821	1301489.01	15252.25	-1720.17151	4237.827937
30/03/2020	23	68	1283.5378	1477532.14	15006.25	-1695.45732	4262.532917
31/03/2020	24	49	1308.24739	1585703.98	14762.25	-1670.74316	4287.237934
01/04/2020	25	135	1332.95697	1435100.91	14520.25	-1646.02905	4311.942989

Figura 11. Datos para México hasta el 1 de abril de 2020

Fecha	Día X	Casos Y	\hat{y}_i	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$(x_i - \bar{x}_i)^2$	Límite inferior	Límite Superior
01/12/2020	269	9187	7362.09592	3330274.89	110.25	5566.958529	9157.233319
02/12/2020	270	7483	7386.80551	9253.37995	90.25	5592.18457	9181.42645
03/12/2020	271	10794	7411.5151	11441204.1	72.25	5617.359092	9205.671099
04/12/2020	272	10335	7436.22468	8402898.35	56.25	5642.482056	9229.967307
05/12/2020	273	8107	7460.93427	417400.931	42.25	5667.553426	9254.315109
06/12/2020	274	0	7485.64385	56034863.9	30.25	5692.573171	9278.714536
07/12/2020	275	22089	7510.35344	212536936	20.25	5717.541263	9303.165615
08/12/2020	276	6388	7535.06302	1315753.58	12.25	5742.457681	9327.668369
09/12/2020	277	6472	7559.77261	1183249.25	6.25	5767.322407	9352.222815
10/12/2020	278	8819	7584.4822	1524034.21	2.25	5792.135426	9376.828967
11/12/2020	279	11251	7609.19178	13262767.1	0.25	5816.896732	9401.486834
12/12/2020	280	11030	7633.90137	11533485.9	0.25	5841.606317	9426.196419
13/12/2020	281	12127	7658.61095	19966500.7	2.25	5866.264184	9450.957725
14/12/2020	282	11625	7683.32054	15536837	6.25	5890.870336	9475.770744
15/12/2020	283	7455	7708.03013	64024.2447	12.25	5915.424782	9500.63547
16/12/2020	284	6399	7732.73971	1778861.62	20.25	5939.927536	9525.551888
17/12/2020	285	1006	7757.4493	45582067.6	30.25	5964.378615	9550.51998
18/12/2020	286	21974	7782.15888	201408354	42.25	5988.778042	9575.539725
19/12/2020	287	11897	7806.86847	16729175.9	56.25	6013.125844	9600.611095
20/12/2020	288	12253	7831.57806	19548972	72.25	6037.422052	9625.734059
21/12/2020	289	12057	7856.28764	17645984.3	90.25	6061.666701	9650.908581
22/12/2020	290	8608	7880.99723	528533.032	110.25	6085.859832	9676.134622

Figura 12. Valores para la regresión del mes de diciembre 2020

REFERENCIAS

- Navarro, E., Martínez, L., López, R., Fritz, J., Flores, B., Mendoza, J.: Modelo para estimación del comportamiento epidémico de la influenza A (H1N1) en México. *Revista Panamericana Salud Pública*, Vol. 31, No. 4, pp. 269–274 (2012)
- Mooney, J., Holmes, E., Christie, P.: Modelización en tiempo real de las epidemias de gripe: un análisis de regresión lineal. *Euro Surveill*, Vol. 7, No. 12, (2002).
- World Health Organization. <https://covid19.who.int/>
- Datos del coronavirus de la enfermedad de COVID-19. Centro Europeo para la prevención y Control de las Enfermedades. <https://data.europa.eu/euodp/es/data/dataset/covid-19-coronavirus-data> (2019).
- Li, F.: Structure, Function, and Evolution of Coronavirus Spike Proteins. *Annual review of virology*, Vol. 3, No. 1, pp. 237-261, (2016).
- Arranz, J., María, J.: COVID-19, SARS-CoV-2. GdT-semFYC en Enfermedades Infecciosas. <https://www.semfy.com/wp-content/uploads/2020/03/Covid-19-semFYC.pdf> (2020).
- Emergencia de un nuevo coronavirus (2019-nCoV). Asociación Española de Pediatría. <https://vacunasaep.org/profesionales/noticias/emergencia-de-un-nuevo-Coronavirus-2019-ncov> (2020).
- Pérez, F., Fernández, H.: *Econometría conceptos básicos*. ECOE (2009).
- Vázquez, K., Monzón, M., Hernández, J.: Modelo “SIR” para epidemias: Persistencia en el tiempo y nuevos retos en la era de la Informática y las pandemias. *Revista Cubana de Informática Médica* (2007).
- Brauer, F.: *Mathematical epidemiology: Past, present, and future*. *Infectious Disease Modelling*, Vol. 2, No. 2, pp. 113–127, (2017).
- Brauer, F., Castillo-Chavez, C., Feng, Z.: *Mathematical Models in Epidemiology*, Springer, (2019).



María Beatriz Bernábe Loranca

Nació en la ciudad de Puebla, México. Recibió el B.S. la licenciatura en Ciencias de la Computación de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), México en 1993 y el M.I. grado en calidad ingeniería de la Universidad Iberoamericana (UIA), México en 2003. En enero de 2010, recibió el grado de Doctorado en Operaciones Investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM.). Desde 1995, ella ha sido profesor en la Facultad de Informática Ciencia de BUAP, donde trabaja en bases de datos y estadísticas. Ella pertenece a la Nacional Sistema de Investigadores con Nivel Candidato (SNI). Sus intereses de investigación son: combinatoria optimización, diseño territorial y multiobjetivo técnicas.



Dr. Gerardo Martínez Guzmán.

Obtuvo el título de Licenciado en Matemáticas. Maestría y Doctorado en Ciencias Matemáticas por la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Actualmente es profesor investigador de la Facultad de Ciencias de la Computación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México



M.C. Mariano Larios Gómez.

Originario de Puebla-México. Profesor investigador tiempo completo en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) con perfil PRODEP. Recibió su grado de licenciatura y maestría en ciencias de la computación en la facultad de ciencias

de la computación (BUAP) 1997-2001 y 2001-2003 respectivamente. Estudios de doctorado en sistemas en Sistemas Inteligentes en la UATX 2019. Desde 2004 es profesor en la facultad de ciencias de la computación (BUAP). Su interés en la investigación incluye tópicos en cómputo distribuido, blockchain, cómputo de alto rendimiento, sistemas de tiempo real y computo pervasivos. Actualmente colabora en proyectos de investigación sobre supercómputo en el laboratorio nacional del suroeste LNS.



Dr. Alberto J. L. Carrillo Canán.

Doctor en filosofía por la Universidad Libre de Berlín. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel III. Ha publicado diversos artículos en revistas con arbitraje nacional e internacional. Es profesor-investigador de tiempo completo de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y es responsable del Cuerpo Académico "La estética y los medios". Sus áreas de investigación incluyen la estética, la teoría de medios, la filosofía de la tecnología, las ciencias cognitivas y la historia de la ciencia.



Dra. Carmen Cerón Garnica.

Profesora Investigadora de Tiempo Completo en la Facultad de Ciencias de la Computación-BUAP desde 1995, participa en el Núcleo Básico del Doctorado de Investigación e Innovación Educativa DIIE de la Facultad de Filosofía y Letras desde 2018. Licenciada en Sistemas Computacionales realizando la Especialidad de Software Educativo en el ILCE, Maestra en Nuevas Tecnologías para el Aprendizaje de la Universidad Iberoamericana, Doctorado en Educación y Tecnologías de la Información de la Universidad La Salle Interinstitucional línea de Investigación Tecnologías Emergentes para la Ciencia Tecnología y Educación. Actualmente tiene Perfil Deseable PRODEP y pertenece al Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1.