

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



***“MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL EMBALSE DE LA
PRESA ALUVIONAL J.J. GÓMEZ”***



PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

INGENIERÍA CIVIL

Autor: **FERNÁNDEZ, FEDERICO GABRIEL**

Director: **Ing. LOSANO, FERNANDO TOMÁS**

Neuquén, Febrero 2020



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el apoyo y confianza brindada por mi familia, especialmente a mis padres y hermana, quienes estuvieron y están presentes en todo momento.

A mis amigos, compañeros de estudio y personas con las que pude relacionarme en esta etapa. Gracias por el cariño, amistad y el apoyo de siempre.

Quiero agradecer además a todos los profesores quienes, de una forma u otra, me ayudaron a orientar mi formación ética, moral y académica.

Y a todos los que me ayudaron a realizar este Proyecto Integrador Profesional, en especial a mi tutor, Ing. Fernando Losano, por el desarrollo de la tesis, la paciencia y la predisposición en todo momento.

¡¡MUCHAS GRACIAS A TODOS!!

RESUMEN

En el presente trabajo, se estudió el comportamiento de la presa de contención pluvio – aluvional ubicada en la localidad de J.J. Gómez, al oeste de la ciudad de General Roca, en el Alto Valle de la provincia de Río Negro.

En los últimos años, las ciudades ubicadas en las zonas aledañas a las riberas del Río Negro, han experimentado un gran auge y una expansión urbana y territorial sin planificación. Los aumentos poblacionales y las actividades económicas relacionadas, han generado asentamientos humanos en suelos no aptos ni preparados para fines habitacionales, básicamente, se registra una gran densidad poblacional sobre las márgenes de los cursos de agua y en zonas de desbordamientos aluvionales.

Las condiciones de aridez características y los consecuentes acontecimientos de lluvias y precipitaciones intensas, hacen que la zona sea particularmente propensa a la generación de fenómenos pluvio – aluvionales, los cuales poseen un importante potencial erosivo y destructivo, generando grandes desprendimientos de material aluvional, como así también el transporte y deposición del mismo en sectores de ocupación humana.

Para dar solución y seguridad frente a este tipo de fenómenos, fue necesario ejecutar un conjunto de obras de defensa, contención y protección contra aluviones, tal es así que se pueden observar, diferentes tipos de construcciones esparcidas sobre la zona del Valle del Río Negro, sobre todo, en sectores cercanos a las grandes urbes y con mayor densidad poblacional. Es común encontrar, presas y diques de contención, zanjas de guardia, canales derivadores y de desagües, tomas de fondo, vertederos y todo tipo de obras de arte, cuya finalidad básicamente consiste en retener y disminuir la intensidad del agua recolectada en las cuencas, y conducir la misma, de forma menos destructiva, hacia los cursos permanentes de agua.

De acuerdo a los planteos antes mencionados, se hace necesaria una adecuación de las obras existentes, como así también, la elaboración de un plan de manejo de cuenca que haga posible el desarrollo sostenible de las mismas. Con el fin de garantizar condiciones de protección futura para las ciudades y los habitantes de la zona.

Tal es así, que se generó un modelo hidrológico para simular el funcionamiento de la presa de contención aluvional ubicada al norte de la ciudad de Coronel J.J. Gómez.

Para ello, se modelizó la cuenca de aporte que contribuye a la misma a través del software ArcMap, se obtuvo el caudal de aporte y el respectivo hidrograma producido por la cuenca, mediante la utilización del software Hec-Hms, y, en base a datos estadísticos e históricos, y utilizando conceptos hidráulicos e hidrológicos, se formularon distintos planteos sobre el estado de descarga de la presa en sí.

Se verificó el estado general de la obra, para los distintos tiempos de recurrencia, corroborando principalmente, el funcionamiento del sistema de defensa, para una recurrencia de 500 años, para lo cual fue diseñada.

Se concluyó con una propuesta para la mejora funcional del sistema de protección aluvional en general.

Palabras clave: cuenca, hidrograma, contención, precipitación.

ABSTRAC

In this work, the behavior of the alluvial containment dam located in J.J. Gómez, west of General Roca, in the High Valley of Río Negro province, was studied.

In recent years, cities located on the coast of Rio Negro, have experienced a great urban and territorial expansion without planning. Population increases and the related economic activities, generated humans settlements in unsuitable soils for housing purposed, basically, there is a high population density on the banks of watercourses and in alluvial overflows areas.

The characteristic aridity conditions and the consequent events of intense rains and precipitations, produce an area prone to the generation of alluvial phenomena, wich have a significant erosive and destructive potential, generating large detachments of alluvial material, as well as the transport and deposition of the same in sectors of human occupation.

To provide a solution and security against this type of phenomenon, it was necessary create a set of defense, containment and flood protection works, so there are different types of constructions in the area of the Rio Negro valley, especially in sectors near the cities and with higher population density. It`s normal to find, containment dams, guard ditches, drainage channels, intakes, landfills and all kinds of works of art, whose purpose basically is retain and decrease the intensity of the water collected in the basins, and conduct it, in a less destructive way, towards permanent water courses.

According to the above, an adaptation of the existing works is necessary, and the elaboration of a basin management plan, that makes possible the sustainable development of the same. In order to guarantee future protection conditions for the cities and people.

Therefore, a hydrological model was generated, to simulate the operation of the alluvial containment dam, located north of Coronel J.J. Gomez.

For this, the contribution was modeled with ArcMap software, the contribution flow and the respective hydrograph produced by the basin was obtained, through the use of Hec-Hms software, and based on statistical and historical data, using hydraulic and hydrological concepts, the discharge status of the dam was analyzed.



The general state of the work was verified, for the different recurrence times, mainly corroborating the defense system operation, for a recurrence of 500 years, for which it was designed.

It was concluded with a proposal for the functional improvement of the alluvial protection system.

Keywords: basin, hydrograph, containment, precipitation.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRAC	V
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 CONSIDERACIONES GENERALES	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
1.3.1 UBICACIÓN	3
1.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA	5
1.3.2.1 ACTIVIDAD ECONÓMICA	5
1.3.2.2 CARACTERÍSTICAS OROGRÁFICAS	5
1.3.2.3 CLIMA	6
2 MARCO TEORICO	7
2.1 CICLO HIDROLÓGICO	7
2.2 LA CUENCA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA HIDROLÓGICO	10
2.2.1 CUENCA	10
2.2.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA	11
2.2.3 PARTES DE UN HIDROGRAMA	13
2.2.4 TIPOS DE MODELOS HIDROLOGICOS	15
2.3 PRECIPITACIÓN	16
2.3.1 PROCESO DE FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	17
2.3.2 FORMAS DE PRECIPITACIÓN	18
2.3.3 TIPOS DE PRECIPITACIÓN	19

2.4	FENOMENOS ALUVIONALES Y PRECIPITACIONES INTENSAS	25
2.4.1	RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTIA	26
2.4.2	MODELOS DE PRECIPITACION-ESCORRENTÍA	26
2.4.3	MÉTODOS EMPÍRICOS.	26
2.4.3.1	MÉTODO RACIONAL	26
2.4.3.1.1	Coeficiente de escorrentía	27
2.4.3.2	MÉTODO RACIONAL MODIFICADO	28
2.4.3.3	MÉTODO DE LA CURVA NUMERO (CN)	28
2.4.4	MÉTODOS ESTADÍSTICOS	32
2.4.4.1	PERIODO DE RETORNO	33
2.5	TORMANTA DE DISEÑO	34
2.5.1	DURACIÓN DE LA TORMENTA	35
2.6	MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN PRECIPITACIÓN- ESCORRENTÍA	36
2.7	CURVAS IDF	37
2.7.1	CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS IDF.	38
2.7.2	MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS IDF.	39
2.7.2.1	SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMETRICAS.	39
2.7.2.2	DETERMINACIÓN DE INTENSIDADES MAXIMAS.	39
2.7.2.3	AJUSTE DE DATOS - FUNCION DE DISTRIBUCION DE GUMBEL.	40
2.7.2.4	DISEÑO DE LAS CURVAS IDF.	41
2.8	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).	42
2.8.1	COMPONENTES DE UN SIG.	43
2.8.2	APLICACIONES DE LOS SIG.	44
2.8.3	CAPTURA DE LA INFORMACIÓN EN UN SIG.	45
2.8.3.1	FORMATO RASTER.	45
2.8.3.2	FORMATO VECTORIAL.	45
2.9	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE).	47
2.9.1	DEFINICIÓN DE MDE.	48
2.9.2	CLASIFICACIÓN DE MDE.	48
2.10	SOFTWARE ARCGIS.	49
2.10.1	COMPONENTES DE ARCGIS.	49
2.10.2	TIPOS DE DATOS QUE SOPORTA ARCGIS.	50

2.11	SOFTWARE HEC-HMS.	51
2.11.1	COMPONENTES.	53
3	DESARROLLO	55
3.1	ADQUISICIÓN DEL MDE	55
3.2	PROCESAMIENTO DEL MDE UTILIZANDO EL SOFTWARE ARCMAP	56
3.2.1	DETERMINACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.	56
3.2.1.1	HERRAMIENTO FILL.	58
3.2.1.2	FLOW DIRECTION.	58
3.2.1.3	FLOW ACCUMULATION.	58
3.2.1.4	ORDEN DE LOS CAUCES EN LA RED DE DRENAJE.	59
3.2.1.5	RED DE DRENAJE.	59
3.2.2	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DE APORTE EN LA ZONA DE ESTUDIO.	60
3.2.2.1	PUNTO DE SALIDA.	60
3.2.2.2	DETERMINACIÓN DE LA CUENCA (WATERSHED).	60
3.2.3	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS, TOPOGRÁFICOS E HIDRÁULICOS.	61
3.2.3.1	SUPERFICIE Y PERÍMETRO DE LA CUENCA.	61
3.2.3.2	PARAMETROS Y ESTADÍSTICOS.	62
3.2.3.3	MAPA DE PENDIENTES.	63
3.2.3.4	DETERMINACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL.	64
3.3	MODELACIÓN HIDROLÓGICA (HEC –HMS)	65
3.3.1	MODELO DE CUENCA – CONSIDERACIONES.	66
3.3.1.1	INDICE DE CURVA NÚMERO (MÉTODO CN).	66
3.3.1.2	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (TC) Y RETARDO (TL)	66
3.3.2	MODELO DE DIQUE DE CONTENCIÓN ALUVIONAL – CONSIDERACIONES.	67
3.3.2.1	CURVA ALTURA-VOLÚMEN.	69
3.3.3	TORMENTA DE DISEÑO.	70
3.3.3.1	RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.	70
3.3.3.2	AJUSTE DE DATOS.	70
3.4	SIMULACIÓN DEL MODELO MEDIANTE HEC –HMS	72
3.4.1	PROCESO DE SIMULACIÓN	72
3.4.2	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	76



4	CONCLUSIONES	79
5	ANEXOS	82
	ANEXO 1	82
	ANEXO 2	84
	ANEXO 3	93
6	BIBLIOGRAFÍA	99

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución sobre la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos.

Nace como una necesidad práctica de proporcionar elementos fundamentales para el aprovechamiento del recurso hídrico, ya sea, como consumo en general, como producción de energía hidroeléctrica, o bien, como control del recurso hídrico, en lo que hace a sus efectos perjudiciales, como puede ser, el control contra las inundaciones, control de la erosión hídrica de los suelos, control de la contaminación de aguas, etc.

Es necesario limitar la parte de la hidrología que estudia la ingeniería, a una rama que comúnmente se llama ingeniería hidrológica.

Generalmente los proyectos hidráulicos son de dos tipos: los proyectos que se refieren al uso de agua, y los que se refieren a la defensa contra los daños que ocasiona el agua. Tomando estos principios se define la Ingeniería hidrológica como la ciencia aplicada, que usa principios hidrológicos en la solución de problemas de ingeniería, que surgen de la necesidad de uso y explotación de los recursos hídricos, así como para la protección contra daños ocasionados por éste. La hidrología aplicada moderna exige conocimientos avanzados de matemáticas, tales como la estadística, planteamientos y resoluciones analíticas del comportamiento del ciclo hidrológico, que es muy complejo.

La hidrología es aplicada con mucha frecuencia para el diseño de obras civiles. Así, el ingeniero civil que se ocupa de proyectar, construir o supervisar el funcionamiento de instalaciones hidráulicas, sanitarias y otras obras civiles, debe resolver numerosos problemas prácticos. Éstos pueden ser de muy variado carácter, pero en la mayoría de los casos será necesario el conocimiento de la hidrología para su solución. Como base para la realización de las tareas mencionadas, el ingeniero debe conocer los elementos básicos del ciclo hidrológico, los medios y métodos de medida de los mismos, las técnicas de tratamiento de datos y su interpretación. Además, debe saber establecer adecuadamente las relaciones cuantitativas y cualitativas entre parámetros importantes, mediante la ayuda del análisis de sistemas, la estadística matemática, etc.

1.2 OBJETIVOS

El presente trabajo plantea como objetivo principal generar un modelo de simulación hidrológica de la presa de contención pluvio - aluvional J.J. Gómez, para determinar el funcionamiento de la misma, y, de esta manera, lograr establecer cómo evolucionará dicha estructura frente a distintas condiciones de caudales recibidos.

Para lograr el objetivo general, se proponen diferentes objetivos secundarios, relacionados indefectiblemente con la modelización de las cuencas hidrográficas y el comportamiento de las mismas.

- Mediante la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG), elaborar una base de datos georreferenciada, que permita identificar y caracterizar cuencas aluvionales, tipos de suelos y vegetación, red hídrica, etc.
- Modelizar, a través del software ArcMap, la cuenca de aporte a la presa de defensa aluvional en estudio.
- Obtener parámetros morfológicos e hidráulicos de la cuenca de aporte.
- Elaborar un modelo de Precipitaciones, basado en datos pluviométricos de la zona y así, confeccionar las Tormentas de Diseño adecuadas.
- Aplicar el software Hec-Hms para determinar el modelo hidrológico que represente lo más real posible, la respuesta de la cuenca de aporte antes mencionada.
- Obtener caudales máximos e hidrogramas asociados a distintas recurrencias adoptadas, integrando el Modelo de Precipitaciones obtenido previamente, con el modelo de transformación lluvia-escorrentía (Modelo Hidrológico).
- Analizar, a partir de los resultados obtenidos, el comportamiento general del sistema, frente a los distintos volúmenes de escorrentía y fenómenos torrenciales.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.3.1 UBICACIÓN

La zona de estudio, se ubica en la denominada región del Alto Valle del Río Negro, provincia de Río Negro, en la Norpatagonia Argentina. Coronel Juan José Gómez es una localidad que pertenece al departamento de General Roca, ubicada a 224 metros sobre el nivel del mar y en la latitud Sur 39° 1' 60", longitud Oeste 67° 39' 0". Se encuentra a 5 km al Oeste de la ciudad de General Roca, y a 21 km al Este de la ciudad de Allen.

Se trata de una localidad ubicada en un valle de formación sedimentaria, al pie del río Negro, cuyo origen es la confluencia de los ríos Limay y Neuquén.

En la Figura 1-1 se puede observar un esquema de ubicación de la Prov. De Río Negro.

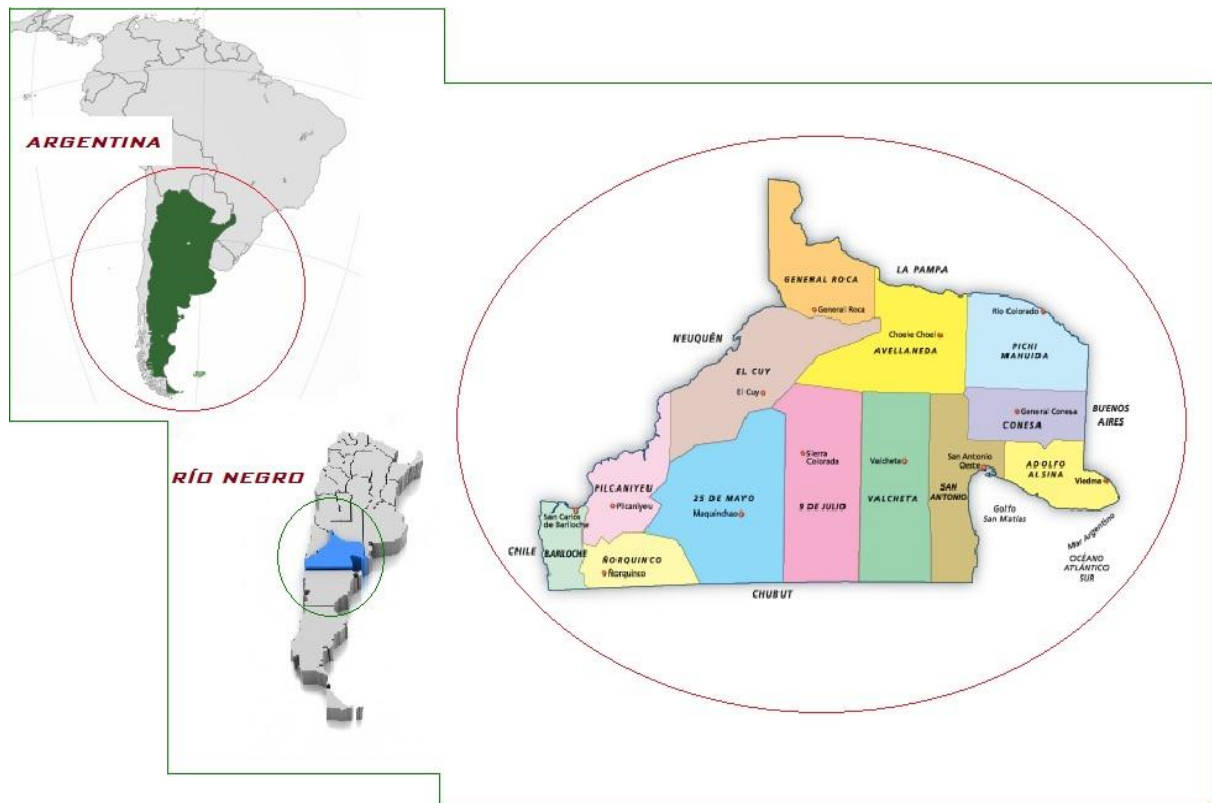


Figura 1-1. Ubicación – Prov. De Río Negro - Argentina.



Figura 1-2. Prov. De Río Negro – Aprox. sector de análisis. Fuente: <https://epicentrogeografico.com/rio-negro-2016/>, (2016)



Figura 1-3. Ubicación y localización de ciudades/ sector de estudio. Fuente: Google Earth.

1.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA

1.3.2.1 ACTIVIDAD ECONÓMICA

Como se mencionó anteriormente, la localidad de J.J Gómez, se encuentra aproximadamente a unos 5 km al oeste de la ciudad de General Roca..

Por la situación geográfica dentro de la región del Alto Valle, el sector agroindustrial ha sido reconocido como uno de los motores económicos más importantes.

La producción frutihortícola ha sido, desde siempre, un referente en cuanto a desarrollo y generación de empleo. Luego de la producción de pera y de manzana, la vitivinicultura y frutas de carozo han crecido en función de este sector productivo.

Según datos del Registro Nacional Sanitario de Productores Agropecuarios del Senasa de 2010, la producción de manzanas en Río Negro involucra unas 19.848 hectáreas cultivadas y unas 2.861 de pera. La zona de General Roca concentra 5.044 hectáreas cultivadas de frutas de pepita.

La vid es otro cultivo importante para la región. Según datos del registro estadístico del Instituto Nacional de Vitivinicultura, Río Negro posee 2.636 hectáreas implantadas con viñedos.

Este sector es fuente de trabajo para muchos ciudadanos, mayoritariamente hombres de entre 40 y 67 años. El asociativismo también ha aumentado entre los productores: un 6,2% de esta mano de obra forma parte de cooperativas de trabajo.

La industria asociada a este sector (empresas de empaque, comercializadoras de fruta, jugueras, transporte frutícola, etcétera) también son grandes generadoras de empleo y refuerzan la cadena de valor en el Alto Valle.

Del mismo modo, el sector de la construcción constituye otro importante pilar económico de la zona. En General Roca y alrededores, hay más de 30 empresas constructoras, entre las que sobresalen cuatro grandes compañías.

1.3.2.2 CARACTERÍSTICAS OROGRÁFICAS

La región patagónica se caracteriza por ser una extensa región geográfica de relieve muy accidentado, en el cual predominan los aspectos mesetiformes de bordes recortados. Además de estas mesetas, se presentan algunos valles fluviales, anchos y con terrazas; bajos de origen tectónico, ocupados por lagos en algunos casos; sierras y cañadones o valles secos.

Los ríos propios de la Patagonia son pocos, pero los que nacen en la cordillera arrastran un caudal considerado, por lo que en sus valles se ha podido desarrollar la agricultura con regadío artificial, especialmente en los ríos septentrionales.

Las mesetas aparecen diseminadas en gran parte de la región patagónica, en mayor medida hacia el oeste. En algunos casos constituyen mesetas aisladas, mientras que en otros casos forman altiplanicies situadas sobre las laderas de los cordones montañosos, en tramos en los que la pendiente general del terreno es escasa. A estas últimas configuraciones se la suele denominar pampas.

Los bordes de los mantos rocosos que suelen constituir estas mesetas y terrazas, se destacan netamente en el perfil de las mismas y se los conoce bajo el nombre de bardas, las que caen en barrancas hacia las depresiones, valles o cañadones.

Los valles correspondientes a los ríos principales son por lo general considerablemente anchos. En las laderas se asciende por las bardas antes mencionadas, hasta el nivel de la meseta, que se halla a alturas variables con respecto al fondo del cauce.

Toda la región de bardas está surcada por cañadones o ríos secos, de extensiones variables, los que por lo general sólo conducen agua en oportunidad de intensas precipitaciones estivales. Esta red, si bien secundaria en cuanto a la configuración del sistema hidrográfico del área, resulta de fundamental importancia para evaluar las características del fenómeno aluvional.

1.3.2.3 CLIMA

El clima de la región es continental, templado y árido, con una precipitación media anual de 188 mm y heladas primaverales. Las precipitaciones son de origen convectivo, caracterizándose por su gran intensidad, corta duración y escasa cobertura areal. Los períodos de mayor precipitación son Septiembre y Junio, mientras que los más secos son Agosto y Noviembre.

Los vientos predominan del cuadrante oeste y sudoeste, con mayor frecuencia en primavera-verano, con velocidades máximas de hasta 80 km/h.

Los meses de mayor temperatura son Enero y Febrero, con valores máximos medios que rondan los 30 °C, y los más fríos son Junio y Julio, con valores mínimos medios de 13 °C aproximadamente.

2 MARCO TEORICO

Para poder caracterizar y cuantificar los fenómenos torrenciales que afectan a las cuencas aluvionales, es necesario enfocarse en la determinación de la escorrentía superficial, producida por el efecto inmediato de un suceso de precipitación determinada. Básicamente, a través de la modelación hidrológica, se logra materializar lo antes descrito.

Para ello, será de fundamental importancia comprender todos los conceptos básicos relacionados con la Hidrología, como ciencia en sí, y principalmente, con su estrecha relación con la Ingeniería.

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es un fenómeno global de circulación del agua entre la superficie de la tierra y la atmósfera, provocado fundamentalmente por la energía solar y la energía gravitacional. Básicamente, es el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.).

La Figura 2-1 muestra un esquema general del fenómeno del ciclo hidrológico.



Figura 2-1. Esquema general – Ciclo hidrológico. Fuente: (Rapacioli, Apunte Cátedra Hidrología - Clase I-A, 2016)

Se puede suponer que el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos, el vapor de agua es transportado por el viento hacia los continentes. Bajo condiciones meteorológicas adecuadas, el vapor de agua se condensa para formar nubes, las cuales dan origen a las precipitaciones. No toda la precipitación llega al terreno, parte de ella se evapora durante la caída y otra es retenida (intercepción) por la vegetación o los edificios, carreteras, etc. Poco después, es devuelta a la atmósfera por medio de evaporación. Otra parte es retenida en huecos e irregularidades del terreno (almacenamiento en depresiones).

Otra parte del agua que llega al suelo circula sobre la superficie (lluvia en exceso) y se concentra en pequeños surcos que luego se combinan en arroyos, los cuales desembocan en ríos (escurrimiento superficial), dichas aguas son conducidas a embalses, lagos u océanos, desde donde se evapora o infiltra en el terreno.

Si el agua infiltrada es abundante, una parte desciende hasta recargar el agua subterránea; cuando es escasa, el agua queda retenida como humedad del suelo en la zona no saturada, de donde vuelve a la atmósfera por evaporación o evapotranspiración. Por efecto de la gravedad, el agua percola hacia estratos más profundos, recargando las napas freáticas y/o confinadas, las cuales aportan flujo hacia las zonas de descarga en ríos, pantanos o vertientes.

En el ciclo hidrológico, la velocidad del agua no es constante, sino, errática tanto espacial como temporalmente. Por otra parte, la calidad del agua cambia en cada fase del ciclo, siendo éste, el gran desalinizador de la naturaleza.

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos, sin embargo, la ausencia de conocimiento perfecto puede representarse en forma simplificada por medio del concepto de *sistema*.

Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman parte de un todo. Si vemos al ciclo hidrológico de esta forma, sus componentes serían la precipitación, evaporación, escorrentía y sus demás fases; para analizar el sistema total, estos subsistemas más simples pueden analizarse separadamente y combinarse los resultados de acuerdo con las interacciones entre los subsistemas.

En la Figura 2-2, se representa el ciclo hidrológico como un sistema, dividida en tres subsistemas.

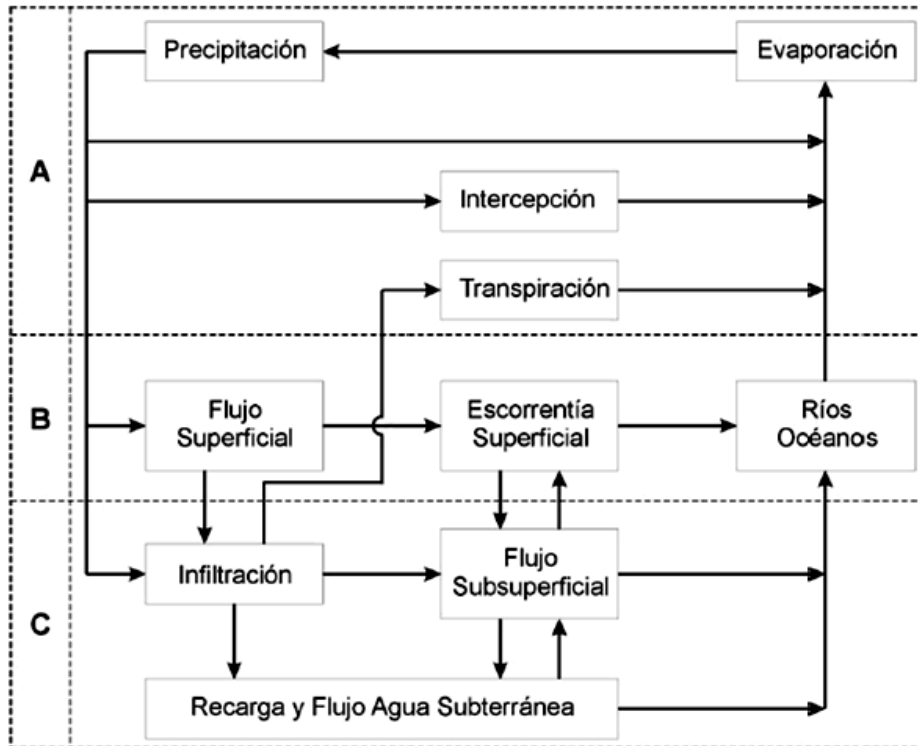


Figura 2-2. Ciclo hidrológico como sistema. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

- *Subsistema de agua atmosférica (A)*, que contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración.
- *Subsistema de agua superficial (B)*, que contiene los procesos de flujo superficial, escoorrentía superficial y, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea y escoorrentía hacia ríos y océanos.
- *Subsistema de agua subsuperficial (C)*, que contiene los procesos de infiltración, recarga de acuíferos, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea, el flujo subsuperficial ocurre en la capa de suelo cercana a la superficie, mientras que el flujo de agua subterránea lo hace en estratos profundos de suelo y roca.

2.2 LA CUENCA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA HIDROLÓGICO

2.2.1 CUENCA

Una cuenca hidrográfica es un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por las precipitaciones y cuyos excedentes en agua o en materias sólidas transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura. Básicamente, es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

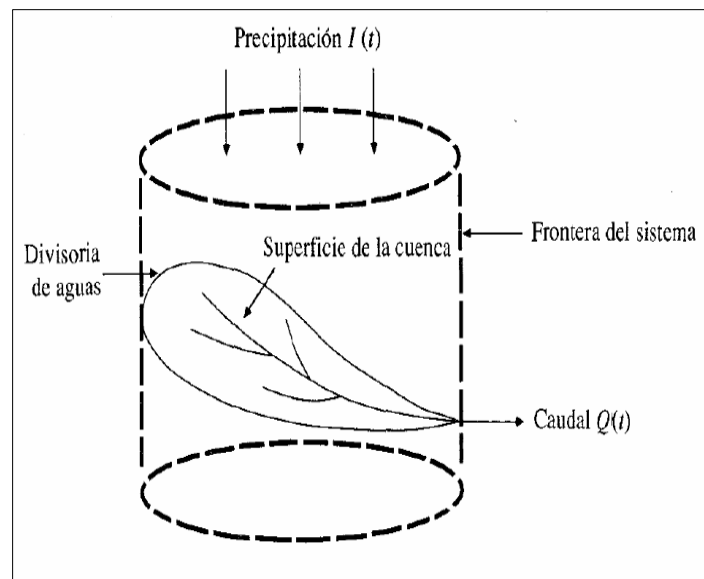


Figura 2-3. Cuenca como sistema. Fuente: (Rapacioli, Apunte Cátedra Hidrología - Clase I-A, 2016)

La divisoria de aguas es una línea que separa la superficie de la tierra cuyo drenaje fluye hacia un río dado, de las superficies de la tierra cuyos desagües marchan hacia otros ríos. La frontera del sistema se dibuja alrededor de la cuenca, proyectando la divisoria de aguas hacia arriba y abajo, hacia planos horizontales.

La precipitación (I) es la entrada del sistema, distribuida en el espacio sobre el plano superior; el caudal (Q) es la salida, concentrado en el espacio del punto de salida de la cuenca. La evaporación y el flujo subsuperficial también pueden considerarse como salidas, pero son muy pequeñas comparados con el caudal de una tormenta. La estructura del sistema es el conjunto de caminos de flujo sobre el suelo o a través de él, e incluye sistemas tributarios que eventualmente convergen para convertirse en caudal de salida de la cuenca.

Si la superficie y el suelo de la cuenca se examinan en detalle, el número de caminos posibles resulta enorme. A lo largo de alguno de estos caminos, la forma, la pendiente, y la rugosidad cambian continuamente y además, varían en el tiempo a medida que se humedece el suelo. De manera análoga, la precipitación varía aleatoriamente en el espacio y tiempo. Debido a estas complicaciones, no es posible describir algunos de los procesos hidrológicos a través de leyes físicas exactas. Sin embargo, utilizando el concepto de sistema, el esfuerzo se dirige hacia la construcción de un modelo que relacione entradas y salidas en lugar de llevar a cabo la difícil tarea de una representación exacta de los detalles del sistema, los cuales pueden ser desconocidos o no significativos desde un punto de vista práctico. No obstante, el reconocimiento de un sistema físico ayuda en el desarrollo de un buen modelo y en la determinación de su precisión.

De modo que los modelos hidrológicos resultan fundamentales para la evaluación, desarrollo y manejo de recursos hídricos simplificando la realidad, analizando a través de ellos, la cantidad y calidad del agua de ríos y arroyos, operación de embalses, protección de acuíferos, manejo conjunto de agua superficial y subterránea, sistema de distribución de agua, análisis de riesgo hídrico frente a eventos de baja recurrencia, y sin duda un amplio rango de actividades relacionadas con el manejo de recursos hidráulicos.

2.2.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente representamos es la *“cuenca hidrográfica”* y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas y salidas del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo. La salida de los modelos hidrológicos varía dependiendo de las metas y objetivos del modelo. El resultado más común es el *hidrograma o hidrograma de escurrimiento*.

Un hidrograma es un gráfico o tabla que muestra la tasa de flujo como función del tiempo en lugar de la corriente. En efecto, el hidrograma es *“una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la precipitación y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular”*

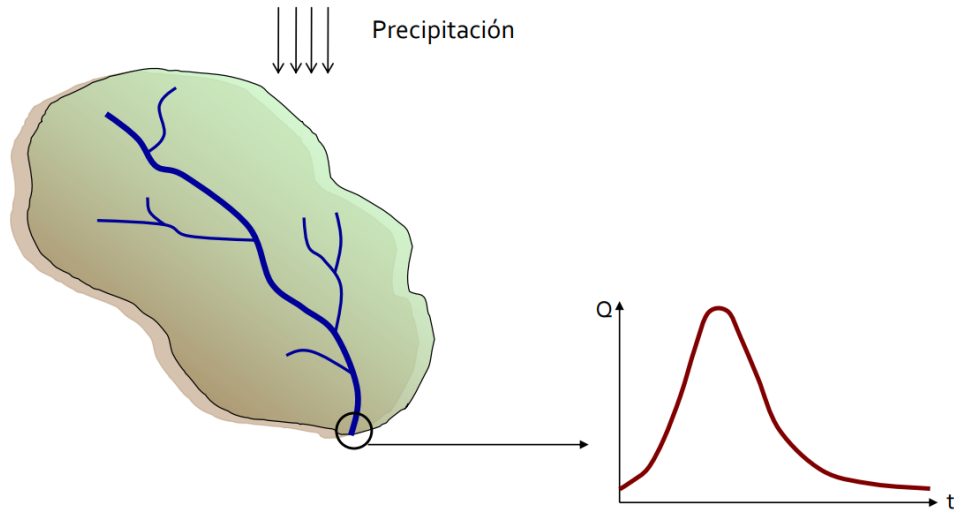


Figura 2-4. Esquema general de un hidrograma. Fuente: (Marizza, M., Hidrología – Clase: Hidrograma Unitario, 2012)

Básicamente, es la “huella digital” de la cuenca, ya que captura la relación lluvia – escurrimiento sobre la misma. Los factores climáticos que influyen en el hidrograma, son principalmente, la intensidad y duración de la lluvia, y la distribución espacial de la misma sobre la cuenca. En cuanto a lo que representan factores fisiográficos, podemos mencionar el tamaño y forma del área drenada, la distribución de la red hídrica, pendientes de laderas y cauces, como así también todo tipo de almacenamientos naturales o artificiales que amortigüen las crecidas.

En la Figura 2-5 se presenta un hidrograma correspondiente a una tormenta aislada. Analizando rápidamente, se observa que parte de la precipitación produce infiltración, y otra parte produce escorrentía directa, ésta última se denomina precipitación neta o efectiva. El área bajo el hidrograma, es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo, en el intervalo de tiempo expresado en el hidrograma.

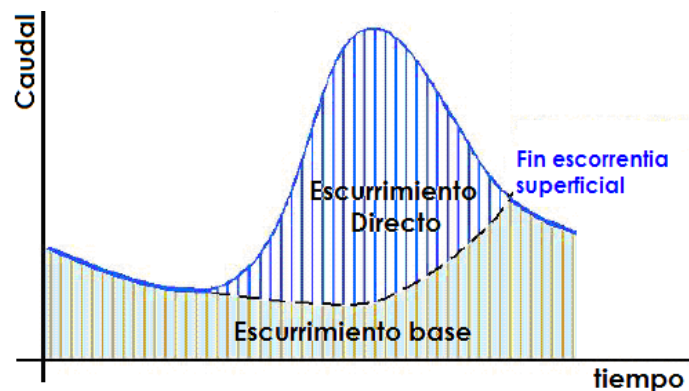


Figura 2-5. Hidrograma para una tormenta aislada. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

2.2.3 PARTES DE UN HIDROGRAMA

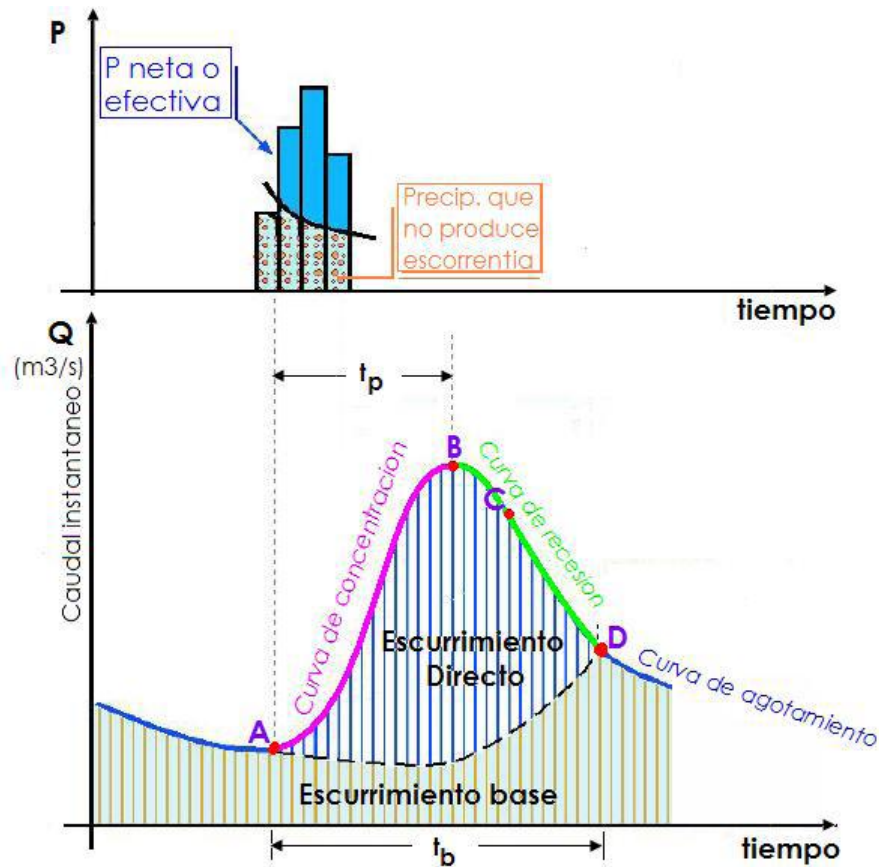


Figura 2-6. Partes de un hidrograma. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

Del análisis de la Figura 2-6, es posible distinguir las siguientes partes en un hidrograma:

Punto de levantamiento (A). En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce después de iniciada la tormenta, durante la misma o incluso cuando ha transcurrido ya algún tiempo después que cesó de llover, dependiendo de varios factores, entre los que se pueden mencionar el área de la cuenca, su sistema de drenaje y suelo, la intensidad y duración de la lluvia, etc.

Pico del hidrograma (B). Representa el caudal máximo que se produce por la tormenta. Con frecuencia es el punto más importante de un hidrograma para los fines de diseño.

Punto de Inflexión (C). En este punto es aproximadamente donde termina el flujo sobre el terreno, y, de aquí en adelante, lo que queda de agua en la cuenca escurre por los canales y como escurrimiento subterráneo.

Fin del escurrimiento directo (D). De este punto en adelante el escurrimiento es solo de origen subterráneo. Normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión, aunque pocas veces se distingue de fácil manera.

Curva de concentración o rama ascendente. Es la parte que corresponde al ascenso del hidrograma, que va desde el punto de levantamiento hasta el pico.

Curva de recesión o rama descendente. Es la zona correspondiente a la disminución progresiva del caudal, que va desde el pico (B) hasta el final del escurrimiento directo (D). Tomada a partir del punto de inflexión (C), es una curva de vaciado de la cuenca (agotamiento).

Curva de agotamiento. Es la parte del hidrograma en que el caudal procede solamente de la escorrentía básica. Es importante notar que la curva de agotamiento, comienza más alto que el punto de inicio del escurrimiento directo.

Tiempo de pico (t_p). A veces denominado “*tiempo de demora*”, es el intervalo entre el inicio del período de precipitación neta y el caudal máximo. Es decir es el tiempo que transcurre desde que inicia el escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma.

Tiempo base (t_b). Es el tiempo que dura el escurrimiento directo, o sea, es el intervalo comprendido entre el comienzo y el fin del escurrimiento directo.

Tiempo de retraso (t_r). Es el intervalo del tiempo comprendido entre los instantes que corresponden, al centro de gravedad del hietograma de la tormenta, y al centro de gravedad del hidrograma. Algunos autores reemplazan el centro de gravedad por el máximo, ambas definiciones serian equivalentes si los diagramas correspondientes fueran simétricos. Ver Figura 2-7.

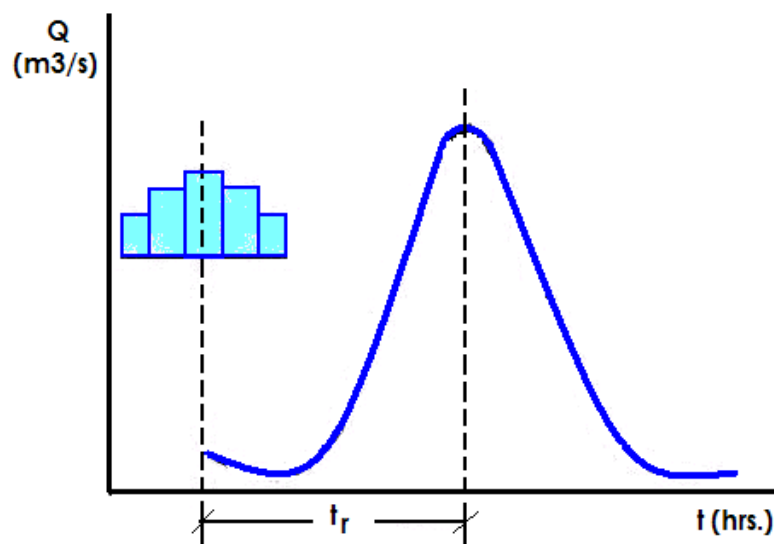


Figura 2-7. Tiempo de retraso. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

2.2.4 TIPOS DE MODELOS HIDROLOGICOS

Los modelos hidrológicos pueden dividirse básicamente en dos categorías: “*Modelos Físicos*” y “*Modelos Abstractos*”.

Los **Modelos Físicos** son aquellos modelos en que se usa una representación material del sistema, a este tipo de modelos comprenden, los modelos a escala, los cuales representan el sistema en una escala reducida, tal como los modelos de una estructura de control de una obra hidráulica, y, los modelos análogos, que usan otro sistema físico que posea propiedades similares a las del prototipo.

Los **Modelos Abstractos** son los más extendidos en hidrología, representan el sistema en forma matemática, por lo general se los conoce como modelos matemáticos. Están constituidos por un conjunto de ecuaciones que describen y representan el sistema real, describiendo las variables de entrada y salida. Estas variables pueden ser funciones del espacio y del tiempo y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias.

Tratar de desarrollar un modelo con variables aleatorias que dependen de las tres dimensiones espaciales y del tiempo es una tarea ardua, por tal razón y por propósitos prácticos es necesario simplificar el modelo.

Primero, se toma en cuenta la aleatoriedad, según esta clasificación puede ser determinístico o estocástico. Los procesos hidrológicos son parcialmente determinísticos y parcialmente aleatorios o estocásticos.

Se llaman determinísticos, cuando no consideran aleatoriedad alguna, es decir, una entrada dada produce siempre una misma salida, por otro lado, estocásticos, son aquellos en los que la causalidad no es determinante, por lo que tienen salidas que son por lo menos parcialmente aleatorias.

Segundo, se considera la variación espacial, la cual nos define si las variables del modelo varían en el espacio o serán uniformes. En el caso de modelos determinísticos, se clasifican en agregados o distribuidos. En los modelos agregados, el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones en el espacio. En los modelos distribuidos, en cambio, se considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio, y define las variables como funciones de las dimensiones espaciales.

Los modelos estocásticos se clasifican como, independientes en el espacio y correlacionados en el espacio, dependiendo de la influencia de las variables aleatorias tengan entre ellas en diferentes puntos del espacio.

Tercero, se considera la variación temporal. Los modelos determinísticos se clasifican en modelos de flujo permanente y modelos de flujo no permanente. Los modelos estocásticos, se clasifican en dependientes en el tiempo y correlacionados en el tiempo.

Un modelo práctico usualmente considera uno o dos fuentes de variación. Adicionalmente se deben tener en cuenta los siguientes conceptos para entender de mejor manera los sistemas y modelos en hidrología.

Fenómeno: es el proceso físico que produce una alteración del estado del sistema, por ejemplo la lluvia, evaporación, infiltración, etc.

Variable: es el valor que describe cuantitativamente un fenómeno, en la hidrología están el caudal, evaporación, lluvia diaria, etc.

Parámetro: es el valor que caracteriza el sistema, que no establece modificaciones en el tiempo, por ejemplo: la capacidad de infiltración de un suelo, el área de la cuenca, etc.

2.3 PRECIPITACIÓN

Podemos definir la precipitación como la fuente primaria de agua en la superficie terrestre. La precipitación, es toda forma de humedad que originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve y otros procesos mediante los cuales el agua propiamente dicha, cae a la superficie, tales como el granizo y nevisca.

Sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios relativos al uso y control del agua. Tal es así, que resulta de fundamental importancia, conocer la manera en la que se produce y algunos métodos con los que se puede predecir, dadas ciertas condiciones atmosféricas, y por otro lado, poder cuantificar y medir la precipitación y diversos criterios para el análisis, síntesis, corrección y tratamiento de los datos obtenidos.

2.3.1 PROCESO DE FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

Se sabe que la humedad siempre está presente en la atmósfera, aún en días sin nubes. Este contenido de humedad en el aire, se puede medir en gramos de agua por kilogramo de aire seco (g/kg) aunque generalmente se conoce y se expresa como porcentaje de *humedad relativa*.

Para que ocurra la precipitación, es necesario que el aire se enfríe mediante algún tipo de mecanismo, de manera que éste alcance su punto de saturación. Vale decir, que la temperatura del aire (T_a), sea inferior al punto de condensación.

Estos mecanismos de enfriamiento comúnmente se generan por la ascensión de masas de aire, las cuales producen calentamiento o enfriamiento de la superficie de la tierra o bien, por barreras orográficas. Sin embargo, la saturación, no necesariamente lleva a la precipitación, en este sentido toma fundamental importancia la presencia de núcleos de condensación o congelamiento, sobre los cuales se forman las gotas de agua o de cristales de hielo, proceso que se conoce como *nucleación*. Estos núcleos por lo general consisten de productos de combustión, óxidos de nitrógeno y partículas de sal, son los más efectivos y aún con humedades tan bajas como del 75% pueden producir condensación.

Finalmente, se debe producir el crecimiento de las gotas de lluvia o los cristales de hielo, ya que las nubes están sostenidas por componentes verticales de las fuerzas que ejercen las corrientes de aire. Estas son pequeñas, pero suficientes para impedir que caigan partículas de determinado tamaño. Es necesario entonces que las gotas tengan peso suficiente, porque de otra manera se podrían evaporar y desaparecería la nube lentamente. Las gotas pueden crecer por atracción electrostática o por turbulencia.

La *coalescencia* ocurre cuando las gotitas de agua se funden para crear otras gotitas más grandes, o cuando las gotitas se congelan en un cristal de hielo. La resistencia del aire hace que las gotitas de agua en una nube permanezcan inmóviles.

Cuando se produce una turbulencia del aire, las gotitas de agua chocan, produciendo así, gotitas más grandes. Cuando estas gotitas descienden, la fusión continua, de modo que las gotas se hacen lo bastante pesadas como para vencer la resistencia del aire y caer como lluvia.

El proceso de Bergeron ocurre cuando los cristales de hielo adquieren moléculas de agua de las gotitas de agua superfrías cercanas. Cuando estos cristales de hielo ganan bastante masa, comienzan a caer. Esto generalmente requiere más masa que la fusión entre el cristal y las gotitas de agua vecinas. Este proceso es dependiente de la temperatura, ya que las gotitas de agua superfrías

sólo existen en una nube por debajo de la congelación. Además, debido a la gran diferencia de temperaturas entre la nube y el nivel de tierra, estos cristales de hielo pueden derretirse cuando caen y convertirse en lluvia.

La evaporación desde la superficie de los océanos es la principal fuente de humedad para la precipitación, ya que no más del 10% de la precipitación continental se puede atribuir a la evaporación en los continentes.

Por otra parte, el 25% de la precipitación total que cae en áreas continentales regresa al mar como escorrentía directa o flujo de agua subterránea.

Sin embargo, la cercanía a los océanos no necesariamente implica altas precipitaciones, como es el caso de islas desérticas. La localización de una región con respecto al sistema general de circulación, la latitud y la distancia a la fuente de humedad son las variables que más influyen en el clima, junto con las barreras orográficas.

2.3.2 FORMAS DE PRECIPITACIÓN

De acuerdo a sus características físicas y producto de la condensación del vapor de agua atmosférico, formado en el aire libre o en la superficie de la tierra, y de las condiciones locales, la precipitación puede adquirir diversas formas, siendo las más comunes: llovizna, lluvia, escarcha, nieve y granizo.

Llovizna. Más conocida como garúas, consiste en diminutas gotitas de agua líquida cuyo diámetro fluctúa entre 0.1 y 0,5 mm; debido a su pequeño tamaño tienen un asentamiento lento y en ocasiones parecen que flotarán en el aire. Por lo general la llovizna cae de estratos bajos y muy rara vez sobrepasa un valor de 1mm/h.

Lluvia. Consiste de gotas de agua líquida en su mayoría con un diámetro mayor a los 5 mm. En muchos países, suelen clasificarla como ligera, moderada o fuerte según su intensidad.

Escarcha. Es una capa de hielo, por lo general transparente y suave, pero que usualmente tiene bolsas de aire que se forma en superficies expuestas por el congelamiento de agua súper enfriada que se ha depositado en forma de lluvia o llovizna.

Granizo. Es la precipitación en forma de bolas de hielo, producida en nubes convectivas. El granizo se forma a partir de partículas de hielo que, en sus desplazamientos por la nube van "atrapando" gotas de agua, las gotas se depositan alrededor de la partícula de hielo y se congelan

formando capas, como una cebolla. Los granizos pueden ser esferoidales, cónicos o irregulares en forma, y su tamaño varía desde 5 hasta 125 mm de diámetro.

Nieve. La nieve está compuesta de cristales de hielo blanco o translúcidos, principalmente de forma compleja, combinados hexagonalmente y a menudo mezclados con cristales simples; alguna veces aglomerada en copos de nieve, que pueden tener varios centímetros de diámetro.

2.3.3 TIPOS DE PRECIPITACIÓN

La precipitación lleva a menudo el nombre del factor responsable del levantamiento del aire que produce el enfriamiento en gran escala y necesario para que se produzcan cantidades significativas de precipitación, en base a ello se distinguen tres tipos de precipitación:

Precipitación de origen ciclónico o frontal.

Se producen cuando hay un encuentro de dos masas de aire, una caliente (color rojo) y otra fría (color azul) y converge en zonas de bajas presiones (ciclones). Las nubes más calientes son violentamente impulsadas a las partes más altas, donde pueden producirse la condensación y precipitación.

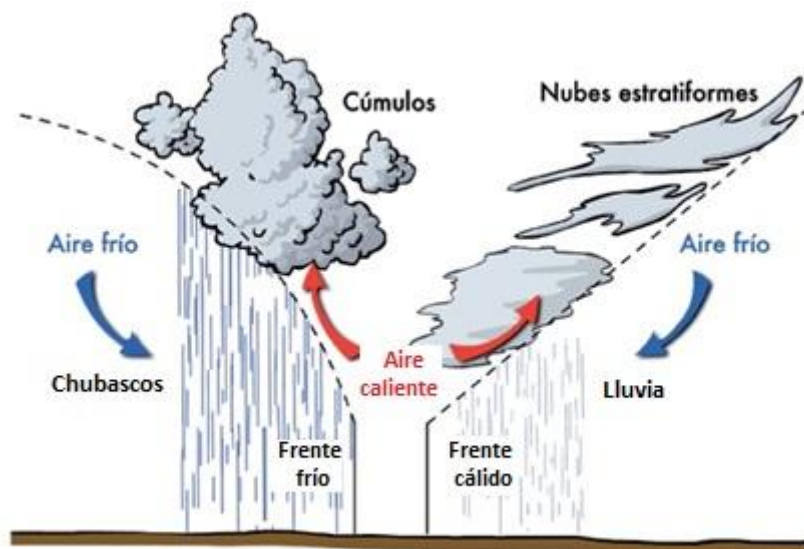


Figura 2-8. Esquema de precipitación de Origen Ciclónico. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

La precipitación ciclónica puede subdividirse en frontal y no frontal. La precipitación frontal resulta del levantamiento del aire cálido a un lado de una superficie frontal sobre aire más denso y frío. La precipitación no frontal es la precipitación que no tiene relación con los frentes.

Precipitación de frente cálido, el aire caliente avanza hacia el aire frío, por lo que el borde de la masa es un frente caliente, tienen una pendiente baja entre 1/100 y 1/300, y lentamente el aire caliente fluye hacia arriba por encima del aire frío,. Generalmente las áreas de precipitación son grandes y su duración varía de ligera, moderada y casi continua hasta el paso del frente.

Precipitación de frente frío, el aire frío avanza hacia el aire caliente, entonces el borde de la masa de aire es un frente frío, el cual tiene una pendiente casi vertical, por lo que el aire caliente es forzado hacia arriba más rápidamente que en el frente caliente.

Precipitación convectiva.

Se presenta cuando una masa de aire que se calienta tiende a elevarse, por ser el aire cálido menos pesado que el aire de la atmósfera circundante. La diferencia en temperatura puede ser resultado de un calentamiento desigual en la superficie.

A medida que la masa de aire caliente se eleva, el aire se enfría llegando hasta la condensación (formación de nubes) y dar origen a la precipitación (gotas de agua).

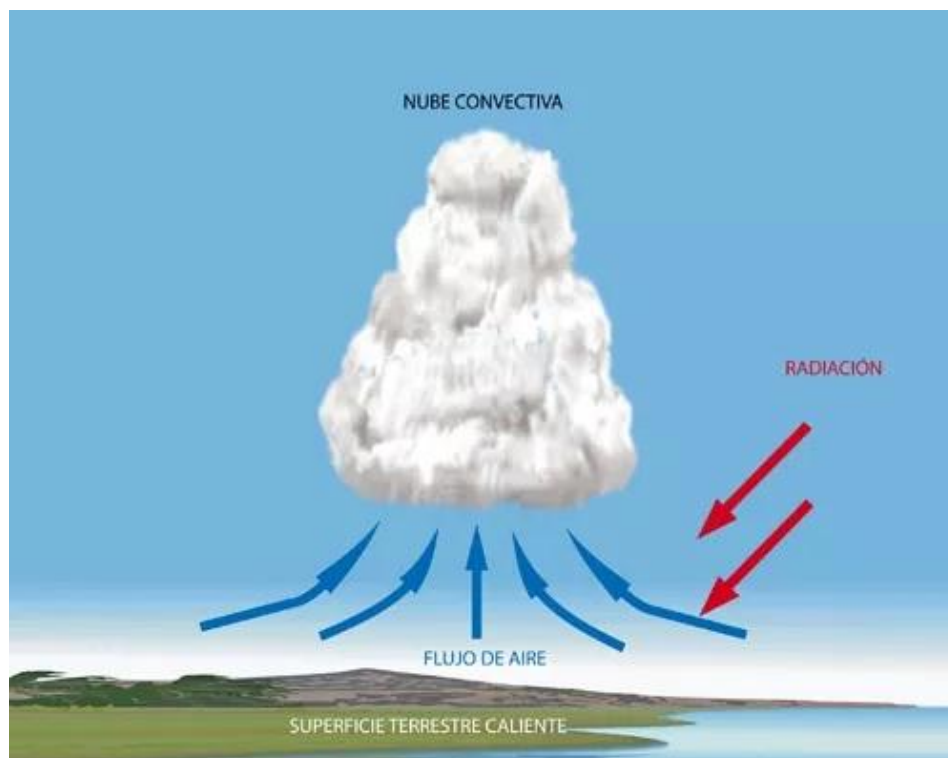


Figura 2-9. Esquema de precipitación de Origen Convectivo. Fuente: <https://vcastello.wordpress.com/10-eso/tema-3-el-tiempo-y-el-clima/>

Un claro ejemplo de este tipo de precipitación son las tormentas eléctricas al atardecer de días calurosos de aire húmedo. La precipitación convectiva es puntual y su intensidad puede variar entre aquellas que corresponden a lloviznas y aguaceros.

Precipitación orográfica.

Se produce cuando el vapor de agua que se forma sobre la superficie, es empujado por el viento hacia las montañas, donde las nubes siguen por las laderas de las montañas y ascienden a grandes alturas, hasta encontrar condiciones para la condensación y la consiguiente precipitación. La precipitación es mayor a barlovento, que a sotavento.

En las cadenas montañosas importantes, el máximo de precipitación se produce antes de la divisoria. En cambio con menores altitudes, el máximo se produce pasado esta, debido a que el aire continúa el ascenso.

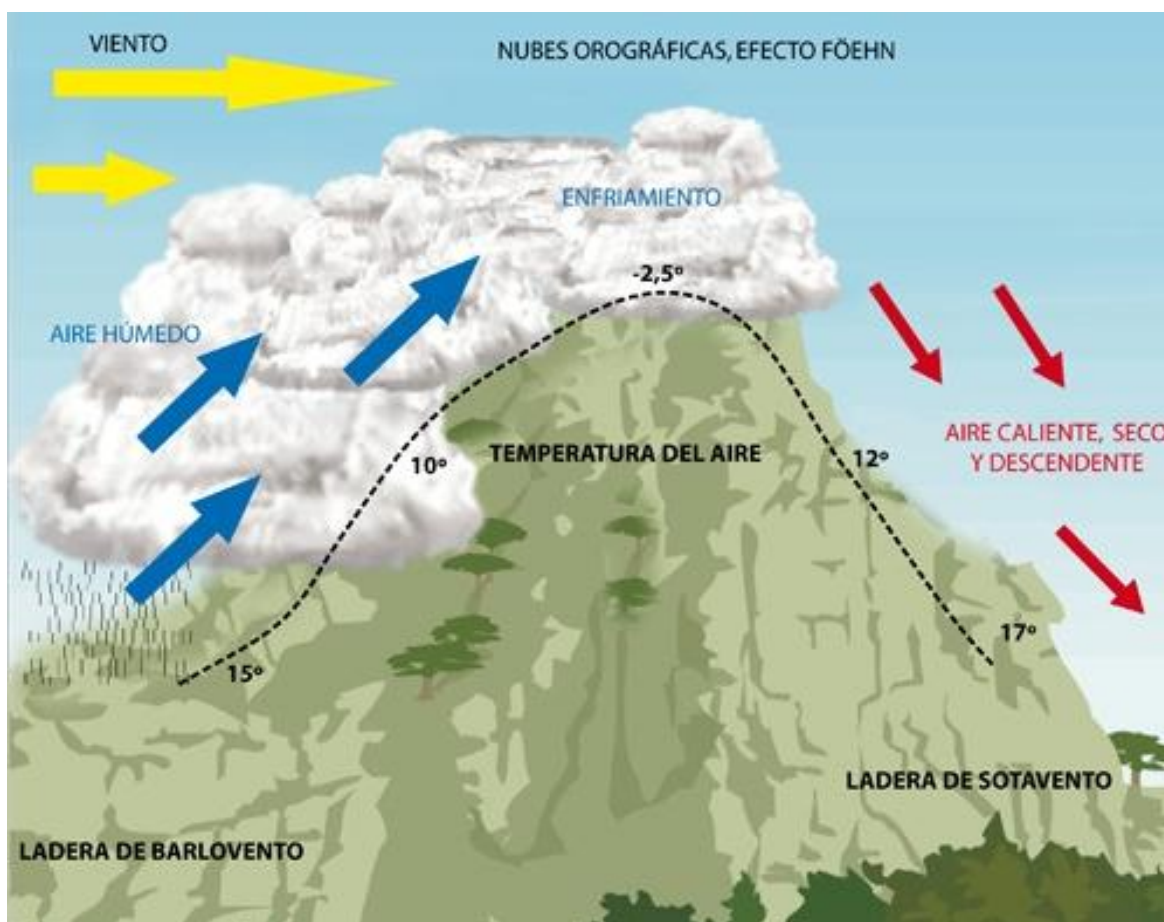


Figura 2-10. Esquema de precipitación de Origen Orográfico. Fuente: (Rapacioli, Apunte Cátedra Hidrología - Clase I-A, 2016)

2.3.4 PRECIPITACIÓN PROMEDIO SOBRE UN AREA O UNA CUENCA

Para evaluar la cantidad promedio de precipitación sobre un área es necesario basarse en los valores puntuales registrados en cada medidor que conforma la red.

Pero como la contribución de cada instrumento al total de la tormenta es desconocida, han surgido varios métodos que intentan darnos una aproximación de la distribución de la precipitación dentro del área en consideración, entre estos métodos tenemos:

Método del promedio aritmético.

Consiste en realizar la suma del valor registrado en cada una de las estaciones pluviométricas ubicadas dentro del área en estudio y dividirla por el número total de estaciones, siendo el valor así hallado, la Precipitación Media. Se trata de un método de resolución rápida y que conlleva un grado de precisión muy relativo, el cual depende de diversos factores, como ser el número de estaciones pluviométrica, de la ubicación de las mismas en la cuenca y de la distribución de la lluvia estudiada. Es el único método que no requiere de un conocimiento previo de la ubicación de cada estación.

Siendo P_1, P_2, \dots, P_n , registros de precipitaciones recogidas en los “n” pluviómetros de la zona, en el mismo intervalo de tiempo (una tormenta determinada, una estación lluviosa, un año calendario o hidrológico), la precipitación media para la zona se define mediante la Ecuación 1, como se observa a continuación:

$$\bar{P}_{aritm} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (1)$$

Método de las curvas isoyetas

Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación (interpolación de líneas) llamadas “isoyetas”, de modo semejante a como se trazan las curvas de nivel en topografía.

Para el trazado de las isoyetas no suele ser suficiente por lo general una simple interpelación lineal, sino que deberán tenerse en cuenta las características de ubicación de cada pluviómetro (situación, vegetación circundante, altitud, topografía, etc.) y, según ellas, se procederá a efectuar una interpelación racional.

Sean P_1, P_2, \dots, P_n los valores asignados a cada isoyeta, y A_1, A_2, \dots, A_{n-1} las áreas entre las isoyetas $P_1-P_2, P_2-P_3, \dots, P_{n-1}-P_n$. La precipitación promedio en la cuenca o área considerada será:

$$\bar{P}_{isoyetas} = \frac{\sum_{i=2}^n \frac{1}{2} \times P_{i-1} + P_i \times A_{i-1}}{\sum_{i=2}^n A_{i-1}} = \frac{\sum_{i=2}^n P_{i-1} + P_i \times A_{i-1}}{2 \times A} \quad (2)$$

El método de las curvas isoyetas es el que da resultados más aceptables, pero el carácter subjetivo del dibujo de las mismas, hace necesario que se posea para ello un buen conocimiento de las características climáticas y físicas de la zona.

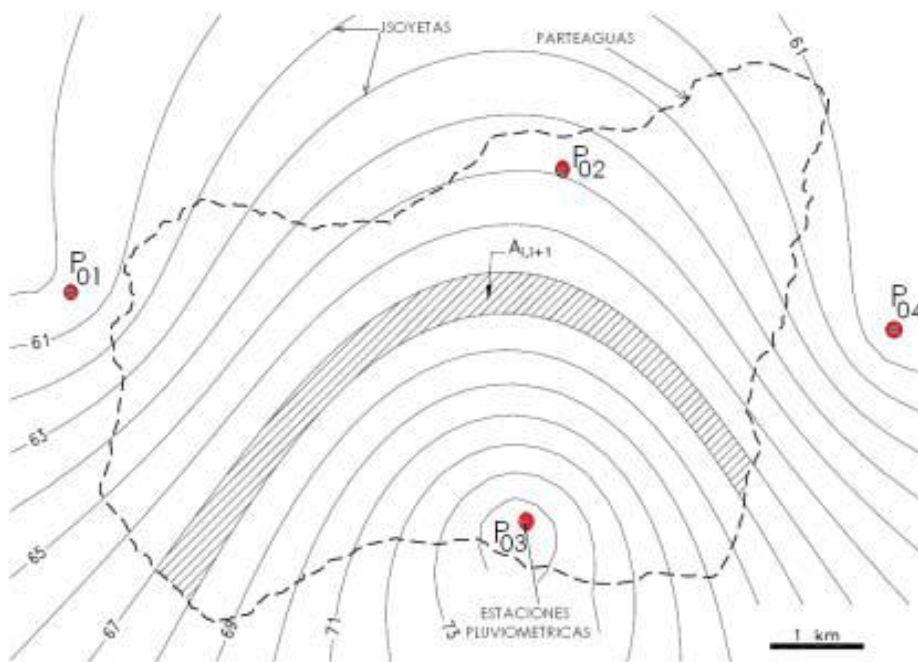


Figura 2-11. Curvas Isoyetas. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

Método de los polígonos de Thiessen

Este método se debe al meteorólogo Alfred. H. Thiessen, y se emplea básicamente, cuando la distribución de los pluviómetros no es uniforme dentro del área en consideración.

El método consiste en:

1. Unir, mediante líneas rectas dibujadas en un plano de la cuenca, las estaciones más próximas entre sí (líneas discontinuas, Figura 2-12). Con ello se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas (P_{0i}).

2. Trazar líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos (líneas rectas continuas, Figura 3.32). Por geometría elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto.

3. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por las líneas rectas del paso 2, que forman los llamados polígonos de Thiessen y, en algunos casos, en parte por el parteaguas de la cuenca, Figura 3.32.

El área encerrada por los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente. Por lo tanto, la precipitación promedio sobre la cuenca se evalúa con:

$$P_{THIESEN} = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad (3)$$

Dónde:

$P_{THIESEN}$ = precipitación promedio sobre la cuenca, en mm.

A_i = área del polígono de cada una de las estaciones “i” dentro de la divisoria de aguas de la cuenca, en Km² o m².

A = área total de la cuenca, en Km² o m².

P_i = precipitación en estación i para el período de estudio, en mm.

Calculando el área encerrada por cada estación y relacionándola con el área total, se sacan pesos relativos para cada pluviómetro y posteriormente el valor de la precipitación promedio se obtiene a partir de un promedio ponderado.

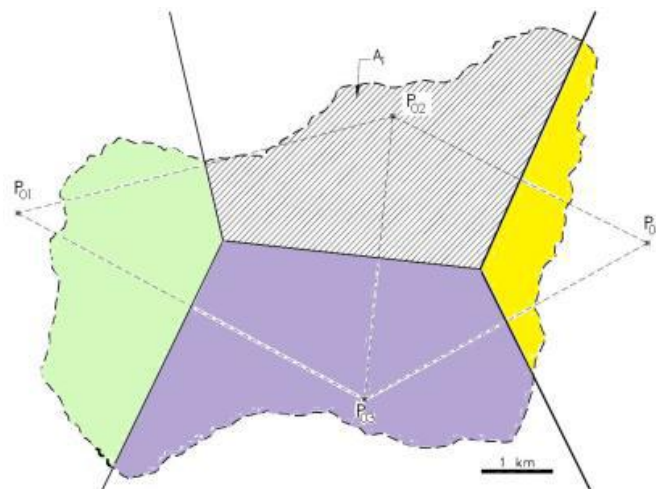


Figura 2-12. Polígonos de Thiessen. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

2.4 FENOMENOS ALUVIONALES Y PRECIPITACIONES INTENSAS

Todas las cuencas constituyen unidades de estudio y gestión. Lo primero porque en ellas se pueden analizar los ciclos del agua y de los sedimentos enmarcados directamente en su territorio, que adquieren una máxima relevancia cuando suceden fenómenos torrenciales, causado por las precipitaciones extremas, fusiones repentinas del manto de nieve o desprendimientos de aludes. Lo segundo porque la cuenca se encuentra normalmente poblada y sus habitantes necesitan de sus recursos para desarrollarse.

El agua y el suelo constituyen los principales recursos que dispone la cuenca, que a su vez son los más necesarios para su población. Por lo tanto, para asegurar el aprovechamiento eficaz de ambos recursos, se debe atender al comportamiento físico de los mismos dentro de la cuenca y en función del mismo establecer su ordenación.

Básicamente, el proceso de incorporación de agua a la cuenca es a través de las precipitaciones. Estas pueden ser de dos tipos, moderadas o torrenciales. Los fenómenos torrenciales, suponen una abundancia de precipitación en un intervalo de tiempo reducido, los cuales, a su vez, pueden ser ordinarias o extraordinarias.

El comportamiento de la cuenca ante las lluvias torrenciales extraordinarias tiene implicaciones más allá del funcionamiento del ciclo del agua en la misma, pues al tratarse de importantes volúmenes de agua que se ponen en movimiento en un pequeño lapso de tiempo, activan, bajo determinadas condiciones, el *fenómeno aluvional*; que se manifiesta, además de un incremento del caudal líquido en el ciclo del agua, por la aparición de procesos de erosión del suelo en la cuenca vertiente por el efecto de las precipitaciones, de las escorrentías de ladera y por la abrasión de sus cauces de drenaje por los caudales de avenida, provocando un incremento de la descarga sólida en el ciclo de los sedimentos.

A los efectos antes mencionados, se les pueden añadir la aparición de deslizamientos en las áreas más vulnerables de la cuenca, afectando a la estabilidad de los terrenos y a la seguridad de sus habitantes y sus bienes.

Los eventos torrenciales ordinarios, evidencian efectos moderados y leves en relación a los extraordinarios, aunque es imprescindible expresar las pérdidas de suelo y cosechas causados por estos acontecimientos, por tanto, se reducen notablemente los recursos naturales de la cuenca y empobrece a sus habitantes, especialmente cuando no se adoptan medidas para controlar dichos efectos y la cuenca entra en un proceso de paulatino deterioro.

2.4.1 RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTIA

Para conocer el caudal de diseño se requiere de datos de escurrimiento en el lugar requerido. En muchas ocasiones no se cuenta con esta información, o bien, hay cambios en las condiciones de drenaje de la cuenca como son, por ejemplo, construcción de obras de almacenamiento, la deforestación, la urbanización, etc., lo que provoca que los datos de caudal obtenidos antes de los cambios no sean útiles.

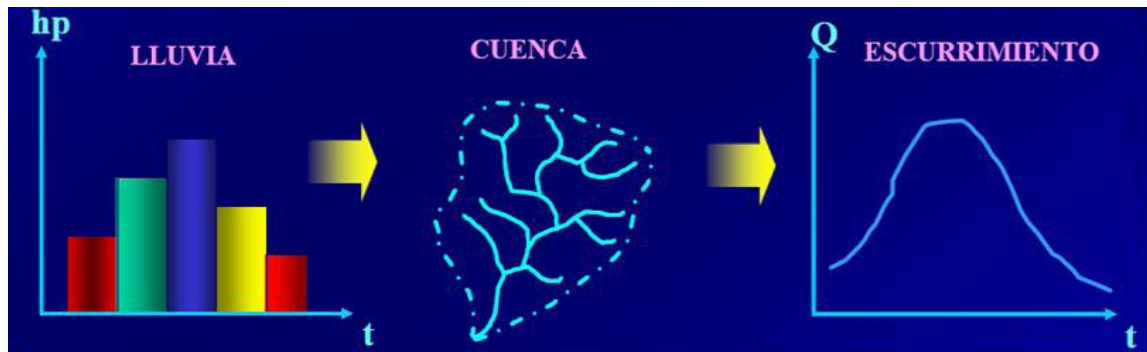


Figura 2-13. Relación precipitación-escorrentía. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

2.4.2 MODELOS DE PRECIPITACION-ESCORRENTÍA

Los modelos de precipitación-escorrentía se pueden clasificar, en métodos empíricos, métodos estadísticos y métodos de hidrograma unitario. La mayoría de los criterios, con excepción de los hidrogramas unitarios sintéticos, requieren de registros históricos tanto de alturas de precipitación como de aforos de corrientes.

2.4.3 METODOS EMPIRICOS.

Ante la carencia de información hidrométrica, se han desarrollado varios métodos que permiten, en función de la precipitación, obtener los caudales que pueden presentarse en la zona de estudio.

2.4.3.1 METODO RACIONAL

El método racional es posiblemente el modelo más antiguo de la relación lluvia-escorrentía, es muy utilizado en el diseño de drenajes. La expresión del método racional es:

$$Q = C \times I \times A \quad (4)$$

2.4.3.1.1 Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es la variable menos precisa del método racional, este representa una fracción de la precipitación total. Se debe elegir un coeficiente razonable para representar los efectos integrados de los factores que influyen en este. Existe una gran variedad de tablas y autores que desarrollan valores del coeficiente de escorrentía para los diferentes tipos de superficies. Sin embargo, el coeficiente de escorrentía “C” puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$C = \frac{\text{Volúmen de la escorrentía superficial total}}{\text{Volúmen de la precipitación total}}$$

Cuando el área de drenaje (Cuenca) está constituida por diferentes tipos de cubierta y superficies, el coeficiente de escurrimiento puede obtenerse en función de las características de cada porción del área como un promedio ponderado.

$$C = \frac{C_1 \times A_1 + C_2 \times A_2 + C_3 \times A_3 + \dots + C_n \times A_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (5)$$

Dónde:

A_i = Área parcial “i” que tiene cierto tipo de superficie.

C_i = Coeficiente de escurrimiento correspondiente al área A_i

Para determinar la intensidad, el método racional supone que la escorrentía alcanza su pico en el tiempo de concentración “ t_c ”, por lo tanto se utiliza como duración de la tormenta el tiempo de concentración. Se recomienda usar el método racional en cuencas pequeñas, de hasta aproximadamente 25 Km².

2.4.3.2 METODO RACIONAL MODIFICADO

Este método amplía el campo de aplicación del método racional, porque considera el efecto de la no uniformidad de las lluvias mediante un coeficiente de uniformidad, el caudal máximo de una avenida se obtiene mediante la expresión:

$$Q = CU \times 0,278 \times C \times I \times A \quad (6)$$

Dónde:

Q = Caudal punta para un periodo de retorno determinado (m³/s)

I = Máxima intensidad para un periodo de retorno determinado y duración igual al tiempo de concentración (mm/h).

A = Superficie de la cuenca (Km²).

C = Coeficiente de Escorrentía.

CU = Coeficiente de Uniformidad.

El coeficiente de uniformidad corrige el supuesto reparto uniforme de la escorrentía dentro del intervalo de cálculo de duración, igual al tiempo de concentración en el método racional, este se puede determinar según la siguiente expresión:

$$CU = 1 + \frac{T_c^{125}}{T_c^{125} + 14} \quad (7)$$

El T_c esta expresado en horas, este método es recomendado para el diseño de alcantarillas en carreteras.

2.4.3.3 METODO DE LA CURVA NUMERO (CN)

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU. (Natural Resources Conservation Service – NRCS), originalmente llamado Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service - SCS) para calcular la precipitación efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad.

La metodología del número de curva (CN), es la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva, surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente. La representación gráfica de la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (P_e), permitió obtener una familia de curvas que fueron

estandarizadas a partir de un número adimensional de curva CN, que varía de 1 a 100, según sea el grado del escurrimiento directo.

Así un número de la curva CN = 100, indica que toda la lluvia escurre y un CN = 1, indica que toda la lluvia se infiltra.

Para la tormenta como un “todo”, la altura de precipitación efectiva o escorrentía directa “Pe” 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 “Fa” es menor o igual a alguna retención potencial máxima “S”; como se observa en la Figura 2-14.

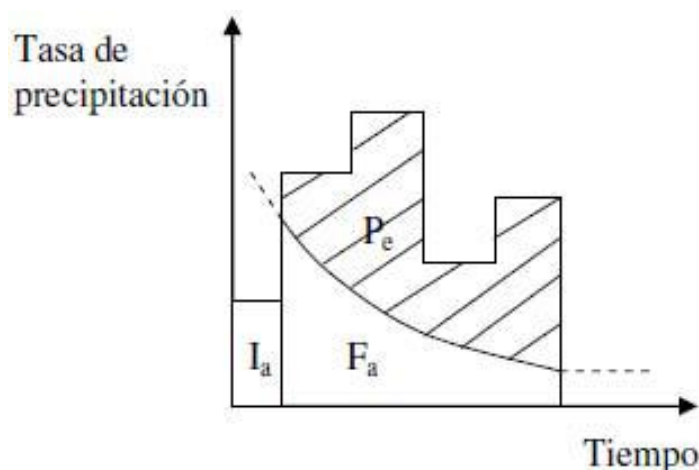


Figura 2-14. Tasa de precipitación vs. tiempo. Fuente: (Rapacioli, Apunte Cátedra Hidrología - Clase V-A, 2016)

Existe una cierta cantidad de precipitación “Ia” (Abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego de eso, la escorrentía potencial es la diferencia entre “P” e “Ia”. A continuación, se detalla la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método SCS.

$$Pe = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad (8)$$

Se puede adoptar la relación empírica: $Ia = 0,20 \times S$, con base en esto, se tiene:

$$Pe = Q = \frac{(P-0,20xS)^2}{P-0,80xS} \quad (9)$$

Por principio de continuidad:

$$P = Pe + Ia + Fa \quad (10)$$

Al representar en gráficas la información de P y Pe para muchas cuencas, el SCS encontró curvas características. Para estandarizar estas curvas, se define un número adimensional de curva **CN**, tal que: $0 \leq CN \leq 100$.

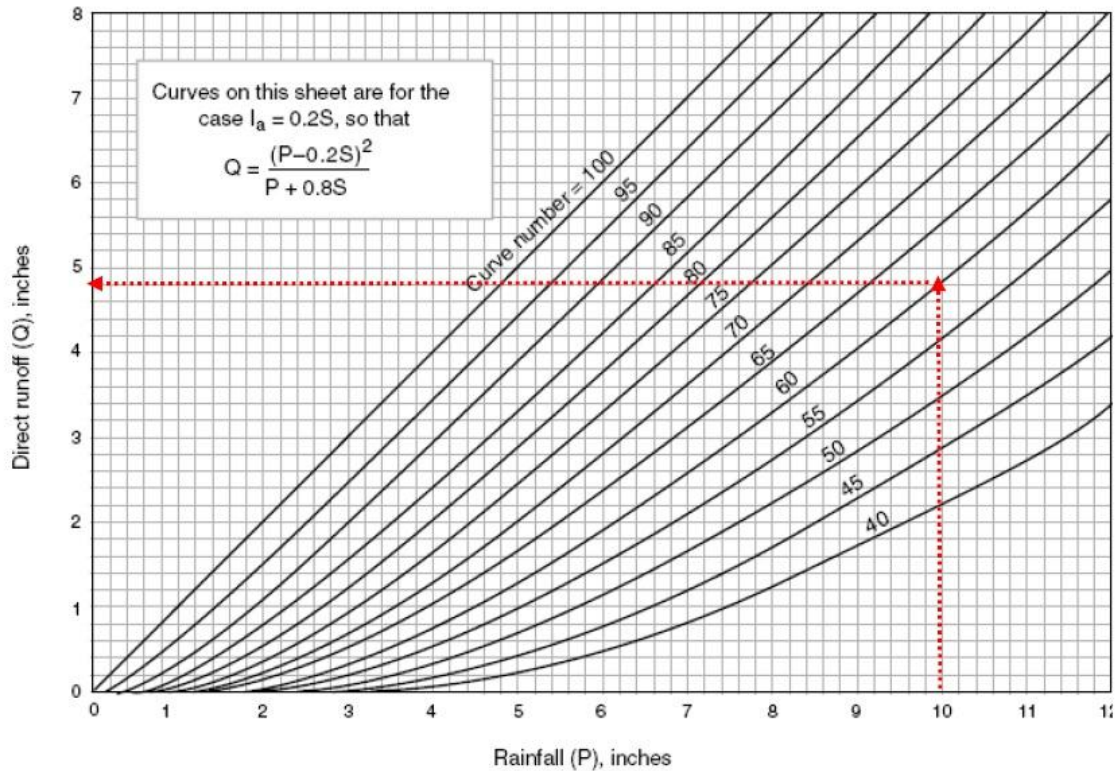


Figura 2-15. Gráfica del número de curva “CN”. Fuente: (Rapacioli, Apunte Cátedra Hidrología - Clase V-A, 2016)

El número de curva “CN” y la retención potencial máxima “S” se relacionan por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (11)$$

El índice CN expresa el potencial de escorrentía de un terreno en función de la humedad antecedente del suelo, cobertura vegetal, grupo hidrológico de suelo y uso del mismo. El valor máximo que puede alcanzar este índice es $CN = 100$, que indica que el terreno que se analiza es completamente impermeable, es decir, todo lo que llueve escurre en superficie.

Las Tablas 1 y 2 permiten obtener un valor estimativo del índice CN para distintas coberturas y usos del suelo, para una condición humedad antecedente media (AMCII). Ver Anexo 1.

El complejo hidrológico suelo-cobertura es muy importante para el cálculo de la precipitación efectiva o escorrentía directa. Los grupos de suelos hidrológicos identificados en las referidas tablas (1 y 2) son:

- Suelos Grupo A: Tienen alta velocidad de infiltración, aun cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen alta velocidad de transmisión.
- Suelos Grupo B: Tienen moderadas velocidades de infiltración cuando están bien húmedos. Consisten principalmente en suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, con textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Con moderada velocidad de transmisión.
- Suelos Grupo C: Tienen infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos con una capa que impide el descenso del agua, o suelos con textura moderadamente fina a fina. Tienen lenta transmisión de agua.
- Suelos Grupo D: Tienen infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos de arcilla con alto potencial de expansión. Tienen lenta transmisión de agua.

Los valores del índice *CN* de las tablas, como se dijo, se refieren a la condición media de humedad en el suelo (*AMCII*). El SCS define tres condiciones de humedad, estos son:

- Seca: suelo que permite una capacidad de infiltración alta, asociada con intensidades de precipitación desde 0 a 635 mm/año.
- Media: suelo que permite una capacidad de infiltración normal, asociada con intensidades de precipitación desde 635 a 1270 mm/año.
- Húmeda: suelo que permite una capacidad de infiltración baja, asociada a intensidades de precipitación mayores de 1270 mm/año.

AMC (I)	Condiciones Secas
AMC (II)	Condiciones Normales
AMC (III)	Condiciones Húmedas

Para la obtención del índice CN para las condiciones seca (AMCI) o húmeda (AMCIII) se utilizan las ecuaciones 12 y 13, respectivamente:

$$CN (I) = \frac{4,2 CN(II)}{10-0,058 CN(II)} \quad (12)$$

$$CN (III) = \frac{23 CN(II)}{10-0,13 CN(II)} \quad (13)$$

2.4.4 METODOS ESTADÍSTICOS

Los estudios hidrológicos requieren del análisis de información hidrometeorológica, esta información puede ser de datos de precipitación, caudales, temperatura, evaporación, infiltración, etc.

Se cuenta con datos recopilados de un periodo disponible, si esta información es organizada y se analiza adecuadamente proporciona una herramienta muy útil, para tomar decisiones sobre el diseño de estructuras hidráulicas y responder a innumerables dudas y parámetros de diseño. En el análisis hidrológico se utilizan los conceptos de probabilidades y estadística, porque generalmente se cuenta con escasa información, y casi todos los fenómenos hidrológicos tienen una alta aleatoriedad.

Los métodos estadísticos se basan en considerar que el caudal máximo anual, es una variable aleatoria que tiene una cierta distribución. Se requiere tener el registro de caudales máximos anuales, cuanto mayor sea el tamaño del registro, mayor será también la aproximación del cálculo del caudal de diseño, el cual se calcula para un determinado periodo de retorno (T).

Los conocimientos a tener en cuenta y que resultan de fundamental importancia, son básicamente todos los referidos al concepto de probabilidad, las funciones de probabilidad discretas, continuas y acumuladas, como así también, las funciones de distribución de la probabilidad.

2.4.4.1 PERIODO DE RETORNO

El Periodo de Retorno “T”, se define como el tiempo o lapso promedio entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada, dicho de otra forma, es el intervalo de recurrencia promedio para un cierto evento. Estadísticamente el Periodo de Retorno es la inversa de la probabilidad de excedencia, es decir:

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} \quad (14)$$

O también puede ser representada por la probabilidad de no excedencia como se muestra a continuación.

$$T = \frac{1}{1 - P(X \geq x)} \quad (15)$$

Otra forma de definir Periodo de Retorno es la siguiente:

Considerar por ejemplo la variable “caudal máximo del año, Q_{máx.}” para “n” años. La gráfica correspondiente para una serie de 41 años será:

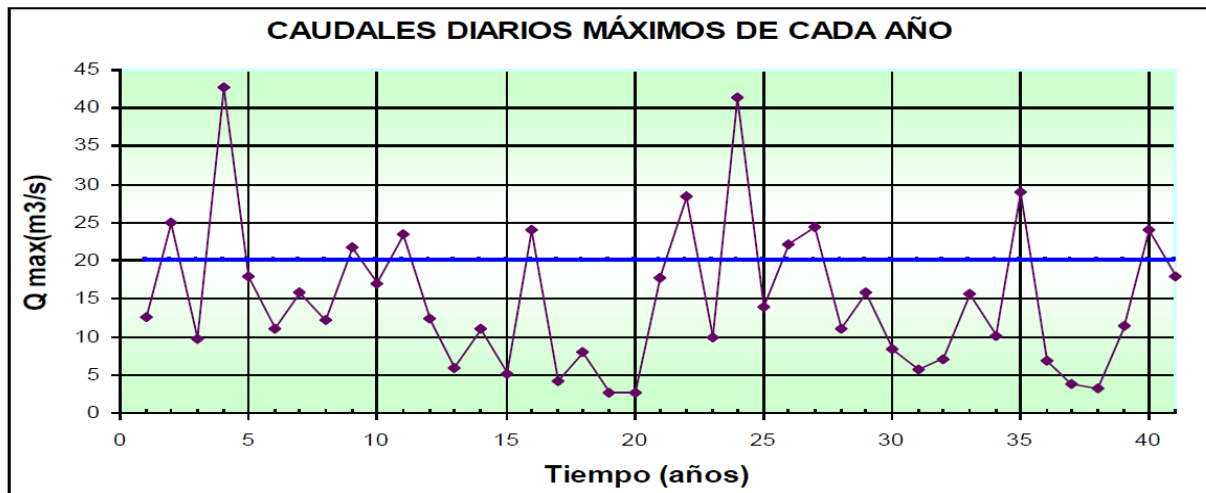


Figura 2-16. Caudales diarios máximos. Fuente: (Cahuana Andia & Morales, 2009)

La media histórica de esta serie de 41 años resulta 14.9 m3/s.

Ahora considerar por ejemplo el valor 20 m3/s. Trazar una recta a 20 m3/s en el gráfico. Realizar el conteo de años transcurridos entre eventos mayores a 20 m3/s:

Una vez que se presentó el evento “Q>20 m3/s” en el segundo año, transcurrieron 2 años antes de que se volviera a presentar dicho evento. Luego transcurrieron 5 años, luego 2 años, etc.

Considerando varias centenas de años, el periodo de retorno “T” será el valor esperado de esos lapsos de tiempo. Entonces en el ejemplo descrito puede ser estimado como sigue:

$$T = \frac{2 + 5 + 2 + 5 + 6 + 2 + 2 + 1 + 8 + 5}{10} = 3,80 \text{ años}$$

Lo que significa:

Considerando varias centenas de años, el valor de 20 m³/s es excedido en promedio una vez cada 3.8 años, es decir, el periodo de retorno del valor de 20 m³/s es de 3.8 años.

Con otras palabras, en el transcurso de un año cualquiera, se tiene una probabilidad de uno en 3.8 (o sea 26%) de que Q_{máx} sea igual o mayor a 20 m³/s.

El periodo de retorno a adoptar para el diseño de una estructura hidráulica debería ser el resultado del análisis costo-beneficio. A mayor periodo de retorno, mayor la obra y en consecuencia, más cara y el beneficio también podría ser más grande. Sin embargo la evaluación de los beneficios es frecuentemente muy difícil de utilizar, por lo que en la práctica se adoptaran periodos de retorno en base a la práctica usual.

2.5 TORMANTA DE DISEÑO

Debido a la disponibilidad de caudales, resulta necesario desarrollar metodologías para realizar la estimación indirecta de caudales a partir de la precipitación, que es una variable cuyo registro es más sencillo, más extenso y más frecuente.

Para predecir caudales críticos es necesario asociar una probabilidad a lluvias máximas de diferentes duraciones.

Deducir la probabilidad de ocurrencia de un evento requiere contar con registros continuos de precipitación. El conocimiento de las características de las precipitaciones intensas es de gran importancia para el dimensionamiento de obras hidráulicas, tales como canales, vertederos, presas, etc. Es necesario determinar una tormenta de diseño para poder estimar los caudales de diseño, esta tormenta de diseño no es otra cosa que la distribución de la precipitación en el tiempo.

Se entiende por tormenta al conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. De acuerdo a esta definición una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días, pueden abarcar extensiones de terrenos muy variables.

También una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación, como se mencionó en el apartado 2.3.4 (Método de las curvas isoyetas).

La tormenta de diseño es la entrada al sistema, y los caudales resultantes se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales.

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes.

2.5.1 DURACIÓN DE LA TORMENTA

La duración de la TD es un parámetro de fundamental importancia, ya que determina la altura de lluvia total para una recurrencia dada y, por lo tanto, afecta el caudal pico resultante, (Pedraza, 2012). Para asegurar el aporte total de la cuenca, es preciso generar una tormenta cuya duración sea mayor o igual al tiempo de concentración.

Para la obtención de los tiempos de concentración, se aplicaron diversas fórmulas:

- **Ecuación de Kirpich:** Kirpich (1940); desarrolla una ecuación a partir de información del SCS en siete cuencas agrícolas rurales pequeñas en Tennessee, con canales bien definidos y pendientes empinadas (3% a 12%). El método de Kirpich es ampliamente aceptado para estimar el “tc” para pequeñas áreas de drenaje. Se calculó con la longitud del cauce principal y con la longitud máxima de escurrimiento en una cuenca.

$$T_c(hs) = 0,066 \left(\frac{L}{\sqrt{\Delta h}} \right)^{0,77} \quad (16)$$

Dónde:

* L = longitud del cauce principal o Longitud máxima de escurrimiento [Km]

* Δh = diferencia de Cota a la entrada y salida de la cuenca [m]

- **Ecuación de Témez:** Fórmula desarrollada en 1978 a partir de datos de cuenca naturales de España.

$$T_c(hs) = 0,3 \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (17)$$

Dónde:

* S = pendiente de la cuenca [m/m]

- **Ecuación del Cuerpo de Ingenieros de EE.UU:** Ecuación generada a partir de 25 cuencas rurales de EE.UU con áreas menores a 12000 km².

$$T_c(hs) = 0,197x L^{0,76} x S^{-0,19} \quad (18)$$

2.6 METODO DE TRANSFORMACIÓN PRECIPITACIÓN- ESCORRENTÍA

El método de transformación precipitación-escorrentía permite determinar la crecida de diseño (y por lo tanto el caudal pico) en cuencas donde no se dispone de suficiente información hidrométrica (como es el presente caso). El procedimiento de cálculo es el siguiente:

a) Se determina un hietograma areal maximizado, denominado Tormenta de Diseño (TD), cuya altura de lluvia total es máxima para una recurrencia dada, con una duración y distribución espacio-temporal dadas.

b) Se calcula el hidrograma de escurrimiento generado por la TD. Esta transformación comprende el cálculo del hidrograma de lluvia efectiva y la propagación de la lluvia efectiva por sub-cuencas y red de drenaje principal.

c) Se asume que la recurrencia del hidrograma calculado es la misma que la recurrencia de la TD.

Existen dos tipos de TD: a) sintéticas: son obtenidas por síntesis y generalización de un gran número de tormentas observadas, b) históricas: son eventos que han ocurrido en el pasado. En ambos casos es necesario contar con curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), ya sea para la determinación de la altura de lluvia total y su recurrencia para el primer caso; como para la asociación de una recurrencia del evento observado en el segundo.

Se hace evidente entonces que las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia son un dato primordial en el análisis hidrometeorológico.

Una tormenta o evento lluvioso está definida por tres variables fundamentales: magnitud de la lluvia o lámina de agua, duración y frecuencia o periodo de retorno.

La magnitud de la lluvia, es la lámina total ocurrida en el lapso de duración de la tormenta, una forma de definir a la magnitud de la lluvia es mediante la “intensidad”, la cual se representa por la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. De las tormentas interesa la intensidad máxima que se haya presentado. Es decir, la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo.

La “duración”, es el tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta, que varía según la distribución espacial.

La “frecuencia”, es el número de veces que se repite una tormenta de características de intensidad y duración definida en un período de tiempo más o menos largo, generalmente en años, se expresa por su periodo de retorno.

2.7 CURVAS IDF

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno. Junto con la definición de las curvas, surgen otros elementos a considerar, como son la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento. Por ello, es de suma importancia tener claro el concepto de cada una de estas variables, como se mencionó anteriormente, de modo de tener una visión más clara de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.

La intensidad se define como la tasa temporal de precipitación, o sea, la profundidad por unidad de tiempo (mm/hr), y ésta se expresa como:

$$i = \frac{P}{T_D} \quad (19)$$

Donde P es la profundidad de lluvia en mm. , y T_D es la duración, dada usualmente en horas.

Es importante señalar, que cuando sólo se dispone de un pluviómetro en una estación, es evidente que, en general, sólo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas. Como se comprenderá, esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son, en general, las más intensas. Es natural entonces que las determinaciones de intensidades de lluvia se hagan a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos.

2.7.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS IDF.

La construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), según diversos autores, plantean distintas formas o métodos para su construcción. Según Aparicio, existen dos métodos; el primero, llamado de intensidad - período de retorno, relaciona estas dos variables para cada duración por separado, mediante alguna de las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología.

El otro método relaciona simultáneamente la intensidad, la duración y el período de retorno en una familia de curvas, cuya ecuación es:

$$I = \frac{k \times T^m}{(d+c)^n} \quad (20)$$

Donde k , m , n y c son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, y en tanto que I y d corresponden a la intensidad de precipitación y la duración, respectivamente.

Por otra parte, Ven Te Chow, plantea dos formas de trabajar con las curvas. La primera, utiliza un análisis de frecuencia de la lluvia, considerando para ello una función de distribución de probabilidad de valor extremo como la función de Gumbel. El segundo método, expresa las curvas IDF como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una gráfica.

Wenzel, dedujo para algunas ciudades de los Estados Unidos, algunos coeficientes para utilizarlos en una ecuación de la forma:

$$I = \frac{c}{(Td)^{e+f}} \quad (21)$$

Donde I es la intensidad de lluvia de diseño, y Td la duración, en tanto c , e y f son coeficientes que varían con el lugar y el período de retorno.

Otra forma o método para determinar las curvas IDF, es el que se presenta en este documento, y corresponde al que ha planteado Témez, el cual relaciona las intensidades de precipitación para distintos períodos de retorno, con el propósito de graficar la relación entre las tres variables (Intensidad- Duración –Frecuencia), y cuyo esquema de la curva IDF es el siguiente:

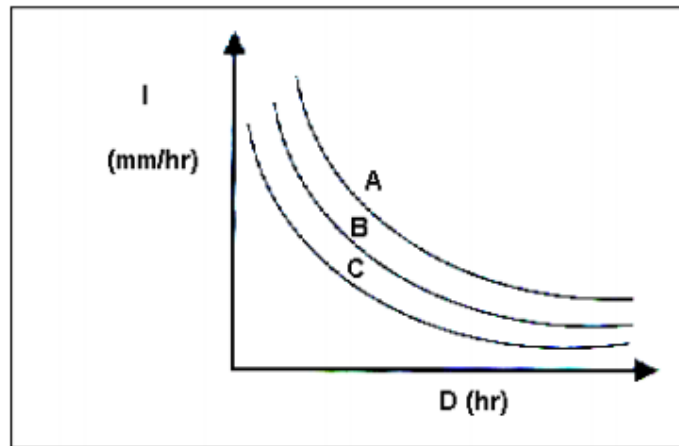


Figura 2-17. Curvas IDF. Fuente: <http://drenajeupucallpa.blogspot.com/2015/03/pluviometriograficos-de-frecuencia.html>

Dónde:

D = Duración en horas.

I = Intensidad de precipitación en mm/hr. Según: $I = P/D$, siendo P = la profundidad de la lluvia en mm.

A , B y C representan distintos períodos de retorno en años.

2.7.2 MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS IDF.

2.7.2.1 SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMETRICAS.

El criterio de selección de las estaciones pluviográficas se basa en el tipo, cantidad y periodicidad de los datos. Se determina un período determinado de tiempo, del cual se tomará como referencias los correspondientes datos.

2.7.2.2 DETERMINACIÓN DE INTENSIDADES MAXIMAS.

Esta etapa se analiza las bandas de registro de los pluviógrafos, para lo cual se realizan diversos muestreos. Se parte con mediciones desde un horario “x”, para una duración de 24 horas; luego, es necesario desplazarse en intervalos de tiempo de forma discreta y estables. Posteriormente, se toman los valores de cada una de las series y se dividen por su duración D en (horas), obteniéndose así las intensidades en mm/ hr.

2.7.2.3 AJUSTE DE DATOS - FUNCION DE DISTRIBUCION DE GUMBEL.

El siguiente paso metodológico, corresponde al ajuste de los valores de intensidad de precipitación a la función de Gumbel. Esta es una distribución de probabilidad de valores extremos, formulada por Gumbel en el año 1941. Es una distribución logarítmica normal, para lo cual, el valor extremo o valor máximo X se obtiene mediante la siguiente ecuación de análisis de frecuencia:

$$X = \bar{X} + K S \quad (22)$$

Donde;

\bar{X} : Media de la muestra de valores de intensidad de precipitación.

K : Factor de frecuencia, depende del período de retorno.

S : Desviación estándar de la muestra.

El valor de K se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Y_t - Y_n}{S_n} \quad (23)$$

Donde;

Y_t : Variable reducida, la cual es función del período de retorno y del tamaño de la muestra.

Y_n : Media de la variable reducida.

S_n : Desviación de la variable reducida.

El valor de la Variable reducida Y_t se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Y_t = -\ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (24)$$

Siendo T el período de retorno.

Una vez transformados los valores a precipitación máxima en intensidad de precipitación, se calcula el promedio y la desviación estándar de las intensidades para cada una de las muestras por duración de la precipitación acumulada. Posteriormente, se calcula el factor K para los períodos de retorno requeridos, sean 5, 10, 25, 50, 100, 250 y 500 años. Para obtener las intensidades máximas de frecuencia se utilizará la ecuación de análisis de frecuencia.

2.7.2.4 DISEÑO DE LAS CURVAS IDF.

Los valores obtenidos para la intensidad máxima por duración para cada uno de los períodos de retorno seleccionados se graficarán como “duración” contra “intensidad de precipitación” para cada uno de los períodos de retorno.

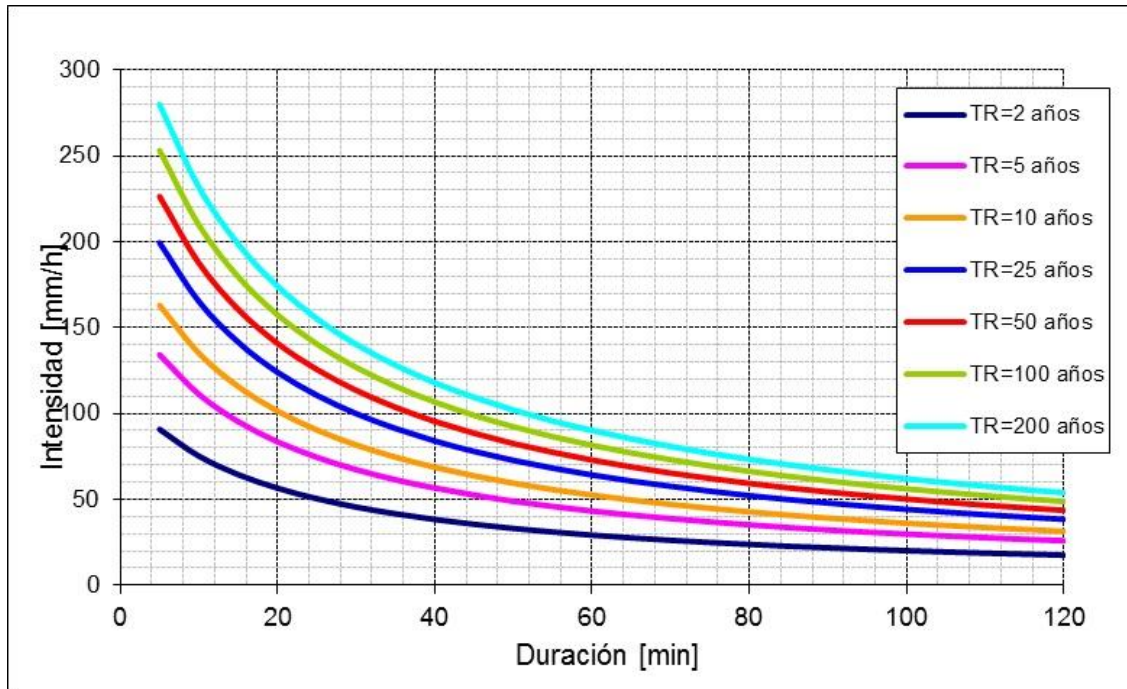


Figura 2-18. Esquema general - Curvas IDF. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Curvas-IDF-para-el-area-del-Gran-Mendoza-con-tiempos-de-recurrencia-de-2-a-200_fig1_332180963

2.8 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) particulariza un conjunto de procedimientos sobre una base de datos no gráfica o descriptiva de objetos del mundo real, que tienen una representación gráfica y que son susceptibles de algún tipo de medición respecto a su tamaño y dimensión relativa a la superficie de la tierra. A parte de la especificación no gráfica el SIG cuenta también con una base de datos gráfica con información georeferenciada o de tipo espacial, y de alguna forma ligada a la base de datos descriptiva. La información es considerada geográfica si es medible y tiene localización.

La mayor utilidad de un sistema de información geográfico está íntimamente relacionada con la capacidad que posee éste de construir “modelos o representaciones del mundo real” a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis.

La construcción de modelos o modelos de simulación como se llaman, se convierte en una valiosa herramienta para analizar fenómenos que tengan relación con tendencias y así poder lograr establecer los diferentes factores influyentes.

Existen muchas definiciones de los SIG, algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones; pero todas coinciden en que se trata de un sistema integrado para trabajar con información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas del conocimiento. Básicamente, son una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial mencionada, y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información, para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

Como “Sistema de Información” se entiende la unión de la información y herramientas informáticas (programas o software) para su análisis con unos objetivos concretos. Por otra parte, al incluir el término “Geográfica” se asume que la información es espacialmente explícita, es decir, incluye la posición en el espacio.

2.8.1 COMPONENTES DE UN SIG.

Básicamente se puede definir un SIG como una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware), programados adecuadamente (software) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con éstos siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (recurso humano). Por lo tanto, son cuatro los elementos constitutivos de un sistema de estas características:

1. Equipos. (Hardware)

Es donde opera el SIG. Hoy por hoy, programas de SIG se pueden ejecutar en un amplio rango de equipos, desde servidores hasta computadores personales usados en red o trabajando en modo “desconectado”.

2. Programas. (Software)

Los programas de SIG proveen las funciones y las herramientas necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica.

3. Datos geográficos.

Probablemente la parte más importante de un sistema de información geográfico son sus datos. Los datos geográficos y tabulares pueden ser adquiridos por quien implementa el sistema de información, así como por terceros que ya los tienen disponibles. El sistema de información geográfico integra los datos espaciales con otros recursos de datos y puede incluso, utilizar los manejadores de base de datos más comunes para manejar la información geográfica.

4. Equipo humano

La tecnología de los SIG está limitada si no se cuenta con el personal que opera, desarrolla y administra el sistema; y que establece planes para aplicarlo en problemas del mundo real.

Aunque todos ellos han de cumplir con su cometido para que el sistema sea funcional, existen diferencias en cuanto a su importancia relativa. A lo largo del tiempo, el peso de cada uno de los elementos dentro de un proyecto SIG ha ido cambiando mostrando una clara tendencia: mientras los equipos informáticos condicionan cada vez menos los proyectos SIG por el abaratamiento de la tecnología, los datos geográficos se hacen cada vez más necesarios y son los que consumen hoy día la mayor parte de las inversiones en términos económicos y de tiempo.

Así, hoy en día, el condicionante principal a la hora de afrontar cualquier proyecto basado en SIG lo constituye la disponibilidad de datos geográficos del territorio a estudiar, mientras que hace

diez años lo era la disponibilidad de computadoras potentes que permitieran afrontar los procesos de cálculo involucrados en el análisis de datos territoriales.

2.8.2 APLICACIONES DE LOS SIG.

Los SIG se están convirtiendo en una herramienta habitual de nuestro mundo, demostrando su eficacia en numerosas aplicaciones de gestión de recursos, análisis de alternativas, herramientas de soporte para la toma de decisiones y planes de actuación frente a diversidad de situaciones. Cualquier actividad relacionada con el espacio (territorial) puede beneficiarse con el uso de los SIG. En efecto, se han convertido en herramientas indispensables para muchos sectores de actividad, tanto públicos como privados. Algunas de sus aplicaciones son:

Planificación hidrológica: gestión del agua en comunidades de regantes, redes de distribución de agua tanto urbana como agrícola, estudios de cuencas fluviales, modelización hidrológica, análisis de riesgos, etc.

Agricultura: gestión territorial mediante coberturas digitales del parcelario rústico, aplicación precisa de fitosanitarios y fertilizantes mediante el uso conjunto de los SIG y los sistemas de posicionamiento global (GPS) en explotaciones agrarias.

Geografía empresarial: investigación de mercados y determinación de la localización óptima de nuevas empresas mediante el análisis de la distribución y características de la población, infraestructuras de comunicación, geomarketing, etc.

Protección del medio ambiente: creación de mapas temáticos del medio natural y seguimiento de su estado de conservación, modelización de variables ambientales.

Ordenación territorial: elaboración de mapas de usos de suelo mediante el uso combinado de los SIG e imágenes de satélite para la planificación del territorio.

Administración regional: asistencia a la planificación de políticas territoriales mediante el uso de información sobre la localización y distribución de las actividades económicas (industrias, explotaciones agropecuarias, empresas de servicios, etc.), de los servicios públicos (asistencia sanitaria, educación, servicios administrativos, etc.), de las infraestructuras, y de los recursos naturales y culturales.

Administración local: asistencia a la planificación de la ordenación urbana, la gestión de infraestructuras (redes de tuberías de distribución de agua, energía, alcantarillado, etc.), gestión del tráfico, medio ambiente urbano (ruidos, olores, contaminación urbana, etc.).

2.8.3 CAPTURA DE LA INFORMACIÓN EN UN SIG.

La información geográfica con la cual se trabaja en los SIG puede encontrarse en dos tipos de presentaciones o formatos: Formato Raster y Vectorial.

2.8.3.1 FORMATO RASTER.

El formato raster se obtiene cuando se "digitaliza" un mapa o una fotografía, o cuando se obtienen imágenes digitales capturadas por satélites. En ambos casos se obtiene un archivo digital de esa información. La captura de la información en este formato se hace mediante los siguientes medios: scanners, imágenes de satélite, fotografía aérea, cámaras de video, entre otros.

Los Sistemas de Información Raster basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos. Su forma de proceder es dividir la zona de afección de la base de datos en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (a las que se denomina pixels) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Dado que la malla es regular (el tamaño del pixel es constante) y que conocemos la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los pixels están georreferenciados.

Lógicamente, para tener una descripción precisa de los objetos geográficos contenidos en la base de datos, el tamaño del pixel ha de ser reducido (en función de la escala), lo que dotará a la malla de una resolución alta. Sin embargo, a mayor número de filas y columnas en la malla (más resolución), mayor esfuerzo en el proceso de captura de la información y mayor costo computacional a la hora de procesar la misma.

No obstante, el modelo de datos raster es especialmente útil cuando tenemos que describir objetos geográficos con límites difusos, como por ejemplo puede ser la dispersión de una nube de contaminantes, o los niveles de contaminación de un acuífero subterráneo, donde los contornos no son absolutamente nítidos; en esos casos, el modelo raster es más apropiado que el vectorial.

2.8.3.2 FORMATO VECTORIAL.

La información gráfica en este tipo de formatos se representa internamente por medio de segmentos orientados de rectas o vectores. De este modo un mapa queda reducido a una serie de pares ordenados de coordenadas, utilizados para representar puntos, líneas y polígonos.

La captura de la información en el formato vectorial se hace por medio de: mesas digitalizadoras, convertidores de formato raster a formato vectorial, sistemas de geoposicionamiento

global (GPS), entrada de datos alfanumérica, entre otros. Con un par de coordenadas y su altitud gestionan un punto (e.g. un vértice geodésico), con dos puntos generan una línea, y con una agrupación de líneas forman polígonos. De entre todos los métodos para formar topología vectorial la forma más robusta es la topología arco-nodo.

Esta topología, basa la estructuración de toda la información geográfica en pares de coordenadas, que son la entidad básica de información para este modelo de datos. Con pares de coordenadas (puntos) forma vértices y nodos, y con agrupaciones de éstos puntos forma líneas, con las que a su vez puede formar polígonos. Básicamente esta es la idea, muy sencilla en el fondo.

En general, el modelo de datos vectorial es adecuado cuando trabajamos con objetos geográficos con límites bien establecidos, como pueden ser fincas, carreteras, etc.

En la Figura 2-19, se observan las distintas capas de información espacial que componen un SIG.

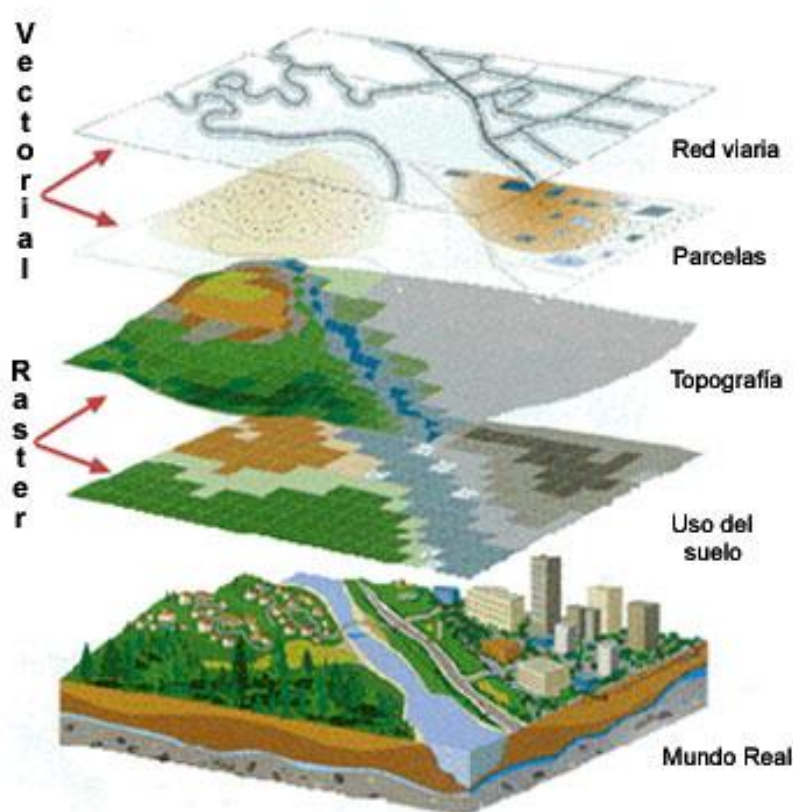


Figura 2-19. Capas de un SIG. Fuente: (Rapacioli, *Sistemas de información geográfica aplicados al manejo de cuencas hidrográficas. Tomo I*, 2016)

2.9 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE).

Desde el siglo XVII la representación del relieve siempre ha tenido importancia relevante para conocer la información que existe acerca de los elementos en la superficie de la tierra, siendo de gran importancia para el análisis y estudios de muy diversa índole en los campos de ingeniería civil y ciencias de la tierra, en particular, el estudio de la forma del terreno y los elementos presentes en el mismo constituye un importante insumo para muchos usuarios como cartógrafos, geólogos, hidrólogos, ingenieros, militares y ahora en la actualidad para los sistemas de información geográfica (SIG).

El modelo digital de elevación desde su creación en la década de los 50 ha constituido un medio para el conocimiento y representación del terreno y para lograr análisis de los elementos presentes en el mismo mediante el uso de equipo y software especializado para tal fin. En la actualidad los modelos constituyen un medio para lograr la representación del relieve muy versátil y funcional ya que a partir del mismo se puede conocer la conformación o morfología del terreno (MDT) sino también los elementos de origen antrópico y la vegetación presente en el mismo (MDS). Además es posible derivar o generar información a partir de los modelos digitales de elevación que nos posibilita que tengamos más datos de apoyo para el cumplimiento de objetivos, toma de decisiones y desarrollo de proyectos relacionados con el relieve, los datos de apoyo derivados pueden ser curvas de nivel, corrientes de agua, mapas de pendientes, redes irregulares de triángulos (TIN), imágenes del relieve sombreado o mapa de sombras, puntos acotados de altura, modelos vectoriales de la altura de los elementos presentes en el terreno, líneas estructurales, entre otros.

Hoy en día, con los sistemas de información geográfica el modelo digital de elevación tiene un abanico de representaciones que permiten al usuario desarrollar mejores análisis de estos datos del relieve ya que permiten visualizar los mismos mediante tintas hipsométricas, realizar perfiles longitudinales, obtener vistas en 3D, modelamiento dinámico en 3D, gamas tradicionales de color, intervalos de color de acuerdo a la variación y rangos de la elevación, sobre posición de datos o información en formato vectorial o raster de diferentes ámbitos, temas y aplicaciones.

2.9.1 DEFINICIÓN DE MDE.

La definición que se menciona en los trabajos de Miller y Laflamme, del Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachussetts, define al MDE como “una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas xyz conocidas, en un sistema coordenado arbitrario”.

Haciendo énfasis en la definición general mencionada anteriormente, un modelo digital de elevaciones (MDE) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. En forma genérica se tiene:

$$z = \xi |x, y|$$

Donde z es la altitud del punto situado en las coordenadas x e y , y ξ la función que relaciona la variable con su localización geográfica. Los valores de x e y suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistema de *proyección cartográfica*.

La ecuación anterior representa una superficie o campo escalar en la que la altitud es una variable continua. Dado que esta superficie está formada por un número infinito de puntos no es posible su modelización sin cierta pérdida de información, proceso equivalente al de generalización cartográfica en los mapas convencionales.

2.9.2 CLASIFICACIÓN DE MDE.

Los modelos de elevación digitales pueden dividirse en dos grandes grupos: *Vectorial* y *Raster*. Los primeros están basados en entidades definidas por sus coordenadas (puntos y líneas), mientras que los segundos, el tipo raster, están basados en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie.

En general, la descripción vectorial es más adecuada para variables discretas, que por su naturaleza están limitadas por fronteras lineales claras, mientras que las descripciones raster se adaptan mejor para la representación espacial de variables continuas, para las que no se pueden definir bordes de una forma neta, así como para otras con naturaleza estadística o probabilística.

Por lo antes expuesto, para la representación del modelo digital de elevaciones se opta por una estructuración de matrices regulares (Modelo Raster) la cual resulta de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda (aunque habitualmente se utiliza un valor puntual, asociado a cada nudo de la retícula o punto medio de la celda, con lo que esencialmente se construye un modelo vectorial de puntos). La red más utilizada es la malla cuadrada con filas y columnas equiespaciadas.

2.10 SOFTWARE ARCGIS.

ArcGIS es uno de los software más utilizados en el campo de los sistemas de información geográfica. Producido y comercializado por ESRI (Environmental Systems Research Institute), empresa que actualmente desarrolla y comercializa software para SIG y es una de las compañías líderes en el sector a nivel mundial. La popularidad de sus productos ha supuesto la generalización de sus formatos de almacenamiento de datos espaciales en el campo de los SIG vectoriales, entre los que destaca el shapefile.

Bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

2.10.1 COMPONENTES DE ARCGIS.

ArcMap.

Representa la parte central de ArcGIS. Es la aplicación utilizada para todas las tareas basadas en mapas incluyendo cartografía, análisis y edición. Esta aplicación permite trabajar con mapas, los cuales contienen una página de diseño, una vista o ventana geográfica con capas o layers, leyendas, barras de escala y flechas de norte entre otros elementos. ArcMap permite visualizar datos, crear mapas para presentaciones de calidad, resolver problemas frente a distintas interrogantes, presentar datos en forma de gráficos o reportes y desarrollar aplicaciones para personalizar la interfaz del usuario final o agregar herramientas para automatizar tareas de análisis.

ArcCatalog.

Con ArcCatalog es posible manejar contenedores de datos espaciales, diseños de bases de datos y para registrar y visualizar metadatos. ArcCatalog permite encontrar, previsualizar, documentar y organizar datos espaciales y crear sofisticadas Bases de Datos Geográficas para

almacenar información. Facilita la búsqueda de archivos e información mediante conexiones a bases de datos personales o remotas (administradas con ArcSDE).

ArcToolbox.

Es una aplicación simple que contiene alrededor de 20 herramientas utilizadas para conversión de datos, geoprocésamiento, manejo de información, proyección de mapas y exportación/importación de datos.

Presenta un árbol con 3 opciones, la primera de ellas hace referencia a las *Herramientas de Conversión* las cuales permiten transformar coberturas, grillas y TIN's (Triangulated Irregular Network) a distintos formatos soportados por ArcGIS. Estas herramientas se organizan en grupos pertenecientes al tipo de conversión a realizar y contienen asistentes (wizards) que guían los procesos de conversión más complicados.

La segunda herramienta corresponde a la de *Manejo de Datos* (Data Management Tools) la cual permite manejar la topología de coberturas, proyecciones, atributos y tablas.

Por último, la sección *My Tools* permite agregar herramientas personalizadas o más comúnmente utilizadas. My Tools comienza con solo dos herramientas activas: un asistente para agregar herramientas y un script en AML (Arc Macro Language).

2.10.2 TIPOS DE DATOS QUE SOPORTA ARCGIS.

ArcGIS soporta diferentes formatos de datos *vectoriales* para almacenar puntos, líneas y polígonos. Básicamente son representaciones conceptuales de elementos geográficos, Feature Classes (clases de elementos). Estos formatos incluyen:

- * Shapefiles: son los archivos vectoriales básicos, estos almacenan la posición y la información atributiva de puntos, líneas y polígonos.
- * Geodatabases (Bases de Datos Geográficas): es un formato de datos vectorial que guarda datos de puntos, líneas y polígonos en un sistema de manejo de bases de datos relacionales.
- * Archivos CAD: Las bases de datos geográficas incluyen datos SIG almacenados en formato CAD. ArcGIS soporta los formatos DXF, DWG y DGN.
- * Tablas de Eventos: Una tabla de eventos contiene campos con las coordenadas y medidas que se usan para comparar con otras medidas existentes en las clases de elementos.

* Red Irregular de Triángulos: Es un modelo que representa el mundo como una red de triángulos vinculados entre puntos espaciados irregularmente con valores X, Y y Z

Con los datos *ráster*, existe una relación entre que tan cercano se quiere modelar la realidad y el tamaño del archivo. Entre más pequeño sea el tamaño de la celda, se capturará más detalle de la realidad. Los datos ráster incluyen:

* Imágenes: Las imágenes de un SIG sirven para muchos propósitos. Por ejemplo: fotografías aéreas, imágenes de satélites y mapas en papel escaneado, tienen referencia geográfica y proporcionan información de ubicación en la superficie de la tierra. Formatos de imágenes comunes soportados por ArcGIS incluyen TIFF, Bitmap (.bmp), MrSID, JPEG (.jpg), e IMG.

* Formatos Grid: ArcGIS usa un formato ráster nativo llamado Grid. Hay dos tipos de grids: continuos y discretos. Los grids continuos pueden almacenar valores con lugares decimales, mientras que los grids discretos sólo almacenan valores enteros.

2.11 SOFTWARE HEC-HMS.

El modelo HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”) es un software que fue diseñado básicamente para simular procesos de lluvia-escorrentía en sistemas dendríticos de cuencas. Se usa en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc.

Es un programa gratuito, de dominio público y fue desarrollado por el “Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU” (US Army Corps of Engineers). Surge como evolución del programa HEC-1 pero incluye muchas mejoras, como una interfase gráfica que facilita al usuario las labores de pre y post-proceso y la posibilidad de conectarse a un sistema de información geográfica.

El HEC-HMS se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Incluye los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. El programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. Puede hacer corridas de precipitación o de la proporción de flujo, tiene la capacidad de salvar toda la información de estado de la cuenca en un punto de tiempo, y la habilidad de comenzar una nueva corrida de simulación, basada en la información de estado previamente guardada. Los resultados de la simulación se pueden ver en el mapa de la cuenca. Se generan tablas sumarias globales y de elemento, que incluyen la información sobre el flujo máximo y el volumen total. También están

disponibles, una tabla de serie de tiempo, el gráfico por elementos, los resultados de múltiples elementos y corridas de simulación. Finalmente, el programa HECHMS tiene la capacidad de imprimir todos los gráficos y tablas.

El modelo contiene:

- * Descripción física de la cuenca.
- * Descripción meteorológica.
- * Simulación hidrológica.
- * Estimación de parámetros.
- * Análisis de simulaciones.
- * Conexión con SIG.

El lapso de tiempo de una simulación es controlado por las especificaciones de control que incluyen: la fecha y hora de inicio, de terminación y un intervalo de tiempo.

Las fases de trabajo del programa son:

- * Separación de la lluvia neta, es decir, se calcula qué parte de la precipitación va a producir escurrimiento directo.
- * Cálculo del escurrimiento directo producido por esa lluvia neta.
- * Suma del escurrimiento directo y el base, si existía previamente. Cálculo de la evolución del escurrimiento base a lo largo del tiempo.
- * Cálculo de la evolución del hidrograma a medida que discurre a lo largo del cauce.

El HEC-HMS permite establecer varias sub-cuencas, en las cuales realiza los cálculos de las 3 primeras fases mencionadas. Luego, suma todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido, y proporciona el hidrograma de salida de la cuenca.

2.11.1 COMPONENTES.

Modelo de cuenca.

El modelo de cuenca representa la cuenca física, el usuario lo desarrolla agregando y conectando elementos hidrológicos. Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos:

- * Sub-cuencas (subbasins)
- * Tramos de tránsito (routing reach)
- * Uniones (junctions)
- * Embalses (reservoirs)
- * Fuentes (Sources)
- * Sumideros (sinks)
- * Derivaciones (diversions)

En los modelos de cuenca, se informa al programa de las distintas sub-cuencas y sus características, como el área, el método que se usará para la obtención del hidrograma, número de curva y el tiempo de retraso o “lag time”.

Modelo meteorológico.

El modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación requerida por un elemento sub-cuenca. El programa puede usar datos de lluvia puntual o en malla y puede modelar lluvia congelada o líquida junto con evapotranspiración. Incluye varios métodos de precipitación (tormenta frecuente, medidores de lluvia, precipitación en malla, distancia inversa y otros). Dentro del modelo meteorológico introducimos los datos de los pluviógrafos que se van a utilizar y los asignamos a cada sub-cuenca.

Especificaciones de control.

En las especificaciones de control se fija el lapso de tiempo de una corrida de simulación. Se establece la fecha y hora de inicio de la lluvia y el término de la misma con un intervalo de tiempo que puede variar según nuestra conveniencia.

Datos de entrada.

La información que necesita el programa está relacionada directamente con los métodos de cálculo que maneja. Existen cinco grupos básicos de información que deben suministrarse a HEC-HMS para efectuar las simulaciones:

1. Precipitación histórica o de diseño.
2. Características del suelo.
3. Información morfométrica de las sub-cuencas.
4. Datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
5. Características hidráulicas de los tramos de canal y de la capacidad de los embalses (métodos de tránsito).

Para la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, además de la información anterior se necesitan:

1. Registros concordantes de precipitación y caudales de salida (hietogramas e hidrogramas).
2. Determinación de las condiciones iniciales de humedad en los suelos (difícil de lograr).

3 DESARROLLO

3.1 ADQUISICIÓN DEL MDE

Existen numerosos formatos disponibles a través de la web para la adquisición de modelos digitales de elevación, difiriendo entre sí en resolución, cobertura geográfica y tratamientos posteriores, así como también su acceso libre o restringido.

Entre los sistemas satelitales que ofrecen datos topográficos, se encuentran plataformas cuya información es gratuita, de rápido acceso y cobertura a nivel global. Encontramos, por ejemplo, el sistema radar Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) 13, y el sistema ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) 14.

En el presente trabajo, se optó por la primera opción, ya que es de fácil acceso y posee una gran resolución espacial.

La misión SRTM fue un proyecto internacional llevado a cabo en cooperación entre la U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA), el German Aerospace Center (DLR), la Agencia Espacial Italiana (ASI) y la U.S. National Geospatial Intelligence Agency (NGA). El objetivo principal de la misión SRTM fue obtener un modelo digital de elevaciones global de alta resolución y calidad uniforme, a partir de datos recolectados con la técnica de interferometría radar de apertura sintética. Los datos InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), fueron obtenidos en once días (11 al 22 de febrero de 2000) por dos sistemas de radar – banda-C (SIR-C) y banda-X (X-SAR) – montados en el transbordador espacial Endeavor.

Cada sistema de radar consiste de dos antenas recolectando datos por interferometría, separadas entre sí alrededor de 60 metros. Se trabajó con dos bandas. Por un lado, el Jet Propulsion Laboratory (JPL) dependiente de la NASA, generó un modelo digital de elevaciones entre las latitudes 56° S y 60° N, operando en banda C en modo ScanSAR, cubriendo un ancho de faja de 225 km. El DLR operó un sistema en banda X con un ancho de faja de 50 Km. Si bien no pudo obtenerse una cobertura continua en banda X debido a la limitación de ancho de barrido, esta banda arrojó menor ruido que la banda C para una misma observación, por lo que los errores aleatorios de elevación de dicha banda fueron menores (poco más de la mitad que los de la banda C).

Las bandas C y X fueron procesadas de manera independiente. La primera banda fue distribuida públicamente, con resolución espacial de 1” de arco (~30 m) para Estados Unidos y reducida a 3” (~90 m) para el resto del mundo. Luego la NGA post-procesó el MDE de banda C creado por el JPL, y es responsable de las distintas versiones circulantes.

El MDE se descargó desde la página <https://earthexplorer.usgs.gov/>, perteneciente al **Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)**. Se determinó un polígono con el sector más representativo de la zona de estudio, y se obtuvo un archivo en formato GeoTiff, con una cobertura de 30 metros de resolución horizontal. Este tipo de archivos, permiten que información georeferenciada sea encajada en un archivo de imagen de formato Tiff. La información adicional incluye el tipo de proyección, sistema de coordenadas, elipsoide, datum, y todo lo necesario para que la imagen pueda ser automáticamente posicionada en un sistema de referencia espacial.

3.2 PROCESAMIENTO DEL MDE UTILIZANDO EL SOFTWARE ARCMAP

Se procede a ejecutar el software ArcMap. Una vez posicionado sobre el espacio de trabajo, se crea un nuevo proyecto, y comienzan a definirse las características y lineamientos generales del mismo.

Definiremos como sistema de coordenadas geográficas, el POSGAR 1994 (Posiciones Geodésicas Argentinas), ubicándonos dentro de la “zona 2”, abarcando así nuestra área de estudio. Las unidades de trabajo se fijarán en metros.

3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.

El primer paso consiste en cargar el modelo digital de elevación obtenido. Desde el ícono “Add Data” se elige el correspondiente archivo y se genera una vista previa al modelamiento y procesamiento del MDE.

En la Figura 3-1 se puede observar la vista que se presenta en el espacio de trabajo de ArcMap una vez cargado el MDE.

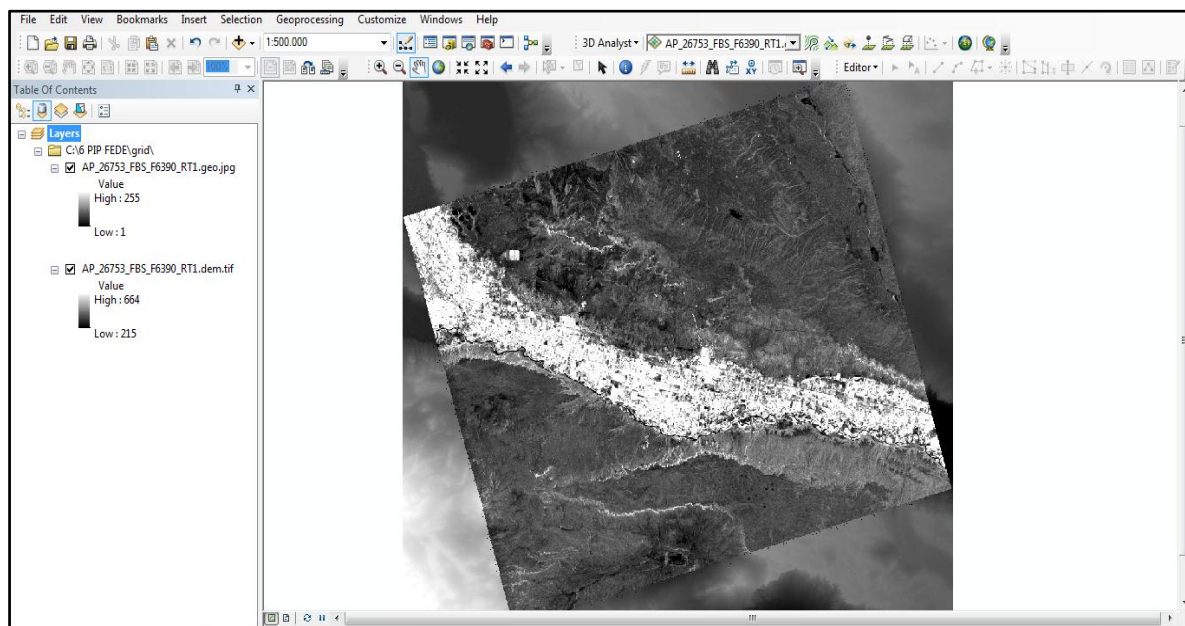


Figura 3-1. Vista previa generada al incorporar el MDE.

Reorganizando y renombrando el MDE, configurando la escala de altitudes podemos obtener una vista como la que se observa a continuación en la Figura 3-2.

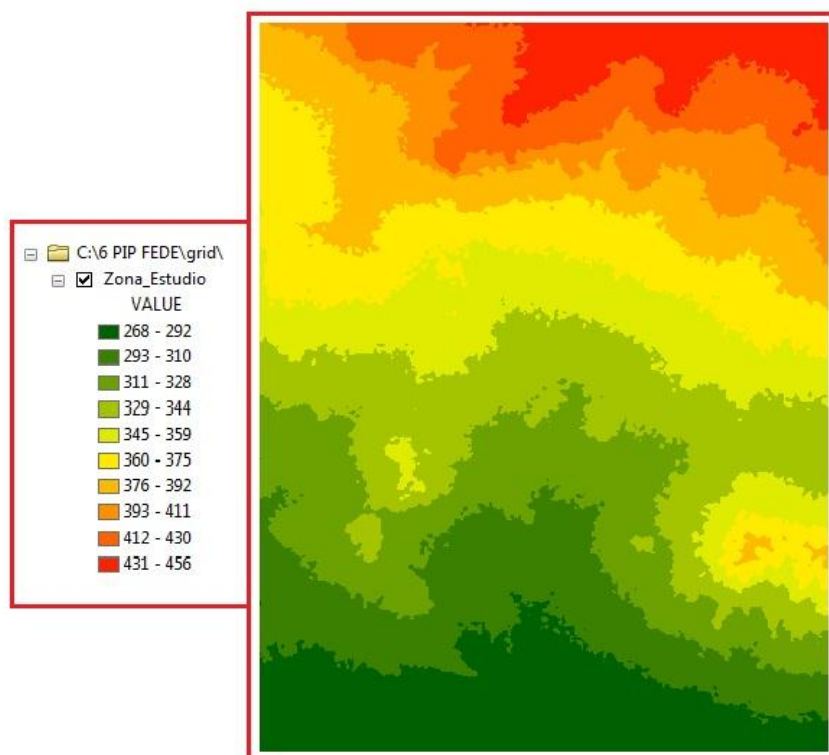


Figura 3-2. Vista Zona de Estudio – Altitudes s.n.m.

El siguiente paso, se basará en activar la caja de herramientas “ArcToolBox”, y comenzar a utilizar la extensión “Spatial Analyst Tools”, la cual proporciona un amplio conjunto de herramientas de análisis y modelado espacial, tanto para datos ráster (basados en celda) como de entidades (vector). Es así, que se desarrolla la siguiente secuencia de operaciones.

3.2.1.1 HERRAMIENTA FILL.

La herramienta “Fill” rellena los sumideros en un raster de superficie, o MDT, para eliminar pequeñas imperfecciones en los datos. Un sumidero es una celda con una dirección de drenaje indefinida y las celdas que lo rodean son más bajas. El punto de fluidez es la celda límite con la elevación más baja del área de contribución de un sumidero. Si el sumidero estuviera relleno con agua, éste sería el punto desde donde surgiría el agua.

3.2.1.2 FLOW DIRECTION.

Con la herramienta “Flow Direction”, se determina la dirección de flujo, identificando hacia donde fluye cada celda. Esta herramienta toma una superficie como entrada y proporciona como salida un ráster que muestra la dirección del flujo que sale de cada celda. Si se elige la opción *Ráster* de eliminación de salida, se creará un ráster de salida con un radio del cambio máximo de elevación desde cada celda a lo largo de la dirección de flujo hasta la longitud de la ruta entre los centros de las celdas y se expresa en porcentajes. Si se elige la opción *Forzar* todas las celdas de eje para que se desplacen hacia fuera, todas las celdas en el eje del ráster de superficie se desplazan hacia fuera desde el ráster de superficie.

3.2.1.3 FLOW ACCUMULATION.

Se determina la acumulación del flujo, utilizando la herramienta “Flow Accumulation”, evaluando así, la cantidad de agua que fluye dentro de cada celda desde todas las celdas de pendiente descendente en el ráster de salida. A menos que se indique el ráster de ponderación, se aplicará un peso de 1 a cada celda, y el valor final será el número de celdas que fluyen hacia cada una de ellas.

Posteriormente, se clasifican todas las celdas con flujo acumulado mayor que el umbral definido previamente, como celdas pertenecientes a la red de drenaje, a partir del cual comienza a delimitarse la red. Se fija un umbral de 1000 celdas, es decir, que en las celdas en las que confluyen 1001, se considera que a partir de ellas comienza a delinearse la red de drenaje.

3.2.1.4 ORDEN DE LOS CAUCES EN LA RED DE DRENAJE.

Utilizando la herramienta “Stream order”, determinaremos el orden de las corrientes o cauces de la red de drenaje. Se utilizará el sistema desarrollado por *STRAHLER*, que es un método para alinear las corrientes de agua, basado en la conectividad y jerarquía de los tributarios que contribuyen a la red. Se tiene entonces: corrientes de primer orden, las cuales son las que no tienen afluentes; las de segundo orden se forman al unirse las de primer orden; las de tercer orden se forman al unirse las de segundo y así sucesivamente. Las corrientes de un orden más bajo que ensamblan una corriente de un orden más alto no cambian el orden de la corriente más alta. Así, si una corriente de primer orden ensambla con una corriente de segundo orden, sigue siendo una corriente de segundo orden. No es así hasta que una corriente de segundo orden combina con otra corriente de segundo orden, y se convierte en una corriente de tercer orden.

3.2.1.5 RED DE DRENAJE.

Luego de trabajar el grid (raster) de nuestra zona de estudio, se obtuvo la *Red de Drenaje* en formato shape (vectorial).

En la Figura 3-3 se observa el resultado obtenido para dicha red de drenaje.

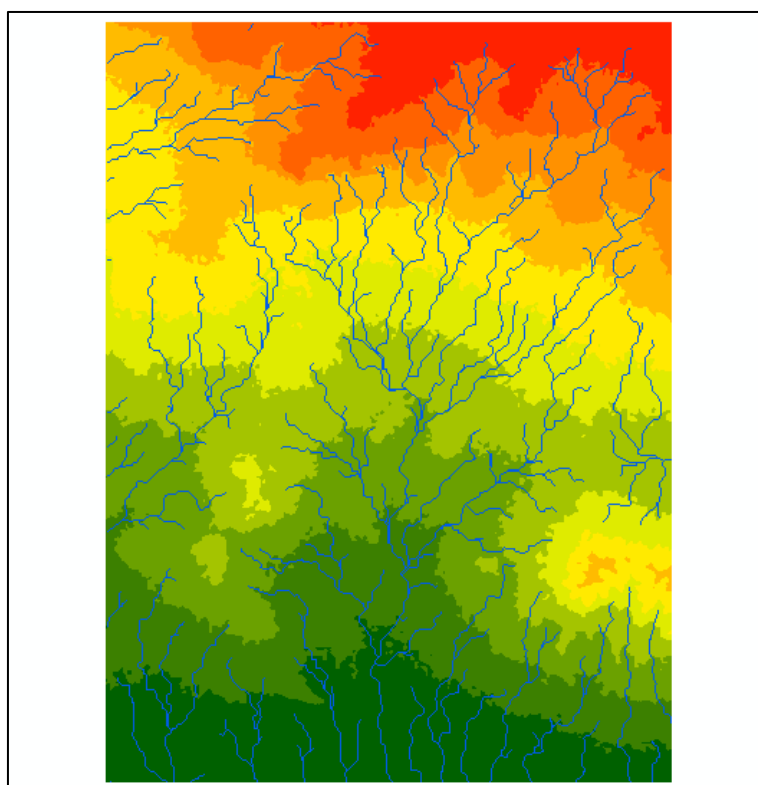


Figura 3-3. Vista general de la Red de Drenaje.

3.2.2 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DE APOORTE EN LA ZONA DE ESTUDIO.

3.2.2.1 PUNTO DE SALIDA.

Para determinar la cuenca hidrográfica de aporte, será necesario especificar un punto de derrame o vertido (Punto de Salida). La actividad posterior consistirá en determinar la zona de drenaje que contribuye a dicho punto.

Se debe crear un archivo shape de puntos. Posteriormente, se editará y se ubicará el punto de salida en el lugar que se elija, en nuestro caso, se colocará en el sector de descarga de la presa de contención aluvional.

3.2.2.2 DETERMINACIÓN DE LA CUENCA (WATERSHED).

Manteniendo activa la caja de herramientas Spatial Analyst Tools, seleccionaremos la opción “Watershed” y, utilizando los datos y resultados calculados anteriormente, obtendremos el grid de nuestra cuenca de aporte. En la Figura 3-4 se observa el resultado.

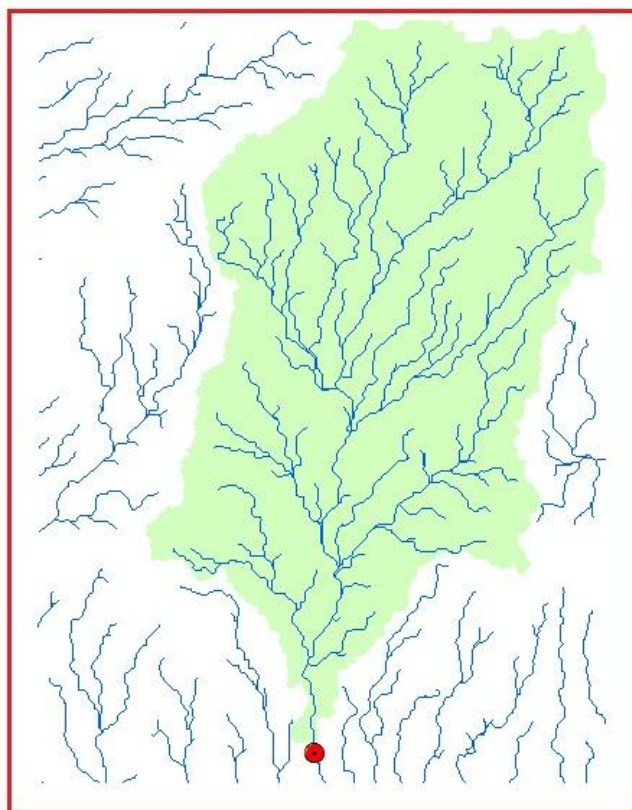


Figura 3-4. Grid – Cuenca de aporte.

Paso siguiente, consistirá en convertir el Grid Cuenca generado, en un Shape de polígonos, y luego, utilizando dicho archivo shape, cortar y extraer el grid Área y el shape Red de Drenaje. Se observa a continuación el resultado obtenido.

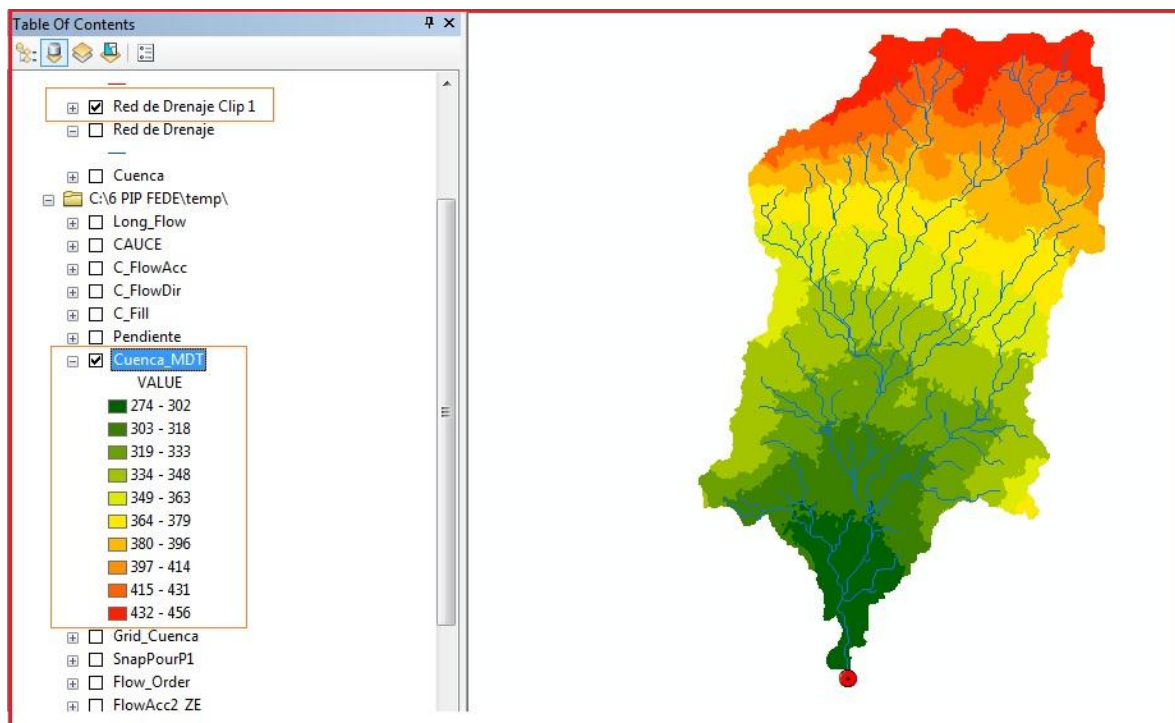


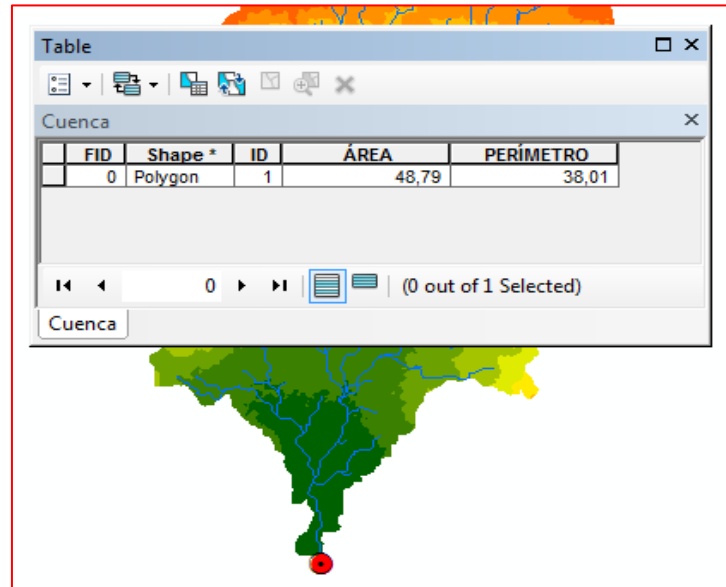
Figura 3-5. Cuenca de aporte – Red de Drenaje y Punto de Salida.

3.2.3 PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS, TOPOGRÁFICOS E HIDRÁULICOS.

3.2.3.1 SUPERFICIE Y PERÍMETRO DE LA CUENCA.

Posicionándonos en el shape Cuenca, desplegamos el menú Open Attribute Table, y luego de ejecutar los procedimientos correspondientes, se obtienen las tablas con los valores de superficie y perímetros de la cuenca, en Km² y Km, respectivamente.

En la Figura 3-6 se observan los valores obtenidos para cada parámetro.



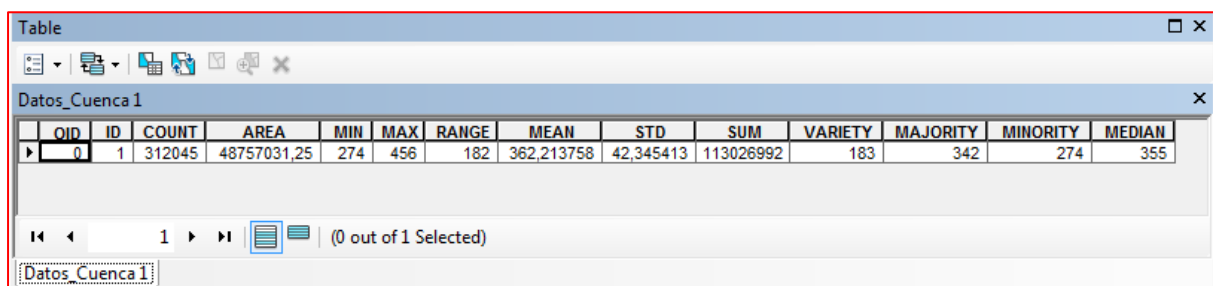
FID	Shape *	ID	ÁREA	PERÍMETRO
0	Polygon	1	48,79	38,01

Figura 3-6. Área y Perímetro de la cuenca.

3.2.3.2 PARAMETROS Y ESTADÍSTICOS.

Desde ArcToolBox, habilitamos la caja Spatial Analyst Tools, optamos por la herramienta *Zonal Statistics as Table*, y luego de cargar los correspondientes datos, se crea una tabla (Datos_Cuenca 1.dbf) que contiene ciertos parámetros y valores estadísticos de la cuenca. Dicha tabla puede ser manipulada mediante Excel.

Como se observa en la Figura 3-7, la tabla contiene valores de Área (m²), alturas mínimas, máximas y media (m), rango entre alturas extremas (m), desvío estándar, mediana, entre otros.



OID	ID	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	VARIETY	MAJORITY	MINORITY	MEDIAN
0	1	312045	48757031,25	274	456	182	362,213758	42,345413	113026992	183	342	274	355

Figura 3-7. Vista de la tabla Datos_Cuenca. (Parámetros y Estadísticos)

3.2.3.3 MAPA DE PENDIENTES.

Desde ArcToolBox, habilitamos la caja Spatial Analyst Tools, optamos por la herramienta *Slope*, y una vez completados todas las casillas y datos requeridos, se obtiene el mapa de pendientes, como se observa en la Figura 3-8.

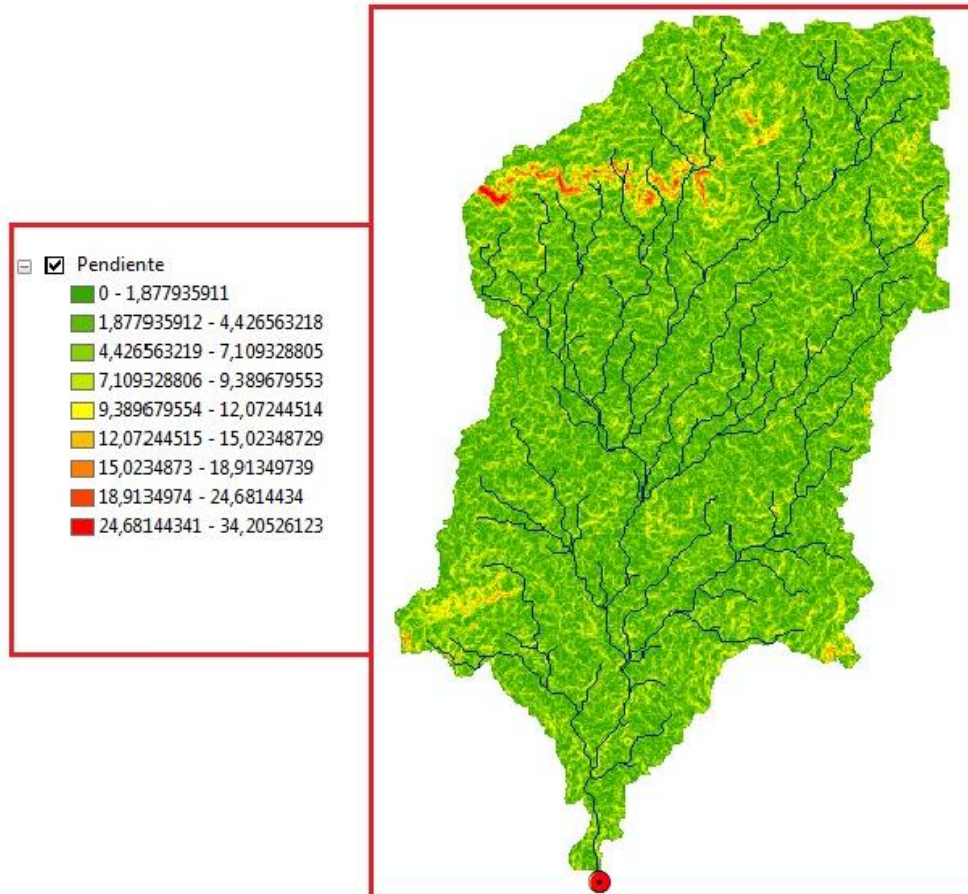


Figura 3-8. Mapa de Pendientes.

3.2.3.4 DETERMINACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL.

Para determinar el Cauce Principal, es preciso contar con los grids de dirección de flujo (FlowDir) y flujo acumulado (FlowAcc) de la cuenca de aporte obtenida previamente.

Para la determinación del Cauce Principal hay que establecer previamente un Punto de Inicio o fuente, y desde éste se realiza el análisis hacia aguas abajo, hasta el punto de salida de la cuenca. El punto de origen o inicio, se efectúa con el mismo procedimiento que se realizó para establecer el punto de derrame o vertido (Punto_Salida.shp)

Establecido el punto de origen (inicio), se realiza el procedimiento que se detalla a continuación. Desde ArcToolBox, habilitamos la caja Spatial Analyst Tools, Distance, y optamos por la herramienta *Cost Path*, y, una vez completados todas las casillas y datos requeridos, se obtiene un raster de Cauce Principal.

Posteriormente, se deberá convertir el raster Cauce Principal a un shape de polilíneas. Se obtiene un resultado como se observa en la Figura 3-9.

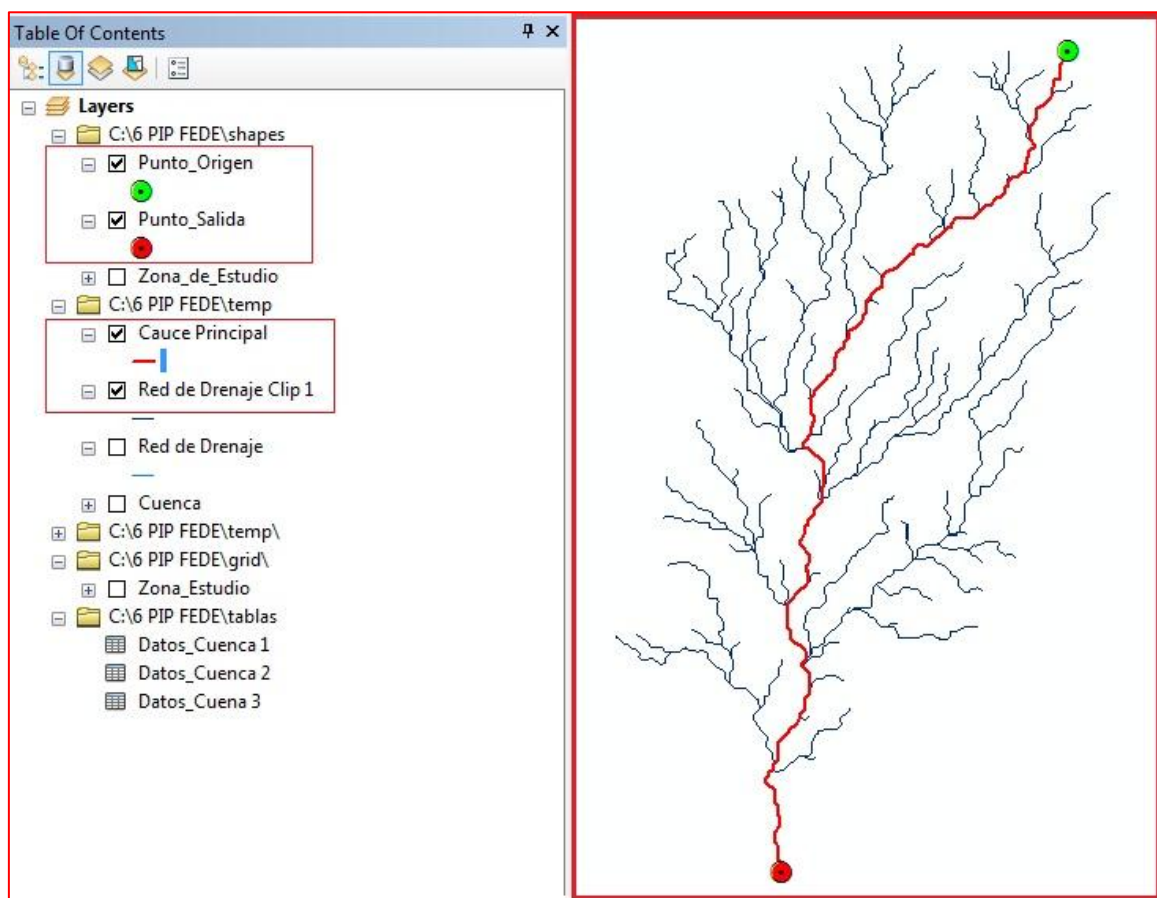


Figura 3-9. Determinación del Cauce Principal.

3.3 MODELACIÓN HIDROLÓGICA (HEC –HMS)

Teniendo en cuenta los datos morfométricos, red hidrológica generada, cauce principal y el índice de curva número de la cuenca de aporte al dique de contención aluvional, se generó el sistema hídrico, lo cual nos permitió armar un esquema del sistema de protección aluvional con todos sus elementos.

Con la serie de datos mencionados del sistema, se procede a cargar y operar con el software HEC-HMS, obteniendo como resultado el modelo de cuenca que se observa en la Figura 3-10.

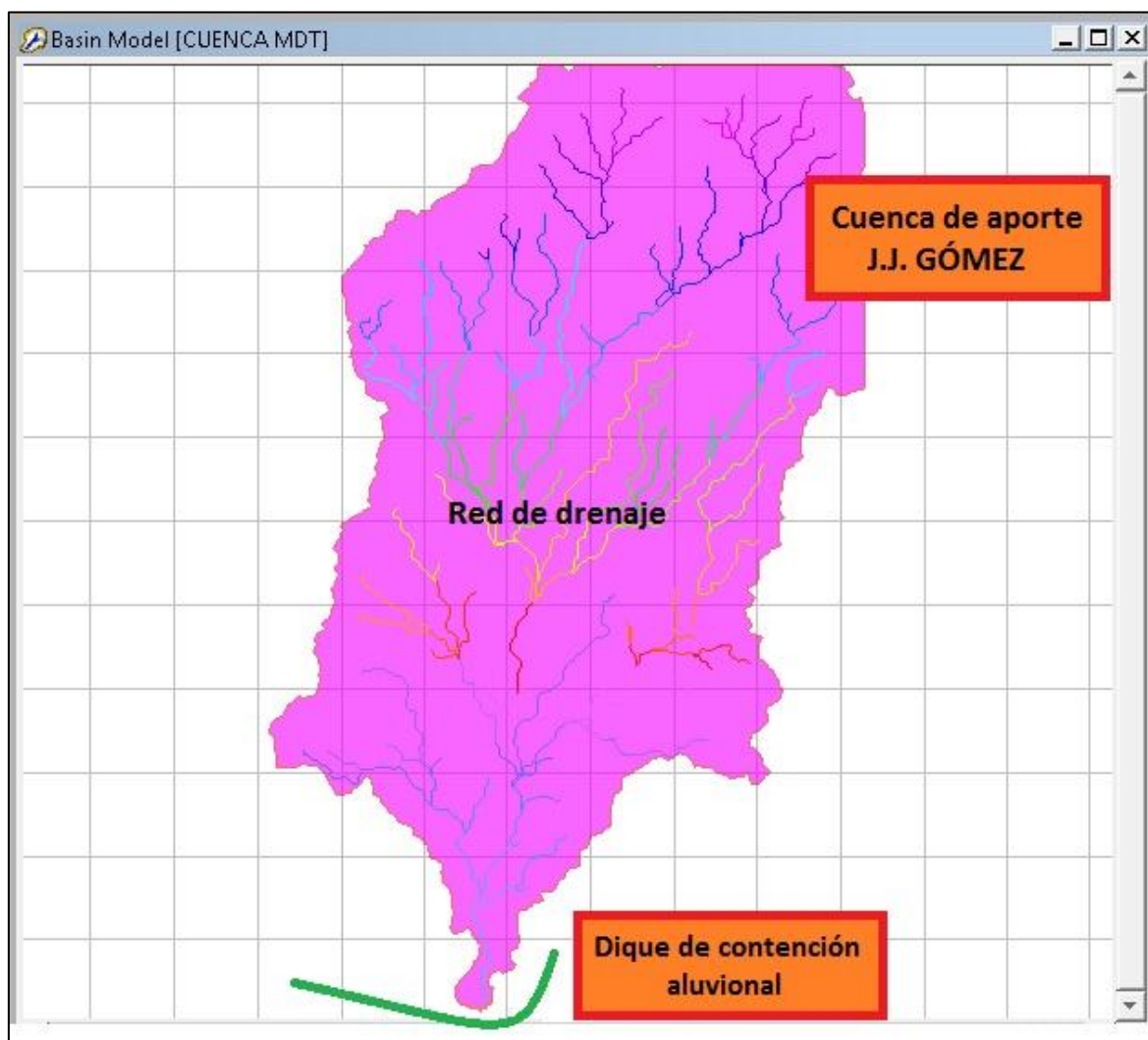


Figura 3-10. Esquema Sistema de Protección Aluvional.

La modelación del sistema consta de tres partes básicas: modelo de cuenca, tormenta de diseño y modelo meteorológico.

3.3.1 MODELO DE CUENCA – CONSIDERACIONES.

Los componentes del modelo de cuenca son: Cuenca J.J Gomez (o cuenca de aporte), dique de contención aluvional, descargadores de fondo y estructuras de salida.

3.3.1.1 INDICE DE CURVA NÚMERO (MÉTODO CN).

Para el cálculo de las pérdidas generales del sistema, se consideró el modelo empírico desarrollado en el apartado 2.4.3. Básicamente, se utilizó el modelo Soil Conservation Service (Método de la CN), sin tener en cuenta el flujo de base o subterráneo, ya que interesa conocer el flujo superficial, el cual aporta el mayor volumen de escorrentía. Para el método de transformación se eligió el Hidrograma Sintético de Snyder (1938).

Para la obtención del número de curva (CN), se trabajó con lo expuesto en el apartado mencionado anteriormente, se realizaron los cálculos con los valores de las Tablas 1,2 y 3, en el Anexo 1, y, se tomaron como referencia, valores de CN obtenidos del trabajo “La problemática aluvional en el Alto Valle del Río Negro” (Marizza, Marta S; Rapacioli, Raúl; Vives, Luis; enero-marzo, 2010)

Dada las dimensiones de la cuenca de aporte, se optó por unificar valores y elegir el CN más conservador, resultando un valor de: **CN= 77**.

3.3.1.2 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (TC) Y RETARDO (TL)

Se estimó el Tiempo de Retardo (T_L) con base en el Tiempo de Concentración (T_c) según las Ecuaciones 16, 17 y 18, respectivamente. Obteniendo los siguientes valores, que se observan a continuación.

Tiempo de Concentración (T_c) RESULTADOS	
Ecuación	t_c (hs)
*Ec. de Kirpich	0,05248828
*Ec. de Témez	4,10653458
*Ec. Cuerpo Ing. EEUU	2,69662438
PROMEDIO T_c (hs)	3,40157948

Tabla 4. Tiempo de Concentración (T_c).

Tiempo de Retardo (T_L)	
T	TL (hs)= 2,04094769
$L = 0,6 * T_c$	TL (min)= 122,46

Tabla 5. Tiempo de Retardo (T_L).

En la Tabla 6, la cual se observa a continuación, se muestran datos generales obtenidos de la cuenca de aporte, para la modelización del sistema de protección aluvional.

DATOS GENERALES CUENCA	
Área Cuenca (km ²)	48,79
Perímetro Cuenca (Km)	38
Long. Cauce Princ. (Km)	14,15
Pendiente Max. (m/m)	34,2
Pendiente Media. (m/m)	0,0419
Altura Max. (m)	456
Altura Min. (m)	274
$\Delta h.$ (m)	182
Método de pérdida.	SCS Curva Número
Método de transformación.	Snyder Unit Hidrograma
Flujo Base.	Sin flujo
Curva Número (CN).	77
Tiempo de Retardo. (hs)	2,04

Tabla 6. Datos generales de la cuenca de aporte.

3.3.2 MODELO DE DIQUE DE CONTENCIÓN ALUVIONAL – CONSIDERACIONES.

La presa/ dique de contención consiste en un terraplén ejecutado con materiales sueltos, de aproximadamente 2600 metros de longitud, medidos en la totalidad de su coronamiento, y una altura máxima aproximada de 16 metros. (Ver Imagen 1 – Anexo 2)

El talud aguas arriba tiene pendiente 1:5, desde la base o nacimiento, hasta una determinada cota, donde luego se observa un quiebre y continúa con una pendiente de 1:3 hasta llegar al coronamiento. Esta ladera de la contención está revestida con enrocado de espesor 0,40 metros, sobre un filtro de grava de aproximadamente 0,20 metros. El paramento de aguas abajo, contiene dos bermas de aproximadamente 3 metros de ancho cada una y tiene una pendiente general igual a 1:3. En el mismo, se observa gran presencia de vegetación zonal que lo cubre hasta determinadas alturas. (Ver Imagen 2 y 3 – Anexo 2)

El coronamiento está conformado por una calzada de 5 metros de ancho y en ambos bordes se observa la presencia de pretiles de hormigón premoldeados de 0,60 metros de altura, distanciados entre sí a 3 metros. (Ver Imagen 4 – Anexo 2)

La presa contiene dos descargadores de fondo, llamaremos torre N°1, a la torre ubicada del lado izquierdo de la presa, y torre N° 2, la que se ubica sobre el sector derecho. Los descargadores se conforman de dos torres de hormigón circulares, de 2.25 metros de diámetro y una altura aproximada de 5 metros (5 aros de Hº premoldeados de 1 metro cada uno), con aberturas laterales en forma de ventanas sobre el perímetro de la estructura. Pueden observarse los restos de una protección metálica consistente en una estructura tubular a modo de rejas, cuya finalidad estaría vinculada a impedir el ingreso de vegetación al conducto de desagüe que atraviesa la presa, evitando obstrucciones del mismo. Los tubos metálicos de la estructura de protección han sido removidos, doblados y dañados en casi su totalidad. (Ver Imágenes 5, 6, 7, 8, 9 y 10 – Anexo 2)

Se observa el depósito de sedimentos y vegetación que se interpone con el ingreso de agua a la estructura de los descargadores de fondo, pudiendo traer complicaciones y obstrucciones que impidan o disminuyan el escurrimiento del agua.

El agua, una vez captada en el embalse por los descargadores/ desagües de fondo, es conducida, a través de los conductos de sección circular que atraviesan la presa, hasta una estructura de Hº Aº, cuya finalidad principal es disipar la energía alcanzada y, laminar y conducir el agua, a través de canales abiertos de sección trapecial. Ver Figura 3-11.

(Ver Imagen 11, 12, 13 y 14 – Anexo 2)

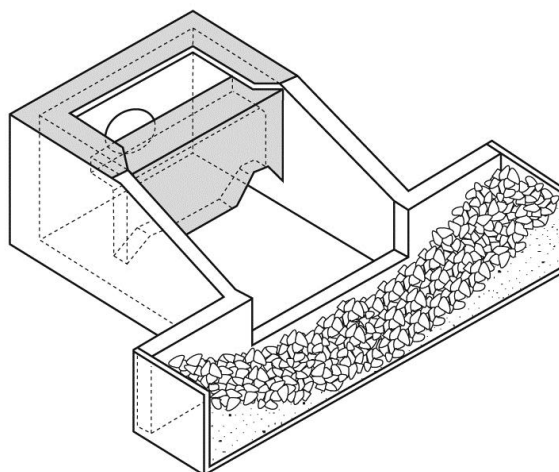


Figura 3-11. Esquema general del dissipador de energía a la salida de la presa. Fuente: (Peterka, 1984)

En la tabla que se observa a continuación, se detalla un resumen de datos generales representativos de dique de contención aluvional y sus elementos de descarga correspondientes.

Dique de Contención Aluvional – J.J. Gómez	
Tipo de Dique.	Materiales Suelos
Forma, esquema transversal.	Planta curva – Forma trapecial
Longitud de coronamiento.	2600 metros. (2,6 km)
Área de la Cuenca de aporte.	48,79 Km ²
Cota de Coronamiento.	292,00
Altura Máxima sobre el Lecho.	18 Mts
Cota Máxima Normal.	287,00
Volumen Embalsado a Cota de Coronamiento.	9,9 Hm ³
Toma Circular (Diámetro).	225 Cm (2,25 mts)
Capacidad de descargadores	26 M ³ /S

Tabla 7. Datos Generales Dique de Contención Aluvional.

3.3.2.1 CURVA ALTURA-VOLÚMEN.

Para la correcta simulación de los niveles de embalse en la presa de contención, fue necesario estimar la curva Altura-Volumen de la misma. En nuestro caso, fue proporcionada por el Ing. Losano Fernando.

COTA (m.s.n.m)	VOLUMEN (Hm3)
274,00	0,0000
275,00	0,0143
276,00	0,0213
277,00	0,0482
278,00	0,0851
279,00	0,1219
280,00	0,2891
281,00	0,4676
282,00	0,7411
283,00	1,0729
284,00	1,4735
285,00	1,9989
286,00	2,6465
287,00	3,3724
288,00	4,1667
289,00	5,2218
290,00	6,4823
291,00	7,9952
292,00	9,9524

Tabla 8. Altura-Volumen – Presa de contención aluvional.

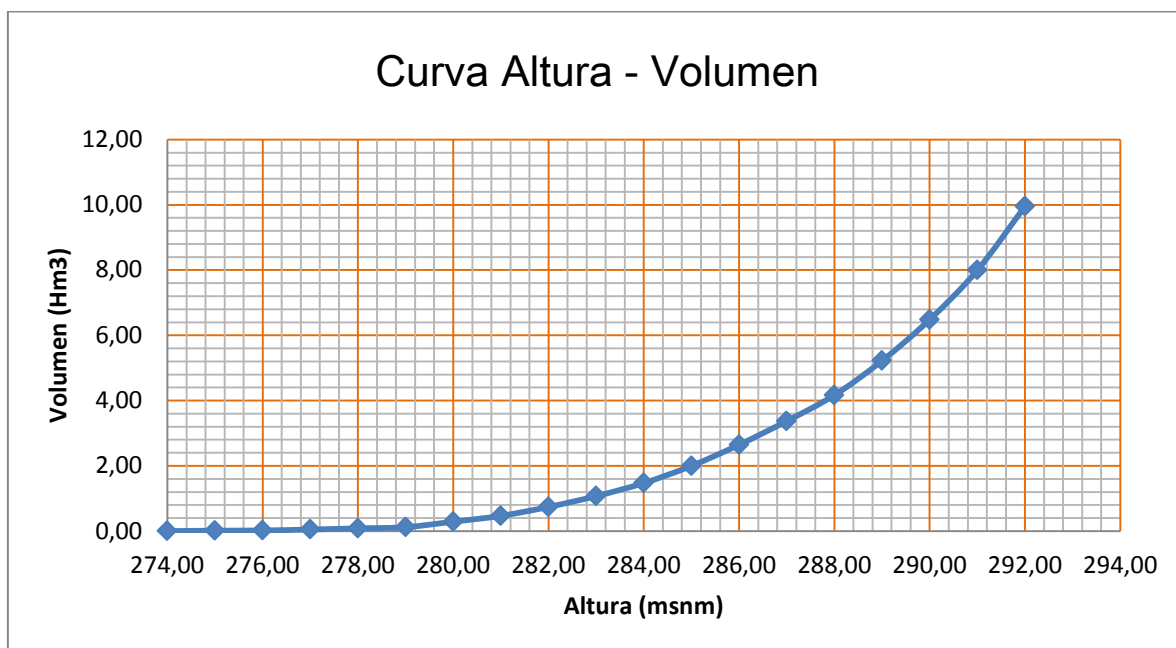


Figura 3-12. Gráfico Curva Altura- Volumen

3.3.3 TORMENTA DE DISEÑO.

3.3.3.1 RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

Se recopilan datos de Precipitaciones Diarias (Pd) registradas por una estación meteorológica en la zona de estudio o cercana a ella. En nuestro caso, se obtuvo un registro de precipitaciones de la estación Pluviométrica de General Roca, entre los años 2000 y 2016.

Posteriormente, se reordenaron los datos registrados en orden decreciente, y, se trabajó con series de duraciones “parciales”, tomando un umbral de 15 mm para las “Pd”. Una serie de duración completa está compuesta por toda la información disponible, mientras que una serie de duración parcial es una serie de datos seleccionados de tal manera que su magnitud es mayor que un valor base predefinido.

3.3.3.2 AJUSTE DE DATOS.

Para analizar el comportamiento de los datos obtenidos, la serie de datos resultante se ajusta a una frecuencia de distribución experimental, asignando así, un valor de probabilidad a cada dato. Dicho valor está en función de su posición dentro de la tabla de datos reordenada, donde la mayor probabilidad de ocurrencia se le asigna al menor valor hallado, y la menor probabilidad al valor máximo de los datos. Este procedimiento comúnmente se denomina “posición de graficación”.

Existe una gran variedad de métodos para la determinación de las posiciones de graficación, en su mayoría, métodos empíricos. Nuestro tratamiento, se formuló con la Ecuación 25, que especifica la probabilidad de que la precipitación diaria supere un determinado valor:

$$p(X > x) = \frac{2m-1}{2n} \quad (25)$$

Dónde:

X = Variable aleatoria. Corresponde a la precipitación diaria registrada “Pd” (mm).

x = Valor específico de precipitación diaria “Pd”.

m = Índice de orden de la precipitación.

n = Número total de precipitaciones diarias registradas.

Posteriormente, se calculan los parámetros estadísticos de la función de ajuste, como ser el valor medio y la desviación estándar de la precipitación (en mm), y, luego de una serie de cálculos utilizando el factor de frecuencia, se obtienen los datos de Intensidades de Precipitación (mm/h), para distintos tiempos de recurrencia.

En la tabla 9, se observan los resultados obtenidos.

D hs	INTENSIDADES DE PRECIPITACIÓN (mm/hs)						
	TR 2 AÑOS	TR 5 AÑOS	TR 10 AÑOS	TR 25 AÑOS	TR 50 AÑOS	TR 100 AÑOS	TR 500 AÑOS
0,25	13,588	18,744	22,157	26,470	29,669	32,845	40,184
0,5	9,608	13,254	15,667	18,717	20,979	23,225	28,415
0,75	7,845	10,822	12,792	15,282	17,130	18,963	23,201
1	6,794	9,372	11,079	13,235	14,835	16,423	20,092
1,25	6,077	8,382	9,909	11,838	13,269	14,689	17,971
1,5	5,547	7,652	9,046	10,806	12,113	13,409	16,405
1,75	5,136	7,084	8,375	10,005	11,214	12,414	15,188
2	4,804	6,627	7,834	9,359	10,490	11,613	14,207
2,25	4,529	6,248	7,386	8,823	9,890	10,948	13,395
2,5	4,297	5,927	7,007	8,371	9,382	10,387	12,707
2,75	4,097	5,651	6,681	7,981	8,946	9,903	12,116
3	3,923	5,411	6,396	7,641	8,565	9,482	11,600
3,25	3,769	5,199	6,145	7,341	8,229	9,110	11,145
3,5	3,632	5,009	5,922	7,074	7,930	8,778	10,740
3,75	3,513	4,846	5,729	6,844	7,671	8,492	10,389
4	3,397	4,686	5,539	6,617	7,417	8,211	10,046

Tabla 9. Datos Intensidades de Precipitación.

Se procede a elaborar las curvas IDF, resultando la siguiente gráfica.

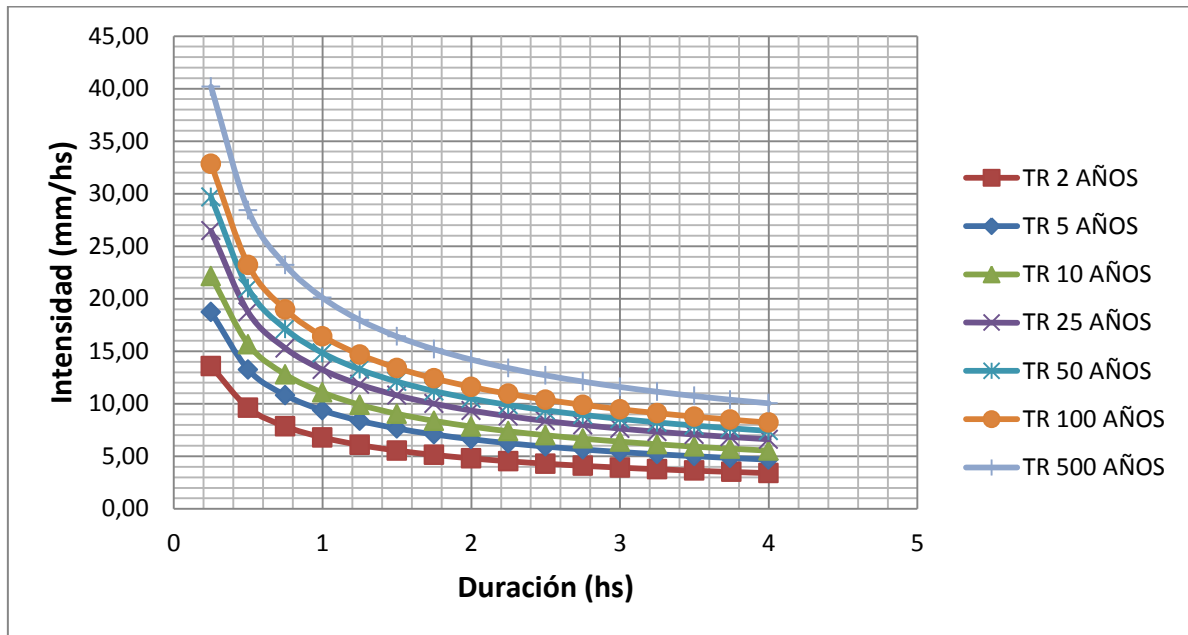


Figura 3-13. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia.

3.4 SIMULACIÓN DEL MODELO MEDIANTE HEC –HMS

3.4.1 PROCESO DE SIMULACIÓN

Para simular y analizar el sistema hidrológico, fue necesario completar cada uno de los pasos fundamentales mencionados en el apartado 2.11.1. Es así, que se definió un modelo de cuenca, importando archivos en formato “shape”, generados mediante el uso del software ArcGis, donde se especifica la delimitación de la cuenca de aporte, como así también, la red de drenaje interna perteneciente a la misma. Se cargaron todos los datos morfométricos, las características físicas e hidráulicas representativas de la cuenca de aporte. Se especificaron datos de control, es aquí que resulta necesario definir el tiempo de simulación (control de especificaciones), el que diferirá del tiempo de duración de la tormenta de diseño, ya que debe dar lugar a obtener el caudal máximo durante el tiempo de concentración de la cuenca. El control de especificaciones se realizó en un período de 10 horas y con intervalos de tiempo de 5 minutos incrementales de lluvia para el cálculo del hidrograma de escurrimiento.

Posteriormente, se ejecutó y relacionó un modelo meteorológico para los datos cargados con anterioridad, y así, se comienza a realizar el proceso de simulaciones y corridas para cada tiempo de recurrencia.

En la figura que se observa a continuación, se establecen los elementos gráficos de la cuenca, el punto de análisis, en nuestro caso, el cierre de la contención aluvional, sector donde se encuentran los descargadores de fondo, y se cargan datos de entrada necesarios para dar inicio al modelado hidrológico.

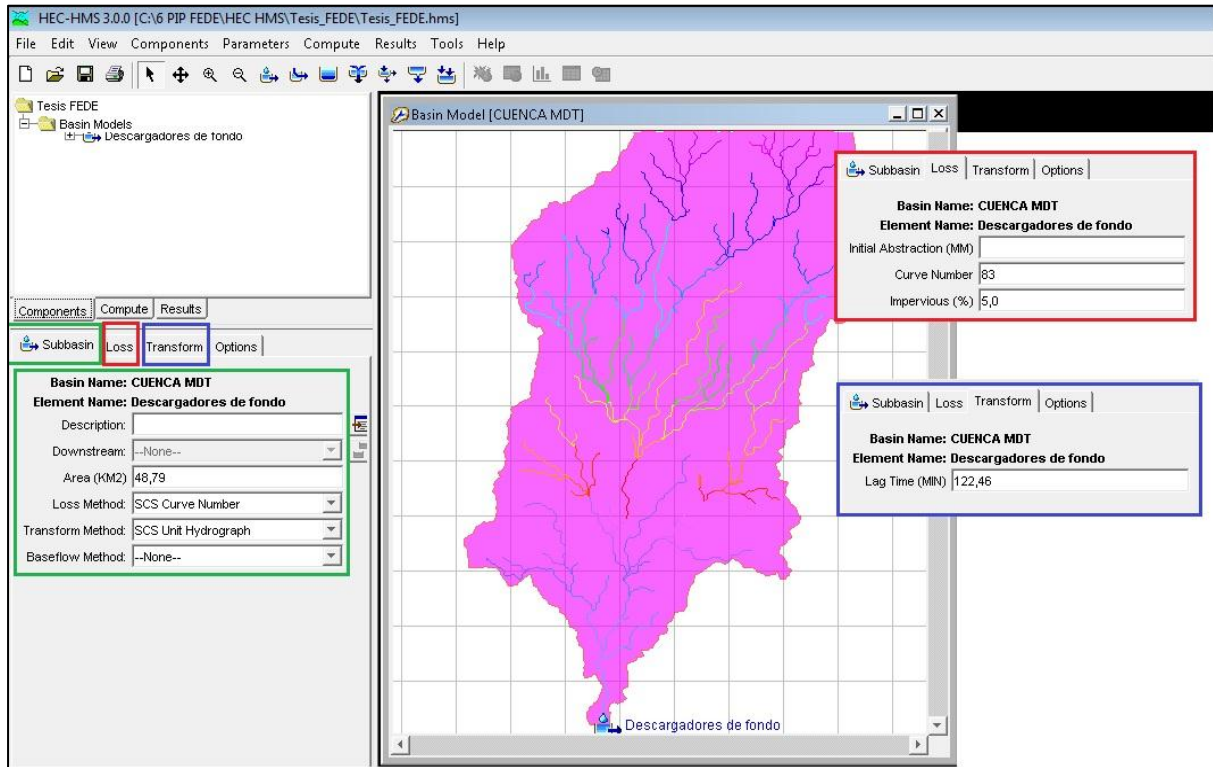


Figura 3-14. Manejo del modelo de Cuenca (Basin Model Manager) generado en HEC-HMS.

El próximo paso, consiste en la creación del modelo meteorológico, para ello asistiremos al componente “Times-Series Data Manager”, dentro del cual optaremos por crear datos tipo “medidas de precipitación”. Una vez allí, incluiremos los datos de nuestras tormentas de diseño, como ser intervalos de tiempos de las mediciones, fecha y hora de inicio y finalización de la tormenta, y se cargarán los datos de los hietogramas acumulados para los diferentes tiempos de recurrencia, en nuestro caso tendremos siete estaciones, para los diferentes TR, a saber: 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Luego, se escoge del menú componentes, la opción “Meteorologic Model Manager”, donde crearemos siete modelos diferentes (uno por cada tiempo de recurrencia), especificando el hietograma correspondiente para cada calor. Es así, que tenemos un “Met 1”, correspondiente al Hietograma para TR: 2 años, un “Met 2”, correspondiente al Hietograma para TR: 5 años; y así, hasta completar la recurrencia de 500 años.

Para finalizar y poder concluir con las simulaciones correspondientes, se deberá definir un control de especificaciones, dentro del menú “Control Specification Manager”, podremos definir el intervalo de tiempo de análisis en el cual queremos nuestro hidrograma, como así también la fecha y hora de finalización, en nuestro caso, optamos por la misma fecha y hora de inicio de la tormenta, pero extenderemos el horario de finalización, ya que en reiteradas ocasiones, la escorrentía continua su curso una vez finalizada la tormenta.

En la Figura 3-15, observamos los datos cargados para el control de especificaciones, “Control 1”, en el cual prolongamos el tiempo de finalización de análisis, fijando un horario total de 12 horas. (Inicio: 08-Abril-2014, 08:00 hs; Finalización: 08-Abril-2014, 20:00 hs)

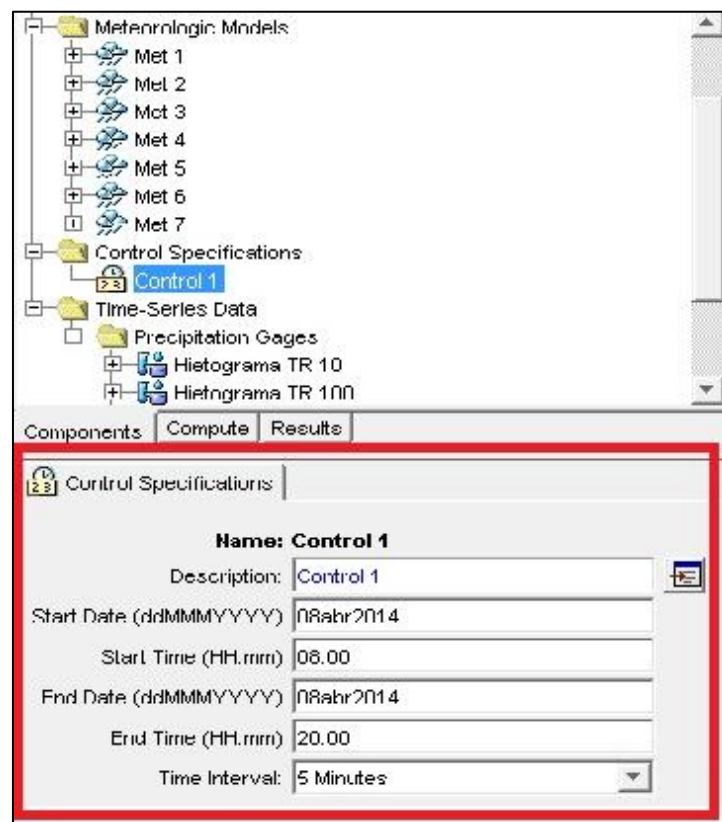


Figura 3-15. Control de especificaciones.

La creación de las corridas o simulaciones, las iniciamos desde el menú “Compute”, optando por el comando “Create Simulation Run”, y realizando los pasos que se observan a continuación.

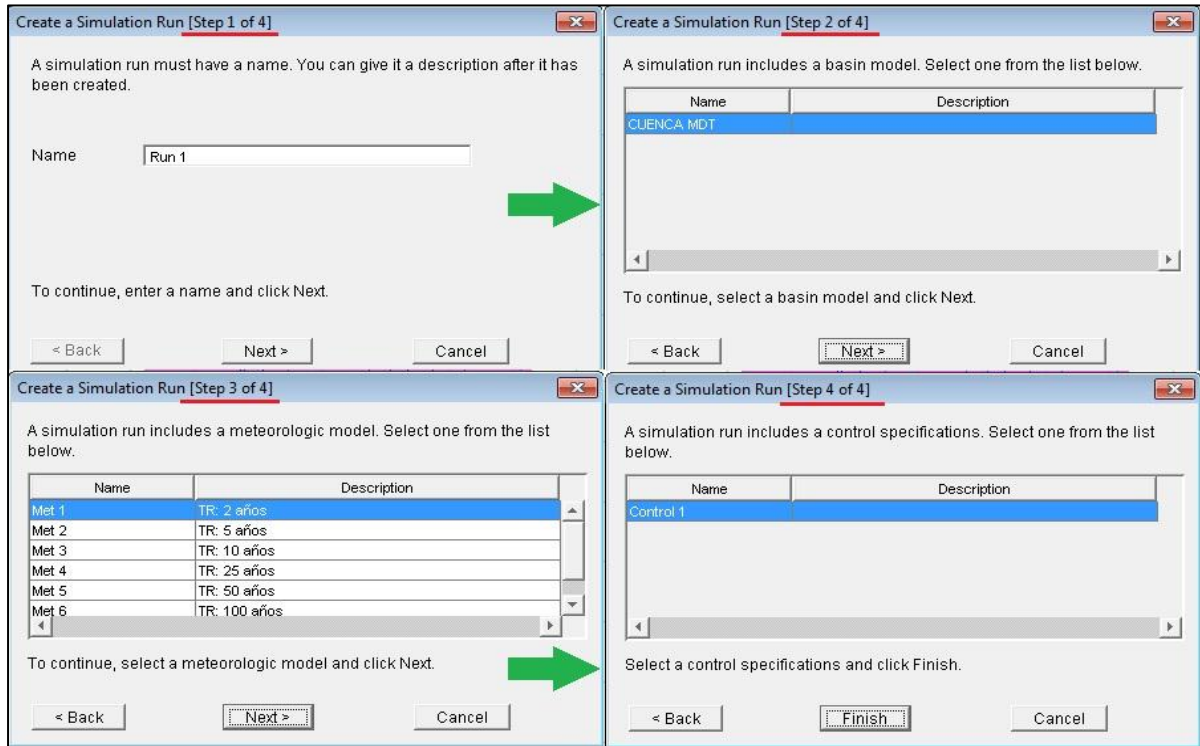


Figura 3-16. Pasos a seguir en la creación de simulaciones.

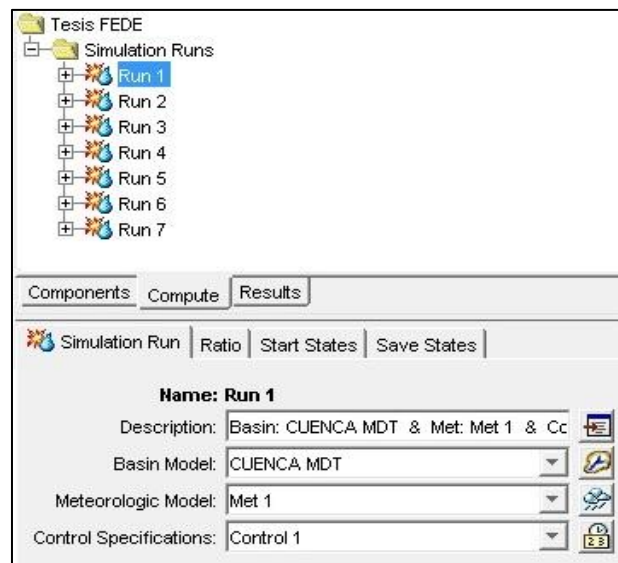


Figura 3-17. Simulaciones correspondientes a cada recurrencia.

Finalizando el proceso, continuamos con la simulación de cada recurrencia, desde el menú “Compute”, nos posicionamos en el comando “Select Run”, donde seleccionaremos cada corrida (Run 1, Run 2, etc.) y posteriormente, daremos inicio mediante el comando “Compute Run”. Estos pasos se reiterarán para cada tiempo de recurrencia.

3.4.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En la siguiente tabla, se observan los resultados de la simulación, para los distintos tiempos de recurrencia. Se describen valores de caudal máximo de descarga en el punto de análisis y volumen de agua almacenado.

Cuenca J.J. Gómez		
TR (años)	Qmáx (m ³ /s)	Vol. (Hm ³)
2	122,23	1,18
5	203,03	3,03
10	259,51	3,91
25	333,00	5,08
50	388,60	5,97
100	444,51	6,86
500	575,62	8,97

Tabla 10. Resumen resultados obtenidos.

TIEMPO RECURRENCIA: 500 AÑOS.

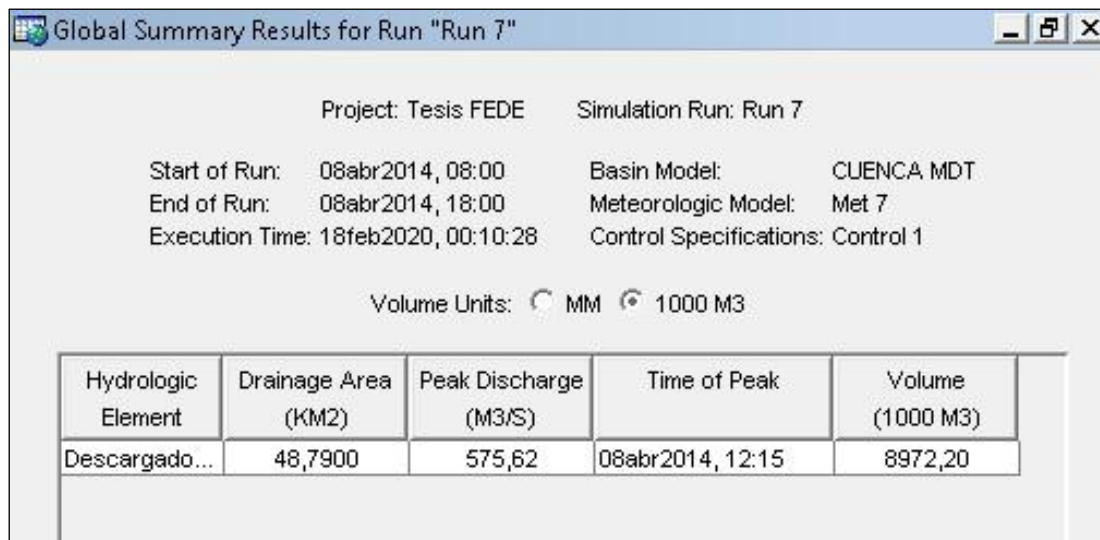


Figura 3-18. Resultados obtenidos – TR: 500 años.

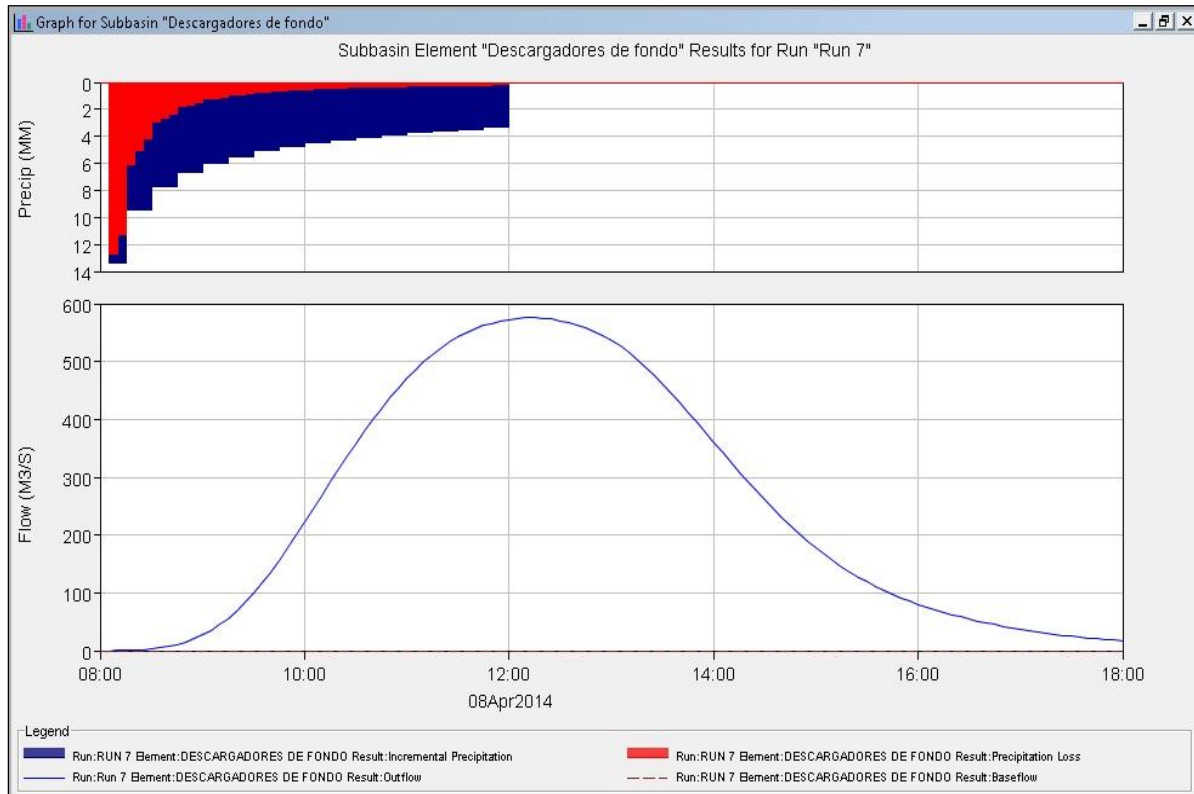


Figura 3-19. Hidrograma crecida – TR: 500 años.

En el hidrograma que se observa en la Figura 3-19, podemos observar que las precipitaciones se han producido entre las 8:00 hs am. y las 12:00 hs, solicitando al software que realice el cálculo final hasta las 18:00 hs pm., teniendo en cuenta diversas características del tipo suelo y cobertura vegetal, las cuales influyen de manera directa en una persistencia de la escorrentía, una vez finalizada la tormenta.

Se observa del gráfico, un pico máximo que indica el caudal de descarga en el punto de análisis. El mismo se produce a las 12:15 hs, con una magnitud de 575,82 m³/s.

En el Anexo 3, se observan los resultados obtenidos luego de la simulación con Hec-HMS, detallando en tablas características, valores de importancia y referentes a cada simulación, a saber: fecha y horario de inicio y finalización de las corridas, área de la cuenca, caudal máximo o pico, volumen almacenado, tiempo en el que se desarrolla el caudal pico.



Se adjuntan además, gráficos con los hidrogramas de crecidas para las recurrencias restantes, y, en la parte superior de los mismos, esquemas con los correspondientes hietogramas de precipitación, los cuales se encuentran discretizados cada 5 minutos, tiempo mínimo adoptado para realizar las simulaciones. Se indica la precipitación total en color azul, es decir, aquella que se trasforma en caudal sobre la cuenca. Las pérdidas por abstracción inicial e infiltración se muestran en color rojo. La diferencia entre ambas constituye la precipitación neta.

4 CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del PIP se pudo destacar el fuerte potencial y la gran utilidad que poseen los SIG, en cuanto a la construcción de modelos y representaciones del mundo real, a través de base de datos digitales. Se logró integrar mediante el uso de los mismos, un modelo de predicción de lluvias y escorrentías, con la finalidad de estudiar y comprender los procesos aluvionales que acontecen en la zona de análisis, y así, poder obtener conocimientos acerca del funcionamiento de las obras de contención existentes.

El proceso metodológico desarrollado, incluyó la integración total de conocimientos e información necesaria para lograr resultados afines y certeros. Se implementó un Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona de estudio, se delimitó, a través del procesamiento del MDE antes mencionado, la cuenca hídrica de aporte con su respectiva red de drenaje. Se obtuvieron parámetros físicos, morfométricos e hidráulicos representativos y característicos de la zona de estudio. Se trabajaron y analizaron datos físicos, constructivos e hidráulicos de la presa de contención aluvional, elementos y obras de arte que conforman el sistema de protección.

Luego, mediante estadística de datos y la utilización de software apropiado, se generó el modelo de simulación para acontecimientos torrenciales definidos.

Finalizados los procesos de simulación, se lograron obtener resultados para diferentes tiempos de recurrencia. Para desarrollar nuestro análisis y conclusiones finales, se optó por tener en cuenta los datos obtenidos para un tiempo de recurrencia de 500 años (**TR: 500 años**), el cual resulta más apropiado y acorde al diseño de este tipo de obras de contención y protección contra aluviones. Se determinaron los siguientes aspectos:

- El caudal obtenido aguas arriba de la presa ($Q_{\text{entrada}} = 575,62 \text{ m}^3/\text{s}$) supera en poco más del 45% al caudal aguas arriba proporcionado por el Departamento Provincial de Aguas de Rio Negro, DPA, para el mismo tiempo de recurrencia. ($Q_{\text{dato}} = 271,9 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Resulta de importante consideración la reducción entre el caudal de entrada al embalse, y el caudal de salida de la presa. Siendo el caudal de entrada de $575,62 \text{ m}^3/\text{s}$, el embalse trabajará prácticamente lleno, liberando por medio de sus descargadores de fondo el agua almacenada, dichas tomas funcionarán a su capacidad máxima de descarga ($Q_{\text{descarga}} = 52 \text{ m}^3/\text{s}$). Es decir, existe una reducción del caudal de más del 90%, lograda por el embalse, respecto del hidrograma de entrada.

- El volumen de agua almacenada ($V_{\text{almacenado}}$) por el embalse para la recurrencia de 500 años, resulta de 8,97 Hm³. Relacionando este valor de almacenamiento con los datos proporcionados en la curva de altura-volumen, podemos observar, que ante esta capacidad de almacenamiento, el embalse trabaja prácticamente lleno, es decir, hasta su cota de coronamiento. (Valores datos = Coronamiento: 292 msnm; Vol: 9,95 Hm³)

En base a lo expuesto anteriormente, se puede formular una serie de recomendaciones y acciones a ejecutar, con el fin de favorecer al funcionamiento y prolongar la vida útil para estas estructuras de contención, a saber:

- Es recomendable reacondicionar y poner en condiciones óptimas de funcionamiento las protecciones metálicas tubulares en las torres descargadoras de fondo, cuya finalidad está vinculada a impedir el ingreso de vegetación y basura al conducto de desagüe que atraviesa la presa. Obstrucciones en dichos sectores, se ven reflejados directamente en una disminución de la capacidad de descarga de la contención, y por ende, en aumentos en los niveles de agua dentro del embalse, con todos los problemas que ello acarrea.
- Organizar una limpieza periódica en los orificios de las torres de toma, como así también en las estructuras disipadoras de energía a la salida de la presa y en los canales de desagüe, eliminando basura y todo tipo de sedimento allí depositado. Todo ello contribuirá a laminar la descarga del embalse de una forma más segura y suave, aminorando los procesos erosivos.
- Todos los trabajos de extracción de suelos, desarrollo de canteras de materiales, y demás tareas que signifiquen un aumento en la capacidad de almacenamiento del embalse, servirán para aliviar y extender la vida útil de la presa de contención.
- Realizar un seguimiento y verificar el estado de los asentamientos humanos existentes en las zonas aledañas a la presa de contención y sus estructuras complementarias, principalmente, por el alto riesgo al que se encuentran expuestos frente a situaciones de tormentas extremas.
- Otro factor a tener en cuenta con el proceso del desarrollo habitacional, es la quita de cobertura vegetal del suelo, generando superficies impermeables, y el consecuente aumento de la escorrentía superficial, producto de una disminución de infiltración de agua hacia el interior de los suelos. Si bien es un factor que mostrará efectos y cambios a largo plazo, no se debe dejar pasar por alto.

- Diagramar un plan de mantenimiento preventivo, organizando inspecciones en la zona y relevamientos periódicos, focalizando y priorizando los lapsos posteriores a la finalización de eventos extremos. Así, se podrá observar, en general, el comportamiento de todo el sistema de protección, el funcionamiento de las torres de tomas y las estructuras disipadoras de energía, y, el flujo del agua luego de ser embalsada y liberada hacia los canales de transvase.

5 ANEXOS

ANEXO 1

Tabla 1- Valores del índice CN para diferentes tipos de coberturas y usos del suelo. (SCS, 1975)

DESCRIPCION DEL USO DEL SUELO Y CUBIERTA	TIPO HIDROLOGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
Tierra cultivada: sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas.	45	66	77	83
cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios parques, etc.;				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más.	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto entre 50% al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial:				
Tamaño de lote Porcentaje impermeable				
≤ 500 m2 65	77	85	90	92
1000 m2 38	61	75	83	87
1300 m2 30	57	72	81	86
2000 m2 25	54	70	80	85
4000 m2 20	51	68	79	84
Estacionamientos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
ripió	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Tabla 2- Valores del índice CN para áreas aluvionales semiáridas. (INCYTH, 1980)

DESCRIPCION DEL USO DEL SUELO Y CUBIERTA	TIPO HIDROLOGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
- Suelo descubierto	77	86	91	94
- Estepa Arbustiva:				
a) Con menos del 5% de cobertura herbácea				
Cobertura entre el 5 - 20%	72	81	88	91
Cobertura entre el 20 - 30%	70	80	87	90
Cobertura entre el 30 - 40%	68	79	86	89
Cobertura mayor del 40%	51	70	80	84
b) Con más del 5% de cobertura herbácea				
Cobertura entre el 5 - 20%	71	80	87	90
Cobertura entre el 20 - 30%	68	78	85	88
Cobertura entre el 30 - 40%	66	77	84	87
Cobertura mayor del 40%	49	68	78	82
- Estepa halófito	70	80	87	89
- Estepa halófito - higrófito	51	70	80	84

Tabla 3- Grupos hidrológicos de suelos (GHS). (USDA-SCS, 1964)

GHS	Potencial de Escorrentía	Infiltración	Suelos típicos	Texturas
A	Escaso	Alta	Arenas y grava excesivamente drenadas	Arenosa Areno franca Areno limosa
B	Moderado	Moderada	Texturas medias	Franco arenosa. Franca Franco-arcillosa arenosa Franco limosa
C	Medio	Lenta	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo	Franco arcillosa Franco-arcillosa limosa Limosa Arcillo arenosa
D	Elevado	Muy lenta	Suelos de arcillas hinchadas o compactas o suelos poco profundos sobre capas impermeables	Arcillosa Arcillo limosa

ANEXO 2



Imagen 1. Vista general presa de contención aluvional.



Imagen 2. Talud aguas arriba.



Imagen 3. Talud aguas abajo.



Imagen 4. Coronamiento.



Imagen 5. Descargador de fondo, toma izquierda.



Imagen 6. Interior descargador de fondo, toma izquierda.



Imagen 7. Estado de rejas tubulares, toma izquierda.



Imagen 8. Descargador de fondo, toma derecha.



Imagen 9. Ausencia de rejas tubulares, toma derecha.



Imagen 10. Vista superior, toma derecha.



Imagen 11. Disipador de energía, salida derecha.



Imagen 12. Vista general, disipador de energía.



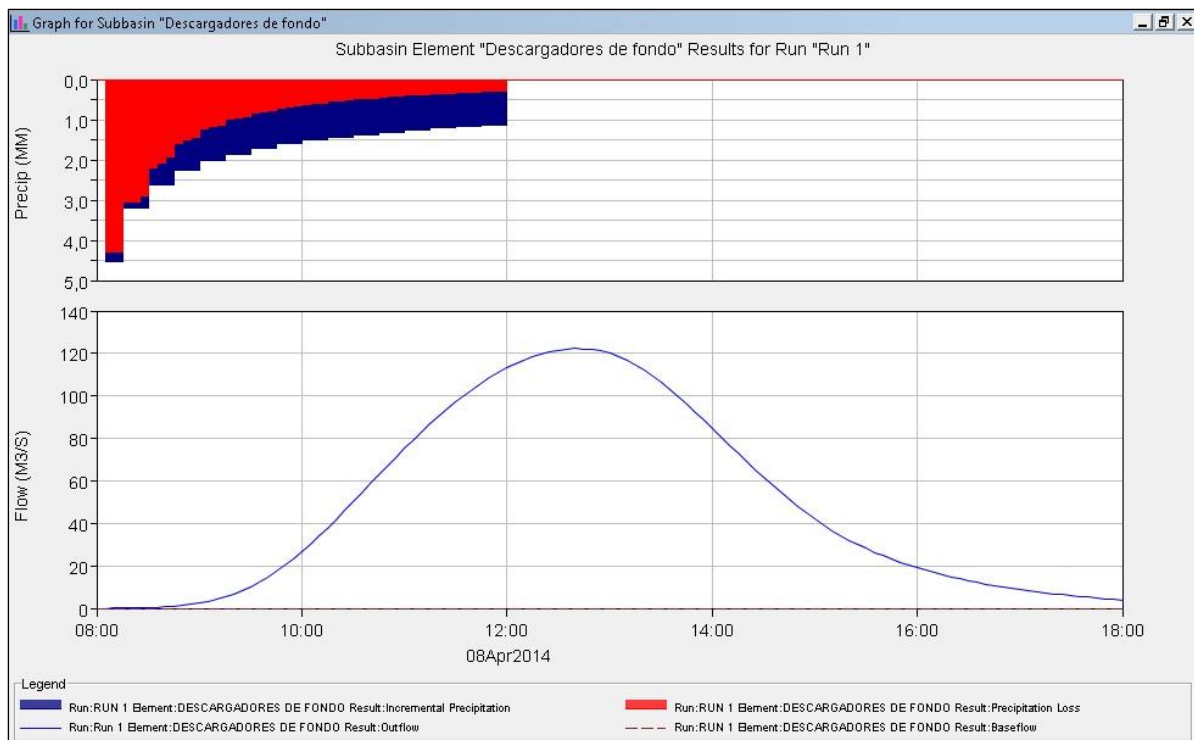
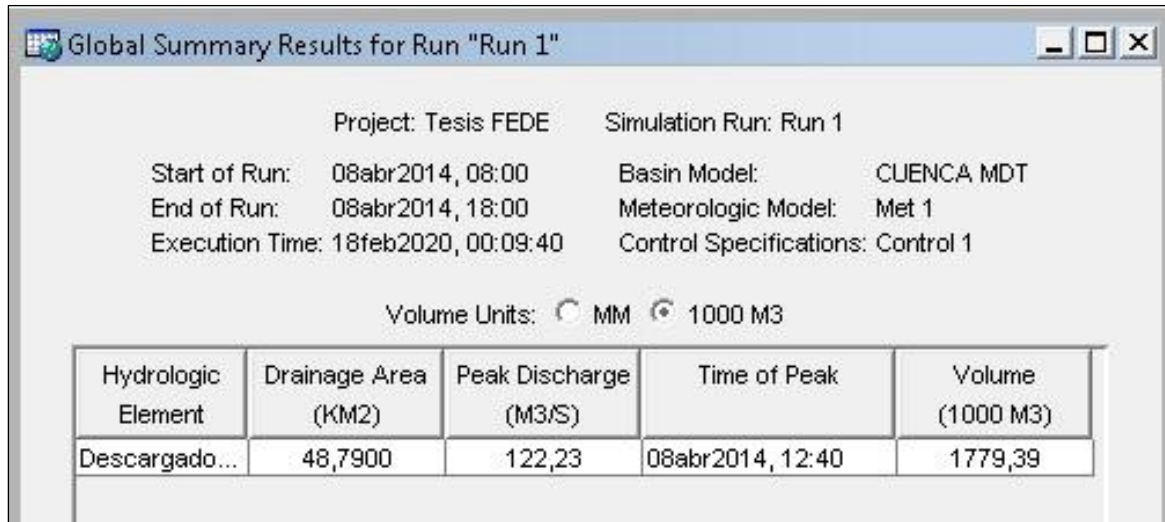
Imagen 13. Disipador de energía, salida izquierda.



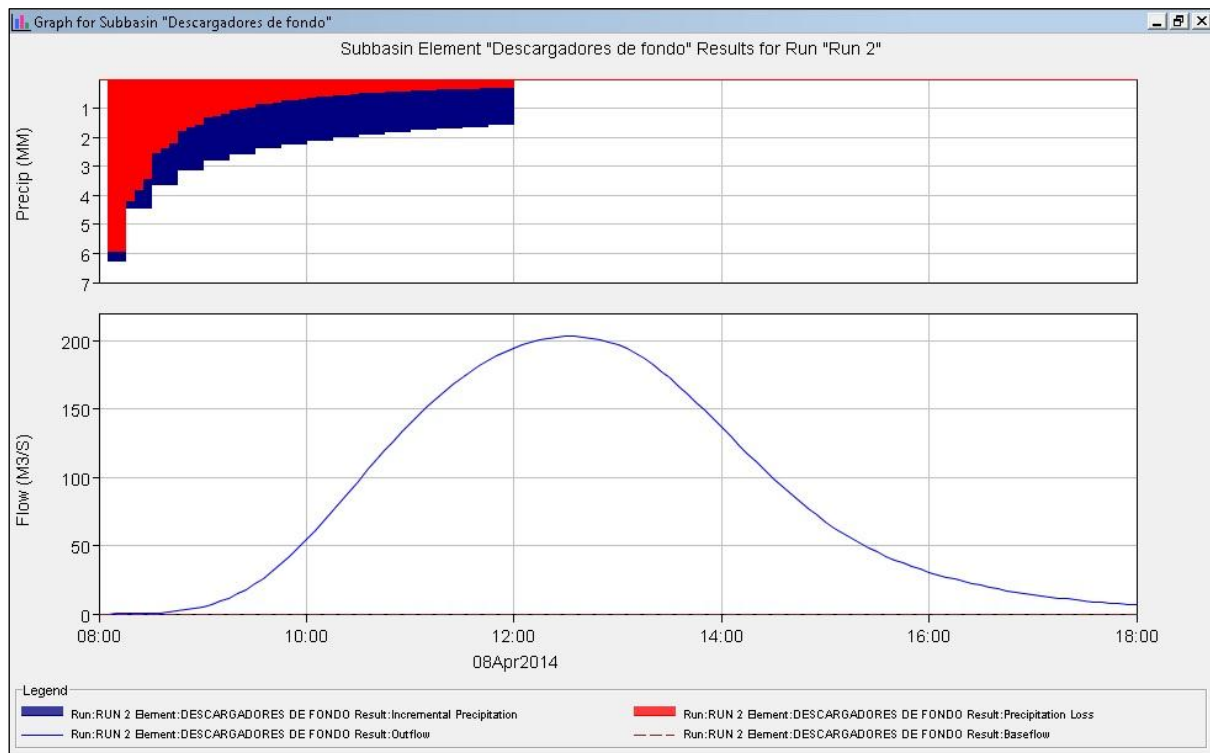
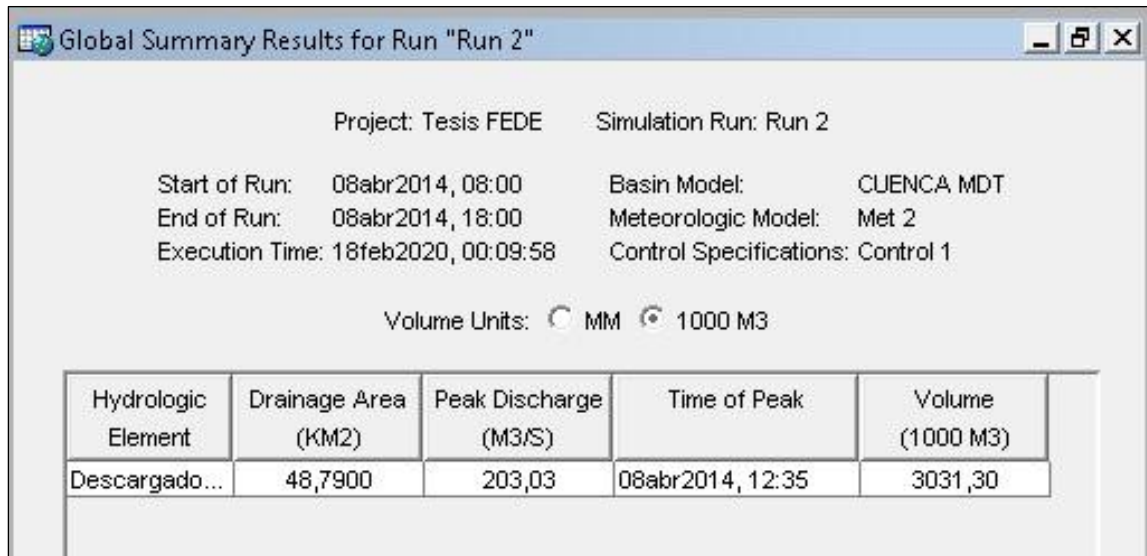
Imagen 14. Orificio de descarga – Salida izquierda.

ANEXO 3

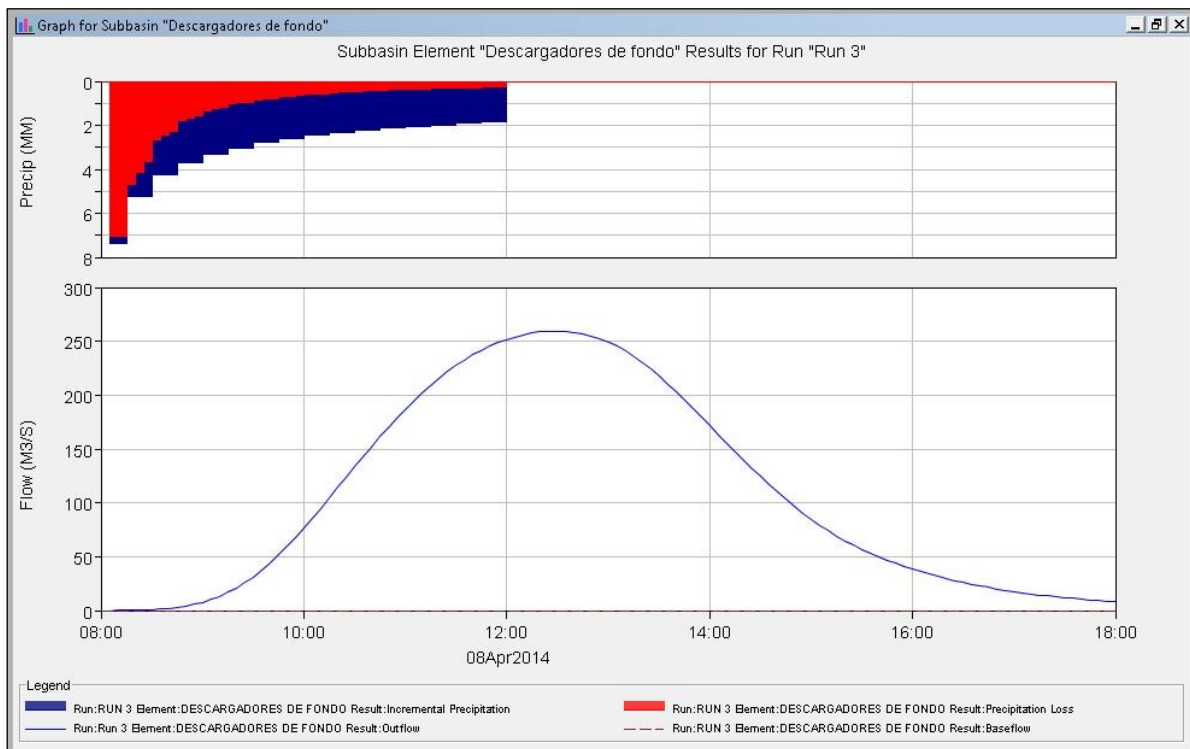
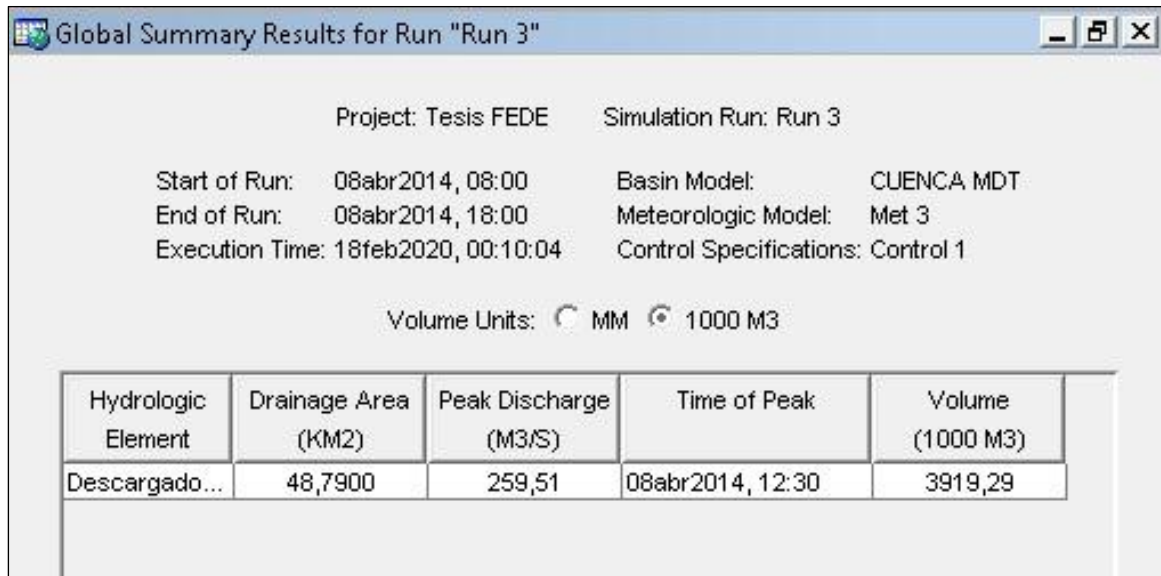
TIEMPO RECURRENCIA: 2 AÑOS.



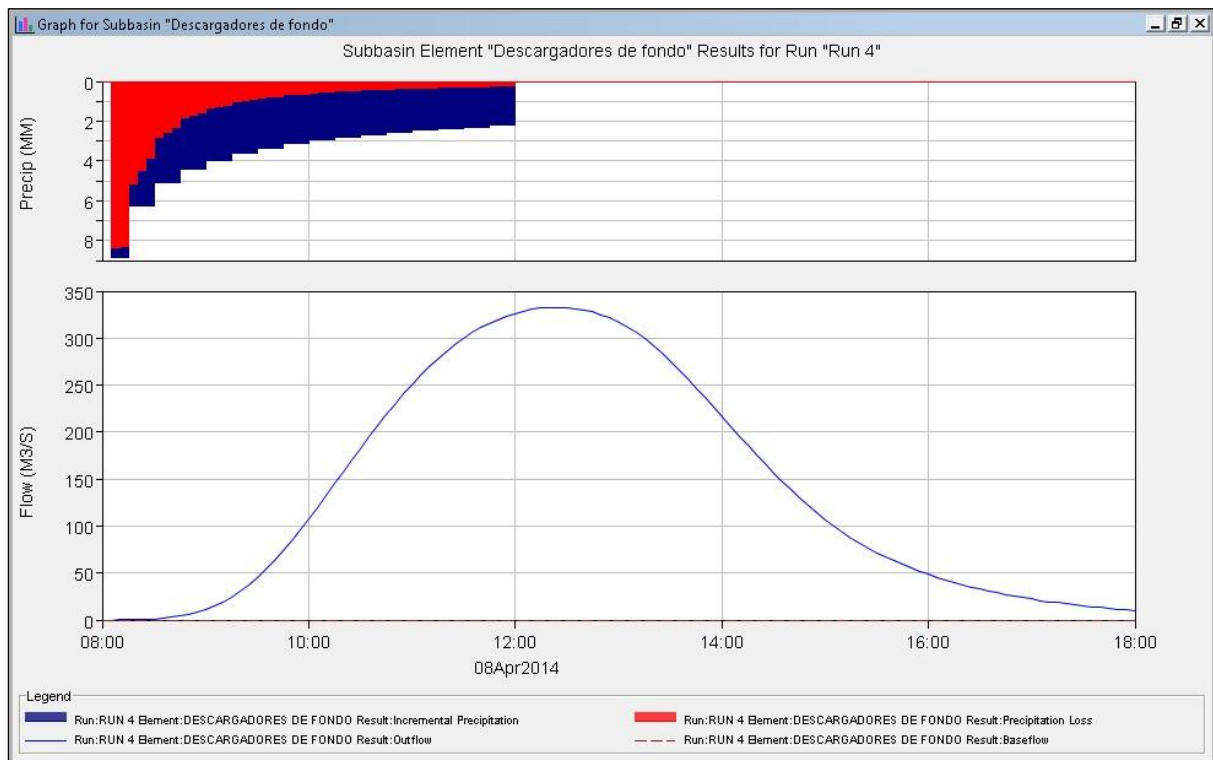
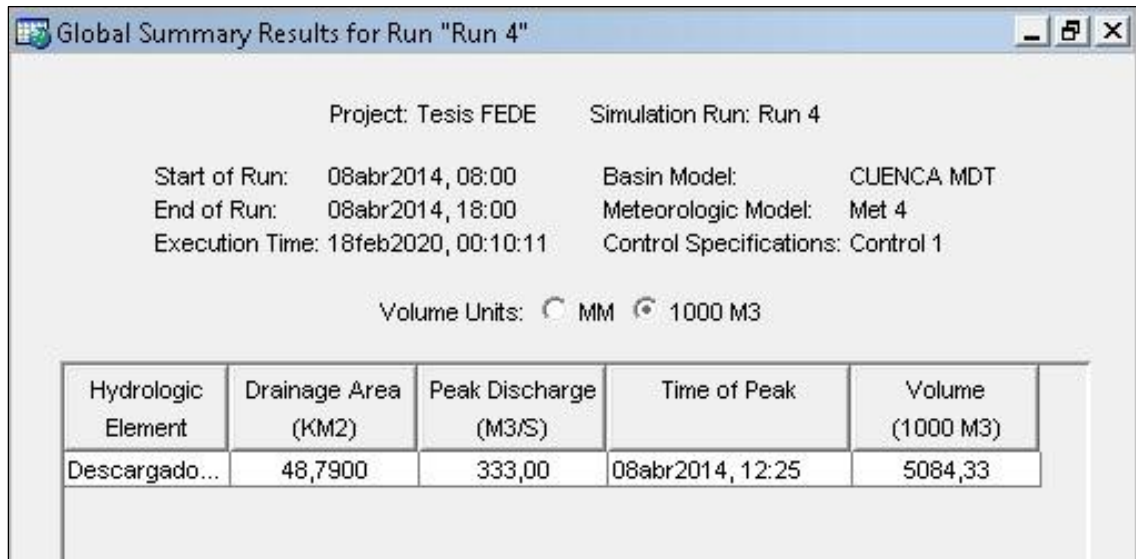
TIEMPO RECURRENCIA: 5 AÑOS.



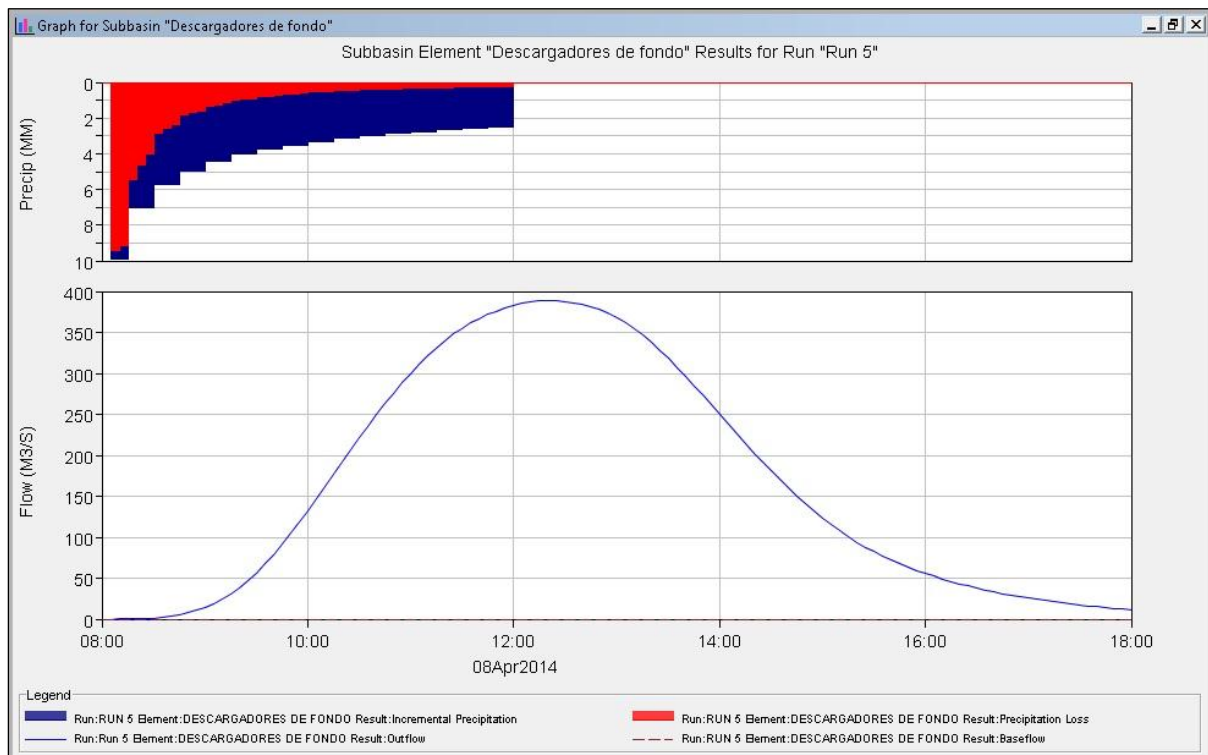
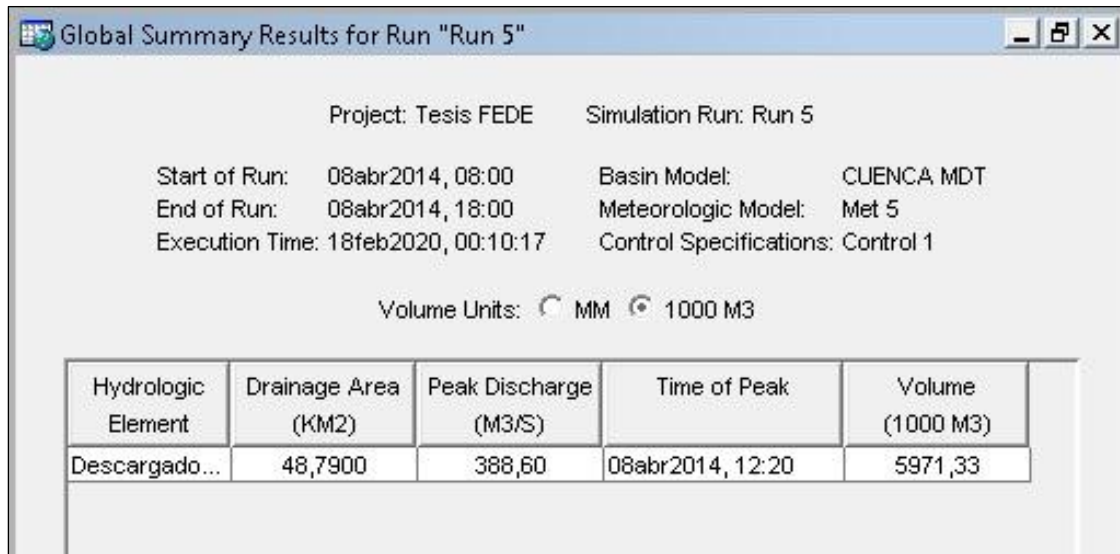
TIEMPO RECURRENCIA: 10 AÑOS.



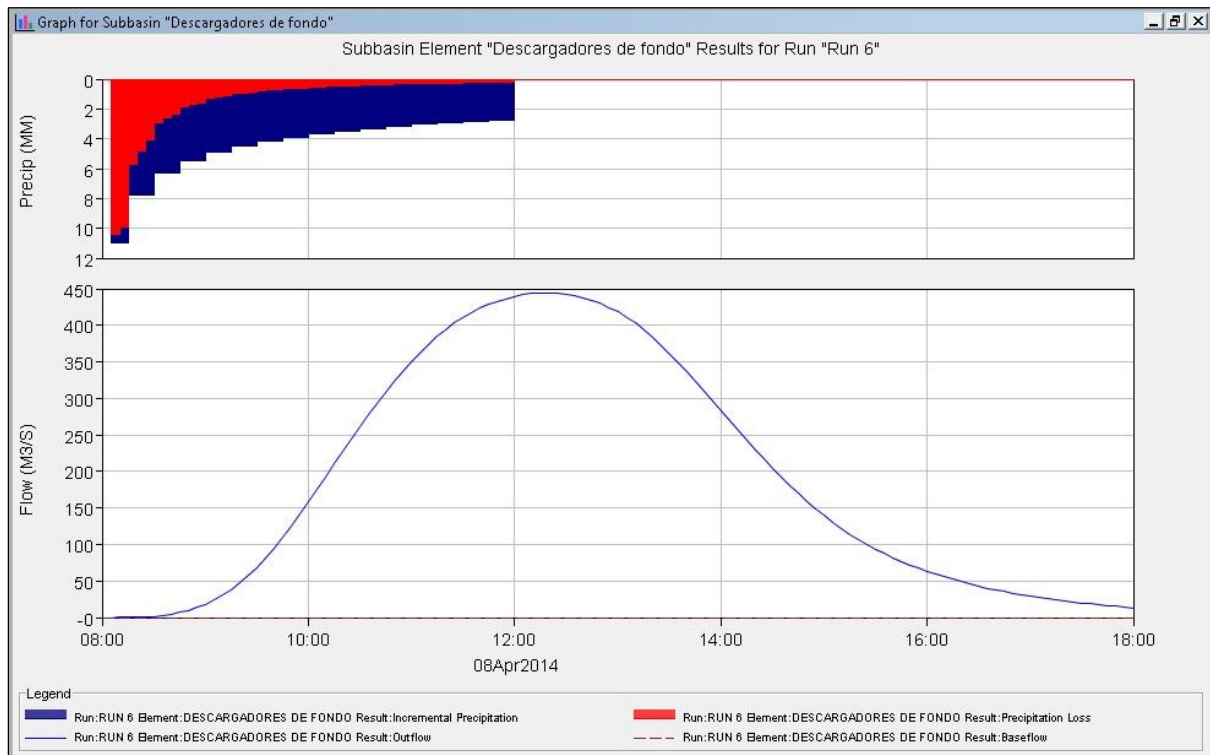
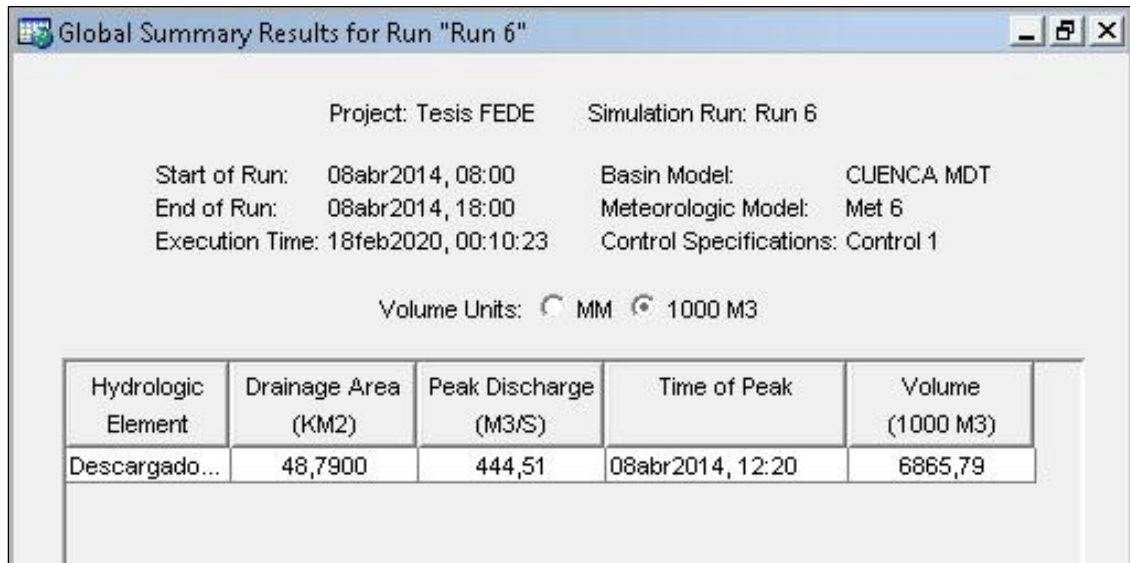
TIEMPO RECURRENCIA: 25 AÑOS.



TIEMPO RECURRENCIA: 50 AÑOS.



TIEMPO RECURRENCIA: 100 AÑOS.



6 BIBLIOGRAFÍA

- Cahuana Andia, A., & Morales, W. Y. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de Hidrología CIV- 233*. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón - Facultad de Ciencias y Tecnologías.
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de los canales abiertos*. Colombia: Nomos S.A.
- D.P.A, R., A.I.C, & Municipalidad Gral. Roca. (2015). *Visita técnica al sistema de desfensas aluvionales de la ciudad de General Roca*. General Roca, Río Negro, Argentina.
- Fuentes Mariles, O. A. (2011). *Estimación del peligro y vulnerabilidad por inundaciones en zonas urbanas*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Ing. Larreguy, A., & Ing. Franke, G. (2003). *Informe técnico sistema Roca-Cattini*. Cipolletti, Río Negro, Argentina: O.R.S.E.P.
- Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas , (., & D.P.A, R. (1978). *Estudio de cuencas aluvionales del Alto Valle de Río Negro y Valcheta. Tomo i*. Viedma, Argentina.
- Marizza, M. S., Rapacioli, R., & Vives, L. (2010). *La problemática aluvional en el Alto Valle del Río Negro, Argentina*. Neuquén.
- Peterka, A. J. (1984). *Hdraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. EE.UU: Department of Interior. Bureau of Reclamation.
- Rapacioli, R. (2010). *Sistemas de información geográfica aplicados a la ingeniería y el medio ambiente. Tomo II-III*. Neuquén, Argentina.
- Rapacioli, R. (2016). *Sistemas de información geográfica aplicados al manejo de cuencas hidrográficas. Tomo I*. Neuquén, Argentina.
- Rocha, A. F. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial*. Rimac, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodredo Sánchez, J. C. (2014). *Cálculo de caudales de avenida*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez San Román, J. (2003). *Hidrología Superficial (III): Relación precipitación-escorrentía*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.