

Límite espacial de riesgo agropecuario y su impacto económico por inundaciones en el río Chillón, Perú

Spatial Limit of Agricultural risk and its Economic Impact Due to Flooding in the Chillón River, Peru

✉ Maiquel López Silva^{I*}, Dayma Carmenates Hernández^I,
 Vanessa Lisbeth Ferrari Lavalle^{II}, David Humberto Bravo Zapata^{II} and Oscar Brown Manrique^{III}

^IUniversidad Católica Sedes Sapientiae, Facultad de Ingeniería, Sedes Sapientiae, Lima Perú.

^{II}Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú.

^{III}Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba.

*Autor para correspondencia: Maiquel López Silva, e-mail: mlopezs@ucss.edu.pe

RESUMEN: La planificación agropecuaria y la gestión de riesgos por desastres naturales es importante para la prevención y conservación del desarrollo socioeconómico. El objetivo del estudio fue definir los límites espaciales de riesgo agropecuario y su impacto económico directo por inundaciones en el río Chillón en el distrito de Carabayllo, Perú. Para el desarrollo de la investigación se utilizaron herramientas del Sistema de Información Geográfico (SIG) y bases de datos confiables. Se aplicaron 7 escenarios hidrológicos con rigurosos análisis estadístico, así como la aplicación de modelos numéricos en el modelamiento hidráulico unidimensional (1D). Mientras que el riesgo agropecuario fue definido por la relación del peligro y vulnerabilidad considerando la repercusión económica de los sectores. Como principales resultados se alcanzó que el escenario extremo de máxima avenida fue de 102,17 m³/s. La modelación hidráulica identificó dos límites de riesgo agropecuario por inundaciones fluviales afectando el rendimiento de hortalizas, granjas avícolas y la producción porcina en un área de 0,24 km² y 0,37 km² en los escenarios de 20 y 1000 años, que generó pérdidas económicas de 5169,14 USD y 6509,04 USD respectivamente. En conclusión, se desarrolló un método integral para simular el riesgo agropecuario frente a inundaciones fluviales.

Palabras clave: Límites de inundaciones, desastres naturales, vulnerabilidad, pérdidas agropecuarias.

ABSTRACT: Agricultural planning and disaster risk management are essential for preventing and preserving socioeconomic development. The study aimed to define the spatial limits of agricultural risk and its direct economic impact due to flooding in the Chillón River in the Carabayllo district, Peru. Geographic Information System (GIS) tools and reliable databases were used for the research. Seven hydrological scenarios were applied with rigorous statistical analysis, along with numerical models for one-dimensional (1D) hydraulic modeling. Agricultural risk was defined by the relationship between hazard and vulnerability, considering the economic impact on different sectors. The main results indicated that the extreme maximum flood scenario reached 102,17 m³/s. The hydraulic modeling identified two agricultural risk limits due to river flooding, affecting the yield of vegetables, poultry farms, and pig production over an area of 0,24 km² and 0,37 km² in the 20 and 1000 year scenarios, causing economic losses of 5,169.14 USD and 6,509.04 USD, respectively. In conclusion, an integrated method was developed to simulate agricultural risk from river flooding.

Keywords: Flood limits, Natural disasters, Vulnerability, Agricultural Losses.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se han desarrollado zonas agropecuarias cercanas a las llanuras aluviales para tener facilidades al acceso de los recursos hídricos (Hartnett & Nash, 2017). Pero, a su vez, estimulan los desastres naturales por la alteración significativa del patrón morfológico del río que modifican las condiciones hidrodinámicas del cauce. A consecuencia se producen graves problemas de inundaciones generando afectaciones a las zonas agropecuarias, pérdidas de vidas humanas, afectaciones económicas y ambientales (Zhu *et al.*, 2019).

En particular, la cuenca del río Chillón en Perú presenta diferentes problemas agropecuarios por la falta de planes de prevención a consecuencia de cambios climáticos como el Fenómeno de El Niño que afecta el crecimiento exponencial por las frecuentes inundaciones. En la Zona de Carabayllo se caracteriza en gran medida por el sector agrícola con un área bajo riego superior a 3000 hectáreas. La misma representa el 45% de la producción hortícola de Lima Metropolitana, con 52 especies y variedades de hortalizas; mientras que el área pecuaria es destinada a la cría de ganado, caprino, porcino y Aves de granja (Galagazza *et al.*, 2021).

Recibido: 20/10/2024

Aceptado: 15/03/2025

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE AUTORES: Conceptualización: M. López-Silva; Curación de datos: V. Ferrari- Lavalle, D. Bravo-Zapata.

Investigación: M. López-Silva, V. Ferrari- Lavalle, D. Bravo-Zapata. Metodología: M. López-Silva, D. Carmenates-Hernández, Ferrari- Lavalle, D. Bravo-Zapata. Supervisión: M. López-Silva, D. Carmenates-Hernández, O. Brown. Validación: M. López-Silva, O. Brown. V. Ferrari-Lavalle, D. Bravo-Zapata. Papel/Redacción, borrador original: O. Brown., Carmenates-Hernández, M. López-Silva. Redacción, revisión y edición: V. Ferrari-Lavalle, D. Bravo-Zapata.D. Carmenates-Hernández, M. López-Silva, O. Brown.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



La gestión del riesgo de desastres y mitigación de desastres naturales son factores importantes para enfrentar de forma eficaz a las inundaciones y sus efectos adversos. La modelización espaciotemporal en los desastres naturales utiliza principalmente el método de simulación del sistema de desastres que incluye modelos hidrológicos e hidráulicos capaces de simular inundaciones fluviales. En particular, el HEC-RAS es reconocido por su rango de trabajo y precisión por la cuestión de incertidumbre y el efecto de inundación (Kim & Cho, 2019; Mokhtar *et al.*, 2018; Pinos *et al.*, 2019).

Por otro lado, existen diversas metodologías para la prevención y reducción del riesgo de desastres naturales alrededor del mundo. Sin embargo, estudios recientes formulan nuevos métodos de evaluación multicriterio de acuerdo a las herramientas con las que se realizan los estudios. [Volonté et al. \(2021\)](#) consideran factores históricos, ecológicos y geomorfológicos. [López-Martínez \(2019\)](#) en el análisis y diagnóstico cuantifican la influencia de los diferentes agentes causales que componen y condicionan el valor de la vulnerabilidad. Mientras que, [Vega-Ochoa \(2020\)](#) propone una metodología de ordenamiento territorial local bajo un enfoque sustentable en sistemas fluviales. Sin embargo, un aspecto necesario que deben integrar las metodologías de prevención son las estimaciones de las pérdidas económicas directas definidas como la interrupción temporal de los flujos económicos de la zona afectada. Al respecto, en la literatura científica citan modelos analíticos para obtener los verdaderos costos económicos de las inundaciones los cuales deben ser adaptados a las circunstancias de cada país.

El río Chillón es una fuente de agua y vida, y una amenaza latente para el sector agropecuario que se desarrolla en los márgenes del río cuando este transporta las máximas avenidas. Por tanto, el propósito de este estudio es definir los límites espaciales de riesgo agropecuario y su impacto económico directo por inundaciones para diferentes probabilidades en el río Chillón en el distrito de Carabayllo, Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación tomó como población de estudio el río Chillón, pero con una muestra de 21 km de longitud del río, ubicado en el distrito de Caraballo que tiene una densidad poblacional de 315 hab/km² (INEI, 2017). La data topográfica fue a partir de un estudio de CENEPRED por medio de un dron DJI MAVIC 2 PRO con una grilla de 0,1m x 0,1m. Fuente: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/drones>

En relación de la base de datos geográfico en la zona urbana, se utilizó los datos actuales de uso del suelo de Global Land Cover by National Mapping Organizations (GLCNMO) (Kobayashi *et al.*, 2017). Las áreas agrícolas se estimaron mediante la herramienta satelital del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) en <https://minagri-geoespacial.users.earthengine.app/view/pastosv2>. Mientras que, la información económica de la zona en estudio fue extraído del Banco Mundial

en <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519>

En los factores hidrológicos, se utilizó una serie histórica de caudales de 55 años, desde el año 1964 al 2018 recopilados a través del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Se aplicó el modelo numérico HEC-RAS versión 6.2 para la simulación hidráulica unidimensional (1D). Se plantearon 7 modelos de escenarios de inundaciones de 0,1% (1000 años); 0,2% (500 años); 0,5% (200 años); 1% (100 años); 2% (50 años); 5% (20 años) y 10% (10 años) de probabilidades hidrometeorológicas.

La geometría del tramo del río se trazó a través de la grilla 0,1x 0,1 con la interfaz RAS Mapper enlazado con el ArcGIS pro 2,0, considerando las secciones trasversales más representativas que, a su vez, permite disminuir el sesgo del modelo.

Las condiciones de bordes del tramo del río se establecieron normales y con flujo uniforme y constante. Mientras que, n de Manning fue calibrado para flujos bajos y altos según el desempeño del modelo de manera estadísticamente rigurosa.

El límite espacial se determinó en función del riesgo por inundación en el margen del río Chillón. En particular, se elaboró una metodología como se muestra la Figura 1 para obtener el riesgo por inundaciones. El diagrama de flujo del análisis de riesgo se planteó con tres variables dependientes, el peligro, la vulnerabilidad y el impacto económico directo. Esta última variable, con un nuevo enfoque para la medición económica directa inducida por las inundaciones, en las cuales se integraron aspectos de la metodología CENEPRED y CEPAL.



FIGURA 1. Diagrama de flujo del análisis de riesgo.

La estimación del impacto económico directo se analizó en primer lugar, por la profundidad del agua en la zona inundada, fracción del área inundada y probabilidad del evento, factores relacionados con el agua que excede la capacidad del río y los estándares de protección contra inundaciones. Por último, se estimaron las pérdidas económicas directas basados en los límites de inundaciones según los escenarios probabilísticos.

Las pérdidas económicas directas fueron definidas en función de la interrupción del sector agrícola y ganadero (Tanoue *et al.*, 2020) según se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Loss} = \left(D_{\text{flood}} + \frac{D_{\text{recov}}}{2} \right) * P \quad (1)$$

donde: Loss son las pérdidas económicas (USD), D_{flood} el número de días de inundación, P es el valor de producción diaria (USD/día), y D_{recov} el período de recuperación después de la inundación del río (día), definido como $D_{\text{recov}} = \alpha \times D_{\text{flood}}$, el α el parámetro de recuperación que oscila 2,0 a 11,5 (Tanoue *et al.*, 2020). El α es depende de la experiencia de desastres, medidas y políticas de mitigación. P es la relación entre el PIB de los sectores agrícolas, ganaderos y el PIB de servicios, estimado en 0,864 según análisis en el momento de estudio del Banco Central de Reserva del Perú.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado del análisis hidrológico se alcanzó máximas avenidas que oscilan desde 40,84 hasta 102,17 m³/s para la función de mejor ajuste de Log Pearson III. Mientras que, el modelo hidráulico en la validación de los niveles de la superficie del agua observado y simulada para el n de Manning mostró alta precisión con RMSE de 0,018 a 0,023 y NSE de 0,92 a 0,962 para valores de n de Manning calibrados de 0,035 a 0,040.

Los límites espaciales de riesgo se muestran en la Figura 2. Pero, fueron de forma significativa el periodo de retorno de 20 y 100 años que permitió obtener de forma precisa áreas inundadas de 0,24 km² y 0,37 km² respectivamente. El resto de probabilidad de ocurrencia de las máximas avenidas se generó solapamiento de los límites espaciales de riesgo.

Las posibles causas del solapamiento de los límites espaciales de riesgo es producto al ancho de encausamiento hasta 100 metros en algunos tramos, así como la altura del

talud natural del río oscila de 1 a 3 m. Todo ello, posibilita la evacuación de las máximas avenidas, aunque genera mayor frecuencia de las inundaciones para periodos de retornos de 20 años.

La Figura 3 muestra algunas características del río en el tramo en estudio. Se observan terrazas fluviales y un talud natural constituido de grava arenosa con partículas de forma redondeada de fácil erosión que agrava las condiciones hidráulicas del río afectando las zonas agropecuarias y edificaciones aledañas al margen del río.

El análisis del riesgo y vulnerabilidad de la zona de estudio se muestran en la Tabla 1. Se observa que el valor del factor condicionante fue superior en relación al factor desencadenante, producto del uso actual del suelo. Sin embargo, ambos reflejaron el mismo peso para la susceptibilidad del ámbito geográfico. En tal sentido, el peligro obtenido fue de 0,173 que se interpreta como condiciones geográficas desfavorables para desarrollar actividades agrícolas en estas zonas. En efecto, se clasifica la zona como categorías de susceptibilidad de ocurrencia frecuente de acuerdo con (Román & Orozco, 2019).

De la misma manera, se evaluó la vulnerabilidad que tomó en cuenta la repercusión social y la económica en la Tabla 1. La vulnerabilidad obtenida fue de 0,23 que se interpreta como una exposición alta para una población frágil dedicada al sector agropecuario. En concordancia con López-Martínez (2019) producto a la integración de relaciones naturales y la sociedad que adecúa la gestión de los riesgos en función de sus necesidades, se le brinda mayor peso a esta por la exposición, fragilidad y resiliencia que se considera en la evaluación. En general, el riesgo obtenido fue de 0,13, lo cual representa muy alto. Sin embargo, Reyna-García *et al.* (2020) señalan la importancia de la interacción entre los recursos para determinar peligro y vulnerabilidad. Por otro lado, Alcocer-Yamanaka *et al.* (2016) consideran que estas informaciones son valiosas para determinar rutas para definir áreas agropecuarias más seguras.



FIGURA 2. Límites espaciales de riesgo por inundación.



FIGURA 3. Condiciones físicas del río.

TABLA 1. Peligro y Vulnerabilidad

Susceptibilidad del ámbito geográfico				Valor	
Factor condicionante		Factor desencadenante			
Valor	Peso	Valor	Peso		
0,194	0,5	0,152	0,5	0,173	
Vulnerabilidad					
Dimensión social		Dimensión económica		Valor	
Valor	Peso	Valor	Peso		
0,262	0,713	0,149	0,287	0,230	

Producto a que los períodos de retorno más significativos fueron 20 y 1000 años se estableció solamente generar el análisis de impacto económico directo por inundaciones fluviales para dichos escenarios. En la Figura 4 se muestra los resultados del escenario para 20 años. Se observa que el sector agrícola es el más afectado con el 94% de las áreas inundadas y representa unas pérdidas económicas directas superiores a cinco mil USD. Entre los cultivos más afectados se encuentran el apio, perejil, brócoli, lechuga y col. Por otra parte, el sector pecuario solo se ve afectado en un 6% de sus áreas para unas pérdidas de tan solo 40 USD. Específicamente, las afectaciones pecuarias son direccionadas a establos, granjas avícolas y la porcicultura. De este modo se estimó que el costo mínimo por la recuperación agropecuaria es de 5169,14 USD. En comparación con el escenario de 1000 años de la Figura 5, las probabilidades de que ocurran son escasas y a su vez, las áreas inundadas solo incrementan el 1% en ambos sectores. Sin embargo, las pérdidas económicas ascienden al 26% para el sector agrícola y el pecuario al 46%.

A consecuencia de las inundaciones causadas por las máximas avenidas del río, el estudio permitió identificar 514 habitantes afectados que repercuten en 185 viviendas para el escenario de 20 años. Mientras que, para el escenario de 1000 años las cifras ascienden a 1105 familias y 335 viviendas.

CONCLUSIONES

- El presente estudio permitió el trazado de dos límites espaciales de riesgo para la ocurrencia de las máximas avenidas de 20 y 100 años que generan unas áreas inundaciones de 0,24 km² y 0,37 km² respectivamente.
- Se determinó un riesgo para el sector agropecuario por inundaciones fluviales de 0,13 lo cual indica el deterioro total y parcial del rendimiento de los cultivos sembrados. Además, afectaciones a los establos, granjas avícolas y a la porcicultura que se desarrolla en la región. Asimismo, las fallas de las infraestructuras de riego y drenaje, así como a las vías de accesos.
- La identificación de las características del lecho del río formado por grava arenosa estimula en su máxima avenida la desnivelación las laderas y por consiguiente la erosión fluvial, transporte de sedimentos e inundaciones a las zonas agropecuaria.

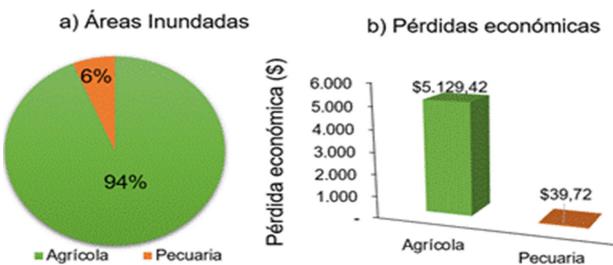


FIGURA 4. Escenario económico por inundación fluvial para 20 años

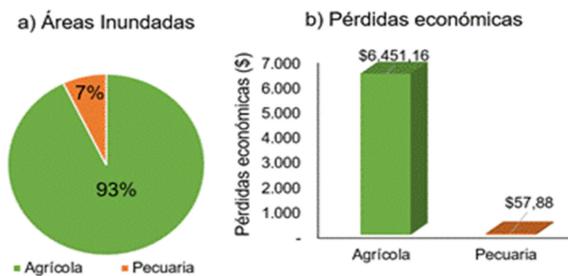


FIGURA 5. Escenario económico por inundación fluvial para 1000 años.

- Se demostró que el sector agropecuario presentó pérdidas económicas de 5169,14 USD y 6509,04 USD para áreas inundadas de 3,96 ha y 5,03 ha para los escenarios de 20 y 100 años respectivamente.
- La investigación establece un nuevo enfoque de delimitación segura a los productores agropecuarios para la protección ante los riesgos naturales. A su vez, para futuras investigaciones se recomienda clasificar el riesgo en función de las áreas agrícolas cultivadas y categorización pecuaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOCER-YAMANAKA, V. H.; RODRÍGUEZ-VARELA, J. M.; BOURGUETT-ORTIZ, V. J.; LLAGUNO-GUILBERTO, O. J.; ALBORNOZ-GÓNGORA, P. M.; ALCOCER-YAMANAKA, V. H.; RODRÍGUEZ-VARELA, J. M.; BOURGUETT-ORTIZ, V. J.; LLAGUNO-GUILBERTO, O. J.; ALBORNOZ-GÓNGORA, P. M.: "Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas". *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(5), 33-55.

- 2016, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500033&lng=es&nr_m=iso&tlang=es
- GALAGARZA, O. A.; RAMIREZ-HERNANDEZ, A.; OLIVER, H. F.; ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, M. V.; VALDEZ ORTIZ, M. D. C.; PACHARI VERA, E.; CERECEDA, Y.; DIAZ-VALENCIA, Y. K.; DEERING, A. J.: "Occurrence of chemical contaminants in peruvian produce: a food-safety perspective". *Foods*, 10(7), 1461, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/FOODS10071461/S1>
- HARTNETT, M.; NASH, S.: (2017). "High-resolution flood modeling of urban areas using MSN_Flood-NC-ND" DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.10.003>
- KIM, J., & CHO, H.: "Scenario-based urban flood forecast with flood inundation map". *Tropical Cyclone Research and Review*, 8(1), 27-34, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TCRR.2019.07.003>
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, F.: "Análisis y diagnóstico de la vulnerabilidad general al riesgo derivado de los procesos de inundación fluvial en el litoral mediterráneo peninsular" 2019. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=289643&info=resumen&idioma=ENG>
- MOKHTAR, E. S.; PRADHAN, B.; GHAZALI, A. H.; SHAFRI, H. Z. M.: "Assessing flood inundation mapping through estimated discharge using GIS and HEC-RAS model". *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21), 1-20, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1007/S12517-018-4040-2/METRICS>
- PINOS, J.; TIMBE, L.; TIMBE, E.: "Evaluation of 1D hydraulic models for the simulation of mountain fluvial floods: a case study of the Santa Bárbara River in Ecuador" 2019, DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2019.018>
- INEI: "Resultados Definitivos de los Censos Nacionales 2017- Censos Nacionales 2017", 2017. <https://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/>
- REYNA-GARCÍA, A. E.; MOREIRA-MOREIRA, D. E.; BONILLA-PONCE, A. N.; PISCO PALACIOS, J. A.; MACÍAS MERA, C. J.; REYNA GARCÍA, A. E.; MOREIRA MOREIRA, D. E.; BONILLA PONCE, A. N.; PISCO PALACIOS, J. A.; MACÍAS MERA, C. J.: "Asentamientos humanos en zonas susceptibles a riesgos por inundación y deslizamiento de la ciudad de Portoviejo". *Revista San Gregorio*, 43, 109-123, 2020, DOI: <https://doi.org/10.36097/RSAN.V1I43.1413>
- ROMÁN, A. Q.; OROZCO, J. J. Z.: "Zonificación de procesos de ladera e inundaciones a partir de un análisis morfométrico en la cuenca alta del río General, Costa Rica". *Investigaciones Geográficas*, 99, 2448-7279, 2019, DOI: <https://doi.org/10.14350/RIG.59843>
- TANOUE, M.; TAGUCHI, R.; NAKATA, S.; WATANABE, S.; FUJIMORI, S.; HIRABAYASHI, Y.: "Estimation of Direct and Indirect Economic Losses Caused by a Flood With Long-Lasting Inundation: Application to the 2011 Thailand Flood". *Water Resources Research*, 56(5), 2020, DOI: <https://doi.org/10.1029/2019WR026092>
- VEGA-OCHOA, D. A.: "Análisis bajo un enfoque sustentable del riesgo por inundaciones en sistemas fluviales: "Río Tunjuelo (Bogotá, Colombia)" (2020), <https://repository.udistrital.edu.co/items/a44311fc-1df2-4f3b-bc72-231ade4e2600>
- VOLONTÉ, A.; GONZÁLEZ, M. A.; GIL, V.: "Gestión del riesgo y territorio fluvial. El caso del arroyo San Bernardo". *Boletín Geográfico*, 43(1), 2021, <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/3246>
- ZHU, X.; DAI, Q.; HAN, D.; ZHUO, L.; ZHU, S.; ZHANG, S.: "Modeling the high-resolution dynamic exposure to flooding in a city region". *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(8), 3353-3372, 2019, DOI: <https://doi.org/10.5194/HESS-23-3353-2019>

Maiquel López-Silva, Dr. C. Prof. Asociado, Universidad Católica Sedes Sapientiae, Facultad de Ingeniería, Departamento de Investigación.

Dayma Carmenates-Hernández, Dra.C. Prof. Asociado, Universidad Católica Sedes Sapientiae, Facultad de Ingeniería, Departamento de Investigación. e-mail: dcarmenates@ucss.edu.pe.

Vanessa Lisbeth Ferrari-Lavelle, Ingeniero, Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería, Lima Perú. e-mail: vanessa.ferrari@urp.edu.pe.

David Humberto Bravo-Zapata, Ingeniero, Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería, Lima Perú. e-mail: david.bravo@urp.edu.pe.

Oscar Brown-Manrique, Dr.C. Prof. Titular, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Centro de Estudios Hidrotécnicos (CEH), Ciego de Ávila, Cuba. e-mail: obrown@unica.cu.

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.