2023

INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

03

XLIV

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE
Revista científica del Centro de Investigaciones Hidráulicas

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

EQUIPO EDITORIAL

La revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental tiene el propósito de divulgar el conocimiento y contribuir al intercambio de experiencias y la comunicación entre los profesionales y técnicos de habla española. Los temas de interés para la revista incluyen contenidos en la solución de problemas, aplicaciones y desarrollo de la ingeniería hidráulica.

Editor-Director
Dr. José Bienvenido Martínez Rodríguez

Consejo Editorial
Dra. Maray Garrido Monagas *(Directora)*
Dra. Haydee Llanusa Ruiz *(Secretaria de la publicación)*
Dr. Yoermes González Haramboure
Dr. Rafael Pardo Gómez
Dr. Norberto Marrero De León
Dr. Alcides Juan Felipe León Méndez
Dr. Armando Hernández Valdés

Consejo Asesor
Damir Brjanovic, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*
Daniel Prats Rico, *Universidad de Alicante, España*
Joaquín Moreno Caselles, *Universidad Miguel Enrique de Elche, España*
Nahún García Villanueva, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*
Raúl Lopardo, *Instituto Nacional del Agua, Argentina*
Alejandro López, *Laboratorio Nacional de Hidráulica, Santiago de Chile*
Jaime Iván Ordóñez, *Universidad Nacional de Colombia, Colombia*
Rafael Guarga Ferro, *Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay*
Abrahán López, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*
Miguel A. Perozo Ynestroza, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*
Cristóbal Díaz Morejón, *Ministerio de Ciencia Tecnología y Mediaombiente (CITMA), Cuba*
Alina Hernández Tur, *Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba*
Rafael Feitó Olivera, *Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de Cuba (UNAICC), Cuba*
Julián Herrera Puebla, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*
Lorenzo E. Camejo Barreiro, *Universidad de Ciego de Ávila, Cuba*
Alfonso Suárez Reytor, *Universidad de Oriente, Cuba*
Eric Cabrera Estupiñán, *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador*
Luis Córdova López, *Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba*
Yoel Martínez González, *Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicada, Cuba*
Ronnie Torres Hugues, *Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción, Cuba*
Ifraín Osa Bernal, *HELVEX, Cuba*
Eduardo López Bastida, *Universidad de Cienfuegos, Cuba*
Javier Orccosupa, *Universidad Tecnológica del Perú, Perú*
Natividad Ramírez Ramírez, *Universidad de Guanajuato, México*
Carlos M. López Vázquez, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*
Julio Iván González Piedra, *Universidad de La Habana, Cuba*
Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, *Universidad del Azuay, Ecuador*
Lamberto Alvarez Gil, Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba
Felicita González, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*
Enrique Cisneros, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Vol. XLIV
No. 03 (Jul-Sep 2023)
ISSN 2788-6050, RNPS 2066

01	Alcides Juan León Méndez Edgar Stefano Johan Chirino Montano	Reducción de longitudes de tubería en la simulación CFD de flujos a través de accesorios	3 16
02	Daykelin León Arias Luis F. Córdova López	Modelo XBeach NH para el cálculo del rebase sobre muros verticales. Malecón de La Habana	17 30
03	Isaida Flores Berenguer Odette Echemendía Nápoles Odalys Jacobo Rodríguez Yoermes González Haramboure Jenny García Tristá	Efecto de la porosidad y la permeabilidad en la estabilidad de taludes bajo el efecto de la lluvia	31 43
04	Esvillel Ferrer Pozo Liliana María Gómez Luna Yudith González Díaz	Impactos de la sequía hidráulica en el agroecosistema Valle de Caujerí, periodo 2018-2021	44 58
05	Roxana Aymeé Luis Winograd Dianet Valladares Hernández	Determinación de las zonas de protección sanitaria, comparación de los métodos de la NC 1192:2017 y el WhAEM, caso de estudio fuentes de abasto de San José de las Lajas	59 69
06	Néstor Rafael Perico-Granados Laura Katherine González-Díaz Heidy Madeleine Arévalo-Algarra Constanza Dorey García-Puentes	Construcción de conocimiento sobre el agua y los ODS a partir del pensamiento crítico	70 82
07	Jorge Xavier Villazhañay Zúñiga Jorge Alexander Bucheli García	Estabilidad de taludes en el puente sobre el río Copueno en Morona, Morona Santiago-Ecuador	83 95

Reducción de longitudes de tubería en la simulación CFD de flujos a través de accesorios

Alcides Juan León Méndez E-MAIL: aleonm@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana

Edgar Stefano E-MAIL: edgstefano@gmail.com
Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México

Johan Chirino Montano E-MAIL: johan@ecmmariel.cu
Dirección Técnica de Ingeniería, Empresa de Construcción y Montaje (ECM), Mariel

RESUMEN

En el presente trabajo se exponen las experiencias en la modelación con técnicas CFD (Computational Fluids Dynamics) de tuberías, como conductos forzados, que llevan insertado un accesorio en línea. En el mismo se exponen los criterios, en cuanto a las longitudes que deben tomarse en consideración y cómo lograrlo, al enfrentar un diseño computacional de estas características. Esto permite minimizar el número de nodos y elementos de la malla que influyen decisivamente en el peso del modelo y en el tiempo de cálculo empleado en cada simulación.

PALABRAS CLAVES: CFD, mallado en elementos finitos, mecánica de los fluidos, modelación numérica, simulación de fluidos

Reduction of pipe lengths in CFD simulation of flow through pipe fittings

ABSTRACT

The present work exposes the experiences in the modeling with CFD (Computational Fluids Dynamics) techniques of pipes, such as penstocks, which have an online accessory inserted. In it, the criteria are exposed, regarding the lengths that must be taken into consideration and how to achieve it, when facing a computational design of these characteristics. This allows minimizing the number of nodes and elements of the mesh that decisively influence the weight of the model and the calculation time used in each simulation.

KEYWORDS: CFD, finite element meshing, fluid mechanics, numerical modeling, fluid simulation

CITMA CERTIFICADO

Septiembre 2023-RECIBIDO *APROBADO-Octubre 2023*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

La capacidad de predecir con precisión los parámetros del flujo aguas arriba y aguas abajo de un accesorio colocado en serie, es crucial para garantizar un diseño eficiente y seguro de los sistemas de tuberías.

Toda investigación encaminada a solucionar problemas asociados a accesorios en tuberías a presión tiene relevancia tanto en el ámbito académico, como en el industrial, ya que su impacto contribuirá al avance del conocimiento y a la mejora de las prácticas de diseño y operación de sistemas de tuberías. Esto permitiría a los ingenieros y diseñadores tomar decisiones acertadas sobre el rendimiento y eficiencia de los sistemas de tuberías, así como validar los resultados obtenidos con las normas y estándares establecidos.

La utilización de herramientas de simulación numérica, como la Dinámica de fluidos computacional (CFD), permite evaluar diferentes configuraciones de geometrías, mallado, parámetros del flujo y modelos de turbulencia que permiten un análisis computacional de la solución y una vez calibrado el modelo, permiten hacer un estudio exhaustivo de las mejores alternativas de su implementación y cuantificar los efectos sobre el flujo que el accesorio provocará (Stefano et al., 2021).

Por otra parte, existe poca información publicada que profundice en los criterios que deben seguirse, en el caso de flujos computacionales, al definir las longitudes de tubería, en la cual irá insertada una obstrucción artificial, tal como: una válvula, un flujómetro del tipo deprimógeno, un estabilizador de flujo, etcétera. La simulación numérica CFD es una herramienta capaz de ofrecer esta información con relativamente poca inversión y tiempo. Al emprender este tipo de simulaciones el especialista se enfrenta a numerosas variables a valorar hasta lograr obtener los resultados deseados con mínimos errores que posibiliten hacer un uso adecuado de la información obtenida y poder llegar a conclusiones totalmente válidas.

Si a lo anterior se le suma, que los modelos CFD requieren de un potencial de cómputo nada despreciable, si se quiere llegar a respuestas ingenierilmente aceptables, entonces, se deben decidir, con mucha precisión, la cuantificación de un número de variables que influyen en la respuesta que dará el modelo y en el tamaño de almacenamiento que el mismo tenga y que influye decisivamente en las capacidades de la computadora a emplear y en el tiempo de cómputo de cada corrida.

El trabajo que aquí se expone se centrará en algunas de esas variables como son: la decisión de la longitud de los tramos de tubería a estudiar, la densidad del mallado y el criterio de parada empleado para aceptar la solución.

ANTECEDENTES SOBRE SOLUCIONES CFD

La Dinámica de fluidos computacional (CFD) surge entre las décadas de los años 50 y 60 del pasado siglo, de manos de John D. Anderson en 1995, citado por Chirino (2023). CFD es una de las ramas de la Mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos.

A grandes rasgos el método en discretizar una región del espacio, creando lo que se conoce por una malla espacial, dividiendo esa región en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve, en cada uno de ellos, las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que, en realidad se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa. El proceso de cálculo se prolonga hasta que se alcance el valor del residuo de las variables que intervienen en el proceso, declarado en la construcción del modelo, o, hasta que visualmente el especialista verifique, después de un grupo de iteraciones, que los residuos se mantienen constantes.

En gráficos por computadora, los primeros intentos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en 3D lo hicieron Foster y Metaxas en 1996, del Center for Human Modeling and Simulation. Ellos basaron su trabajo, en un artículo clásico de CFD del año 1965 publicado por Harlow y Welch en 1965, (Chirino, 2023).

En el campo del CFD uno de los paquetes más utilizados los proporciona la empresa ANSYS Inc. en su paquete computacional propietario ANSYS y una versión limitada para estudiantes (ANSYS Academic Student). Pero, no son los únicos y en código abierto, al acceso de todos, está cobrando mucha fuerza el OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation).

Desde esa época y hasta hoy se han presentado en revistas, congresos y libros, numerosos trabajos sobre el uso de CFD para la solución de problemas de la ciencia y la ingeniería.

En los últimos años han sido publicados numerosos trabajos relacionados con fluidos. Villaroel (2015), en su tesis de maestría, al evaluar una válvula de mariposa emplea para la longitud aguas arriba una distancia de 6 diámetros y 15 diámetros para la longitud de tubería aguas abajo, sin entrar en detalle de como validaron esas longitudes. Por su parte, Lluguay en 2016, citado por Chirino (2023), desarrolla un modelo CFD para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías sin abordar el tema de las longitudes idóneas para una simulación. Chirino (2023), en su tesis de grado cita también a Ordoñez et al. (2018), que publica un estudio, donde el objetivo principal es desarrollar un modelo CFD para el análisis y simulación de los perfiles de velocidad en el banco de pérdidas del laboratorio de turbomáquinas hidráulicas.

Recientemente, Barros y un grupo de colaboradores en el año 2022, citado por Chirino (2023), llevaron a cabo un estudio en la Universidad de Estadual de Campinas en Brasil donde desarrollaron y validaron un procedimiento diseñado para utilizar la dinámica de fluidos computacional (CFD) para estimar con precisión la caída de presión del flujo de agua a través de placas perforadas con orificios delgados biselados, sin que en el mismo se detalle el cálculo de las longitudes de tubería empleadas.

También en el año 2022, Khayat y Afarideh, citado por Chirino (2023), plantean que las simulaciones con herramientas de la dinámica de fluidos computacional es un método numérico válido para predecir el flujo de dos fases en flujómetros Venturi, pero no abunda en el diseño del modelo necesario para llevar a cabo el estudio.

Importante es resaltar que, en 2008, el National Institute of Standards and Technology de Estados Unidos de América, utilizó ANSYS, para modelar las causas y efectos del desplome del edificio World Trade Center, durante el atentado del 11 de septiembre de 2001, citado por Chirino (2023).

En su trabajo de tesis de grado Chirino (2023) recopila, en breve síntesis, los trabajos desarrollados en el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, hoy Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.

En la citada institución cubana, se han presentado trabajos basados en el empleo de herramientas CFD, desde hace más de dos décadas y se han impartido por el profesor Doctor Alejandro P. Prieto, cursos optativos a los estudiantes de Ingeniería Hidráulica. Dentro de los estudios realizados en el CIH, se encuentran: la investigación dirigida por A. J. León realizadas por Márquez (2002), que aborda un estudio sobre la modelación, en conducciones forzadas, con el empleo de ANSYS; y para darle continuidad a ese estudio la tesis de grado de Vélez (2003). Posteriormente en el año 2012, se publica un trabajo sobre conducciones libres utilizando, otra herramienta computacional CFD, el programa FLOW 3D (León y Herrera, 2012).

Otra de las tesis con la que cuenta el CIH, que aparece citada por Chirino (2023), es la de maestría desarrollada por Bosch (2015), dirigida por A. J. León y A. Prieto, sobre el comportamiento de las

obras hidráulicas, siendo la primera tesis de maestría en Ingeniería Hidráulica defendida en Cuba sobre la aplicación de modelos CFD a estas obras.

Otro de los trabajos es la tesis de grado defendidas en el año 2017 por Izquierdo (2017), dirigidas por A. J. León, donde se desarrolló un trabajo metodológico sobre la construcción de modelos de conducciones forzadas con herramientas CFD.

Más reciente, se encuentra el trabajo de Stefano et al. (2019), con recomendaciones básicas para modelar obras hidráulicas en canales, empleando CFD. Por su parte, Asen (2019), presenta su tesis de diploma dirigida por A. Prieto y J. Ramírez, dedicada a la simulación de la ruptura súbita en tuberías de agua, empleando ANSYS CFX y ANSYS Fluent.

También se aborda, más recientemente, el tema de la modelación de tuberías con CFD en una publicación dedicada a los flujómetros proporcionales (León et al. 2022).

De los trabajos publicados en Cuba, ninguno aborda el tema de la longitud ideal de los tramos de tubería, pero sin embargo en varios de ellos (Márquez, 2002; Vélez, 2003; León y Herrera, 2012; Izquierdo, 2017; León, Ramírez y Stefano, 2022) se aborda el tema de la simulación del comportamiento de accesorios en una tubería.

Es de resaltar que, en muy pocos de los trabajos internacionales consultados, se aborda el tema de la longitud de los tramos de tubería a emplear, en consonancia con el mejor rendimiento del modelo y la obtención de resultados válidos y con bajos errores. El resto de la búsqueda de trabajos publicados en otros países y que aparecen en Chirino (2023) y que, por limitaciones propias de esta revista no pueden ser incluidos, no arrojó ningún resultado destacable.

Por la razón anterior, el grupo de recomendaciones que se presentarán a continuación se espera que contribuyan en el futuro a un mejor empleo de esta importante y útil herramienta computacional en la búsqueda de mejores soluciones.

Para el desarrollo que a continuación se expone se empleará como accesorio insertado en serie en la tubería el flujómetro de Cuña (Wedge Meter) validado recientemente por la SASO ISO 5167-6 (2020) y para su modelación, se empleará la componente CFX del ANSYS.

ANSYS CFX es una herramienta CFD de propósito general, muy potente para el análisis ingenieril y el diseño de problemas relacionados con flujos de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas, problemas de combustión, etc. CFX es un solucionador basado en la presión (pressure based solver) que no necesita una corrección especial para Números de Mach bajos.

El objetivo del presente trabajo, es transmitir la experiencia de los autores, trabajando con ANSYS CFX, acerca del diseño inicial de tuberías que contienen accesorios, con el objetivo de minimizar el número de elementos del mallado y así disminuir el espacio de almacenamiento del modelo y el tiempo de cómputo necesario para su solución.

02 CONSIDERACIÓN SOBRE LAS LONGITUDES DE TUBERÍA AGUAS ARRIBA Y AGUAS ABAJO DE UN ACCESORIO.

Las longitudes de tubería aguas arriba y aguas abajo de un accesorio, para una misma densidad de mallado, influyen de forma directamente proporcional en el número de nodos y elementos de la malla de elementos finitos en que se subdivide el volumen del cuerpo a modelar; por tanto, tiene una relación directa con el costo computacional y el tiempo de ejecución de cada corrida. Por esta razón, la decisión que se tome influirá directamente, también, en la selección de la potencia informática de la PC a emplear, si se quiere llegar a una solución con bajos errores.

LONGITUD NECESARIA PARA LA ESTABILIDAD DEL FLUJO AGUAS ARRIBA (AARR) DEL ACCESORIO

Las pruebas para determinar esta distancia tendrán como base los patrones de velocidad formados a lo largo del conducto, observando su estabilidad y reduciendo los tramos de la tubería donde ya se mantiene estable.

Entre las opciones de ANSYS CFX para ingresar el flujo en el conducto, se encuentra la de introducir un valor de velocidad. Esta última opción, tiene dos modalidades, introducir un patrón de velocidades homogéneo, o constante; o introducir un patrón de velocidades no homogéneo, o variable.

Para el trabajo se modeló una tubería de 300 mm de diámetro interior, 50 metros de largo y una rugosidad de 0,15 mm. Para la malla global y la malla local se empleó una inflación con 15 capas y en total para los 50 metros de tubería la malla se subdividió en 2,54E+06 nodos y 6,15E+06 elementos, o lo que es igual 5,00E+04 nodos y 1,20E+05 elementos por metro lineal de tubo.

Empleando la opción de introducir la velocidad como variable de entrada del flujo con la velocidad media que se quiere modelar formando un patrón homogéneo, se estudiaron en secciones desde la entrada del flujo hasta la salida de este en una tubería de 300 mm de diámetro interior, 50 metros de largo y una rugosidad de 0,15 mm.

Se empleó para la evaluación de la longitud, la mayor velocidad a modelar, que para este caso fue de 2,5 m/s (ver figura 1).

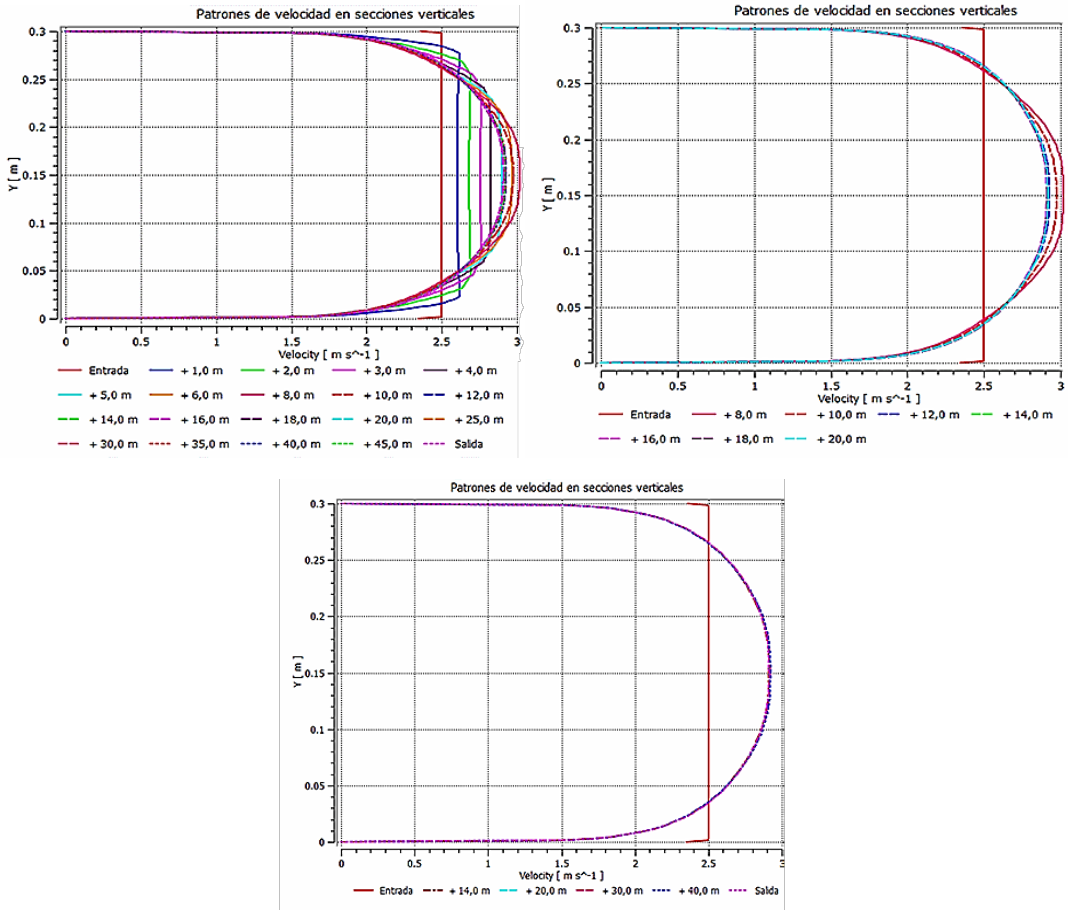

Figura 1. Distribución de las velocidades en secciones verticales por el centro de la tubería.

Para el trabajo se empleó una PC con una placa base B365M DS3H, memoria GPU compartida 3,9 Gb, procesador Core I5 de 9na generación, 6 núcleos y 8 Gb de memoria RAM de 2666 MHz.

Se empleó, como criterio de parada que el RMS (Root Mean Square) que los residuos fueran menores que una millonésima (1E-06), mientras que el tiempo de ejecución fue de 1 hora 37 minutos para la entrada con patrón homogéneo de 2,5 m/s y alrededor de 1 hora 7 minutos para la entrada con el patrón no homogéneo que más adelante se empleará.

La figura 1, muestra las distribuciones de velocidades en diferentes secciones desde la entrada, donde se evidencia una estabilidad a partir de los 14 metros de la entrada (≈ 47D) el patrón de velocidades se mantiene estable, por lo que, si el accesorio hubiera estado ubicado en el medio del tubo (aproximadamente 25 metros aguas abajo de la entrada y 25 metros aguas arriba de la salida), podía prescindirse de 10 metros de tubería aguas arriba del accesorio, con lo cual se reduce en 5,00E+05 nodos y 1,22E+06 elementos, con el consiguiente ahorro de costo computacional y tiempo de cómputo.

Al patrón estable se le mide la velocidad media que representa, empleando para esto los normado por el método avalado por la BS ISO 3966 (2008), que establece la posición de los puntos de medición en una tubería con un tubo de Pitot para la determinación del caudal por el método aritmético, figura 2.

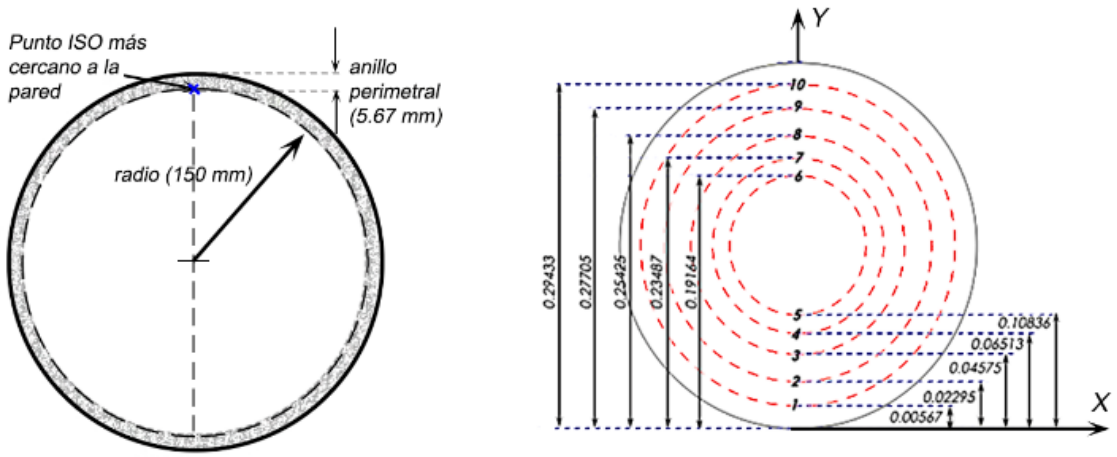

Figura 2. Sección de la tubería donde se resaltan los puntos para medir la velocidad media por la BS ISO 3966 (2008) y el anillo más cercano al perímetro interno de ducto.

Del procesamiento de la información que se obtiene del patrón estable de velocidades a 14,0 metros de la entrada del flujo, según el método Log-Lineal de la BS ISO 3966 (2008); es el resultado que aparece en la tabla 1. Este resultado indica el bajo error relativo (-0,245%) de la velocidad media real del patrón, estable y no homogéneo, que se forma a los 14,0 metros de la entrada; respecto a la velocidad media que se quiere emplear para la simulación de accesorio.

Tabla 1. Resultado de la medición de la velocidad (v) media del patrón estable de velocidad

Punto	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	$\bar{v}$ **de medio patrón (m/s)**	$\bar{v}$ **del patrón (m/s)**
Rel. (y/D) ISO*	0,01890	0,07650	0,15250	0,02171	0,03612		
Coord. Y* (m)	0,00567	0,02295	0,04575	0,06513	0,10836	2,494262	
***v* (m/s)**	1,90932	2,35534	2,59853	2,72401	2,88411		
Punto	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	$\bar{v}$ **de medio patrón (m/s)**	2,493867
Rel. (y/D) ISO*	0,63880	0,78290	0,84750	0,92350	0,98110		
Coord. Y* (m)	0,19164	0,23487	0,25425	0,27705	0,29433	2,493472	
***v* (m/s)**	2,88461	2,72492	2,60057	2,35491	1,90235		

*la coordenada Y= 0,00 metros, está en la invertida de la tubería

REDUCCIÓN DE LA LONGITUD AGUAS ARRIBA (AARR) DEL ACCESORIO APLICANDO UN PERFIL DE VELOCIDAD EN LA ENTRADA

La segunda variante empleada para acortar el tramo aguas arriba, de un supuesto accesorio colocado en la sección media de la tubería (25,0 metros aguas abajo de la entrada y 25,0 metros aguas arriba de la salida), fue la de llevar a una ecuación, el patrón estable de velocidades que CFX creó en la prueba anterior, en una tubería de igual diámetro, igual rugosidad (material del tubo), igual mallado e igual modo de turbulencia que el que se empleará para evaluar el accesorio.

Para garantizar la simetría del patrón y dado que las diferencias entre las velocidades, para los puntos simétricos (1 y 10; 2 y 9; ...) difieren en menos de 0,078%, se calcula una distribución simétrica de velocidades, promediando la mismas a ambos lados del centro. En la tabla 2, aparecen las velocidades del patrón de velocidades simétrico. En cada celda donde aparecen las coordenadas de los dos puntos simétricos, que caracterizan el patrón, los números en la parte superior de la línea horizontal son las distancias, dadas por la ISO3966 (2008), entre el cetro del conducto y su invertida, medidos a partir del centro.

Tabla 2. Velocidades del patrón simétrico de velocidades estables en el ducto.

Punto	1 y 10	2 y 9	3 y 8	4 y 7	5 y 6	centro
Coord. Y* (m)	$\frac{0{,}00567}{0{,}29433}$	$\frac{0{,}02295}{0{,}27705}$	$\frac{0{,}04575}{0{,}25425}$	$\frac{0{,}06513}{0{,}23487}$	$\frac{0{,}10836}{0{,}19164}$	0,15000
$\bar{v}$ (m/s)	1,905835	2,355125	2,599550	2,724465	2,88436	2,91578

A partir de los datos obtenidos del patrón de velocidades, de acuerdo con la máxima cantidad de puntos recomendados por la BS ISO 3966 (2008) y agregándole a estos puntos, la velocidad en el centro de la tubería, medida con la herramienta *probe* del módulo de posprocesamiento del ANSYS CFX, se obtiene la expresión matemática (1), que modela, con un error estándar (Standard Error) de 2,76E-16 y un coeficiente de determinación (r^2) de 1,0; el patrón de velocidades que debe imponerse, a la entrada del conducto. Debe resaltarse que este patrón ajustado no tiene en cuenta la distribución de velocidades que se produce en el anillo perimetral; que va desde la circunferencia que contiene los puntos 1 y 10, hasta la pared (ver figura 2).

$$v = (a + cr\text{^}2 + er\text{^}4 + gr\text{^}6 + ir\text{^}8)/(1 + br\text{^}2 + dr\text{^}4 + fr\text{^}6 + hr\text{^}8 + jr\text{^}10)\ ) \qquad (1)$$

Donde,

a, ..., j: constantes de la ecuación y su valor es función de la velocidad media con la cual se evaluó el patrón. Para el caso de estudio, los valores aparecen tabulados en la tabla 3.

r : distancia, medida sobre un radio, que separa el punto de velocidad *v* del centro de la sección del ducto. Esta distancia se evalúa de acuerdo con la expresión (2).

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad (2)$$

Donde,

x, y: coordenadas de los puntos dentro del perímetro interno del ducto.

Tabla 3. Valores de las constantes del patrón estable de velocidades

a=	2,91578	f=	-212141,3573979267
b=	51,15327262021717	g=	207171,4934702348
c=	140,1114577458863	h=	8721813,743396307
d=	4035,619288220024	i=	-41271272,71169078
e=	4245,481875297239	j=	-665017518,6421526

El patrón definido por la ecuación (1) y las constantes que aparecen en la tabla 3, se genera con los puntos definidos por la BS ISO 3966 (2008) más el punto central, considerando lineal la distribución de velocidades en el anillo perimetral. La cantidad de cifras de cada constante es importante mantenerlas para no alterar las velocidades que conforman el patrón.

Para imponer el patrón ajustado por la ecuación (1), se asume que la distribución de velocidades es lineal, a partir de los dos puntos BS ISO 3966 (2008) más cercanos al perímetro interno de la tubería y el propio perímetro interno (anillo de 5,67 mm para este diámetro).

Para el diseño geométrico que se evalúa, su mallado y las restricciones adoptadas en el *Setup* y con el fin de comprobar el error que se comete en con la suposición anterior, se distribuyeron 9 puntos en cada una de las dos zonas del anillo y se midió el valor de las velocidades, con la herramienta *probe* del módulo de posprocesamiento del ANSYS CFX.

En la figura 3 aparecen, de izquierda a derecha, los 9 puntos ubicados en la zona superior (anillo de 5,67 mm para este diámetro) y los 9 puntos ubicados en la zona inferior (anillo de 5,67 mm para este diámetro) y las distribuciones de velocidad para cada grupo y el patrón promedio para esa franja perimetral.

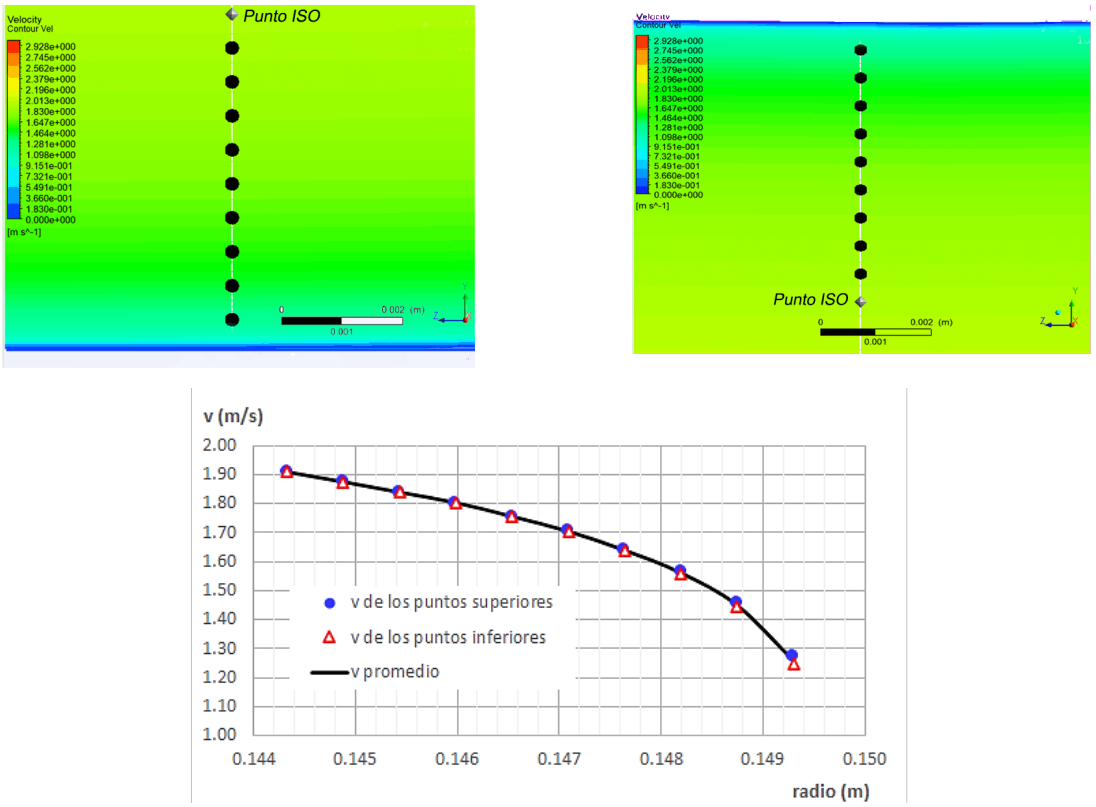

Figura 3. Distribución de puntos adicionales y el patrón medio medido en ellos

Según el método Log-Lineal que aparece en la BS ISO 3966 (2008) el patrón de velocidades cerca de la pared responde a la ecuación (3).

$$v = a + b * Log\ y \quad (3)$$

Donde,

a, b: constantes;

y: distancia del punto a la pared más cercana.

Evaluando los 9 puntos de la parte inferior y superior del anillo, promediando las velocidades en los puntos simétricos e incorporando, la velocidad media del punto más cercano, normado por la BS ISO 3966 (2008), (puntos 1 y 10, tabla 2), se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 4 a partir de ajustar con la ecuación logarítmica, dada por el método Log-Lineal propuesto por la BS ISO 3966 (2008), para el anillo más cercano a las paredes del ducto, resultando un coeficiente de determinación r^2= 0,9996951 y un Standard Error= 0,0038305

Tabla 4. Valores del ajuste de la ecuación (3)

a=	3,5053685680770590
b=	0,7104192620702514

Para verificar la validez de suponer una distribución lineal, en el anillo más cercano al perímetro interno del ducto, se realizaron dos pruebas. Primero, se comparó el patrón de velocidades medido (los 10 puntos de la BS ISO 3966 (2008), más el valor del punto central más la suposición de que en el último anillo el patrón es lineal terminando en cero en la pared) con los resultados del ajuste realizado con el modelo matemático que aparece en (1), midiéndose los errores entre ambos, dando como resultado que varían en un intervalo entre +6,78E-13 % a -1,54E-14%, los valores indican, una vez más, que la expresión (1) ajusta los puntos medidos. En la figura 4, izquierda, aparecen los dos patrones: medidos y ajustados.

La segunda prueba incorpora los puntos medidos, con los de la velocidad de los nueve puntos que cuantifican la distribución de velocidades en el anillo perimetral, ajustando una nueva ecuación a la nube de puntos. La nueva expresión aparece en la expresión (4).

$$v = (a + cr\text{^}2 + er\text{^}4)/(1 + br\text{^}2 + dr\text{^}4 + fr\text{^}6) \qquad (4)$$

La expresión (4) es más simple que la (1) al tener menos términos formando el numerador y el denominador. El modelo matemático de ajuste, aunque con buenos resultados estadísticos, tiene mayores desviaciones que los que presenta el ajuste de la expresión (1). Las constantes (*a, b, ..., f*) que aparecen en la tabla 5 se generan con los puntos definidos por la BS ISO 3966 (2008), más el punto central, más la distribución de velocidades media medida en el anillo perimetral. Para este ajuste se obtuvo un coeficiente r^2= 0,9961219 y un valor del Standard Error= 0,04763849.

Tabla 5. Valores de las constantes del patrón estable de velocidades

a=	2,92060107821163	d=	1012,462737166585
b=	-67,90500046507253	e=	4054,116810927918
c=	-221,0091877491234	f=	1639,567309474713

En la figura 4, izquierda, aparecen los patrones medidos y ajustados para la prueba con los puntos de la ecuación 1, correspondientes a la BS ISO 3966 (2008), más el punto central, considerando lineal la distribución en el anillo perimetral; en la propia figura, a la derecha, los patrones medidos y ajustados para la prueba que incorpora los nueve puntos del anillo perimetral (ecuación 4). Además, aparece al centro y abajo, una comparación, a mayor escala, de la diferencia entre los patrones ajustados, de las pruebas anteriores, cerca del perímetro interno del tubo.

Debido a la similitud entre ambos patrones, tanto medido como ajustado, decidió emplear el formulado por la ecuación (4) en la entrada de la tubería, por ser el que mejor representa la distribución de velocidades medidas con CFX, cercana a la pared.

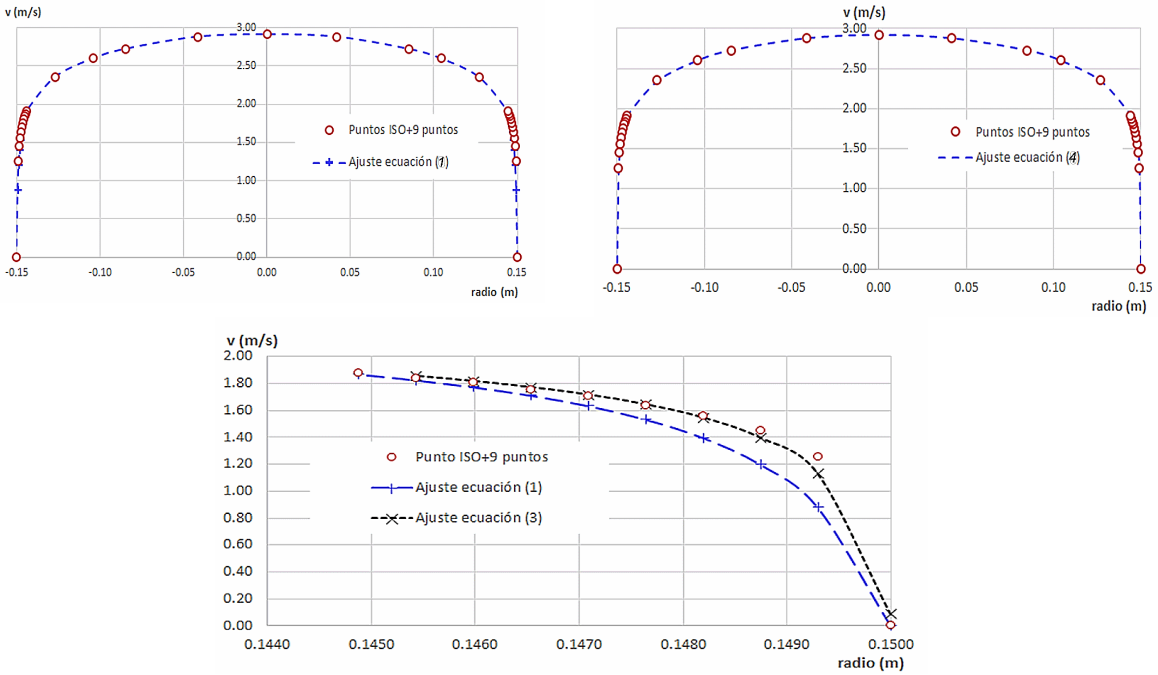

Figura 4. Comparación de patrones

Luego de obtener los resultados numéricos y gráficos se pasó a verificar, a partir de qué distancia de la entrada del ducto, se establecía un patrón estable de velocidades. Con este análisis se determina con mayor rigor la distancia de conducto aguas arriba del accesorio que debe emplearse.

La determinación de los patrones se realizó, muestreando 200 puntos de velocidad para cada patrón a partir de la entrada con intervalos regulares de 1,0 metro en dirección del flujo. En la figura 5, aparecen los valores de los patrones obtenidos. A la izquierda en la propia figura, todos los patrones con intervalos de 1,0 metro desde la entrada hasta la sección ubicada a 5,0 metros de la entrada y en la figura de la derecha, el patrón de entrada y el patrón a 5,0 metros de la entrada.

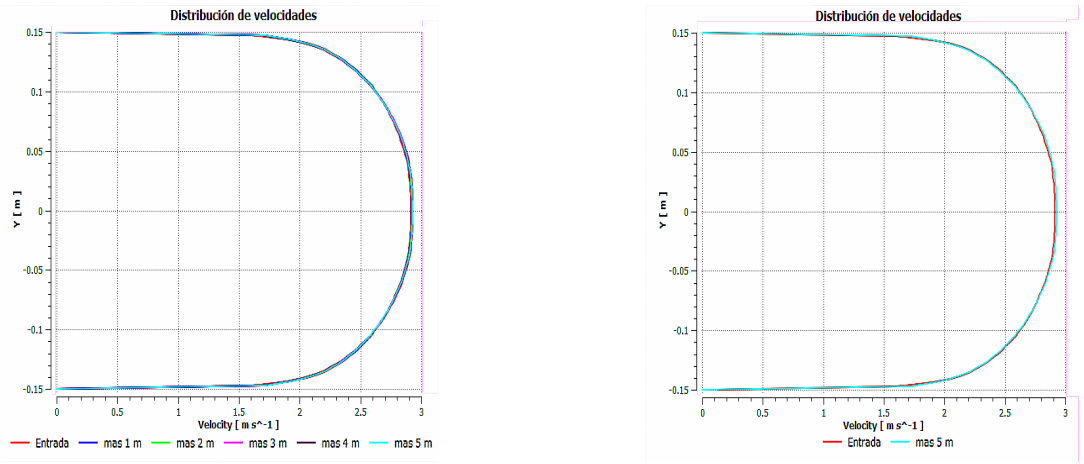

Figura 5. Patrones de velocidad a intervalos de 1,0 metro a partir de la entrada

En la tabla 6 se muestra una valoración de las diferencias de las velocidades obtenidas entre cada patrón y el patrón de entrada empleando el error relativo medio. Se incluyeron los errores entre los patrones que se producen a 6 metros y a 7 metros de la entrada, para corroborar el resultado.

Visualmente no hay diferencias apreciables entre el patrón de entrada y los patrones cada un metro hasta cinco metros de la entrada, pero al analizar cuantitativamente las diferencias, se

observan pequeñas variaciones que conducen a un mejor criterio acerca de la distancia que debe mantenerse aguas arriba del accesorio para que el patrón tenga estabilidad.

Tabla 6. Error máximo entre secciones transversales contiguas

Intervalo	Entrada y 1,0 m	1,0 m y 2,0 m	2,0 m y 3,0 m	3,0 m y 4,0 m	4,0 m y 5,0 m	5,0 m y 6,0 m	6,0 m y 7,0 m
Error (%)	1,27%	0,63%	0,88%	0,59%	0,28%	0,30%	0,29%

El cálculo numérico de los errores que aparecen en la tabla 6, indican que a los 5,0 metros de la entrada se puede considerar estable el patrón de velocidades, y además la velocidad media del mismo tiene un bajo error cuantificado en -0,25%, con la velocidad que inicialmente se supuso para el ensayo.

En la tabla 7, se muestra una comparación entre la velocidad media a la entrada y en la sección ubicada a los 5,0 m de la entrada. Además, aparece el error de estas respecto a la velocidad media esperada de 2,5 m/s, donde se evidencia la factibilidad de emplear el perfil previamente generado con errores inferiores al 1%.

Tabla 7. Velocidad media según la BS ISO 3966 (2008) y error relativo respecto a 2,5 m/s

Patrón de la entrada		Patrón a +5,0 metros	
2,489 m/s	-0,44%	2,489 m/s	-0,43%

Vale resaltar que es importante emplear la velocidad media calculada del patrón en el proceso de calibración del modelo en ANSYS, conteniendo el accesorio a investigar.

DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD NECESARIA Y SUFICIENTE AGUAS ABAJO (AAB) DEL ACCESORIO A MODELAR.

El análisis para determinar la longitud aguas abajo del accesorio que se inserte, es un proceso semejante al anterior y reviste, también, mucha importancia, por lo que implica una menor longitud en el ahorro de costo computacional y tiempo de cómputo.

A diferencia del anterior análisis, en este caso es importante tener en cuenta el accesorio a modelar y su efecto sobre el flujo aguas abajo. De forma general si el accesorio tiene geometría constante (reducido, ampliaciones, etcétera), la determinación se realiza solo para la mayor velocidad de trabajo y este escenario dará el resultado esperado y con factor de seguridad para las velocidades menores.

Si el accesorio es necesario evaluarlo para diferentes estrechamientos, caso típico de flujómetros deprimógenos, válvulas, etc.; entonces la condición extrema debe cumplir ambas restricciones: máxima velocidad y mínimo estrechamiento.

Para los límites del presente trabajo, se analizó mediante simulaciones CFD el perfil de velocidad en un tramo de 25 metros aguas abajo de un flujómetro deprimógeno tipo Cuña (Wedge flowmeter), figura 6, observando y cuantificando aguas abajo del accesorio, la distancia a la cual el perfil comienza a tomar un patrón estable. Se empleó la máxima velocidad (2,5 m/s) y el menor valor de abertura para este flujómetro (h, figura 6) igual a 60 mm para un diámetro interior de conducto de 300 mm (h/D= 0,2; figura 6). Los resultados de los patrones de velocidad aguas abajo del flujómetro aparecen cuantificados en la tabla 8, donde se evidencia una estabilidad del perfil de velocidades a partir de los 10 metros con un error porcentual respecto a las secciones anterior y posterior de 0,148 % como máximo.

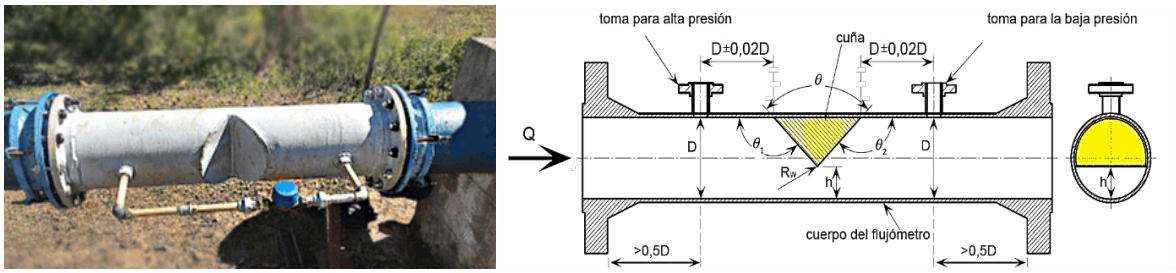

Figura 6. Flujómetro deprimógeno tipo Cuña

Tabla 8. Resultados del procesamiento de los patrones aguas abajo del vértice de la cuña.

Secciones (m)	4,0 a 6,0	6,0 a 8,0	8,0 a 10,0	10,0 a 12,0	12,0 a 15,0	15,0 a 20,0
Error **(%)	0,282	0,197	0,150	0,148	0,147	0,148
v (m/s)	2,486	2,491	2,489	2,489	2,490	2,488

*a partir del vértice de la cuña en dirección aguas abajo ** máximo calculado muestreando el patrón en 200 puntos

EL PATRÓN DE VELOCIDADES ESTABLE EN LA TUBERÍA Y SU RELACIÓN CON EL CRITERIO DE PARADA DE LAS ITERACIONES EN EL CÁLCULO

El ANYS tiene tres criterios de parada, el primero manualmente por el usuario al analizar las curvas del comportamiento de los errores (normalmente RMS o máximos) y de las variables del proceso. El segundo criterio viene dado por el número de iteraciones que el usuario elige al configurar el módulo *Setup* del CFX y el tercero por el límite del error impuesto, en el propio *Setup*, para las variables englobadas en masa (Mass) y momento (Momentum).

El criterio de parada influirá decisivamente en los resultados, así como las variables que se analicen. Cada problema en particular tiene sus propias características, pero en los límites del presente trabajo, el criterio de parada tiene influencia en el patrón estable de velocidades que se genera y por tanto tendrá influencia en la decisión de las longitudes de tubería a emplear, aguas arriba y aguas abajo.

Como ejemplo, se presentan en la tabla 9, resultados de los patrones generados aguas arriba del accesorio estudiado para criterios de parada para valores de 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5} y 10^{-6}.

Tabla 9. Errores que se cometen en la determinación del patrón de velocidades estable.

Criterio	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Error respecto a 10^{-6} (%)	-0,93	-0,40	-0,16	0,00
v (m/s)	2,477	2,490	2,489	2,489

03 CONCLUSIONES

No se encontró en la literatura consultada sobre la simulación de tuberías a presión, todas perteneciente a los últimos 10 años, datos específicos en cuanto a cómo acortar los tramos de tubería con accesorio insertado, en un ensayo CFD.

En este estudio se demostró que, para un accesorio con una obstrucción muy fuerte y una velocidad relativamente alta, el empleo del patrón de velocidades que genera ANSYS CFX en una tubería de iguales características, muy larga y sin accesorio insertado, la dimensión del tramo aguas arriba, que garantiza un patrón estable para una modelación con rigor, equivalente a 16,7 veces el valor del diámetro interno del tubo (*Laarr*= 16,7D).

Para las mismas condiciones de obstrucción provocada por el accesorio y la velocidad del ensayo, la dimensión del tramo aguas abajo, que garantiza un patrón estable para una modelación con rigor, equivale a 33,3 veces el valor del diámetro interno del tubo (*Laarr*= 33,3D).

Por último, apoyando esta recomendación con los resultados de la tabla 8, se reafirma la necesidad de estudiar inicialmente, para cada accesorio en particular, el criterio de parada de cada corrida del modelo de simulación.

04 REFERENCIAS

Asen González. R., Prieto A., Ramírez Beltrán. J. (2019). "Simulación de la ruptura súbita en tuberías de agua mediante ANSYS CFX y ANSY Fluent". Tesis en opción del título académico de Ingeniero Hidráulico. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.

Barros Filho J.A, Santos A.A.C, Navarro M.A, Jordao E. (2015). "Effect of chamfer geometry on the pressure drop of perforated plates with thin orifices" [en línea]. Ingeniería y diseño nuclear. Elsevier Ltd., 284: 74-79. ISSN: 00295493, DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.12.009. Disponible en: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84920668042&partner ID=40&md5 =7b6d911e0c1342d401656613625767cd [Consulta: mayo 2023].

BS ISO 3966 (2008). "Measurement of fluid flow in closed conduits. Velocity area method using Pitot static tubes". Second Edition, British Standard, United Kingdom. ISBN 978 0 580 62863 4.

Chirino Montano J. (2023). "Estudio de la influencia de modelos RANS en la modelación de un flujo a través de una obstrucción. Caso de estudio en flujómetro de cuña". Tesis en opción del título académico de Ingeniero Hidráulico. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE, La Habana, Cuba.

Izquierdo López D. (2017): "Propuesta del nuevo laboratorio virtual para conducciones forzadas con CFD en ANSYS". Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE.

León Méndez A. J. y Herrera U. (2012). "Empleo de los modelos visuales en la enseñanza y la investigación", Ingeniería Hidráulica y Ambiental, ISSN: 1815–591X, vol. XXXIII, p. 14, 2012. Disponible en: https://riha.cujae.edu.cu [Consulta: mayo 2023].

León Méndez A.J.., Ramírez Beltrán J., Stefano E. (2022). "Flujómetros proporcionales: opciones, alcance y limitación" [en línea]. Ingeniería Hidráulica y Ambiental vol. 43 no.3. (2022). Cuba. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/363196015 [Consulta: mayo 2023].

Márquez J. M. (2002). "Modelación en conductos forzados utilizando el software ANSYS," Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniería Hidráulica), Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.

SASO ISO 5167-6 (2020). "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 6: Wedge Meter". Saudi Standards, Metrology and Quality Org. (SASO), Reino de Arabia Saudita. ICS: 17.120.10

Stefano E.; Prieto Fernández A.P. y León Méndez A.J. (2021). "Recomendaciones básicas para modelar obras hidráulicas empleando la dinámica de los fluidos computacional (CFD)" [en línea].

Ingeniería Hidráulica y Ambiental vol. 42 no.4. (2021). Cuba. Disponible en: https://riha.cujae.edu.cu [Consulta: mayo 2023].

Vélez Mederos M.A. (2003). "Soporte informático a las asignaturas de la disciplina Hidráulica Básica"., Tesis (en opción al título de Ingeniería Hidráulica), Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2003.

Villaroel Quinde L.F (2015). "Simulación numérica de un flujo de agua a través de una válvula tipo mariposa de doble excentricidad". Tesis para optar el grado de Magíster en Ciencias con mención en Energía, Escuela de Posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Disponible en: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6408 [Consulta: mayo 2023].

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Alcides Juan León Méndez https://orcid.org/0000- 0002-5072-6438

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, desarrollo de la investigación, redacción del documento y análisis y discusión de los resultados.

Johan Chirino Montano https://orcid.org/0009- 0001-3749-5938

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, desarrollo de la investigación y análisis y discusión de los resultados.

Edgar Stefano https://orcid.org/0000-0001-8548-2149

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, desarrollo de la investigación, revisión del documento y análisis y discusión de los resultados.

Modelo XBeach NH para el cálculo del rebase sobre muros verticales. Malecón de La Habana

Daykelin León Arias E-MAIL: daykelin.la@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH).Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

Luis F. Córdova López E-MAIL: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH).Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

RESUMEN

La investigación se centró en modelar con XBeach, en su modo No Hidrostático el comportamiento del oleaje durante la ocurrencia de eventos extremos en el malecón de La Habana para determinar el rebase sobre la estructura. Se realizó la calibración - validación del modelo para las condiciones de tormenta del huracán Wilma (2005) y el período de retorno 1/50 años. Se estableció el modelo y se simuló la hidrodinámica costera de 6,25 km del malecón para 49 horas del huracán Wilma correspondiente con los días 22 al 25 de octubre, obteniéndose los rebases específico y promedio sobre el muro.

PALABRAS CLAVES: hidrodinámica litoral, modelación numérica, muro vertical, no hidrostático.

XBeach NH model for the calculation of overttoping on vertical walls. Havana Malecon

ABSTRACT

The research focused on modeling with XBeach, in its Non-Hydrostatic mode, the behavior of the waves during the occurrence of extreme events on the Havana boardwalk to determine the overtopping on the structure. The calibration - validation of the model was carried out for the storm conditions of Hurricane Wilma (2005) and the return period 1/50 years. The model was established and the coastal hydrodynamics of 6.25 km of the seawall was simulated for 49 hours of Hurricane Wilma corresponding to October 22 to 25, obtaining the specific and average overtopping on the wall.

KEYWORDS: hydrodynamic coastal, numerical modeling, vertical wall, non Hydrostatic.

CITMA CERTIFICADO

Septiembre 2023-RECIBIDO *APROBADO-Octubre 2023*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

La protección contra las inundaciones costeras y penetraciones del mar ha cobrado una importancia especial a medida que el ascenso del nivel medio del mar se ha acelerado por los efectos del cambio climático global. Cuba no escapa de esta situación, por su posición geográfica, además, se ve amenazada por la ocurrencia de tormentas tropicales, huracanes, frentes fríos y otros fenómenos que vienen acompañados de fuertes vientos, intensas lluvias y marejadas. (Morejón, 2020)

Cada vez con mayor frecuencia el litoral costero de La Habana y en especial la zona donde se encuentra ubicado el malecón, es víctima de los efectos generados por los fenómenos hidrometeorológicos que azotan la isla, perjudicando en gran medida a la población capitalina que radica en sus cercanías y ocasionando grandes pérdidas a la economía del país. El malecón de La Habana se clasifica como un muro vertical de defensa de costas, además de su atractivo como espacio de ocio y esparcimiento tiene la finalidad de proteger la infraestructura de la zona contra el rebase del oleaje y las inundaciones, en muchas ocasiones ante la ocurrencia de eventos extremos como los ciclones tropicales y frentes fríos se ve rebasado.

La integración de los modelos numéricos en la estimación del rebase de oleaje resulta cada vez más atractivo dado el avance en la potencia de cálculo y su capacidad para reproducir la hidrodinámica litoral; se evidencia la necesidad de seguir abordando en el tema referido, por lo que la presente investigación se centrará en modelar con precisión a través del modelo XBeach, en su modo No Hidrostático el comportamiento del oleaje durante la ocurrencia de eventos extremos en el malecón de La Habana para determinar el rebase sobre la estructura.

La investigación constará de 2 etapas: calibración – validación del modelo y simulación y determinación del rebase sobre el muro.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

Para simular las condiciones hidrodinámicas en el malecón de La Habana (caso de estudio), se seleccionó el modelo numérico XBeach en su modo No Hidrostático (Roelvink et al. 2014), por su capacidad de reproducir los procesos costeros y en especial la rotura de la ola sobre la estructura al emplear las ecuaciones de Navier-Stokes en aguas poco profundas.

Los límites de representatividad de la investigación fueron las condiciones de tormenta del huracán Wilma (2005) y el período de retorno 1/50 años definido en la tarea técnica para la solución de las inundaciones en el malecón, en el caso de la calibración – validación y en la simulación solamente el escenario del huracán Wilma correspondiente con los días 22 al 25 de octubre donde se registraron las mayores afectaciones para la zona; el enmarcamiento espacial, abarca el malecón desde calle 12 hasta Prado con una longitud de 6,25 km subdividiéndose el área de estudio en 4 tramos considerando los criterios del Grupo de Expertos Gobierno de La Habana, 1993 (ver figura 1).

Se utilizó una base de datos que permitió una mayor precisión en la reproducción de las condiciones litorales extraída de los materiales que se presentan a continuación:

- Batimetría escala 1:500, GEOCUBA S.A, 2020
- Línea de costa (resolución 25 m), GEOCUBA S.A, 2020
- Topobatimetría, estacionado 20 m, GEOCUBA S.A, 2020
- Modelo de superficie del terreno (resolución 0,25 m), GEOCUBA S.A, 2020

- Clima Marítimo, INSMET, 2012
- Marea astronómica, INSMET, 2012
- Datos huracán Wilma, INSMET, 2005
- Zonas de inundación asociadas al área de estudio, Defensa Civil, 2006
- Resultados de la modelación física, Laboratorio de modelación física de la Universidad de

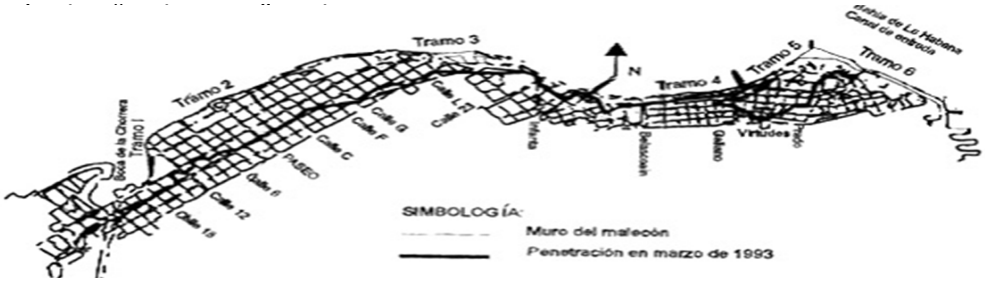

Figura 1: Vista en planta Malecón de La Habana, división por tramos. (Grupo de Expertos Gobierno de La Habana, 1993)

Se tomó como punto de referencia para la calibración-validación del modelo los resultados de la estimación del rebase obtenidos de la modelación física realizada en el laboratorio de la Universidad de Nápoles "Feder

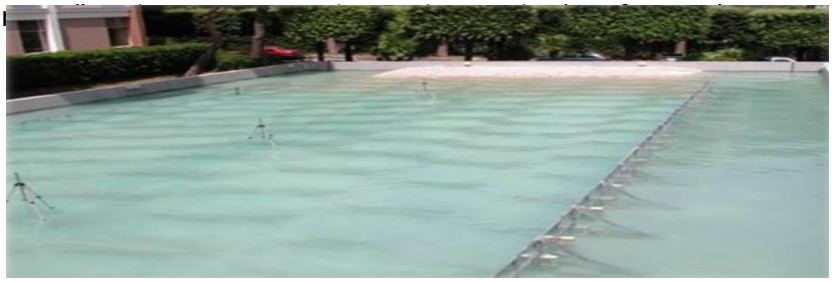

Figura 2: Tanque de oleaje irregular, Laboratorio Federico II, Universidad de Nápoles, Italia, 2013.

Para establecer las condiciones de frontera de la simulación se tomaron como referencia los resultados de (Orta, 2020), "Estudio del fenómeno del rebase promedio del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia del huracán Wilma 2005 aplicando el modelo Delft 3D", donde se obtuvo altura de ola, periodo pico y nivel total de mar durante la ocurrencia del evento de estudio medidos con boyas virtuales (usando Delft 3D) a varias profundidades en la zona del malecón; al carecer de la información requerida a la profundidad seleccionada para la simulación de – 20 m se tomó una estimación de estos parámetros comprendidos entre las boyas 38 y 39 que se ubicaron en las profundidades -120 y -2.14 m respectivamente, en la dirección norte, ver figura 3.

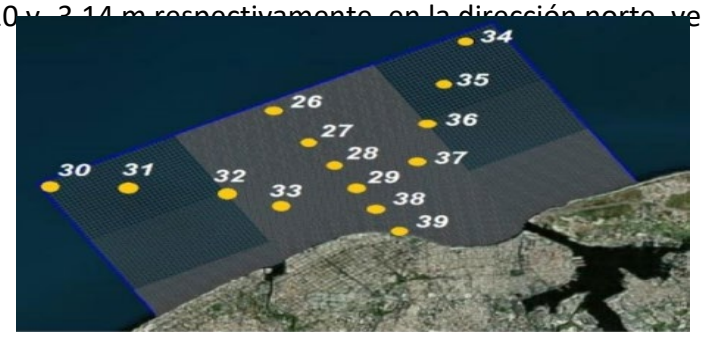

Figura 3: Ubicación de las boyas virtuales, dominio Malecón Habanero. (Orta, 2020)

Los parámetros característicos para la simulación se muestran en las figuras 4 y 5 respectivamente.

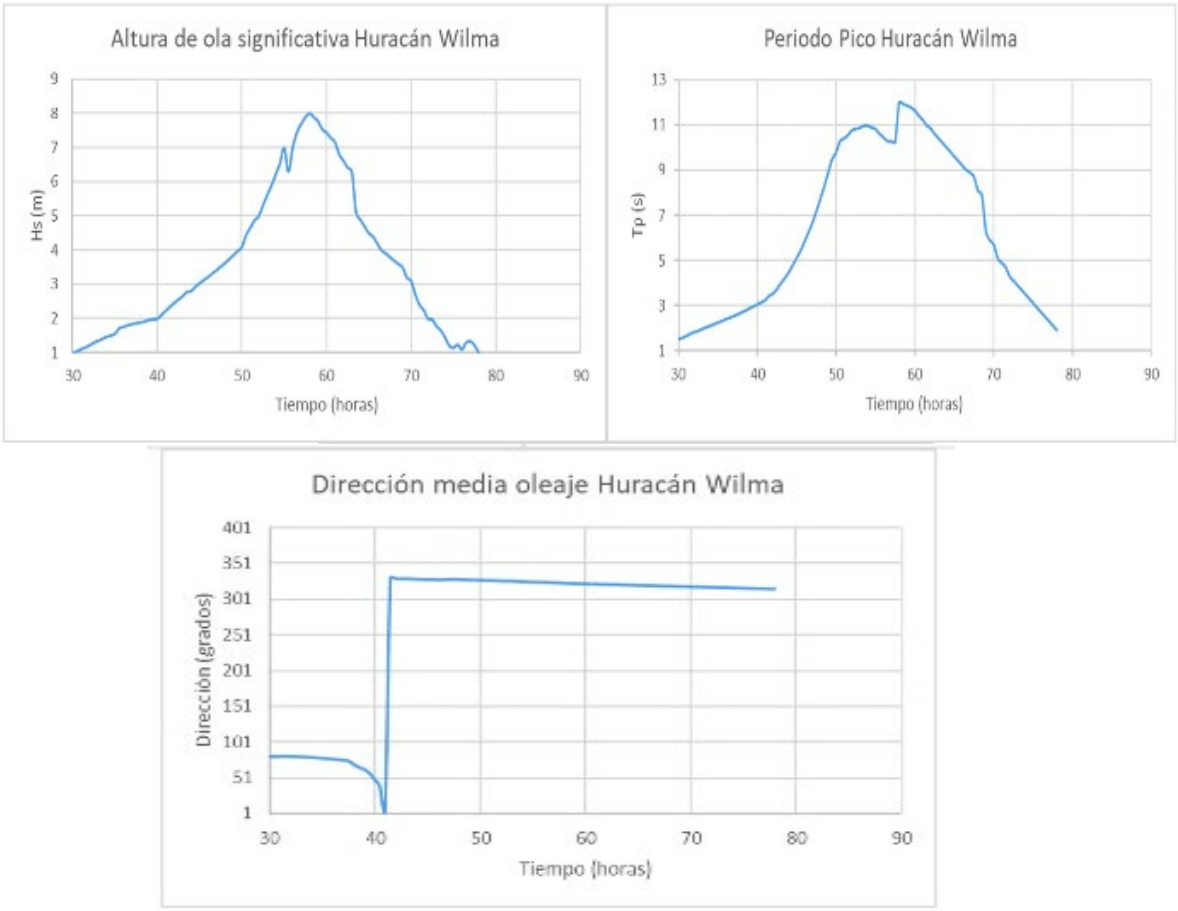

Figura 4: Altura de ola significativa, periodo pico y dirección media de oleaje huracán Wilma, profundidad -20 m.

Figura 5: Nivel total de mar huracán Wilma, tramos 2 al 5 Malecón de La Habana.

03 RESULTADOS DE LAS ETAPAS DE INVESTIGACIÓN

ETAPA I: CALIBRACIÓN – VALIDACIÓN DEL MODELO

En esta primera etapa correspondiente a la calibración – validación del XBeach se emplearon ocho pruebas de la modelación física correspondientes cuatro al escenario del huracán Wilma, considerando un nivel total de +2,28 m y cuatro al escenario del Periodo de retorno con un nivel total de +1,73 m, con dos alturas de olas significativas (*Hs*) 2,7 y 6,5 m y dos periodos picos (*Tp*) 10 y 12 seg para la calibración y ocho pruebas con la misma estructura para la validación (*Hs* 4 y 5,4 m, *Tp* 10 y 12 seg). La comparación de los resultados se realizó mediante el error absoluto definiendo como buenos resultados los correspondientes a un error absoluto menor que q= 1 m^3/sm.

Se definieron tres parámetros a calibrar: resolución de la malla, esbeltez máxima de la ola y fricción de fondo, ver tabla 1.

Tabla 1: Parámetros a calibrar XBeach NH.

Descripción	Parámetro	Rango
Resolución de la malla (1D o 2D, m)	dx, dy	0-1000000000
Criterio de esbeltez máxima de la ola (adim)	maxbrsteep	0,3 - 0,8
Fricción de fondo (adim)	manning	Según tipo de fondo.

El proceso de calibración se dividió en tres fases:

1. Definición de la resolución de malla (*dx*)
2. Definición del parámetro de esbeltez máxima de la ola (*maxbrsteep*)
3. Definición del valor de fricción de fondo (*n*, Manning)

Estas fases se establecieron bajo el criterio de ir fijando cada una de las variables a calibrar y hacer corridas del modelo para comparar con los resultados de la modelación física a modo de ir definiendo variables en cada paso hasta tener la mejor selección de los parámetros.

La resolución de la malla (*dx*) se varió 0,5 y 1 m en una sola dimensión (1D), para la esbeltez máxima del oleaje se utilizaron valores representativos del rango admitido según XBeach Manual, 2015, 0,3; 0,6 y 0,8 y los valores de la *n* de Manning fueron 0,016 (hormigón) y 0,035 (roca) correspondientes con las características del muro y la zona de rompiente. El perfil característico que se empleó para este proceso se tomó a partir de los - 20 m de profundidad, con una cota de coronación del muro de 3,96 m por encima del nivel medio del mar y con una resolución de la malla de 1 m.

Los resultados de la primera fase para el parámetro *dx* (resolución de la malla) arrojaron que tanto para la resolución de 0,5 m como la de 1 m los resultados fueron buenos teniendo en cuenta que el error absoluto en todos los casos fue menor que q= 1 m^3/sm; los mejores resultados se obtuvieron para *dx*=1 m, no solo los errores absolutos fueron menores, los valores de caudal se duplicaron estimando con mayor precisión el rebase y se fijó la malla de 1 m para los siguientes pasos; se realizaron un total de 16 pruebas. En la segunda fase se realizaron 16 pruebas; los tres valores seleccionados dentro del rango admisible del parámetro estudiado en este paso mostraron buenos resultados; los mejores resultados se obtuvieron para *maxbrsteep*=0,8, en cada una de las pruebas se pudo apreciar que los errores absolutos fueron menores y que disminuyeron a medida que se

aumentó el parámetro al igual que los valores de caudal (que se duplicaron), por lo que se fijó el valor *maxbrsteep*=0,8. En la tercera fase se realizaron 8 pruebas y se obtuvieron los mejores resultados para *n*=0,016 (hormigón), siendo la variante de menores errores absolutos y aumentándose los valores del caudal con una mejor aproximación al caudal obtenido en las pruebas de modelación física, los resultados de esta última fase se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Resultados obtenidos en el proceso de calibración, tercera fase.

Escenario	No. de prueba	n-manning (adim)	maxbrsteep (adim)	dx (m)	Tp (s)	Hs (m)	q (m^3/sm) XBeach NH	q (m^3/sm) Modelación Física	Error Absoluto (m^3/sm)
Huracán Wilma +2,28 m	5	0,016	0,8	1	10	2,7	0,192	0,35	0,158
	6	0,016	0,8	1	10	6,5	0,705	0,98	0,275
	7	0,016	0,8	1	12	2,7	0,249	0,37	0,121
	8	0,016	0,8	1	12	6,5	0,814	1,13	0,316
Período de Retorno 1/50 años +1,73 m	5	0,016	0,8	1	10	2,7	0,122	0,18	0,058
	6	0,016	0,8	1	10	6,5	0,419	0,67	0,251
	7	0,016	0,8	1	12	2,7	0,147	0,18	0,033
	8	0,016	0,8	1	12	6,5	0,504	0,80	0,296

Se realizaron un total de 40 pruebas y el proceso de calibración concluyó definiéndose los parámetros: *dx*=1m, *maxbrsteep*=0,8 y *n*=0,016 para el caso de estudio teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la modelación física. En la figura 6 se muestra gráficamente la comparación del caudal obtenido en la calibración (tercera fase) con los resultados de la modelación física para ambos escenarios.

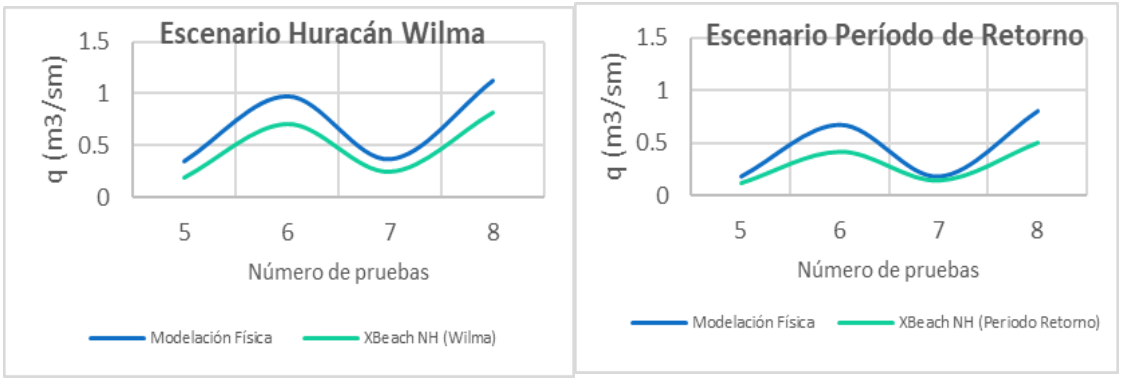

Figura 6: Comparación del caudal de rebase obtenido en la calibración con los resultados de la modelación física, escenarios simulados.

En la comparación gráfica del caudal se observa que el modelo subestima los valores de rebase obtenidos en la modelación física.

A partir de los resultados de la calibración se realizó el proceso de validación demostrándose la capacidad del modelo de reproducir las condiciones hidrodinámicas en el malecón de La Habana en base a la comparación realizada con los estudios de modelación física y cumpliendo con la condición planteada del error absoluto, observándose que para menores alturas de ola y menor nivel inicial (condición de frontera) los resultados son más precisos ya que los errores son menores; en la tabla 3 se muestran los resultados de la validación y en la figura 7 el análisis gráfico en base a la comparación con la modelación física.

Tabla 3: Resultados obtenidos en el proceso de validación de modelo.

Escenario	No. de prueba	n-manning (adim)	maxbrsteep (adim)	dx (m)	Tp (s)	Hs (m)	q (m^3/sm) XBeach NH	q (m^3/sm) Modelación Física	Error Absoluto (m^3/sm)
Huracán Wilma +2,28 m	1	0,016	0,8	1	10	4	0,386	0,53	0,144
	2	0,016	0,8	1	10	5,4	0,626	0,74	0,114
	3	0,016	0,8	1	12	4	0,461	0,60	0,139
	4	0,016	0,8	1	12	5,4	0,626	0,88	0,254
Período de Retorno 1/50 años	1	0,016	0,8	1	10	4	0,241	0,29	0,049
	2	0,016	0,8	1	10	5,4	0,347	0,47	0,123
	3	0,016	0,8	1	12	4	0,265	0,34	0,075
	4	0,016	0,8	1	12	5,4	0,392	0,56	0,168

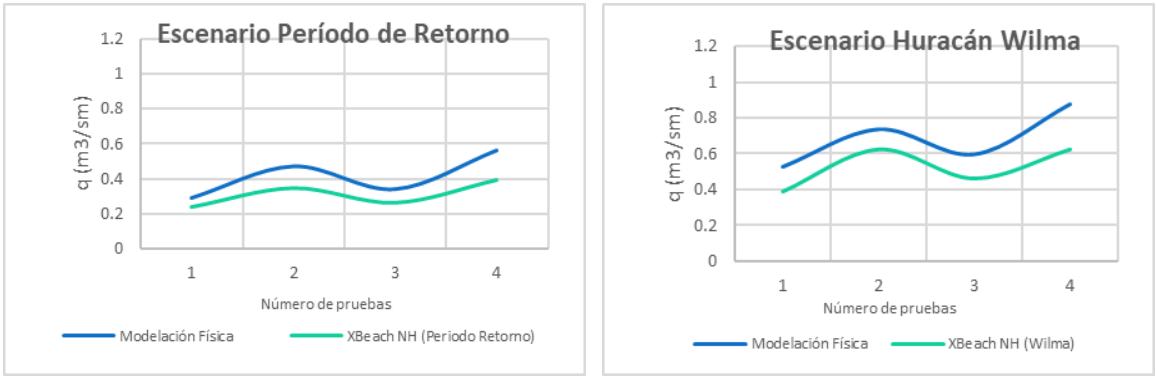

Figura 7: Comparación del caudal de rebase obtenido en la validación con los resultados de la modelación física.

En la figura 7 se evidencia claramente que, en el proceso de validación, aunque se cumple la condición del error absoluto, el modelo subestima los resultados del caudal de rebase obtenidos en los estudios de referencia, aspecto a considerar en la siguiente etapa.

Además de evaluar los resultados del XBeach NH con la modelación física se realizó una comparación con SWASH y las fórmulas de rebase del EurOtop (2018) para muros costeros verticales con una corrección de sus exponentes que fue obtenida en la modelación física (2013) y que se presentó por Montero, 2016 en su tesis de grado, donde el autor utilizó las mismas condiciones de simulación que se emplean en la presente investigación; la comparación de los resultados se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Comparación de los resultados obtenidos con el modelo XBeach NH – SWASH y Fórmulas del EurOtop.

Escenario	No. de prueba	dx (m)	Tp (s)	Hs (m)	q (m^3/sm) Modelación Física	q (m^3/sm) XBeach NH	q (m^3/sm) SWASH	q (m^3/sm) EurOtop
Huracán Wilma +2,28 m	1	1	10	4	0,53	0,386	0,210	0,280
	2	1	10	5,4	0,74	0,626	0,329	0,560
	3	1	12	4	0,6	0,461	0,293	0,520
	4	1	12	5,4	0,88	0,626	0,474	0,800
Período de Retorno	1	1	10	4	0,29	0,241	0,103	0,120
	2	1	10	5,4	0,47	0,347	0,181	0,350

1/50 años +1,73 m	3	1	12	4	0,34	0,265	0,167	0,200
	4	1	12	5,4	0,56	0,392	0,279	0,430

Como se puede observar a iguales condiciones de altura de ola, periodo y resolución de malla, XBeach NH arroja mejores resultados en la obtención del caudal de rebase ante el modelo SWASH, duplicándose los valores obtenidos con una mejor aproximación a la modelación física. En la figura 8 se representa de forma gráfica la comparación establecida entre todos los métodos estudiados para ambos escenarios.

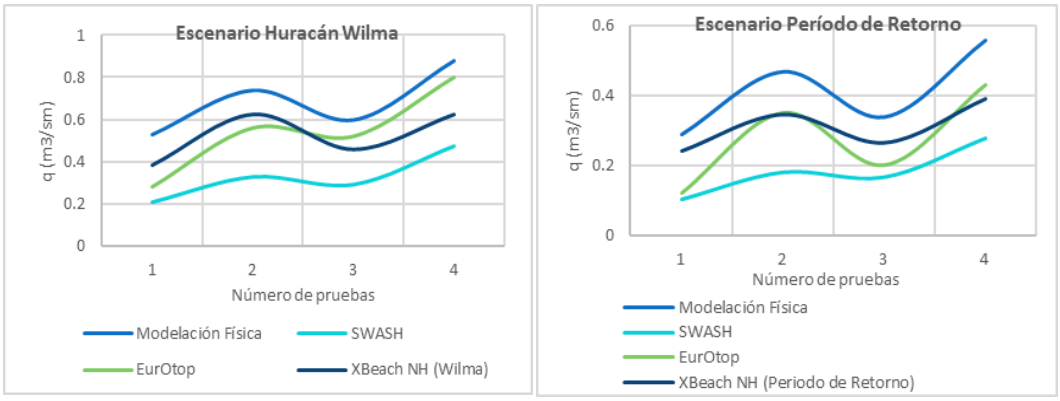

Figura 8: Comparación entre métodos estudiados para la obtención del rebase en los escenarios estudiados.

En el proceso de validación se pudo evidenciar la precisión de los resultados obtenidos con el XBeach siendo esta variante junto con las fórmulas del EurOtop las más acertadas, según figura 8; considerando que las fórmulas representa un régimen cuasi dinámico donde las variables: nivel, altura de ola y periodo pico son fijos y el valor de rebase obtenido representa un volumen de agua que rebasa la estructura y lo hace de forma continua durante el tiempo de simulación, se concluye que el XBeach NH reproduce la hidrodinámica costera y por tanto las condiciones de rebase, al usar el modo No Hidrostático donde a partir de datos de nivel de mar, altura de ola y periodo pico representativos en el tiempo de duración de un evento se puede modelar con precisión cuándo el oleaje rebasa la estructura y cuándo la masa de agua regresa al mar por el fenómeno de reflexión, a pesar de subestimar los valores de referencia obtenidos en la modelación física el uso de este modelo constituye una gran ventaja debido a su régimen semi dinámico que resulta un aspecto de gran importancia en el manejo costero y en el estudio de las inundaciones.

ETAPA II: SIMULACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL REBASE SOBRE EL MURO

En esta etapa partiendo de los resultados de la calibración – validación se estableció el modelo para el caso de estudio definiendo los perfiles característicos representativos de los tramos del malecón a partir de los criterios de selección: representación de las condiciones batimétricas (profundidad – 20 m hasta el muro), cota de coronación del muro y posición frente al oleaje; se trazaron 14 perfiles, su ubicación y distribución que se muestran en la figura 9.

Los tramos se dividieron en subtramos (ver figura 9) y cada subtramo se le asoció una longitud, las características fundamentales de cada subtramo se presentan en la tabla 5.

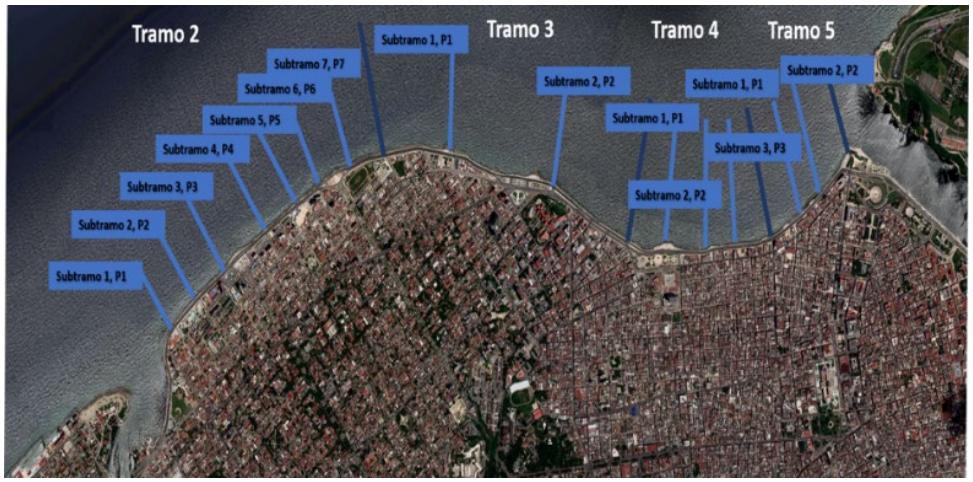

Figura 9: Ubicación de los perfiles a modelar.

Tabla 5: Características de los subtramos de estudio malecón de La Habana.

Tramo	Subtramo	Cota muro (m)	Longitud muro (m)
2	1	3,10	250
	2	3,35	250
	3	3,60	500
	4	3,75	250
	5	3,80	250
	6	4,10	250
	7	4,43	250
3	1	4,30	1000
	2	4,00	1000
4	1	4,16	250
	2	4,33	250
	3	3,97	750
5	1	3,97	500
	2	3,94	500

A partir de las condiciones de frontera y el establecimiento del modelo se presentan los resultados de la obtención del rebase del muro en el malecón de La Habana en la tabla 6.

Tabla 6: Resultados del rebase específico en la modelación de los perfiles seleccionados.

Tramo	Sub tramo / Perfil	Cota muro (m)	Longitud muro (m)	Caudal rebase específico q (m^3/sm)	Caudal rebase específico máximo q (m^3/sm)
2	Subtramo 1 / Perfil 1	3,10	250	0,066	11,774
	Subtramo 2 / Perfil 2	3,35	250	0,096	14,152
	Subtramo 3 / Perfil 3	3,60	500	0,118	18,299
	Subtramo 4 / Perfil 4	3,75	250	0,133	25,548
	Subtramo 5 / Perfil 5	3,80	250	0,134	17,124
	Subtramo 6 / Perfil 6	4,10	250	0,129	23,042
	Subtramo 7 / Perfil 7	4,43	250	0,177	31,981
3	Subtramo 1 / Perfil 1	4,30	1000	0,048	14,287
	Subtramo 2 / Perfil 2	4,00	1000	0,196	30,325
4	Subtramo 1 / Perfil 1	4,16	250	0,153	22,280
	Subtramo 2 / Perfil 2	4,33	250	0,151	17,141

	Subtramo 3 / Perfil 3	3,97	750	0,246	32,144
5	Subtramo 1 / Perfil 1	3,97	500	0,246	32,144
	Subtramo 2 / Perfil 2	3,94	500	0,116	18,628

Al analizar el comportamiento del caudal especifico de rebase por perfiles modelados presentados en la tabla 6, se observa que el rebase no es proporcional a la altura del muro, depende de varios factores como la batimetría, la posición del muro frente al oleaje y la propia trayectoria del evento simulado.

Tramo 2: los mayores rebases se dieron en perfil 7 con 0,177 m^3/sm perteneciente al subtramo 7 donde a pesar de tener la cota de coronación del muro más alta para ese tramo el muro se encuentra más cercano a la profundidad de – 20 m incidiendo directamente en una mayor altura de ola y en los niveles de rebase, la posición del muro orientado hacia el noroeste posibilitó el incremento del rebase para este fenómeno en específico debido a su trayectoria haciendo que el frente de olas impactará perpendicular a la zona donde se encuentra el perfil; comparando con los récords históricos del huracán, donde se ubicó este perfil, cercano a calle G se observaron grandes volúmenes de inundación, el rebase del muro resultó una de las principales causas de que esto ocurriera.

El análisis de la distribución del rebase en el tiempo modelado, para este perfil en específico, arrojó que el sobrepaso comenzó a partir del día 24 de octubre del 2005 (49,17 horas) en horas de la madrugada (aproximadamente las 6:00 hora local) y se mantuvo por casi 20 horas, en los resultados ola a ola se evidenció que el mayor rebase ocurrido alcanzó los 31,98 m^3/sm (aproximadamente a las 17:00 hora 14:00, hora local (día 24) los rebases su

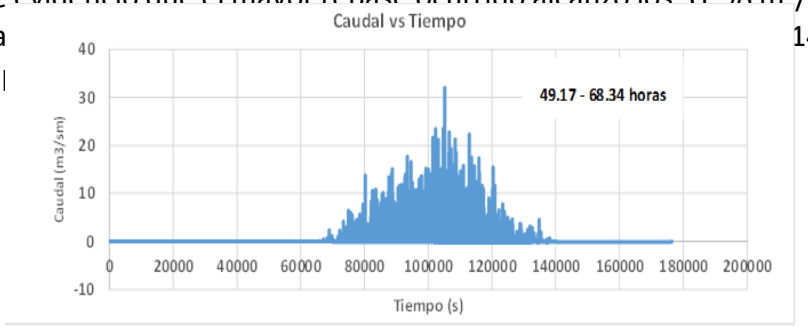

Figura 10: Representación gráfica del rebase específico en el tiempo simulado, P7, Sub 7, Tramo 2.

Tramo 3: el mayor rebase específico se obtuvo en el perfil 2 del subtramo 2 con 0,196 m^3/sm en este caso tuvo mayor influencia la altura del muro y su distancia a la profundidad de – 20 m, la posición del muro ubicada más hacia el norte se ve afectado en menor medida por la trayectoria del huracán, este perfil se ubicó frente al Hotel Nacional de Cuba, cercano a calle 23 y como en el caso anterior en la zona se reportaron grandes volúmenes de inundación siendo el rebase una de las causas y el sobrepaso del muro comenzó a partir del día 24 de octubre, el mayor rebase ocurrido alcanzó los 30,32 por más de 8 horas los rebases superaro

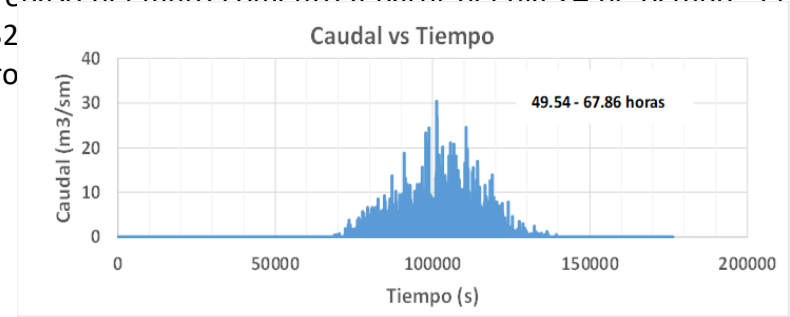

Figura 11: Representación gráfica del rebase específico en el tiempo simulado, P2, Sub 2, Tramo 3.

Tramo 4: el mayor rebase específico se obtuvo en el perfil 3 del subtramo 3 con 0,246 m^3/sm influyendo la altura del muro y la batimetría de la zona, debido a que este un perfil más extendido hacia el muro donde las profundidades son menores, el perfil se encuentra entre las calles Perseverancia y Campanario correspondiente a la zona del Malecón Tradicional, otro de los puntos de mayor inundación. En este caso como se puede ver en la figura 12 los rebases comienzan a darse una hora [illegible] los 32,14 m^3/sm a l [illegible] eraron los 15 m^3/sm

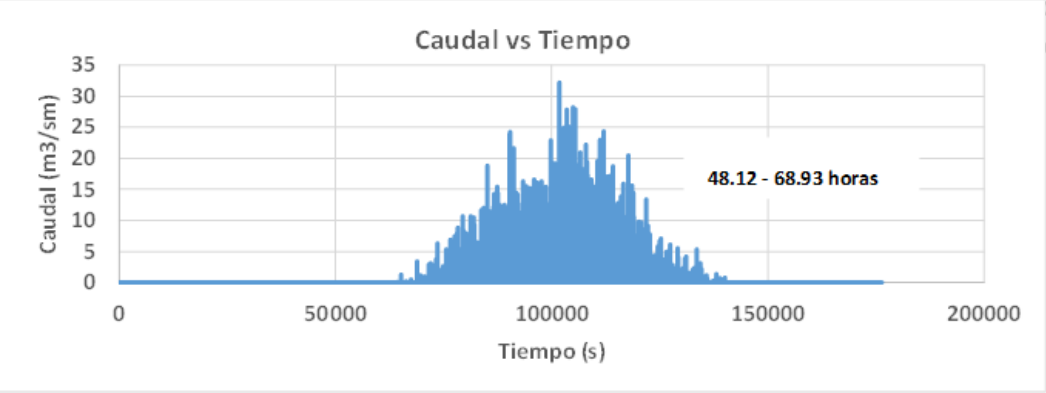

Figura 12: Representación gráfica del rebase específico en el tiempo simulado, P3, Sub 3, Tramo 4.

Tramo 5: el mayor rebase específico se obtuvo en el perfil 1 del subtramo 1 con 0,246 m^3/sm influyendo la altura del muro, la batimetría de la zona y la trayectoria del huracán respecto a la posición del muro en sentido noroeste, el perfil también se encuentra entre las calles Crespo y Genios correspondiente a la zona del Malecón Tradicional. En la figura 13 se muestra tal como en el caso anterior q [illegible] yor rebase ocurrido a [illegible] re y por de 8 horas de

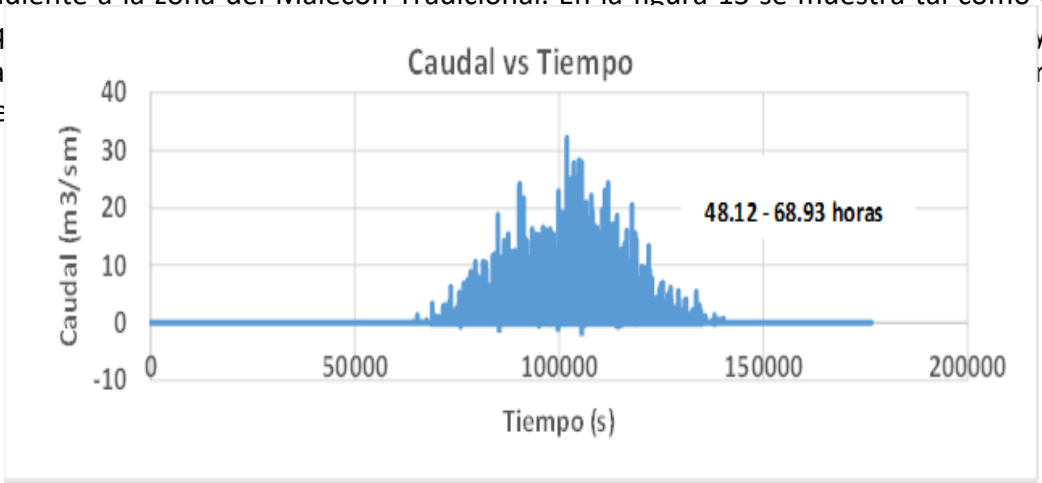

Figura 13: Representación gráfica del rebase específico en el tiempo simulado, P1, Sub 1, Tramo 5.

De forma general en los perfiles donde se dieron los mayores rebases específicos, el mayor valor ocurrió alrededor de las 16:00 horas, hora local y los rebases se mantuvieron durante aproximadamente 20 horas del día 24 de octubre de 2005.

Seguidamente se presenta el rebase específico por perfiles modelados y su distribución por tramos y subtramos, donde se evidencian los perfiles que arrojaron mayor rebase correspondientes al análisis anterior.

A partir del rebase específico se obtuvo el rebase promedio por subtramos y tramos, ver tabla 7.

Tabla 7: Resultados rebase promedio malecón de La Habana.

Tramo	Sub tramo / Perfil	Caudal rebase promedio subtramos (m^3/s)	Caudal rebase promedio tramos (m^3/s)
2	Subtramo 1 / Perfil 1	16,50	272,35
	Subtramo 2 / Perfil 2	24,00	
	Subtramo 3 / Perfil 3	88,50	
	Subtramo 4 / Perfil 4	33,35	
	Subtramo 5 / Perfil 5	33,50	
	Subtramo 6 / Perfil 6	32,25	
	Subtramo 7 / Perfil 7	44,25	
3	Subtramo 1 / Perfil 1	48,00	244,00
	Subtramo 2 / Perfil 2	196,00	
4	Subtramo 1 / Perfil 1	38,25	260,50
	Subtramo 2 / Perfil 2	37,75	
	Subtramo 3 / Perfil 3	184,50	
5	Subtramo 1 / Perfil 1	123,00	181,00
	Subtramo 2 / Perfil 2	58,00	
Total			957,85

Según los resultados obtenidos para las 49 horas modeladas del huracán Wilma y su influencia en el área del malecón de La Habana el caudal de rebase total fue de 957,85 m^3/s.

Al incluir en el análisis la longitud que se le asocia a cada perfil, se evidencia una gran influencia en los resultados del rebase promedio; aplicando un mismo valor de rebase a un subtramo previamente definido, en los puntos donde este fue superior y se seleccionó una longitud más ext io); po de for s.

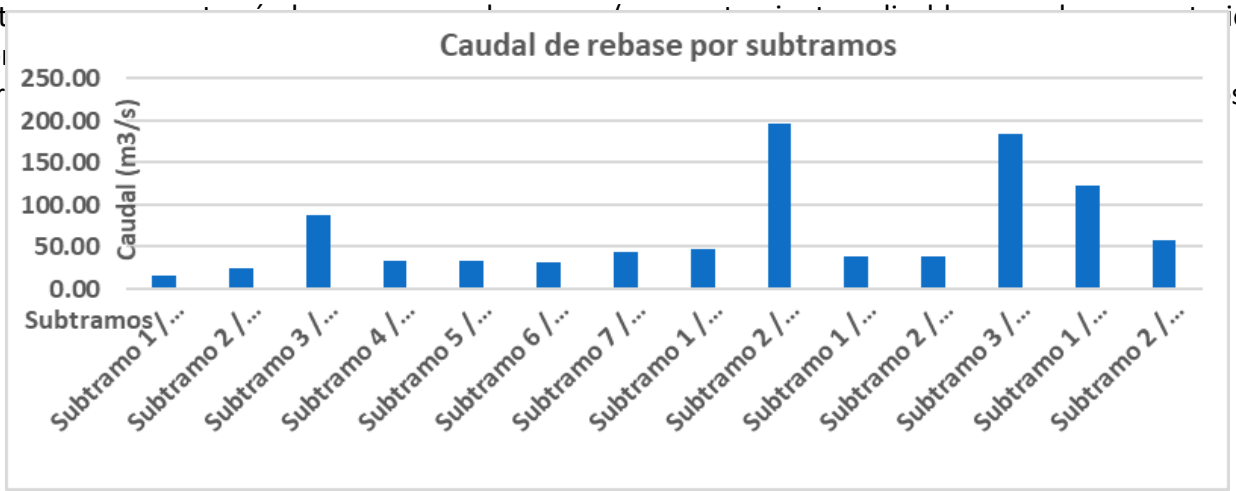

Figura 14: Rebase promedio por subtramos malecón de la Habana.

Los mayores rebases se localizaron en el subtramo 2 del tramo 3, en el subtramo 3 del tramo 4 y subtramo 1 del tramo 5, tomando en consideración lo explicado del efecto del rebase específico y la longitud asociada a cada perfil; el peor escenario por tramos se dio en el tramo 2, seguido del tramo 4, 3 y 5.

04 CONCLUSIONES

El modelo XBeach NH se calibró para el caso de estudio obteniéndose los valores de los parámetros: *dx*= 1m, *maxbrsteep* = 0,8 y *n* = 0,016; siendo la resolución de la malla y el parámetro de rompiente de la ola los de mayor importancia en la calibración del modelo.

El modelo XBeach NH se validó para el caso de estudio en base a la evaluación realizada con los resultados de la modelación física de 2013.

Los resultados del rebase por tramos del malecón proyectaron un peor escenario en cuanto al rebase específico en el tramo 2 de calle 12 a calle J, el valor más elevado en este tramo fue 0,177 m3/sm en el subtramo 7 cercano a calle G.

Los mayores rebases específicos en el resto de los tramos se presentaron en: tramo 3, subtramo 2, frente al Hotel Nacional: 0,196 m^3/sm; tramo 4, subtramo 3, entre las calles Perseverancia y Campanario: 0,246 m^3/sm; tramo 5, subtramo 1, entre las calles Crespo y Genios: 0,246 m^3/sm.

El rebase total obtenido fue de 957,85 m^3/s; los mayores rebases por tramos se dieron en el tramo 2 con 272,25 m^3/s, seguido del tramo 4 con 260,50 m^3/s, el 3 con 244,00 m^3/s y el 5 con 181,00 m^3/s.

El uso del XBeach NH presenta ventajas en su aplicación ante otros métodos fundamentado por el dinamismo del modelo y la reproducción de forma acertada de la hidrodinámica costera y la interacción del oleaje – estructura.

05 REFERENCIAS

Montero D.A. (2016). Determinación del Rebase del oleaje en el malecón Tradicional Habanero, mediante la aplicación del modelo Matemático SWASH. Cuba, 118 pp., Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. Cuba

Morejón M. B.I. (2020). Estudio del sobrepaso del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia del huracán Irma 2017 aplicando el modelo Delft3D. Cuba, 134 pp., Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. Cuba

Orta P. C. (2020). Estudio del fenómeno del rebase promedio del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia del huracán Wilma 2005 aplicando el modelo Delft 3D. Cuba, 116 pp., Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. Cuba

Roelvink J.A., McCall R., Masselink G., Poate T.G., Almeida L.P., Davidson M. and Russel P.E. (2014). “Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G”. Coastal Engineering, 91 (2014) 231-250. The Netherlands.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Luis Fermín Córdova López https://orcid.org/0000-0001-8175-6819

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

Daykelin León Arias https://orcid.org/0009-0002-3737-6362

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación y en la redacción final del informe.

Efecto de la porosidad y la permeabilidad en la estabilidad de taludes bajo el efecto de la lluvia

Isaida Flores Berenguer E-MAIL: isaidafb@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Odette Echemendía Nápoles E-MAIL: odetteechemendia@gmail.com
Instituto de Geografía Tropical

Odalys Jacobo Rodríguez E-MAIL: jacobodalys96@gmail.com
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Yoermes González Haramboure E-MAIL: yoermes@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Jenny García Tristá E-MAIL: jenny@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

RESUMEN

El deslizamiento de taludes constituye actualmente, una de las principales causas de falla de las presas en Cuba. Este fenómeno se origina a raíz de variadas situaciones, una de las más recurrentes es la acción de cargas externas sobre el talud, tales como la lluvia. El objetivo fundamental de esta investigación es realizar un análisis de la influencia de la lluvia en la estabilidad del talud aguas abajo de una presa de tierra homogénea, con 15 metros de altura de terraplén y drenaje a pie de talud. Se determinó una muestra de 10 suelos arcillosos no saturados para conformar el terraplén, y se aplicaron lluvias con 12 y 24 horas de duración, para períodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años. Se evalúa el comportamiento del factor de seguridad y del tiempo de falla. Además, se determina la influencia de la porosidad y la permeabilidad de los suelos en la estabilidad.

PALABRAS CLAVES: estabilidad de taludes; intensidad de lluvia; permeabilidad; porosidad; presas de tierra; suelos no saturados

Effect of porosity and permeability on slope stability under the effect of rainfall

ABSTRACT

The main goal of this research is to carry out an analysis of the influence of rainfall on the stability of the slope downstream of a homogeneous earth dam, with a 15-meter embankment height and drainage at the foot of the slope. A sample of 10 unsaturated clayey soils was determined to form the embankment, and rains were applied for 12 and 24 hours, for return periods of 5, 10, 25 and 50 years. The behavior of the safety factor and the failure time are evaluated. In addition, the influence of porosity and permeability of soils on stability is determined.

KEYWORDS: slope stability; rainfall intensity; permeability; porosity; earthen dams; unsaturated soils

CITMA CERTIFICADO

Septiembre 2023-RECIBIDO *APROBADO Octubre 2023*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

El deslizamiento de los taludes constituye una de las principales causas de falla de presas de tierra en el mundo. Debido a los efectos del cambio climático, los ciclos de lluvia han sufrido alteraciones, alargando los períodos secos, y modificando el régimen de lluvia en cuanto a frecuencia, duración e intensidad (Fonseca et al., 2020). Las variantes que pueden ocasionar un deslizamiento de talud son varias, sin embargo, en los últimos años, una de las más importantes e influyentes es la acción de la lluvia, causando, en su mayoría, fallas no catastróficas, pero sí costosas en su reparación, en el talud aguas debajo de las presas de tierra (Malla and Kumar, 2021)

El diseño de una presa de tierra comprende disímiles parámetros que abarcan desde el tipo de sección transversal, el nivel de agua máximo, el ancho de la corona, la pendiente de los taludes aguas arriba y aguas abajo, hasta el sistema de drenaje a utilizar. La forma en la que serán evacuadas las aguas del interior del terraplén afecta significativamente la permeabilidad y el grado de saturación del suelo, parámetros ambos fundamentales para el cálculo del factor de seguridad (FS) de los taludes al incluirse en el análisis la mecánica de suelos no saturados (Flores et al., 2019). El valor del FS expresa la magnitud en que puede reducirse la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie más desfavorable (Armas y Horta, 1987).

Debido a la infiltración de la lluvia, pueden ocurrir varios tipos de fallas de taludes, dependiendo de su morfología, las curvas características del suelo y la resistencia al corte involucrada. Se han revelado vínculos complicados entre las circunstancias de lluvia, la presión intersticial del agua, la resistencia del suelo, las variables de seguridad y las tasas de movimiento (Lee et al., 2021). Al infiltrarse, las precipitaciones son una de las principales causas de los deslizamientos de taludes que cobran la vida de muchas personas y provocan importantes pérdidas económicas en todo el mundo. El agua de lluvia que no logra infiltrarse en el suelo se convierte en escorrentía y fluye cuesta abajo. Ambos escenarios (infiltración de lluvia y escorrentía) contribuyen a la pérdida de succión en el suelo, lo que resulta en la falla del talud.

02 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS NO SATURADOS

Se denomina suelo no saturado, a aquellos en los cuales los vacíos están ocupados parcialmente por agua y aire (Tristá, 2015). En el presente estudio se tuvieron en cuenta características fundamentales de los suelos parcialmente saturados, tales como la succión matricial, conductividad hidráulica y contenido volumétrico de agua. Estas características fueron introducidas al modelo a partir de las curvas representativas de los suelos.

La succión matricial se define como la presión isotrópica ejercida por el agua de los poros para absorber más agua. Esta se determina como la diferencia de presiones entre el aire y el agua de los poros (Fredlund and Rahardjo, 1993). El contenido volumétrico de agua se interpreta como el porciento de agua presente en una muestra de suelo, pudiéndose expresar en términos gravimétricos o volumétricos (Fredlund and Rahardjo, 1993). En términos del contenido de agua, es importante destacar que la capacidad de almacenamiento es función del índice de poros del suelo y del grado de saturación; de la lluvia que se precipita sobre la superficie del terreno, una parte importante se infiltra en el suelo, dando inicio al llenado de los poros vacíos entre las partículas del suelo.

CURVA CARACTERÍSTICA Y DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LOS SUELOS NO SATURADOS

En la presente investigación se determinó la curva característica de los suelos empleando el método de Aubertin (2003). Este método predice la función de contenido volumétrico de agua utilizando propiedades básicas del material, tales como la granulométrica de los suelos, se desarrolla considerando el tamaño, la forma de las partículas y la porosidad propias del material.

Para obtener el grado de saturación se relacionan dos componentes fundamentales del suelo, el primero tiene en cuenta las fuerzas capilares que existen a presiones intersticiales negativas relativamente pequeñas y el segundo, considera que la cantidad de agua es principalmente una función de la adhesión. El grado de saturación determinado en base a los componentes capilar y adhesivo se muestra en la ecuación 1.

$$\boldsymbol{S_r = S_c + S_a^* \times (1 - S_c)} \qquad (1)$$

Dónde S_r es el grado de saturación, S_c es el grado de saturación debido a las fuerzas capilares y S_a^* es el grado acotado de saturación debido a la adhesión (S_a), calculado según la ecuación 2.

$$\boldsymbol{S_a^* = (1 - S_a) + 1} \qquad (2)$$

El componente adhesivo es un valor acotado, ya que es posible que a bajas succiones el valor de S_a sea mayor que 1; por lo que el valor acotado asegura que, si $S_a \geq 1 \therefore S_a^* = 1$ y si $S_a < 1 \therefore S_a^* = S_a$.

El componente adhesivo está asociado con una película delgada de agua que cubre la superficie del grano y depende de las propiedades básicas del material, como son: la presión negativa del agua intersticial en el suelo, el tamaño de las partículas, el coeficiente de forma y la porosidad, siendo determinado por la ecuación 3.

$$S_a = aC_\psi \frac{\left(\frac{h_{co}}{\psi_n}\right)^{\frac{2}{3}}}{e^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\psi}{\psi_n}\right)^{\frac{1}{6}}} \qquad (3)$$

Dónde a es el parámetro de ajuste de la curva, considerado como constante 7×10^{-4} para suelos cohesivos, ψ es la succión, ψ_n es el término de la succión introducido para asegurar un componente adimensional, e es la relación de vacíos del suelo y h_{co} es la elevación capilar media (cm) determinada para suelos capilares, obtenida mediante la ecuación 4 o la ecuación 5, según los datos de los que se disponga.

$$\boldsymbol{h_{co} = \frac{b}{e * D_{10}}} \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{h_{co} = \frac{\xi * (LL)^{1.75}}{e}} \qquad (5)$$

Siendo D_{10} (cm) el diámetro efectivo correspondiente al 10% de la curva granulométrica, LL es el Límite Líquido (%), y ξ es una constante igual a 402,2 cm^2. Para obtener el parámetro asociado al coeficiente de uniformidad para suelos granulares (b), se emplea la ecuación 6.

$$\boldsymbol{b = \frac{0.75}{1.17 * log C_u + 1}} \qquad (6)$$

Donde C_u es el coeficiente de uniformidad (adimensional) y C_ψ es el coeficiente de corrección que permite disminuir el contenido de agua para succiones altas, basado en el propuesto por Fredlund et al. (1994) obtenido mediante la ecuación 7.

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln(1+\frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1+\frac{\psi_0}{\psi_r})} \qquad (7)$$

Siendo ψ_0 la succión inicial, considerada igual a 10^{-7} cm, expresada en términos de columna de agua y ψ_r la succión correspondiente al contenido de agua residual en cuyo punto un aumento en la succión no eliminará más agua del suelo, y está dado por la ecuación 8.

$$\boldsymbol{\psi_r = 0.86\left(\frac{\xi}{e}\right)^{1.2} * LL^{1.74}} \qquad (8)$$

Este método es uno de los que se encuentra disponible para implementar en el GeoStudio (2018), paquete integral de herramientas informáticas diseñado para modelar la estabilidad de pendientes, la deformación del suelo y la transferencia de calor y masa en suelo y roca. Este es el único método disponible en el programa que depende de los parámetros de la curva granulométrica de los suelos para obtener el contenido de agua volumétrico y la succión de los mismos.

Con respecto a la curva de conductividad hidráulica, a diferencia de un suelo saturado, el cual mantiene una conductividad hidráulica constante; en un suelo no saturado, la conductividad hidráulica es variable, y depende del contenido de agua o estado de succiones que exista en el suelo (Mendoza, 2018). En términos del contenido de agua es importante destacar que la capacidad de almacenamiento es función del índice de poros del suelo y del grado de saturación (Fredlund and Rahardjo, 1993). La función de conductividad hidráulica correspondiente al modelo de Fredlund et al. (1994) se muestra en la ecuación 9.

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{ln\psi}^{b} \frac{\theta(e^y)-\theta(\psi)}{e^y}\theta'(e^y)dy}{\int_{ln\psi_{aev}}^{b} \frac{\theta(e^y)-\theta_s}{e^y}\theta'(e^y)dy} \qquad (9)$$

Donde $k_r(\psi)$ es la función de conductividad hidráulica respecto a la succión, b es el límite superior de integración, considerado como $ln(1\ 000\ 000)$, ψ es la succión del suelo, e es el número natural de Euler (2,71828), y es una variable ficticia de integración que representa el logaritmo de la succión, θ' es la derivada del modelo que ajusta la curva característica del suelo, $\theta(\psi)$ es la curva característica del suelo, ψ_{aev} es el valor de entrada de aire al suelo y θ_s es el contenido volumétrico de agua del suelo.

03 ESTABILIDAD DE TALUDES EMPLEANDO EL MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

En los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), se evalúa el talud en su estado de falla a partir del análisis de dos ecuaciones generales que rigen el FS. Los elementos de la estática, empleados para determinarlo son: la sumatoria de fuerzas horizontales y verticales, y la sumatoria de momentos. Estos requerimientos complican la solución del método convirtiéndolo en un problema indeterminado (Morgenstern and Price, 1965). La geometría, en conjunto con el criterio de falla, y asumir la dirección y magnitud de las fuerzas entre dovelas, son requerimientos para que el MEL se convierta en un problema determinado. En términos generales, el análisis de estabilidad de taludes con el MEL consiste en dividir la masa del suelo en dovelas delimitadas por la superficie de falla y la superficie del terreno, como se muestra en la figura 1.

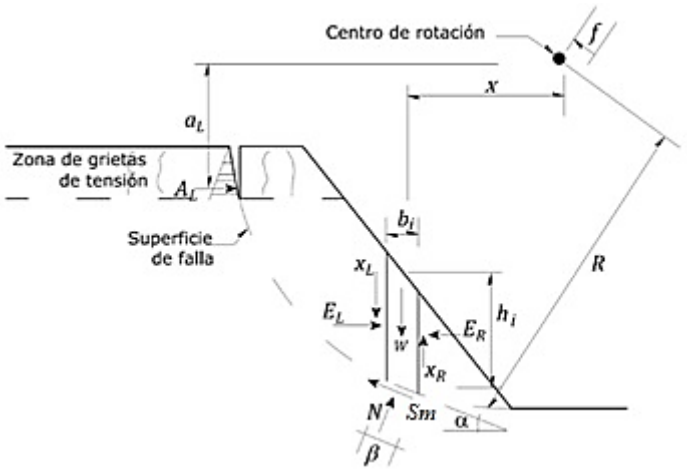

Figura 1. Fuerzas actuantes en una dovela con superficie de falla circular (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Donde W es el peso total de una dovela de ancho b y altura h, N es la fuerza normal total sobre la base de la dovela, S_m es la fuerza cortante en la base de la dovela, E es la fuerza horizontal normal entre dovelas (los subíndices *L* y *R* designan el lado izquierdo o derecho de la dovela), X es la fuerza cortante entre dovelas (*L* y *R* designan el lado izquierdo o derecho de la dovela), R es el radio de la superficie circular de falla asociada con la fuerza cortante S_m, f es la distancia perpendicular de la fuerza normal desde centro de rotación, x es la distancia horizontal del centro de cada dovela al centro de rotación, h_i es la distancia vertical del centro de la base de cada dovela a la superficie del terreno, α es el ángulo entre la tangente al centro de la base de cada dovela y la horizontal (cuando el ángulo se inclina en la misma dirección de la geometría del talud, α es positivo y viceversa), A es la resultante de la fuerza externa que produce el agua, a es la distancia perpendicular de la resultante de la fuerza del agua al centro de rotación o al centro de momentos y β es la longitud de la base de la dovela.

Según Fredlund and Rahardjo (1993) la fuerza cortante que actúa en la base de cada dovela se escribe a partir de la resistencia al corte para un suelo no saturado como se muestra en la ecuación 10.

$$S_m = \frac{\beta}{FS}(c' + (\sigma_n - u_a)tan\,\phi' + (u_a - u_w)tan\phi^b) \quad (10)$$

Donde σ_n es la tensión normal en el centro de la base de una dovela. La fuerza normal en la base de la dovela se determina por la sumatoria de fuerzas en la dirección vertical como se muestra en la ecuación 11.

$$N = \frac{W-(X_R-X_L)-\frac{\left[c'\beta sen\alpha+u_a\beta sen\alpha\left(tan\phi'-tan\phi^b\right)+u_w\beta sen\alpha tan\phi^b\right]}{FS}}{cos\alpha+\frac{sen\alpha tan\phi'}{FS}} \quad (11)$$

Para obtener el factor de seguridad se tiene una ecuación de momento (12) y una ecuación de fuerzas (13).

$$FS_m = \frac{\sum\left(c'\beta R+\left[N-u_w\beta\frac{tan\phi^b}{tan\phi'}-u_a\beta\left[1-\frac{tan\phi^b}{tan\phi'}\right]\right]Rtan\phi\right)}{A_La_L+\sum Wx-\sum Nf} \quad (12)$$

$$FS_f = \frac{\sum\left(c'\beta cos\alpha + \left[N - u_w\beta\frac{tan\phi^b}{tan\phi'} - u_a\beta\left[1-\frac{tan\phi^b}{tan\phi'}\right]\right]tan\phi cos\alpha\right)}{A_L + \sum Nsen\alpha} \qquad (13)$$

Donde ω es el ángulo de la carga puntual desde la horizontal. La interacción entre dovelas puede considerarse a partir de la ecuación 14.

$$E_R = E_L + (W - (X_R - X_L)tan\alpha - \frac{S_m}{cos\alpha} \qquad (14)$$

Asimismo, esta ecuación plantea que la fuerza cortante (X) se relaciona con la fuerza normal (E) a partir de la función planteada por Morgenstern & Price (1965), y que se muestra en la ecuación 15.

$$X = \lambda f(x)E \qquad (15)$$

Dónde $f(x)$ es la función que describe la forma en cómo varía la relación X/E a lo largo de la superficie de deslizamiento y λ es una constante que representa el porcentaje de la función, $f(x)$, usada para resolver las ecuaciones del factor de seguridad.

El método planteado por Morgenstern and Price (1965) satisface las condiciones de equilibrio de fuerzas y de momentos en cada dovela y presenta una alta flexibilidad para considerar la función que describe la fuerza interdovelas.

04 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

La geometría del modelo se definió a partir de un análisis de todas las presas existentes en Cuba. De las 242 presas de tierra construidas, 157 son homogéneas, de las que el 39,5% tiene hasta 15 metros de altura de cortina. La geometría del modelo numérico, a partir de las características de este tipo de presa, se muestra en la figura 2.

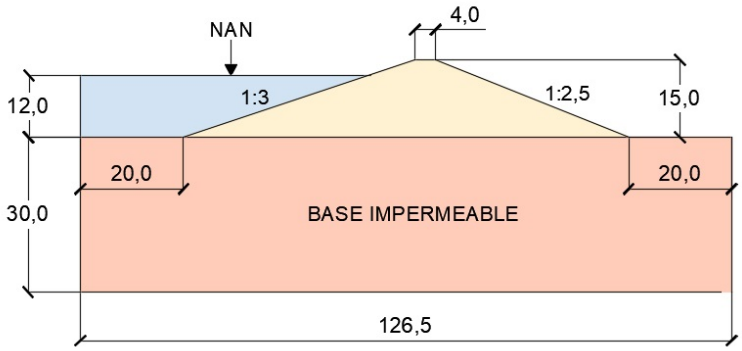

Figura 2. Geometría definida para el modelo numérico (valores en metros).

Para definir los materiales que conformarán los terraplenes de las presas de tierra se seleccionaron 10 suelos arcillosos con clasificación de arcilla de alta o baja compresibilidad (SUCS) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). En todos los suelos se consideró una relación de anisotropía de $\frac{kx}{ky} = 0{,}083$. Las propiedades físico-mecánicas empleadas en la modelación se muestran en la tabla 1 y las curvas granulométricas de los suelos se muestran en la figura 3.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas de los suelos del terraplén.

No. Suelo	m_v (kPa^{-1})	CVA (adim.)	LL (%)	k_x (m/s)	e (adim.)	γ (kN/m^3)	C´ (kPa)	Φ´ (°)
1	5,61E-05	0,421	57	1,50E-07	0,726	18,3	30,9	13,5
2	1,05E-04	0,428	47	1,10E-07	0,749	18,8	56,8	13,4
3	5,06E-05	0,406	38	6,60E-08	0,683	18,9	18,6	13,2
4	9,34E-05	0,391	72	1,50E-07	0,642	17,9	29,8	17,6
5	7,42E-05	0,439	60	8,70E-08	0,783	19,2	42,1	15,4
6	6,64E-05	0,503	39	4,70E-07	1,013	18,8	32	21,3
7	6,52E-05	0,455	39	1,70E-07	0,836	19	22,1	14,3
8	8,88E-05	0,496	56	1,20E-06	0,984	18	43,7	13,2
9	1,42E-04	0,426	56	6,00E-07	0,741	17,3	40,6	14,9
10	6,36E-05	0,425	57	1,80E-07	0,739	18,5	57,5	27,1

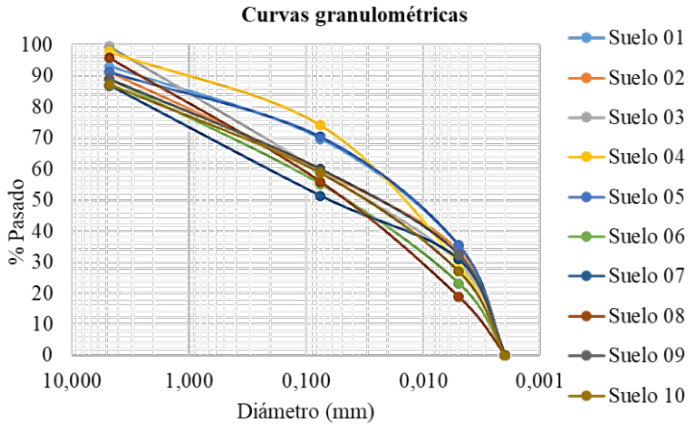

Figura 3. Curvas granulométricas de los suelos del terraplén.

En la figura 4 se muestran las curvas características empleando el modelo de Aubertin et al. (2003) y las curvas de conductividad hidráulicas correspondientes, mediante el método de Fredlund et al. (1994).

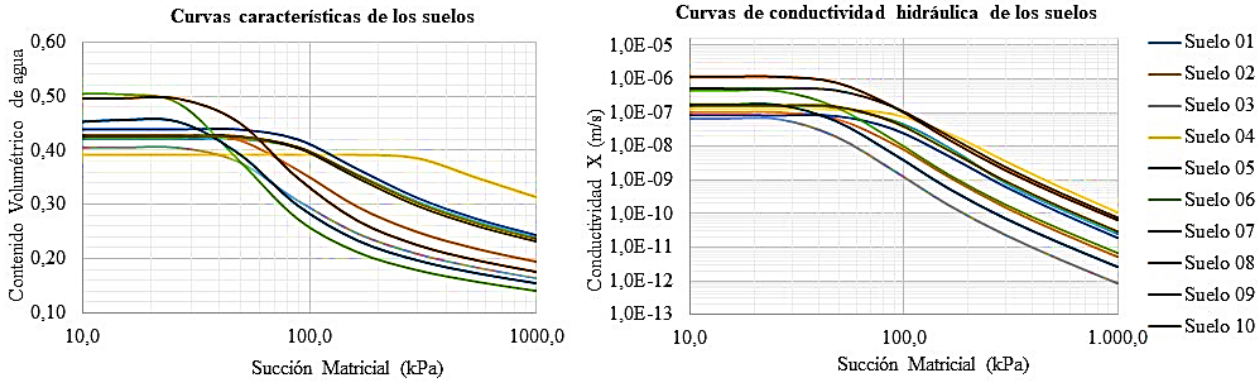

Figura 4. Curvas características y de conductividad hidráulica de los suelos del terraplén.

Para la determinación de las intensidades de lluvia a emplear, se tomó como referente el estudio realizado por Barcia y León (2013), donde se exponen las curvas de intensidad-frecuencia-duración (IFD) de la lluvia para la localidad de Cienfuegos, determinadas a partir de datos pluviométricos medidos en el período 2001-2010, para una duración máxima de 24 horas, a partir de las cuales se seleccionaron las intensidades correspondientes a 5, 10, 25 y 50 años de período de retorno. Estas

intensidades de lluvia fueron afectadas por el coeficiente de infiltración propuesto por Schosinsky (2007), que para las condiciones de los taludes aguas abajo de las presas de tierra en Cuba se estimó en 27%. En la tabla 2 se muestra la velocidad de infiltración de la lluvia correspondiente a la intensidad y los períodos de retorno establecidos.

Tabla 2. Lluvia infiltrada, establecida a partir de la intensidad y del coeficiente de infiltración correspondiente.

Lluvia infiltrada (m/s)		
Período de retorno (años)	Duración (h)	
	12	24
5	7,3 E-07	4,5 E-07
10	8,9 E-07	5,6 E-07
25	1,1 E-06	7,1 E-07
50	1,2 E-06	8,2 E-07

05 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Una vez definidas las variantes que intervienen en el proceso de modelación, se construyó un modelo numérico con el programa GeoStudio (2018). Inicialmente, se realizó la modelación del flujo de filtración estacionario, sin lluvia, para establecer la posición de la línea de corriente superior y la superficie drenante en el talud aguas abajo. Luego, se impuso la condición de infiltración de la lluvia sobre la superficie del talud aguas abajo, exceptuando la sección del mismo en la que ocurre el drenaje del flujo de filtración. Todo ello se muestra en la figura 5.

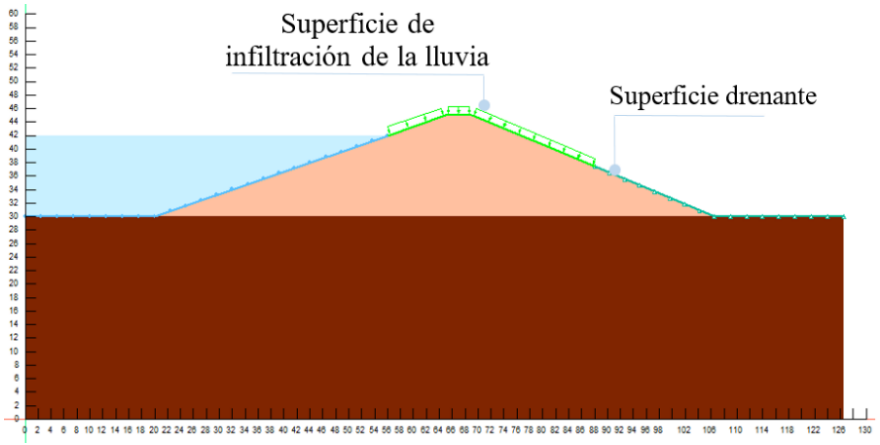

Figura 5. Modelo numérico resultante con la aplicación de la superficie de infiltración de la lluvia y la superficie drenante.

Se realiza un análisis del avance del frente de saturación correspondiente al efecto de la lluvia en la LCS de los terraplenes, para los 10 suelos estudiados en las diversas condiciones planteadas. El resultado correspondiente a los períodos de retorno de 5 años (menor) y 50 años (mayor), tomado como ejemplo el suelo 10, se muestran en la figura 6.

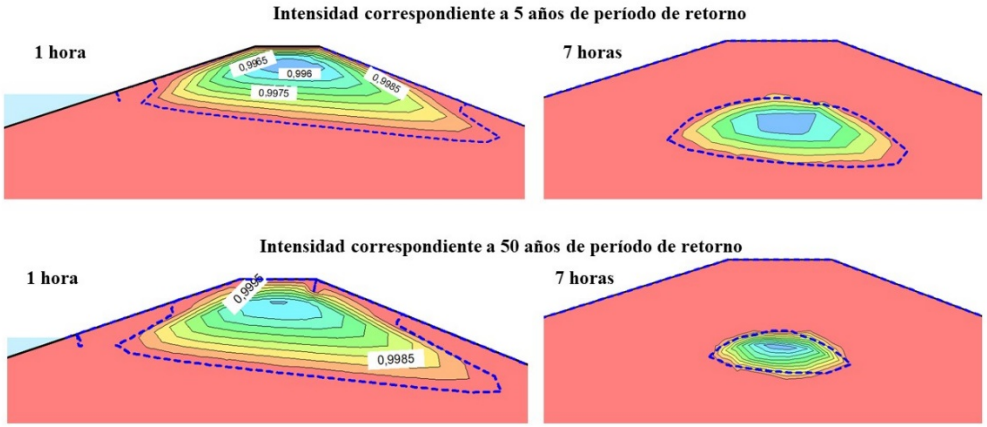

Figura 6. Avance del frente de saturación para el suelo 10, entre las horas 1 y 7 de lluvia para 5 y 50 años de período de retorno.

En la figura 6 se puede observar que el frente de filtración en la primera hora de lluvia se comporta prácticamente igual para ambos períodos de retorno. Sin embargo, una vez transcurridas siete horas, el área saturada (indicada en color naranja en la figura 6) resulta cada vez mayor. Esto ocurre debido a que los mayores períodos de retorno se asocian con las mayores intensidades de lluvia, lo que provoca que al suelo se infiltre una mayor cantidad de agua en un menor período de tiempo independientemente del tipo de suelo.

Luego, se analiza el comportamiento del FS en función del tiempo para los 10 suelos definidos y las intensidades de lluvia correspondientes a los 5, 10, 25 y 50 años de período de retorno para 12 y 24 horas. Estos resultados se muestran en las figuras 7 y 8.

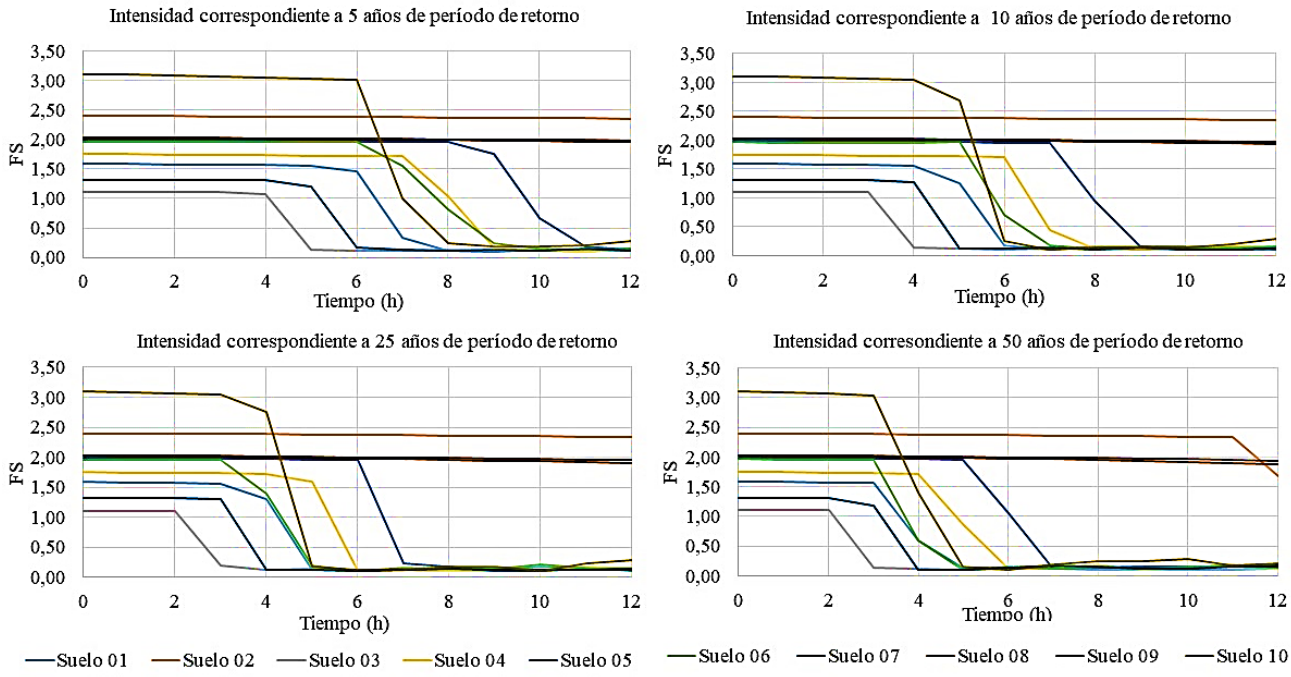

Figura 7. Comportamiento del FS para 12 horas de duración de la lluvia.

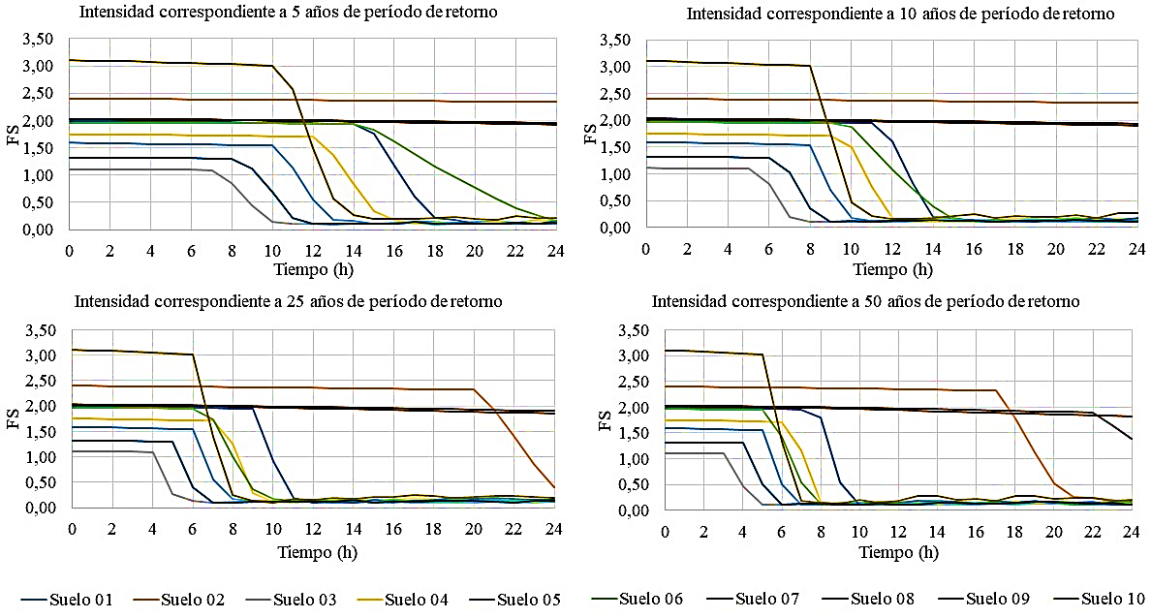

Figura 8. Comportamiento del FS para 24 horas de duración de la lluvia.

Como se puede observar en las figuras 7 y 8, en la medida que los períodos de retorno son mayores, o sea, las intensidades de lluvia aumentan, el tiempo que tarda en desencadenarse la falla disminuye para todos los suelos estudiados. Se aprecia además que, en las menores intensidades de lluvia, que corresponden con los menores períodos de retorno, la falla no ocurre en todos los suelos, como es el caso de los suelos 2, 8 y 9. Sin embargo, a medida que aumenta la intensidad, se producen las fallas de forma gradual en todos los suelos. De manera general, queda demostrado que las menores intensidades de lluvia que se sostienen durante un mayor período de tiempo, son más peligrosas para la estabilidad de taludes en una presa de 15 metros de altura con las características de la estudiada en la presente investigación.

Llegados a este punto, resulta necesario analizar los parámetros del suelo que pueden provocar la divergencia en los tiempos de ocurrencia de las fallas. Para ello, se evalúa la relación entre el índice de poros y permeabilidad para todos los suelos estudiados y las intensidades y tiempos de duración de la lluvia. Los resultados correspondientes a 24 horas de duración de la lluvia se muestran en las figuras 9 y 10.

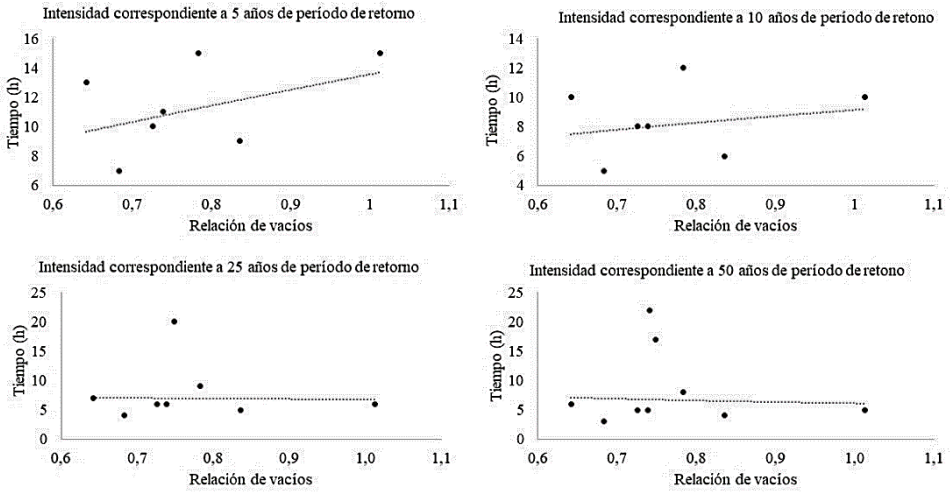

Figura 9. Relación entre el tiempo de falla y la relación de vacíos para 24 horas de duración de la lluvia.

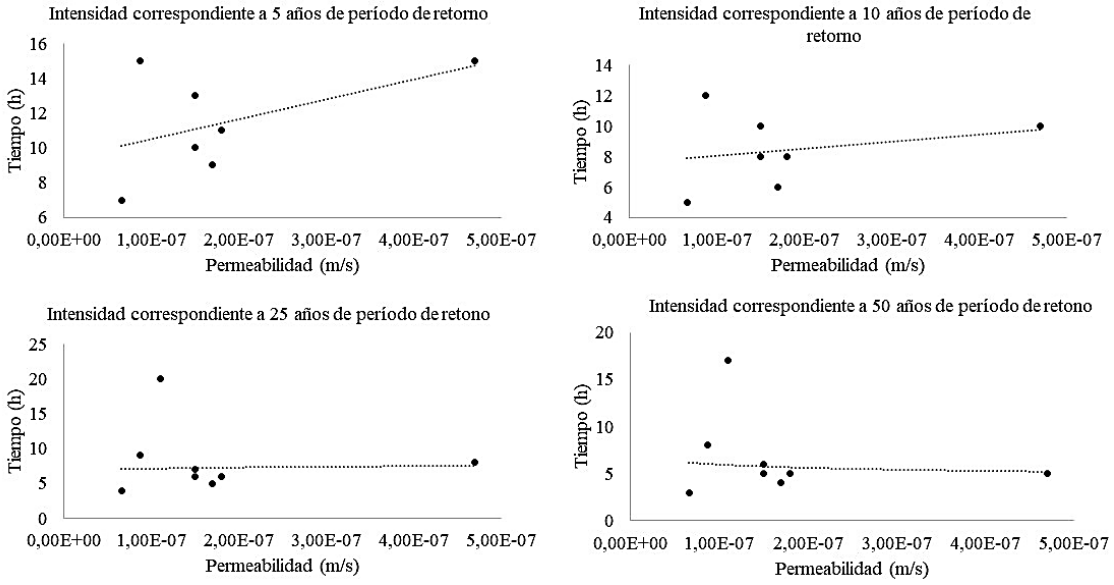

Figura 10. Relación entre el tiempo de falla y la permeabilidad para 24 horas de duración de la lluvia.

En la figura 9 se observa que, para bajas intensidades de lluvia, la relación de vacíos y el tiempo de falla tienen una relación directamente proporcional. En la medida que la intensidad de la lluvia aumenta, la influencia de la relación de vacíos en el tiempo de ocurrencia de la falla va disminuyendo, hasta convertirse en una relación inversamente proporcional. En cuanto a la permeabilidad, (figura 10), esta sigue el mismo comportamiento respecto al tiempo de falla, que el observado en la relación de vacíos. A mayor intensidad de la lluvia, menos influencia ejerce la relación de vacíos y la permeabilidad en la ocurrencia de la falla.

Los resultados correspondientes a 12 horas de duración de la lluvia mostraron la misma tendencia en el comportamiento. La única distinción respecto a la duración de 24 horas es que, para las intensidades correspondientes a los períodos de retorno menores, la relación directamente proporcional que se establece es mucho menos manifiesta. Este comportamiento se ajusta con los resultados previos que se presentaron en la presente investigación, que relacionan una mayor rapidez en la ocurrencia de la falla para mayores intensidades de lluvia durante menores períodos de tiempo.

06 CONCLUSIONES

En todos los modelos analizados se pudo observar que, para las lluvias de menor intensidad, pero larga duración (24 horas) los parámetros del suelo como índice de poros y permeabilidad son determinantes en la ocurrencia de la falla para los casos de las lluvias con menor período de retorno (5 y 10 años). Mientras que, para períodos de retornos mayores (25 y 50 años) los parámetros: índice de poros y permeabilidad se comportan de forma inversamente proporcional al tiempo de ocurrencia de la falla. Para las lluvias de menor tiempo de duración (12 horas) y mayores intensidades, se mantiene el mismo comportamiento, pero de manera mucho menos manifiesta que para la duración de 24 horas.

Se observa que, aunque los valores de los parámetros de resistencia a cortante son determinantes para el FS inicial del talud, estos no influyen en la forma ni el tiempo en el que ocurre la falla bajo el efecto de la lluvia, demostrando que la permeabilidad, el índice de poros del suelo y la intensidad de la lluvia son los que priman en el momento de ocurrencia de la falla, independientemente de los

restantes parámetros físico-mecánicos del suelo.

07 REFERENCIAS

Armas R. y Horta E. (1987). Presas de Tierra (P. R. Fonte (ed.)). Editorial ISPJAE. ISBN 978-959-07-1141-1, La Habana, Cuba.

Aubertin M., Mbonimpa M., Bussière B. and Chapuis R. P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. Canadian Geotechnical Journal, 1122, 1104–1122. https://doi.org/10.1139/T03-054. ISSN: 1208-6010. Canadá

Barcia I. y León O. (2013). Determinación de la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia de Cienfuegos. Revista Cubana de Meteorología, Vol.19, No1, 2013, 11. ISSN: 0864-151X. Cuba

Flores I., Castro I., Tristá J. G. y Haramboure Y. G. (2019). Influencia de la permeabilidad del suelo no saturado en los taludes de presas de tierra. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XL(3), 86–100. ISSN: 2788-6050. Cuba

Fonseca C., Alpizar M., Hernández D., González I., Cutié V., Valderá N., Barcia S., Martínez M., Gil L., Vazquez R., Rodríguez R. M., Velázquez B. y Pérez R. (2020). Estado del Clima en Cuba 2019. Resumen ampliado. Revista Cubana de Meteorología, 26(4). ISSN: 0864-151X. Cuba

Fredlund D. G. and Rahardjo H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons. Online ISBN:9780470172759. DOI:10.1002/9780470172759. Canadá.

Fredlund D. G., Xing A. and Huang S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31(3), 521–532. https://doi.org/10.1139/t94-062. ISSN: 1208-6010. Canadá

Lee W.-L., Martinelli M. and Shieh C.-L. (2021). An Investigation of Rainfall-Induced Landslides From the Pre-Failure Stage to the Post-Failure Stage Using the Material Point Method. Front. Earth Sci. Sec. Geohazards and Georisks. https://doi.org/10.3389/feart.2021.764393. ISSN: 2296-6463

Malla B. and Kumar B. (2021). Effect of rainfall on stability of anisotropic soil slope. Proceedings of 10th IOE Graduate Conference, 10, 1097–1102.ISSN: 2350-8914. Nepal

Mendoza J. A. (2018). "Influencia de las propiedades no saturadas del suelo en los análisis numéricos de flujo de agua y estabilidad de taludes". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de https://repositorio.unam.mx/contenidos/86229

Morgenstern N. R. and Price V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique, 15(1), 79–93. ISSN: 0016-8505**.**

Schosinsky N. G. (2007). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central, 34–35, 13–30. https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223. ISSN: 2215-261X. Costa Rica

Tristá J. G. (2015). Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas; Instituto Superior Politécnico ¨José Antonio Echeverría¨. Tesis de Doctorado. Cuba

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Isaida Flores Berenguer https://orcid.org/0000-0001-8492-0928
Realizó el análisis hidráulico de los casos de estudio. Participó en la búsqueda de información, la caracterización de los suelos considerados en el estudio, el análisis de resultados de la modelación computacional y la revisión del documento final.

Odette Echemendía Nápoles https://orcid.org/0009-0001-2455-5233
Realizó el análisis hidráulico de los casos de estudio. Participó en el análisis de resultados de la modelación computacional y la redacción del trabajo.

Odalys Jacobo Rodríguez https://orcid.org/0000-0001-9608-0815
Participó en la búsqueda de información, la caracterización de los suelos considerados en el estudio, el análisis de resultados de la modelación computacional y la revisión del documento final.

Yoermes González Haramboure https://orcid.org/0000-0001-8613-6264
Participó en el análisis hidráulico de los casos de estudio. Participó en la búsqueda de información, así como en el análisis de resultados y la redacción del trabajo. Además, en la revisión del documento final.

Jenny García Tristá https://orcid.org/0000-0003-3072-8011
Participó en el procesamiento de los datos de suelos, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación, en la búsqueda de información y en la revisión del documento final.

Impactos de la sequía hidráulica en el agroecosistema Valle de Caujerí, periodo 2018-2021

Esvillel Ferrer Pozo E-MAIL: esvillel@gmail.com
Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos Guantánamo.

Liliana María Gómez Luna E-MAIL: lilianag@uo.edu.cu
Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado. Universidad de Oriente.

Yudith González Díaz
Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Química y Agronomía.

RESUMEN

En los últimos 30 años, los eventos de sequía hidráulica en Guantánamo se han intensificado de manera que han afectado los recursos hídricos disponibles, interfiriendo de manera brusca en el desarrollo de las principales actividades. El objetivo de la presente investigación es evaluar los impactos de la sequía hidráulica en el "Valle de Caujerí" mediante la aplicación de un índice sintético. Se analizó una serie temporal de cuatro años para caracterizar los eventos de sequía hidráulica con categorías de leves, moderadas, intensas y muy intensas, a partir de la aplicación de un novedoso Índice de sequía hidráulica, que corroboró la conveniencia y funcionalidad del mismo. Además, demostró que desde el 2018 hasta el 2021 el área de estudio sufre los efectos de una sequía persistente con daños considerables.

PALABRAS CLAVES: agroecosistema, índice de sequía hidráulica (ISHdr), sequía hidráulica.

Impacts of hydraulic drought on the Caujerí Valley agroecosystem, period 2018-2021

ABSTRACT

In the last 30 years, the events of hydraulic drought in Guantánamo have intensified in such a way that they have affected the available water resources, abruptly interfering in the development of the main activities. The objective of this research is to evaluate the impacts of hydraulic drought in the "Caujerí Valley" by applying a synthetic index. A four-year time series was analyzed to characterize hydraulic drought events with categories of mild, moderate, intense and very intense, based on the application of an innovative hydraulic drought index, which corroborated its suitability and functionality. In addition, it demonstrated that from 2018 to 2021 the study area suffers the effects of a persistent drought with considerable damage.

KEYWORDS: agroecosystem, hydraulic drought index (ISHdr), hydraulic drought.

CITMA CERTIFICADO

Octubre 2023-RECIBIDO *APROBADO-Diciembre 2023*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

La amenaza del cambio climático a nivel global ha causado preocupación entre los científicos, ya que los factores climáticos indispensables para el desarrollo, como son la precipitación y la temperatura, se verán severamente afectados (Nicholls y Altieri, 2010). Estos impactos ya son perceptibles, fundamentalmente en los países del trópico, donde también se espera una extensión de las sequias que producirá un aumento en la escasez de agua y por consiguiente daños en las producciones agropecuarias.

Uno de los efectos derivados del cambio climático es el aumento de la sequía, que puede ser de diferentes tipos: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica (Valiente 2001), contándose en la actualidad un quinto tipo de sequía: la hidráulica. Todas representan un peligro por su significado, extensión, manifestación lenta y progresiva e impacto, de ahí la necesidad creciente de emplear herramientas para lograr su monitoreo y control.

Cuba enfatiza la gestión de riesgos hacia las sequías meteorológica y agrícola con el fin de fortalecer la capacidad de respuesta ante este tipo de amenaza, teniendo en cuenta las afectaciones provocadas a la economía y la sociedad (Varela et al. 2019) y para ello se han adoptado modelos de gestión diferenciados, dejando aún niveles de incertidumbre en las afectaciones de la seguía hidráulica en esferas de la economía como la industria y la agricultura.

En Guantánamo se ha venido analizando y diagnosticando a partir de la aplicación de diferentes índices existentes, las sequías meteorológica, agrícola e hidrológica, con los cuales se identifican las zonas afectadas, y se realizan acciones operativas para suplir el déficit (Gutiérrez et al. 2020). Sin embargo, los efectos de la sequía hidráulica en esta provincia con el trascurso del tiempo se han hecho más severos y se han afectado los recursos hídricos disponibles en embalses y acuíferos (INRH 2020). Esto hace indispensable controlar la disponibilidad de agua en sistemas de recursos hidráulicos, para determinar las pautas de actuación para corregirla.

El objetivo de la presente investigación consiste en evaluar los impactos de la sequía hidráulica en el agroecosistema "Valle de Caujerí" del municipio San Antonio del Sur en el periodo 2018 – 2021, mediante la aplicación de un índice sintético.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en los límites del agroecosistema “Valle de Caujerí” ubicado en el extremo más oriental de Cuba, en la provincia Guantánamo, específicamente entre los 20° 7' 15" y 20° 15' 16" de latitud norte y los 74° 31' 15" y 74° 43' 30" de longitud oeste (figura 1).

Ocupa un área aproximada de 173,3 km², un perímetro de 95,50 km y una altitud promedio de 408 m sobre el nivel medio del mar (msnm). Se ubica en la vertiente sur del parteaguas central de la Región Oriental, entre las estribaciones de dos grupos montañosos: por el norte - noreste se halla la Sierra del Purial y prolongaciones de la Sierra de Imías, y por el oeste, la Sierra de Caujerí y prolongaciones de la Sierra de Mariana.

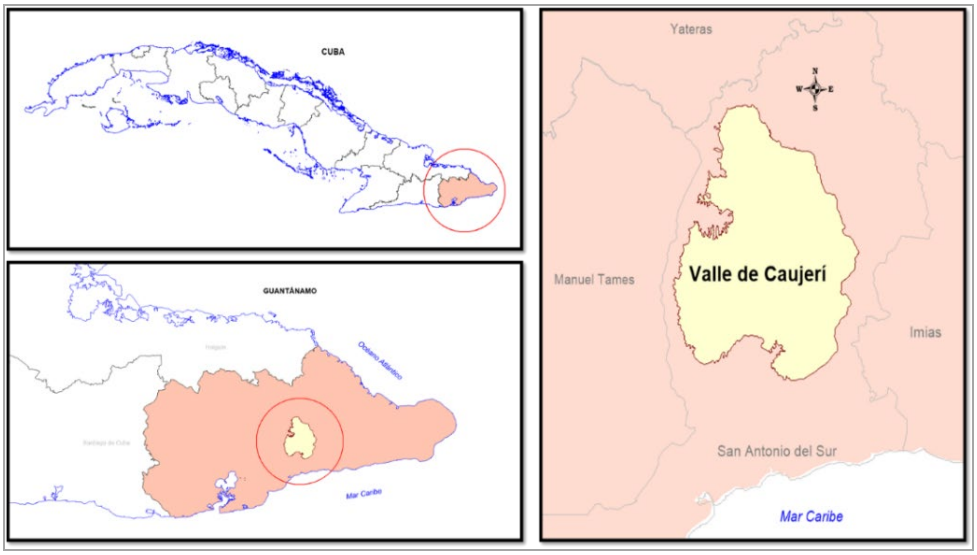

Figura 1. Esquema de localización del área de estudio. Fuente: elaborado por los autores, 2023.

SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA HIDRÁULICA

Para la evaluación de los impactos de la sequía hidráulica se emplea el Índice de Sequía Hidráulica (ISHdr) diseñado por Ferrer et al. (2015). Esta herramienta puede ser aplicada tanto a nivel de cuencas hidrográficas como de municipios. Su implementación ha demostrado una capacidad operativa elevada, en función de sus requerimientos de datos disponibles, además de su sencillez y rapidez de cálculo.

APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEQUÍA HIDRÁULICA ISHDR.

El ISHdr es un algoritmo que permite evaluar la sequía hidráulica de los sistemas de los recursos hidráulicos a partir del monitoreo y seguimiento del comportamiento de indicadores climáticos y físicos, hasta lograr una clasificación adecuada de sequía hidráulica. Establece criterios para determinar cuándo una sequía o un período seco se inicia y termina. Para su evaluación emplea indicadores ambientales seleccionados los cuales incluyen: la precipitación, los factores geológicos, la cobertura forestal, los niveles de los caudales de corrientes superficiales, los niveles de agua subterránea, los niveles de los embalses y la relación demanda disponibilidad.

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SEQUÍA HIDRÁULICA ISHDR.

El cálculo del ISHdr se realiza a partir de una fórmula que plantea la sumatoria de los pesos relativos de cada indicador, multiplicado por el valor ponderado según escala de puntuación para medir el grado o magnitud del comportamiento del indicador, y responde a (ecuación 1):

$$ISHdr = \sum_{i}^{n} Pi * Ei \qquad (1)$$

Donde: i: indicador del 1 al 7, P_i: peso relativo de cada indicador, E_i: escala de puntuación para medir el grado o magnitud del comportamiento del indicador.

Cada indicador posee un valor que mantiene una relación con el efecto o grado de influencia en el comportamiento de la sequía hidráulica, como se muestra en la tabla 1. Para la asignación y jerarquización de pesos relativos para cada indicador se utilizó la opinión de expertos mediante el método Delphi, método que resulta muy conveniente cuando no existe posibilidad de que los

participantes acudan de conjunto a una sesión de trabajo o cuando resulta conveniente limitar al mínimo la interrelación entre los participantes de la sesión.

Tabla 1. Criterios o indicadores a considerar en la sequía hidráulica y pesos relativos.

No.	SIGLA	Indicador	Pesos relativos (método Delphi)
1	(FC)	Factores climáticos (lluvias)	0,16
2	(FG)	Factores geológicos	0,13
3	(NC)	Nivel del cauce de las corrientes superficiales de agua	0,13
4	(NA)	Nivel de las aguas subterráneas	0,15
5	(VE)	Volumen de los embalses	0,17
6	(CF)	Cobertura forestal	0,12
7	(DD)	Relación demanda-disponibilidad	0,14

Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

Sustituyendo en la ecuación (1) i y P_i se tiene (ecuación 2):

$$\mathrm{ISHdr} = 0{,}16 * \mathrm{FC} + 0{,}13 * \mathrm{F} \quad + 0{,}13 * \mathrm{NC} + 0{,}15 * \mathrm{NAS} + 0{,}17 * \mathrm{VE} + 0{,}12 * \mathrm{CF} + 0{,}14 * \mathrm{DD} \quad (2)$$

La flexibilidad del índice seleccionado en materia de escala temporal, permitirá evaluar y determinar sus relaciones con otras variables hidrológicas de modo que se puedan definir criterios de activación de fases de sequía apropiados. Los valores del ISHdr oscilan entre uno y diez, siendo más favorables los resultados mientras más cercanos estén a la unidad.

CLASIFICACIONES DE LA SEQUÍA HIDRÁULICA A PARTIR DEL ISHDR

La clasificación empleada se basa en cuatro categorías en orden ascendente y una escala de colores para la salida cartográfica del estado de la sequía hidráulica. El rango de valores del ISHdr se estableció basado en una escala de intervalos iguales, la que además de poseer la equivalencia de categorías y el ordenamiento interno entre ellas (Ferrer et al. 2015), tienen la característica de que la distancia entre sus intervalos está claramente determinada y que éstos son iguales entre sí.

Tabla 2. Clasificación de la sequía hidráulica.

Clase	Rango de valores del ISHdr	Clasificación	Categoría	Escala de colores
1	0 < ISHdr < 2,5	Leve	I	Verde
2	2,5 ≤ ISHdr < 5	Moderada	II	Amarillo
3	5 ≤ ISHdr < 7,5	Intensa	III	Anaranjado
4	7,5 ≤ ISHdr ≤ 10	Muy intensa	IV	Rojo

Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

La determinación de cada una de estas fases permitirá tomar, en cada una de ellas, las medidas pertinentes según los intereses económicos o sociales de cada usuario que podría ser la protección de la población en primer lugar, la ganadería, el riego agrícola y los otros usos.

En el análisis del comportamiento de los indicadores que integran el ISHdr se tuvo en cuenta una sectorización del área de estudio, tomando como principios básicos las metodologías propuestas por (Priego et al., 2008), (Lagar, 2018) y (Ramón et al., 2009) relacionadas a la sectorización y determinación de unidades. Se parte del principio del área mínima cartografiable para escala 1:25 000, el reconocimiento de los tipos y procesos de relieve, su composición litológica, agrupamiento de suelos y la cobertura vegetal, constituyen el fundamento de la delimitación de las mismas.

Además, se tuvo en cuenta como nuevo elemento el límite de las circunscripciones. El software empleado fue el MapInfo versión 16.0 y resultaron un total de ocho zonas o sectores, según se muestra en la figura 2.

Figura 2. Sectorización del área de estudio. Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS INDICADORES QUE INTEGRAN EL ISHDR

El último periodo de intensa sequía de la provincia culminó en el año 2021, por lo que para la aplicación del ISHdr se realizará el análisis para el año hidrológico que se extiende desde diciembre de 2020 hasta noviembre de 2021 con el propósito de analizar el impacto de la sequía hidráulica en un periodo en el que sus efectos se acrecentaron ocasionando daños significativos a la economía de la provincia.

Precipitaciones: el Valle de Caujerí durante el último año de estudio se caracterizó por un periodo lluvioso relativamente seco donde solo precipitó el 22% de la lluvia media anual y en la estación poco lluviosa, solo el 25 % de la lluvia media anual según se muestra en la tabla 3, con una tasa de evaporación alta con valores de 2 250 mm. Coincidentemente un estudio realizado por Ruiz y Melo en el 2022 arrojó que en el Valle del río Cauca en Colombia las condiciones climáticas muestran las mismas tendencias como efecto del cambio climático en los valles interiores (Ruiz y Melo, 2022). Ellos proponen un nuevo modelo objetivo para establecer tendencias en las áreas seleccionadas.

Atendiendo a los resultados del indicador y en correspondencia con la escala de valores que propone el índice desarrollado por Ferrer et al. (2015), se establecen 10 rangos o valores fronteras, clasificados desde extremadamente seco con lluvia = 0 % (escala 10) hasta extremadamente húmedo con valores de lluvias ≥ de 140% (escala 1) según los rangos empleados en el sistema INRH Guantánamo.

Tabla 3. Registros de las lluvias en %, red pluviométrica del área de estudio vs escala de valores.

No. Pluv.	Período seco					Período húmedo						
	2020	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
732	15,10	0,0	10,80	66,50	10,31	41,58	40,50	48,80	0,30	81,20	98,80	65,20
733	18,20	0,0	10,90	86,80	20,61	24,89	30,54	52,60	0,01	42,60	100,20	74,40
734	21,50	0,0	4,00	71,20	0,00	11,20	10,83	23,30	0,06	54,40	174,60	74,80
1345	42,20	0,0	0,80	91,60	41,06	10,10	10,40	85,20	0,80	98,50	144,80	66,50
1594	0,50	0,0	22,10	52,30	0,00	11,50	20,01	74,40	0,70	70,20	196,90	138,90
1647	1,62	0,0	0,40	55,40	0,40	60,10	57,02	55,30	1,17	62,50	192,50	121,20
1648	34,50	0,0	31,05	66,80	54,90	58,02	61,60	81,10	2,01	42,20	122,90	110,20
Prom.	19,09	0,0	11,44	70,09	18,18	31,06	32,99	60,10	0,72	64,51	147,24	93,03
Eval.	8	10	9	5	8	7	7	5	9	5	1	4

Fuente: elaborado por los autores, 2023.

A criterio del INRH (2021) en la provincia, el comportamiento de las lluvias fue muy inferior a lo esperado en una amplia zona en el área de estudio y para un largo período. Esta escasez de lluvias propició un déficit continuo en la escorrentía en superficie y se estima que alcanzó niveles inferiores de las aguas subterráneas.

Factor geológico (FG): afloran un total de 7 formaciones: Río Macío, Cauto, Maquey, San Luis, San Ignacio, Centeno y Farola. Con base en el mapa hidrogeológico se determinó para el Valle de Caujerí el litofacial predominante, estableciendo la consiguiente correlación entre la permeabilidad de las rocas y la escala de valores correspondiente. Los litofaciales vulcanógenos, terrígeno y metamórficos no cársicos coinciden con las áreas de naturaleza prácticamente impermeables y los sectores con litología cársica corresponden a las áreas de naturaleza permeable de sus rocas (tabla 4).

Para el caso del factor geológico la escala de valores que propone el índice aplicado, establece 10 rangos o valores fronteras, según el resultado de la aplicación de la ecuación de Darcy que clasifica los rangos desde Muy Permeable o alta permeabilidad con valores superiores a 200 miliDarcy para un valor escala de 1, hasta Impermeable con valores inferiores a 5 para escalas de 10.

Tabla 4. Comportamiento del indicador Factor geológico.

Sectores	Litofacial		Permeabilidad	Escala
Sector 1	Vulcanógeno	No Cársico	Impermeable	10
Sector 2	Carbonatado	Cársico	Muy Permeable	1
Sector 3	Clástico	No Cársico	Impermeables con juntas permeables	6
Sector 4	Vulcanógeno	No Cársico	Prácticamente impermeable	9
Sector 5	Clástico	No Cársico	Poco permeable	5
Sector 6	Carbonatado-terrígeno	Cársico	Prácticamente permeable	3
Sector 7	Terrígeno	No Cársico	Impermeable	10
Sector 8	Terrígeno	No Cársico	Impermeable	10

Fuente: elaborado por los autores, 2023.

Nivel del cauce de las corrientes superficiales de agua (NC): la principal fuente de alimentación de los ríos del valle de Caujerí son las precipitaciones. Durante el periodo evaluado las lluvias no fueron abundantes por lo que los escurrimientos hacia las aguas superficiales no fueron cuantiosos. Sucede un claro predominio de los caudales en descenso, caudales mínimos o estiajes y caudales mínimos extremos (escurrimientos ceros y corrientes superficiales secas).

Para el análisis de este indicador, se consideró el resultado del cálculo del coeficiente de escurrimiento (m^3/s) y se hizo corresponder con la escala de valores que propone el ISHdr que

clasifica 10 rangos para este indicador, que va desde Caudal mínimo extremo con valores entre 0 y 1 para una escala de 10 puntos, hasta el máximo Caudal con valores superiores a 10 para una escala de 1, según se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Comportamiento del Indicador Nivel del cauce. Valle de Caujerí.

Sectores	2020	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Sector 1	5	5	5	5	5	5	5	9	9	9	9	10
Sector 2	5	10	10	5	5	10	10	10	8	8	8	9
Sector 3	4	4	4	5	5	6	7	7	10	10	5	5
Sector 4	4	4	4	9	9	9	7	7	10	10	10	10
Sector 5	4	4	8	9	9	9	9	5	10	10	10	10
Sector 6	8	4	8	8	8	5	5	5	5	10	10	10
Sector 7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10
Sector 8	10	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5

Fuente: elaborado por los autores, 2023.

Nivel de aguas subterráneas (NAS): Las aguas subterráneas presentes en el territorio de estudio son pocas y la mayoría pertenece a la cuenca subterránea Gt-3 (INRH 2021). Basados en la observación sistemática, la evaluación de las aguas subterráneas se realiza a través del Gráfico de Control de Balance de Agua Subterránea. En el mismo se observan tres zonas de gran importancia que indican el estado del acuífero: zonas de entregas aumentadas, zonas de entrega garantizada, zonas de entregas reducidas. A partir de este método se estableció la escala de valores, la cual define diez rangos que van desde el Estado de entregas aumentadas de las fuentes subterráneas con valores superiores al 80 % de llenado desde la superficie hasta el espejo de agua para una escala de 1 punto, hasta el estado de emergencia de la fuente con valores inferiores al 5% de llenado asignando el valor escala de 10.

Según se muestra en la tabla 6 la mayor parte del área de estudio trascurrió el año 2021 en estado desfavorable y crítico, fundamentalmente en los meses desde junio hasta noviembre.

Tabla 6. Comportamiento del indicador Nivel de las aguas subterránea.

Sectores	2020	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Sector 1	5	5	5	5	5	5	9	9	9	9	9	9
Sector 2	5	10	10	5	10	10	10	10	5	9	5	7
Sector 3	5	5	5	5	5	5	10	10	9	9	5	5
Sector 4	10	10	5	7	7	5	5	8	8	9	5	7
Sector 5	5	3	3	3	7	7	5	5	8	3	7	7
Sector 6	10	10	10	7	7	5	5	8	8	5	5	5
Sector 7	5	10	10	5	10	10	10	8	8	9	7	7
Sector 8	5	5	3	3	3	3	5	5	10	10	7	5

Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

Volumen de los embalses (VE): el comportamiento de este indicador está vinculado al comportamiento de los Gráficos de Despacho de los Embalses, según se muestra en la tabla 7. La escala de valores correspondiente a este indicador define diez rangos establecidos en la concepción del ISHdr que expresa el porciento de llenado de los embalses, desde el estado de entregas aumentadas con valores superiores al 95% para un valor escala de 1, hasta el estado de emergencia del embalse con valores por debajo del 10% para una escala de valor de 10 puntos.

El área de estudio comienza el año hidrológico con un déficit de 254 mm de precipitaciones, que no se transformaron en escurrimientos para los embalses del Valle de Caujerí. Estos embalses comienzan el periodo con bajos porcientos fundamentalmente el embalse Pozo Azul, el cual debido a los bajos escurrimientos y los ritmos de entrega a la agricultura experimenta un gradual descenso. En el caso de Los asientos sucede la misma tendencia, aunque posee un volumen de 6 hm^3 subutilizados experimenta un gradual descenso hasta el mes de octubre.

Tabla 7. Porciento de llenado de los embalses respecto al volumen disponible. Valle de Caujerí.

Embalses	2020	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Los Asientos	32,2	38,8	37,63	34,22	33,1	14,22	12,38	14,54	11,25	12,3	14,5	34,2
Pozo Azul	17,8	14,2	12,34	18,17	16,1	10,17	8,63	8,25	7,85	6,52	6,15	16,4
Total	50	53	49,97	52,39	49,2	24,39	21,01	22,79	19,1	18,82	20,65	50,6
Escala	5	5	5	5	5	8	8	8	9	9	8	5

Fuente: elaborado por los autores, 2023.

Cobertura forestal (CF): La cubierta original de bosques del territorio ha sido degradada a vegetación secundaria, fundamentalmente en la zona de Guaibanó y Puriales, cuyos bosques se encuentran parcialmente degradados. Teniendo en cuenta el resultado de este indicador del cálculo de la cubierta de bosques con el empleo del Índice Normalizado (García et al. 2012) y en correspondencia con la escala de valores que propone el ISHdr (Ferrer et al. 2015), se establecen 10 rangos o valores fronteras, clasificados de cobertura crítica con valores por debajo del 5% para una escala de 10 puntos hasta una cobertura favorable con valores por encima del 80% y un valor escala de 1 punto.

La cobertura forestal durante el año 2021 no experimentó grandes variaciones. Los resultados del comportamiento de este indicador para el área de estudio se muestran en la tabla 8, donde se observa que en el Valle la cobertura forestal presente es del 40%, con tres sectores por encima del 50% y un sector por debajo del 10%.

Tabla 8. Comportamiento del indicador Cobertura forestal (%). Cierre 2021.

Sectores	Cobertura Forestal	Escala
Sector 1	86.6	1
Sector 2	54.1	4
Sector 3	12.2	8
Sector 4	90.9	1
Sector 5	22.5	7
Sector 6	19.9	8
Sector 7	18.8	8
Sector 8	9.8	9

Fuente: elaborado por los autores, 2023.

Relación demanda - disponibilidad (DD): este indicador posee su basamento en la relación de la demanda que realiza cada usuario y la disponibilidad de agua que existe en los sistemas de los recursos hidráulicos para satisfacerla. La escala de valores define diez rangos asociados a la satisfacción de la demanda planteada para cada usuario o cliente en el Balance de agua anual, que va desde la no satisfacción de la totalidad de la demanda (por debajo del 10% de la cifra aprobada) con un valor escala de 10, hasta la satisfacción de la totalidad de la demanda (por encima del 95% de la cifra aprobada) con un valor escala de 1 punto.

El balance de agua para los ocho sectores definidos del área de estudio, durante el periodo de análisis, se encontraba con bajos niveles de satisfacción de la demanda, producto a la disponibilidad del recurso hídrico en el área de estudio. Como se observa en la tabla 9, pocas veces en el año se logra la satisfacción de la demanda, en el caso del sector 8 todos los usuarios están asociados a fuetes no reguladas y sus demandas son ínfimas, y para todos los sectores acontece una mejoría al final del periodo asociadas al comienzo de la recuperación de las fuentes reguladas y las no reguladas.

Tabla 9. Comportamiento del indicador Disponibilidad-Demanda. Satisfacción de la demanda

Sectores	2020	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Sector 1	8	8	6	6	6	8	8	8	5	5	4	3
Sector 2	8	8	8	6	6	6	5	5	5	5	1	1
Sector 3	9	9	9	9	5	5	5	5	5	4	1	1
Sector 4	7	7	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Sector 5	10	10	10	9	5	7	7	9	9	5	5	5
Sector 6	10	10	10	5	5	9	9	9	9	5	4	3
Sector 7	10	10	10	9	9	8	8	6	6	5	4	3
Sector 8	3	3	3	4	3	5	5	5	5	4	4	4

Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

Como resultado de la escasez de lluvias del 2020-2021 acontece en el área de estudio una disminución de los rendimientos agrícolas, condiciones inadecuadas de pastoreo, baja rentabilidad de las inversiones agrícolas, menor disponibilidad de madera para la combustión, incremento de la probabilidad de ocurrencia de incendios, alto riesgo de desertificación y la ocurrencia de impactos socio económicos negativos ligados a la sequía, incluida la inseguridad en los suministros alimentarios.

CÁLCULO DEL ISHDR

Una sequía hidráulica se produce en la medida que los valores aportados por el ISHdr se alejan del valor 0 siempre positivamente, y alcanza su máxima intensidad en el valor 10. Evaluado el comportamiento de cada indicador que forma parte del índice, se establecieron las escalas de valores y, por tanto, se procede al cálculo del índice de sequía hidráulica según la ecuación general, en el área de estudio.

RESULTADO DE LA APLICACIÓN DEL ISHDR EN EL VALLE DE CAUJERÍ

Con el cálculo del ISHdr se determinó que durante el período de evaluación el área de estudio fue afectada por una sequía hidráulica intensa casi persistente, desde el 2018 hasta el 2021 resaltando que a partir del mes de agosto los indicadores comenzaron a mejorar gradualmente y según los cálculos realizados.

La tabla 10 muestra el resultado de la aplicación del ISHdr para el último año hidrológico del periodo 2018-2021. Se refleja el comportamiento de la sequía por meses, desde diciembre del 2020 hasta noviembre 2021.

Tabla 10. Resultado del cálculo del ISHdr. en el Valle de Caujerí.

Indicador	Pi	P. Seco					P. Húmedo						
		Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.
FC	0,2	8	10	9	5	8	7	7	5	9	5	1	4
FG	0,1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
NC	0,1	6	6	10	7	7	7	7	8	8	9	8	9
NAS	0,2	6	7	8	5	7	6	8	9	9	8	4	4
VE	0,2	5	5	5	5	5	8	8	8	9	9	8	5
CF	0,1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	7
DD	0,1	8	9	8	7	6	7	9	9	6	5	1	1
$ISHdr = \sum_{1}^{7} Pi \times Ei$		6,8	7,5	7,7	5,9	6,7	7,1	7,7	7,6	8,3	7,3	4,9	4,96
Categoría		III	IV	IV	III	III	III	IV	IV	IV	III	II	II

Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

La tabla muestra los indicadores de la sequía hidráulica obtenidos, los cuales permiten comparar los diferentes episodios, y revelan que a partir de enero del 2021 los dos primeros meses el Valle estuvo bajo condiciones de sequía hidráulica Muy Intensa hasta el mes de marzo, donde descendió a sequia Intensa por un periodo de tres meses. Debido a los efectos de las condiciones climáticas adversas, en los meses de junio, julio y agosto se acrecentaron los efectos de la sequía y cambio la categoría a sequía hidráulica Muy Intensa.

Las tablas mostradas (tabla 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9) describen, a modo de ejemplo, el comportamiento de los indicadores en el área de estudio y la determinación del índice para el año hidrológico 2020 - 2021. Este mismo análisis realizado para las series temporales que comprende desde el año 2018 hasta el 2021, indica que las sequias fueron recurrentes en los últimos cuatro años y más frecuentes a partir del año 2020. Las figuras 3, 4, 5 y 6 muestran la salida cartográfica de los resultados de los años que componen el período en estudio.

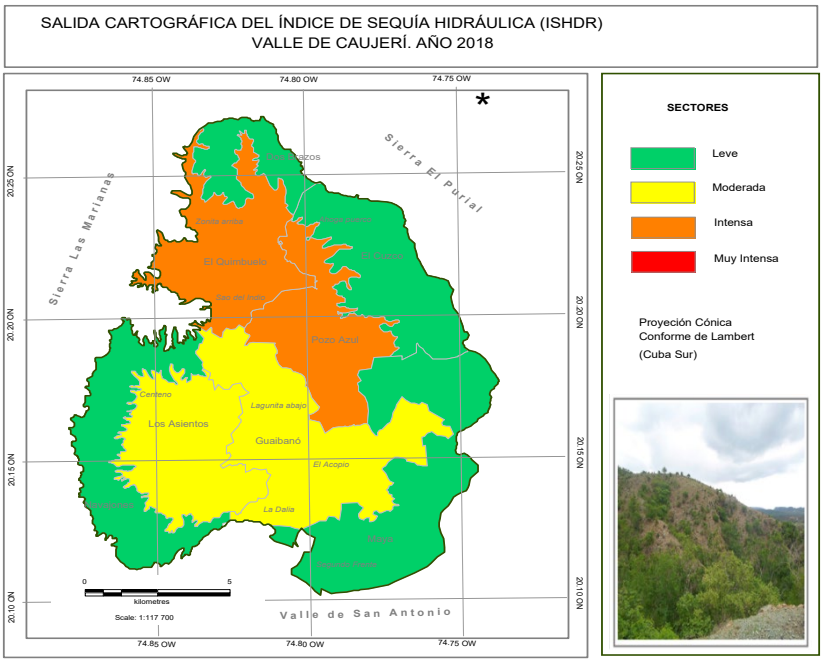

Figura 3. Salida cartográfica del ISHdr. en el área de estudio al cierre del 2018. Proyección Cónica Conforme de Lambert, Cuba Sur. Fuente: elaborado por los autores, 2023.

En el año 2018, el Valle de Caujerí experimentó los efectos de una sequía hidráulica leve en las partes altas, y en la parte central fue moderada e intensa. Los sectores más complicados en el área de estudio fueron los sectores 2, 3 y 5 ubicados en las inmediaciones del asentamiento de Puriales. En promedio general una sequía moderada con efectos impactantes en el sector de la agricultura que registra una magnitud de 6,5 meses y una intensidad de 5,6.

Este evento provocó impactos considerables en los sistemas agrícolas: en cultivos, pastizales, ganadería, suelos destinados a la producción, etc. Pero no solamente en la agricultura, también provocó efectos negativos en la población (INRH 2021). En este periodo la ausencia de precipitaciones provocó el traslado de 248 cabezas de ganado vacuno, equino y ovino-caprino. Se tomaron acciones como llevar agua a través de carros cisternas, y se emplearon otras acciones que no fueron realmente eficaces. Este evento ha provocado además afectaciones severas sobre 43 hectáreas de plantaciones forestales a las cuales les ha provocado defoliación y deterioro de las copas de los árboles. Estas especies son atacadas con más frecuencia, por plagas y enfermedades secundarias de insectos y hongos.

En el 2019 el 92% del área del valle estaba bajo la influencia de la sequía hidráulica en sus formas moderadas e intensas, con algunos sectores pequeños ubicados en la parte altas del Valle con categoría de sequía leve. Respecto al 2018 denota una expansión de la sequía moderada, condicionada fundamentalmente por la escasez de lluvia y la baja disponibilidad de agua en los embalses (ver figura 3). Este fenómeno tuvo una duración de 310 días, de ellos 85 sin registro de lluvias, fundamentalmente en los meses de febrero, abril, mayo y junio, hasta el día 12, donde se produjeron 25 mm en 24 horas y, a partir de ahí, ocurrieron lluvias esporádicas que no se transformaron en escurrimientos para la recuperación de los cuerpos de aguas.

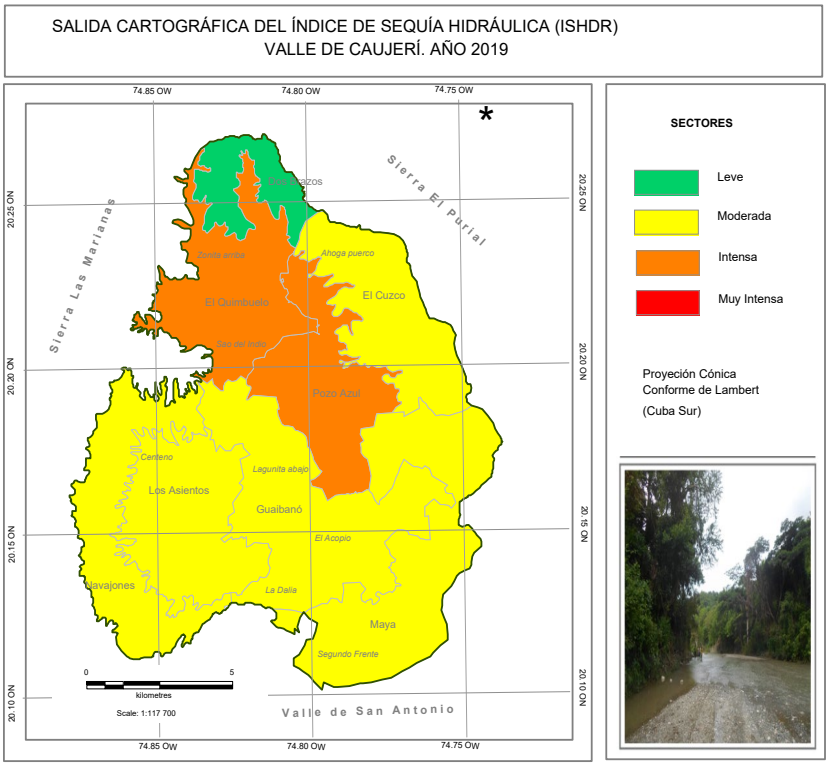

Figura 4. Salida cartográfica del ISHdr en el área de estudio al cierre del 2019. Proyección Cónica Conforme de Lambert, Cuba Sur. Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

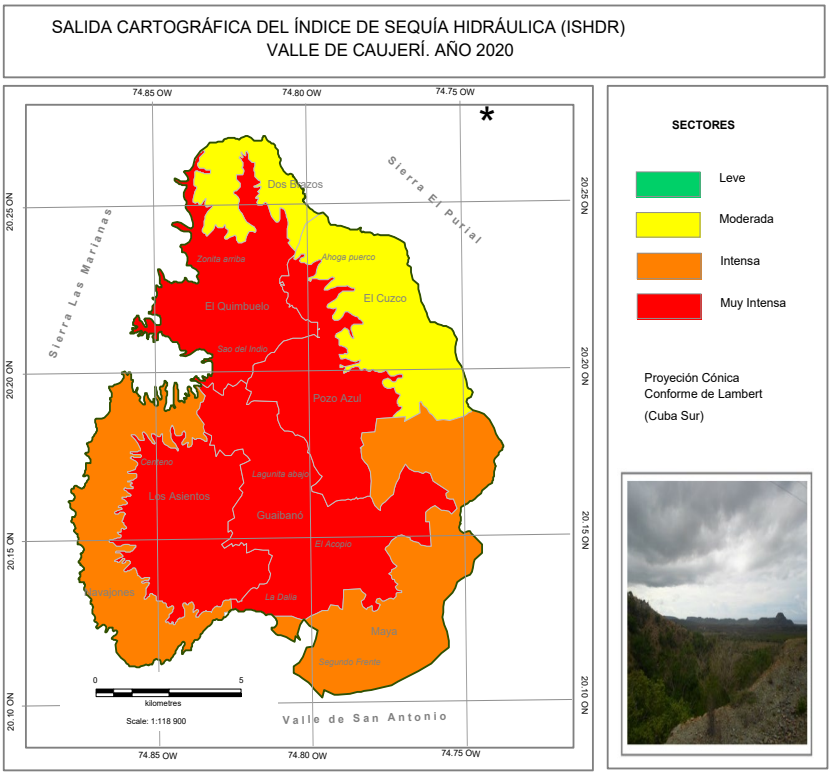

Figura 5. Salida cartográfica del ISHdr en el área de estudio al cierre del 2020. Proyección Cónica Conforme de Lambert, Cuba Sur. Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

Respecto al 2018-2019, la sequía en el año 2020 se expande hacia otros sectores del valle con importantes producciones agrícolas declaradas. Las áreas complicadas son las que están ubicadas en el centro del valle de Caujerí, en las zonas del Guaibanó y Puriales. En el año 2020 la sequía se tornó persistente, abarcó mayores áreas en su forma intensa (ver figura 4) y se estableció con el 38% del área afectada en categoría muy intensa. Durante este periodo los embalses experimentaron descensos en sus volúmenes, que desde el 2018 no se han recuperado. En los últimos cuatro años solo se ha cubierto la demanda por debajo del 35 %.

En el año 2021 hubo pocas variaciones respecto al año 2020, lo que evidencia el incremento de la intensidad de la sequía. El 70% del área de estudio está afectada por una sequía hidráulica muy intensa, como uno de los eventos más severo y de mayores afectaciones en los últimos 15 años, no solo en el área de estudio, sino en la región oriental del país (figura 6).

La sequía hidráulica del 2018 al 2021 ha provocado una de las que más cuantiosas pérdidas al sector agropecuario guantanamero. El sector agrícola reportó pérdidas estimadas en 240 ton de cultivos varios y 40 ton de café. El sector ganadero reportó 150 animales evacuados, el suministro de agua en carros cisternas a más de 300 cabezas de ganado, en pérdidas de más de 30 mil litros de leche. Por concepto de sequía, el seguro de bienes agropecuarios fue el acápite de riesgo que mayor reembolso por indemnizaciones efectuó a sus asegurados, con un monto superior a 900 mil pesos.

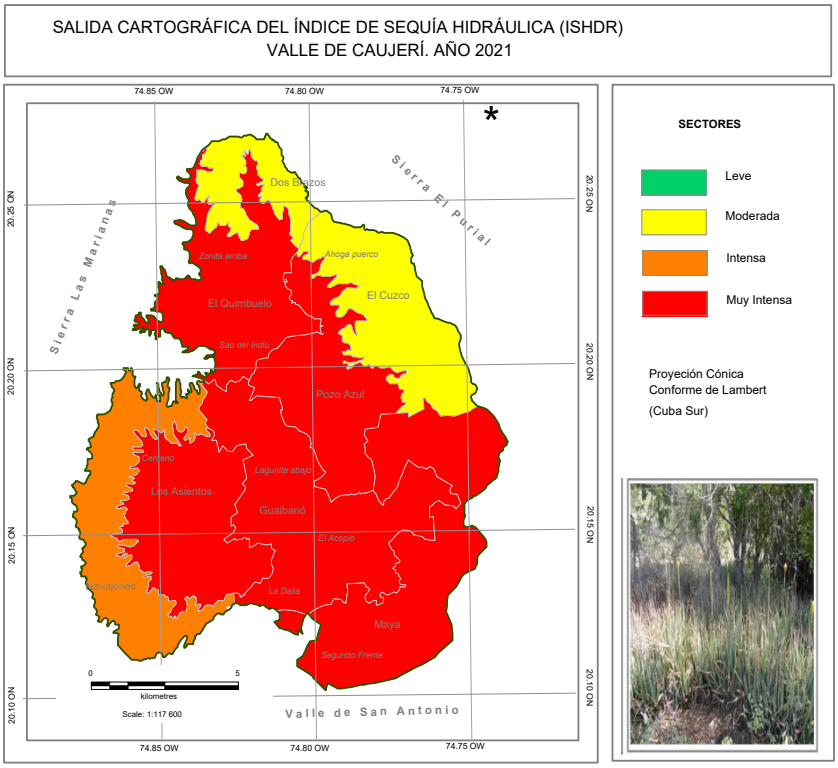

Figura 6. Salida cartográfica del ISHdr. en el área de estudio al cierre del 2021. Proyección Cónica Conforme de Lambert, Cuba Sur. Fuente: Elaborado por los autores, 2023.

Se constató que la sequía hidráulica ha incrementado la extensión territorial, la intensidad, magnitud y la duración. Las experiencias adquiridas en la provincia Guantánamo, a partir de eventos transcurridos, permiten expresar que la extensión superficial de la sequía hidráulica en el Valle de Caujerí ha afectado áreas anteriormente no afectadas. El área de estudio no ha logrado en los últimos cuatro años estadios normales de humedecimiento.

04 CONCLUSIONES

La aplicación de un Índice de sequía hidráulica en el Valle de Caujerí para un año hidrológico, corroboró la conveniencia y la funcionalidad del índice, además demostró que desde el 2018 hasta el 2021 el área de estudio sufre los efectos de una sequía persistente que se ha tornado desde moderada hasta muy intensa.

Durante el periodo 2018 - 2021 se produjo una intensificación de la sequía hidráulica en el Valle de Caujerí, con eventos de sequía que variaron gradualmente en las áreas desde Leve a Muy Intensos, evidenciando un marcado incremento de las áreas afectadas con una concentración hacia el centro del Valle, provocando afectaciones económicas severas con pérdidas importantes de producciones de cultivos varios, afectaciones directas a la ganadería local e impactos negativos sobre la disponibilidad del recurso agua en los embalses.

05 REFERENCIAS

Ferrer E., Marzo Y. y Dinza Y. (2015). "Propuesta de una herramienta metodológica para monitoreo u control de la sequía hidráulica en la provincia Guantánamo". Gestión Administración Pública. Universidad de Guantánamo. 5 - 24. Disponible en el Archivo Central de la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos (DPRH) Guantánamo.

García J. M, Castro V. y Gutiérrez J. (2012): Nueva herramienta para evaluar la gestión integrado de las cuencas hidrográficas cubanas. El índice simplificado de gestión de cuencas hidrográficas (IsGC. 1ra etapa). Revista Voluntad hidráulica, 106, pp 6 - 17.

Gutiérrez J.E., Crespo V. y Hernández M.E. (2020). "Intensidad y persistencia de la sequía en SW de Guantánamo: uso de índices ISA e IPS". Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Versión impresa ISSN 1680-0338, riha, 41(1):3-17. La Habana, Cuba, extraído de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382020000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es. en diciembre de 2022.

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), (2020). "Informe de Estrategia para la Gestión Integrada del Recursos Agua en condiciones de sequía hidráulica". 18-33. Archivo central de la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos Guantánamo (Inédito).

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), (2021). "Informe de Estrategia para la Gestión Integrada del Recursos Agua en condiciones de sequía hidráulica según asentamientos de la provincia". 12-48. Archivo central de la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos Guantánamo.

Lagar D. (2018): Methodology for the classification of units of the landscape in the Villuercas-Ibores-Jara Geopark. Departamento de Expresión Gráfica. Universidad de Extremadura. Revista Internacional Mapping, 23(164), 34–47, extraído de: https://ojs.revistamapping.com/MAPPING/issue/view/173/MAPPING_164. en septiembre 2022.

Nicholls C. I y Altieri M. A. (2010). "Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas". Revista Agropecuaria.org. Disponible en: http://agropecuaria.org/2015/12/cambio-climatico-y-agricultura-campesina-impactos-y-respuestas-adaptativas/. en diciembre del 2022.

Ramón A. M., Salinas E. y Remond R. (2009): "Diseño metodológico para la elaboración de mapas de paisajes con el uso de los SIG: aplicación a la cuenca alta del río Cauto, Cuba". Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Programa de Estudios Geográficos (PROEG). Universidad Nacional de Luján, Argentina. ISSN 1852-8031, 1(1), 95-108, extraído de: https://docplayer.es/14967090-Diseno-metodologico-para-la-elaboracion-de-mapas.html. en septiembre 2022.

Priego A., Bocco G., Mendoza M. y Garrido A. (2008): Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Planeación Territorial. ISBN: 978-968, 98 p. Extraído de: https://docplayer.es/36569093-Propuesta-para-la-generacion-semiautomatizada-de-unidades-de-paisajes.html. en septiembre 2022.

Ruiz J.F. y Melo J.Y. (2022). "Informe de predicción climática a corto, mediano y largo plazo". Colombia. Grupo de modelamiento de tiempo y clima, subdirección meteorología-IDEAM", extraído de: http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/cpt/informe/informe.pdf. en enero del 2023.

Valiente O. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Barcelona. Investigaciones Geográficas, 26: 59-80. ISSN: 1989-989. Barcelona, España, extraído de: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17602604. en marzo del 2023.

Varela N., Oquendo H. D, Romero P. L. y Zúñiga L. M. (2019). "Toma de decisiones en la gestión integral del riesgo por sequía en Cuba". Retos de la Dirección, 13(1):48-68. ISSN 2306-9155. CITMA, Camagüey, Cuba. extraído de: http://scielo.sld.cu/pdf/rdir/v13n1/2306-9155-rdir-13-01-48.pdf. en marzo de 2023.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Esvillel Ferrer Pozo https://orcid.org/0000-0003-1011-7424
Conceptualización, análisis de datos, trabajo de campo, cartografía, gestión de software, validación, redacción del informe.

Liliana María Gómez Luna https://orcid.org/0000-0002-1282-3392
Metodología, análisis de los resultados, aplicación de las matrices del índice, redacción del informe original y revisión.

Yudith González Díaz https://orcid.org/0000-0003-1240-1146
Análisis de los resultados, redacción del informe original y revisión.

Determinación de las zonas de protección sanitaria, comparación de los métodos de la NC 1192:2017 y el WhAEM, caso de estudio fuentes de abasto de San José de las Lajas

Roxana Aymeé Luis Winograd E-MAIL: roxluis87@gmail.com
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae),Cuba.

Dianet Valladares Hernández E-MAIL: dianetvalladares@gmail.com
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae),Cuba.

RESUMEN

En Cuba la Oficina Nacional de Normalización estableció un procedimiento de cálculo para la delimitación de las zonas de protección sanitarias (ZPS), vigente en la NC 1192: 2017. Además de este procedimiento, existen modelos matemáticos que son aplicados en todo el mundo como es el caso del modelo matemático utilizando el programa WhAEM. Estos dos métodos fueron aplicados en cuatro de las fuentes de abasto de San José de las Lajas. Arrojando como resultado que los dos métodos presentan resultados favorables, con una relación entre ellos de un 99% de precisión, por lo que se justifica la utilización del programa WhAEM, en las zonas donde no se cuente con todos los datos hidrogeológicos necesarios para la utilización de la NC 1192: 2017. Lo cual garantiza que todos los pozos de abasto cuenten con la determinación de ZPS.

PALABRAS CLAVES: contaminantes, calidad del agua, WhAEM

Determination of the sanitary protection zone, comparison of the NC1192:2017 and WhAEM methods, case study of supply sources in San Jose de la Lajas.

ABSTRACT

In Cuba the National Office of Normalization established a calculation procedure for the delimitation of the sanitary protection areas (ZPS), effective in the NC 1192: 2017, besides this procedure mathematical models that are applied in the entire world exist like it is the case of the mathematical pattern using the program WhAEM. These two methods were applied in four of the sources of supply of San José de las Lajas. Throwing as a result that the two methods present favorable results with a relationship among the two methods of 99% of precision, for what is justified the use of the program WhAEM, in the areas where it is not had all the data necessary hydrogeological for the use of the NC 1192: 2017. That which guarantees that all the supply wells have the determination of ZPS.

KEYWORDS: polluting, water quality, WhAEM

CITMA CERTIFICADO

Octubre 2023-RECIBIDO APROBADO-Diciembre 2023

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

La calidad del agua subterránea no es más que la cantidad y naturaleza de las distintas materias que se le han incorporado durante el contacto con los terrenos por donde circula. El conocimiento de estos elementos permitirá concretar las posibilidades de su utilización con propósitos industriales, de regadío, consumo humano y demás, ya que el tipo de uso es el que determina los requisitos de calidad exigidos en cada caso y los análisis necesarios, ya sean químicos, físicos o bacteriológicos. El agua subterránea puede dañarse de forma directa cuando la sustancia contaminante se introduce directamente en el acuífero por el vertido de aguas en pozos negros o de forma indirecta a causa de la extracción de agua de un pozo o del drenaje de la zona (Pérez, 1982).

Las fuentes de contaminación son las continuas actividades del hombre sobre el medio ambiente, algunas de estas fuentes son: las aguas residuales domésticas vertidas en fosas sépticas o pozos negros y las fugas de los sistemas de alcantarillado originados por la vida del hombre en comunidad, la contaminación por la actividad agrícola con la utilización de insecticidas, fungicidas entre otros, ya que son nocivos para el hombre y los animales, también la producida por las industrias como metales pesados, sustancias inorgánicas y orgánicas. El control de la contaminación debe comenzar por someter a tratamiento adecuado las aguas residuales domésticas e industriales que pueden afectar tanto las aguas superficiales como las subterráneas, y por tomar diversas medidas preventivas para evitar la contaminación originada por otras fuentes. Las medidas preventivas pueden ir desde la prohibición, regulación u ordenamiento de señaladas actividades en zonas determinadas y el establecimiento de medidas de seguridad sobre actividades potencialmente nocivas hasta la creación de redes de detección de las posibles sustancias contaminantes. Para que todas las medidas de protección sean efectivas debe existir un detallado conocimiento de las características hidrogeológicas del acuífero y un sistema adecuado de control de la calidad del agua (Pérez, 1982).

La provincia Mayabeque cuenta con varios focos de contaminación provenientes de centrales azucareros, fábricas de plásticos, pintura, además de las mismas comunidades; los cuales presentan solución para el residual que originan, mientras que otros no. San José de las Lajas es la capital de la provincia Mayabeque, situado en la parte centro norte de la provincia, con una extensión superficial de 592,67 km² y un total de aproximadamente 80 960 habitantes que son abastecidos de agua potable por un total de 12 pozos de abastos localizados en el territorio. Conocer la influencia o no de focos contaminantes en cada fuente de abasto es fundamental para garantizar la calidad del preciado líquido. Para determinar las ZPS, se seleccionaron dos métodos la NC 1192:2017 y el modelo matemático WhAEM, los cuales se aplicarán en tres pozos del área de estudio, con el objetivo de poder determinar si existe correlación entre estos dos métodos y poder aplicar el modelo matemático en los pozos que no cuenten con todos los datos hidrogeológicos necesarios para aplicar la NC 1192: 2017.

02 REFERENTES TEÓRICOS

El agua subterránea tiene la capacidad de recargarse y reponerse. Esto puede ocurrir naturalmente cuando la lluvia y la nieve derretida se filtran por las grietas y hendiduras debajo de la superficie de la tierra, o artificialmente cuando las personas toman medidas para restaurar los niveles de agua subterránea redirigiendo el agua para que sea reabsorbida por el suelo a través de canales, cuencas o estanques (Hermann y Prunes, 2022).

La extracción de las aguas subterráneas está siendo superior a la de su reposición, razón por la que se hace obligatorio visibilizar la importancia del recurso hídrico y desarrollar procesos y medidas de monitoreo, revisión y seguimiento para gestionar la extracción del recurso. Algunas medidas pueden ser (Pérez, 1982):

- Establecer perímetros de protección.
- Ubicar correctamente los vertederos de residuos sólidos y desagües.
- Desarrollar sistemas sostenibles para eliminar los compuestos líquidos contaminantes que ya están dentro de las zonas de los acuíferos.
- Mejorar los sistemas de riego y fertilización.

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

El problema de la contaminación de las aguas es conocido desde la antigüedad. Con el incremento de la población y el surgimiento de la actividad industrial la polución de ríos, lagos y aguas subterráneas aumenta constantemente. La Organización Mundial de la Salud define la contaminación de las aguas dulces de la siguiente manera:

"Debe considerarse que un agua está contaminada, cuando su composición o su estado están alterados de tal modo que ya no reúnen las condiciones a una u otra o al conjunto de utilizaciones a las que se hubiera destinado en su estado natural".

Siempre hay contaminación natural originada por restos de animales, vegetales, minerales y sustancias gaseosas que se disuelven cuando los cuerpos de agua atraviesan diferentes terrenos (Rodríguez et al., 2011).

Los materiales orgánicos, mediante procesos biológicos naturales de biodegradación en los que intervienen descomponedores acuáticos (bacterias y hongos), son degradados a sustancias más sencillas. En estos procesos es fundamental la cantidad de oxígeno disuelto en el agua porque los descomponedores lo necesitan para vivir y para producir la biodegradación (Ramíres, 2007).

La contaminación del agua causada por las actividades del hombre es un fenómeno ambiental de importancia. Los procesos de producción industrial requieren la utilización de grandes volúmenes de agua para la transformación de materias primas, siendo los efluentes de dichos procesos productivos, vertidos en los cauces naturales de agua (ríos, lagos) con desechos contaminantes. La contaminación del agua se produce a través de la introducción directa o indirecta en los cauces o acuíferos de sustancias sólidas, líquidas, gaseosas, así como de energía calórica, entre otras. Esta contaminación es causante de daños en los organismos vivos del medio acuático y representa, además, un peligro para la salud de las personas y de los animales.

Las fuentes de contaminación pueden ser naturales y antropogénicas, dentro de estas últimas están las industriales, los vertidos urbanos, las procedentes de la navegación y de actividades agrícolas y ganaderas, siendo de mayor importancia para este trabajo las industriales y las urbanas.

La calidad del agua subterránea tiene gran importancia ya que esta agua constituye una fuente de abastecimiento en el mundo, de rápida utilización y relativamente de bajos costos (Pérez, 1982), por lo que es importante que tenga un seguimiento ya que es un recurso renovable y limitado. Se abastece tanto a la población como a la industria y el regadío, y cada una de estas actividades determina el requisito de calidad exigido por las normas de calidad establecidas para dicho uso.

Para proteger la calidad del agua se determinan las zonas de protección sanitarias, que no son más que los territorios creados alrededor de las fuentes de abasto para preservar la calidad de las mismas. Estas se dividen en 3 zonas: la zona I es un área cercada alrededor del pozo de abasto y donde existen

mayores restricciones; en la zona II no se recomienda la existencia de algún tipo de desechos peligrosos, productos de industrias o actividades agrícolas; y en la zona III se comienzan a permitir algunas actividades siempre que se cumplan las medidas pertinentes. Dichas zonas alejadas de empresas industriales y de áreas residuales para proteger la salud de las zonas adyacentes, proporcionando un área para la disposición segura de desechos industriales peligrosos, ajustando sus concentraciones a la normativa higiénica vigente, para proteger las reservas y mantener una adecuada calidad del agua.

MARCO LEGISLATIVO

La Oficina Nacional de Normalización (NC) es el Organismo Nacional Normalización de la República de Cuba que representa al país ante las Organizaciones Internacionales y Regionales de Normalización. La NC 1192: 2017 establece el procedimiento de cálculo para la determinación de la zona de protección sanitaria, sustituyendo la NC 93-01-209: 1990 y ajustada al nuevo formato establecido por la NC. La norma es aplicable a todas las fuentes de abasto de aguas subterráneas, que sean estudiadas por el sistema del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), o por cualquier otra organización privada o del Estado que le sea otorgada esta responsabilidad. La misma no se aplica en aquellos pozos de uso doméstico, donde no se requiera permiso de extracción. El usuario es el encargado de velar por la calidad del agua del pozo a través del Ministerio de Salud Pública.

03 MATERIALES Y MÉTODOS

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

San José de las Lajas es la capital de la provincia Mayabeque, situada en la parte centro norte, con una extensión superficial de 592,67 km², limita al norte con la provincia de La Habana y el municipio de Jaruco, al sur con los municipios Güines, Melena del Sur y Batabanó, al este con los municipios Madruga y Güines, y al oeste con los municipios Bejucal y Quivicán. La llanura donde se encuentra dicho territorio limita al norte con las alturas Habana-Matanzas y al sur con las de Bejucal-Madruga-Limonar. Geológicamente el área de estudio está caracterizada por la presencia de rocas la Formación Colón la cual está caracterizada por margas calcáreas biógenas, calizas arcillosas biógenas, calizas biógeno-detríticas y eventualmente lentes de arena. Su color varía entre mostaza en las porciones más alteradas, a crema amarillento en profundidad. El espesor total de la formación puede alcanzar unos 80 metros. Descansa discordante sobre las rocas más antiguas y a su vez, está cubierta concordante por la Formación Güines y eventualmente por la Formación Cojímar, como ocurre al Norte de Limonar. Esta formación es acuífera y todos los pozos del área de estudio se localizan en ella.

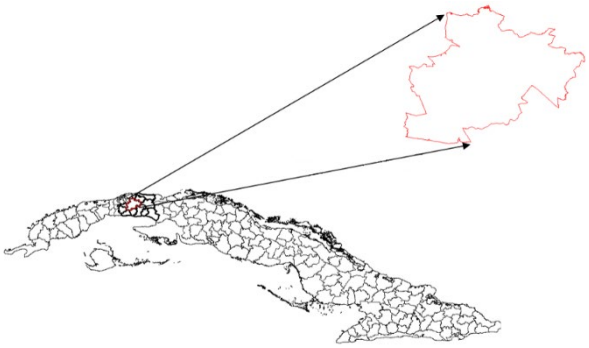

Figura 1. San José de las Lajas.

Los tres pozos de abasto seleccionados para establecer la comparación entre los métodos para determinar la ZPS, pertenecen al INRH, los cuales están distribuidos en la zona cabecera del municipio San José de las Lajas. El objetivo fundamental de estos pozos es abastecer tanto a la población como a las principales industrias del área. En la Tabla 1 se puede observar el nombre de las fuentes y su ubicación geográfica, pudiéndose observar en la figura 2:

Tabla 1 Fuentes de abasto.

No	Localidad o Poblado	Cuenca	Nombre de la estación	Coordenadas	
				Norte	Este
1	San José de Las Lajas (Consejo Popular Norte)	HAV-2	Ac. San José de Las Lajas No. 1	350 250	382 720
2	San José de las Lajas	HMJ-1	Ac. Las Parcelas	348 080	383 810
3	Pastorita y Vostok	HAV-2	Ac. Gran Panel	350 600	381 230

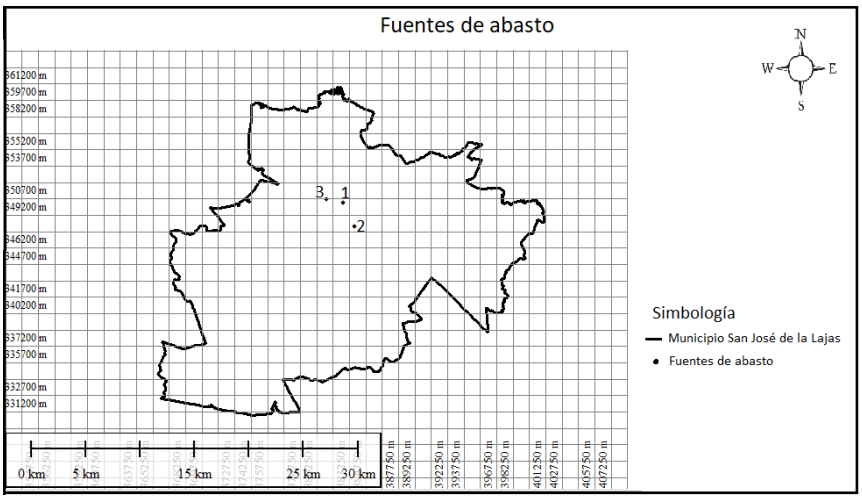

Figura 2 Ubicación de los pozos de abasto.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO POR LA NC: 1192: 2017.

Para determinar la ZPS por la NC 1192: 2017 es necesario conocer y determinar un grupo de parámetros que posteriormente serán necesarios para establecer la representación de la zona. Los valores de la velocidad en la dirección principal del flujo hacia el pozo (*Ux*), se obtiene por la ecuación 1 mientras que el gradiente natural será determinado por la ecuación 2.

$$U_x = I_0 * kd \quad (1)$$

Donde, I_0: Gradiente natural

$$I_0 = \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

Δh: Diferencia de altura entre las líneas equipotenciales (m).

L: Distancia entre las líneas equipotenciales con respecto a cada pozo (m).

kd: Conductividad hidráulica (m/s).

$$k_d = \frac{T}{h_0} \quad (3)$$

T: Transmisividad hidráulica del acuífero (m/s).

h_0: Espesor saturado.

$$h_0 = profundidad\ total - NE \quad (4)$$

NE: Nivel estático.

El punto de estancamiento (*Xo*) se determina por la ecuación:

$$X_0 = -\frac{Q}{2\pi * k_d * h_0 * I_0} \quad (5)$$

Donde,

Q: Caudal de extracción de la fuente (m³/s).

La máxima extensión horizontal (*Y*) se obtiene mediante la ecuación:

$$Y = \pm\frac{Q}{2k_d * h_0 * I_0} \quad (6)$$

La distancia de protección sanitaria (*DPS*) se calcula mediante la ecuación:

$$DPS = \sqrt{\frac{Q}{\pi * h_0 * \mu}} * t_d + {X_p}^2 \quad (7)$$

Donde,

μ: Coeficiente de almacenamiento, cuyo valor se obtiene según la formación geológica donde se encuentra la fuente de abasto. En este caso es igual a 0,02, ya que los tres pozos se encuentran en la formación Colón.

t_d: Tiempo de supervivencia de la bacteria (*d*), toma valores entre los 50 y los 75 días.

X_p: Punto de estancamiento (Xo).

El ancho de la zona II de protección a la distancia *DPS* (D_{II})

$$D_{II} = \frac{1}{3} DPS \quad (8)$$

Luego de calcular X_0, Y, DPS y D_{II}, estos valores se multiplican por un factor de seguridad, en este caso 1,3, para estar del lado de la seguridad.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA ZPS POR EL MODELO MATEMÁTICO WHAEM

El WhAEM (Haitjema and Kraemer, 2018) es un modelo numérico utilizado para la evaluación y gestión del riesgo ambiental de sustancias químicas; se utiliza para calcular la dispersión de dichas sustancias en la atmósfera y determinar los niveles de exposición a los que están expuestos los seres humanos y el medio ambiente. Para calcular las zonas de protección sanitarias el WhAEM utiliza un enfoque de protección por capas, el cual consiste en tres capas de protección diseñadas para proporcionar diferentes niveles de protección para diferentes grupos de población.

La primera capa es la zona de exclusión, que está destinada a proteger las fuentes de extracción de la contaminación. Esta zona se basa en el peligro para la vida y la salud de las sustancias químicas, generalmente estará en un radio de 30 a 100 metros desde el lugar de contaminación.

La segunda capa es la zona de protección inmediata. Esta zona está diseñada para proteger la fuente de abasto de niveles peligrosos de las sustancias químicas. Esta zona se basa en los criterios de toxicidad aguda y en general engloba un área de 100 a 500 metros alrededor de la contaminación.

La tercera capa es la zona de protección a largo plazo. Esta zona está destinada a proteger el pozo de niveles bajos de sustancias químicas. Esta zona se basa en criterios de toxicidad crónica y puede extenderse hasta varios kilómetros desde la contaminación.

Mapas de la base

El WhAEM (Haitjema and Kraemer, 2018) se apoya de varios mapas ráster y gráficos de vectores, que sirven de base para que fluyan los modelos de agua subterránea. Todos los mapas deben ser georreferenciados, es decir, que deben contener la información de las coordenadas en UTM, y puede ser NAD 27 o NAD 83, en este caso se empleó NAD 27.

Parámetros acuíferos

WhAEM le exige al usuario que especifique cuatro parámetros acuíferos regionales que se hacen pulsando en la opción *Model setting,* tal como muestra la figura 3.

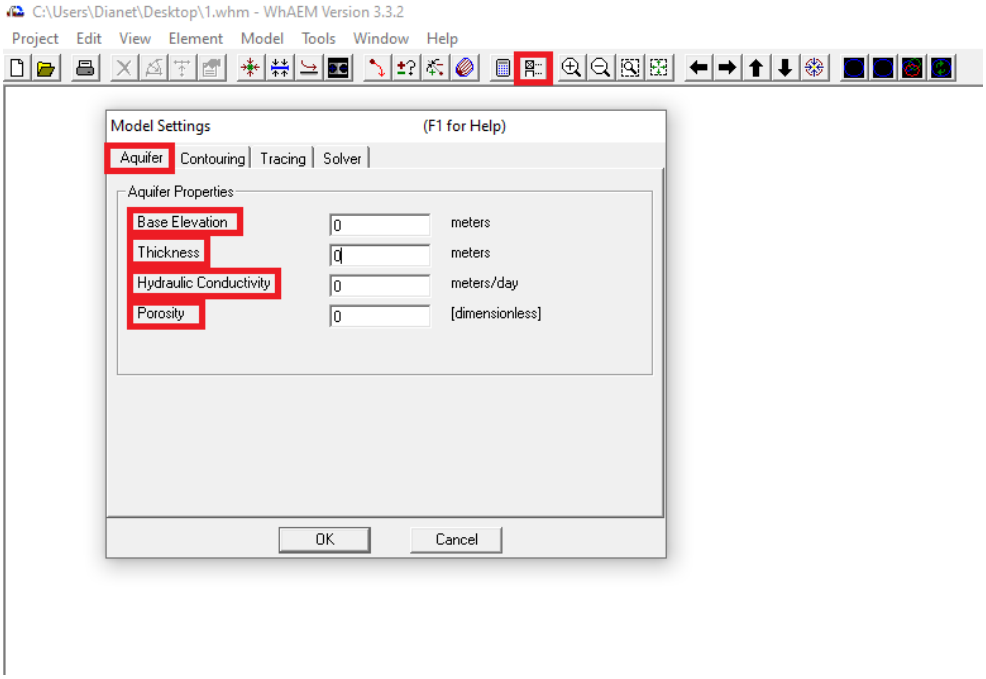

Figura 3. Configuración del acuífero.

La elevación base, en pies o metros con respecto al nivel del mar. La base acuífera puede ser una capa de arcilla o superficie de la piedra que normalmente no es una superficie horizontal perfecta, es importante que esta base acuífera no sea más alta que el nivel de agua más bajo.

El espesor del acuífero es el espesor real del material del acuífero sobre el fondo de la base acuífera, sin tener en cuenta cuanto se satura. Si usted quiere asegurar que fluyan las condiciones a lo largo del dominio, sin tener en cuenta la elevación del agua subterránea, se deben poner un valor alto en el espesor del acuífero, lo suficientemente grande para asegurar que la elevación de la base más el espesor del acuífero estén sobre la masa de agua.

La conductividad hidráulica es el valor regional. Se puede seleccionar una conductividad hidráulica diferente localmente definiendo uno o más dominios.

La porosidad en WhAEM es una porosidad eficaz que es el valor regional. Se puede seleccionar una porosidad diferente localmente definiendo uno o más dominios, el valor de la porosidad se usa para rastrear el camino del agua subterránea.

Flujo uniforme

La opción del flujo uniforme (ver figura 4) permite planear el flujo regional sin la introducción de rasgos de agua de superficie en el modelo. Esta opción no debe usarse en la combinación con otros elementos analíticos, exceptuando los pozos, para que las zonas de protección sean generadas. El flujo uniforme está calculado basado en una pendiente hidráulica especificada y las propiedades regionales del acuífero.

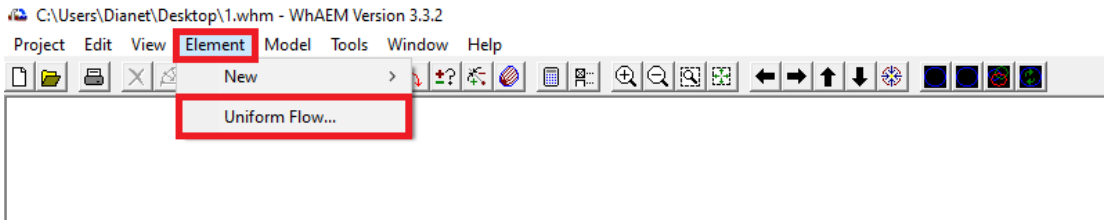

Figura 4. Configuración de la opción Flujo uniforme.

Pozos

Para crear un pozo se pulsa la opción *Add well* en el menú (ver figura 5), se ubica en cualquier zona y se mostrarán las opciones donde se puede ajustar la ubicación del pozo reemplazando las coordenadas en la caja de datos, luego se teclea el caudal bombeado en la caja de descarga y el radio dicho pozo (nunca usar comas en los datos numéricos).

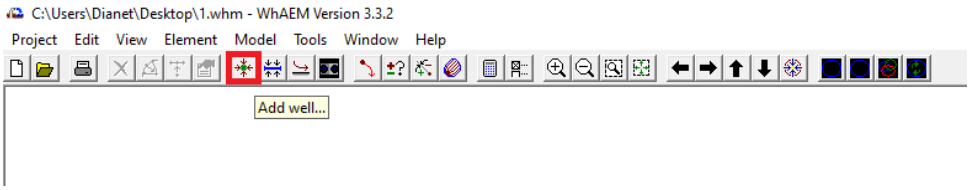

Figura 5. Opción Adicionar pozo.

Solver

Se pulsa el botón *Run*! (ver figura 6), aparece una caja negra con algunos indicadores del proceso de la solución. Cuando el solver se hace, el mapa reaparece con una cubierta de contornos (líneas azules) y la zona de protección representadas.

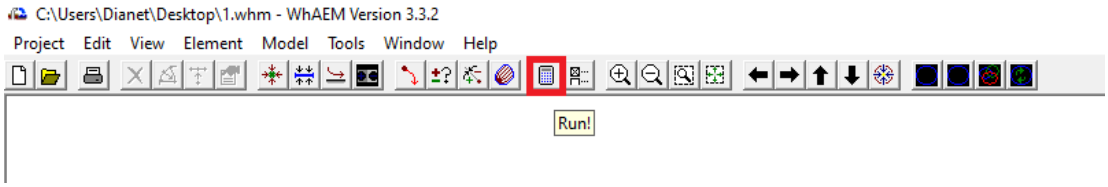

Figura 6. Opción Run.

04 RESULTADOS

La metodología descrita fue aplicada en los tres pozos de abasto del municipio San José de las Lajas, los datos iniciales de cada uno de los pozos: caudal, profundidad total y nivel estático se muestran en la tabla 2. Mientras que en la tabla 3 se muestran los parámetros calculados, para determinar el punto de estancamiento (*Xo*), de la máxima extensión horizontal (*Y*), de la distancia de protección sanitaria (*DPS*) y del ancho de la misma (D_{II}) los cuales aparecen representados en la tabla 4, junto con los parámetros recalculados por el factor de seguridad que según la NC 1192:2017 es 1/3 de los valores obtenidos.

Tabla 2 Datos iniciales de los pozos.

No. Pozo	Q (m^3/d)	Profundidad total (m)	N.E.(m)
1	25	61	35,64
2	90	61	23
3	25	38	12,3

Tabla 3. Parámetros para el cálculo de Xo, Y, W, DPS y DII según la norma cubana.

No. Pozo	Ho (m)	T (m/s)	Kd (m/d)	Δh (m)	L (m)	Io (adim)	Ux (m/d)
1	25,36	100	3,9432	20	15267	0,0013	0,0051
2	38	100	2,6316	20	6932	0,0029	0,0076
3	25,7	100	3,8911	20	16213	0,0012	0,0047

Tabla 4. Xo, Y, W, DPS y DII calculados y multiplicados por el factor seguridad 1.3 según la norma cubana

	Parámetros calculados					Parámetros multiplicados por el factor de seguridad (1,3)				
No. Pozo	Xo (m)	Y (m)	W (m)	DPS (m)	DII (m)	1,3*Xo	1,3*Y	1,3*W	1,3*DPS	1,3*DII
1	-30,63	96,16	192,32	1215,47	405,16	-39,82	125,01	250,02	1580,12	526,71
2	-49,42	155,18	310,36	2872,11	957,37	-64,25	201,74	403,48	3733,75	1244,59
3	-33,18	104,17	208,34	1376,35	458,79	-43,14	135,43	270,86	1789,26	596,42

En la tabla 5, se observan las dimensiones *Xo*, *Y*, *W*, *DPS* y *DII* de las zonas de protección obtenidas tanto por el cálculo mediante la norma cubana vigente en nuestro país, así como los obtenidos mediante el modelo matemático utilizado, donde se observa un coeficiente de correlación de 0,99; con una diferencia entre los dos métodos que van desde los 8m hasta 214 m en la extensión de la *DPS*, siendo el modelo WhAEM (Haitjema and Kraemer, 2018) el que se comporta con una variación mayor en los valores con respecto a la NC, como se puede observar en la figura 7, figura 8 y figura 9, donde aparecen representados los dos métodos para los tres pozos estudiados.

Tabla 5 Dimensiones de las zonas de protección sanitarias según ambos métodos

	Norma Cubana (con factor de seguridad)					WhAEM					
No. Pozo	Xo (m)	Y (m)	W (m)	DPS (m)	DII (m)	Xo (m)	Y (m)	W (m)	DPS (m)	DII (m)	Coeficiente de correlación
1	-39,82	125,01	250,02	1580,12	526,71	-51,58	133,35	266,7	1638,7	571,73	0,99
2	-64,25	201,74	403,48	3733,75	1244,59	-68,12	264,53	529,06	3801,64	1030,09	0,99
3	-43,14	135,43	270,86	1789,26	596,42	-68,26	149,21	298,42	1952,77	459,33	0.99

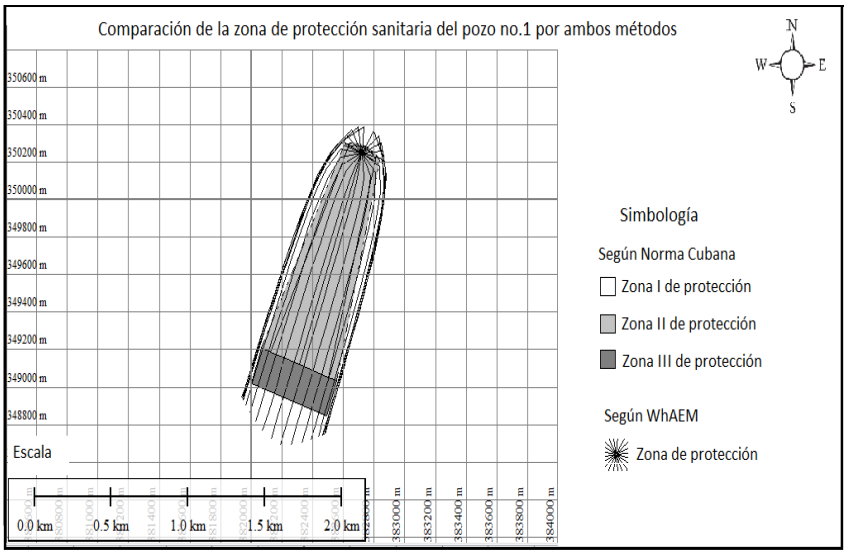

Figura 7. Comparación de las zonas de protección del pozo 1 según ambos métodos.

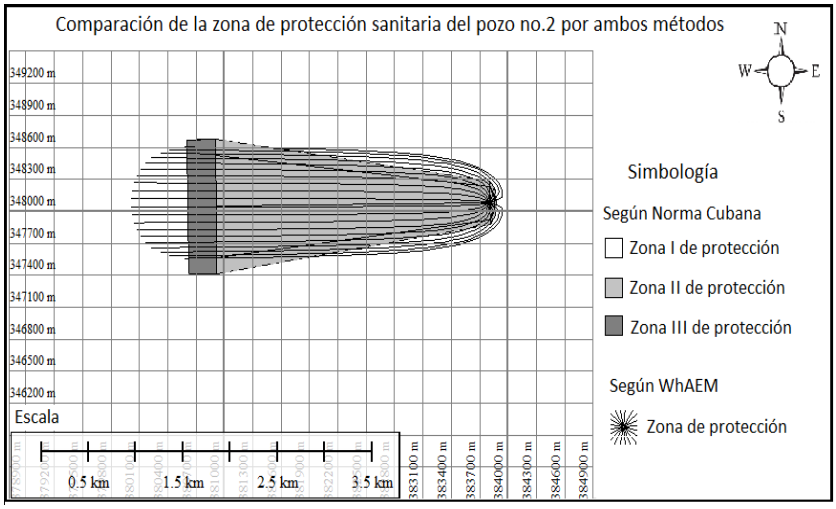

Figura 8. Comparación de las zonas de protección del pozo 2 según ambos métodos.

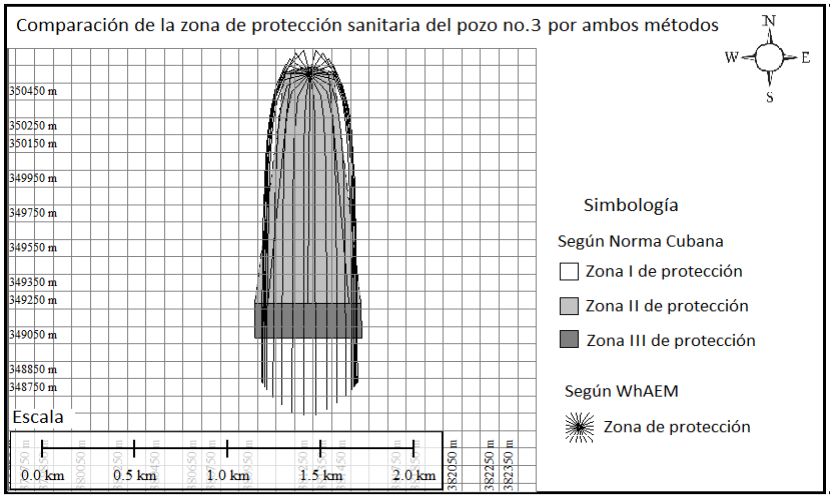

Figura 9. Comparación de las zonas de protección del pozo 3 según ambos métodos.

Los resultados alcanzados por los dos métodos permiten valorar de forma positiva el modelo del WhAEM con respecto a la NC 1192: 2017, lo cual permite que se determine la ZPS, en aquellos pozos

que no se cuente con los datos hidrogeológicos completos, haciendo más fácil la obtención de las diferentes zonas, ya que además de dar valores similares a la NC, el programa nos brinda una salida gráfica.

05 CONCLUSIONES

Se pudieron determinar y actualizar las tres zonas de protección sanitarias de las fuentes de abasto de San José por los dos métodos seleccionados, la norma cubana vigente y por el modelo matemático WhAEM. Arrojando una correlación entre los dos métodos del 99%, lo cual significa que se pueden utilizar cualquiera de los dos métodos para determinar la ZPS.

Las zonas de protección sanitarias deben ser actualizadas periódicamente para asegurar que se están tomando en cuenta los últimos descubrimientos en toxicidad y otros factores relevantes.

Ambos métodos tienen sus limitaciones y pueden ser mejorados mediante el uso de datos más precisos y estudios más detallados de los efectos de las sustancias químicas, estos métodos pueden ser complementarios y utilizados en conjunto dependiendo de la situación y el grado de conocimiento sobre los riesgos asociados.

06 REFERENCIAS

Haitjema H. and Kraemer S. (2018). WhAEM (Nº de versión 3.3.2). Windows. Environmental Protection Agency (EPA). https://www.epa.gov/ceam/wellhead-analytic-element-model-whaem

Pérez Franco D. (1982). Hidráulica Subterránea. Editorial Científico Técnica, La Habana, Cuba. ISSN:0138-6026

Ramíres M. F. (2007). Estudio del proceso de tratamiento químico—Físico de coagulación—Floculación en residuales líquidos. Universidad Central ¨Marta Abreu¨ de Las Villas. Tesis de grado en opción al título de Ingeniero Químico. https://dspace.uclv.edu.cu/xmlui/handle/123456789/1287.

Rodríguez R., Torres I., Suáres Y., García O. y Beltrán J. (2011). Nivel de contaminación por hidrocarburos del petróleo en zonas costeras de Cuba (p.9). https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/3564/047%20NIVEL%20DE%20CONTAMINACI%C3%93N%20POR%20HIDROCARBUROS. pdf?sequence=1&isAllowed=y.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Roxana Aymeé Luis Winograd https://orcid.org/0000-0002-4758-4045

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del artículo.

Dianet Valladares Hernández https://orcid.org/0009-0003-9533-6956

Trabajó en el procesamiento de los datos, haciendo contribuciones en el análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y elaboración de los mapas.

Construcción de conocimiento sobre el agua y los ODS a partir del pensamiento crítico

Néstor Rafael Perico-Granados E-MAIL: nestor.perico@uniminuto.edu.co
Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO

Laura Katherine González-Díaz E-MAIL: laura.gonzalezd@uniminuto.edu.co
Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO

Heidy Madeleine Arévalo-Algarra E-MAIL: heidyarevalo2019@gmail.com
Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO

Constanza Dorey García-Puentes E-MAIL: cogarcia@uniminuto.edu.co
Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO

RESUMEN

Es un artículo producto de investigación que tuvo como objetivo promover la educación sostenible, con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, mediante el pensamiento crítico, en un curso de Ingeniería Civil, en la Universidad Corporación Minuto de Dios-UNIMINUTO. Se construyó conocimiento sobre la sostenibilidad ambiental y se hizo la evaluación para observar los cambios en los aprendizajes sobre la materia. Se obtuvieron conclusiones como la necesidad de incluir en los planes de estudio los contenidos sobre desarrollo sostenible para que exista una mayor apropiación y consolidación de los conocimientos y de las competencias sobre la materia.

PALABRAS CLAVES: conservación del agua, educación para el desarrollo sostenible, objetivos de desarrollo sostenible, pensamiento crítico, proyectos

Exploitation of the hydro-energy potential in an isolated mini-hydroelectric.

ABSTRACT

It is a research article that aimed to promote sustainable education, with the Sustainable Development Goals, through critical thinking, in a Civil Engineering course, at the Universidad Corporación Minuto de Dios-UNIMINUTO. Knowledge about environmental sustainability was built and the evaluation was carried out to observe the changes in learning on the subject. Conclusions were obtained such as the need to include content on sustainable development in the study plans so that there is greater appropriation and consolidation of knowledge and skills on the subject.

KEYWORDS: water conservation, education for sustainable development, sustainable development goals, critical thinking, projects

CITMA CERTIFICADO

Octubre 2023-RECIBIDO *APROBADO-Diciembre 2023*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

A escala global, la energía hidroeléctrica es la forma de energía renovable más utilizada, con más de 1,2 Tera vatios (TW) de capacidad instalada. Sin embargo, la potencia instalada a nivel mundial de las pequeñas hidroeléctricas (hasta 10 MW) se estima en 78 gigavatios (GW) en 2016.Las minicentrales representan aproximadamente el 1, 9% de la capacidad total de energía del planeta (Cayetano et al. 2017).

En las mini y micro centrales hidroeléctricas autónomas ubicadas en regiones montañosas de Cuba, los consumidores no aprovechan todo el potencial energético disponible en el recurso hídrico producto de la mala calidad de la energía generada en estas centrales según las normas técnicas vigentes (Peña y Fariñas, 2020).

Las mini y micro centrales hidroeléctricas de Cuba a menudo presentan problemas de operación, las principales causas son: pobre control de la frecuencia y la potencia, así como deficiente distribución de la demanda (HIDROENERGIA, 2018). Los factores de diseño también implican problemas en la operación como: excesiva relación entre la longitud de la tubería y la carga hidráulica (L/H), momento de inercia (GD2/4g) inadecuado, entre otros. Estos aspectos propician baja calidad de la energía y una baja eficiencia energética, que trae como consecuencia que los hidro grupos operen fuera de su punto de operación óptimo (Peña y Fariñas, 2020).

En este artículo se hace un estudio de caso de una mini hidroeléctrica aislada, que presenta problemas con la disponibilidad del agua para la generación (el agua se agota rápidamente), la misma presta servicio a una comunidad rural, para ello cuenta con una turbina de fabricación cubana 650X65 acoplada a un generador sincrónico de 1800 rpm.

Entre las barreras que actualmente tiene el desarrollo de la hidroenergía está la disminución de los recursos hídricos, por efectos del cambio climático. Esta futura disminución de las aportaciones hidrológicas perturbará sobre todo a las centrales hidroeléctricas de tipo fluyente, sin capacidad de regulación, traduciéndose en una disminución de horas equivalentes de funcionamiento (Cayetano, 2017).

Dos cuestiones resaltan la importancia del estudio, el uso racional del agua y la eficiencia energética de la instalación. Operar la turbina fuera de los parámetros óptimos de diseño no solo repercute en la calidad de la energía eléctrica generada, conduce entre otros problemas a un inadecuado consumo de agua.

Acerca de los métodos para lograr los parámetros óptimos en las mini hidroeléctricas aisladas se propone el almacenamiento de energía (Yadav y Mathew, 2014), empleo de sistemas híbridos (Khodadoost, 2017), regulando el caudal de agua de entrada a la turbina y la carga (Dreidy et al. 2017). Sin embargo, el proyecto y la explotación de las pequeñas centrales hidroeléctricas es el resultado de la aplicación de diferentes ciencias, resulta imposible tratar de resolverlos mediante el análisis fraccionado (Sharma and Singh, 2013).

La investigación bibliográfica realizada demuestra que el tema del aprovechamiento óptimo del potencial hidro energético depende en gran medida de la regulación de los parámetros de trabajo, lo cual resulta complejo para mini hidroeléctricas aisladas, no obstante, no existen evidencias del comportamiento de los parámetros de operación de las turbinas 650X65 en relación con el potencial hidro energético disponible para lograr su aprovechamiento eficiente.

El objetivo del trabajo fue evaluar el aprovechamiento del potencial hidro energético disponible aplicando una metodología integradora que contribuye a la mejora de la eficiencia energética en el proceso de transformación de la energía hidráulica en eléctrica.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

EDUCACIÓN PARA LA SOSTENIBILIDAD

De acuerdo con Mora (2015) el desarrollo sostenible, como todo proceso, avanza con base en los valores y formas de comportamiento humano y no depende solo de la aplicación de técnicas y programas. Según Perico-Granados, Tovar-Torres et al., (2021) con la sensibilización a la comunidad académica, cimentada por la investigación, la docencia y la proyección social se obtienen resultados crecientes en la sustentabilidad. Es un desafío que nos compromete a todos para disminuir los impactos desde el uso de materias primas hasta la utilización de la energía de forma apropiada. De esta manera, la educación para la sostenibilidad es una función estratégica en la sociedad, aspecto que la convierte en un factor clave que incide en el modelo de desarrollo establecido para llevarlo por el camino de la sostenibilidad y la equidad, con la transformación para tener una sociedad justa para todos. Entonces, la educación sostenible debe apoyarse más en los planteamientos éticos aspecto que la hace incompatible con la publicidad agresiva que estimula un consumo poco inteligente. Se requiere un mundo más solidario y menos competitivo.

Por tanto, para una educación en la sostenibilidad, son indispensables herramientas para la alfabetización ambiental, mediante reflexiones con los seres humanos, a través del pensamiento crítico sobre su entorno. Según Rodrigo-Cano et al (2019) la ecociudadanía refuerza la libertad, autonomía crítica y la participación ciudadanía, en las cuestiones sociales, económicas, ecológicas e interculturales, a partir del uso adecuado de la tecnología comunicativa. Al respecto, la educomunicación ambiental debe entenderse para este contexto como la capacitación para la acción y caracterización de la búsqueda de soluciones y participación democrática para una visión de un futuro utópico respecto del ambiente, con acciones para disminuir los riesgos que hoy afronta el ser humano y el planeta, por la carencia de educación frente a su entorno ambiental. Entonces, hace falta colaboración para la mitigación y adaptación al cambio climático, a partir del trabajo estructurado y retador de los maestros en y fuera del aula.

Al respecto, de acuerdo con Valcazar (2019) se necesitan docentes que se cualifiquen para construir el conocimiento indispensable y formen en las competencias que el momento lo requiere, en este caso de sostenibilidad, a los estudiantes. Igualmente, la responsabilidad se extiende a todos los actores educativos y entre ellos docentes, estudiantes, directivos y administrativos. En este aspecto, es esencial la participación de estos actores y de representantes gubernamentales y organizaciones sociales orientadas a la solución de problemas sociales de la vida cotidiana, a partir de la formación en las competencias humanas y disciplinares. De acuerdo con Núñez (2019) y Perico-Granados, Tovar-Torres, et al. (2021) la formación por competencias comprende habilidades y destrezas que se fortalecen con la interacción académica y la comunicación educativa y en muchos casos se fortalecen con proyectos. Entonces, se forman competencias para la educación cimentada en presupuestos con la orientación para la supervivencia de las personas de esta generación y de las venideras.

De la misma manera, Núñez (2019) dice que hacen parte para la formación sostenible la pertenencia social de los estudiantes, con sus componentes diversos, complejos, transdisciplinares, socio económicos, culturales y didácticos, con la construcción del conocimiento de manera transversal, en teoría y en práctica, en sus entornos. De acuerdo con Murga-Menoyo (2015) la

formación en sostenibilidad solicita su inclusión en el currículo y el compromiso real y consciente de los maestros. Estos aspectos trabajados con reflexión y flexibilidad contribuyen en la formación de seres humanos con elementos para la sostenibilidad. Así, se construyen competencias en los diferentes niveles educativos, en los profesores y en los discentes con principios y valores del desarrollo sostenible. Surge la sostenibilización curricular, como educación para el desarrollo sostenible y no sobre el desarrollo sostenible. Entonces, es la propuesta para la formación de competencias en la sostenibilidad adaptada a circunstancias, niveles y perfiles del entorno en donde se lleva a cabo el proceso.

PENSAMIENTO CRÍTICO

Para los docentes es una responsabilidad formar en el proceso del pensamiento crítico a los estudiantes a lo largo de los espacios académicos en la construcción del conocimiento y en la evaluación integral: heteroevaluación, coevaluación y autoevaluación (López-Fernández, 2021). En el espacio académico, de acuerdo con Mackay-Castro et al., (2018) cuando una persona se pregunta acerca de ciertos temas, puede obtener respuestas constructivas en un contexto más analítico, haciendo un buen uso de su pensamiento crítico, que incluye razones y argumentos que se presentan al momento de analizar un texto. Sin embargo, el pensamiento crítico se conceptualiza de diferentes formas a lo largo del tiempo, por autores que investigan el tema. Por ahora, interesa la perspectiva para su aplicación en la pedagogía. De esta manera, se resuelven problemas a partir de las estrategias, los procesos y se toman decisiones en el aula y en los diferentes ambientes de aprendizaje, pero sus competencias quedan para todo el desarrollo profesional y personal.

De acuerdo con Bezanilla, et al. (2018) su enseñanza y su aprendizaje en el aula, parte del debate a lo largo de la escuela en primaria, secundaria, profesional y posgradual. Al respecto, la lógica es importante para cimentar el pensamiento crítico, que se construye a partir de los pensamientos abstractos y críticos mentales, para aumentar el nivel de conocimiento y de capacidades para decidir. Según Mackay-Castro et al. (2018) el usar eficientemente el pensamiento crítico, incrementa su capacidad de análisis y cualificación de la información relevante y útil. Para Perico-Granados, Tovar-Torres, et al. (2021), con una adecuada orientación en la investigación por proyectos se fomenta y desarrolla la postura crítica para transformar los contextos. Entonces, se debe educar en pensamiento crítico para la vida durante la etapa educativa, profesional y en la rutina del día a día y para ello la formación de docentes con pensamiento crítico es el primer paso.

LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se plantearon como una agenda universal para el desarrollo sostenible a favor de las personas, del planeta y la prosperidad. Tienen entre sus propósitos fortalecer la paz universal dentro del concepto de libertad, erradicar la pobreza en todas sus formas, incluyendo la pobreza extrema, educación de calidad, agua limpia y saneamiento y ciudades y comunidades sostenibles, entre otros, a partir de las drásticas acciones y consecuencias que producen los procesos climáticos (Naciones Unidas, 2018). En un proceso de negociación entre los miembros de las Naciones Unidas, actores de la sociedad civil, de la academia y el sector privado establecieron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, con sus Objetivos de Desarrollo Sostenible. Se incluyen 17 objetivos y 169 metas con los aspectos económicos, sociales y ambientales.

Allí se presentaron las prioridades de la comunidad internacional para resolverlas entre los años 2015-2030, con fundamento en la igualdad y dignidad de las personas, con propuestas para cambiar el estilo de desarrollo, con el respeto al ambiente (Naciones Unidas, 2018). Con base en los resultados que hasta el momento son débiles, de acuerdo con Bello-Benavides et al (2021) es urgente diseñar y

ejecutar acciones que mitiguen el cambio climático y en unos casos permitan la adaptación a las nuevas circunstancias. Según Araque-Niño, et al., (2018), con la visibilización de los escollos ambientales, propuestas de cambios del entorno y con promoción de sus soluciones se consiguen avances significativos. Entonces, esta generación más que otras, tiene la responsabilidad de afrontar el tema y promover todas las acciones indispensables para la sostenibilidad de las personas y de la naturaleza en el tiempo.

Con respecto al agua limpia y saneamiento, se espera que se garantice su disponibilidad y su gestión sostenible para todas las personas, quienes deben tener acceso a agua potable segura y asequible, dado que unas de ellas en el mundo tienen el acceso a este servicio y a los sistemas de saneamiento, pero lamentablemente muchas no cuentan con ello. Según las Naciones Unidas, (2018) la escasez del agua afecta a más del 40% de la población a nivel mundial y con las proyecciones, sin virajes importantes, en el año 2050 por lo menos una de cada cuatro personas se verá afectada por recurrente escasez de agua. Para Cajigal Molina et al., (2017) las consecuencias las sufren las personas vulnerables de los países en desarrollo, aunque quienes más inciden en su generación son los desarrollados.

De acuerdo con Perico-Granados, Arévalo-Algarra et al., (2021) sufren las consecuencias de la escasez y a la vez también las de las inundaciones por las deforestaciones en las cuencas, dado que hace falta agua en unos periodos de tiempo y en otros momentos sobra. Ambos fenómenos son causados por el cambio climático y generados especialmente por el mismo ser humano. Se necesita cooperación internacional para proteger humedales, ríos y especialmente las cuencas que son las que regulan los caudales de forma natural y para ellos es necesario restaurar los ecosistemas. En este sentido, también se requiere promover el tratamiento de agua, en lo posible con métodos naturales, para evitar la contaminación y las consecuencias dañinas de los químicos (Perico-Granados, Montaña et al., (2019).

Con respecto al objetivo de Ciudades y Comunidades Sostenibles, se pretende que los asentamientos humanos sean inclusivos, resilientes y sostenibles, dada la alta concentración de personas en unas ciudades. De acuerdo con Naciones Unidas, (2018) en año 2014 existían 28 ciudades, con 453 millones de personas, con un promedio mayor de 16 por cada una. En ellas se desarrollan procesos de cultura y negocios, pero también crece la pobreza. Entonces, para la sostenibilidad en las ciudades y en las comunidades se deben crear viviendas asequibles y de buena calidad, invertir en las condiciones de los asentamientos vulnerables, mejorar el transporte público y construir espacios verdes. Sin embargo, tal vez lo más importante es invertir en preservar las cuencas aguas arriba de las comunidades y de las ciudades para evitar deslizamientos catastróficos y sequías arrasadoras.

Según Gamboa-Bernal (2015) con verdaderos cambios de actitud y comportamiento social, mediante una cultura solidaria, inclusiva y menos dependiente de ideologías de mercado consumista, que llevan a consumos excesivos de recursos, se pueden desarrollar los objetivos sostenibles para la vida y para la naturaleza. En este sentido, los ODS orientados a la disminución del cambio climático son viables, pero con un cambio de la cultura dominante, con base en poner en primer lugar el medioambiente que, a las personas, dado que, si se trabaja más en pro de un espacio sano en el mundo, el beneficiado será para el ser humano y todo ser vivo que habita en el planeta.

03 METODOLOGÍA

Esta investigación hace parte de una de mayor cobertura con estudiantes de seis espacios académicos. En esta se llevó a cabo con el curso de Hidráulica de Tuberías, en sexto semestre durante el año 2021, con doce estudiantes, que representan la población. Se hizo de forma cualitativa, con un proceso de acción en educación. En un primer momento se aplicó una valoración para establecer las competencias y conocimientos que tienen los estudiantes sobre la retención del agua en los páramos, los efectos que producen en ellos el incremento de la frontera agrícola y los daños aguas abajo por las deforestaciones. Se hizo con una matriz que fue validada por un comité de expertos con formación de doctorado. Durante el semestre la investigadora principal, durante cinco a diez minutos por cada sesión de clases, cada semana, presentó la importancia del pensamiento crítico y su incidencia en los compromisos de los estudiantes con las comunidades y las ciudades sostenibles y el agua, como parte de los Objetivos de Desarrollo sostenible, ODS.

Igualmente, la investigadora desarrolló el método de proyectos con sus estudiantes de pregrado, en equipos de dos o tres de ellos, con problemas conocidos en sus inmediaciones, con el propósito de construir con mayor fundamento los conocimientos. Se hizo con la propuesta de Perico-Granados, Galarza, et al., (2020) para su formulación y desarrollo. Al finalizar el semestre se tomó una segunda valoración, con la misma rúbrica, para establecer los avances en las competencias y conocimientos descritos en los estudiantes. En todos los casos se pidieron los permisos escritos de los participantes para el tratamiento de los datos.

En este segundo momento se estableció un problema del entorno de los estudiantes sobre el páramo de Guerrero, aspecto mencionado muy poco a lo largo del curso, ubicado en el departamento de Cundinamarca. Este tiene en su cobertura vegetal varias especies nativas, pero se han sembrado otras exóticas como los eucaliptus y los pinos, que lamentablemente deterioran los suelos, disminuyen la calidad y el espesor de la capa vegetal y como consecuencia merma la capacidad de retención del agua. De acuerdo con Perico-Granados, Arévalo-Algarra et al., (2021) los páramos en la capa vegetal pueden retener hasta el 90% de su volumen en agua, en su estado natural y con su disminución baja la capacidad de regulación. Al respecto, junto con la siembra de cultivos de forma periódica, por parte de los campesinos, la vida útil del embalse del Neusa se acorta y disminuyen los caudales para el suministro del agua a las poblaciones como Zipaquirá, Nemocón y Cogua.

De las preguntas que se formularon a los estudiantes sobre la situación descrita, con base en la matriz de la rúbrica validada se cuestionó sobre los argumentos analíticos, con base en referentes, de lo descrito en el páramo. Se indagó sobre los conceptos éticos que de allí se derivan y la contradicción sobre los intereses de las comunidades involucradas. Igualmente, se cuestionó sobre las actitudes de ellos en procesos similares que se presentarán en su futuro personal y profesional. Sobre los conocimientos y competencias de los discentes se valoró con deficiente (D), regular (R), bueno (B) y muy bueno (MB), en ambos momentos. En la tabla 1 se presentan en orden secuencial las respuestas en el momento uno y en el momento dos a las cuatro preguntas descritas.

Tabla 1. Respuestas de estudiantes sobre el Páramo.

Estudiante	Preg.1	Preg.2	Preg.3	Preg.4	Preg.1	Preg.2	Preg.3	Preg.4
Uno	D	D	D	D	D	D	D	D
Dos	D	D	D	D	R	R	R	B
Tres	D	D	D	D	R	R	R	R
Cuatro	D	D	D	D	R	R	R	R
Cinco	D	D	D	D	R	R	R	R
Seis	D	D	D	D	R	B	R	R
Siete	D	D	D	D	R	R	R	R
Ocho	D	D	D	R	R	R	R	B
Nueve	D	R	R	R	R	R	B	B
Diez	D	D	D	D	R	R	R	R
Once	R	R	R	R	B	B	B	B
Doce	D	D	D	D	D	D	D	D

Fuente: autores de la investigación, 2021

04 RESULTADOS Y ANÁLISIS

La profesora e investigadora les advirtió desde el principio que los aprendizajes y las competencias que se tratarían sobre los ODS y el pensamiento crítico son muy importantes, pero que al finalizar el curso no tendrían evaluación. Al respecto, en promedio diez estudiantes en su primera valoración presentaron conocimientos y competencias deficientes y con el trabajo de la investigadora principal, en la segunda pasaron en promedio a regular. Sin embargo, dos discentes en ambos momentos, al principio del semestre y luego de trabajar los contenidos sobre sostenibilidad al finalizar el semestre, continuaron con el mismo deficiente. Cuatro tuvieron bueno con una breve argumentación, especialmente en las propuestas, aunque con poca citación. Solamente uno de ellos pasó de regular en promedio en un primer momento, con unos conocimientos previos sobre la temática, a bueno en el segundo, con propuestas sobre responsabilidad en su profesión. Entonces, es posible que los discentes se preocuparan por los contenidos de la asignatura que sí tendría evaluación y los relacionados con el ambiente no los tomaron en serio y fueron vistos incluso en unos casos de manera irresponsable. Este aspecto Murga-Menoyo (2015) lo presenta como una necesidad para incluirlo como sostenibilidad curricular. Se puede concluir que es necesario incluir los conocimientos y competencias de sostenibilidad en los planes de estudio para que aprendan, tanto de forma teórica como práctica y puedan ser evaluados.

En cuanto a la primera pregunta sobre los análisis que ellos hacen con respecto a lo descrito en el páramo, con argumentaciones y citas, los estudiantes tienen conciencia por la afectación que le genera la agricultura al páramo como la erosión y por los sedimentos que produce, con disminución de la capacidad del embalse. Expresaron que unos árboles, como los exóticos, son fuente de limpieza del aire contaminado, con la absorción del gas carbónico y la expulsión de oxígeno, pero a la vez son dañinos para las fuentes de agua. Sin embargo, tienen claro que los campesinos necesitan sembrar para obtener su sustento, aspecto que en los páramos crea daños en los acuíferos del cual se pueden obtener las fuentes de agua potable. Así se contribuye al daño que genera todos los años con sedimentos, y daños climáticos, aspectos que plantean González-Gaudiano et al., (2020). En este sentido, las prácticas agropecuarias afectan a los páramos que, como ecosistemas únicos e indispensables para la conservación de agua, se están degradando por estas malas y dañinas prácticas.

Ellos son conscientes que no se pueden sacar a los campesinos de los páramos de forma fácil y rápida y plantean que debe existir un equilibrio entre el suelo destinado a cultivo y el suelo

considerado como reserva y como recurso natural valioso, fuente de agua y albergue de especies endémicas que deben ser protegidas. Sin embargo, insisten en que la tierra de páramo no debe ser destinada a cultivo porque estos son reservorios de agua que alimentan nuestras fuentes de agua potable. Ellos sugieren que en pendientes mayores a 40 grados no se permita la agricultura ni explotación minera ni agropecuaria y además se proteja la ronda de los ríos en los 30 metros que se tiene establecido. Estos aspectos se deben cumplir en todas las áreas del territorio nacional y con mayor razón en reservas naturales. Lastimosamente en la realidad estás normas no se cumplen, cada vez se talan más árboles en los páramos y en los bosques y se explota la tierra contaminando ríos y sedimentando los embalses. Tienen buenas exposiciones, pero adolecen de argumentación conceptual y se hacen sin citas de normas o de autores, aspecto que requiere de fundamentos con un pensamiento crítico, como lo expresa Cangalaya (2020). Con dos excepciones diez estudiantes tuvieron deficiente al principio y en la segunda evaluación pasaron a regular. Uno de ellos sí hizo buenas reflexiones al respecto. Entonces, si hace falta mucha más formación en los discentes para que tomen conciencia del presente y asuman en perspectiva sus responsabilidades sobre la sostenibilidad ambiental.

Con respecto a la pregunta sobre los conflictos éticos los estudiantes vislumbran las diferencias de los modos de vida en el campo y sus necesidades para sobrevivir, pero advierten sobre las consecuencias para otras comunidades. Sin embargo, plantean que el páramo debe tener una mayor protección, por parte del Estado colombiano para evitar que los buenos propósitos se queden en ilusiones como lo expresa Rodrigo-Cano et al (2019). En este sentido, varios de ellos expresan, con respecto a las consecuencias que produce la ingeniería civil, entre otras, sobre la sobreexplotación de las materias primas para la construcción y el consumo de energía, pero la más significativa es la afectación a los páramos y como consecuencia sobre el flujo de agua. Al respecto, en la construcción y en muchas obras se hacen usos inadecuados de la misma, con frecuencia se malgasta el agua y se van agotando las reservas que contienen los páramos, con la posibilidad cada vez menor de recarga por su deterioro.

De la misma manera, plantean que como profesionales de la ingeniería civil es importante tomar conciencia para hacer mejor uso de este preciado líquido, diseñando mejores sistemas de acueductos para que sean óptimos. Adicionalmente, es necesario optimizar el diseño y construcción de las plantas de tratamiento de aguas residuales para descontaminarlas y optimizar la cantidad de aguas disponibles para varios usos domésticos, de abrevadero y de regadío, como lo plantean Araque-Niño et al., (2018). Algunos de ellos expresaron la incidencia de la corrupción, a veces por desinformación, que muchas otras personas desobedecen las normas, se aprovechan de las tierras y no se respetan las cuencas. Con ello atentan contra las reservas naturales y contra los bienes púbicos, en detrimento del bienestar de la mayoría de las personas. En términos generales los discentes presentaron ideas interesantes con ninguna argumentación, con base en autores o en normas. La valoración fue similar a la primera pregunta, aunque ya hubo dos personas que hicieron mejores reflexiones en el segundo momento. Al respecto, es necesario formar a los estudiantes con conceptos y cimentación en autores que han trabajado estos temas, con más profundidad, para que su argumentación sea sólida.

En cuanto a las contradicciones que los estudiantes observan entre las comunidades y los intereses individuales, los discentes pueden ver las consecuencias negativas de la explotación del páramo y observan sus procesos desastrosos en varias causas. Proponen privilegiar el cuidado del ambiente, por encima del ser humano, para que este pueda sobrevivir como especie en el tiempo. Hoy se explotan los recursos naturales de forma poco inteligente y sin un balance entre la naturaleza y lo que se necesita para el futuro. Insisten en la falta de conocimiento y de conciencia por parte de

esta generación quienes no están haciendo lo suficiente en el cuidado y conservación del medio ambiente. Se presenta en especial en los ecosistemas de páramos, ya que la mayoría de las personas se concentran más en la producción de recursos económicos y en la acumulación de productos y de bienes, sin mirar las afectaciones que con estos aspectos se producen al entorno y especialmente a la naturaleza. Proponen investigar más como lo expresan Perico-Granados et al., (2019) para remplazar los químicos por medios naturales en tratar las aguas. En este sentido, ven con más preocupación por las afectaciones que se están generando para las futuras generaciones.

Ellos expresaron sobre la producción de los alimentos, por parte de los grandes agricultores, que se preocupan en producir con independencia de las consecuencias negativas a las cuencas y les quitan espacio a los bosques y a los páramos. Dijeron que los agricultores y los ganaderos se preocupan por su bienestar presente y no ven que, en el futuro, por las pérdidas en los bosques y en los páramos también se verán afectados ellos, como todos los seres vivientes. Se necesita de un proceso de sensibilización como lo plantea Bello-Benavides, et al (2021), en los jóvenes y en las comunidades que tienen una responsabilidad al respecto. Cuando no se protegen los recursos que se tienen en el presente, probablemente las generaciones de hoy, pero con seguridad las futuras van a pagar un costo muy elevado por el agua, ya que estos gremios tienen intereses particulares en el presente, que ponen por encima de los intereses colectivos, aspecto que con toda seguridad ocasionará grandes dificultades en los años por venir.

En un sentido parecido, expresaron que las actuales generaciones que se dedican a la minería del carbón, del oro y de otros minerales piensan en el aprovechamiento de los recursos naturales con fines de acumulación para su beneficio, pero dejan de lado la conservación natural para el bienestar de las futuras generaciones. De manera irresponsable dejan escombros en sitios que contaminan las aguas de escorrentía y las subterráneas, el suelo y el aire. Adicionalmente, utilizan químicos como el mercurio que dañan la fauna y la flora terrestre y acuática. Falta formación en principios, valores, conciencia y solidaridad con las personas que viven cerca y con el ambiente y así acaban con la flora y desplazan la fauna como lo expresa Murga-Menoyo (2018). Con excelentes ideas presentan sus exposiciones, aunque con poca argumentación referenciada con autores o con normas, que hagan visible el desastre que un puñado de hombres le infligen a la naturaleza. En los indicadores se tienen resultados parecidos a las preguntas anteriores, pero en el segundo momento se incrementó la reflexión importante de un estudiante que obtuvo una buena calificación.

En cuanto a la pregunta sobre sus compromisos presentes y futuros los estudiantes fueron más explícitos. Al respecto, la totalidad de los estudiantes conocen unos de los problemas que se causan al ambiente y en este caso a los páramos, en diferentes grados de percepción. Ellos sí tienen la intención de preservar estos ecosistemas, pero hace falta más conocimientos y competencias que les permita con más claridad afrontar los problemas que se están presentando. Falta formación y construcción de principios y de valores para la sostenibilidad, como lo plantea Núñez (2019). Entre otras propuestas plantean fomentar la educación a los campesinos y a los estudiantes para comenzar con la solución de este tipo de problemas. Al respecto, es vital construir una legislación actualizada y con más exigencias para evitar la permisividad del Estado con muchas personas que se dedican a explotar los recursos sin ningún tipo de intervención del gobierno, como en las grandes quemas de los bosques y selvas para dedicar esas tierras a cultivos ilícitos y a la ganadería extensiva.

De otro lado, proponen desarrollar campañas para establecer compromisos de ahorro del agua en todos los niveles y buscar maneras en la profesión de la ingeniería que sean eco amigables y que en lo posible no generen impactos negativos al medio ambiente. Varios estudiantes se comprometen a llevar a cabo sus proyectos para que sean sostenibles y evitar las afectaciones a esta y a las

generaciones futuras, especialmente se comprometen a aplicar y promover el conocimiento de un buen trato hacia los páramos y la naturaleza en general. Entonces, es indispensable formar a los estudiantes para que al ejercer la profesión analicen las consecuencias irreversibles que se pueda generar y se encuentren las formas de evitarlas, como lo proponen Bello-Benavides et al., (2021).

Cuatro estudiantes propusieron el compromiso para elaborar mejores diseños en sus obras para optimización de los recursos no renovables y evitar el daño a los renovables. Ellos mismos ven la oportunidad en sus construcciones formar a sus trabajadores para que actúen de forma solidaria con todas las personas y con las futuras generaciones. Igualmente, proponen establecer diferentes terrenos que sean aptos para los cultivos y de esta manera se protegen los reservorios de agua que están en estos yacimientos, que afortunadamente abundan en el país. Ellos tienen conciencia de la riqueza que hay en Colombia, dado que aquí están ubicados más del 50% de los páramos que hay en el mundo y si los descuidan se perjudica más al planeta. Entonces, sobre el aspecto agropecuario se puede encontrar un equilibrio para cuidar el ambiente y a la vez buscar nuevas oportunidades para quienes viven de estos medios.

Cuando los estudiantes, en funciones profesionales, tengan cargos con competencias de protección ambiental, harán cumplir las normas ambientales para el correcto aprovechamiento de los recursos. Ellos cumplirán con la preservación y protección de las rondas de los ríos y supervisarán para la correcta disposición final de los deshechos de las obras. Se comprometen a llevar a cabo capacitaciones sobre los parámetros de las normas ambientales a la población rural, con quienes tiene interacción laboral y a sus colaboradores, para concientizarlos sobre el correcto uso de los recursos, especialmente el agua, los árboles y los materiales de construcción. De esta manera se evita que sufran las consecuencias del cambio climático, que como lo expresan Cajigal Molina et al., (2017) lo sufren las comunidades más vulnerables.

Es importante establecer medidas sostenibles y formar a las personas, tanto de manera teórica como práctica, sobre el manejo adecuado de los recursos, como la apropiada separación de los desechos, cuidado de los ríos, disminuir la contaminación, entre otros aspectos que ellos proponen que pueden implementar en sus vidas profesionales. Argumentan que por el mal uso que se hace con los recursos y luego en la disposición inapropiada de los residuos, se está viendo el incremento de la contaminación ambiental. Igualmente, plantean que se comprometen a explorar opciones para desarrollar construcciones amigables con el medio ambiente, con la menor explotación de materias primas para el uso en estos procesos, con la devolución al planeta, así sea parcial, de lo que se le ha quitado. Entonces, existen elementos para afirmar sobre los daños que le generan las empresas, por su interés primordial en ver crecer los números negros en sus balances y muy poco piensan en cómo ayudar para sostener el planeta, bajar el índice de contaminación y la aplicación de los buenos usos de los recursos naturales.

05 CONCLUSIONES

La educación en desarrollo sostenible es fundamental que se lleve a cabo, con implementación en los currículos, para que los estudiantes construyan los conocimientos de manera teórica y práctica, desarrollen las competencias con mayor responsabilidad y se evalúen al finalizar el periodo correspondiente, en conjunto con todos los de la asignatura correspondiente.

Es una tarea inaplazable llevar a cabo mucha más formación en los discentes, para que tomen conciencia del presente sobre los daños que se producen a los páramos y asuman en perspectiva sus responsabilidades sobre la sostenibilidad ambiental. La formación en pensamiento crítico debe

llevarlos a analizar los problemas de degradación de estos reservorios y desarrollar propuestas que permitan obtener soluciones a corto y mediano plazo.

En los conocimientos y competencias sobre la parte ética, aunque unos discentes tienen conceptos claros, se necesita construir más conocimiento y competencias para la búsqueda de soluciones hacia las comunidades que desarrollan las explotaciones agropecuarias y para quienes derivan de allí el agua para sus diversas necesidades.

Es una prioridad comenzar de forma responsable con la protección de los recursos que se tienen en el presente de forma práctica y teórica, especialmente con la formación de los estudiantes, para que ellos adquieran el compromiso con la seguridad de las futuras generaciones y eviten pagar un costo muy elevado por el agua. De otro lado, los gremios tienen intereses particulares en el presente, que ponen por encima de los intereses colectivos, entonces a quienes les corresponde tomar la iniciativa, para la conservación de los seres vivos, en un principio es a los integrantes de la academia.

Los estudiantes tienen la intención de preservar estos ecosistemas, pero adolecen de los conocimientos y competencias para que lo puedan hacer. Se necesita formación y construcción de principios y de valores para la sostenibilidad para que su compromiso sea sólido y lo puedan llevar a la práctica, con base en conceptos construidos con profundidad. Entonces, así se pueden ejecutar diseños en sus obras para optimización de los recursos y evitar el uso de los que no sean indispensables.

06 REFERENCIAS

Araque-Niño I., Britto-Aponte M., Cuellar-Rodríguez L., Perico-Granados N. (2018). Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá, Revista de tecnología, ISSN 1692-1399, V 17 N 1, 37-48, Universidad del Bosque. Colombia. https://revistas.unbosque.edu.co/index.php/RevTec/article/view/2950

Bello Benavides L. O., Cruz Sánchez G. E., Meira Cartea P. A. y González Gaudiano E. J. (2021). El cambio climático en el bachillerato. Aportes pedagógicos para su abordaje. Enseñanza de las Ciencias, ISSN: 0212-4521 39(1), 137-156. España. https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3030.

Bezanilla M., Poblete M., Fernández D., Arranz S. y Campo L. (2018). El Pensamiento crítico desde la perspectiva de los docentes universitarios. *Estudios pedagógicos (Valdivia)* ISSN 0718-0705,44 (1): 89-113. Chile. https://scielo.conicyt.cl/pdf/estped/v44n1/0718-0705-estped-44-01-00089.pdf

Cajigal Molina E., Maldonado González A. L. y González Gaudiano E. (2017). Resiliencia en docentes: una vía para mejorar capacidades de las poblaciones ante inundaciones agravadas por el cambio climático. México. Revista Diálogo Educacional. ISSN: 1981-416X, 17 (55). Pp. 1445-1464. ISSN: 1518-3483. ISSNe: 1981-416x. http://dx.doi.org/10.7213/1981- 416X.17.055.DS01. Disponible en: https://periodicos.pucpr.br/index.php/dialogoeducacional/article/view/22305/22536

Cangalaya L. (2020). Habilidades del pensamiento crítico en estudiantes universitarios a través de la investigación. Desde el Sur, ISSN: 2415-0959, 12(1), pp. 141-153. Perú.

Gamboa-Bernal G. (2015). Los objetivos de desarrollo sostenible: una prespectiva bioética. Persona y Bioética ISSN 0123-312, 19 (2): 175-81.Colombia. https://doi.org/10.5294/pebi.2015.19.2.1

González-Gaudiano E., Meira-Cartea P. y Gutiérrez Pérez J. (2020). ¿ Cómo educar sobre la complejidad de la crisis climática? Hacia un currículum de emergencia, Revista mexicana de investigación educativa, ISSN: 2594-2271, V 25 (87), pp. 843-872. México.

López Fernández R., Nieto Almeida L. E., Palmero Urquiza D. E. y León González J. L. (2021). Transformaciones al componente de la didáctica evaluación utilizando la investigación-acción participativa. Revista Universidad y Sociedad, ISSN 2218-3620, 13(2), 170-175. Cuba

Mackay Castro R., Franco-Cortazar D., Villacis-Pérez P. (2018). El pensamiento critico, aplicado hacia la investigación. Revista Universidad y Sociedad, SSN 2218-3620, vol.10 no.1 Cienfuegos, Cuba. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202018000100336#:~:text=En%20el%20%C3%A1rea%20investigativa%2C%20el,este%20estudio%20sea%20m%C3%A1s%20confiable.&text=El%20estudio%20del%20pensamiento%20cr%C3%ADtico,el%20%C3%A1rea%20te%C3%B3rica%20y%20pedag%C3%B3gica.

Mora Penagos W. (2015). Desarrollo de capacidades y formación en competencias ambientales en el profesorado de ciencias. Revista de la Facultad de Ciencia y Tecnología Tecné, Episteme y Didaxis: TED-ISSN: 2323-0126 1 (38): 185-203.Colombia. https://doi.org/10.17227/01213814.38ted185.203

Murga-Menoyo M. A. (2015). Competencias para el desarrollo sostenible: las capacidades, actitudes y valores meta de la educación en el marco de la Agenda global post-2015. Foro de Educación, ISSN: 1698-7802, 13(19), 55-83. España. doi: http://dx.doi.org/10.14516/fde.2015.013.019.004

Murga-Menoyo M. A. (2018). La formación de la ciudadanía en el marco de la Agenda 2030 y la Justicia Ambiental. Revista Internacional de Educación para la Justicia Social, ISSN: 2254-3139, vol. 7, núm. 1, pp. 37-52. España.

Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf.

Núñez I. (2019). Educación para el Desarrollo Sostenible: hacia una visión sociopedagógica. Controversas y Concurrencias Latinoamericanas ISSN: 2219-163119: 291-314. Uruguay. https://www.redalyc.org/jatsRepo/5886/588661549016/588661549016.pdf.

Perico-Granados N., Montaña A., Uricoechea M., Vargas M. y Arévalo-Algarra H. (2019). Propuesta alternativa de coagulantes naturales, L'esprit Ingénieux, ISSN: 2145-927410 (1), 127-142. Colombia. http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/2125

Perico-Granados N., Galarza E., Díaz Ochoa M., Arévalo-Algarra H.y Perico-Martínez N. (2020). Guía práctica de investigación en ingeniería: Apoyo a la formación de docentes y estudiantes, Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO. En: https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/10822/Libro_Gu%C3%ADa%20practica%20de%20investigaci%C3%B3n%20en%20ingenier%C3%ADa_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Perico-Granados N., Tovar-Torres C., Reyes-Rodríguez C., y Perico-Martínez, C. (2021). La Formación de docentes y transformaciones desde la ingeniería, Bogotá: Corporación universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO, en: https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/11822

Perico-Granados. N.R. Arévalo-Algarra. H.M. Reyes-Rodríguez. C.A. Perico-Martínez. C.A. Claudia–Vera. M. y Monroy. J. (2021). Sitios de inundaciones causadas por los ríos La Vega y Jordán, Tunja (Boyacá). Tecnura, ISSN: 2248-7638, 25(67), 86-101.Colombia. https://doi.org/10.14483/22487638.15248

Rodrigo-Cano D., Pico M. y Dimuro G. (2019). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible como marco para la acción y la intervención social y ambiental. Retos ISSN: 1390-8618, 9 (17): 25-36.Ecuador. https://doi.org/10.17163/ret.n17.2019.02

Valcazar E. (2019). Las competencias del docente de posgrado. Un estudio comparativo en cuatro maestrías especializadas desde la percepción de los estudiantes. Desde el Sur, ISSN 2415-0959, 11(1), pp. 191-206. Perú

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Néstor Rafael Perico-Granados https://orcid.org/0000-0003-1768-793X

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

Laura Katherine González-Díaz https://orcid.org/0000-0002-3929-5817

Participó en el diseño de la investigación y análisis de los resultados.

Heidy Madeleine Arévalo-Algarra https://orcid.org/0000-0002-5312-0407

Realizó contribuciones en la redacción del informe final.

Constanza Dorey García-Puentes https://orcid.org/0000-0002-4684-9750

Participó en el diseño de la investigación, el trabajo de campo, análisis de los resultados y redacción de las conclusiones finales.

Estabilidad de taludes en el puente sobre el río Copueno en Morona Santiago-Ecuador

Jorge Xavier Villazhañay Zúñiga E-MAIL: jvillazhanay2642@pucesm.edu.ec
Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Manabí

Jorge Alexander Bucheli García E-MAIL: jabucheli@puce.edu.ec
Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil

RESUMEN

Zonas críticas de la carretera E45 (Troncal Amazónica), Provincia de Morona Santiago, Ecuador, tienen un alarmante historial de inestabilidades de taludes, que han bloqueado la vía e impactado negativamente a la población más vulnerable por las condiciones inseguras. En la presente investigación se evalúa la estabilidad de taludes de acceso al puente sobre el río Copueno, Provincia de Morona Santiago, Ecuador. Se reporta la caracterización geológica-geotécnica, los procesos que influyen en el desprendimiento de materiales, evaluación y análisis de los estados límites de falla de los sitios de inestabilidad.

PALABRAS CLAVES: estabilidad, parámetros geotécnicos, taludes.

Slope stability on the bridge over the Copueno River in Morona Santiago-Ecuador

ABSTRACT

Critical areas of the E45 highway (Troncal Amazónica), Morona Santiago Province, Ecuador, have an alarming history of slope instability, which have blocked the road and negatively impacted the most vulnerable population due to unsafe conditions. In the present investigation, the stability of access slopes to the bridge over the Copueno River, Morona Santiago, Ecuador Province, is evaluated. The geological-geotechnical characterization, the processes that influence the detachment of materials, evaluation and analysis of the limit states of failure of the instability sites are reported.

KEYWORDS: stability, geotechnical parameters; slopes.

CITMA CERTIFICADO

Octubre 2023-RECIBIDO *APROBADO-Diciembre 2023*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de masa son uno de los desastres naturales que más daño producen a una población, en comparación a las inundaciones y terremotos (Gartner 2023; Pourghasemi et al. 2023; Suárez 2009; Zumba 2023); particularmente en Ecuador esta problemática ha sido de gran impacto en el ámbito socioeconómico y ambiental, sobre todo para la población y sectores más vulnerables, donde las pérdidas económicas, materiales y hasta humanas, son alarmantes; por lo anterior la evaluación adecuada de taludes en este país se ha vuelto un desafío (Zumba 2023; Loor et al. 2020; Ávila 2021; Rivera 2022; Patín 2022).

Un elemento importante en el diseño de la estabilidad de taludes es el factor de seguridad a largo plazo, con el cual se puedan prevenir amenazas y daños en deformaciones que desencadenen la rotura de suelos y formación de fallas intrínsecas en el talud. De acuerdo a esta premisa, la evaluación de taludes debe involucrar la determinación de su estabilidad y establecimiento de medidas de prevención y mitigación que permitan reducir los niveles de amenaza (Loor et al. 2020; Nebeokike et al. 2020; Kardani et al. 2021; Fu et al. 2020; Tien et al. 2019).

En la presente investigación se reporta la evaluación de la estabilidad de talud en la vía de acceso al puente sobre el río Copueno, provincia de Morona Santiago, Ecuador. Los taludes de este tramo de vía, han sufrido desprendimientos continuos de material que han llegado a bloquear parcial y totalmente la carretera E45; donde, al ser una vía de alto tráfico en el país, que conecta la ciudad de Macas con la ciudad de Puyo, urbanizaciones, cantones y poblados ubicados al este de esta ciudad, la estabilización de este sitio crítico es de alta prioridad para la provincia. La inestabilidad del este talud se ha asociado a factores naturales y antrópicos que se agudizan en épocas de invierno; presentando algunos escarpes, grietas y levantamientos en vías y veredas. Se realizó la caracterización geológica-geotécnica del sitio, se identificaron los procesos que influyen en el desprendimiento de materiales, se evaluaron y analizaron los estados límites de falla de los sitios de inestabilidad; información que a futuro será valiosa para proponer medidas de estabilización o mitigación.

02 ASPECTOS GENERALES

SITIO DE ESTUDIO

El área de estudio está ubicada en la provincia de Morona Santiago, cantón Morona, salida de la ciudad de Macas hacia Puyo, zona alta de la carretera E45-Troncal Amazónica (UTM WGS-84: 821014 E y 9744938 N). El sitio abarca varias zonas de desprendimiento de materiales en un tramo de 450 metros de vía, previo al acceso al puente sobre el río Copueno (ciudad de Macas). Entre la ciudad y la vía existe una diferencia en cota de 80 m aproximadamente y en el talud existe una plataforma intermedia que en ciertos tramos se extiende a un ancho de hasta 60 m (figura 1).

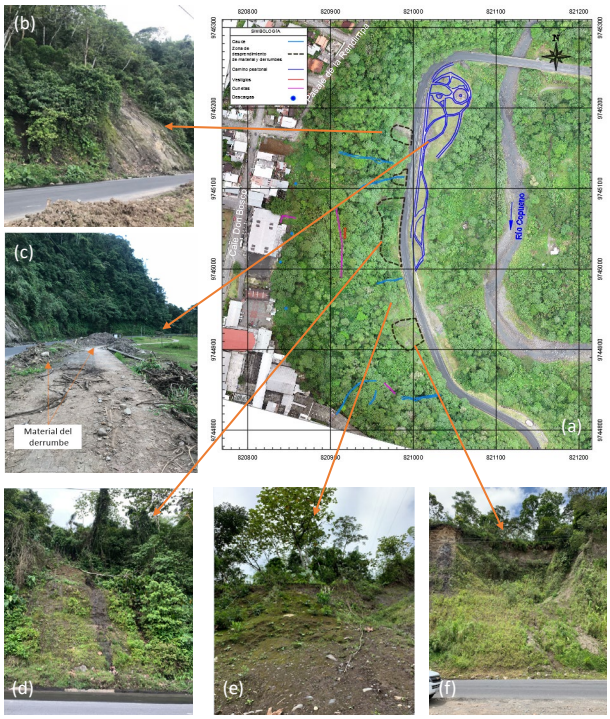

Figura 1. Zonas de desprendimiento de material y derrumbes.

GEOLOGÍA LOCAL

En la figura 2, se presenta el perfil geológico del corte C-C', como ejemplo de los tres perfiles analizados en la presente investigación. La formación Mera se constituye de conglomerados polimícticos con clastos volcánicos y trazas de rocas metamórficas o intrusivos englobados en una matriz arenosa. Los clastos son mayormente redondeados, con intercalación de areniscas poco compactas. En la plataforma intermedia se encontraron depósitos coluviales y suelos residuales producto de la meteorización de la formación Mera. En la zona inferior existen materiales de escombreras que se colocaron sobre depósitos aluviales y sobre la misma formación. En cuanto a terrenos inestables, el sitio comprende deslizamientos traslacionales superficiales puntuales de material coluvial y residual sobre un estrato más compacto y resistente. Los deslizamientos se clasificarían como deslizamientos latentes, ya que en épocas invernales éstos se podrían activar.

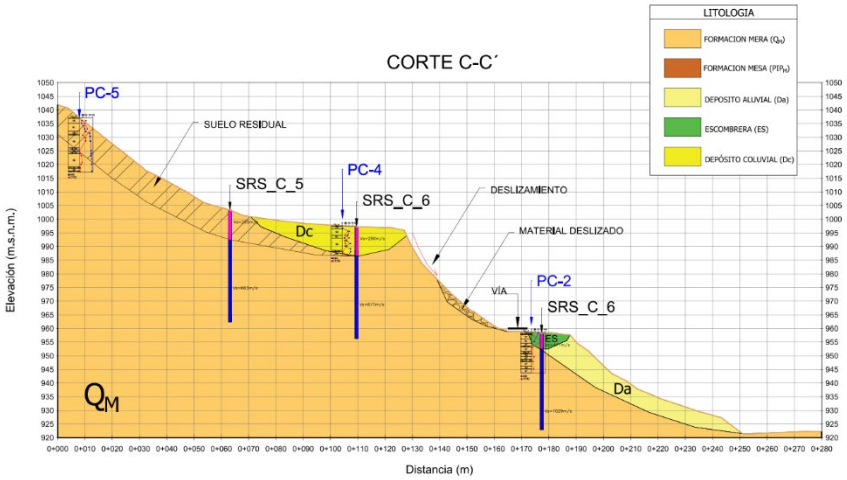

Figura 2. Perfil geológico C-C.

EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Se realizaron ensayos mecánico y geofísicos. Los ensayos directos consistieron de seis perforaciones (SPT) ejecutadas con la metodología de roto-percusión y de nueve calicatas. Las perforaciones PC-01, PC-02, PC-03 y PC-04 se realizaron con un martillo tipo dona ("Donut hammer"); la altura de caída fue de 76 cm y el peso del martillo de 140 lb. En tanto que, en las perforaciones PC-05 y PC-06 el martillo utilizado fue de seguridad ("Safety hammer"). Diversos autores (Robertson and Wride 1997; McGregor and Duncan 1998) recomiendan los factores de corrección por energía (CE). En base a estos rangos, se ha adoptado un factor CE de 0,72 y 0,96 para los martillos "Donnut" y "Safety", respectivamente. En las tablas 1 y 2, se presenta la información de las perforaciones y calicatas, respectivamente.

Tabla 1. Información de los sondeos SPT.

Sondeo SPT	Coord. X	Coord. Y	Profundidad del Sondeo (m)	Profundidad del Nivel Freático (m)	Tipo de Martillo Utilizado
UCUENCA (2019)					
PC-01	821021	9745146	22	No identificado	Donnut
PC-02	821006	9744993	15	No identificado	Donnut
PC-03	820939	9745076	12.5	No identificado	Donnut
PC-04	820945	9744938	11	1.10	Donnut
PC-05	820835	9744999	20	11.10	Safety
PC-06	820874	9745189	29	10.05	Safety
TECNOSUELOS (2012)					
P-01 (existente)	820984	9744905	6.0	5.0	-
P-02 (existente)	820981	9744858	2.0	4.0	-
P-03 (existente)	820968	9744873	5.0	4.0	-

Tabla 2. Información de las calicatas.

Calicata	Coord. X	Coord. Y	Profundidad (m)	Profundidad del Nivel Freático (m)
UCUENCA (2019)				
CC-1	820887	9745073	3.7	No identificado
CC-2	820908	9744995	2.4	0.50
CC-3	820912	9744917	2.5	1.2
CC-4	820950	9745202	4.2	No identificado
CC-5	820999	9745151	2.3	0.30
CC-6	820982	9745052	2.1	0.3
CC-7	821013	9745173	0.9	No identificado
CC-8	821025	9744909	2.5	1.70
CC-9	821003	9744927	2.5	0.30
TECNOSUELOS (2012)				
C-1	820931	9744884	2.0	1.2
C-2	821000	9744874	2.0	1.2
C-3	820886	9744959	2.0	1.0
C-4	820940	9744960	2.0	0.2
C-5	821010	9744908	2.0	No identificado

En las tablas 3 y 4, se presentan los ensayos de la geofísica. Nueve ensayos de refracción sísmica (SRS), a través de 9 líneas de 110 m de longitud; siete ensayos de tomografía eléctrica (TE), a través de 7 líneas de 110 m de longitud y cuatro ensayos de análisis multicanal de ondas espectrales (MASW) combinados con análisis de medición de microtremores (ReMi), a través de 4 líneas de 110 m de longitud.

Tabla 3. Ensayos de geofísica.

Perfil	INICIO		FIN	
	Coord. X	Coord. Y	Coord. X	Coord. Y
Resistividad Eléctrica				
SEV-1 (existente)	820920	9744878	-	-
SEV-2 (existente)	820945	9744893	-	-
SEV-3 (existente)	820976	9744913	-	-
SEV-4 (existente)	821016	9744946	-	-
Sísmica de Refracción				
L-01(existente)	820868	9744950	820937	9744867
L-02 (existente)	820846	9744934	820916	9744851

Tabla 4. Ensayos de geofísica.

Perfil	INICIO		FIN	
	Coord. X	Coord. Y	Coord. X	Coord. Y
Ensayos de Sísmica de Refracción (SRS)				
SRS_C_1	820877	9745135	820931	9745223
SRS_C_2	820906	9745139	820960	9745231
SRS_C_3	820842	9745011	820858	9745117
SRS_C_4	820914	9744998	820918	9745106
SRS_C_5	820946	9744867	820882	9744952
SRS_C_6	820988	9744864	820929	9744955
SRS_C_7	821034	9744891	820999	9744995
SRS_C_8	821002	9744999	821005	9745108
SRS_C_9	821006	9745116	821019	9745224
Ensayos MASW+MAM				
RM_C_1	820877	9745135	820931	9745223
RM_C_2	820914	9744998	820918	9745106
RM_C_3	821002	9744999	821005	9745108
RM_C_4	820946	9744867	820882	9744952
Ensayos de Tomografía Eléctrica (TE)				
TE_C_1	820877	9745135	820931	9745223
TE_C_2	820906	9745139	820960	9745231
TE_C_3	820842	9745011	820858	9745117
TE_C_4	820914	9744998	820918	9745106
TE_C_5	820988	9744864	820929	9744955

03 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE BLOQUES

Para la determinación de los parámetros de resistencia de elementos rocosos, producto de mezclas complejas como “bimrocks” o “bimsoils”, se utilizó el método de Pitágoras referido por Kalender et al. (2014). El valor del contenido volumétrico de bloques (VBP) se obtuvo a partir del porcentaje de bloques de las perforaciones siguiendo lo descrito por Medley and Zekkos (2011). En la tabla 5 se resumen los porcentajes de medición de bloques en las perforaciones ejecutadas.

Tabla 5. Porcentaje lineal de VBP en las perforaciones realizadas.

Perforación	Profundidad (m)			Bloques (%)
	Desde	Hasta		
PC-1	0,8	7,5	1,76	26
PC-1	9,0	19	1,79	18
PC-2	0,5	5,5	0,58	12
PC-2	5,5	14,5	1,53	17
PC-3	5,5	12,0	0,96	15
PC-4	4,5	7	0,36	14
PC-5	6,0	12,5	0,97	15
PC-5	12,5	18,0	0,82	15
PC-6	14	18,6	1,27	28
PC-6	18,6	29,0	2,19	21

Además, se determinó el valor de VBP en las zonas de materiales deslizados, donde se observa los bloques dentro de la matriz de suelo, mediante la relación del área de bloques en el talud con respecto al área total muestreada. En la figura 3, se muestra el talud evaluado, en el cual se observó la concentración más uniforme de bloques y con menor vegetación. El valor de VBP del talud corresponde a 15 % de materiales de bloques, con el cual se verificó las mediciones de las perforaciones.

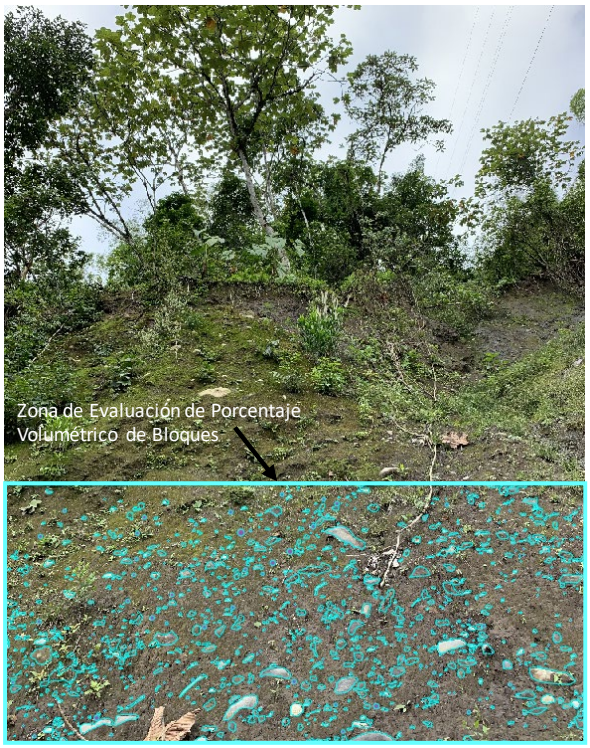

Figura 3. Talud evaluado de la vía de acceso al puente Copueno.

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA MATERIALES "BIMROCK"

Para la caracterización de los parámetros de resistencia en los análisis de estabilidad se ha adoptado la metodología de Medley (1997). De acuerdo a la caracterización geológica-geotécnica y al porcentaje de bloques identificados en las perforaciones, se han diferenciado varias zonas de "Bimrock". La primera es una zona de conglomerados compactos que afloran hacia la vía; sobre este material se ha diferenciado una segunda zona de conglomerados (conglomerados superiores) que, aunque muestra un contenido de bloques similares, presenta valores de resistencia menores a la compresión simple. Una tercera zona correspondió a los materiales de transición de depósitos residuales a conglomerados, la cual presenta propiedades significativamente menores y son parte de la zona de desprendimientos. Debido a la cantidad significativa de bloques identificados en los materiales de escombros, éstos también se han definido como materiales "Bimrock". En la tabla 6, se presenta los valores de VBP a partir de las perforaciones para las diferentes zonas descritas y en la tabla 7 los porcentajes de bloques.

Tabla 6. Medición del porcentaje de bloques de acuerdo a Medley (1997).

Zona	Bloques (%)	L (m)	e (m)	Ndmax	Incertidumbre (ξ)	VBP (%)
Conglomerado Superior	21	10,1	1,0	10,1	0,28	15
Conglomerado Compacto	19	29,4	1,0	29,4	0,22	15
Arena 2	15	9,0	0,5	18,0	0,31	10
Escombrera	19	9,45	0,5	18,9	0,25	14

Tabla 7. Parámetros adoptados para los materiales de Bimrock.

Parámetro	Zona				Observación
	Arena 2	Congl. superior	Congl. compacto	Escombrera	
Proporción volumétrica de bloque, VBP (%)	10	15	15	15	Obtenido de mediciones del porcentaje de bloques en los taludes y en las perforaciones, siguiendo la metodología de Medley and Zekkos (2011)
Ángulo de fricción de los bloques, α (°)	35	33	33	25	Valor estimado de acuerdo a la angularidad de los bloques
Ángulo de fricción de la matriz de suelo Φ_{matrix} (°)	35	35	30	35	Obtenido de la correlación con el número de golpes (N60)
Resistencia a la compresión uniaxial matriz, UCS_{matrix} (MPa)	0,05	0.27	1.3	0	Valor obtenido de ensayos de compresión simple realizados en núcleos de materiales coluviales
Parámetro de corrección A	0,2	4	30	0,12	Estimado de acuerdo a Kalender et al. (2014)
Resistencia a la compresión uniaxial bimrocks $UCS_{bimrock}$ (MPa)	0,04	0,25	1,27	0	
Ángulo de fricción del Bimrock $\Phi_{Bimrock}$ (°)	33,7	35,9	31,2	35,1	
Constante de control del contraste de fuerza entre Bimrock y matriz $C_{Bimrock}$ (kPa)	11	64	358	0	

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE RIGIDEZ

Para la caracterización geotécnica dinámica de los materiales, se utilizaron los resultados de las mediciones de onda de corte (Vs) y a partir de los ensayos geofísicos se estimaron los valores de la velocidad de onda de corte ponderada en los 30 primeros metros de suelo (Vs30). Además, a partir de la Vs fue posible estimar el módulo de corte del suelo y, mediante la teoría de la elasticidad, el módulo de Young. En la tabla 8 se presentan los resultados. Se puede observar que el sitio se clasifica como suelo tipo C, de acuerdo a la norma ecuatoriana NEC-15 (basada en norma Internacional SUCS), para los ensayos ejecutados en la plataforma intermedia, en la zona superior y en un ensayo ejecutado en la vía E45. Sin embargo, los ensayos SRS-C-8 y SRS-C-9, se presentan como perfiles Tipo B debido al contraste en un material con velocidades superiores a 1000 m/s.

Debido a los diferentes materiales identificados a lo largo de las perforaciones que la geofísica no puede capturar, en el caso de los materiales de arcilla superficial los módulos se determinaron a partir de los ensayos de laboratorio, utilizando el módulo obtenido del ensayo triaxial; mientras que, para los materiales de arena que subyacen a las arcillas, se emplearon correlaciones con el número de golpes (Bowles 1997) y se verificaron con valores característicos de acuerdo a Look (2007).

Tabla 8. Módulo de Young (E50) para los ensayos geofísicos.

Ensayo	Vs (m/s)	$h_{promedio}$ (m)	V_{s30} (m/s)	Tipo de Suelo (NEC-15)	γ (kN/m)	Gmax (kPa)	v	Emax (kPa)	Es/ Emax	Es(kPa)
SRS_C_1	302	14,86	438	C	17	158211	0,30	411349	0,05	20567
	785	15,14			18	1131842	0,25	2829605	0,05	141480
SRS_C_2	275	13,27	437	C	17	131186	0,30	341084	0,05	17054
	818	16,73			18	1229003	0,25	3072508	0,05	153625
SRS_C_3	305	14,32	474	C	17	161370	0,30	419562	0,05	20978
	959	15,68			18	1689210	0,25	4223025	0,05	211151
SRS_C_4	295	13,96	432	C	17	150962	0,30	392501	0,05	19625
	726	16,04			18	968099	0,30	2517057	0,05	125853
SRS_C_5	265	12,73	405	C	17	121819	0,30	316729	0,05	15836
	663	17,27			18	807372	0,30	2099166	0,05	104958
SRS_C_6	290	14,52	411	C	17	145888	0,30	379308	0,05	18965
	677	15,48			18	841829	0,30	2188755	0,05	109438
SRS_C_7	471	10,03	737	C	17	384826	0,30	1000548	0,05	50027
	1029	19,97			18	1944810	0,25	4862025	0,05	243101
SRS_C_8	624	14,31	794	B	17	675448	0,30	1756165	0,05	87808
	1058	15,69			18	2055975	0,25	5139937	0,05	256997
SRS_C_9	385	7,19	763	B	17	257125	0,30	668525	0,05	33426
	1105	22,81			18	2242699	0,25	5606747	0,05	280337

DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE AGUA

Se instalaron piezómetros en las perforaciones PC-3, PC-4 y PC-6. En la figura 4, se presentan las mediciones del nivel de agua desde la instalación de los piezómetros en enero de 2019 hasta febrero de 2019; observándose una estabilización en las mediciones. Las mediciones del nivel freático se utilizaron en la caracterización geotécnica y en los análisis de estabilidad.

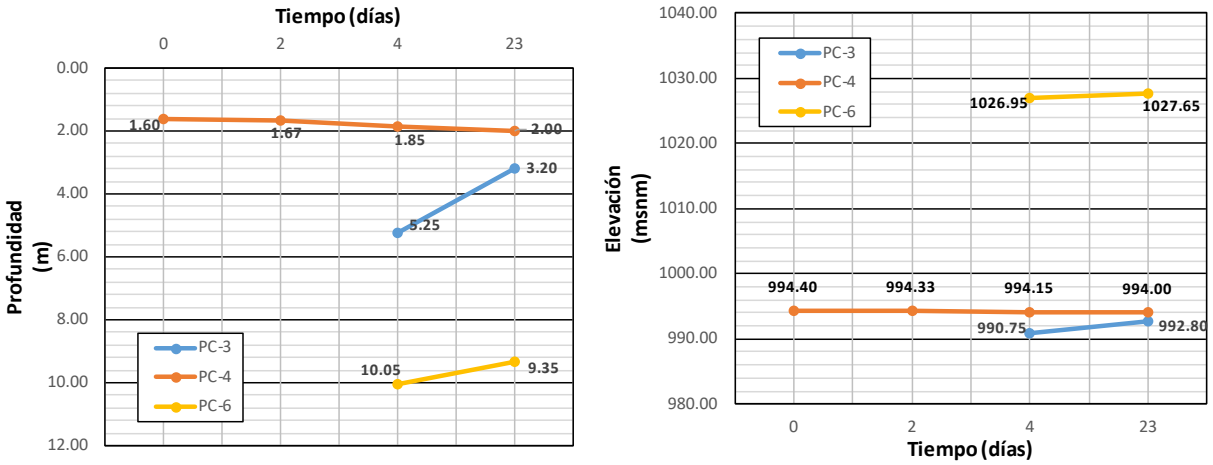

Figura 4. Mediciones del nivel de agua en los piezómetros de las perforaciones PC-3, PC-4 y PC-6. Izquierda: profundidades y Derecha: elevaciones.

DESCRIPCIÓN DE LAS SERIES ESTRATIGRÁFICAS

Con los perfiles geotécnicos se captaron las diferentes zonas de inestabilidad en el sentido del deslizamiento (Perfiles A-A´, B-B´ y C-C´, figuras 5, 6 y 7). Los perfiles tienen una dirección SO-NE y comprenden el área de la ciudad en la zona superior del perfil, la plataforma intermedia, la vía de acceso al puente sobre el río Copueno y el río Copueno en la zona inferior. En el perfil A-A´, no existe una plataforma intermedia en el talud como se observa en los otros perfiles, y en éste se ha incluido además el perfil del terreno en el año 2014 obtenido de la ortofoto del SigTierras, mientras que, en los otros perfiles, debido a la extensa vegetación no fue posible obtener un perfil que refleje las condiciones del terreno en el 2014. En los perfiles se presenta la variación espacial de los materiales de acuerdo a los resultados de los ensayos SPT, calicatas y geofísica. Los símbolos de interrogación indican zonas en las que no se cuenta con exploración geotécnica y se asume la estratigrafía. En los perfiles se ha incluido el número de golpes del ensayo SPT y el contenido de finos de las muestras ensayadas de las perforaciones. El nivel freático se ha definido a partir de lo identificado al momento de la perforación y del monitoreo mediante piezómetros. Para la descripción de las series estratigráficas se ha considerado la información obtenida de la exploración geotécnica, resultados de laboratorio y correlaciones realizadas de los parámetros geotécnicos. El grado de compacidad y la rigidez de los materiales de grano grueso y fino, respectivamente, se definieron de acuerdo a los rangos descritos por Look (2007).

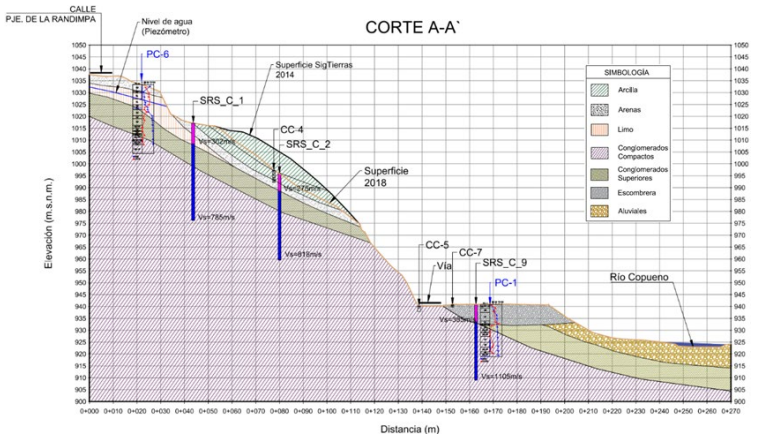

Figura 5. Perfil geotécnico: A-A´.

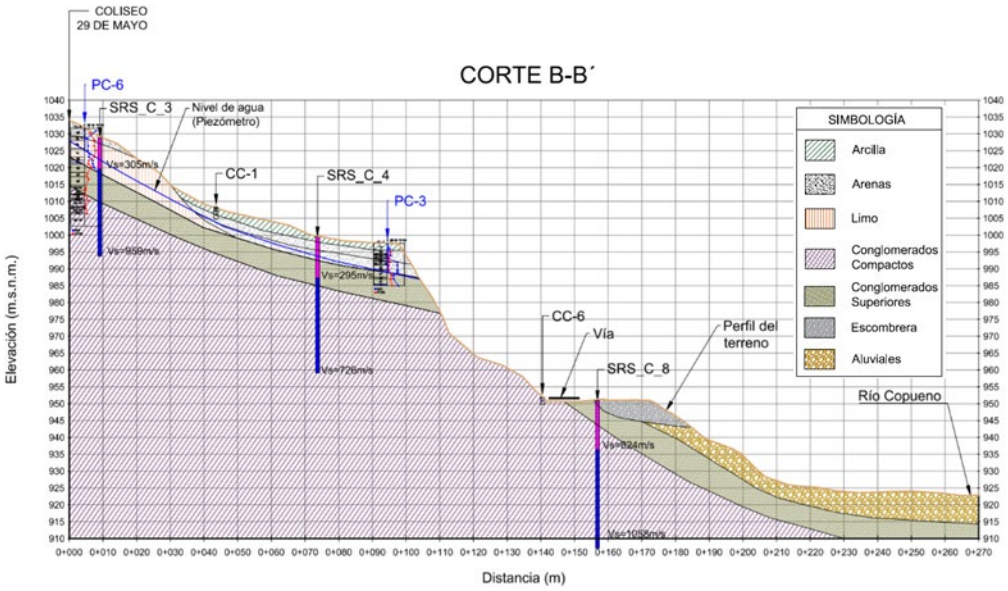

Figura 6. Perfil geotécnico: B-B´.

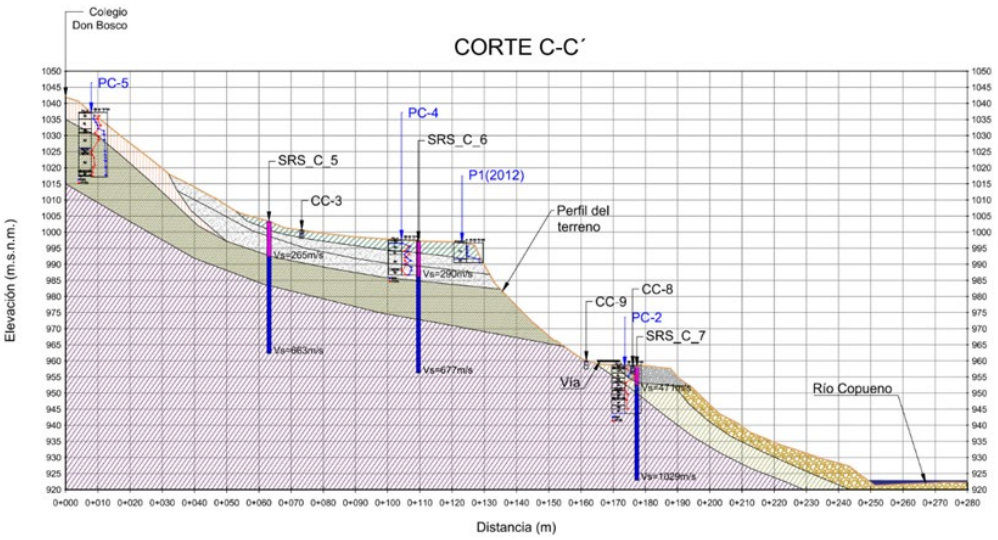

Figura 7. Perfil geotécnico: C-C´.

05 CONCLUSIONES

Debido a la extensión del sitio de estudio, se dividió el área en dos zonas. La zona 1 comprende las perforaciones PC-3, PC-4, PC-5, PC-6 y P-1 y las calicatas CC-1, CC-2, CC-3 y CC-4 y la zona 2 las perforaciones PC-1 y PC-2 y las calicatas CC-5, CC-6, CC-7, CC-8 y CC-9:

-En la zona 1, los materiales identificados, de acuerdo a la clasificación SUCS, corresponden superficialmente a arcillas y limos de baja y alta plasticidad; con un contenido de humedad mayor al 70 %, un límite líquido promedio del 60 % y un índice de plasticidad, de acuerdo a los ensayos de laboratorio en muestras extraídas de calicatas, que varía entre 9 y 17 %. El gran contenido de agua es consistente con la acumulación de humedad en la zona de la plataforma intermedia. Dado el tipo y características del terreno, para la determinación de su carga útil se consideró la prueba de compresión simple. El número de golpes fue de 4 a 12 y la resistencia promedio no drenada (Su) de 35 kPa. En la zona superior de la plataforma se identificaron en las perforaciones P-5 y P-6 limos de baja plasticidad (ML), que presentan un número de golpes de 25 a 40, que se incrementaron con la profundidad. Además, a partir de las perforaciones se identificaron materiales de grano grueso con

intercalaciones de arcillas y gravas que en varios casos resultaron en reportes de rechazo en las perforaciones. El contenido de agua fue menor al 40 % y el número de golpes varía entre 20 y 40. Estos materiales forman parte de la zona de material susceptible a erosionarse y a caer hacia la vía. Por otro lado, se identificó a los conglomerados de la formación Mera. El contenido de bloques fue de alrededor del 15 % y el número de golpes varió de 50 hasta el rechazo. Estos materiales presentaron una matriz cementada, por lo que en las perforaciones de mayor profundidad (PC-5 y PC-6) se pudieron extraer muestras mediante la ejecución de rotación. En estas muestras se realizaron ensayos de compresión simple, obteniendo valores que varía entre 440 kPa, a una profundidad de 15 m, y 1800 kPa, a una profundidad de 24 m desde la zona superior. Se espera que a mayor profundidad los materiales tengan mayor resistencia. Debido a la variación en resistencia de estos materiales, se dividió el talud en un estrato de conglomerados intermedios y conglomerados compactos, que se extienden hasta la vía E45. De acuerdo a lo observado en los registros de perforación y a las visitas al sitio de estudio, la zona de inestabilidad no se profundiza en estos estratos. La erosión por el agua, afectaría en la zona superior de esos materiales, siendo el límite de la zona de materiales susceptibles a caer hacia la vía. Además, debido a que estos materiales presentan una elevada cementación a mayor profundidad, se presenta una barrera para el flujo de agua. Esto es consistente con las observaciones en el sitio de estudio al identificarse gran cantidad de agua proveniente desde la zona superior del talud. Mediante los ensayos de geofísica (SRS-C-1, SRS-C-2, SRS-C-3, SRS-C-4, SRS-C-5), se identificó un material superficial con velocidad de onda de corte (Vs) que varía entre 265 y 305 m/s, con una profundidad entre 7,5 m, en el perfil A-A´, a 12 m, en el Perfil C-C´. Este primer material identificado en los perfiles de sísmica de refracción estaría relacionado a los materiales de arcilla y arenas identificados dentro de los primeros estratos en las perforaciones y calicatas. A continuación, el valor de Vs se incrementó a valores de entre 663 y 959 m/s, resultado asociado a los conglomerados de la formación Mera. Adicionalmente, a partir de los ensayos de resistividad eléctrica se verificó las zonas de mayor saturación, identificándose que gran parte del área presenta afloramientos y acumulaciones superficiales, siendo consistente con lo observado en el sitio y en las perforaciones.

-La zona 2, abarca el área de la vía E45 y el borde derecho, hasta el río Copueno. En esta zona se identificaron superficialmente gravas y arenas limosas con contenido natural de agua inferior al 35 %. El número de golpes del ensayo SPT varía entre 11 y 35; sin embargo, a mayor profundidad, debido a la significativa cantidad de bloques a lo largo de la perforación no se pudo realizar ensayos SPT o los números de golpes reportados indicaban el rechazo. De acuerdo a las perforaciones y a los perfiles geológicos, los escombros llegan a una profundidad de hasta 7 m. Dentro de estos materiales se identificaron estratos de arcilla puntuales de menor espesor, asociados a la deposición heterogénea característica de esos materiales. La velocidad de onda de corte (Vs) de estos materiales varía entre 385 y 624 m/s, indicando que presentan una compacidad densa. Además, de los escombros se identificaron conglomerados de la formación Mera y materiales aluviales. Los conglomerados de la formación Mera comprenden la continuación de los materiales identificados en la zona superior del talud, en el área de la ciudad (perforaciones PC-5 y PC-6); sin embargo, debido a que presentan valores de hasta 1105 m/s, corresponderían a conglomerados de mayor rigidez.

06 REFERENCIAS

Ávila Oñate L. D. y Bojorque J. (2021). “Comparativa entre los métodos pseudoestático y dinámico para la estabilidad de taludes mediante el método de elementos finitos. caso de estudio: terremoto de bahía de caráquez (2016)”, Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica de Litoral, Ecuador.

Bowles J. (1997). Foundation analysis and design. The McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN:0-07-118844-4. United States.

Gartner K. (2023). "The Need for Additional Landslide Regulation: Examining Flooding Through a Case Study", William & Mary Environmental Law and Policy Review, vol. 4, no. 2, pp. 447. Virginia. United States.

Kalender H., Sonmez E., Medley C., Tunusluoglu K. and Kasapoglu E. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. Engineering Geology, vol. 183, pp. 65–79.

Kardani N., Zhou A., Nazem M. and Shen S. L. (2021). "Improved prediction of slope stability using a hybrid stacking ensemble method based on finite element analysis and field data", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol.13, no.1, pp. 188-201.China.

Look B. (2007). Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables. Taylor & Francis Group, London, UK.

Loor Sierra D. E., Macías Sánchez L. K. y Loaiza Ambuludi S. C. (2020). "Estudio de la estabilidad de taludes de la vía garrapata-santa maría, entre las abscisas 7+ 900 y 63+ 040, provincia de Manabí, Ecuador", Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica de Litoral, Ecuador.

Medley E.W. and Zekkos D. (2011). Geopractitioner approaches to working with antisocial mélanges. Invited paper. In: Wakabayashi, J., Dilek, Y. (Eds.), Mélanges: Processes of Formation and Societal Significance, Geological Society of America Special Paper. 480, pp. 261–277. United States.

Medley E. (1997). Uncertainty in estimates of block volumetric proportions in melange bimrocks. Proc. International Association of Engineering Geologists, Athens, Greece.

McGregor J. A. and Duncan J. M. (1998). "Performance and Use of the Standard Penetration Test In Geotechnical Engineering Practice", Center for Geotechnical Practice and Research, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA. United States.

Nebeokike U. C., Igwe O., Egbueri J. C. and Ifediegwu S. I. (2020). "Erodibility characteristics and slope stability analysis of geological units prone to erosion in Udi area, southeast Nigeria", Modeling Earth Systems and Environment, vol. 6, pp. 1061-1074.Springer. Germany.

Patín Guaquipana G. O. (2022). "Protección Biológica del talud junto al canal de riego Belisario Quevedo con dos especies arbóreas (Acacia melanoxylonen),(Alnus acuminata), y una especie arbustiva (Murraya paniculata), en la Parroquia Belisario Quevedo, Cantón Latacunga", Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.

Pourghasemi H. R., Pouyan S., Bordbar M., Golkar F. and Clague J. J. (2023). "Flood, landslides, forest fire, and earthquake susceptibility maps using machine learning techniques and their combination", Natural Hazards, vol. 116, no.3, pp. 3797-3816.Springer.

Rivera Huaringa N. (2022). "Estabilidad de taludes en la carretera Cruz Blanca–Choten, Cajamarca", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Centro del Perú, Escuela de Posgrado Unidad de Posgrado. Perú.

Robertson P. K. and Wride C. E. (1997). "Cyclic Liquefaction and its Evaluation Based on the SPT and CPT", Proceedings of the National Center for Earthquake Engineering Research, NCEER, Report No 970022. China.

Suárez Díaz J. (2009). Deslizamientos (Vol. I). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Colombia.

Tien Bui D., Moayedi H., Gör M., Jaafari A. and Foong L. K. (2019). "Predicting slope stability failure through machine learning paradigms", ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 8, no. 9, pp. 395. Switzerland.

Zumba Calle J. V. (2023). "Análisis de Estabilidad del Talud en la Vía al CRS Turi aplicando Ensayos Geofísicos", Bachelor's thesis, Facultad de Ciencia y Tecnología-Ingeniería Civil, Universidad del Azuay, Ecuador.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Jorge Xavier Villazhañay Zúñiga https://orcid.org/0009-0003-3976-5545

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados, revisión y redacción del informe.

Jorge Alexander Bucheli García https://orcid.org/0009-0001-0641-2458

Trabajó en el análisis e interpretación de los datos. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final del informe.