

ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO EN EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN A PARTIR DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE EN BOLIVIA

Martin Gómez García¹

Resumen

Un factor determinante en la estimación de caudales de diseño a partir de eventos extremos de precipitación, es la accesibilidad y existencia de información y registros que se constituyen en los insumos básicos para los modelos matemáticos que describen los procesos del ciclo hidrológico. La carencia de este tipo de información en zonas rurales, donde se sitúan los principales proyectos de diseño y construcción de puentes u obras de drenaje, requiere que se elaboren métodos de estimación estadística de eventos extremos y de estimación de las características de la superficie.

El presente artículo trata de mostrar las fuentes y medios para preparar los insumos básicos de modelación y estimación de caudales de diseño a partir de la información disponible en Bolivia.

Palabras-clave: caudal de diseño, análisis de eventos extremos de precipitación, DEM, Número de curva, HEC-HMS.

¹ Licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad Privada Boliviana. Ex profesor de Ingeniería Civil de la UPB. Estudiante de Maestría de la Carrera de Ingeniería Civil en la Universidad de Tokyo, , martingga_gchs@hotmail.com, martin@hydra.t.u-tokyo.ac.jp

1 INTRODUCCIÓN

El estudio y diseño de caminos y carreteras tiene como elemento fundamental, el estudio y caracterización hidrológica de la zona. El estudio hidrológico tiene como principal fin el de determinar los caudales para diferentes periodos de recurrencia que son necesarios para el relevamiento, revisión y cálculo del sistema de drenaje de la vía. Dicho sistema debe permitir el escurrimiento de forma segura y rápida de las aguas que lleguen al camino como resultado de las precipitaciones. Por esta razón, se debe determinar caudales correspondientes a eventos hidrometeorológicos extraordinarios que puedan originar daños a las obras hidráulicas y, así, permitir el flujo vial en beneficio del área económica colindante al proyecto (Gomez Garcia, 2007).

En Bolivia, el diseño del sistema de drenaje en obras viales está regulado por el “Manual Técnico de Hidrología y Drenaje para el Diseño de Carreteras” elaborado en el año 2008 por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). Dicho documento es una recopilación de parámetros, sugerencias y requerimientos básicos de un estudio hidrológico.

El procedimiento de estudio se resume a los cinco siguientes pasos (ABC, 2008):

Elección del Periodo de Retorno

Caracterización hidrográfica del Área de Estudio

Recopilación de datos meteorológicos

Análisis de datos hidrológicos

Estimación de los caudales de diseño

El objeto del presente artículo es el de evidenciar las dificultades encontradas para realizar los TRES últimos puntos del procedimiento en estudios hidrológicos en Bolivia. Este análisis se hace desde el punto de vista de que la información disponible para el territorio nacional que, en muchas ocasiones, no es la solicitada o establecida en los Términos de Referencia de Obras Viales basados en los Manuales Técnicos. De la misma manera, los paquetes computacionales de acceso público con los que actualmente se modela la respuesta hidrológica de las cuencas en estudio, requieren información representativa de la zona para lograr resultados fehacientes. A continuación se presentan algunas soluciones y procedimientos de adecuación de la información disponible en el país, para el correcto estudio de la respuesta hidrológica y la obtención de caudales de diseño en obras hidráulicas y de drenaje para carreteras.

2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS HIDROLÓGICOS

Es necesario mencionar que la determinación de caudales de diseño para obras hidráulicas y de drenaje (puentes, alcantarillas, cunetas, etc.) es un estudio de eventos extremos.

Actualmente, el estudio hidrológico se basa en la interacción de los elementos presentes en la atmósfera, suelo y vegetación, que están involucrados en el ciclo del agua y en

el balance energético. El estudio del movimiento de agua sub-superficial (el cual se constituye en flujo base fluvial en época de estiaje) y del balance energético en la cuenca, se hace indispensable en análisis y balances anuales, donde es importante la evolución temporal y el flujo espacial de factores como la humedad en el suelo, calor, radiación y momento (Sellers, 1997).

Sin embargo, en estudios de eventos extremos, el análisis de balance energético se hace irrelevante y el resultado depende únicamente de la respuesta de la cuenca a una parte del ciclo hidrológico, la cual está compuesta de los siguientes procesos: precipitación, infiltración y escurrimiento. Para poder modelar correctamente estos procesos y su interrelación, la información necesaria es la siguiente:

2.1 Información topográfica

Las características topográficas de la cuenca de aporte (superficie, distancias de flujo, cotas y pendientes) determinan parámetros hidrológicos como el tiempo de concentración. En el país, la entidad encargada de generar esta información en diferentes escalas es el Instituto Geográfico Militar (IGM). Esta información se encuentra disponible en formato físico y digital. Las escalas de las cartas topográficas son 1:250 000, 1:100 000 y 1:50 000. Esta información está constituida por curvas de nivel, las cuales determinan la delineación de cuencas de aporte. Los intervalos de altura de estas curvas de acuerdo al tipo de escala son, respectivamente, cada 100m, 80m y 20m.

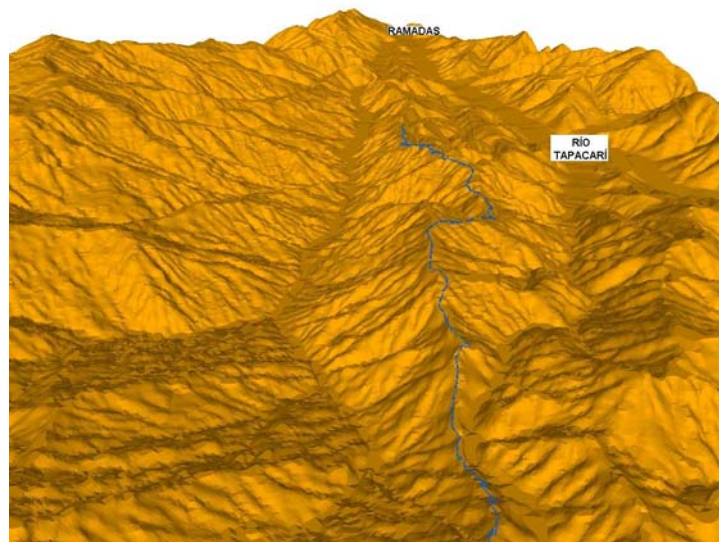


Figura 1 – Modelo Digital de Elevación de Terreno para la Localidad de Ramadas, ubicada en las riberas del río Tapacarí del Departamento de Cochabamba (Gomez Garcia, 2007)

La incorporación del manejo de información digital por medio de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha permitido desarrollar los Modelos Digitales de Elevación de Terreno (DEM, por sus iniciales en inglés). Los DEM son una representación

del relieve de la superficie por medio de una grilla con celdas del mismo tamaño, a las que se asigna un valor de altitud correspondiente al promedio en la superficie contenida en la celda. A partir de la digitalización de las curvas de nivel, es posible generar los DEM. La aplicación de herramientas SIG, por medio de una comparación automatizada de las altitudes de una celda con aquéllas de las celdas adyacentes, permite determinar el sentido de flujo en la superficie. De esta manera, se automatiza la determinación de líneas de acumulación de flujo (ríos) y las líneas divisorias de cuencas. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de DEM, el cual fue obtenido a partir de la digitalización de las curvas de nivel cada 20m de las cartas topográficas del IGM. Claramente, puede observarse los sectores donde están localizados los ríos y las líneas divisorias de cuencas.

Una limitación que se tiene al trabajar con las cartas topográficas es la accesibilidad a información digital. Si bien, actualmente, es posible adquirir esta información en formato digital para zonas urbanas o peri-urbanas, al año 2008 existían sectores rurales que aún no habían sido siquiera impresos en escala 1:50 000. En otros casos, las cartas no se encontraban disponibles debido a revisiones, especialmente aquellas en escala 1:50 000.

Debe también considerarse que las cartas topográficas del IGM fueron hechas originalmente en base a fotogrametría y fointerpretación de fotografías aéreas que datan desde la década de los años 1960. A pesar de que usan como sistema de coordenadas el Universal Transversa de Mercátor, se encuentran georeferenciadas de acuerdo al elipsoide y dátum PSAD56 (Provisional South American Dátum 1956). Actualmente, y por convenio universal, se utiliza la georeferencia WGS84 (Sistema Geodésico Mundial 1984), lo cual implica que debe transformarse la información del IGM para que los resultados cumplan con las exigencias actuales de diseño.

Por la razón expuesta, se busca otras fuentes de representación de la superficie. Actualmente, a nivel mundial existen varios proyectos que proveen los DEM en diferentes resoluciones. Un ejemplo es el proyecto SRTM de CGIAR-CSI (CGIAR Consortium for Spatial Information). El SRTM (NASA Shuttle Radar Topographic Misión) consiste de DEMs con una resolución de 3 arco segundos (90 metros aproximadamente) y que es posible acceder gratuitamente a través de Internet (Huffman *et al*, 1997; TRMM webpage). Un DEM de 90m de resolución puede lograr resultados muy precisos en análisis de cuencas con superficies de aporte mayor a 5 km².

2.2 Registros de Precipitación

En un análisis de eventos extremos, el principal dato de precipitación está representado como un hietograma, el cual está definido como la distribución hipotética de precipitación en una duración de tiempo determinada. El hietograma es también conocido como tormenta de diseño. Para una zona de estudio, pueden existir diferentes tormentas de diseño, debido a que éstas dependen de la probabilidad de ocurrencia (periodo de retorno) y la duración del evento.

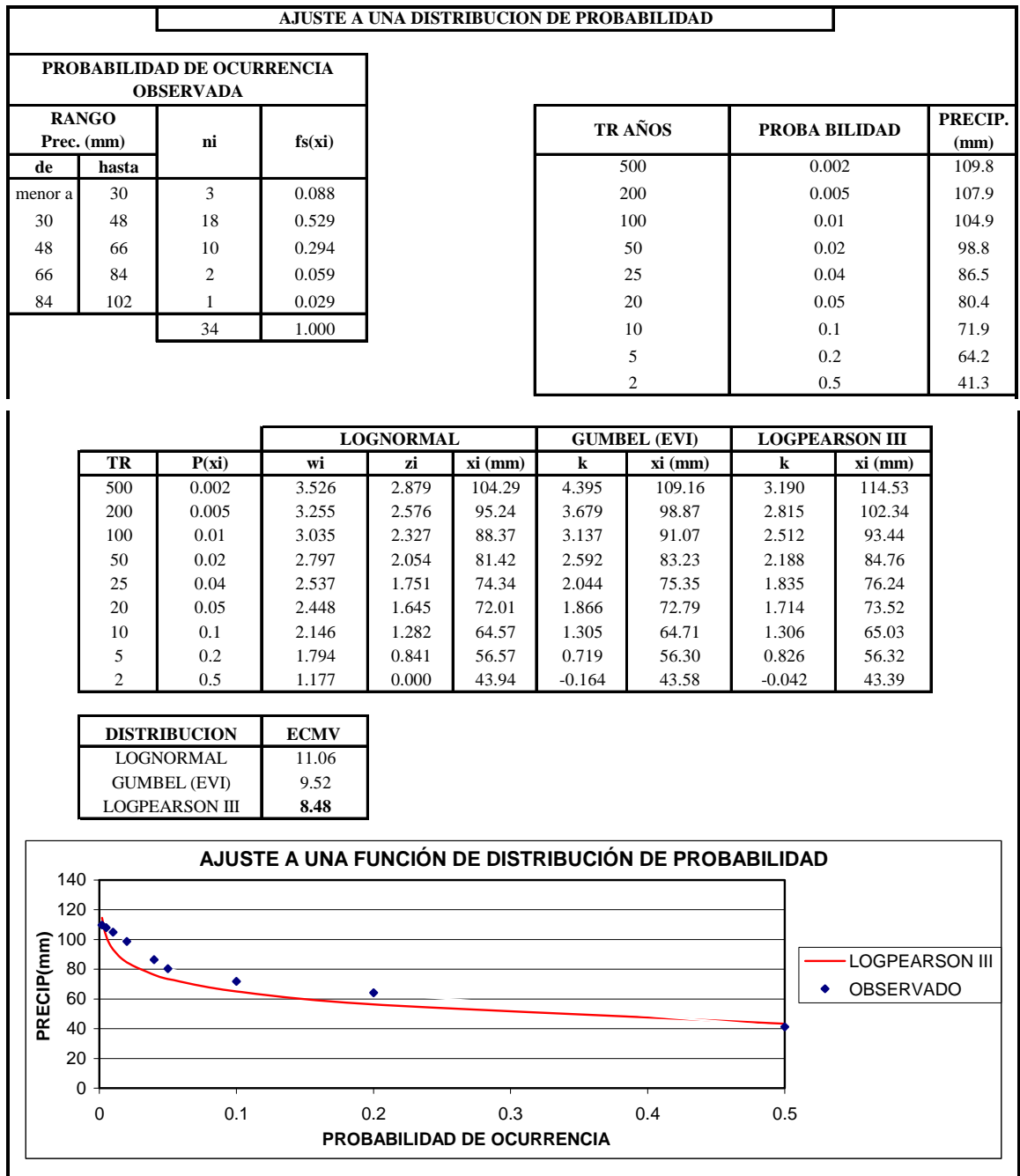


Figura 2 – Ajuste de la serie de PMDA de la estación Ravelo, ubicada en el Norte del Departamento de Potosí. (Gomez Garcia, 2009)

Las tormentas de proyecto son obtenidas a partir de curvas de intensidad-duración-frecuencia, las cuales son características de cada estación hidrometeorológica. Estas curvas son obtenidas a partir de interpretaciones de las lecturas continuas de pluviógrafos. Sin embargo, en el territorio nacional no todas las estaciones cuentan con dicho instrumento.

En Bolivia, existen varias entidades (públicas o privadas) que realizan mediciones de precipitación acumulada diaria (pluviómetros). La entidad que realiza el manejo más extenso, y que además cuenta con estaciones en casi todo el territorio nacional, es el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). En promedio los registros pluviómetros datan de entre 20 a 30 años atrás.

El procedimiento para generar las tormentas de diseño a partir de los registros de pluviómetros, identifica primeramente la precipitación máxima diaria anual (PMDA). Para generar las curvas de intensidad-duración-frecuencia deberá ajustarse antes la serie de PMDAs a una función de distribución de probabilidad (PDF, Probability Density Function). Para determinar la bondad de ajuste existen métodos estadísticos como la prueba paramétrica de Kolmogorov-Smirnov (K-S) o el análisis numérico de mínimos cuadrados (ECMV). Las funciones PDF que usualmente se adecuan mejor a PMDAs son: log-Normal, log-Pearson III y Gumbel (Valor Extremo I). En la Figura 2 se detalla el procedimiento de ajuste a una de las PDF mencionadas, se puede observar que para la estación Ravelo, el mejor ajuste se da con la función correspondiente a log-Pearson III (Gomez Garcia, 2006 y 2009).

Para generar las curvas de intensidad-duración-frecuencia, una vez establecida la PDF, se necesita desagregar los valores acumulados de precipitación diaria para periodos menores a 1 día. Con este fin, se utiliza factores de desagregación de estaciones cercanas que cuentan con pluviógrafos, y en donde se ha podido realizar dicho análisis. Generalmente, este caso se da en las estaciones ubicadas en las ciudades principales del país. En la Figura 3 se muestra las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) y PDF (Precipitación-Duración-Frecuencia) obtenidas mediante los factores de desagregación para la estación de Ravelo.

Utilizando el criterio del "padrón de tormenta crítico" y a partir de las curvas IDF, se obtienen las precipitaciones de proyecto para diferentes periodos de retorno, considerando diferentes duraciones de tormenta que dependen de la superficie de la cuenca y tomando intervalos de discretización en minutos.

El método del padrón de tormenta crítico, divide la duración típica de precipitación en n intervalos Δt . Para cada periodo de tiempo $i \cdot \Delta t$ ($i=1, 2, \dots, n$), se extrae de las curvas IDF la profundidad de precipitación, los valores hallados se ordenan alternadamente desde el intervalo $(n/3)$ hacia los intervalos extremos (Chow et al, 1988). El resultado de este procedimiento es la tormenta de proyecto, y un ejemplo se muestra en la Figura 4 para la estación de Ravelo.

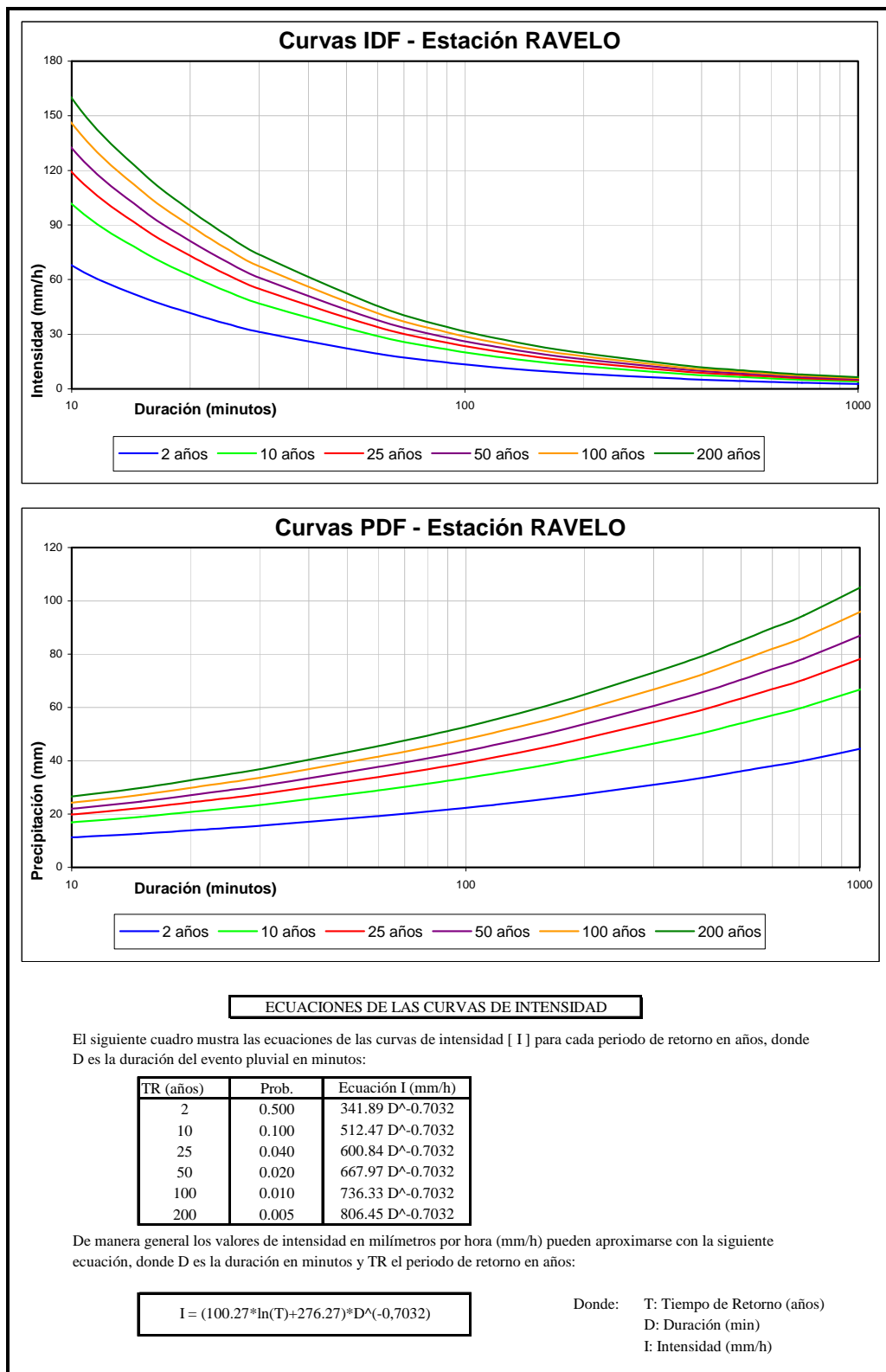


Figura 3 – Curvas IDF y PDF para la estación Ravelo, ubicada en el Norte del Departamento de Potosí. (Gomez Garcia, 2009)

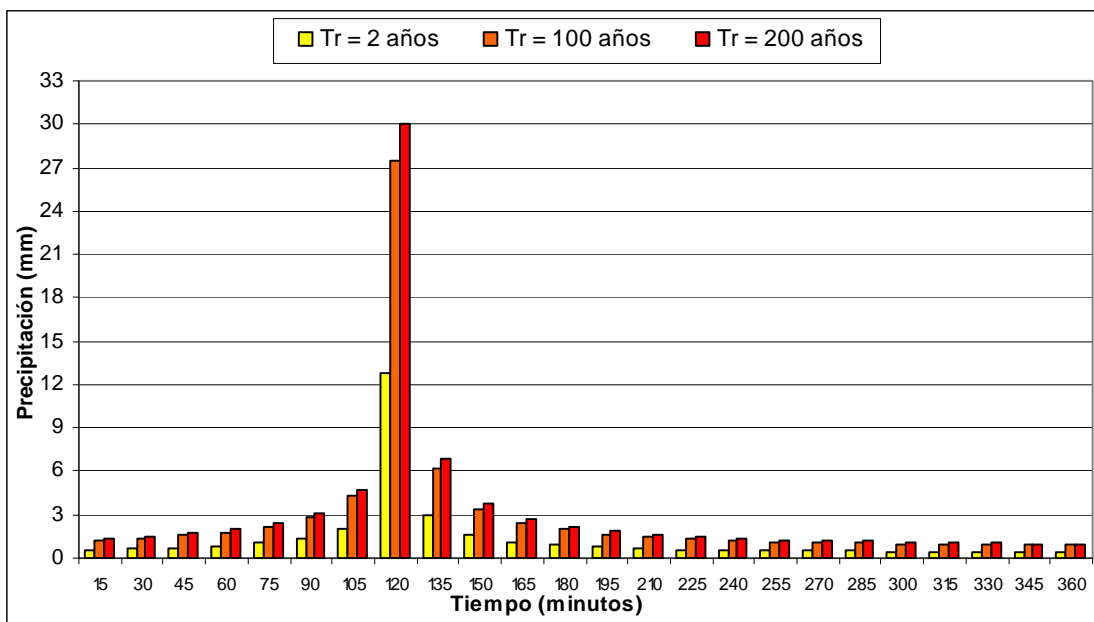


Figura 4 – Tormenta de proyecto de 6 horas para la estación Ravelo, ubicada en el Norte del Departamento de Potosí. (Gomez Garcia, 2009)

La tormenta de diseño de cada pluviómetro debe aplicarse a la zona colindante; sin embargo, cuando se tiene una red muy dispersa de estaciones (como es el caso general en el territorio nacional para zonas rurales), el mismo histograma es aplicado en varias decenas de kilómetros a la redonda. Dado que la distribución de precipitación es variable en el espacio y existe cierta dependencia con las condiciones orográficas, este procedimiento puede no ser el más óptimo.

El TRMM (Tropical Rainfall Measuring Misión) es una conjunción de exploración espacial entre NASA y JAXA (Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa) diseñada para monitorear y estudiar precipitaciones entre las latitudes 50° S y 50° N. El radar de precipitación (PR) que lleva a bordo el TRMM es capaz de recibir lecturas de intensidad y distribución de lluvia. Por medio de Internet es posible acceder a esta información que provee intensidades de precipitación con una resolución espacial de 25 kilómetros aproximadamente cada 3 horas. Estos registros existen desde el año 1998 (Huffman, 2007). Dado que el registro anual no es muy extenso (no más de 12 años), es difícil afirmar si un análisis de eventos extremos puede generar resultados útiles. Aún así, se ha determinado también que la calidad de esta información no tiene muy buena precisión en escalas pequeñas, pero que sirve como una muy buena aproximación de eventos de precipitación a gran escala. Sin embargo, es apreciable que la evolución que este tipo de información pueda tener en futuro, será muy conveniente dadas las ventajas de resolución espacial y temporal que posee.

2.3 Información característica de la superficie

En caso de eventos de precipitación extremos, el volumen o caudal máximo de descarga de una cuenca que se puede registrar en un punto de control, se da cuando toda el área de la cuenca está drenando el agua precipitada. Esta situación es válida si consideramos una intensidad constante sobre toda la superficie. Sin embargo, el volumen de salida de la cuenca es menor a la cantidad precipitada debido a las abstracciones.

Las abstracciones incluyen la intercepción de precipitación por la vegetación del terreno, el almacenamiento en depresiones en la superficie del suelo a medida que el agua se acumula en hundimientos de la superficie, e infiltración de agua en el suelo que genera el flujo sub-superficial y que además constituye el flujo base de ríos. Las abstracciones por intercepción y almacenamiento en depresiones, se estiman en base a la naturaleza de la vegetación y la superficie del terreno.

A continuación se presenta un ejemplo de la relevancia de las características de la superficie en el análisis de abstracciones. Al respecto, el NRCS (U.S. National Resources Conservation Service) desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa P_e , es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P . De manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación I_a (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la que no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es $P - I_a$ (Chow *et al*, 1988). La hipótesis del método del NRCS consiste en que las relaciones de las cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (1)$$

Con base en esta ecuación, el NRCS desarrolló una ecuación suponiendo que I_a es 0.2 veces S :

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2)$$

Al representar en gráficas la información de P y P_e para muchas cuencas, el NRCS encontró curvas, las cuales están estandarizadas con un número adimensional de curva CN , que varía dependiendo de las condiciones de suelo de la cuenca. El número de curva y S están relacionados por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3)$$

donde S está en pulgadas. El número de curva representado en la ecuación (3), se aplica a condiciones antecedentes de humedad normales (AMC II). Para condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse por

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (4)$$

y

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (5)$$

Los números de curva han sido tabulados por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) con base en el tipo de suelo y el uso de tierra. Se definen cuatro grupos de suelo:

- Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
- Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

El tiempo para el cual toda la cuenca empieza a contribuir con flujo superficial, durante y después de un evento de precipitación, es el tiempo de concentración t_c ; éste es el tiempo de flujo desde el punto más alejado hasta la salida de la cuenca.

El tiempo de concentración, en cuencas de gran extensión, está directamente relacionado con la tasa de infiltración en el suelo del agua precipitada. Según el NRCS, el tiempo de concentración (minutos) está en función del número de curva (CN) bajo la siguiente relación:

$$t_c = \frac{100L^{0.8} \left[\frac{1000}{CN} - 9 \right]^{0.7}}{1900s^{0.5}} \quad (6)$$

donde L es la longitud hidráulica de la cuenca en metros, y s es la pendiente promedio de la cuenca (m/m).

La estimación del CN depende de poder realizar la caracterización de dos propiedades importantes: 1) el uso de suelo o vegetación y 2) el tipo de suelo. Al respecto, en Bolivia existen instituciones (SENAMHI, IGM, SERGEOTECMIN) que realizan dichas caracterizaciones. Estos mapas se encuentran a grandes escalas (1:250 000 o 1: 1 000 000), y ayudan a tener una idea inicial de la zona de estudio. Por esta razón, se busca otra manera de obtener estas caracterizaciones.

Un método que se usa bastante en nuestro medio, es la caracterización de unidades de mapeo a partir de la interpretación de combinaciones únicas de bandas de imágenes satelitales, la cual es finalmente verificada con extensivos recorridos de campo o sobrevuelo de la zona de estudio. Las imágenes satelitales usadas para este fin son las Landsat TM que

poseen 7 bandas o 7 rangos de longitud de onda que el satélite puede captar. La combinación de estas bandas hace posible identificar ciertas características de la superficie, como unidades geomorfológicas o unidades de uso de suelo y vegetación.

De acuerdo a la interpretación de la imagen satelital para el norte de Potosí, en la Tabla 1 se han identificado las unidades fisiográficas, las cuales además, se han clasificado de acuerdo al grupo hidrológico de suelo. De la misma manera, en la Tabla 2 se han identificado las unidades de uso de suelo para la misma zona, donde para cada una se ha definido un valor único de CN para cada tipo de grupo hidrológico de suelo.

Tabla 1 – Clasificación de Grupo Hidrológico de Suelo para unidades fisiográficas en el Norte del Departamento de Potosí (Gomez Garcia, 2009)

Nº	Unidad de Geomorfología	GHS
1	Abanico Aluvial Lig. Disectado	B
2	Colina Fuerte. Disectada	D
3	Cuerpos de agua	A
4	Ladera con Pend. Ligera Mod. Disectada	C
5	Ladera Mod. Disectada con Pend. Mod.	D
6	Llanura Aluvial Lig. Disectada	B
7	Serranía Alta Fuert. Disectada	D
8	Serranía Alta Mod. Disectada	D
9	Serranía baja Fuert. Disectada	C
10	Serranía baja Mod. Disectada	C
11	Serranía con Pend. Moderada y Fuert. Disectada	D
12	Serranía con Pend. Moderada y Lig. Disectada	D
13	Serranía con Pend. Moderada y semidisectada	D
14	Serranía Empinada Lig. Disectada	D
15	Serranía Media Fuert. Disectada	C
16	Serranía Media Mod. Disectada	C
17	Terraza con Pend. Ligera Fuert. Disectada	B
18	Terraza con Pend. Ligera Mod. Disectada	B
19	Valle Aluvial Lig. Disectado	C

Tabla 2 – Matriz de CN para uso actual de tierra y cobertura vegetal en el Norte del Departamento de Potosí (Gomez Garcia, 2009)

USO ACTUAL DE LA TIERRA	GHS			
	A	B	C	D
Bosque Ralo asociado a Pastizales	36	60	75	80
Cauce de Río	88	90	92	94
Agricultura Temporal Extensiva	64	75	83	87
Arbustal ralo de porte mediano	55	67	78	84
Arbustal Ralo de porte bajo	68	79	86	89
Herbazal ralo de porte bajo	47	57	81	88
Herbazal ralo de porte bajo con afl. Rocoso	55	64	86	89
Pastizal	62	70	77	83
Arbustal denso	48	61	72	80
Area degradada con escasa vegetacion	72	79	85	89

Finalmente, haciendo un cruce entre ambas tablas y con la ayuda de herramientas SIG, es posible determinar un valor de CN para la superficie. El mapa de CN se muestra en la Figura 5.

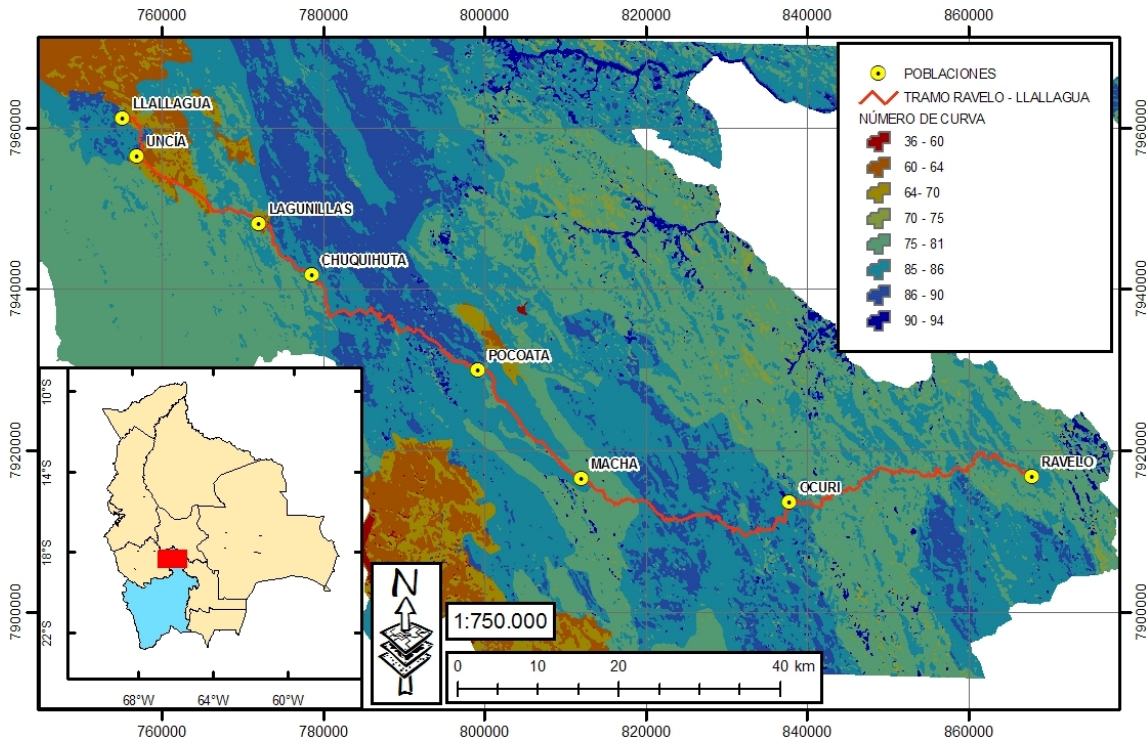


Figura 5 – Mapa de Número de Curva (CN) en el Norte del Departamento de Potosí. (Gomez Garcia, 2009)

El método expuesto es considerado el óptimo a causa del nivel de detalle y resolución, que se puede lograr al combinar resultados de imágenes satelitales de hasta 30 metros de resolución con observaciones de campo; sin embargo, en cuanto a otras fuentes para realizar este tipo de caracterizaciones se pueden considerar las siguientes.

La FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations) ha desarrollado la clasificación mundial de suelos. Vía Internet, esta información está disponible para su manipulación con herramientas SIG y tiene una resolución de 5 arco minutos (FAO Soil Map webpage).

El USGS (United States Geological Survey) ha desarrollado mapas de clasificación de uso de suelo a nivel global. Esta información está disponible, vía Internet, para su manipulación con herramientas SIG y tiene una resolución de 1 km (USGS webpage).

3 ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES DE DISEÑO

Tal como se mencionó en la introducción, el objetivo del análisis hidrológico de eventos extremos es de calcular los caudales de diseño en el punto de control de la cuenca en estudio. Para tal fin, se cuenta con métodos directos e indirectos. Los primeros implican que se debe contar con registros de caudal de flujo a la salida de una cuenca y, a partir de éstos, realizar por medio de un análisis estadístico, una extrapolación de los valores para un evento extremo con una mínima probabilidad de ocurrencia. En el país, esta información es muy limitada y muy poco probable que exista para las cuencas de estudio que, en la mayoría de los casos, son puentes o alcantarillas para carreteras. Es por esta razón que los segundos métodos, son los que más se adecuan a la disponibilidad actual.

Si bien existen varios métodos indirectos para transformar la precipitación en escorrentía a partir de la generación de diferentes tipos de hidrograma de caudal, en este trabajo no se pretende discutir las ventajas o deméritos de éstos. El objetivo es presentar la manera de lograr estos resultados a partir de la información disponible. Al respecto, en las últimas décadas se han ido desarrollando paquetes computacionales que modelan estos distintos tipos de métodos. A partir de la información, que previamente se ha demostrado que se puede desarrollar en el país y, dado su característica de libre accesibilidad, se considera al paquete computacional HEC-HMS (Hydrological Engineering Center – Hydrologic Modeling System del cuerpo de ingenieros de los EE.UU.) el óptimo para estimar los caudales de diseño.

En un principio, la forma más simple de aplicar este paquete es con un modelo agregado, en el cual las características físicas de cuencas y subcuencas son determinadas fácilmente a partir de la manipulación del DEM. Sin embargo, el hecho de que mucha de la información generada sea posible representar por medio de grillas con el mismo tamaño de celda (e.g. 100 m, 500 m o 1 km), permite que el modelo que mejor resultados puede generar sea el semi-agregado. Este paquete trabaja en base a tres conjuntos de información (HEC-USACE, 2005):

- Modelo de cuenca (Basin Model), es aquel que representa la conectividad de los elementos hidrológicos del sistema (cuencas, ríos, convergencias, punto control), que es posible generar a partir del DEM y la determinación de la acumulación y sentido de flujo.
- Modelo meteorológico, el cual puede aplicarse usando diferentes métodos de representación de la información pluvial, como por ejemplo hietogramas de diseño.
- Especificaciones de Control, conjunto de información que determina el inicio, fin e intervalo de tiempo para la modelación del sistema.

Los resultados principales que genera el paquete HEC-HMS incluyen el caudal pico para diferentes tiempos de retorno (probabilidad de ocurrencia), el tiempo al pico del hidrograma y el tiempo de recesión. Finalmente, el paquete permite la calibración del modelo al aproximar los resultados a flujos observados en puntos de control definidos. El modelo se

calibra a partir de la variación controlada de parámetros hidrológicos, como el CN o el tiempo de concentración.

4 CONCLUSIONES

La información disponible en el país necesaria para estimar caudales de diseño en caso de eventos extremos de precipitación para el diseño de puentes y obras de drenaje en carreteras, limita el procedimiento de cálculo y muchas veces no se adecua a las exigencias actuales de los Manuales Técnicos de la ABC.

Para delinear las cuencas de aporte, computar las características fisiográficas de las cuencas de aporte y la conectividad entre ellas, se considera como insumo principal el Modelo Digital de Elevaciones de Terreno (DEM) que puede ser obtenido vía Internet o generado automáticamente a partir de las cartas geográficas actuales del IGM.

Los registros de precipitación en el país para zonas rurales son geográficamente dispersos, corresponden a lecturas diarias acumuladas y, en promedio, datan de no más de entre 20 y 30 años. Sin embargo, para el análisis de eventos extremos se han desarrollado métodos estadísticos para generar las tormentas de diseño (hietogramas) que requieren los paquetes de modelación hidrológica. Adicionalmente, se ha presentado una fuente de registros de intensidad de precipitación accesible vía Internet (TRMM), pero sus características actuales no permiten extrapolar eventos extremos de carácter fehaciente.

Para determinar las abstracciones en el proceso de precipitación-escorrentía, se ha escogido el método del NRCS que permite determinar el CN a partir de la combinación única de unidades de geomorfología y uso de suelo en la superficie de la cuenca en estudio. La mejor forma de generar esta información es a partir de la interpretación de combinaciones de bandas de las imágenes satelitales, combinada con la verificación en campo. Existen fuentes para este tipo de información vía Internet, pero con mucha menor resolución.

El paquete computacional presentado en este trabajo, que permite modelar la transformación de precipitación en escorrentía, es el HEC-HMS. Este paquete ha demostrado estimar buenos resultados a partir de la información que puede ser generada en el país. Los resultados incluyen el caudal pico del hidrograma, el tiempo al pico del hidrograma y el tiempo de recesión. La manipulación de la información con referencia geográfica a partir de herramientas SIG, permite generar un modelo semi-agregado.

5 REFERENCIAS

CHOW, V. T. et al. (1988). **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 537p. ISBN-10: 9586001717.

HUFFMAN, G.J. et al. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, Vol 8, No. 1, February, p. 38-55.

SELLERS, P.J. et al. (1997). Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, Vol 275, No. 5299, January, p. 509-509.

GOMEZ GARCIA, M. (2006). Aplicaciones SIG en el Estudio Hidrológico e Hidráulico del Río Chapare para el Puente Alfonso Gumucio. Tesis de Grado – Universidad Privada Boliviana, Cbba – Bolivia. Octubre 2006, 267 p.

GOMEZ GARCIA M. (2007). **Estudio Hidrológico** del Estudio de Factibilidad Técnico Económica, Diseño Final e Impacto Ambiental del Proyecto de Apertura del Camino Ramadas Cóndor Chucuna (fase II). Prefectura del Departamento de Cochabamba – Unidad de Preinversión, Cbba – Bolivia, 2007, 13 p.

GOMEZ GARCIA M. (2009). **Estudio Hidrológico e Hidráulico** Estudio de Factibilidad Técnico Económica, Impacto Ambiental y Diseño Preliminar de la Alternativa Definitiva Ruta F-06 Tramo "Ravelo-Llallagua". Administradora Boliviana de Carreteras, 2008, La Paz – Bolivia, 2008, 382 p.

Administradora Boliviana de Carreteras. (2008). Manual Técnico para el Diseño de Carreteras – **Manual de Hidrología y Drenaje**, La Paz – Bolivia, 2008.

U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center (2005). Hydrologic Modeling System **HEC-HMS. User's manual** Version 3.0.0. Davis – California, 2005.

USGS. (2010) **Global Land Cover Characterization**. Disponible en: <<http://edc2.usgs.gov/glcc/glcc.php>>. Acceso en: 21 de julio de 2010.

FAO - UNESCO. (2010) **Soil Map of the world**. Disponible en: <<http://www.lib.berkeley.edu/EART/fao.html>>. Acceso en: 21 de julio de 2010.

NASA (2010). 3B42: 3-Hour 0.25 x 0.25 degree merged **TRMM and other satellite estimates**. Disponible en: <<ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/merged/>>. Acceso en: 21 de julio de 2010.