

Clasificación de tormentas tropicales según lluvias asociadas: (2) resultados

Rafael Pardo Gómez

Profesor Titular y Dr. en Ciencias Técnicas

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.

email: rpardo@cih.cujae.edu.cu

Yakelin Rodríguez López

Profesora Auxiliar y Dra. en Ciencias Técnicas

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.

email: yake@cih.cujae.edu.cu

RESUMEN

La alta frecuencia con que Cuba es azotada por tormentas tropicales hace que la población cubana siga las informaciones del departamento de pronósticos del Instituto de Meteorología junto con las orientaciones del Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil, que planifican medidas de protección para mitigar los desastres. Dichas informaciones abordan básicamente la intensidad de los vientos, pero acerca de las lluvias y sus consecuentes inundaciones, la información es muy pobre. Los autores del presente trabajo ofrecen un primer acercamiento a una escala de clasificación de las tormentas tropicales atendiendo a las lluvias asociadas, considerando solo variables de lluvia propiamente, quedando otras variables que inciden en la magnitud de las inundaciones, como las vinculadas al suelo, su uso y otras, para análisis posteriores que permitirán obtener mejores criterios de clasificación.

Palabras clave: huracán, intensidad de lluvia, inundaciones por intensas lluvias, pronóstico.

Tropical storms classification according to their associated rainfall: (2) results

ABSTRACT

The high frequency of tropical storms in Cuba has made Cuban people to follow informations released by the forecast department of the Instituto de Meteorología (Meteorology Institute) together with instructions emitted by the Estado Mayor Nacional de Defensa Civil (Civil Defense National Headquarters), with the purpose of planning relevant protection measures aimed at disaster mitigation. These informations deal mainly with wind intensity among others but very little is said about rainfall amounts and their consequent flooding danger. The authors of this paper present a first approach to a classification scale of tropical storms according to their associated rainfall considering only rainfall-related variables. Other important variables, such as soil properties, soil use, etc. are left aside for later analysis which in a near future will allow better classification criteria.

Keywords: hurricane, rainfall intensity, heavy rain flooding, forecast.

INTRODUCCIÓN

En este artículo, en una primera parte, se estudia la influencia de algunas variables en la ocurrencia de inundaciones y se definen las variantes de tormentas que se pretenden simular, por lo cual también se describen, ya en la segunda parte, los métodos y programas empleados en esta investigación.

Estudio sobre la influencia de variables, en la ocurrencia de inundaciones

Las inundaciones ocurren por la combinación de factores naturales (suelo, relieve etc.), antrópicos (uso del suelo, urbanización etc.) y meteorológicos (intensidades de lluvia, tiempos de duración, área de la tormenta). Cada uno de estos factores interviene en las avenidas de manera diferente. A continuación se describen las variables que influyen en la formación de inundaciones.

Pendiente

Cuando se analiza el relieve se deben tener presentes los índices geomorfológicos y dentro de estos específicamente los morfométricos, entre los que se encuentra el ángulo de inclinación del terreno.

Existen varios criterios para determinar la pendiente media de la cuenca en función de las curvas de nivel del terreno. Uno de los más usados es el que considera la pendiente igual al cociente entre la longitud total de curvas de nivel dentro de ella, multiplicada por el desnivel constante entre éstas y el tamaño de la cuenca (González et al. 2007).

Si en el área a estudiar se encuentra una pendiente muy inclinada se obtendrá entonces que el flujo de agua correrá más rápidamente, será más difícil que parte de la lámina de agua pueda infiltrar hacia el interior y por tanto, mayor cantidad de agua llegará a la base de la pendiente pudiendo ocasionar inundaciones.

Si por el contrario, se encuentra en una superficie de poca inclinación, el flujo de agua que se desplazará sobre la misma lo hará de forma más lenta, posibilitando a su vez que parte de esta pueda infiltrarse, llegando menos cantidad de agua al pie de la elevación y evitando la acumulación de las aguas en zonas bajas y poco permeables (Bonilla 2007).

Suelos

Entre los factores edafológicos se encuentran las propiedades físico-mecánicas de los suelos y dentro de estas la permeabilidad, que no es más que la velocidad con que el agua se infiltra a través de las capas del suelo.

De acuerdo con la composición de los suelos, estos pueden absorber mayor cantidad de agua como es el caso de los suelos permeables o por el contrario absorber menor cantidad de agua como sucede con los suelos impermeables.

Si se encuentra en presencia de un suelo con mucho contenido de arcilla, menos cantidad de agua logra pasar a las capas inferiores, por tanto se infiltra menos y escurre mayor cantidad de agua; todo lo contrario sucede en un suelo que posea gran contenido de arena, el cual permite que gran parte del agua que precipita pase a los capas inferiores logrando el humedecimiento de estos y por tanto menor es la escorrentía superficial.(Bonilla 2007)

Uso del suelo

La vegetación juega un papel fundamental en las inundaciones pluviales. La cubierta vegetal de un territorio protege al terreno de la erosión provocada por el escurrimiento, pues la

infiltración es mayor, a su vez actúa como una barrera natural que regula la cantidad de agua que llegará de forma efectiva al suelo, ya que parte de las precipitaciones queda en las hojas de los árboles, (este fenómeno se conoce con el nombre de intercepción) y va a depender de la densidad y naturaleza de la vegetación. También la vegetación impide que las gotas de agua caigan de manera directa sobre el suelo, lo que provoca la compactación del mismo y como consecuencia la disminución de la permeabilidad, evitando la erosión producida por las gotas de agua cuando impactan sobre el suelo.

La cubierta forestal reduce el gasto de las crecidas al mantener la infiltración al máximo, acrecentando así las corrientes subterráneas a expensas de las superficiales; el movimiento de sedimentos desde las zonas de captación hasta el lecho de la corriente queda reducido al mínimo.

La acción de asfaltar superficies cada vez mayores impide que el agua proveniente de las precipitaciones se infiltre y como consecuencia el escurrimiento será mayor y más rápido, ocasionando lo que se le conoce como inundaciones rápidas. Se puede mencionar también la tala de los bosques y su sustitución por otros cultivos, lo que facilita la erosión y la llegada de gran cantidad de sedimentos a los cauces y lagos, que intensifica la ocurrencia de las inundaciones.

Otra actividad económica que influye en las inundaciones es la excesiva ganadería, pues esta provoca la compactación del suelo, lo que afecta su permeabilidad y como consecuencia disminuye la capacidad de infiltración del mismo considerablemente (Bonilla 2007).

Intensidades de lluvia y tiempos de duración

Las precipitaciones influyen de forma directa sobre las inundaciones pluviales. Mientras mayor sea la cantidad de precipitaciones que ocurran en un área, mayor será la posibilidad de que ocurra una inundación (Bonilla 2007).

Al analizar las precipitaciones se debe tener en cuenta la intensidad y la duración de las mismas y también el volumen o cantidad total, pues si son escasas y caen en un período de tiempo corto, pueden no provocar inundaciones, si por el contrario son abundantes y ocurren en un período prolongado, sí pueden favorecer la ocurrencia de las mismas.

Área de la tormenta

Este factor tiene gran peso en las inundaciones, pues, mientras mayor sea la tormenta, mayor será el área de la cuenca donde llueva, aumentando así el volumen de agua que escurrirá hasta llegar a zonas bajas pudiendo ocasionar inundaciones. Si por el contrario, la tormenta es de radio pequeño y hace llover solo en un área pequeña de la cuenca y alejada de las zonas bajas, son menores las probabilidades de inundaciones.

DEFINICIÓN DE LAS VARIANTES

Para esta versión preliminar a la clasificación de los huracanes atendiendo a las lluvias, solo se analizará la influencia de las variables asociadas a las precipitaciones. No se definen las variaciones de las características del terreno del área de estudio; esto quiere decir que se escoge para las modelaciones una subcuenca y se varían solo las características de los eventos lluviosos.

Para generar las variantes de eventos que se simulan, se escogen los parámetros que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de las variantes a estudiar

<i>7 láminas asociadas a su probabilidad de ocurrencia</i>							
Probabilidad (%)	0,02	0,2	1	5	10	25	20
<i>5 tiempos de duración de la tormenta</i>							
Duración (h)	6	12	24	48	96	-	-
<i>6 áreas de afectación de la tormenta en la cuenca</i>							
Área (km ²)	100	190	305	527	715	837	-

Estos valores se corresponden con las áreas de las subcuencas de la cuenca que se tomará como caso de estudio. De esta forma se obtienen 210 variantes, abarcando un amplio rango de intensidades que se producen.

MÉTODOS Y MATERIALES EMPLEADOS

Para poder determinar en cada variante el área que será inundada, se deben realizar modelaciones hidrológicas e hidráulicas para las cuales se pueden utilizar diversos programas, en el presente artículo se emplea para la modelación hidrológica el software de simulación hidrológica HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center –Hydrologic Modeling System), mientras que la modelación hidráulica se realiza con la ayuda del modelo de gestión de aguas pluviales SWMM.

Selección del área de estudio

El área de estudio debe ser una cuenca representativa del país, de la que se debe tener el modelo digital de elevaciones (MDE) y se debe contar con series de lluvias máximas de esta zona. La modelación hidrológica se realizará en una subcuenca (en lo adelante cuenca), mientras la hidráulica se efectuará en un tramo de río al cual aporte la cuenca.

Con el programa ArcView GIS 3.3 usando las extensiones: Spatial Analyst, 3D Analyst y HEC-GeoHMS se realiza el preprocesamiento del MDE, se define el parte aguas de la cuenca y se efectúa el procesamiento de esta última, dando como resultado el modelo hidrológico conceptual (MHC) que se exporta al HEC-HMS (USACE 2000).

Con la ayuda del programa PECAMax (Paquete Estadístico para el Cálculo de Aguas máximas) se procesan series de lluvias máximas de la subcuenca en estudio, que han sido registradas mediante pluviómetros. De la distribución de mejor ajuste se toman las láminas de lluvias para las 7 distintas probabilidades de ocurrencia.

Simulación hidrológica con el HEC-HMS

En el presente trabajo se emplea la versión 3.5 del HEC-HMS. El programa HEC-HMS es el software que mayor atención tiene, para la simulación del proceso lluvia – escurrimiento, por su condición de utilizar un modelo semidistribuido para representar la cuenca, modela tanto cuencas rurales como urbanas y es de libre acceso. Además puede añadirse a su favor que es un programa que viene siendo mejorado hace más de 35 años y permite evaluar el comportamiento de varios elementos hidrológicos tales como: las subcuencas, los tramos de ríos, embalses, entre otros (Rodríguez 2011).

Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. HEC-HMS utiliza los siguientes componentes:

Datos de entrada

Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas son requeridos como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico.

Modelos de cuenca

En el modelo de la cuenca se realiza la simulación con los métodos señalados en la tabla 2.

Modelo de Pérdidas

- Número de la curva “Curve Number” (NC): representa un parámetro de este método que relaciona a la máxima retención potencial (S).
- Pérdida Inicial: se refiere a la cantidad de lluvia que debe caer para alcanzar un exceso de precipitación que provoque escurrimiento.

$$S = \frac{25\,400}{CN} - 254 \tag{1}$$

Transformación lluvia escurrimiento

- Tiempo de retardo “Lag time” es el intervalo de tiempo entre el centroide del hietograma de exceso de lluvia y el centroide del hidrograma de escorrentía directa. Puede definirse también como el tiempo de respuesta de la cuenca.

Modelos meteorológicos

Los modelos meteorológicos son unos de los componentes principales en un proyecto. Su propósito principal es establecer el método para representar la lluvia en la cuenca. Se utiliza como modelo meteorológico en este estudio: la tormenta asociada a una frecuencia (Frequency Storm), este método está creado para simular una tormenta sintética con los datos de la precipitación.

Los datos que requiere este modelo son:

- Área de la tormenta.
- Tiempo de duración de la tormenta.
- Lámina.

Tabla 2. Métodos empleados y parámetros necesarios por subcuencas

Componente del proceso de escurrimiento	Método	Parámetros por subcuencas
Modelo de pérdidas	SCS número de la curva (CN)	CN Pérdida Inicial
Transformación lluvia escurrimiento	Hidrógrafo Unitario del SCS	Tiempo de Retardo, Lag

Especificaciones de control

Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar.

Modelación hidráulica con el SWMM

El Storm Water Management Model (modelo de gestión de aguas pluviales) (SWMM) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada. El módulo de escorrentía del SWMM funciona con una serie de subcuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía. El módulo de transporte del SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Asimismo, el SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad del agua de escorrentía de cada subcuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad del agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.

SWMM representa el comportamiento de un sistema de drenaje mediante una serie de flujos de agua y materia. Estos módulos y sus correspondientes objetos de SWMM son los siguientes:

- Módulo atmosférico.
- Módulo de superficie de suelo.
- Módulo de aguas subterráneas.
- Módulo de transporte.

En un determinado modelo de SWMM no es necesario que aparezcan todos los módulos.

Las modelaciones se harán con régimen impermanente utilizando el método de la Onda Dinámica (Dynamic Wave Routing), que resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant y por tanto teóricamente genera los resultados más precisos. Estas ecuaciones suponen la aplicación de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento en las conducciones y la continuidad de los volúmenes en los nudos.

El modelo de transporte de la onda dinámica puede contemplar efectos como el almacenamiento en los conductos, los resaltos hidráulicos, las pérdidas en las entradas y salidas de los pozos de registro, el flujo inverso y el flujo presurizado. Dado que resuelve de forma simultánea los valores de los niveles de agua en los nudos y los caudales, se trata del método de resolución adecuado para sistemas en los que los efectos de resalto hidráulico están presentes originados por las restricciones del flujo aguas abajo.

El SWMM no tiene la capacidad de recibir archivos de información geográfica, en su lugar utiliza distintos tipos de objetos que recogen información del diseño. Para modelar un área de drenaje y su sistema de transporte, se simulan con los objetos nudos y líneas. Siendo en el presente caso los nodos, las secciones transversales de río que se desea simular, y las líneas los tramo de río entre sección y sección.

Resultados de la modelación hidrológica con HEC-HMS

En el presente trabajo se toma como caso de estudio la cuenca Zaza, ubicada en la zona central del país ocupando territorios de las provincias Sancti Spíritus y Villa Clara. El área de la cuenca es de 2378,28 km² hasta su desembocadura al mar, su perímetro es 334,4 km y la longitud del río principal es de 127,2 km. Esta es una cuenca donde se producen inundaciones considerables dejando como resultados cuantiosos daños económicos, de ahí que ya se hayan realizado numerosos proyectos e investigaciones sobre ella. Para la modelación hidrológica se utilizó la subcuenca Paso Ventura que cuenta con un área de 837,9 km².

Los datos de entrada al programa para las modelaciones fueron:

Para el modelo de pérdidas: $CN=99$ y $PI= 17,69$ mm
Para transformación de la lluvia: $Lag= 142,08$ min.

Para el Número de la Curva se estimó un valor alto considerando que el suelo se encontraba saturado antes de la ocurrencia del evento, buscando el mayor escurrimiento posible, siendo este el caso más desfavorable. Los parámetros de Pérdida Inicial y Tiempo de Retardo fueron los resultados del proceso de calibración de la subcuenca en estudio, presentados Rodríguez (2011).

Resultados de la modelación hidráulica con el SWMM

Para la modelación hidráulica se tomó un tramo de río de 21,78 km de longitud, el cual se dividió en 19 secciones como se muestra en la figura 1.

Es válido aclarar que el modelo de elevación con que se cuenta tiene una escala de 1:25000 con lo cual se puede decir que no se goza de una muy buena precisión. Al definir las secciones, se observó que de la sección 6 a la 13 no se definía el cauce del río, por lo que hubo que modificarlas. Calculando la pendiente entre las cotas de fondo de las secciones 5 y 14, se le impuso este valor a cada tramo entre secciones, buscando la cota de fondo de cada una de estas.

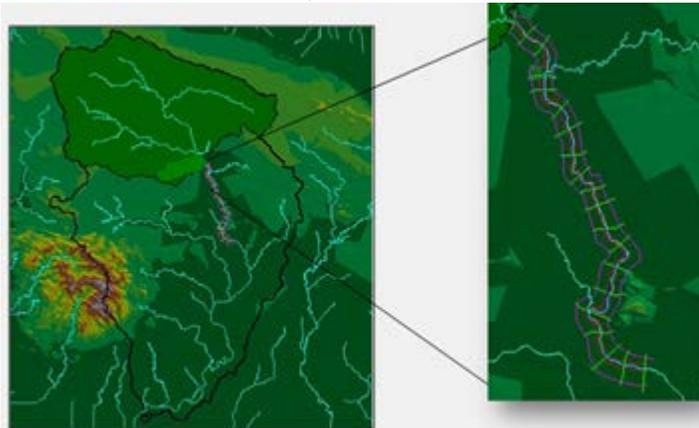


Figura 1. Cuenca Zaza: tramo de río utilizado para la modelación hidráulica

Como resultado de cada una de las modelaciones, se calculó en el tramo de río correspondiente a la sección 18, presentada en la figura 2, el nivel máximo durante la avenida, el caudal, y la velocidad para este nivel.

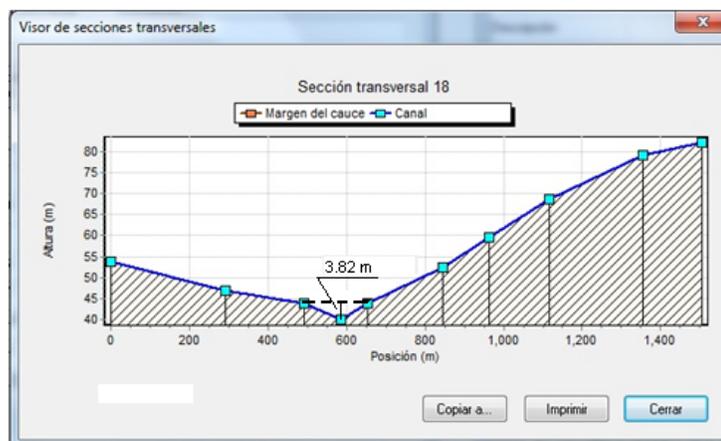


Figura 2. Geometría de la sección transversal 18.

Para obtener el nivel de agua alcanzado en la planicie de inundación, se toma el tirante en el río y se le resta el tirante del cauce.

$$Y = Y_I - Y_C \quad (2)$$

donde:

Y : Tirante de inundación o calado.

Y_I : Tirante en el río durante la crecida.

Y_C : Tirante del cauce.

Como se observa en la figura 2, $Y_C = 3,82$ m.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como se presentó anteriormente, existen tres criterios de clasificación de inundación, atendiendo solo al tirante de inundación (Y), al tirante por la velocidad ($Y*V$) y/o al tirante por la velocidad al cuadrado ($Y*V^2$), en el presente documento solo se trabaja con el primer criterio, debido a que el programa con que se modeló no brinda el área de inundación y por tanto no se puede conocer la velocidad fuera del cauce del río.

Con los tirantes de inundación, se crearon 4 tablas, ordenando en cada una de ellas de forma descendente los valores de una de las variables (intensidad, área de la tormenta, duración o lámina), para observar el comportamiento del tirante en cada caso. En la tabla 3 se presenta un fragmento, de la ordenada por la intensidad.

Del análisis de estas tablas es posible concluir que la lámina no es una variable que por sí sola tenga gran influencia en la intensidad de las inundaciones, pues con valores grandes de láminas ocurren tanto inundaciones de alta intensidad como mismo no ocurren inundaciones, así que para los siguientes análisis se excluyen los valores de esta variable.

Para organizar y analizar los resultados y llegar a una versión preliminar de la clasificación de los huracanes, se trabajó de la siguiente manera:

- Se definen tipos de intensidad de la inundación atendiendo al tirante de inundación o calado.
- Se determina el número y porcentaje de eventos que proporcionan inundaciones de cada tipo de intensidad definida.
- Se delimitan tipos o rangos, de cada una de las variables utilizadas (intensidad, área y duración).
- Se halla la cantidad de eventos que corresponden a cada rango y el porcentaje que estos representan.
- Se determina el número y porcentaje de cada intensidad de inundación causada en cada uno de los rangos establecidos a cada una de las variables.

Nota: lo expuesto anteriormente se resume en las tablas 4, 5, 6 y 7.

Tabla 3. Variación del tirante con respecto a la intensidad

Probabilidad (%)	Lámina (mm)	Intensidad (mm/h)	Área (Km ²)	Tiempo (h)	Q (m ³ /s) máximo	Q(m ³ /s) transformado	Y1 (m)	Y = Y1- Yc (m)
5	213.07	35.51	305	6	3469.9	1924.87	7.07	3.25
0.02	841.72	35.07	717	24	7243.4	1917.92	7.07	3.25
0.02	385.4	32.12	527	12	5261.3	1932.18	7.07	3.25
0.2	185.9	30.98	190	6	3094.3	1905.43	7.05	3.23
25	180.27	30.05	527	6	2832.4	1905.47	7.05	3.23
0.02	358.05	29.84	305	12	5270.7	1917.77	7.05	3.23
1	711.12	29.63	847	24	6111.6	1929.16	7.07	3.25
0.02	385.4	16.06	527	24	3318.1	1894.55	7.04	3.22
0.2	185.9	15.49	190	12	2578.0	1885.67	7.03	3.21
25	180.27	15.02	527	12	2405.5	1873.78	7.01	3.19
0.02	358.05	14.92	305	24	3121.9	1878.96	7.02	3.2
0.2	321.21	13.38	527	24	2762.1	1869.62	7.01	3.19
1	256.07	5.33	305	48	1186.6	1196.70	6.16	2.34
5	500.88	5.22	717	96	1166.1	1176.01	6.13	2.31
10	120.84	5.04	190	24	1064.2	1063.65	5.87	2.05
0.02	117.39	4.89	100	24	1440.8	1046.30	5.83	2.01
25	465.09	4.84	847	96	1094.1	1102.30	5.96	2.14
0.02	385.4	4.01	527	96	898.4	908.32	5.49	1.67
25	180.27	3.76	527	48	838.4	848.11	5.35	1.53
0.02	358.05	3.73	305	96	839.0	848.91	5.35	1.53
50	341.18	3.55	717	96	802.9	812.15	5.27	1.45
25	167.48	3.49	305	48	784.6	794.26	5.22	1.4
50	156.22	3.25	527	48	726.4	733.87	5.1	1.28
0.2	298.42	3.11	305	96	699.2	709.13	5.04	1.22
50	145.13	3.02	305	48	679.8	686.97	4.98	1.16
5	69.86	2.91	100	24	600.1	602.43	4.74	0.92
1	275.63	2.87	527	96	642.5	544.44	4.57	0.75
10	63.6	2.65	100	24	540.7	533.31	4.54	0.72
0.2	97.84	2.04	100	48	529.1	491.89	4.4	0.58
10	193.98	2.02	305	96	459.4	469.35	4.33	0.51
50	47.58	1.98	100	24	385.5	382.14	4.03	0.21
0.2	185.9	1.94	190	96	438.4	448.36	4.26	0.44
1	159.62	1.66	190	96	376.2	386.17	4.05	0.23
50	145.13	1.51	305	96	343.6	353.04	3.93	0.11
5	69.86	1.46	100	48	329.0	338.89	3.87	0.05
5	132.73	1.38	190	96	312.9	322.87	3.81	-0.01
10	63.6	1.33	100	48	299.0	308.89	3.75	-0.07
10	120.84	1.26	190	96	287.9	297.88	3.71	-0.11
0.02	117.39	1.22	100	96	279.3	289.28	3.67	-0.15

Tabla 4. Acerca del calado o tirante de inundación.

Intensidad de la inundación	<i>Calado Y</i>	
	Total	%
Muy alta [$Y \geq 1,5$]	154	73,3
Alta [$1,0 \leq Y < 1,5$]	13	6,3
Media [$0,5 \leq Y < 1,0$]	16	7,6
Baja [$0,01 \leq Y < 0,5$]	12	5,7
No inundación	15	7,1

Tabla 5. Acerca de la intensidad de la lluvia

Tipo (mm/h)	<i>Intensidad I</i>		Inundación	Total	%
	Total	%			
Alta [≥ 30]	43	20,5	Muy alta	43	100
			Alta	0	0
			Media	0	0
			Baja	0	0
			No inundación	0	0
Moderada [$15 \leq I < 30$]	37	17,6	Muy alta	37	100
			Alta	0	0
			Media	0	0
			Baja	0	0
			No inundación	0	0
Media [$5 \leq I < 15$]	63	30,0	Muy alta	57	90,5
			Alta	3	4,8
			Media	2	3,2
			Baja	1	1,5
			No inundación	0	0
Baja [$2 \leq I < 5$]	43	20,5	Muy alta	17	39,5
			Alta	10	23,2
			Media	14	32,7
			Baja	2	4,6
			No inundación	0	0
Muy baja [$0 \leq I < 2$]	24	11,4	Muy alta	0	0
			Alta	0	0
			Media	0	0
			Baja	9	37,5
			No inundación	15	62,5

Luego de analizadas estas tablas se puede hacer los siguientes comentarios.

- ✓ Hay una buena representación de todos los tipos de intensidades de inundaciones definidos.

- ✓ Las intensidades de lluvia clasificadas como alta y moderada llevan a muy altas inundaciones.
- ✓ La intensidad de lluvia clasificada como media lleva a inundaciones muy altas y altas.
- ✓ La intensidad de lluvia clasificada como baja tiene varios tipos de inundaciones, aunque se destaca que más del 95% de los casos están entre media y muy alta.
- ✓ La intensidad de lluvia clasificada como muy baja es la única que agrupa todos los casos en inundaciones bajas o sin inundaciones.

Tabla 6. Acerca del área de la tormenta

Tamaño (km ²)	Área de la tormenta A		Inundación	Total	%
	Total	%			
Grande [≥ 500]	105	50,0	Muy alta	97	92,5
			Alta	3	2,8
			Media	3	2,8
			Baja	1	1,0
			No inundación	1	0
Mediana [200 ≤ A < 500]	35	16,7	Muy alta	27	77,1
			Alta	3	8,6
			Media	3	8,6
			Baja	2	5,7
			No inundación	0	0
Pequeña [100 ≤ A < 200]	35	16,7	Muy alta	22	62,8
			Alta	3	8,6
			Media	3	8,6
			Baja	3	8,6
			No inundación	4	11,4
Muy pequeña [0 ≤ A < 100]	35	16,7	Muy alta	8	22,9
			Alta	4	11,4
			Media	7	20,0
			Baja	6	17,1
			No inundación	10	28,6

- ✓ Las grandes y medianas cuencas tienen sus inundaciones clasificadas como muy altas y altas en el 85% de ellas.
- ✓ Solo las cuencas clasificadas como muy pequeñas tienen una distribución bastante uniforme en cuanto al tipo de inundaciones.

Tabla 7. Acerca de la duración de la tormenta

Tipo (h)	Duración d		Inundación	Total	%
	Total	%			
Muy prolongada [96]	42	20,0	Muy alta	15	35,7
			Alta	3	7,1
			Media	7	16,7
			Baja	5	11,9
			No inundación	12	28,6
Prolongada [48]	42	20,0	Muy alta	27	64,3
			Alta	5	11,9
			Media	4	9,5
			Baja	3	7,1
			No inundación	3	7,1
Media a prolongada [24]	42	20,0	Muy alta	36	85,6
			Alta	2	4,8
			Media	2	4,8
			Baja	2	4,8
			No inundación	0	0
Media [12]	42	20,0	Muy alta	38	90,4
			Alta	1	2,4
			Media	2	4,8
			Baja	1	2,4
			No inundación	0	0
Corta [6]	42	20,0	Muy alta	38	90,4
			Alta	2	4,8
			Media	1	2,4
			Baja	1	2,4
			No inundación	0	0

✓ Las duraciones de tormentas entre 6 y 24 horas tienen sus casos de inundaciones con más del 85% clasificadas como muy altas y altas.

✓ En la medida que crece la duración de la tormenta, disminuyen las inundaciones clasificadas como muy altas y altas.

No se puede llegar a una clasificación de los huracanes pensando en cada variable por separado, se deben integrar las variables intensidad de la lluvia, área de la tormenta y duración de la misma, para observar y analizar el comportamiento de la intensidad de la inundación en cada caso.

Este resumen se muestra en las tablas 8, 9, 10 y 11, en la que por restricciones de espacio no se han presentado todas las tablas desarrolladas por los autores; esto es, solo aparecen las correspondientes a intensidades altas de la lluvia y se han excluido las correspondientes a intensidades moderadas, medias, bajas y muy bajas.

Tabla 8. Combinaciones de las variables intensidad de la lluvia, área de la tormenta y duración de la misma

<i>Intensidad de la lluvia</i>			<i>Área de la tormenta</i>			<i>Duración de la lluvia</i>			<i>Inundaciones</i>		
Tipo (mm/h)	Total	%	Tamaño (km ²)	Total	%		Total	%	Inundación	Total	%
Alta [≥ 30]	43	20.5	Grande [≥ 500]	36	83.8	Muy prolongada [96 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Prolongada [48 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Media a prolongada [24 h]			Muy alta	3	8.3
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Media [12 h]			Muy alta	13	36.1
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
Corta [6 h]			Muy alta	20	55.6						
			Alta	0	0						
			Media	0	0						
			Baja	0	0						
			No inundación	0	0						

Tabla 9. Combinaciones de las variables intensidad de la lluvia, área de la tormenta y duración de la misma

<i>Intensidad de la lluvia</i>			<i>Área de la tormenta</i>			<i>Duración de la lluvia</i>					
Tipo (mm/h)	Total	%	Tamaño (km ²)	Total	%		Total	%	Inundación	Total	%
Alta [≥ 30]	43	20.5	Mediana [200 ≤ A < 500]	5	11.6	Muy prolongada [96 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Prolongada [48 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Media a prolongada [24 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Media [12 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
Corta [6 h]			Muy alta	5	100						
			Alta	0	0						
			Media	0	0						
			Baja	0	0						
			No inundación	0	0						

Tabla 10. Combinaciones de las variables intensidad de la lluvia, área de la tormenta y duración de la misma

<i>Intensidad de la lluvia</i>			<i>Área de la tormenta</i>			<i>Duración de la lluvia</i>					
Tipo (mm/h)	Total	%	Tamaño (km ²)	Total	%		Total	%	Inundación	Total	%
Alta [≥ 30]	43	20.5	Pequeña [100 ≤ A < 200]	2	4.6	Muy prolongada [96 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Prolongada [48 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Media a prolongada [24 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
						Media [12 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
						Corta [6 h]			Muy alta	2	100
									Alta	0	0
Media	0	0									
Baja	0	0									
No inundación	0	0									

Tabla 11. Combinaciones de las variables intensidad de la lluvia, área de la tormenta y duración de la misma

<i>Intensidad de la lluvia</i>			<i>Área de la tormenta</i>			<i>Duración de la lluvia</i>					
Tipo (mm/h)	Total	%	Tamaño (km ²)	Total	%		Total	%	Inundación	Total	%
Alta [≥ 30]	43	20.5	Muy pequeña [0 ≤ A < 100]	0	0	Muy prolongada [96 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Prolongada [48 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Media a prolongada [24 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
						Media [12 h]			Muy alta	0	0
									Alta	0	0
									Media	0	0
									Baja	0	0
									No inundación	0	0
Corta [6 h]			Muy alta	0	0						
			Alta	0	0						
			Media	0	0						
			Baja	0	0						
			No inundación	0	0						

Al analizar las *combinaciones de las variables intensidad de la lluvia, área de la tormenta y duración de la misma*, mostradas en las tablas 8, 9, 10 y 11, se tiene que:

1. Las lluvias clasificadas como de intensidades altas y moderadas producen inundaciones muy altas, independientemente del área de la tormenta y de su duración.
2. Las lluvias clasificadas como de intensidad media producen inundaciones muy altas para todos los casos de área de la tormenta iguales o superiores a las denominadas pequeñas a grandes.
3. Las lluvias de intensidades bajas producen inundaciones en grandes y medianas áreas de la tormenta y con duraciones muy prolongadas y prolongadas.
4. Las lluvias de intensidades bajas producen inundaciones en grandes. medianas y pequeñas áreas de la tormenta y con duraciones muy prolongadas, prolongadas y medias a prolongadas.
5. Las lluvias de intensidades bajas producen inundaciones con muy pequeñas áreas de la tormenta fundamentalmente con duraciones medias a prolongadas.
6. Las lluvias de intensidades muy bajas producen inundaciones para duraciones de las tormentas prolongadas y muy prolongadas, independientemente del área de la tormenta.

CONCLUSIONES

- Atendiendo a las consideraciones anteriores se propone *una primera versión de clasificación de los ciclones atendiendo solo a propiedades de la lluvia* de la forma indicada en la tabla 12.

Tabla 12. Clasificación de las tormentas atendiendo a las propiedades de la lluvia

Categoría de la tormenta	Tipo de inundación		Intensidad de la lluvia	
	Denominación	Calado Y (m)	Denominación	(mm/h)
L5	Muy alta	$Y \geq 1,5$	Altas y moderadas	≥ 15
L4	Alta	$1,0 \leq Y < 1,5$	Medias	$5 \leq I < 15$
L3	Media	$0,5 \leq Y < 1,0$	Bajas	$2 \leq I < 5$
L2	Baja	$0,01 \leq Y < 0,5$	Muy bajas	$1 \leq I < 2$
L1	No	$Y = 0$		

- Esta primera propuesta de clasificación solo tiene en cuenta las principales características de la lluvia y no entra a considerar las propiedades de la cuenca por ser este un tema muy amplio que desborda con creces el tiempo dedicado a esta primera versión.

REFERENCIAS

- Bonilla S.** (2007). "Estudio de los factores que determinan los peligros de inundaciones". La Habana, Cuba, extraído de: <http://www.monografias.com/trabajos81/estudio-factores-determinan-peligros-inundaciones> en mayo de 2013.
- USACE** (2000). "HEC-HMS Technical Reference Manual". U.S. Army Corps of Engineers, Massachusetts, USA.
- González L., Jorge M., Martínez J. y Marrero N.** (2007). "Hidrología Superficial para ingenieros". Libro de texto. Ministerio de Educación Superior. La Habana, Cuba.
- Rodríguez Y.** (2011). "Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: cuenca del río Zaza". Tesis de doctorado. Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.