

## Análisis de tensiones Von Mises en biodigestores anaerobios de cúpula rígida

### Analysis of Von Mises Tense in Anaerobic Biodigesters Type Rigid Dome

Dr.C. Carlos M. Martínez Hernández<sup>I✉</sup>, Ing. Leandro Méndez Gómez<sup>I</sup>, Lic. José Flores Ruiz<sup>II</sup>

<sup>I</sup> Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>II</sup> Grupo Empresarial de Proyectos Agropecuarios (ENPA), UEB, Villa Clara, Santa Clara, Cuba.

**RESUMEN.** El trabajo realiza un análisis de tensiones Von Mises de los biodigestores de cúpula rígida (tipo chino), los cuales son los más extendidos en las condiciones cubanas. Para lo anterior, se procedió al empleo de un software profesional de diseño CAD. Basadas en técnicas de Diseño Asistido por Computadoras (CAD), así como a la utilización de la simulación física a pequeña escala en biodigestores plásticos y la toma de mediciones a escala real, se ejecutó esta investigación. El objetivo del trabajo estuvo dirigido a comparar la correspondencia entre los resultados obtenidos en la variable presión de biogás obtenido a escala de laboratorio y los valores reportados por otros autores a escala piloto contra el modelo computarizado empleado. Mediante el empleo del modelo computarizado se pudo determinar las secciones más peligrosas en los diferentes elementos constructivos que conforman los biodigestores de esta tipología constructiva, además de los límites de rigidez que pueden soportar este tipo de biodigestor, en dependencia de sus dimensiones y el material de construcción utilizado. Como conclusiones se llegó a determinar que las tensiones que provocan la presión interior de biogás generado en estos biodigestores de cúpula rígida (tipo chino), no constituyen tensiones peligrosas que puedan afectar las estructuras de las paredes, cúpula y cuello de este tipo de biodigestor.

**Palabras clave:** tensiones von Mises, biodigestores, simulación por computación.

**ABSTRACT.** The work shows an analysis of Von Mises tensions of biodigesters of rigid dome (Chinese type), which are the most extended under Cuba conditions. For the above-mentioned, a professional software of design CAD was used. These investigations were executed based on Attended Design for Computers (CAD) as well as on the use of the physical simulation to small scale in plastic biodigesters and taking mensurations to real scale. The objective of the work was to compare the correspondence between the results obtained in the variable pressure of biogas obtained to laboratory scale and the values reported by other authors to pilot scale against the pattern on-line used. By means of the on-line pattern, the most dangerous sections in the different constructive elements that conform the biodigesters of this constructive type could be determined. It was possible to determine that the tensions that cause the interior pressure of biogas generated in these biodigesters of rigid dome (Chinese type), do not constitute dangerous tensions affecting the structures of walls, dome and neck of this biodigestor type.

**Keywords:** von Mises tense, biodigesters, computer simulation.

✉ Autor para correspondencia: Carlos M. Martínez Hernández. E-mail: [carlosmh@uclv.edu.cu](mailto:carlosmh@uclv.edu.cu)

Recibido: 14/06/2017

Aceptado: 14/03/2018

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con [Asociación Cubana de Producción Animal \(2007\)](#), los biodigestores tipo chino (cúpula rígida), modelo NL-7, contruidos de ladrillos con diferentes volúmenes: 19,20 m<sup>3</sup>; 19,58 m<sup>3</sup> y 24,00 m<sup>3</sup>, ha llegado a soportar una presión interior máxima de biogás de 1070 mm c.a. sobre sus paredes internas y cúpula (volumen = 24,00 m<sup>3</sup>). Por otra parte, en los biodigestores diseñados de diferentes capacidades (volumen = 12, 24; 32, 47 y 90 m<sup>3</sup>) e introducidos en la producción en la provincia de Villa Clara, contruidos utilizando ladrillos o bloques mediante tecnologías semejantes a las empleadas por [Asociación Cubana de Producción Animal \(ACPA\), \(2007\)](#), se han alcanzado como presiones máximas de biogás en el interior de los mismos valores de 1650 mm c.a. (volumen = 24,00 m<sup>3</sup>). Según [Guardado \(2007\)](#), un requisito esencial de un biodigestor anaerobio es que debe ser impermeable, el depósito de gas no debe tener fugas, por esta razón se deben tener en cuenta los cálculos que eviten fisuras. El autor antes mencionado plantea que existen fuerzas internas y externas que actúan sobre la estructura de un biodigestor anaerobio, dentro de las cuales se encuentra la presión del gas en las paredes y cúpula o domo del biodigestor. Por tal motivo, las fuerzas internas pueden ser disminuidas si se selecciona una forma de construcción adecuada. De aquí que el uso de estructuras conformadas por superficies curvas (bóvedas, cúpulas, cilindros etc), en las que se logra una distribución más uniforme de las fuerzas externas, originándose un “reparto” más distribuidos de las fuerzas internas, disminuye la concentración de tensiones y por lo tanto los “picos” en sus diagramas. Según [Moreno \(2011\)](#), en los biodigestores tipo chino (cúpula rígida), no existe gasómetro, almacenándose, por tanto, el biogás dentro del sistema. A medida que aumenta la presión del gas almacenado en el domo del digestor, aumenta su presión, forzando al líquido, en los tubos de entrada y salida a subir y llegándose a alcanzar presiones de hasta 1000 mm c. a. En estos, se generan entre 0,15 y 0,20 volúmenes de gas por volumen de digestor/día. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, se reduce la eficiencia en los equipos consumidores. De acuerdo con [Sánchez et al. \(2005\)](#), en los biodigestores de cúpula rígida contruidos en la provincia de Matanzas, Cuba, las presiones obtenidas han oscilado entre 1000-1400 mm c.a para un volumen de biodigestor de 24.00 m<sup>3</sup>. De acuerdo con [Pérez \(2010\)](#), en los biodigestores de domo fijo se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo con presiones entre 1000 y 1500 mm de c.a. Por otra parte, de acuerdo con [ANÓNIMO \(2004\)](#), en los biodigestores tipo chino se llegan a alcanzar presiones internas de biogás de hasta más de 1000 mm c.a. Ante estas variaciones de presión interior de biogás en biodigestores semejantes, los cuales utilizan como biomasa excretas porcinas, vacunas o mezclas de ambas, se decidió realizar un estudio de esta variable utilizando la simulación computacional y la simulación física a pequeña escala (laboratorio), para determinar si estas tensiones creadas por la presión del biogás podrían considerarse peligrosas para las paredes y cúpulas de dichos biodigestores, para ello, se procedió al empleo de herramientas de diseño asistido por computadoras (CAD), ampliamente conocidas y utilizadas a escala global, mediante las cuales se puede simular diferentes variables a los cuales estarán sometidos los nuevos proyectos. Mediante estas técnicas es posible estudiar los diferentes elementos o partes que conformaran cualquier tipo de instalación ingenieril. En el caso cubano los softwares profesionales más utilizados son el Autocad, Mechanical Desktop, Inventor y otros. En este caso se procedió a utilizar un software de diseño en 3D, denominado: Solidworks Office Premium, 2014 ([Solidworks, 2014](#)).

## MÉTODOS

Se procedió a la construcción de modelos a escala de laboratorio de biodigestores de cúpula rígida, para lo cual se utilizaron recipientes de agua de 5 L de capacidad. En los mismos se le realizaron orificios de 8 mm de diámetro en sus respectivas tapas. Fueron colocados diferentes dispositivos, los cuales permiten la salida del gas hacia dos ramas o conductos diferentes. Una conexión está dirigida hacia un gasómetro en forma de probeta, en la cual se monitorea la producción de biogás diariamente, mientras que la otra rama fue conectada hacia un micro manómetro modelo Schragrohrmanometer Fabr.Nr.898192 ([Schragrohrmanometer, 2014](#)), mediante el cual se pudo monitorear la presión interior de biogás generado. En la [Figura 1](#) se muestran detalles de los modelos reducidos.

La biomasa que se introdujo en los biodigestores a escala de laboratorio estuvo compuesta por 36 g de maíz molido (harina), 358 g de excretas porcinas y 1576 mL de agua común, disueltas en una relación agua-excreta de 4:1. Los bioreactores fueron colocados en condiciones de campo, siendo monitoreado durante un tiempo de retención hidráulica (THR) de 35 días. Las variables climáticas objeto de evaluación fueron: presión atmosférica, y temperatura ambiental, mientras que en el micro manómetro se observó el desplazamiento del líquido de cierre manométrico utilizado (agua). Como líquido manométrico se puede utilizar indistintamente alcohol etílico, mercurio o agua, no obstante se utilizó agua como líquido manométrico.

Para la simulación por computación, tanto en el modelo de laboratorio como en el modelo a escala real, se utilizó el software profesional ([Solidworks, 2014](#)). Sobre la base del trabajo desarrollado por [Guardado \(2007\)](#), utilizando los datos constructivos y materiales utilizados para la construcción del modelo de laboratorio; así como de los biodigestores que se construyen a escala real. Se procedió al estudio por simulación apoyado en el software mencionado, para ello se tomaron los datos obtenidos a escala de laboratorio y los datos brindados por [Sánchez et al. \(2005\)](#), a escala real.



**FIGURA 1.** Biodigestor (Modelo reducido) y micro manómetro utilizado.

En el modelo real, para la determinación de las presiones de biogás generado en el interior se utilizó la [expresión 1](#), la cual se tomó de acuerdo con [Nekrasov \(1986\)](#).

$$P_{est} = \rho_{liquid} \cdot g \cdot \Delta L \quad (1)$$

donde:

$P_{est}$ - presión (Pa);

$\rho_{liquid}$ - densidad del líquido manométrico (agua) ( $\text{kg/m}^3$ );

$g$ - gravedad terrestre ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

$\Delta L$  – altura estática del líquido manométrico (m);

En el caso de las presiones de biogás generado en el interior del modelo a escala reducida se aplicó la [expresión 2](#), la cual se define por:

$$P = c_p \cdot \Delta L \cdot [\rho + 0,0009 (T_o - T_m)] \quad (2)$$

donde:

$P$ - presión (Pa);

$c_p$ - constante para la presión, depende del grado de inclinación de la columna del líquido de cierre.

Para inclinación igual a  $90^\circ$ ; ( $c_p = 0,1962$ );

$\Delta L$  – lectura del líquido manométrico (mm);

$\rho$  – densidad del líquido manométrico en el momento de la medición ( $\text{g/cm}^3$ );

$T_o$ - temperatura ambiental en el momento de la medición ( $^\circ\text{C}$ );

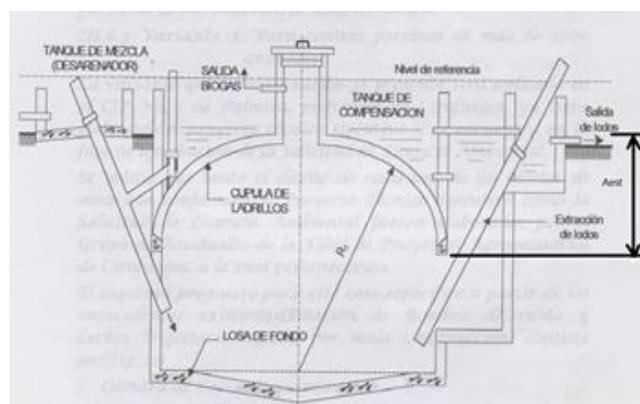
$T_m$ - temperatura del micro manómetro ( $^\circ\text{C}$ );

Como en este caso, la investigación se efectuó en condiciones de campo. Entonces  $T_o$  y  $T_m$  tienen el mismo valor, por lo cual se anulan. Quedando la [expresión 2](#) igual a:

$$P = c_p \cdot \Delta L \cdot \rho \quad (3)$$

De acuerdo con [Perry \(1967\)](#), la densidad del líquido manométrico (agua), se selecciona de acuerdo con la temperatura en el momento de la medición.

Para las mediciones a escala real, fueron utilizados los datos brindados en la [Asociación Cubana de Producción Animal \(ACPA\) \(2007\)](#). De acuerdo al monitoreo de la presión se efectuó a la salida del biogás (cuello o gasómetro). En la [Figura 2](#) se muestra un croquis del biodigestor de cúpula rígida donde se aprecia la cota de altura estática ( $A_{est}$ ); valor que determina la presión de biogás máxima que puede ser alcanzada en este tipo de biodigestores desde el punto de vista constructivo.



**FIGURA 2.** Croquis del biodigestor de cúpula rígida a escala real. Fuente: [Guardado \(2007\)](#).

Una vez determinado las expresiones de cálculo para cada caso. Se procedió a evaluar los mismos siguiendo las metodologías explicadas anteriormente. Para lo cual se tuvo en cuenta los resultados de las mediciones a escala de laboratorio, a escala real y se procedió a simular el efecto que estas presiones interiores de biogás pudieran provocar en el diseño de los biodigestores; así como determinar el estudio de tensiones von Mises en las paredes, cúpula y cuello de este tipo de biodigestor.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de presión de interior de biogás obtenida durante el ciclo analizado (35 días) en el modelo a escala de laboratorio, se puede apreciar en la [Tabla 1](#).

Para el análisis de tensiones Von Mises, se procedió a introducir el máximo valor de presión obtenido a escala de laboratorio (39,66 Pa) en el software [Solidworks \(2014\)](#) y fueron obtenidos los gráficos que se aprecian a continuación.

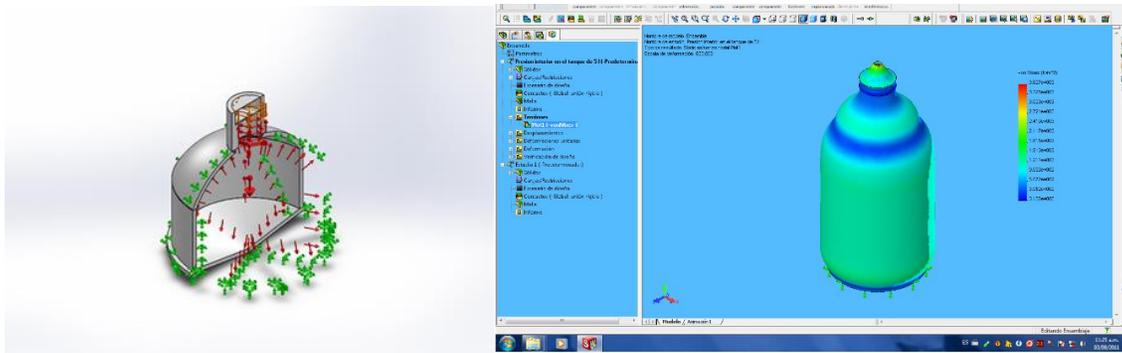
En la [Figura 3](#) se muestra el estudio de tensiones von Mises realizado, apreciándose que no existen tensiones peligrosas. Lo cual permite afirmar que todas las secciones interiores del tanque resisten favorablemente las tensiones provocadas por la presión del biogás generado en los modelos a escala de laboratorio. Se debe destacar que como material de simulación a escala de laboratorio se utilizó PVC plastificado, ya que este es el material más semejante que contiene la base de datos del software utilizado ([Solidworks, 2014](#)).

En el caso de los biodigestores a escala real, con los datos definidos, se procedió a introducir el máximo valor obtenido de presión, igual a 16 180,97 Pa (biodigestor de cúpula rígida), con este valor y utilizando el software [Solidworks \(2014\)](#), se obtuvo los gráficos que se aprecian a continuación.

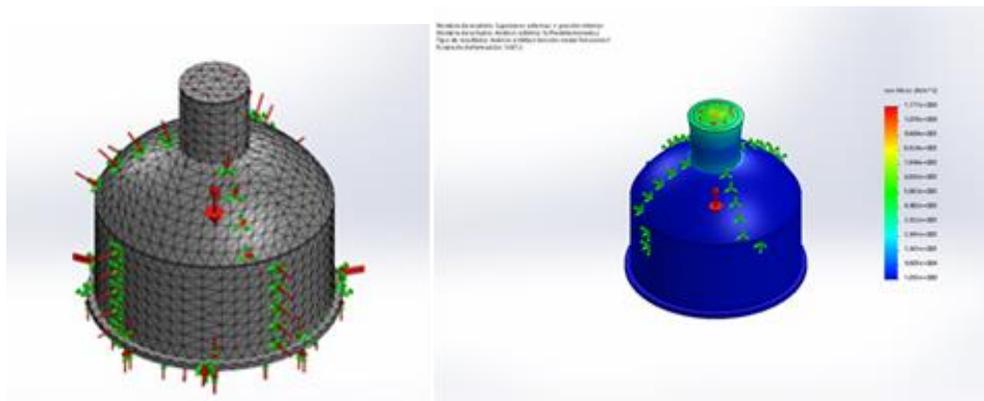
En la [Figura 4](#), se puede apreciar el estudio de tensiones von Mises realizado, apreciándose que para este caso tampoco existen puntos de tensiones peligrosas, lo cual confirma que el mismo resiste adecuadamente las presiones interiores del biogás generado, estas presiones pueden considerarse como bajas presiones (16 180,97 Pa). Se debe destacar que como material de simulación se utilizó cerámica porcelana, ya que el software, no tiene en su base de datos materiales tales como ladrillos o bloques de construcción. Esto pudiera traer algunas pequeñas variaciones en los resultados, pero creemos que estas no serían significativas, ya que el material utilizado es bastante semejante; por otra parte, es conocido que en toda simulación no es posible imitar al 100% la realidad.

**TABLA 1.** Presión obtenida en diferentes días de monitoreo en modelo a escala de laboratorio

Days	Temperature (°C)	Water (g/cm <sup>3</sup> )	Density	Reading of the Manometric Liquid (mm)	Pressure (Pa)
8	35	0.99		205	39.59
13	35	0.99		123	23.74
14	33	0.99		120	23.17
15	34	0.99		62	11.97
16	33	0.99		68	13.13
17	34	0.99		65	12.55
18	36	0.99		68	13.12
19	36	0.99		70	13.51
21	28	0.99		205	<b>39.66</b>
32	34	0.99		125	24.14



**FIGURA 3.** Análisis von Mises en biodigestor a escala reducida.



**FIGURA 4.** Análisis von Miles en biodigestor a escala real.

Se debe destacar que muy poca información está disponible en la literatura respecto a la variable objeto de estudio en este trabajo, sin embargo. De acuerdo con [Martínez et al. \(2007\)](#), en los analizadores de gas utilizados a nivel de laboratorio, es común determinar variables tales como: contenido de metano ( $\text{CH}_4$ ), contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), contenido de oxígeno ( $\text{O}_2$ ), contenido de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), presión atmosférica en el momento de la medición, sin embargo no es común determinar la presión interior del biogás generado. Lo anterior no significa que no existan analizadores de gases capaces de realizarlo, tal como el que se describe en el [Ansyco \(2000\)](#). Sin embargo estos son costosos y en este trabajo no se contaba con ninguno de este tipo.

Por lo tanto, de acuerdo con los resultados de estas investigaciones, se puede plantear que tanto en el modelo a escala de laboratorio, como en los modelos a escala real, las tensiones que provocan la generación de presiones interiores de biogás en el cuerpo y cúpula de estos biodigestores (paredes, cúpula y cuello), no son peligrosas y reafirman su rigidez mecánica; así como un trabajo seguro y sin peligro respecto a esta variable, siempre y cuando se cumplan con los requisitos técnicos constructivos que se plantean en el trabajo de [Guardado \(2007\)](#).

## CONCLUSIONES

En este trabajo se arribaron a las siguientes conclusiones:

- La simulación física a escala de laboratorio y mediante softwares profesionales garantiza una valoración de biodigestores anaerobios de este tipo sin incurrir en elevados gastos de fuerzas de trabajo, materiales y constructivas.

- Las tensiones von Mises que provoca la generación de presiones interiores de biogás en modelos de biodigestores a escala de laboratorio y real, tanto en su cuerpo, cúpula y cuello no son peligrosas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANÓNIMO: *Biodigestores. Soluciones Prácticas ITDG. Tecnologías desafiando la pobreza*, [en línea], Inst. Soluciones Prácticas ITDG, Lima, Perú, 4 p., 2004, Disponible en: [www.solucionespracticas.org.pe](http://www.solucionespracticas.org.pe), [Consulta: 13 de marzo de 2017].
- ANSYCO: *Analytische Systeme und Componenten GmbH*, [en línea], ATEX-BIOGAS MONITOR-Tagbar BM, 2000, Disponible en: [www.ansyco.de](http://www.ansyco.de), [Consulta: 14 de junio de 2016].
- ASOCIACIÓN CUBANA DE PRODUCCIÓN ANIMAL (ACPA): *Biodigestores. Biogás y bioabonos. Un sistema tecnológico limpio*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 72 p., 2007.
- GUARDADO, C. J.A.: *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*, Ed. CUBASOLAR, La Habana, Cuba, 70 p., 2007, ISBN: 959-7113-33-3.
- MARTÍNEZ, C.; KANSWOH, M.; SCHLEGEL, N.: *Estudio de la producción de biogás a escala de laboratorio utilizando diferentes tipos de biomásas agrícolas*, [en línea], Argentina, 2007, Disponible en: <http://www.e-campo.com/-info@e-campo.com>, [Consulta: 28 de agosto de 2017].
- MORENO, V. M.T.: *Manual de Biogás*, Ed. FAO, Editado por Proyecto CHI/00/G32 ed., vol. Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables, Roma, Italia, 119 p., 2011, ISBN: 978-95-306892-0.
- NEKRASOV, B.: *Hidráulica*, [en línea], Ed. Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 432 p., 1986, Disponible en: [catalogo.bnjm.cu/cgi-bin/koha/opac-search.pl?idx=su&q=HIDRAULICA%20](http://catalogo.bnjm.cu/cgi-bin/koha/opac-search.pl?idx=su&q=HIDRAULICA%20), [Consulta: 10 de junio de 2016].
- PÉREZ, M.J.A.: *Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros*, [en línea], Ed. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile, Chile, 2010, Disponible en: [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103926/cf-perez\\_jm.pdf?sequence=3](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103926/cf-perez_jm.pdf?sequence=3), [Consulta: 20 de agosto de 2015].
- PERRY, J.H.: *Chemical Engineer's handbook*, Tomo I, Ed. Revolucionaria, Instituto Cubano del Libro, La Habana, Cuba, 1967, ISBN: 0-07-049841-5.
- SÁNCHEZ, R. J.V.; ILINICHNA, S.; CHÁVEZ, A.; GARCÍA, J.: *Introducción a la producción de biogás*, [en línea], Inst. Centro de Reflexión y Dialogo, Cárdenas, Matanzas, Cuba, 47 p., 2005, Disponible en: <http://monografias.umcc.cu/-monos/2014/.../mono1470.pdf>, [Consulta: 20 de agosto de 2015].
- SCHRAGROHRMANOMETER: *Veb. Anemometerbau*, [en línea], Ed. MEGW3K4I6SV2, Dresden. Germany, 2014, Disponible en: [www.deutsche-digitale-bibliothek.de/](http://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/), [Consulta: 12 de junio de 2016].
- SOLIDWORKS: *Solidworks Office Premium*, [en línea], Inst. Solidworks Corporation, 300 Baker Avenue. Concord, Massachusetts 01742. USA, 2014,

Disponible en: [http://www.solidworks.com/sw/docs/instructor\\_WB\\_2011\\_ESP.pdf](http://www.solidworks.com/sw/docs/instructor_WB_2011_ESP.pdf),  
[Consulta: 20 de junio de 2015].

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

Este artículo de se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)