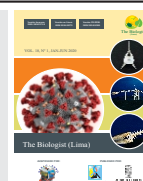




The Biologist (Lima)



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

MATHEMATICAL MODELING OF THE EPIDEMIOLOGICAL BEHAVIOR OF THE COVID-19 PANDEMIC IN CHINA

MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO EPIDEMIOLÓGICO DE LA PANDEMIA COVID-19 EN CHINA

Olegario Marín-Machuca^{1,*}; Abel Walter Zambrano-Cabanillas²; Enrique Gustavo García-Talledo³; Julia Iraida Ortiz-Guizado⁴; Dan Erick Vivas-Ruiz⁵ & Obert Marín-Sánchez⁶

¹Departamento Académico de Ciencias Alimentarias, Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura, Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú. Calle Roma 340, Miraflores, Lima, Perú.

²Departamento Académico de Acuicultura, Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura, Universidad Nacional Federico Villarreal. Calle Roma 340, Miraflores, Lima, Perú.

³Departamento Académico de Ingeniería Pesquera, Facultad de Ingeniería Pesquera y de los Alimentos, Universidad Nacional del Callao. Av. Juan Pablo II 306, 07011, Bellavista, Callao, Lima, Perú.

⁴Departamento Académico de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional José María Arguedas, Jr. Juan Francisco Ramos N° 380, Andahuaylas, Perú.

⁵Laboratorio de Biología Molecular, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Av. Venezuela Cdra. 34 S/N, Ciudad Universitaria, Lima, Perú.

⁶Vicepresidencia de Investigación, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Sector 3 Grupo 1A 03, Cercado (Av. Central y Av. Bolívar). Villa El Salvador. Lima, Perú.

* Corresponding autor: omarin@unfv.edu.pe

ABSTRACT

The objective of the aim was to develop a mathematical model that would predict epidemiological behavior caused by SARS-CoV2 (COVID-19) in the Popular Republic of China. The model relied on determining the relationship between the variation in the number of reported cases (dN) and the variation in elapsed time (dt), called the rate with which the phenomenon of cases reported in China. The speed of the phenomenon was determined by graphical differentiation, with the purpose of finding an Ordinary Differential Equation of First Order (EDOPO), linear type. This equation was resolved between the initial conditions of the reported data ($t=1$ day, $N=278$ reported cases), getting the corresponding predictive model. The predictive model (Equation 15) was statistically validated, evaluating its Pearson r correlation coefficient, whose value is 0.97, indicating a good estimate of the model in relation to the epidemiological phenomenon of COVID-19.

Keywords: behavior – COVID-19 – modeling – pandemic

doi: 10.24039/rtb2020181473

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue desarrollar un modelo matemático que haga la predicción del comportamiento epidemiológico causado por SARS-CoV2 (COVID-19) en la República Popular de China. El modelo se basó en determinar la relación entre la variación del número de casos reportados (dN) y la variación del tiempo transcurrido (dt), denominado velocidad con que el fenómeno de casos reportados en China. La velocidad del fenómeno se determinó por diferenciación gráfica, con el propósito de encontrar una Ecuación Diferencial Ordinaria de Primer Orden (EDOPO), tipo lineal. Esta ecuación fue resuelta entre las condiciones iniciales de los datos reportados ($t=1$ día, $N=278$ casos reportados), llegando a obtener el modelo predictivo correspondiente. El modelo predictivo (Ecuación 15) fue validado estadísticamente, evaluando su coeficiente de correlación r de Pearson, cuyo valor es de 0,97, indicando una buena estimación del modelo en relación con el comportamiento epidemiológico de COVID-19.

Palabras clave: comportamiento - COVID-19 – epidemia- modelado

INTRODUCCIÓN

El nuevo coronavirus (2019-nCoV) identificado el 31 de diciembre de 2019 en Wuhan, China, actualmente oficializado como SARS-CoV2, produce la COVID-19. Además, este virus es el primero de su familia que ha sido declarado pandemia por la Organización Mundial de la Salud (OMS) el 11 de marzo de 2020 (WHO, 2020ab).

Los estudios epidemiológicos mundiales del coronavirus (CoV) durante 15 años han demostrado que los murciélagos de Asia, Europa, África, América y Australasia albergan una amplia variedad de virus, y diseminan estos agentes infecciosos con bastante facilidad, aumentando su capacidad de transmisión (Fang *et al.*, 2019; Wang & Fish, 2019; Woo & Lau, 2019). Según el Grupo de Investigación Modelos Matemáticos en Ciencia y Tecnología: Desarrollo, Análisis, Simulación Numérica y Control (MOMAT) del Instituto de Matemáticas Interdisciplinarias de la Universidad Complutense de Madrid, España, la aplicación del modelo Be-CoDiS (Between-Countries Disease

Spread) en el análisis de la pandemia COVID-19 proyecta numéricamente que este fenómeno viral estará presente hasta Julio de 2020 en el mundo (Ivorra & Ramos, 2020). En virtud de ello es importante estimar la tendencia en el comportamiento de la curva epidemiológica de la pandemia COVID-19 en la República Popular de China.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos empleados para el estudio se obtuvieron de la plataforma interactiva del CSSE (Center for Systems Science and Engineering) (Dong *et al.*, 2020) de la Universidad John Hopkins, USA, entre el 20 de enero y el 16 de marzo del 2020. Según esta plataforma, la representación gráfica del comportamiento epidemiológico muestra dos fases (una por diagnóstico molecular y la segunda por diagnóstico molecular más sintomatología), pero para el presente modelado matemático, se ha

Tabla 1. Datos tomados de la plataforma interactiva del CSSE (Center for Systems Science and Engineering) de la Universidad John Hopkins, USA.

t (días)	Fecha	Casos Reportados (N)	t (días)	Fecha	Casos Reportados (N)	t (días)	Fecha	Casos Reportados (N)
1	20/01/2020	278	20	08/02/2020	36800	39	27/02/2020	78500
2	21/01/2020	326	21	09/02/2020	39800	40	28/02/2020	78800
3	22/01/2020	547	22	10/02/2020	42300	41	29/02/2020	79300
4	23/01/2020	639	23	11/02/2020	44300	42	01/03/2020	79800
5	24/01/2020	916	24	12/02/2020	44700	43	02/03/2020	80000
6	25/01/2020	2000	25	13/02/2020	59800	44	03/03/2020	80200
7	26/01/2020	2700	26	14/02/2020	66300	45	04/03/2020	80300
8	27/01/2020	4400	27	15/02/2020	68300	46	05/03/2020	80400
9	28/01/2020	6000	28	16/02/2020	70400	47	06/03/2020	80600
10	29/01/2020	7700	29	17/02/2020	72400	48	07/03/2020	80700
11	30/01/2020	9700	30	18/02/2020	74100	49	08/03/2020	80700
12	31/01/2020	11200	31	19/02/2020	74500	50	09/03/2020	80700
13	01/02/2020	14300	32	20/02/2020	75000	51	10/03/2020	80800
14	02/02/2020	17200	33	21/02/2020	75500	52	11/03/2020	80900
15	03/02/2020	19700	34	22/02/2020	76900	53	12/03/2020	81000
16	04/02/2020	23700	35	23/02/2020	76900	54	13/03/2020	81070
17	05/02/2020	27400	36	24/02/2020	77200	55	14/03/2020	81120
18	06/02/2020	30600	37	25/02/2020	77700	56	15/03/2020	81170
19	07/02/2020	34100	38	26/02/2020	78100	57	16/03/2020	81200

Los datos reportados (número de casos reportados, N , frente al tiempo transcurrido, t , en días) por CSSE se presentan en la Tabla 1. Estos datos fueron representados gráficamente (N vs t), en la Figura 1 (Roosa *et al.*, 2020). Como se puede observar, el modelamiento de los datos de la Tabla 1, en base a la experiencia profesional nos planteamos varios modelos, entre los cuales podemos citar: 1) el de producto de dos funciones, una potencial y una exponencial; 2) el logístico; 3) el de interpolación de Lagrange; 4) el de diferenciación gráfica con

una potencial y una exponencial; y, 5) el de una Ecuación Diferencial Ordinaria de Primer Orden (EDOPO), tipo lineal (Marín-Machuca, 1996).

En cuanto a estos modelos descritos, los autores optamos por el modelo 5, el cual resulta ser el más apropiado, dado que dicho modelo recurre a la técnica de diferenciación gráfica para obtener la relación entre la variación del número de casos reportados y la variación del tiempo. Es decir, obtenemos:

$$N' = \frac{dN}{dt} = f(N, t) \dots \text{(Ecuación 1)}$$

Donde N es el número de casos reportados y t el tiempo transcurrido (días). Luego, $f(N, t)$ adoptó la

expresión característica complementaria de una (EDOPO), tipo lineal, cuya forma es:

$$f(N, t) = A + B \times N + C \times t + D \times t^2 \dots \text{(Ecuación 2)}$$

Para evaluar los parámetros A, B, C y D; se formuló un sistema de ecuaciones lineales, de cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas (4×4), la misma que se muestra a continuación:

$$n \times A + B \times \sum N + C \times \sum t + D \times \sum t^2 = \sum N^t \dots \text{(Ecuación 3)}$$

$$A \times \sum N + B \times \sum N^2 + C \times \sum N \times t + D \times \sum N \times t^2 = \sum N \times N^t \dots \text{(Ecuación 4)}$$

$$A \times \sum t + B \times \sum N \times t + C \times \sum t^2 + D \times \sum t^3 = \sum t \times N^t \dots \text{(Ecuación 5)}$$

$$A \times \sum t^2 + B \times \sum N \times t^2 + C \times \sum t^3 + D \times \sum t^4 = \sum t^2 \times N^t \dots \text{(Ecuación 6)}$$

En seguida, se formuló la EDOPO, tipo lineal, cuya expresión final se muestra:

$$\frac{dN}{dt} = A + B \times N + C \times t + D \times t^2 \dots \text{(Ecuación 7)}$$

$$\frac{dN}{dt} - B \times N = A + C \times t + D \times t^2 \dots \text{(Ecuación 8)}$$

Finalmente, el modelo resultante, de la solución de la Ecuación (8), se validó estadísticamente por el coeficiente de correlación r de Person, empleando la expresión:

$$r = \frac{\sqrt{(\widehat{N} - \bar{N})^2}}{\sqrt{(N - \bar{N})^2}} \dots \text{(Ecuación 9)}$$

Donde \widehat{N} es la estimación de los casos reportados, \bar{N} es la media de los casos reportados y N es el número de los casos reportados.

Aspectos Éticos

El presente estudio ha cumplido con toda la normatividad nacional e internacional en el ámbito ético tomando los datos de la plataforma interactiva CSSE de la Universidad John Hopkins que es de acceso público y abierto.

RESULTADOS

Para el modelamiento del comportamiento epidemiológico de COVID-19 reportado en la República Popular de China, nos hemos basado en la teoría de Modelamiento Empírico (Bronshstein & Semendiaev, 2018) sobre el número de casos reportados (N), en función del tiempo transcurrido, t, (días), para la cual se formuló y resolvió el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$29A + 1508681B + 841C + 32509D = 39460 \dots \text{(Ecuación 10)}$$

$$1508681A + 10749760030B + 58069759C + 2455001201D = 1610479060 \dots \text{(Ecuación 11)}$$

$$841A + 58069759B + 32509C + 1413721D = 825980 \dots \text{(Ecuación 12)}$$

$$32509A + 2455001201B + 1413721C + 65570653D = 19958860 \dots \text{(Ecuación 13)}$$

Dando, de esta manera, el valor de los parámetros correspondientes de la (EDOPO), tipo lineal, los mismos que se muestran a continuación:

$$A = -728,934; B = -0,0722981; C = 428,502; D = -5,86596$$

Con estos valores se planteó la EDOPO, lineal; la misma que fue resuelta entre los límites correspondientes (para t=1 día y N=278 casos reportados); que son las condiciones iniciales del proceso pandémico.

$$\frac{dN}{dt} + 0,0722981N = -728,934 + 428,502t - 5,86596t^2 \dots \text{(Ecuación 14)}$$

Resolviendo la EDOPO, tipo lineal (Ecuación 14) por integración indefinida, por partes, resulta el modelo correspondiente (Ecuación 15), que hace

la predicción respectiva (número de casos reportados en China), que se puede observar en la Figura 1.

$$N = -123105,4426 + 8171,3556t + 81,1357t^2 + 123937,4182e^{-0,0723t} \dots \text{(Ecuación 15)}$$

El modelo representado por la Ecuación 15 se muestra en la Figura 2. La validación estadística de dicho modelo se realizó por medio del valor del

coeficiente de correlación r de Pearson, determinado por la Ecuación 8:

$$r = \frac{\sqrt{27484408470}}{\sqrt{29002955520}} = 0,97$$

Determinando de esta manera que el coeficiente de correlación r de Pearson fue de 0,97, con un

coeficiente de determinación del 94,76%.

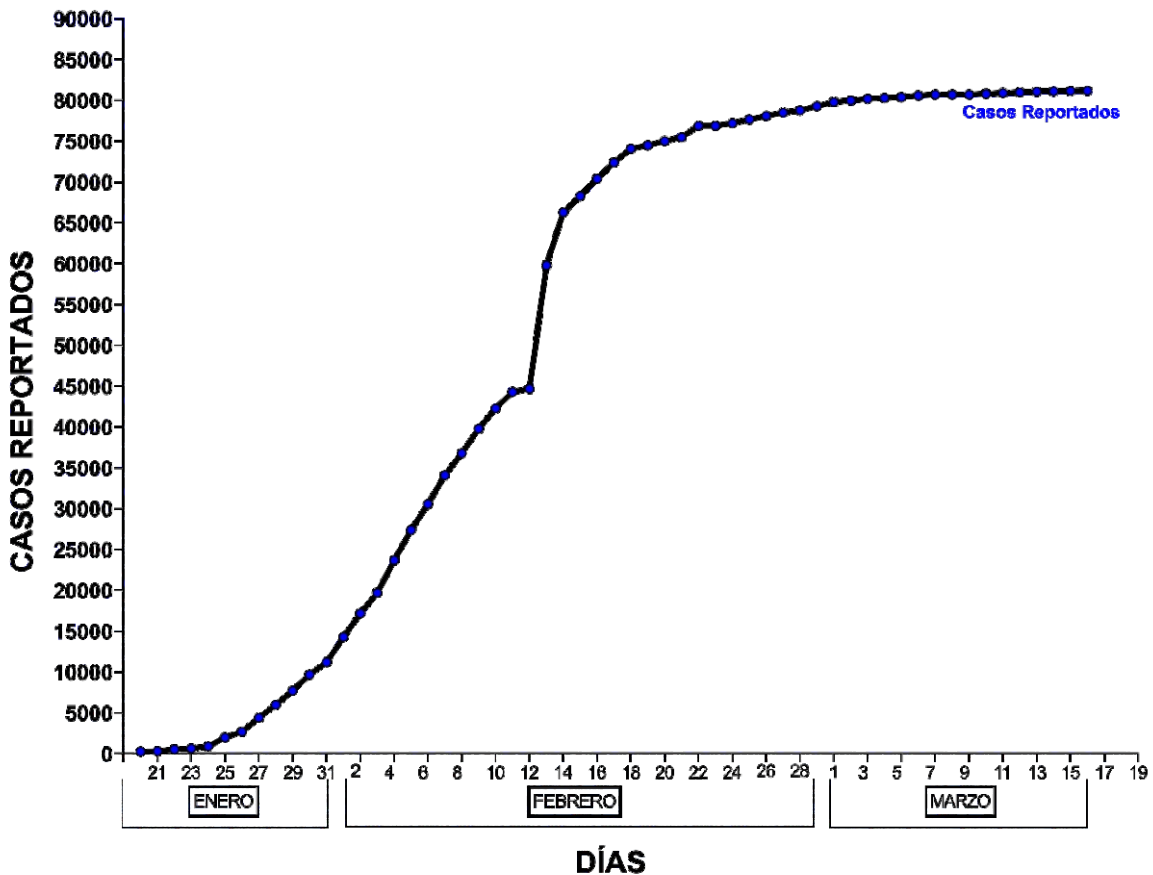


Figura 1. Comportamiento del número de casos reportados en la República Popular de China. La imagen muestra la dispersión del número de casos reportados de COVID-19, en relación entre la variación del número de casos reportados (dN) y la variación del tiempo transcurrido (dt).

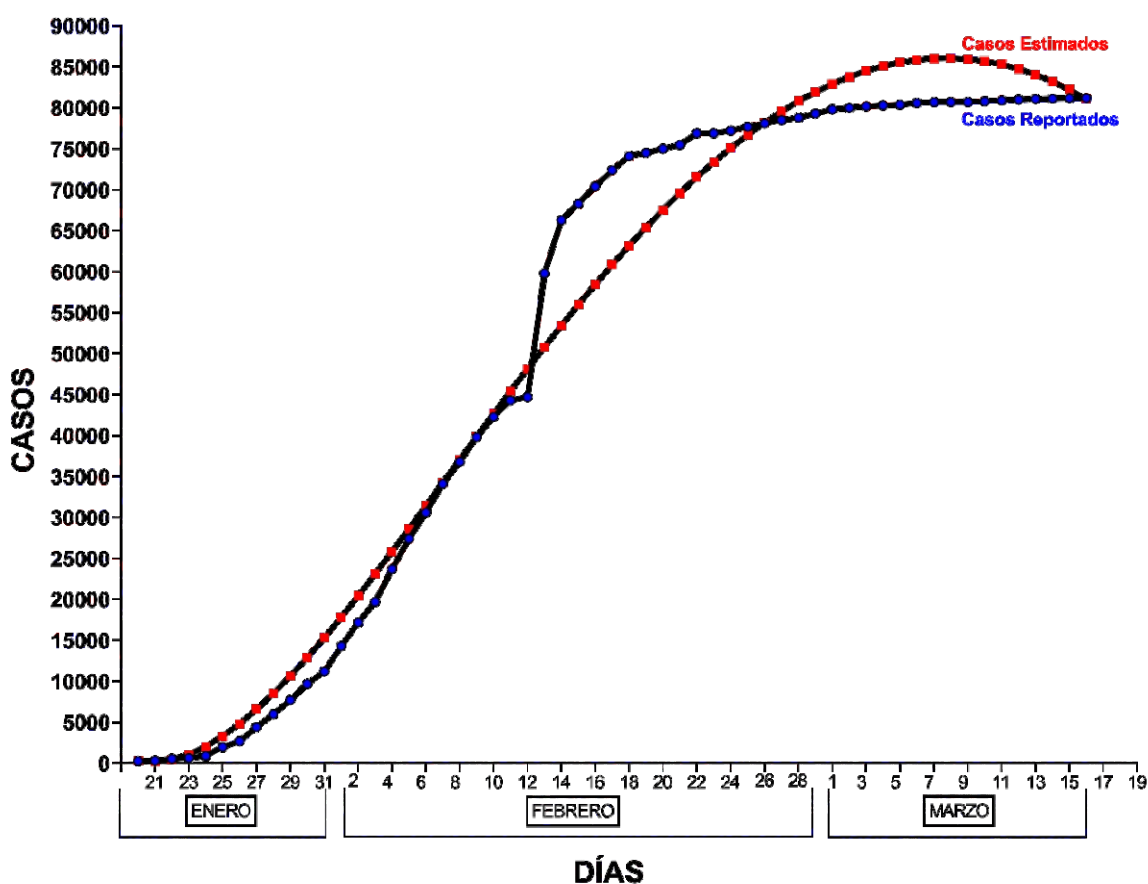


Figura 2. Comportamiento del número de casos estimados (según nuestro modelo) en la República Popular de China. La imagen muestra la comparación entre la dispersión de los casos reportados (en azul) y los casos estimados (en rojo) de COVID-19, en relación entre la variación del número de casos reportados (dN) y la variación del tiempo transcurrido (dt).

DISCUSIÓN

El fenómeno epidemiológico de la dispersión de SARS-CoV2 (COVID-19) en la República Popular de China presenta aparentemente dos fases. La primera fase desde el inicio hasta el 12 de febrero, y la segunda a partir del 13 de febrero hasta la fecha actual. Este fenómeno se debe a un aumento de 15.152 casos entre estos dos días, el cual se debe a la forma de diagnóstico hecha un profesional médico capacitado en base a imágenes torácicas, en lugar de una prueba de laboratorio. El modelo desarrollado describe y estima el número de casos reportados, infectados por el COVID-19, en la República Popular de China coincidiendo con lo mencionado por otros estudios (Ivorra & Ramos, 2020). Himmelblau & Bischoff (1992) describen

un modelo matemático similar al utilizado en el presente estudio, esto es, la EDOPO lineal, que es una expresión matemática de gran valía para simular matemáticamente, fenómenos logísticos, empíricos y de balance de población. El modelo determinado (Ecuación 15) es graficado (puntos de color rojo), a la misma escala, juntamente con los datos reportados en China (puntos de color azul), comparación cercana que se observa en la figura 2. La representación de los datos reportados en China (Figura 1) muestra dos tramos bien definidos, explicados biológicamente, por tipo de pruebas clínicas; la primera fase de diagnóstico molecular y la segunda de diagnóstico molecular y sintomatológico. La Ecuación 14, representa la relación entre la variación del número de casos reportados (dN) y la variación del tiempo transcurrido (dt), que está dependiendo del número

de casos reportados en china (N), del tiempo transcurrido al cuadrado (t^2) y de una constante (A); resultando una técnica matemática de gran utilidad para realizar el modelamiento matemático de fenómenos epidemiológicos, estando de acuerdo con lo reportado por otro estudio (Roosa *et al.*, 2020).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bronshstein, I. & Semendiaev K. 2018. *Manual de matemáticas para Ingenieros y Estudiantes*. 4ª edición. Editorial Mir. Moscú. URSS.
- Dong, E.; Du, H. & Gardner, L. 2020. An interactive web-based dashboard to track COVID-19 in real time. *The Lancet Infectious Diseases*, doi:10.1016/s1473-3099(20)30120-1
- Fan, Y.; Zhao, K.; Shi, Z.-L.; & Zhou, P. 2019. Bat Coronaviruses in China. *Viruses*, 11:210.
- Himmelblau, D. M. & Bischoff, K. B. 1992. *Análisis y Simulación de Procesos*. Ed. Reverté, S. A. Barcelona. España.
- Ivorra, B., & Ramos, A. M. 2020. *Validation of the forecasts for the international spread of the coronavirus disease 2019 (COVID-19) done with the Be-CoDiS mathematical model*. Reporte Técnico Grupo MOMAT, Universidad Complutense de Madrid, 1–14. doi:10.13140/RG.2.2.31460.94081
<http://www.doi.org/10.13140/RG.2.2.31460.94081>
- Marín-Machuca, O. 1996. *Reología Física de la Leche Concentrada*. Tesis para optar al Grado Académico de Magister en Ciencias, Especialidad Tecnología de los Alimentos. Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima. Perú.
- Roosa, K.; Lee Y.; Luo, R.; Kirpich, A.; Rothenberg, R.; Hyman, J.M.; Yan, P. & Chowell, G. 2020. Real-time forecasts of the COVID-19 epidemic in China from February 5th to February 24th, 2020. *Infectious Disease Modelling*, 5: 256-263.
- Wang, B. X. & Fish, E.N. 2019. Global virus outbreaks: Interferons as 1st responders. *Seminars in Immunology*, 43:101300.
- WHO. 2020a. Naming the coronavirus disease (COVID-19) and the virus that causes it. Recuperado de [https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/naming-the-coronavirus-disease-\(covid-2019\)-and-the-virus-that-causes-it](https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/naming-the-coronavirus-disease-(covid-2019)-and-the-virus-that-causes-it).
- WHO. 2020b. WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020. Recuperado de <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>
- Woo, P. C. Y. & Lau, S. K. P. 2019. Viruses and Bats. *Viruses*, 11:884.

Received April 16, 2020.
Accepted April 21, 2020.