

# Modelación hidrológica del río Levisa con el modelo HEC-HMS

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la Voluntad Hidráulica en Cuba, proclamada por el Comandante en Jefe de la Revolución Fidel Castro Ruz, alcanza su máxima expresión en el momento actual con la construcción del Tránsito Este-Oeste (conocido como la obra hidráulica del siglo en Cuba) para el aprovechamiento futuro del potencial hidráulico del nordeste montañoso oriental en zonas deficitarias del oeste y cuyas presas presentan también objetivo de protección contra inundaciones en los ríos del macizo Nipe-Sagua-Baracoa. Una de las presas perteneciente a éste conjunto es la presa Levisa en el río homónimo.

En el trópico húmedo expuesto a huracanes es muy frecuente que los ríos montañosos como éste, con pendientes importantes, presenten grandes avenidas como consecuencia de precipitaciones extremas (huracanes o bajas presiones estacionarias) que provocan pérdidas de vidas, destruyen poblaciones y objetivos económicos. Por ello adquiere gran importancia el estudio más preciso posible de dichas avenidas para el diseño de la presa Levisa con la estabilidad requerida, de manera que se proteja a la población aguas abajo de inundaciones naturales o por rotura de presa y se preserve la inversión a ejecutar en dicha obra y los beneficios a producir por la misma sin sobrevalorar su costo económico.

La modelación matemática es una de las manifestaciones de la revolución científico-técnica contemporánea ampliamente generalizada en países desarrollados. Las metodologías empleadas en las investigaciones hidrológicas han evolucionado en los últimos años gracias a la generalización del uso de los modelos matemáticos. El Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica del ejército de los EE. UU.: HEC-HMS (por sus siglas en Inglés) es un programa de simula-

## Resumen / Abstract

*Dada la gran importancia del estudio de avenidas para protección de la población y preservación de inversiones en las obras del trasvase Este-Oeste, se realizó la modelación matemática de las avenidas para la presa Levisa con el modelo HEC-HMS. Para suplir la falta de información de lluvias máximas, se estableció una relación Lluvia Máxima del 1% contra Altura cuyo resultado se transformó en hietograma con la Curva Regional Adimensional de Acrecentamiento de la Lámina y el programa TableCurve2D. Se modeló para el 1% de probabilidad en 48 subvariantes. Los resultados se compararon con la relación regional Escurrimiento Máximo del 1% contra Área Tributaria establecida por la autora para la región Nipe-Sagua-Baracoa, resultando definitiva la combinación de submodelos: Pérdidas NC, Hietograma Especificado e Hidrógrafo Unitario de Clark.*

*Palabras clave: modelación de avenidas, modelación hidrológica, modelo HEC-HMS.*

*Given the great importance of floods definition for population protection and investment preservation in the construction works of the East-West Diversion, mathematical modeling of floods was carried out for Levisa dam with HEC-HMS model. Lacking maximum rainfall data, a 1% Rainfall vs. Height relationship was established and its results were transformed into a hyetogram by using the Regional Nondimensional Depth Increase Curve and software TableCurve2D. It was modeled for 1% probability with 48 subvariants. The results were compared with the 1% Maximum Flow vs. Tributary Area regional relationship, established by the author for Nipe-Sagua-Baracoa region, being definitive the following submodel combination: CN Losses, Specified Hyetogram and Clark Unitary Hydrograph. Keywords: flood modeling, hydrological modeling, HEC-HMS model.*

ción hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrógrafos de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvia, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hidrogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa (USACE 2000). Ha alcanzado gran popularidad en la práctica hidrológica internacional pero aún es escasa su aplicación en el país.

## CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA E INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

### Características de la cuenca

La cuenca del río Levisa se encuentra al este de la provincia de Holguín, en la vertiente norte de la Sierra Cristal, corre de sur a norte y desemboca en el océano Atlántico, en la bahía homónima, limita al oeste con la cuenca del río Cabonico, al sur con el río Mícara y las cabeceras del río Mayarí y al este con la cuenca del río Arroyo Blanco y afluentes derechos del río Mayarí. El área de la cuenca correspondiente al cierre en estudio es de 91 km<sup>2</sup> con una altura media de 500 m SNM, tiene forma ovalada, con pendientes bastante desarrolladas y laderas muy abruptas, en ocasiones casi verticales.

Las mayores alturas se localizan en el parteaguas donde sobresale el Pico Cristal con sus 1320 m SNM. El cauce de estiaje es poco profundo, tiene un ancho de 10 a 20 m, seguidos en ambos márgenes de terrazas muy pronunciadas y abruptas debido a la proximidad de la serranía. Los suelos son típicos de la región, formados por arcillas rojas de origen laterítico. La vegetación es uniforme, conformada por bosque de pinos en las terrazas y en las márgenes crecen arbustos y matorrales. En la cuenca existen zonas muy afectadas por la explotación minera.

### Disponibilidad de información

En la cuenca en estudio no existe información pluviométrica, en general en la zona se cuenta con 18 pluviómetros. Las series de observación de las precipitaciones están caracterizadas por la heterogeneidad de sus períodos (oscilan entre los 10 y 58 años) y de su distribución territorial, quedando grandes fajas altimétricas sin observación, lo que dificulta la definición de los estadígrafos de la presa Levisa.

Solamente se cuenta con observaciones del escurrimiento medio en la cuenca Levisa, aguas abajo del cierre de estudio, las mismas son extremadamente cortas, existiendo sólo un año completo de observaciones: 1965, y un período con algunas observaciones mensuales y no se cuenta con observaciones del escurrimiento máximo. En consecuencia se utilizaron otras 7 estaciones de la región físico-geográfica del macizo Nipe-Sagua-

Baracoa, y que se caracterizan por la heterogeneidad y extrema cortedad en varios casos, de sus períodos de observación (oscilan entre los 7 y 44 años).

Se contó además con documentos técnicos relacionados con estudios anteriores en el territorio. Como base cartográfica se utilizaron los planos E 1: 25 000 y 50 000.

### Tratamiento de la información hidrometeorológica

Para la caracterización de la lluvia máxima diaria anual del 1% de probabilidad (Estrada et al. 2010), requerida para la determinación de la avenida de diseño, primeramente fueron definidos todos los valores de la lluvia máxima diaria para cada año de observación de los pluviómetros señalados. A partir de estas series de observación se definieron los fenómenos extremos más significativos de la zona por sus valores y extensión territorial, destacándose el correspondiente a 1963 (Ciclón Flora), con valores entre 238 y 331 mm y que abarcó todo el territorio, seguido en importancia por los años 2000, 1977, 94 y 60.

Dada la heterogeneidad en las longitudes de las series y, sobre todo, en la observación por los diferentes pluviómetros de los fenómenos extremos más significativos, fue necesario establecer la homogeneidad estadística de la zona, siendo restablecidos por el método de las distancias los valores correspondientes al ciclón Flora en los equipos que no poseen observación del mismo dada su significativa influencia en las series de lluvia máxima. Se realizó el análisis para los 11 equipos más cercanos al área de estudio determinándose que las series de observación se agrupan en una zona estadísticamente homogénea (ZEH) con respecto a las medias y a las varianzas, excluyendo 2 equipos por su cortedad y mala calidad.

Se realizó el tratamiento estadístico de las series de lluvia máxima aplicándoseles 13 curvas teóricas de probabilidad a través de los programas PQMAX y AFMULTY con utilización del coeficiente de Mamedov, determinándose la curva de mejor ajuste gráfico en cada caso, resultando en la mayoría la Exponencial. El coeficiente de Mamedov (k) permite corregir la probabilidad de los fenómenos extraordinarios al asignar a los valores atípicos una probabilidad de ocurrencia más cercana a la realidad que la correspondiente a la que obtienen a partir de las series de observación, por lo general cortas.

$$k = \frac{X}{Xm} \quad (1)$$

$$p = \frac{m}{N + I + k^3} * 100 \quad (2)$$

donde:

X- Valor extremo

Xm- Promedio de la serie incluyendo X

p- probabilidad de ocurrencia de X

m- número de orden de X en la serie ordenada descendientemente

N- Número de valores observados en la serie incluyendo X

Se estableció una relación lluvia máxima del 1% de probabilidad contra su altura con todos los equipos procesados (ver figura 1) y se determinó el valor correspondiente a la altura media de la cuenca igual a 440 mm.

Esta lámina máxima fue transformada en el hietograma de 1 día de duración con intervalos de 1 h por la Curva Adimensional de Acrecentamiento de la Lámina del 1% de probabilidad para la región montañosa de Oriente, definida por Trusov (1986) y utilizando el programa Tabla-Curve 2D para el ajuste de curvas. La intensidad máxima igual a 127 mm en una hora obtenida en el mismo fue variada de posición desde el inicio al centro, 2/3 y final del hietograma para manejar en la modelación diferentes variantes de su ocurrencia. Ver figura 2.

Al no poderse desarrollar la calibración y validación del modelo en la cuenca por falta de observaciones hidrométricas, sus resultados tendrán un carácter aproximado. A modo de comparación fue establecida una Relación Regional de dependencia del escurrimiento máximo del 1% de probabilidad con el área de la cuenca para las estaciones hidrométricas del macizo Nipe-Sagua-Baracoa

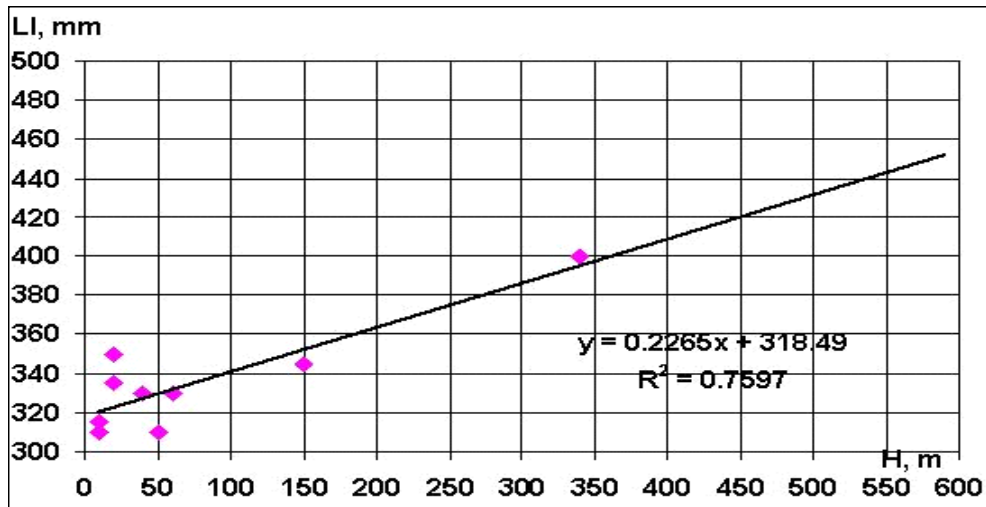


Figura 1- Relación Lluvia Máxima 1% - Altura

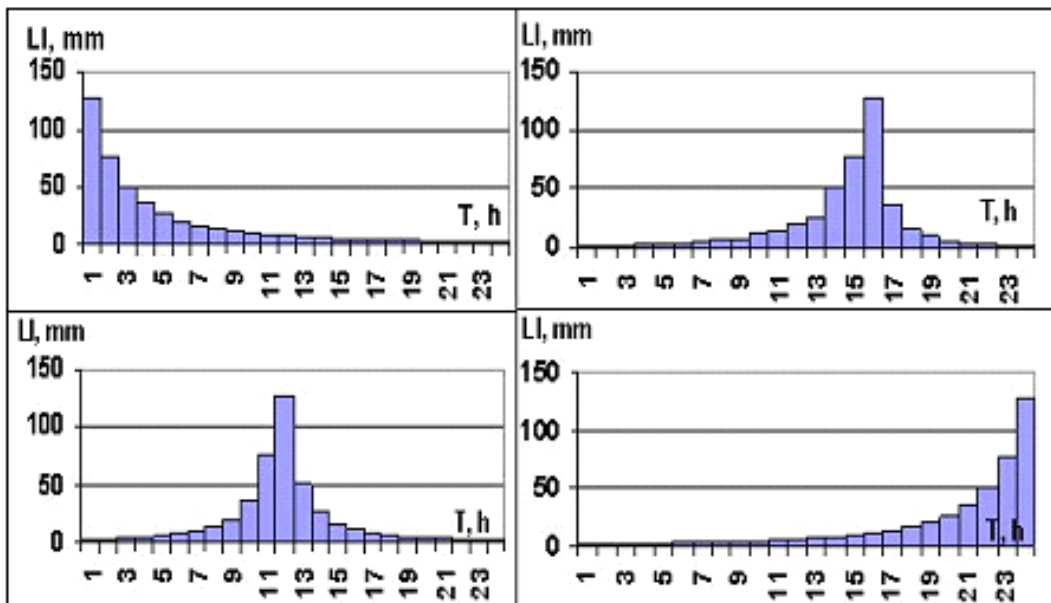


Figura 2- Variantes de posición de la intensidad máxima

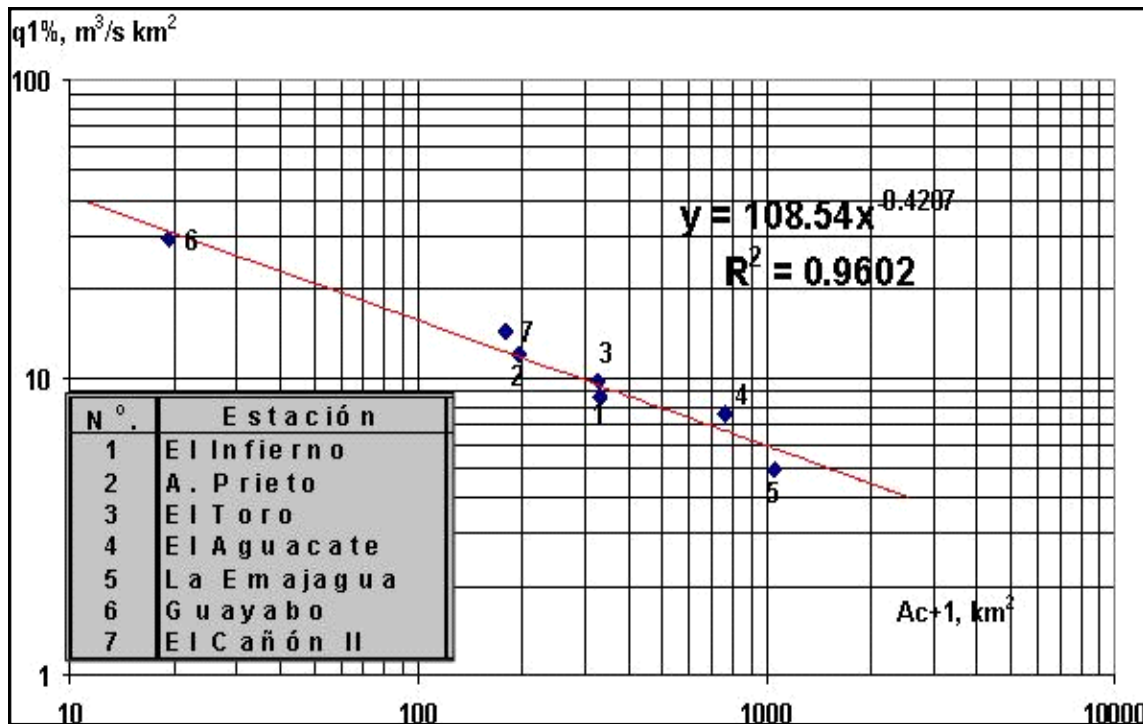


Figura 3- Relación Regional Esguerrimiento Máximo 1%-Área Tributaria. Región Nipe-Sagua-Baracoa

y por la cual se obtuvo un gasto del 1% de probabilidad para la presa Levisa igual a 1475 m<sup>3</sup>/s (Estrada et al. 2010). Ver Figura 3

Para ello fue necesario, a partir de los valores del gasto máximo del ciclón Flora determinado por las huellas de la avenida para algunas estaciones (Bulat 1964), definir el valor aproximado correspondiente al resto en función del área de la cuenca y agregar el mismo a las series de observación. En el tratamiento estadístico de las series de esguerrimiento máximo anual de dichas estaciones, con aplicación del coeficiente de Mamedov (1), se utilizaron los programas AFMULTY y PQMAX, con un total de 15 curvas probabilísticas para valores extremos, de las cuales fueron escogidas la de mejor ajuste o el promedio de un grupo de ellas para cada estación.

En el caso de las series más cortas (7 y 8 años) se siguieron las recomendaciones de Semionov (1969) para el tratamiento estadístico de valores mensuales para series cortas de observación a partir de la definición de los períodos de acuosidad interanual y cuya fórmula de posición probabilística depende del número de meses por períodos húmedo y seco.

### MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación de la avenida de diseño se realizó con el modelo HEC-HMS, modelo de simulación hidrológica de amplio uso internacional y poderoso algoritmo de cálculo,

que tiene un carácter lineal y semidistribuido; y posibilita estimar los hidrógrafos de salida en una cuenca o varias subcuencas a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hidrogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en esguerritía directa (USACE 2000).

El mismo cuenta con numerosas ventajas: se basa en métodos hidrológicos para gastos máximos en cuencas de cualquier tamaño, permite la modelación de diferentes situaciones, es capaz de procesar una voluminosa información, posee buenas funciones de pre y post procesamiento por lo que los datos son más fáciles de editar, modificar y visualizar en pantalla, tiene capacidad para interactuar con modelos digitales, es un programa validado por la práctica internacional, es relativamente sencillo y fácil de utilizar y es de libre adquisición.

Presenta algunas desventajas relacionadas con las condiciones de su aplicación, como son la insuficiente información de precipitaciones en la cuenca en estudio y que existe poca experiencia de su aplicación en cuencas del país.

El programa permite introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico a través de módulos integrados y obtener respuestas gráficas o tabuladas de fácil comprensión e impresión. Trabaja con tres módulos básicos que definen

en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca, los cuales deben definirse completamente antes de iniciar la corrida de la solución: Módulo Meteorológico, Módulo de Cuenca y Módulo de Control.

Una simulación calcula la transformación de lluvia-caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico y las especificaciones de control que definen el período de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar. Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos son requeridos como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico.

El modelo de la cuenca representa la cuenca física, se desarrolla por el usuario incluyendo y conectando elementos hidrológicos. Estos últimos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos que se producen en la cuenca. En la presente aplicación el modelo fue concebido como una cuenca unitaria debido a que no existen tributarios importantes comparables al río principal ni cambios significativos en los regímenes geológico y climático, la cuenca es abarcable en su totalidad por las lluvias ciclónicas y no existen objetivos internos con interés de modelación, de tal forma que para el cálculo de los gastos máximos no es imprescindible descomponer la cuenca.

La modelación se realizó en 48 variantes y subvariantes a partir de la combinación de los diferentes submodelos que integran el HEC-HMS y en dependencia de la información existente en la cuenca, considerando que no existe flujo base:

- Modelo de pérdidas (considerando una alta humedad antecedente): Iniciales y constantes; y Número de la Curva (NC por sus siglas en Inglés) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS por sus siglas en Inglés). de EE. UU.
- Modelo meteorológico: Hietograma Especificado (con 4 subvariantes según la posición de la intensidad máxima al principio, 2/3, medio o final del hietograma); y Tormenta Tipo del SCS (en 4 subvariantes según el tipo de tormenta).
- Modelo de transformación lluvia-escurrimiento: Hidrógrafo Unitario de Clark e Hidrógrafo Unitario del SCS.

Para la determinación del tiempo de concentración solicitado por el modelo se utilizó la ecuación de Temez (Ferrer Polo 1993). Comúnmente en el país se determina por la fórmula de Kirpich 1940, o de California, que arrojan resultados semejantes entre sí, por lo general bajos, lo que exagera el gasto pico y provoca inversiones econó-

micas innecesarias. La fórmula de Kirpich fue calibrada con base en los datos registrados en 7 cuencas rurales de Tennessee, en Estados Unidos.

Las cuencas consideradas presentaban una superficie inferior a 50 hectáreas y cauces bien definidos, con pendientes que oscilaban entre 3 % y 10 %. Para su utilización en cuencas con características diferentes a las del proceso de calibrado (Ferrer Polo 1993) es necesario tener en cuenta lo indicado al respecto por D. A. Chin en su libro "Water Resources Engineering", en el que se incluyen algunos coeficientes correctores. En el caso de cuencas naturales el mismo es igual a 2.0. Sólo al aplicar dicha corrección a la fórmula de Kirpich (lo que comúnmente no se hace) se obtienen valores semejantes al de la fórmula de Temez utilizada en el presente estudio.

### Resultados de la modelación

La modelación, en dependencia de las variantes utilizadas, arrojó valores de gastos máximos del 1 % de probabilidad que varían en 480 m<sup>3</sup>/s, con un intervalo entre 1200 y 1680 m<sup>3</sup>/s y un promedio de 1440 m<sup>3</sup>/s, luego de desechar algunas variantes con valores muy bajos para las características de humedad y pendientes de la cuenca en estudio y que se apartaban del resultado de la Relación Regional Escurrimiento Máximo 1%-Área Tributaria en un 20% o más.

Tomando un 5% de error con respecto al resultado de la Relación Regional utilizada como comparación, los mejores resultados se obtuvieron por las siguientes combinaciones de submodelos:

1. Modelo de pérdidas: Iniciales y Constantes; modelo meteorológico: Hietograma Especificado con la posición de la intensidad máxima a 2/3 y al centro del hietograma; y modelo de transformación lluvia-escurrimiento: Hidrógrafo Unitario de Clark.
2. Modelo de pérdidas: NC del SCS; modelo meteorológico: Hietograma Especificado con la posición de la intensidad máxima a 2/3 y al centro del hietograma; y modelo de transformación lluvia-escurrimiento: Hidrógrafo Unitario de Clark.
3. Modelo de pérdidas: NC del SCS; modelo meteorológico: Tormenta del SCS Tipo 3; y modelo de transformación lluvia-escurrimiento: Hidrógrafo Unitario del SCS.

Es necesario destacar que, para la cuenca en estudio, la posición de la intensidad máxima a 2/3 o al centro del hietograma especificado no provoca diferencias significativas en el resultado de la modelación. Como resultado definitivo de la modelación se adoptó la tercera combinación de submodelos cuyo gasto máximo coincide con el resultado de la Relación Regional, obteniendo así el hidrógrafo de la avenida del 1% de probabilidad: distribu-

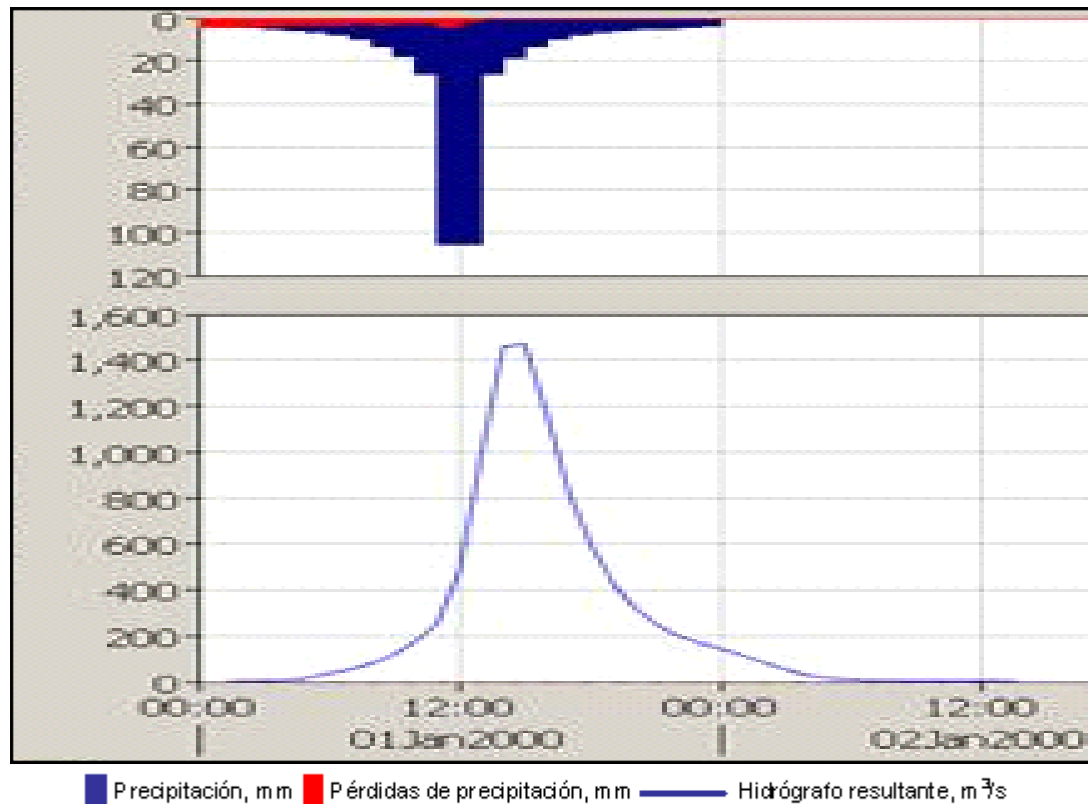


Figura 4- Hidrógrafo resultante de la modelación

ción temporal de los gastos, valor extremo y volumen de la avenida. Ver figura 4.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- La aplicación del modelo HEC-HMS permitió ampliar la caracterización hidrológica de la cuenca en estudio logrando resultados importantes tales como el gasto máximo y el hidrograma de la avenida de diseño.

- Esta simulación, aunque constituye una aproximación a la realidad del fenómeno modelado dado que en la cuenca en estudio no existen observaciones para la calibración y validación del modelo, se considera aceptable luego de ser comparada con la Relación Regional Escorrentamiento Máximo 1%-Área Tributaria para la región Nipe-Sagua-Baracoa.

- El trabajo presenta como novedoso la aplicación, en una cuenca montañosa de la región oriental del país, de un modelo hidrológico de amplio uso internacional, la utilización de la ecuación de Temez para la determinación del tiempo de concentración y la confección del modelo hidrológico de la cuenca tributaria de la presa Levisa, lo que posibilita el estudio de escenarios futuros.

### Recomendaciones

- Utilizar los resultados obtenidos en el diseño de la presa Levisa.

- Utilizar las experiencias obtenidas de la aplicación del modelo en la modelación hidrológica de otras cuencas nacionales.

- Desarrollar, a partir del modelo confeccionado, el estudio de escenarios futuros relacionados con el cambio climático o transformaciones particulares en la cuenca Levisa, así como la ulterior ampliación del propio modelo para la transformación de las avenidas por el embalse en diseño.

### REFERENCIAS

**Bulat, B. G.** (1964). "Avenidas catastróficas en las provincias orientales de Cuba del 4 al 8 de octubre de 1963". EIPH. Holguín

**Estrada, V.; Moreno, I. y Cruz, S.** (2010). "Trasvase Este-Oeste. Tramo Sagua - Melones. Presas Levisa, Cabonico y Grande. Estudio hidrológico". EIPH. Holguín.

**Ferrer Polo, F. J.** (1993). "Recomendaciones para el cál

---

culo hidrometeorológico de avenidas". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid.

**Semionov, E.** (1969). "Cálculo de los caudales máximos de agua por series cortas de observación". INRH. La Habana.

**USACE** (2000). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS". Hydrologic Engineering Center.

**Trusov I.** (1986). "Intensidades máximas de las precipitaciones en las regiones naturales de Cuba". INRH. La Habana.

---

Recibido: enero del 2011  
Aprobado: febrero del 2011