

Guía metodológica para el cálculo de caudales de avenida en la isla de Tenerife

José D. Fernández Bethencourt; Ing. CCyP; Gerente del Consejo Insular de Aguas de Tenerife; jfernandez.cia@cabtfe.es

Pedro Delgado Melián; Ing. Agrónomo; Jefe de Sección del Consejo Insular de Aguas de Tenerife; pdelgado.cia@cabtfe.es

Jesús López García; Ing. CC y P; Yacu S.L.; jesus@yacu.es

Martín Rodríguez Pallarés; Ing. CCyP; INCLAM S.A.; martin.rodriguez@inclam.com

1 Introducción

En zonas áridas, aunque con escorrentías torrenciales y erosión consiguiente importante como sucede en la isla de Tenerife, es poco frecuente disponer de registros de dichas escorrentías al no existir estaciones de aforo. En los pocos casos en que se construyeron, no fue posible mantenerlas adecuadamente, especialmente por los acarreos (arrastres sólidos), que inutilizaron su instrumentación hasta dejarlas inservibles.

En estos casos la escorrentía sólo se puede evaluar indirectamente a partir del mejor conocimiento posible de la lluvia y de las características del territorio que intervienen en el proceso de generación de escorrentía: además de los aspectos hidrometeorológicos, la masa vegetal (cultivos y vegetación natural), los suelos (en su acepción edafológica) de cobertera, las características geológicas del terreno subyacente, los usos antrópicos (por la alteración de la capacidad de infiltración de los terrenos), la pendiente, la topología y desarrollo de la red de drenaje y sus características morfológicas, etc.

La lluvia – y consiguientemente la escorrentía resultante – es considerada una variable estocástica. No sabemos cuándo y cuánto lloverá, pero resulta posible estimar la probabilidad de que en un lugar concreto se presente una lluvia determinada, o expresado de otra forma, qué lluvia puede presentarse con una probabilidad determinada.

Este último planteamiento es el más generalizado en el mundo con el concepto de “período de retorno”: período de tiempo en el que se espera se produzca al menos una vez en un año el fenómeno con esa magnitud.

Los métodos estadísticos para evaluación de valores extremos (máximos) han tenido un gran desarrollo y aplicación en la hidrometeorología, pero su mayor o menor aproximación a la realidad depende de la calidad y amplitud de los datos sobre los que se aplican. Subyace la duda de si estamos en un proceso de “cambio climático” que desvirtúe la hipótesis de variable estocástica pura.

Ante la necesidad de evaluar aceptablemente los caudales de avenida, el Consejo Insular de Aguas (CIATF) decidió desarrollar ese proceso en las fases siguientes:

- Implantación de la base de datos hidrometeorológicos de Tenerife.
- Establecimiento de un Sistema de Información Geográfica de la red hidrográfica insular.
- Estudio de caracterización del régimen pluviométrico extremo de Tenerife.
- Desarrollo de un Sistema de Modelización Hidrológica, capaz de:
 - Simular crecidas en los cauces naturales
 - Calcular hidrogramas y caudales de avenidas en cualquier punto de la red insular
 - Regionalizar variables y parámetros hidrológicos,
- Elaboración de la metodología para el cálculo de caudales de avenida, para:
 - Formular hipótesis y criterios metodológicos homologados
 - Poner a disposición de la sociedad los datos disponibles
 - Conocer, prevenir y minimizar el riesgo de daños por avenidas e inundaciones.

Estas fases se cubrieron con la Guía Metodológica '2003, pero procede disponer de una nueva versión actualizada y ampliada por las razones siguientes:

- En este tiempo la red hidrográfica de cauces oficiales ha sido revisada minuciosa y exhaustivamente por los servicios técnicos del CIATF. Se recogen muchas modificaciones, incluso incorporando cauces no contemplados en la primera versión y nuevos puntos de control.
- Por encargo del CIATF, el Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna (ULL) finalizó en 2007 la elaboración del mapa edafológico (a escala 1:25.000 frente al anterior a escala 1:50.000) y el estudio de las propiedades hídricas de los suelos. El nuevo mapa cubre la isla completa lo que permite solventar algunas dudas en el cálculo del número de curva del SCS en zonas que se habían obtenido de la aplicación de mapas geológicos.
- El Departamento de Botánica de la ULL ha confeccionado el mapa de vegetación (a escala 1:20.000), que incluye una caracterización detallada de los tipos de vegetación natural presentes en la isla. Sobre la base de esta cartografía temática, los servicios técnicos del CIATF han concluido recientemente, con el apoyo de ortofotos, la tarea de asignar valores de densidad de ocupación a cada tesela de vegetación.
- La cubierta vegetal en las zonas de cultivos y la caracterización de las tipologías presentes en cada una de ellas se actualiza cada cuatro años. El último mapa de cultivos a escala 1:5.000 elaborado por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación del Gobierno de Canarias, corresponde a la campaña agrícola 2003-2004.
- En áreas urbanas se cuenta con la actualización de los Planes Generales de Ordenación Urbana para su adaptación a la Ley 9/1999 de Ordenación del Territorio, además de la información contenida en el mapa de ocupación del suelo, elaborado por la empresa pública Cartográfica de Canarias (GRAFCAN) y en otras cartografías específicas, como la del sistema viario insular facilitado por el Servicio de Carreteras del Cabildo de Tenerife.
- La serie de datos pluviométricos y pluviográficos ha incrementado su serie histórica con la información procedente de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), del Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), y del Servicio de Agricultura del Cabildo de Tenerife (AgroCabildo).
- Se ha obtenido un modelo digital del terreno (GRAFCAN) de mayor precisión (celda de 5 m frente a la 10 m utilizada en el 2003).
- Las posibilidades informáticas han aumentado de forma considerable lo que posibilita el tratamiento de mucha mayor información (ortofotos, cartografía raster, etc.)

Aunque se trata de una actualización, dicha tarea supone un trabajo de magnitud similar al original, ya que es necesario generar las diferentes coberturas de información, preparar la nueva topología, ejecutar de nuevo todos los modelos de cálculo y realizar el postproceso de resultados.

Lógicamente, se han mantenido determinados desarrollos y aplicaciones informáticas que no han sufrido cambios desde la versión original lo que, unido a la existencia previa de una metodología del proceso perfectamente definida, ha permitido acelerar los cálculos.

2 Metodología utilizada en la elaboración de la Guía

Debido a las facilidades que ofrece para el cálculo hidrológico, se ha adoptado como base metodológica de trabajo un GIS de tipo matricial (raster). Sin embargo, para el tratamiento previo de las capas de información necesarias para la Guía se ha contado con el apoyo de sistemas vectoriales, ya que estos resultan más ventajosos.

En relación con el modelo matemático hidrometeorológico a emplear, se ha optado por la utilización del modelo conceptual global del tipo tormenta.

El modelo de tormenta se justifica por exclusión, ya que los modelos del tipo continuo necesitan disponer de series pluviométricas a intervalos pequeños (por ejemplo cinco o diez minutos) en numerosas estaciones pluviométricas para períodos muy largos (por ejemplo 50 años).

Evidentemente, no se dispone de esta información en Tenerife y aunque se espera que en el futuro, cuando los datos sean abundantes, puedan popularizarse los modelos continuos, al tiempo presente no representan una buena alternativa a los modelos de tormenta, cuyo empleo acumula actualmente una amplia experiencia.

El modelo del tipo global se ha preferido frente al distribuido por su sencillez de tratamiento y la inapreciable falta de precisión. El problema de cálculo es demasiado complejo para trabajar al nivel de detalle que requieren estos modelos, capaces de realizar balances de agua celda a celda para determinar el exceso de lluvia intervalo a intervalo y trasladarlo a las celdas inferiores.

Por otra parte, tampoco hay garantía de que al utilizar un modelo tan detallado se obtengan mejores resultados. La traslación de agua de unas celdas a otras en un territorio tan abrupto como Tenerife, que generalmente produce flujos del tipo rápido, no podría ser calibrada sin la ayuda de los inexistentes registros en las estaciones de aforo, lo que dejaría una gran incógnita en los resultados.

A cambio, un modelo global basa sus características de traslado en algoritmos sencillos de balance hidrológico tan comprobados como el hidrograma unitario, que partiendo únicamente de la geometría permite trasladar los caudales producidos hasta el punto final de la cuenca.

La precipitación en un modelo distribuido se aplicaría en cada punto leyendo los mapas de isohietas y componiendo hietogramas específicos. Sin embargo esta rigurosa forma de actuar no mejora las predicciones que en el modelo global se realizan partiendo de precipitaciones promediadas en todas las celdas que componen la cuenca con el mismo procedimiento.

Hay que destacar que al utilizar un modelo global que se alimenta de parámetros extraídos de GIS, se resume la información del sistema distribuido que representan las coberturas raster de los parámetros en cada subcuenca, lo que supone un método intermedio entre el global y el distribuido.

El método más extendido para simular caudales en modelos globales, y que se emplea por defecto en la elaboración de la Guía, es el del hidrograma unitario (utilizado para cuencas de más de 3 km²), que representa el caudal que produce la cuenca como respuesta a un exceso de lluvia de valor unidad y duración determinada. Para cuencas menores de 1 km² se utiliza el método racional y para las cuencas intermedias una media ponderada entre ambos métodos.

2.1 Caracterización del régimen de precipitaciones extremas

La caracterización trata de extraer la mayor información posible de las lluvias registradas para obtener productos elaborados que se pueden aplicar directamente a los procesos de simulación hidrometeorológica. En concreto se buscan:

- Isohietas máximas diarias para diferentes periodos de retorno en la isla
- Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia
- Patrones y frecuencias de la distribución temporal de las tormentas más intensas

Para facilitar la realización del presente trabajo, el CIATF ha realizado una labor exhaustiva de recopilación de información pluviométrica y pluviográfica en la isla.

En los siguientes apartados se resumen los datos que tras la recopilación quedaron disponibles para el estudio para cada uno de los dos tipos de información (lluvia total e intensidades).

2.1.1 Datos pluviométricos diarios

Para caracterizar la pluviometría diaria extrema en la isla se dispone de las series de precipitación máxima diaria en 382 estaciones pluviométricas. Las estaciones con datos pertenecen a las redes de la AEMET, del ICIA y de AgroCabillo.

El análisis se ha realizado sobre las series anuales de precipitación máxima diaria, construidas con las máximas observaciones diarias de cada año hidrológico.

Para obtener los mapas de isolíneas que llevan a la precipitación de cálculo en las subcuencas se han realizado las siguientes tareas:

- Selección de estaciones pluviométricas (47 estaciones con más de 20 años de datos de garantía)
- Ajuste de las series anuales de precipitación a distribuciones extremas
 - Composición de las series anuales de precipitación máxima diaria

- Ajuste de las series de precipitaciones máximas diarias a las distribuciones estadísticas de Gumbel, SQRT-ET max y log-Pearson tipo III. En este último caso con las asimetrías propias de cada serie y a continuación con las asimetrías regionalizadas.
- Extrapolación de las precipitaciones del ajuste final a los períodos de retorno 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000 y 5000 años.
- Elaboración de los mapas de isolíneas máximas diarias
 - Establecimiento y cálculo de pluviómetros virtuales
 - Cálculo de isolíneas para cada período de retorno
 - Representación de los mapas de isolíneas sobre un mapa de la isla
- Conversión de isolíneas máximas diarias a coberturas raster para la simulación

Las isohietas utilizadas en la simulación se generaron a partir de los valores deducidos de la función de distribución de frecuencias log-Pearson tipo III. A modo de ejemplo, del resultado final del trabajo, se muestra a continuación el mapa de precipitaciones máximas diarias para el período de retorno de 500 años.

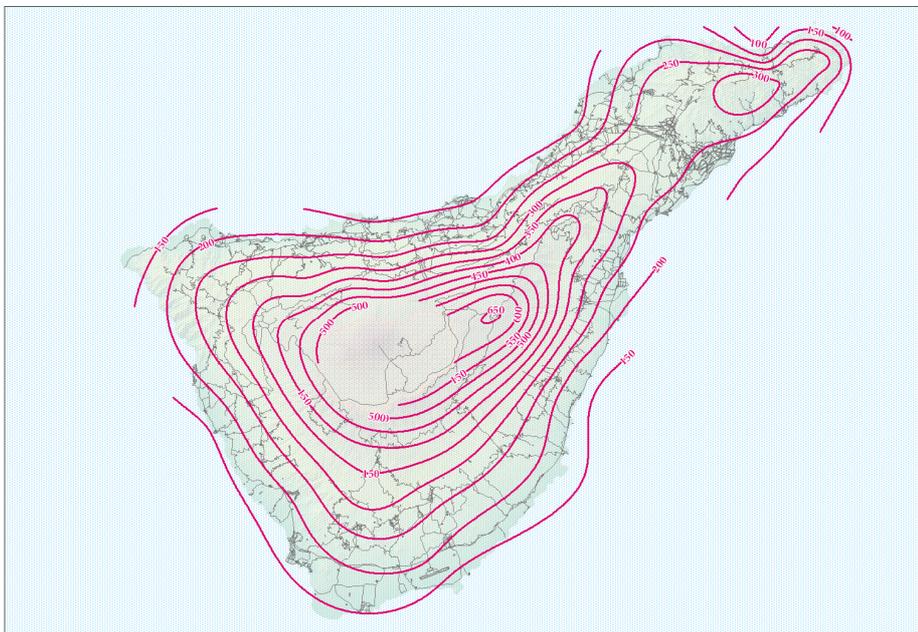


Figura 1 Precipitaciones máximas diarias para 500 años de período de retorno

2.1.2 Datos Pluviográficos

Se dispone de los datos pluviográficos procedentes de las redes de observación gestionadas por las siguientes entidades:

- AEMET: Se cuenta con las series diezminutales de lluvia en los dos aeropuertos y en el Observatorio del Centro Meteorológico de Santa Cruz. Las series son muy largas ya que a las series recogidas por las estaciones automáticas se suman las procedentes de digitalización de bandas que se incorporaron en el estudio antecedente.
- AgroCabildo: Se dispone de información en 163 estaciones, con datos a intervalos de 30' en las series más antiguas que bajan posteriormente a 12' (en conjunto más de 15 millones de registros de lluvia). Las primeras series comienzan en septiembre de 1996, pero muy pocas sobrepasan los 10 años de datos, a veces incompletos. En líneas generales, debido a que densifican la red tradicional y porque la mayoría está situada en altura, suponen una información muy valiosa que en el futuro permitirá extender las características de la precipitación a nuevas zonas de la isla, pero que carece de valor en el presente análisis por su relativa escasez.

- ICIA: Dispone de información en 6 estaciones, con datos a intervalos de 1h en los observatorios más antiguos y que se han reducido a 30' por recientes renovaciones de instrumentación. Las series son extremadamente cortas para su inclusión en el análisis pero suponen, como las anteriores una esperanza para mejorar la información en el futuro.

En primer lugar se busca caracterizar la frecuencia de las intensidades de lluvia. El resultado de mayor interés para la hidrología son las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (abreviadamente IDF). Estas curvas sintetizan las propiedades de la pluviometría intensa en un observatorio en forma de relaciones entre la intensidad de las lluvias y su duración para cada frecuencia de superación (o período de retorno).

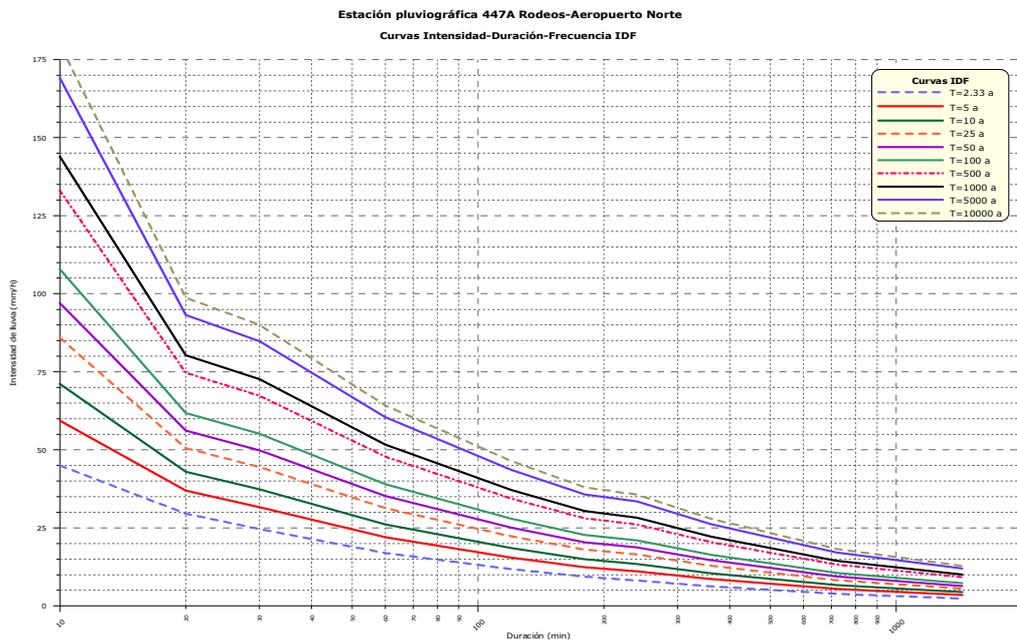
Para calcular las curvas IDF, se parte de los registros de pluviógrafos con longitud de serie suficiente para a continuación abordar los pasos siguientes:

- Preparación de las series anuales temporales de intensidad de lluvia para diferentes duraciones
- Ajuste de las series temporales a distribuciones de frecuencia
- Extrapolación a los períodos de retorno deseados
- Dibujo de las curvas individuales

Metodológicamente se siguen los procedimientos empleados en el cálculo de las isohietas máximas diarias, utilizando como valores de partida las series anuales formadas por las intensidades máximas de lluvia para cada duración. Para componerlas se rastrean las series de precipitación de cada estación a intervalos diezminutales (el pluviograma) para encontrar la intensidad máxima registrada en cada año para cada duración de tormenta analizada (5, 10, 15, 20, 30, 45 minutos, 1, 2, 3, 4, 6, 12 y 24 horas).

Una vez obtenidas las series anuales, se ajustan una la ley estadística extremal de Gumbel a cada duración para obtener las intensidades que corresponden a los diferentes períodos de retorno.

Como ejemplo de los resultados obtenidos se acompaña los ajustes realizados para la estación de Los Rodeos Tenerife Norte.



En segundo lugar se procede a la identificación y selección de tormentas. Para definir una tormenta de proyecto en un proyecto hidrológico es necesario especificar las siguientes características:

- Precipitación total de la tormenta
- Duración de la tormenta
- Distribución temporal
- Distribución espacial
- Movimiento

Los análisis realizados en este trabajo permiten obtener información de interés para la preparación de las tres primeras características y, por lo tanto, acometer proyectos que exijan la realización de estudios hidrológicos extremos. Para obtener resultados relativos a los dos últimos puntos es necesario disponer de una densidad de pluviógrafos mucho más importante que la actual funcionando sincrónicamente.

Para paliar esta deficiencia a la hora de aplicar los modelos hidrológicos y definir dichas características, será necesario utilizar métodos estándar simplificados.

Después de tantear, se llegó a la conclusión de que un criterio razonable para la selección de las tormentas importantes consiste en seleccionar de la base de datos general las que cumplen al menos una de las condiciones siguientes:

- Intensidad de lluvia en 10 minutos ≥ 50 mm/h
- Intensidad de lluvia en 20 minutos ≥ 30 mm/h
- Intensidad de lluvia en 30 minutos ≥ 20 mm/h
- Intensidad de lluvia en 60 minutos ≥ 10 mm/h
- Intensidad de lluvia en 120 minutos ≥ 5 mm/h
- Precipitación total de la tormenta ≥ 30 mm

Aplicando estos criterios se obtienen 376 tormentas. Como se excluyen del análisis las tormentas muy cortas, el análisis final se realiza con 339 tormentas.

Estas tormentas sirven de base a los cálculos que caracterizan las intensidades de lluvia y la forma de las tormentas. Para ello se ha empleado el clásico método de Huff, pero modificado para trabajar con el detalle de deciles en lugar de los cuartiles originales del procedimiento. Como resultado final se obtienen las curvas de diseño del histograma para la isla de Tenerife para tormentas corta (duración inferior a 6 horas) y tormentas largas (duración superior a 6 horas).

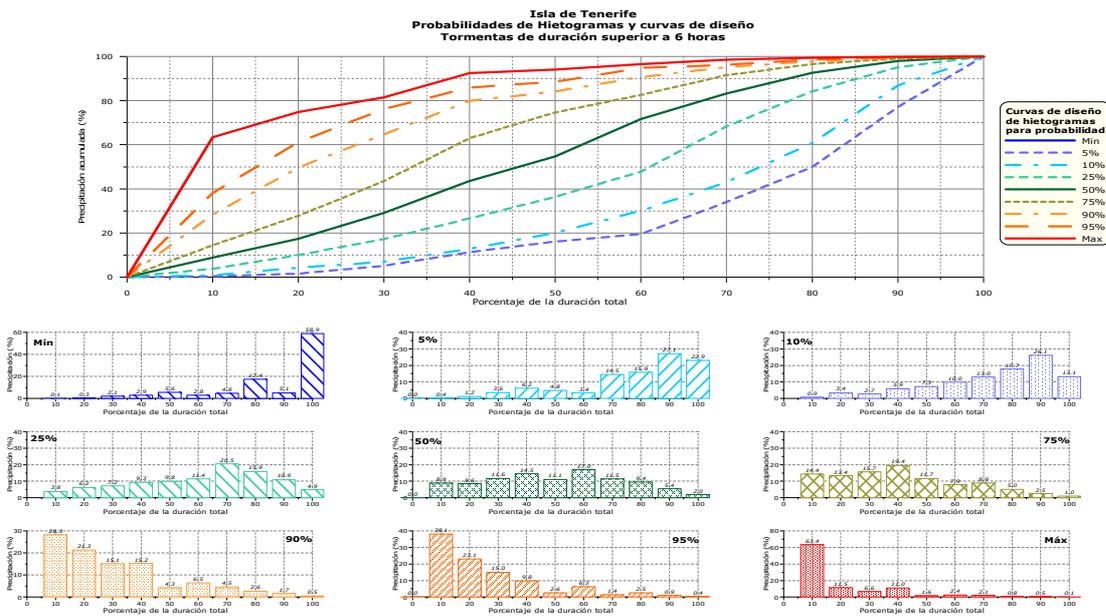


Figura 3

Ejemplo de probabilidades de hietogramas y curvas de diseño

2.2 Caracterización del medio físico

La base fundamental de la caracterización del medio físico es el modelo digital del terreno (MDT) y las distintas coberturas temáticas (edafología, vegetación, cultivos, ocupación del suelo, etc.). El modelo digital está discretizado en celdas cuadradas de 5 metros de lado y representa las cotas del terreno en la isla en un conjunto de 15.861 filas y 12.969 columnas (en total 205.701.339 celdas).

2.2.1 Geometría y parámetros físicos de las cuencas hidrográficas

El cálculo de la cuenca y sus parámetros asociados (contorno, área, cota máxima, cota mínima y longitud), en cualquier punto de la Isla y de forma interactiva, pasa por realizar previamente por unas serie de correcciones sobre el MDT, tales como el quemado con la red vectorial de cauces, la eliminación de sumideros y otra serie de problemas topológicos asociados con las confluencias y los trasvases.

Todos estos cálculos se realizaron con el apoyo de software propio de INCLAM y del programa TOPAZ (U.S. Department of Agriculture) obteniéndose, entre otros resultados, coberturas raster auxiliares que contienen direcciones de flujo y áreas vertientes a cada celda. Dado el tamaño del MDT (mas de 200 millones de celdas) fue preciso dividir éste en tres partes y una vez realizados los cálculos anteriores proceder a la unión de las coberturas obtenidas.

Sobre la base de estas coberturas raster es posible, a partir de la metodología de los autómatas celulares, obtener los parámetros anteriormente mencionados.

A pesar de la precisión del modelo de terreno (celda de 5m de lado) en zonas urbanas puede suceder que no se delimiten las cuencas con suficiente precisión, por lo que la aplicación informática de la Guía permite la importación (en formato shp) del contorno de una cuenca definida por otros procedimientos.

2.2.2 Parámetros de infiltración

Las características del terreno en cuanto a infiltración se representan a través del conocido número de curva del Soil Conservation Service (SCS). Este método clasifica el potencial de escorrentía de superficie por un único parámetro ligado a las características de la vegetación, del tipo de suelo, uso del suelo y pendiente.

La aplicación del cálculo de caudales de la Guía necesita la definición del número de curva en forma de cobertura raster con tamaño de celda de 5 m superponible a la del MDT. Para elaborarla, se dispone de la siguiente colección de coberturas sectoriales temáticas:

Tabla 1 Coberturas temáticas para el cálculo del número de curva

Cobertura	Contenido	Tipo	Origen
Cultivos	Cultivos agrícolas	Vectorial	Gobierno de Canarias. Consejería de Agricultura
Vegetación	Especies forestales y de vegetación natural	Vectorial	ULL. Dpto. de Botánica
Ocupación	Usos del suelo	Vectorial	GRAFCAN
Urbanismo	Zonas urbanas y urbanizables	Vectorial	Planes Generales de Ordenación Urbana
Carreteras	Red viaria insular	Vectorial	Cabildo de Tenerife
Espacios	Espacios abiertos en zonas urbanas	Vectorial	Plan Insular de Ordenación del Territorio
MDT	Cotas del terreno	Raster	GRAFCAN
Suelos	Grupos hidrológicos del SCS	Vectorial	ULL. Dpto. de Edafología y Geología

En síntesis, la metodología utilizada consiste en el relleno celda por celda de los valores que resultan de consultar la tabla de números de curva del SCS. Para ello, se definen previamente las equivalencias entre los elementos que componen las distintas coberturas temáticas de la Isla y las categorías que utiliza el método original del SCS.

A continuación se describe de forma esquemática el procedimiento de elaboración de la cobertura raster de número de curva:

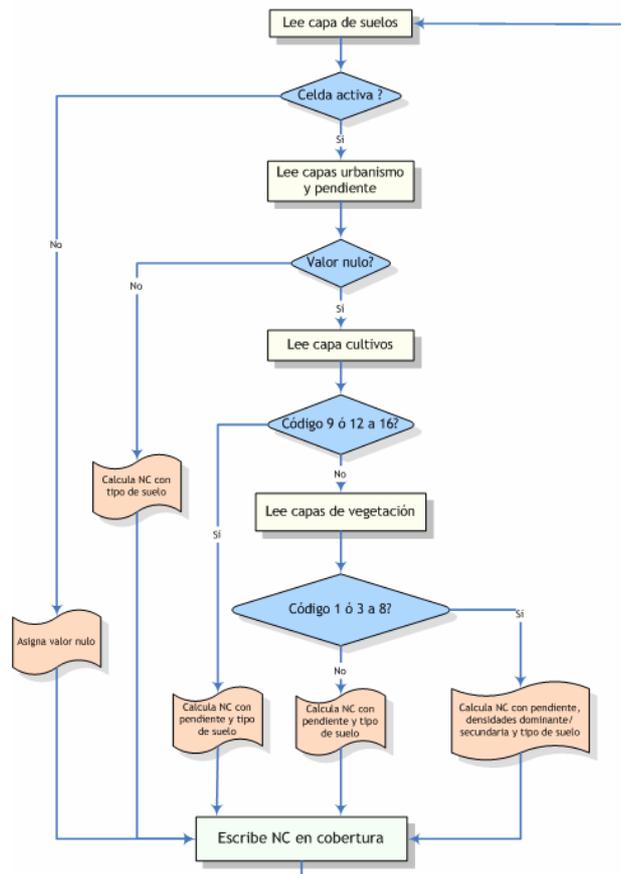


Figura 4 Esquema de cálculo del número de curva en una celda

3 Verificación de resultados e hipótesis de cálculo

Una vez parametrizados todos los elementos que requiere el modelo matemático de simulación HEC-1 y el método racional, es necesario preparar un procedimiento que facilite la selección de diferentes hipótesis de cálculo hidrológico y que permita validar los resultados aportados por el modelo, así como la generación de caudales para cada hipótesis.

A tal efecto, se ha desarrollado una aplicación para la simulación de los caudales de avenida y la obtención de los parámetros físicos e hidrológicos asociados a todas las cuencas vertientes (a cauces o al mar) de la Isla. Asimismo, efectúa el almacenamiento de los resultados generados para cada una de las hipótesis de cálculo consideradas en una base de datos.

El objetivo de esta aplicación es doble:

- Ajustar las hipótesis de simulación a los datos de caudales extremos observados o a cualquier otra información contrastada, mediante un proceso de verificación que, en cierto modo, sustituye a la imprescindible tarea de calibración que habría que realizar en caso de existir datos de aforo.
- Establecer los criterios recomendados por la Guía Metodológica para la obtención de los caudales de avenida, a partir del análisis previo de las hipótesis de cálculo hidrológico más plausibles y de la verificación de resultados de la hipótesis seleccionada.

La pantalla principal de la aplicación, que se muestra a continuación muestra las opciones que se han manejado para desarrollar los procesos de simulación de caudales y validación de hipótesis.

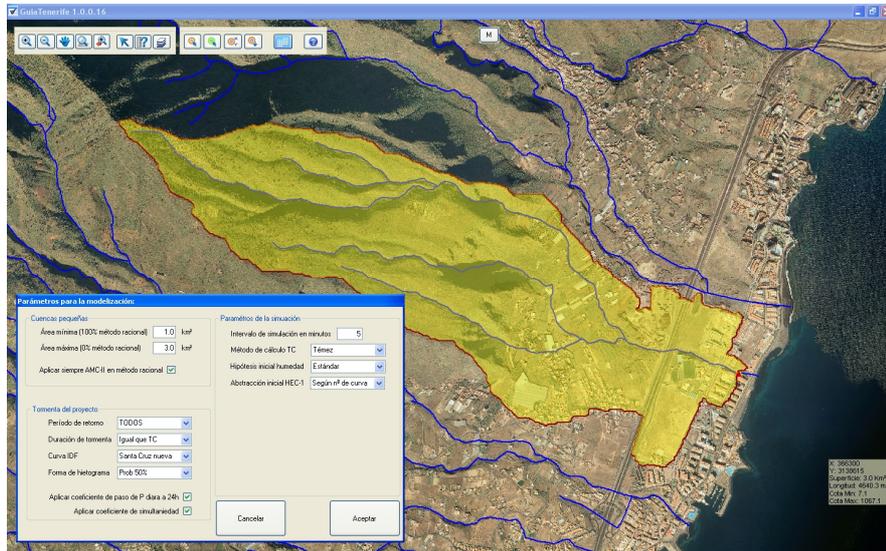


Figura 5 Pantalla de calibración

Básicamente, los parámetros de cálculo hidrológico que consideraron en la formulación de las hipótesis de simulación de caudales son los siguientes:

- Métodos de cálculo del tiempo de concentración y del tiempo de retardo del hidrograma.
- Hipótesis de humedad antecedente del suelo y de abstracción inicial previa al encharcamiento.
- Propiedades que definen la tormenta de proyecto.

4 Aplicación informática de usuario

En el año 2003 se desarrolló una Guía Metodológica para el cálculo de caudales en los cauces de Tenerife. Dicha aplicación permitía obtener de forma automática los caudales de avenida en cualquier punto de la red hidrológica digitalizada, a partir de los puntos calculados previamente (alrededor de 22.000).

El deseo de avance en la gestión y modelización hidrológica ha llevado a desarrollar nuevas funcionalidades y mejorar las existentes, dotando de mayor capacidad a la aplicación informática para el cálculo de caudales. Así en la nueva Guía se puede calcular, de forma interactiva, la cuenca vertiente con sus parámetros asociados (área, pluviometría, número de curva, etc.) y caudales de los distintos períodos de retorno, en cualquier punto de la Isla, independientemente de que se trate de un cauce de la red oficial o no. Estos cálculos se realizan de forma específica para el punto seleccionado sin necesidad de interpolar con otros calculados previamente.

Otra posibilidad que incorpora la nueva Guía es la de calcular los caudales asociados a una cuenca definida por el usuario. En este caso, el cálculo se realiza por el procedimiento de importar una región en formato shape (de ArcView) y de introducir a continuación el dato de determinadas variables (cota máxima y cota mínima de la cuenca y longitud del cauce principal), a partir de los cuales la Guía proporciona el resultado de los caudales de avenida así como del resto de parámetros asociados a la cuenca (número de curva, pluviometría, etc.).

También se han mejorado los aspectos gráficos, dado que permite incorporar como tapiz de fondo la ortofoto con resolución de 50 cm/píxel o la imagen raster de la cartografía a escala 1:5.000, que además facilitan enormemente la búsqueda y localización del punto de cálculo.

Cuando el usuario inicia la aplicación, se presenta una ventana que indica que se está realizando la carga de datos necesarios para su correcto funcionamiento. A continuación, se muestra el menú principal de la aplicación sin datos de simulación cargados.

Dentro de la aplicación se dispone de los botones típicos de los GIS (zoom más, zoom menos, etc.) que nos ayudan a realizar desplazamientos por la isla para localizar el punto donde se desea calcular los caudales. Como capa de fondo se puede elegir entre varias opciones que incluye la aplicación por defecto.