

1.1 Antecedentes

La teledetección o percepción remota es una técnica que ha ido evolucionando aceleradamente durante las últimas décadas con la aparición de la tecnología satelital; sus orígenes se ubican con el inicio de las actividades aeronáuticas a principio de siglo XX, para ir evolucionando con el desarrollo de las actividades espaciales. Hoy en día, la teledetección por satélite ha demostrado ser una fuente rentable de valiosa información para numerosas aplicaciones.

A principios de los años 80, los SIG se habían convertido en un sistema plenamente operativo, a medida que la tecnología de los ordenadores se perfeccionaba, se hacía menos costosa y gozaba de una mayor aceptación. Actualmente; se están instalando rápidamente estos sistemas en los organismos públicos, los laboratorios o institutos de investigación, las instituciones académicas, la industria privada y las instalaciones militares y públicas.

Existen numerosos métodos teóricos científicamente reconocidos que permiten estimar las precipitaciones, caudales y otras variables. Sin embargo, cuando se necesita información de los parámetros hidrológicos a nivel de detalle de muchas subcuencas, para sitios específicos o para la totalidad de un territorio, el cálculo y la aplicación tradicional de las fórmulas, resulta muy complejo e incluso impracticable. El trabajo con la utilización de imágenes satelitales mediante su sistema SIG, nos permite obtener esta información en un menor tiempo y con mayor precisión.

1.2 Justificación

1.2.1 Justificación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

En la cuenca del río Santa Ana, se han realizado varios estudios hidrológicos en diferentes áreas de la ingeniería, todos con aplicación de metodologías y herramientas comúnmente empleadas en el medio, por ello, la presente propuesta de investigación pretende contribuir con la actualización de los estudios hidrológicos, en cuanto a la generación de caudales máximos empleando herramientas modernas como la utilización de imágenes satelitales mediante su sistema de información

geográfica (SIG), aplicado a estudios hidrológicos a través de técnicas avanzadas con dichas herramientas.

En la hidrología, se realiza el seguimiento detallado de todos y cada uno de los eventos, que pueden ocasionar riesgos debido a la variación de los caudales en determinados puntos de la red hidrográfica de la cuenca, uno de los fenómenos hidrológicos que requiere un estudio adecuado es el tránsito de avenidas o crecidas, debido a que en determinadas situaciones pueden poner en peligro vidas humanas y generar importantes daños materiales.

Según Chuvieco (2003), el empleo de imagen satelital mediante su sistema de información geográfica (SIG) en el análisis y estimaciones de caudales y otros parámetros hidrológicos de la cuenca, representa una alternativa práctica y útil por cuanto su aplicación permite manejar grandes cantidades de información ahorrando tiempo.

El presente trabajo, es una alternativa para proporcionar técnicas modernas de cálculo de caudales en diferentes periodos de retorno manejando programas que utilizan sistemas de información geográfica, los cuales son aplicables a modelos hidrológicos para la resolución de gran variedad de problemas de ingeniería.

1.2.2 Justificación del área de estudio

La elección del área de estudio fue basada en los siguientes puntos:

- Siendo la cuenca del río Santa Ana uno de los principales afluentes de la cuenca del río Guadalquivir, es de importancia realizar su estudio hidrológico.
- Por ser una de las más extensas de la provincia cercado.
- Por la variabilidad hidrológica que presenta la cuenca cuyo caudal es grande en la época de lluvia y disminuye considerablemente en la época de estiaje, llegando incluso a agotarse en años de sequía.

- Por la accesibilidad a la información necesaria para la realización del presente estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Contribuir al estudio y estimaciones de caudales máximos en la cuenca del río Santa Ana, utilizando imágenes satelitales, mediante el sistema SIG (sistemas de información geográfica), integrados a programas computacionales.

1.3.2 Objetivos específicos

- Investigar, conocer y ampliar la información actual que se tiene en el medio de la utilización de imágenes satelitales mediante el sistema SIG, relacionarlos con recursos hídricos existentes.
- Obtener de un modelo digital del terreno.
- Analizar y determinar las características físicas y morfológicas de la cuenca del río Santa Ana.
- Estimar la precipitación máxima de la cuenca del río Santa Ana.
- Ahorrar tiempo manejando y procesando grandes volúmenes y tipos de información hidrológica utilizando imagen de satélite.

1.4 Alcance del trabajo

Con este estudio se pretende investigar, conocer y ampliar la información actual que se tiene en el medio con la utilización de imágenes satelitales mediante los SIG y relacionarlos con recursos hídricos existentes; así también adquirir, almacenar y analizar información hidrológica básica existente y relacionarla con un nuevo conjunto de herramientas potentes, cuya capacidad para sintetizar y complementar la dinámica de los fenómenos naturales que se pretenda reflejar, es bastante eficiente.

Se explicará el procedimiento que se sigue para obtener y transformar la información geográfica en datos hidrológicos a través de mapas o coberturas, cómo se gestiona, almacena, analiza estos datos y cuáles son sus resultados. Se conocerá qué Sistemas de

Información Geográfica se utiliza en el medio, de qué tipos, en qué áreas, profesiones e instituciones se los usan y cómo los aplican.

Finalmente, después de haber desarrollado el trabajo, se podrá determinar las ventajas y desventajas de la utilización de imágenes satelitales mediante el sistema SIG aplicado a la hidrología, se tendrá una visión más clara con conceptos e ideas renovadas que se utilizan actualmente y que están a la vanguardia de la Ciencia y la Tecnología en el estudio de aguas superficiales, y de esta manera contribuir con algunos aspectos metodológicos en la determinación de caudales máximos de una cuenca hidrográfica.

a la tierra en forma de lluvia. Durante el trayecto hacia la superficie terrestre, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas y construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada, una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie, se evapora nuevamente. Del agua que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega a los océanos y lagos donde se produce la evaporación, a partir de los espejos de agua. Del agua infiltrada una parte es absorbida por las plantas y es regresada a la atmósfera por la transpiración, la otra parte del agua infiltrada fluye bajo la superficie terrestre en corrientes subterráneas hasta salir a la superficie o llegar a los lagos y océanos.

2.3 Fases del ciclo hidrológico

2.3.1 La precipitación

La precipitación, es toda forma de humedad que originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo; de acuerdo a esta definición la precipitación puede ser en forma de: lluvias, granizadas, nevadas.

2.3.2 Escorrentía

Se define como el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre, y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

2.3.2.1 Escorrentía superficial

Es aquella que proviene de la precipitación no infiltrada y que se escurre sobre la superficie del suelo.

2.3.2.2 Escorrentía subsuperficial

Es aquella que proviene de una parte de la precipitación infiltrada.

2.3.2.3 Escorrentía subterránea

Es aquella que proviene del agua subterránea, la cual es recargada por parte de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo se ha saturado.

2.3.4 Evaporación

Considerada un fenómeno puramente físico, la evaporación es el paso del agua del estado líquido al estado gaseoso que se transfiere a la atmósfera. La evaporación se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de aguas cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producida por la radiación solar.

2.3.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración está constituida por las pérdidas totales, es decir: evaporación de la superficie evaporante (del suelo y agua) más transpiración de las plantas (es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas). Uso consuntivo es la suma de la evapotranspiración y el agua utilizada directamente para construir los tejidos de las plantas. Esta última cantidad es pequeña en comparación con la evapotranspiración (aproximadamente representa sólo el 1%), por lo que los términos evapotranspiración y uso consuntivo se usan como sinónimos.

2.3.6 Interceptación

La interceptación o retención por la cubierta vegetal es el fenómeno de retención de precipitación. Esta retención es temporal pues parte de ella vuelve a la atmósfera por evaporación. La cantidad de agua retenida es variable, dependiendo del tipo de lluvia, tipo de cubierta y del clima.

2.3.7 Infiltración

Proceso por el cual el agua superficial se introduce en las capas internas del suelo, el proceso de infiltración es debido básicamente a las fuerzas gravitatorias, pero en el intervienen fuerzas capilares o químicas. Esta agua infiltrada puede llegar a los acuíferos, ríos, lagos, al mar o bien puede volver a la superficie por capilaridad y evaporarse.

2.3.8 Percolación

En el ciclo del agua, la percolación no es más que el movimiento del agua en el interior de la superficie de la tierra.

2.3.9 Retención por las depresiones de terreno

Corresponde a la acumulación de agua en todo tipo de accidentes y/o depresiones del terreno; estas zonas producen almacenamiento de agua que bien puede facilitar la evaporación o bien la infiltración.

2.4 La cuenca hidrológica

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. El área de limitación de una cuenca se hace sobre un plano a curvas de nivel, siguiendo las líneas divisorias de aguas o líneas de las altas cumbres. La anterior definición se refiere a una cuenca superficial, asociadas a éstas, existen también una cuenca subterránea, cuya forma es semejante a la cuenca superficial, pero no idéntica, pues depende de la estratificación, especialmente de aquellos estratos impermeables y de su posición.

3.1 Nociones básicas de geodesia

La geodesia estudia la forma, dimensiones y campo gravitatorio de la tierra en territorios extensos.

Desde el punto de vista práctico, una de las mayores utilidades de la geodesia es que mediante sus técnicas es posible representar cartográficamente territorios muy extensos. Esto se consigue mediante el establecimiento de una red de puntos, distribuidos por toda la superficie terrestre, de los cuales se determinarán sus coordenadas, así como su elevación sobre el nivel del mar con muy elevada precisión.

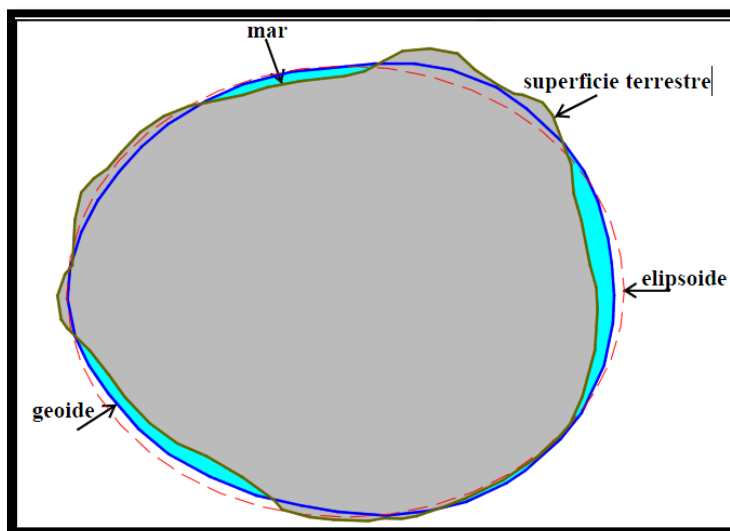


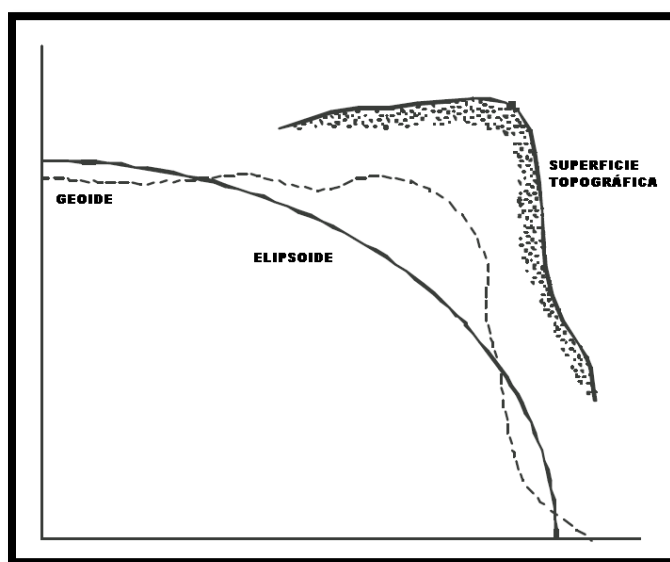
Fig. 3.1 Modelos de la tierra
Fuente: Conceptos básicos geodésicos (CPIAA Chubut)

3.2 Geoide y elipsoide de referencia

La palabra geoide significa “forma de la tierra” y fue introducida por Listing en el año 1873. El geoide es un esferoide tridimensional, tiene en cuenta las anomalías gravimétricas (debidas a las distribución de las masas continentales y la densidad de los componente de la Tierra) y el achatamiento de los polos, por el cual es una superficie irregular con protuberancias y depresiones.

El geoide no puede ser una superficie de referencia adoptada, pues, como hemos dicho, es muy compleja e irregular. Se toma entonces la hipótesis de escoger un elipsoide de revolución que se adapte en lo posible al geoide y que se define por unos parámetros matemáticos, denominándose elipsoide de referencia.

La elección del elipsoide es más que justificada, por razones de sencillez en su definición matemática y porque se ajusta con aproximación de primer orden al geoide.



*Fig. 3.2 Geoide, elipsoide de referencia y superficie terrestre
Fuente: Nociones de geodesia (Jorge Franco Rey)*

3.3 Datum

El Datum geodésico, está constituido por:

- Una superficie de referencia con definición geométrica exacta, generalmente un elipsoide de revolución.
- Un punto fundamental, en el que coinciden los vértices al geoide y al elipsoide.

En general, el datum es la superficie de referencia para el cálculo y determinación de coordenadas, estableciéndose unos datos iniciales de los cuales se derivan el resto. En geodesia se emplean dos tipos de datum, el vertical y el horizontal.

El datum vertical es la superficie de referencia que permite el cálculo de alturas.

El datum horizontal permite la determinación de la longitud y latitud.

3.4 Sistemas de coordenadas utilizados en geodesia

La situación relativa de puntos respecto a la localización de otros requiere la utilización de parámetros como ser distancia y dirección, este problema es solucionado mediante el empleo de sistemas de coordenadas. Los sistemas globales de coordenadas permiten definir posiciones sobre la superficie de la Tierra. El más comúnmente usado sistema de coordenada, es el de la latitud, longitud y altura.

3.4.1 Coordenadas geodésicas

El sistema de coordenadas geodésicas, es considerado como la descripción de un punto en el espacio tridimensional por medio de la longitud, latitud geodésica y la altura elipsoidal. Las coordenadas geodésicas se las determina sobre un elipsoide de referencia, sus orígenes son producto del análisis geométrico y matemático del elipsoide por lo cual los puntos obtenidos son exactos debido a que el elipsoide es una figura matemática exacta.

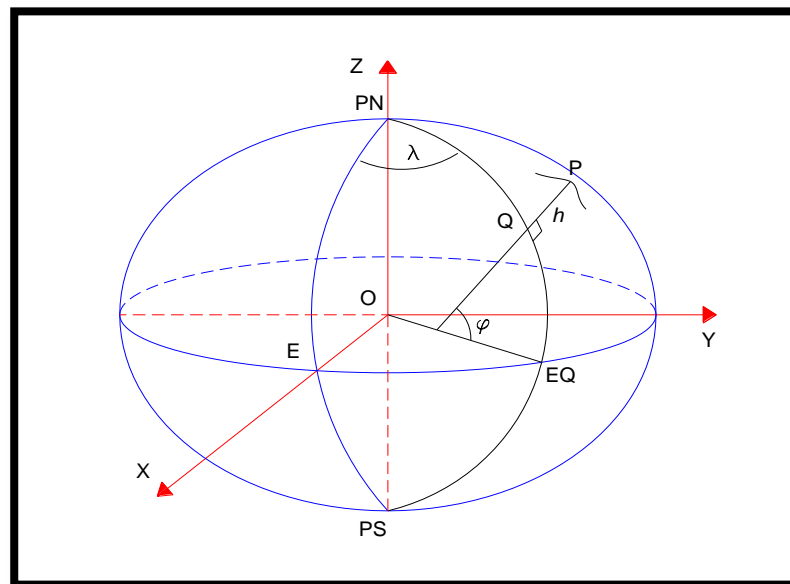


Fig. 3.3 latitud, longitud geodésica

Fuente: Sistemas de referencia (Prof. Ing. Agrim. Jorge Faure Valbi)

La **latitud geodésica**, se define como la distancia angular entre la normal del elipsoide del punto en observación y el plano ecuatorial, es decir, la línea del Ecuador. Se mide a partir de este último de 0° a 90° con un signo positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur.

La **longitud geodésica**, es la distancia angular comprendida entre el plano ecuatorial y la del meridiano geodésico; se mide de 0° a 360° en sentido positivo, hacia el este. Por motivos de cálculos las longitudes toman valores de 0° a 180° , hacia el hemisferio oriental (E) y 0° a 180° , hacia el hemisferio occidental (O).

La **altura elipsoidal**, es la distancia perpendicular desde el elipsoide al punto.

3.4.2 Coordenadas geográficas

Se determinan de una forma independiente de cualquier modelo de aproximación de la tierra, por lo cual no necesitan de un sistema de referencia (elipsoide, datum), sólo necesitan dos orígenes de medición como son meridiano principal (de Greenwich) y la línea del Ecuador.

3.4.3 Coordenadas cartesianas

Las coordenadas cartesianas son los valores que representan la ubicación de un punto en un plano, en relación con tres ejes de coordenadas mutuamente perpendiculares, las cuales interceptan un punto u origen en común.

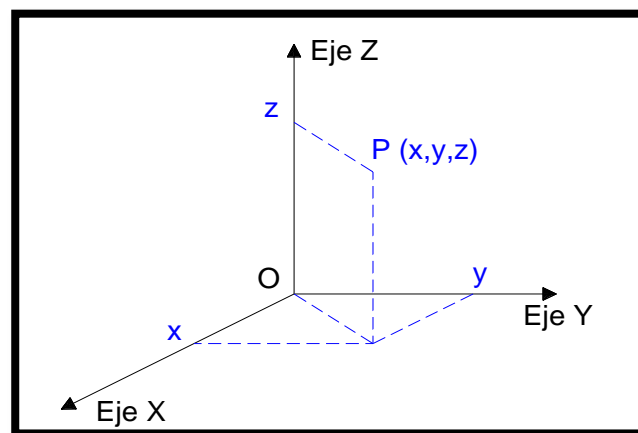


Fig. 3.4 Coordenadas cartesianas

Fuente: *Sistemas de referencia* (Prof. Ing. Agrim. Jorge Faure Valbi)

3.5 Proyección U. T. M

La proyección U.T.M. (Universal Transversa de Mercator) es una representación de carácter universal con una formulación común para cualquier zona de la tierra. La proyección U.T.M. se define como un sistema cilíndrico transverso, conforma y secante al elipsoide a lo largo del meridiano central de la zona que se toma como meridiano origen. En esta proyección la tierra se divide en 60 husos o zonas de 6° de longitud, cada huso se enumera con un número entre el 1 y el 60. Cada huso tiene asignado un meridiano central, que es donde se sitúa el origen de coordenadas, junto con el ecuador. Los husos o zonas se enumeran en orden ascendente hacia el este.

4.1 Nociones básicas de Teledetección

Los satélites de observación de la Tierra describen dos tipos de órbitas, helio síncronas (figura 4.1) y geoestacionarias (figura 4.2). Las primeras suelen ser casi polares, estando inclinadas 90° respecto al plano del Ecuador. La órbita es perpendicular al movimiento de rotación de la Tierra, por lo que es posible observar zonas distintas del planeta en cada pasada. Suelen sobrevolar el Ecuador a la misma hora, de tal manera que registran imágenes en condiciones de iluminación homogéneas en las mismas épocas. Suelen orbitar a altitudes comprendidas entre 600 y 900 km. Esta órbita es la más habitual en los satélites de recursos naturales de media y alta resolución espacial como Landsat, SPOT, IRS, IKONOS, Terra y Aqua, aunque existen otros satélites meteorológicos de órbita polar y media resolución espacial como NOAA.

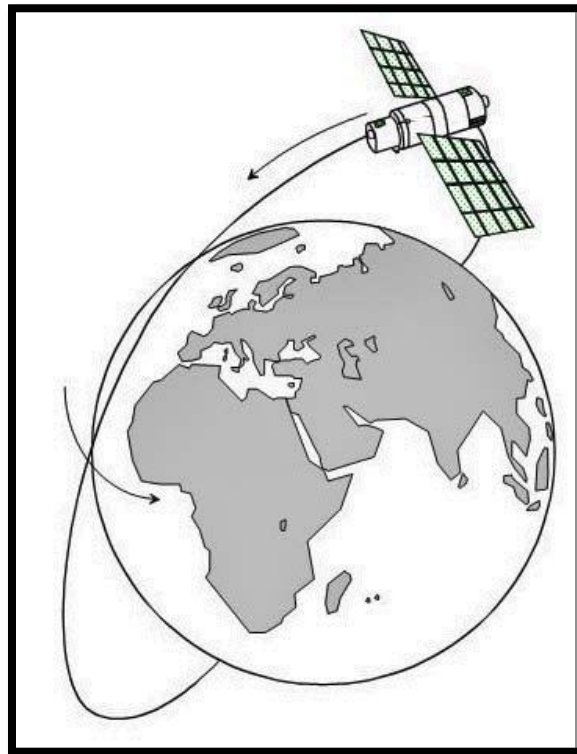
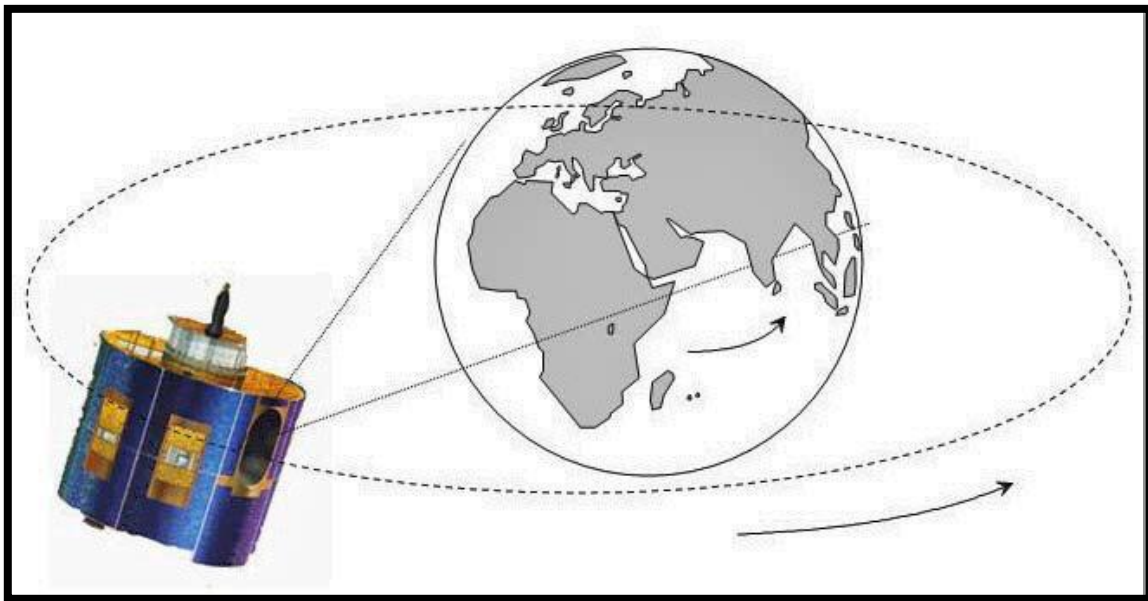


Fig. 4.1 Órbita polar de un satélite
Fuente: Chuvieco 2008

Las órbitas geoestacionarias son ecuatoriales, a una altura de 36.000 km. Su periodo orbital es similar a la velocidad de rotación de la Tierra por lo que su posición relativa respecto a

nuestro planeta siempre es la misma, registrando imágenes sobre la misma porción de superficie terrestre. La mayor parte de satélites de comunicaciones y meteorológicos son geoestacionarios. Suelen complementarse en constelaciones, de tal manera que un conjunto de satélites cubran toda la superficie terrestre. A pesar de su escasa resolución espacial, como consecuencia de su elevada altura orbital, disponen de gran resolución temporal. Son capaces de ofrecer imágenes cada media hora, permitiendo un seguimiento temporal de fenómenos que ocurren muy rápidamente.



*Fig. 4.2 Órbita geoestacionaria de un satélite
Fuente: Chuvieco 2008*

El ojo humano es el sensor natural con el que percibimos la información de la superficie terrestre. Sin embargo, éste se encuentra limitado a la región espectral del visible (figura 4.3). Por el contrario, los sensores que viajan a bordo de los satélites artificiales suelen ser multiespectrales e incluso, hiperspectrales. Ello significa que son capaces de registrar el comportamiento de los objetos de la superficie terrestre en diversas longitudes de onda o bandas del espectro electromagnético, desde la región del visible, hasta las distintas bandas del infrarrojo (próximo, medio y térmico) y de las microondas.

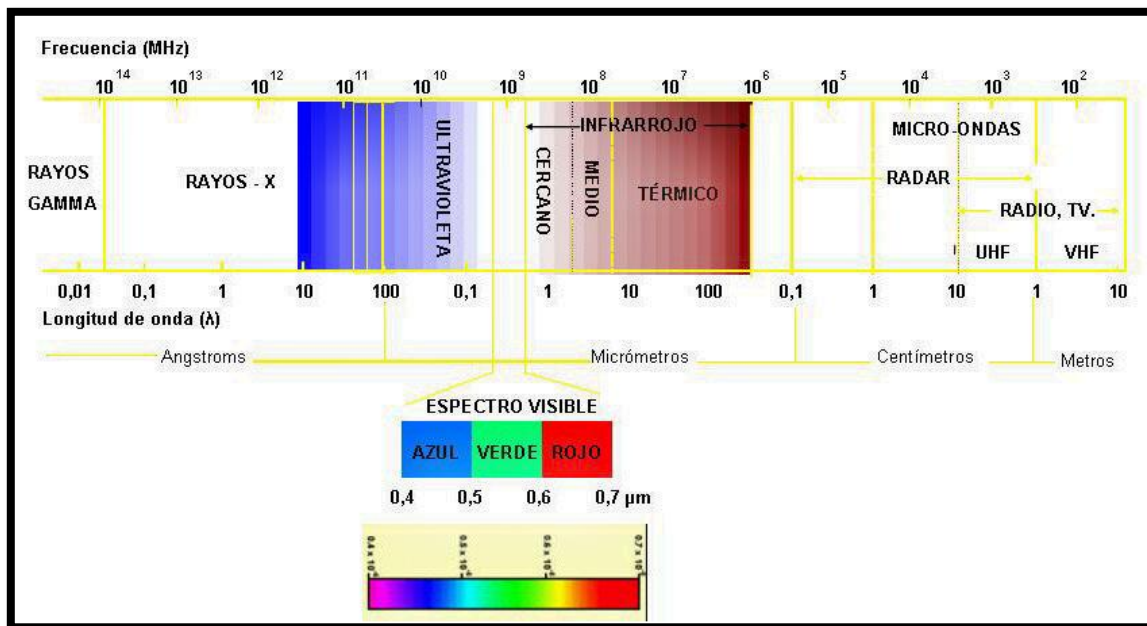


Fig. 4.3 Espectro electromagnético
Fuente: Chuvieco 2008

4.2 Definición

Teledetección, técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre mediante observación remota (*remote sensing*), es decir, a distancia, sin un contacto material entre el objeto observado (superficie terrestre o marina y atmósfera) y el observador (sensor).

Actualmente, gracias a las nuevas tecnologías y la informática, es de vital importancia el desarrollo de la Teledetección espacial, denominada así porque los sensores se instalan en plataformas espaciales, lo que comúnmente denominamos satélites artificiales. La Teledetección espacial se basa en observaciones cuantitativas y permite estimar variables, tanto cualitativas como cuantitativas.

4.3 Componentes del sistema de Teledetección

El proceso de Teledetección, involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés. Un ejemplo de este proceso, con el uso de sistemas de captura de imágenes puede verse en la siguiente figura. Nótese, sin embargo, que la Teledetección también involucra la percepción de energía emitida y el uso de sensores que no producen imágenes.

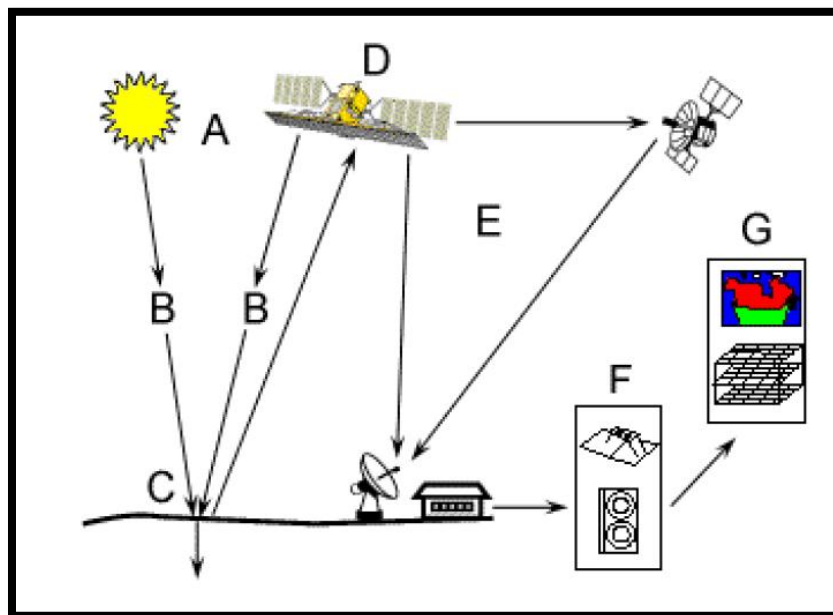


Fig. 4.4 Componentes de Teledetección
Fuente: Tutorial a la Teledetección

- A. Fuente de energía o iluminación:** El primer requerimiento en Teledetección es disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía electromagnética al objeto de interés.
- B. Radiación y la atmósfera:** Ya que la energía “viaja” desde la fuente al objeto, entrará en contacto e interaccionará con la atmósfera. Esta interacción tiene lugar una segunda vez cuando la energía “viaja” desde el objeto al sensor.
- C. Interacción con el objeto:** La energía interactúa con el objeto dependiendo de las propiedades de este y de la radiación incidente.
- D. Detección de energía por el sensor:** Necesitamos un sensor remoto que recoja y grabe la radiación electromagnética, reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera.
- E. Transmisión, recepción y procesamiento:** La energía grabada por el sensor debe ser transmitida; normalmente en forma electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los datos son convertidos a imágenes satelitales.
- F. Interpretación y análisis:** La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca del objeto que fue iluminado (o que emitió radiación).

G. Aplicación: El paso final en el proceso de Teledetección se alcanza en el momento en que aplicamos la información extraída de las imágenes del objeto para un mejor conocimiento del mismo, revelando nuevas informaciones o ayudándonos a resolver un problema particular.

4.4 Formas de energía empleadas

La adquisición de información a distancia implica la existencia de un flujo de información entre el objeto observado y el sensor. El portador de esta información es la radiación electromagnética, que puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por éste. Todos los cuerpos (planetas, seres vivos, objetos), emiten radiación electromagnética, aunque su cantidad y tipo depende fundamentalmente de su temperatura.

El principal emisor de energía en el sistema solar, es el Sol, cuya radiación reflejada por la tierra y los objetos situados en ella, es la más común en Teledetección y la que nos permite ver los objetos que nos rodean. También el propio sensor puede incorporar un emisor de radiación, cuyo reflejo en la superficie terrestre es captado por él posteriormente.

La Teledetección espacial permite percibir otras formas de energía en un espectro mucho más amplio de energía, no visible (rayos ultravioleta, rayos infrarrojos o microondas), desde una perspectiva vertical y panorámica.

4.5 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es una escala en la que puede situarse cualquier onda de energía. En dicha escala se representa la frecuencia, así como la longitud de onda de la radiación electromagnética, siendo ambas inversamente proporcionales, es decir, a mayor frecuencia menor longitud de onda. En esta escala pueden definirse intervalos dentro de los cuales las ondas electromagnéticas se comportan de forma similar. Dichos intervalos se denominan bandas o canales espectrales.

Las bandas más empleadas en Teledetección son:

- **Espectro visible** (0,4 a 0,7 μm). Coincide con las longitudes de onda donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas fundamentales: azul (0,4

a 0,5 μm), verde (0,5 a 0,6 μm) y rojo (0,6 a 0,7 μm), según los colores que nuestros ojos perciben al recibir una radiación electromagnética de cada una de esas longitudes de onda.

- **Infrarrojo próximo** (0,7 a 1,3 μm). También llamado infrarrojo reflejado o fotográfico, porque parte de él puede detectarse mediante películas dotadas de emulsiones especiales. Es de gran utilidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- **Infrarrojo medio** (1,3 a 8 μm). En esta banda se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y los de emisión propia de la superficie terrestre. Es útil para la estimación de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
- **Infrarrojo lejano o térmico** (8 a 14 μm). Incluye la emisión propia de la superficie terrestre, por lo que es útil para detectar el calor que emiten las cubiertas terrestres, o sus cambios de temperatura.
- **Microondas** (a partir de 1mm). Un radar es un sensor activo de microondas. Esta banda de energía es bastante transparente a la cubierta nubosa. Se ha utilizado para confeccionar mapas de la superficie de Venus, que está totalmente oculta por nubes muy densas, para navegación oceánica, para detectar características geológicas e, incluso, para calcular el contenido de humedad del suelo.

La Teledetección espacial, utiliza sensores multispectrales que permiten representar la Tierra desde diferentes longitudes de onda. Son cámaras de barrido que no utilizan películas, sino detectores electrónicos que registran radiaciones electromagnéticas.

Los sensores infrarrojos y de microondas registran energía electromagnética invisible. El calor de los objetos puede medirse por la energía infrarroja que irradian. Los sensores infrarrojos crean imágenes que muestran las variaciones de temperatura en una zona. Los científicos emplean imágenes infrarrojas para determinar las condiciones de vegetación, estudiar los cambios de temperatura en la superficie del agua, localizar daños en canalizaciones subterráneas y registrar determinados accidentes geográficos superficiales y subterráneos.

Los sensores de microondas, como el radar, transmiten ondas electromagnéticas hacia un objeto y registran las ondas que este refleja. A diferencia de otros sensores, los de microondas pueden recoger información sobre una zona a través de las nubes. Explorando una zona con radar y procesando los datos con una computadora, los científicos pueden crear mapas de radar.

4.6 Tipos de sensores

Una clasificación básica de los sensores, diferencia entre sensores activos (generan su propia radiación y la reciben rebotada) y sensores pasivos (reciben radiación emitida o reflejada por la Tierra).

Entre los sensores pasivos destacan:

- Los fotográficos
- Los exploradores o radiómetros de barrido
- Los exploradores de empuje
- Las cámaras de vídeo
- Los radiómetros de microondas

Por lo que se refiere a los sensores activos, actualmente se dispone del radar y el lidar (basado en tecnología láser). El radar es un radiómetro de microondas de naturaleza activa, es decir, que a diferencia del descrito en el punto anterior, se encarga de emitir la señal para luego interpretar la respuesta. El lidar es un sensor similar al anterior, pero que emite pulsos de luz polarizada de longitudes de onda mucho más pequeñas, en la franja del espectro correspondiente al ultravioleta y al infrarrojo cercano.

En función de la orientación con la que el sensor capta las imágenes se distingue entre: sensores de orientación vertical, habitual en satélites de resolución espacial baja (METEOSAT) o media (LANDSAT); de orientación oblicua, típica del radar; y de orientación modificable, que aparece en los sensores de alta resolución (a partir del SPOT-IHV) y en los que se dispone por encargo la orientación, lo que permite mantener unas elevadas resoluciones espacial y temporal (tiempo de revisita); no obstante, su

inconveniente es que es difícil encontrar imágenes a posteriori, ya que sólo se toman aquellas imágenes que se han encargado previamente.

4.7 SIG y Teledetección

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), intervienen en las últimas fases de las que componen un proceso de Teledetección, más concretamente en lo que anteriormente se definía como los elementos intérprete y usuario final.

Dotarán al intérprete de una herramienta que le permitirá corregir, basándose en datos geográficos existentes, las imágenes satelitales; garantizando unos mínimos de calidad suficientes para ser interpretadas. Pero es el usuario final el que más y mejor partido va a sacar de los SIG, pues le ofrecen capacidad de almacenamiento y procesado de la información, así como multitud de herramientas de análisis e integración de diversas variables obtenidas a partir de esos mismos datos, cerrando así un proceso que se iniciaba con la toma de las imágenes, y que va a permitir a científicos y técnicos de diversas disciplinas profesionales y de investigación aprovechar estas técnicas para ponerlas al servicio de la sociedad y de la ciencia.

Como ejemplo sencillo y esquemático es muy explicativo el caso de la explotación de datos procedentes de un proceso de Teledetección, y su aplicación para la evaluación y prevención de catástrofes naturales, por ejemplo, las inundaciones provocadas por lluvias torrenciales. El técnico, gracias a la Teledetección, recopila una serie de imágenes que, una vez corregidas y almacenadas mediante herramientas SIG, puede explotar obteniendo así variables de vital importancia para la evaluación y prevención de avenidas. Son multitud las variables que el técnico puede extraer y analizar mediante un SIG; algunas de forma directa, como son los caudales de avenida, las velocidades del agua en distintos puntos, las dimensiones de la mancha de inundación y las afecciones producidas; y otras de forma indirecta, como la evaluación de los impactos económicos que éstas producen, o los riesgos que determinadas actividades humanas tienen para el medio ambiente y el ser humano.

Los SIG son, por tanto, los sistemas que, por su naturaleza, mejor permiten explotar los datos que la Teledetección aporta.

4.8 Aplicaciones de Teledetección

Las aplicaciones de la Teledetección son múltiples y de muy diversa índole, y están en constante evolución conforme a los adelantos técnicos en una amplia gama de disciplinas por medio de los cuales se desarrollan, se diversifican y se amplían, como la informática, la aeronáutica, la física o los campos de la ingeniería civil y ambiental.

La Teledetección, con fines militares ha sido, además de una de las propulsoras del desarrollo de esta técnica; una de las ramas que mayor provecho ha obtenido, sobre todo, porque tuvo sus orígenes durante la I Guerra Mundial (1914-1918), como herramienta insustituible para el espionaje y la planificación de campañas bélicas.

Actualmente, son muchas las ciencias que se benefician de forma directa de esta tecnología, como, por ejemplo:

- La meteorología (ofrece perfiles de temperatura atmosférica, mapas de presiones o isobáricos, contenidos de vapor de agua, velocidad de los vientos, predicción de huracanes...).
- La oceanografía (temperatura superficial del mar, corrientes oceánicas, velocidad y altura del oleaje, estado de las mareas, detección de tsunamis...).
- La geología y la geomorfología (identificación de perfiles geotécnicos, localización de fallas y desplazamientos tectónicos, determinación de surgencias y masas de agua subterráneas, grado de actividad de volcanes...).
- La topografía y la cartografía (obtención de mapas de detalle de la superficie terrestre...).
- La zoología (inventarios de fauna, movimientos migratorios...).
- La ingeniería forestal y la agricultura (tipos de cobertura vegetal y estado sanitario de la misma, identificación de plagas, mapas de usos del suelo, vulnerabilidad a los incendios, predicción de cosechas...).
- La hidrología (estimación de recursos hídricos, prevención de avenidas...).
- El medio ambiente y el control de fenómenos naturales catastróficos (muy ligado a algunas de las disciplinas anteriormente descritas, como los avisos de tormenta,

movimientos sísmicos, avalanchas, inundaciones, control de la polución...) y el urbanismo (planificación urbanística, vigilancia del tráfico...).

5.1 Aspectos generales

Un Sistema de Información Geográfico (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.

En un SIG se usan herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, estas herramientas van dotadas de procedimientos y aplicaciones para captura, almacenamiento, análisis y visualización de la información georeferenciada.

La mayor utilidad de un sistema de información geográfica 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.

5.2 Definición

Un Sistema de Información Geográfica, es un conjunto de “hardware”, “software”, datos geográficos y personal capacitado, organizados para capturar, almacenar, consultar, analizar y presentar todo tipo de información que pueda tener una referencia geográfica. Un SIG es una base de datos espaciales.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son herramientas de análisis que ofrecen la posibilidad de identificar las relaciones espaciales de los fenómenos que se estudian.

La diferencia que existe entre un SIG y otros paquetes de software gráficos reside en que el SIG es esencialmente una base de datos espacial, lo que le otorga una cualidad incomparable en el desarrollo de análisis enfocados a resolver problemas reales que afectan el espacio geográfico.

5.3 Objetivo fundamental de un SIG.

Los objetivos básicos de un SIG son los siguientes:

- Consultar y analizar información a través de su representación espacial y sus atributos asociados.
- Conocer el comportamiento espacial de los datos para resolver situaciones y problemas del mundo real.

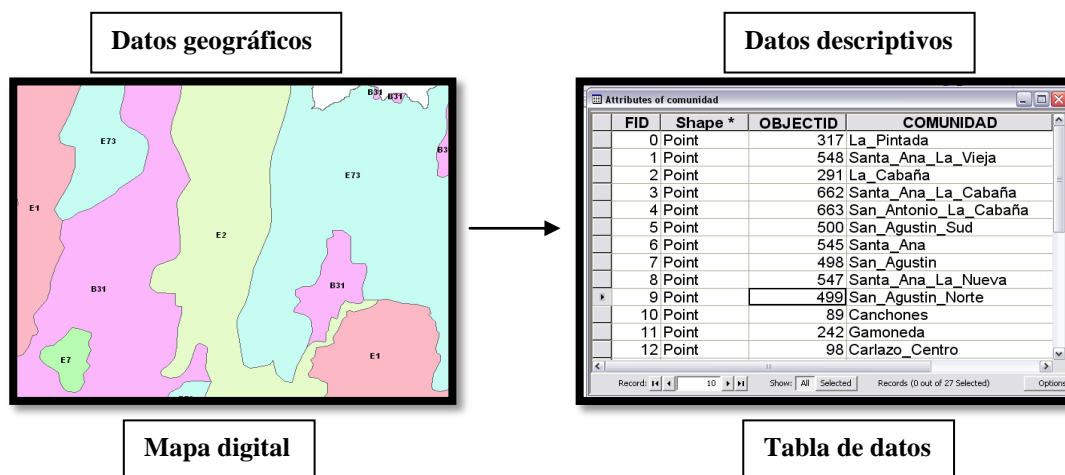


Fig. 5.1 Datos geográficos y descriptivos
Fuente: José Luis Vicente González - Virginia Behm Chang (2008)

El SIG, almacena información cartográfica digital, a la cual se anexa una información atributiva organizada mediante tablas. Los datos descriptivos recogidos en las tablas permiten realizar las consultas, análisis, gráficos e informes relativos a los datos espaciales.

5.4 Base de datos geográfica

La esencia de un SIG está constituida por una base de datos geográficos. Esta es, una colección de datos acerca de objetos localizados en una determinada área de interés en la superficie de la tierra, organizados en una forma tal que puede servir eficientemente a una o

varias aplicaciones. Una base de datos geográfica requiere de un conjunto de procedimientos que permitan hacer un mantenimiento de ella; tanto desde el punto de vista de su documentación como de su administración. La eficiencia está determinada por los diferentes tipos de datos almacenados en diferentes estructuras. El vínculo entre las diferentes estructuras se obtiene mediante el campo clave que contiene el número identificador de los elementos. Tal número identificador aparece, tanto en los atributos gráficos como en los no gráficos. Los atributos no gráficos son guardados en tablas y manipulados por medio de un sistema manejador de bases de datos.

Los atributos gráficos son guardados en archivos y manejados por el software de un sistema SIG. Los objetos geográficos son organizados por temas de información, o capas de información, llamadas también niveles. Aunque los puntos, líneas y polígonos pueden ser almacenados en niveles separados, lo que permite la agrupación de la información en temas, son los atributos no gráficos. Los elementos simplemente son agrupados por lo que ellos representan.

Los formatos estándar para un archivo de diseño son el formato celular o RASTER y el formato tipo VECTOR

La información gráfica en formato vectorial 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 superficies.

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

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.

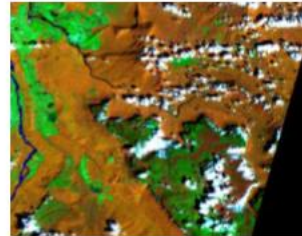
La captura de la información en este formato se hace mediante los siguientes medios: scanners, imágenes de satélite, fotografía aérea, cámaras de video entre otros.

- **Formato Vectorial:**
Representación discreta de la realidad



- Información que posee una expresión espacial claramente definida:
 - Cursos de agua
 - Vías de comunicación
 - Redes de servicios: tuberías
 - Infraestructuras: aeropuertos

- **Formato “Raster”:**
Representación continua de la realidad



- Información que NO posee una expresión espacial claramente definida:
 - Topografía del terreno
 - Variables climáticas
 - Masas de vegetación
 - Áreas inundables

Fig. 5.2 Tipos de formato.

Fuente: Programa de capacitación GeoTecnologías SA

5.5 Componentes de un SIG.



*Fig. 5.3 Componentes de un SIG.
Fuente: Programa de capacitación GeoTecnologías SA*

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”.

Programas (Software)

Los programas de SIG proveen las funciones y las herramientas necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica. Los principales componentes de los programas son:

- Herramientas para la entrada y manipulación de la información geográfica.
- Un sistema manejador de base de datos (DBMS)
- Herramientas que permitan búsquedas geográficas, análisis y visualización.
- Interface gráfica para el usuario (GUI) para acceder fácilmente a las herramientas.

Datos

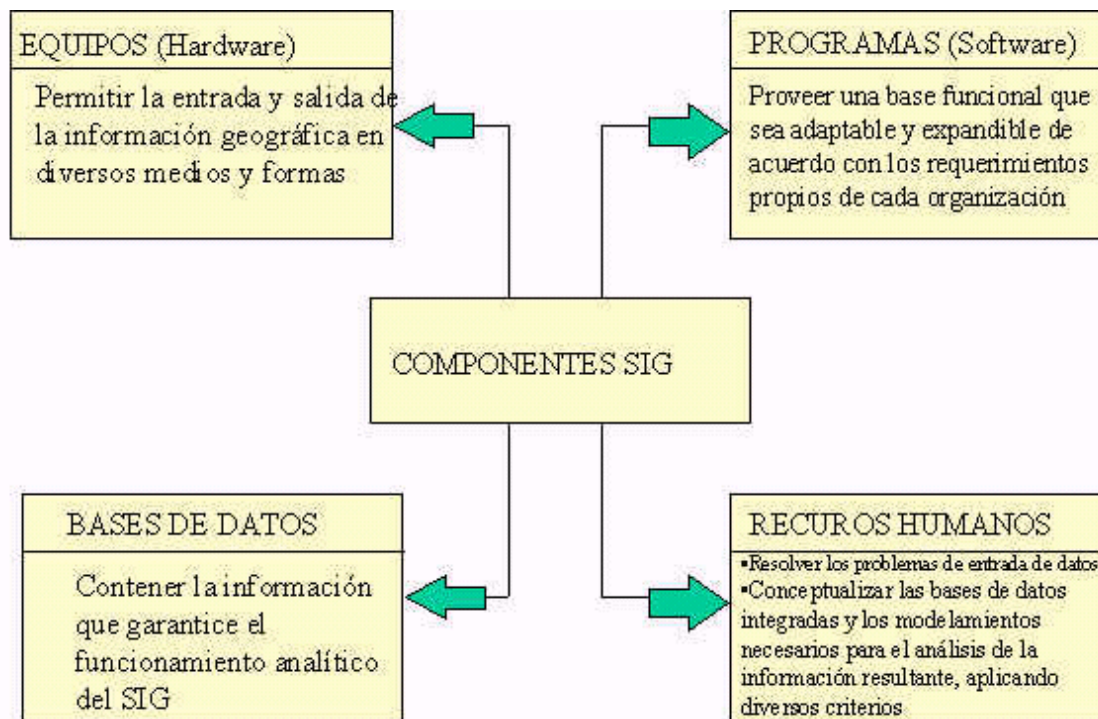
Probablemente la parte más importante de un sistema de información geográfico son sus datos. Los datos geográficos y tabulares pueden ser adquiridos por quien implementa el sistema de información, así como por terceros que ya los tienen disponibles. El sistema de información geográfica integra los datos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

Recurso 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.

Procedimientos

Un SIG, operará acorde con un plan bien diseñado y con unas reglas claras del negocio, que son los modelos y las prácticas operativas características de cada organización.



5.6 Aplicaciones de un SIG

La utilidad principal de un Sistema de Información Geográfica, radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales y para utilizar esos modelos en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza produce sobre un determinado escenario, en una época específica. La construcción de modelos constituye un instrumento muy eficaz para analizar las tendencias y determinar los factores que las influyen así como para evaluar las posibles consecuencias de las decisiones de planificación sobre los recursos existentes en el área de interés.

En el ámbito municipal pueden desarrollarse aplicaciones que ayuden a resolver un amplio rango de necesidades, como por ejemplo:

- Producción y actualización de la cartografía básica.
- Administración de servicios públicos (acueducto, alcantarillado, energía, teléfono, entre otros)

- Regulación del uso de la tierra.
- Control ambiental (saneamiento básico ambiental y mejoramiento de las condiciones ambientales, educación ambiental).
- Evaluación de áreas de riesgos (prevención y atención de desastres)
- Estimaciones hidrológicas:
 - ✓ Caudales medios anuales
 - ✓ Caudales máximos y mínimos
 - ✓ Caudales mensuales
 - ✓ Erosión laminar

6.1 Ubicación geográfica del área de estudio

La zona de estudio comprende la cuenca hidrográfica del río Santa Ana, ubicada al sur de Bolivia, en el sector occidental del departamento de Tarija, provincia Cercado.

La sub cuenca del río Santa Ana, constituye uno de los principales afluentes de la cuenca del río Guadalquivir, desembocando sus aguas en la parte baja del Valle Central de Tarija, es una de las cuatro cuencas que forman el Valle Central de Tarija

Los límites son:

Al norte limita con la cuenca del río Nogal, afluente del río Pilaya (comunidad Jarcas).

Al sud con la confluencia del río Guadalquivir, (comunidad La Pintada).

Al este limita con la serranía el Cóndor que constituye al mismo tiempo el límite entre la Provincia Cercado y O'Connor.

Finalmente, al oeste con la serranía de Morro Gacho y Barbecho (cuenca del río Sella).

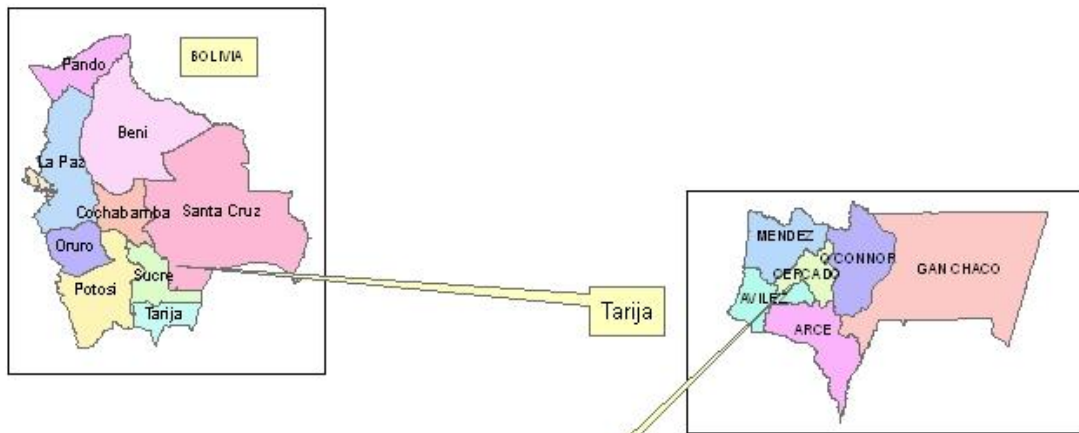
Los puntos extremos de la cuenca tienen las siguientes coordenadas:

Cuadro 6.1 Coordenadas de la cuenca del río Santa Ana

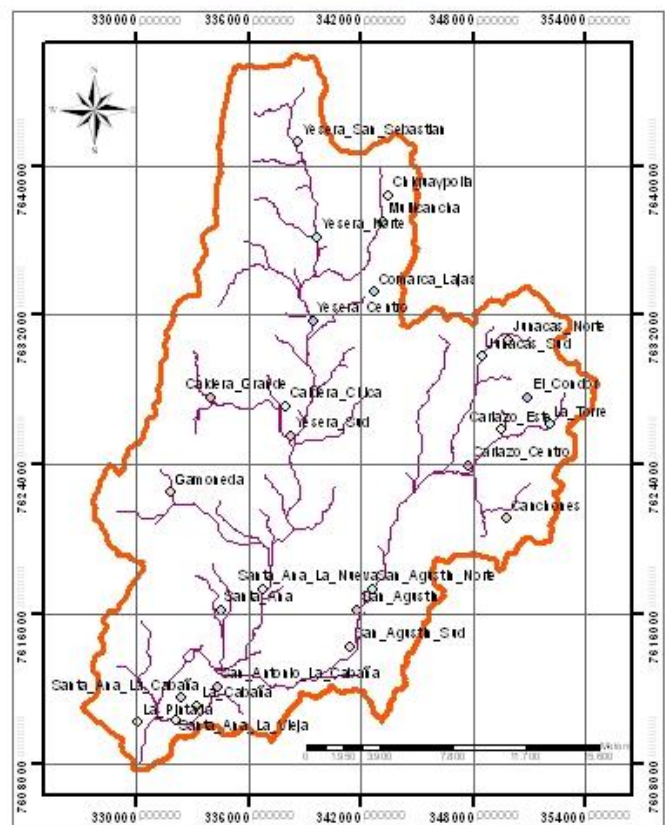
COORDENADAS UTM			COORDENADAS GEODÉSICAS	
PUNTO	X	Y	LATITUD SUD	LONGITUD OESTE
E	354604,625	7628296,715	21°26'30.75"	64°24'11.01"
O	327028,133	7611013,483	21°35'43.88"	64°40'15.15"
N	338503,078	7645927,028	21°16'52.56"	64°33'24.16"
S	330138,649	7607698,073	21°37'32.75"	64°38'28.23"

Fuente: Elaboración propia

MAPA DE UBICACIÓN



AREA DE ESTUDIO



6.2 Descripción del área de estudio

Dentro de la Provincia Cercado, están las cuencas menores del Guadalquivir, Santa Ana, Tolomosa, Tarija, Cajas, Papachacra y Nogal; el de mayor área es el Santa Ana, llegando al 22 por ciento, y el de menor porcentaje esta en Papachacra con el 7 por ciento.

La cuenca del río Santa Ana, es la segunda en importancia dentro del municipio, especialmente en cuanto a superficie. Entre las principales subcuencas está: Yesera, San Agustín, Gamoneda y afluentes directos del Santa Ana y corren entre sus cursos los principales ríos de Yesera, San Agustín, y Gamoneda.

La cuenca del río Santa Ana, atraviesa por medio de varias comunidades, cuyo caudal es bastante en la época de lluvia y disminuye considerablemente en la época de estiaje, llegando incluso a secarse en años de sequía. Por otra parte, la cuenca cuenta con varias quebradas, que presentan diferentes caudales y que en su generalidad son quebradas que se llenan en la época de lluvia, pero cuyas aguas desaparecen en época seca.

Las precipitaciones tienen características propias en cada época del año, en la época seca que comprende los meses de mayo a septiembre y las precipitaciones son moderadas en octubre, noviembre, marzo y abril, concentrándose en los meses de diciembre a febrero. El inicio de las precipitaciones marca el inicio de la siembra, es decir que es fundamental la época de lluvia en la agricultura, principalmente la que es a secano o temporal.

La temperatura media de la cuenca es de 17° C a 18° C con oscilaciones anuales entre 13° C a 22° C. Los meses de invierno el termómetro baja los 0° C, con fríos que limitan en general la producción agrícola. Los meses más cálidos son noviembre, diciembre y enero; mientras que los más fríos son junio y julio.

Los principales cultivos de la zona son: maíz, papa, arveja, trigo, frutales, maní, cebolla, mientras que las principales especies ganaderas son: caprinos, aves, ovinos, vacunos, porcinos y equinos (burros).

La vegetación natural corresponde a una estepa arbustiva semiseca y vegetación secundaria degradada y de poca cobertura, formando estratos arbóreos, arbustivos y herbáceos, a lo largo de las quebradas, ríos, torrentes y algunas laderas. Las especies predominantes son:

Cuadro 6.2 Vegetación natural

Nº	Nombre Vulgar	Nombre Botánico
1.	Churqui	Acacia caven
2.	Algarrobo blanco	Prosopis alba
3.	Algarrobo negro	Prosopis nigra
4.	Molle	Schinus molle
5.	Jarca	Acacia visco
6.	Chañar	Geofraea decorticans
7.	Aliso	Alnus sp.
8.	Chilca	Bacharis sp.
9.	Tusca	Acacia Oromo
10.	Tola	Paratrephia lepidophylla

Fuente: Encuestas socioeconómicas PERTT- marzo 2007

Elaboración: PERTT

7.1 Introducción

Las características de una cuenca y de las corrientes que forman el sistema hidrográfico pueden representarse cuantitativamente, mediante índices de la forma, relieve de la cuenca y de la conexión con la red fluvial. Muchos de los índices son razones matemáticas, por lo que pueden utilizarse para caracterizar y comparar cuencas de diferentes tamaños.

La morfología de una cuenca tiende a centrarse en el área, longitud, forma, atributos del relieve y densidad de drenaje de la cuenca.

Es muy importante tener en cuenta el cociente de alargamiento para comprender la hidrología de la cuenca y calcular los riesgos de inundación. Esto se debe a que, dada una determinada cantidad de lluvia, cuanto menos alargada sea la cuenca, mayor será la esorrentía máxima y antes alcanzarán las aguas la salida o desembocadura.

La densidad de drenaje está considerada como un índice relevante. Es una medida de la textura de la red, y expresa el equilibrio entre el poder erosivo del caudal terrestre y la resistencia del suelo y rocas de la superficie.

7.2 Características físicas y morfométricas de la cuenca

7.2.1 Área de la cuenca

Se define como el área de terreno a todas las aguas caídas por precipitación que se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido.

$$\text{Área de la cuenca Santa Ana} = 571,462 \text{ Km}^2$$

7.2.2 Longitud del río principal

Es la distancia en kilómetros, desde el nacimiento del río, hasta su desembocadura. Se considera río principal al de mayor longitud.

$$\text{Longitud del río principal de la cuenca Santa Ana} = 48,629 \text{ Km}$$

7.2.3 Índice de gravelius o coeficiente de compacidad

Este parámetro da una idea de la forma de la cuenca, se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo cuya superficie es igual al área de la cuenca, es decir:

$$Ic = \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{\text{Perímetro de un círculo de igual área}}$$

$$Ic = \frac{P}{P_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$Ic = \frac{P}{2r\pi} \dots\dots\dots (2)$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots\dots\dots(3)$$

Sustituyendo 3 en 2, se tiene.

$$Ic = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{A}{\pi}}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

$$Ic = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ec. 7.1

Donde:

P: Perímetro de la cuenca estilizado

A: Área de la cuenca

El índice de compacidad, trata de expresar la influencia del perímetro y el área de una cuenca en la escorrentía, particularmente en las características del hidrograma.

Si $Ic = 1$, la cuenca será de forma circular; por lo general, para cuencas alargadas se espera que $Ic > 1$. Hay mayor tendencia a las crecientes en medida en que este número sea próximo a la unidad.

El índice de compacidad de la cuenca Santa Ana = 2,097

Este valor refleja que la cuenca tendrá un drenaje relativamente lento debido que la forma que presenta la cuenca es alargada.

7.2.4 Factor de forma

La forma de la cuenca hidrológica afecta a los hidrogramas de escorrentía y a las tasas de flujo máximo. Se han hecho numerosos esfuerzos para tratar de descubrir el efecto de la forma por medio de un solo valor numérico. La mayoría de las cuencas tienden a tener la forma de una pera; sin embargo, los controles ecológicos conducen a numerosas desviaciones a partir de esta forma.

Horton sugirió un factor adimensional de forma (F), como índice de la forma de una cuenca, determinado por la expresión:

$$F = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ec. 7.2}$$

Donde:

A: Es el área de la cuenca

L: Es la longitud de la cuenca (medida desde la salida hasta el límite de la cuenca, cerca de la cabecera del cauce más largo, a lo largo de una línea recta).

Este índice o su recíproco han sido usados extensamente como indicadores de la forma del hidrograma unitario. La relación $F = (A/L^2)$, no implica una suposición esencial de la forma de la cuenca. Para un círculo $F = 0,79$, para un cuadrado, con salida en el punto medio de uno de los lados $F = 1$; y para el cuadrado con la salida en una esquina $F = 0,5$. Los valores correspondientes para otras formas geométricas se pueden deducir fácilmente.

Si:

$F < 0,50$ Cuenca alargada

$F > 0,50$ Cuenca achatada

El factor de forma de la cuenca Santa Ana = 0,39

Lo que nos indica que nuestra cuenca tiene una forma alargada

7.3 Sistema de drenaje

La red de drenaje de una cuenca, se refiere a las trayectorias o al arreglo que guardan entre sí, los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. Es otra característica importante en el estudio de una cuenca, ya que manifiesta la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante, es decir, la rapidez con la que desaloja la cantidad de agua que recibe. La forma de drenaje, proporcional también indicios de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca.

7.3.1 Jerarquización fluvial

Uno de los problemas que casi siempre se plantea en un estudio hidrológico, es la distinción entre río principal y sus afluentes. En tal sentido, es necesario realizar una clasificación de los cauces de acuerdo al número de orden de un río, como una medida de ramificación del cauce principal en la cuenca.

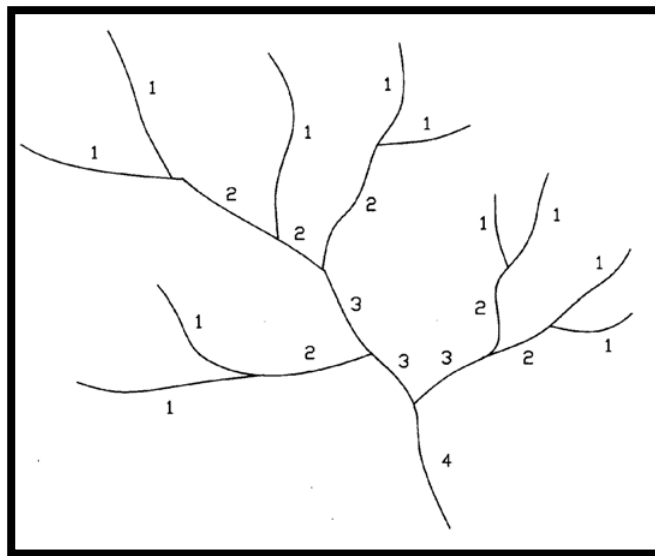
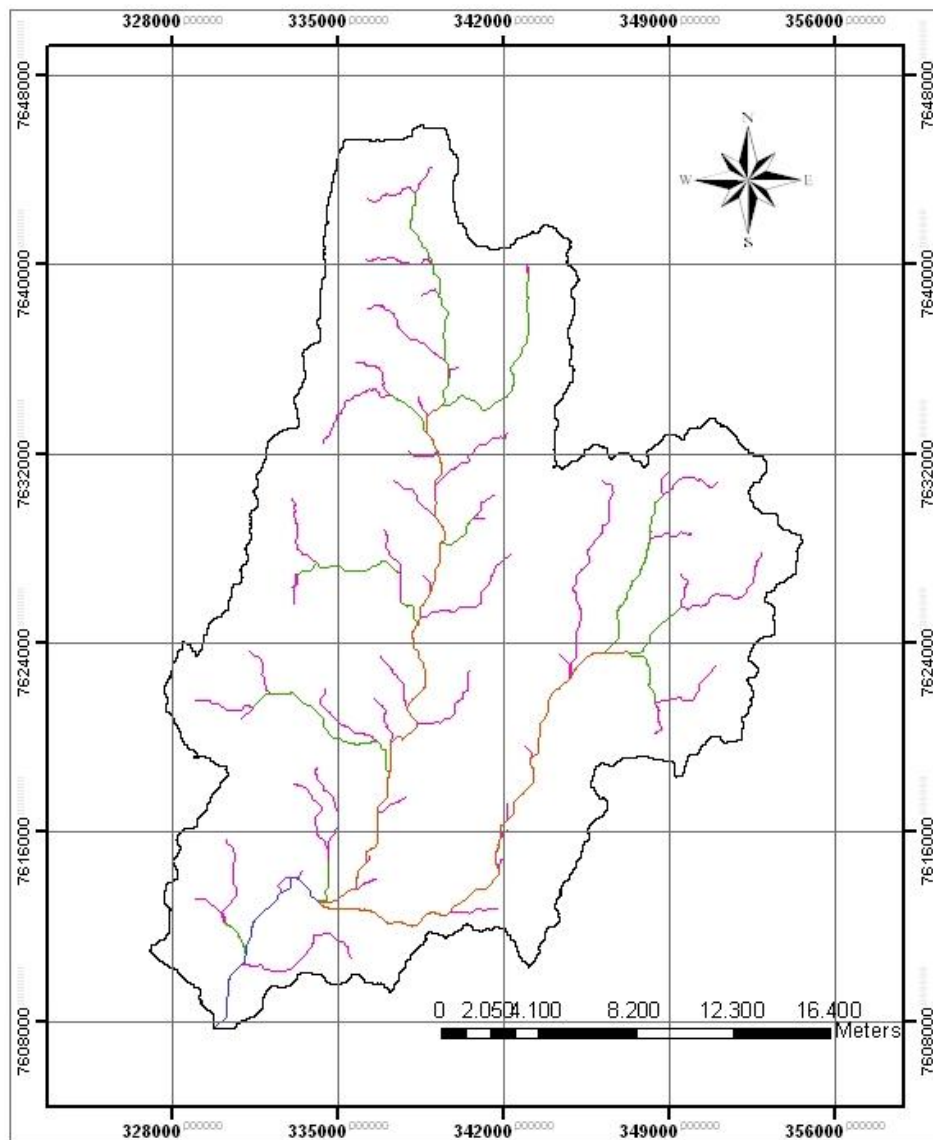


Fig. 7.1 Jerarquización de una red hidrográfica según el criterio de Strahler
Fuente: Texto Geomorfología Aplicada de la Universidad de San Luis

MAPA DE LA RED DE DRENAJE DE LA CUENCA



7.3.2 Densidad de drenaje

La longitud total de los cauces dentro de una cuenca, dividida por el área total de drenaje, define la densidad de drenaje o longitud de canales por unidad de área.

La densidad de drenaje es un parámetro que indica la posible naturaleza de los suelos, también da una idea sobre el grado de cobertura que existe en la cuenca. Una densidad alta refleja una cuenca muy bien drenada, áreas con suelos fácilmente erosionables o relativamente permeables, con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal. Una cuenca con baja densidad, refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta, muestra áreas con suelos resistentes a la erosión o muy permeables, un relieve bajo y cobertura vegetal densa. Se representa con la siguiente ecuación.

$$Dd = \frac{L}{A} \quad \text{Ec. 7.3}$$

Donde:

Dd: Densidad de drenaje

L: Longitud total de las corrientes

A: Área total de la cuenca

La densidad de drenaje, usualmente toma valores entre 0,5 km/km² para cuencas con drenaje pobre, hasta 3,5 km/km² para cuencas excepcionalmente bien drenadas.

La densidad de drenaje de la cuenca Santa Ana = 0,427 Km/Km²

La cuenca Santa Ana tiene un drenaje pobre.

7.4 Parámetros de relieve de la cuenca

El gradiente de pendiente de una cuenca tiene importancia dado que, indirectamente, a través de la velocidad del escurrimiento, influye en el tiempo de concentración. Por ello, puede resultar de interés, en lugar de representar todo el relieve mediante una curva a un

rectángulo, definirlo por un valor determinado o un índice que sintetice la pendiente de la cuenca.

7.4.1 Pendiente del río principal

Este parámetro se define como la diferencia de altura entre el punto más bajo y el más alto de la cuenca dividida, por la longitud máxima de la misma.

$$S = \frac{Cota_{sup} - Cota_{inf}}{L_{río\ principal}} \quad \text{Ec. 7.4}$$

Donde:

S: Pendiente del río

El índice global de la cuenca Santa Ana = 0,031 m/m

7.4.2 Curva hipsométrica de la cuenca

La curva hipsométrica representa la relación entre la altitud en m.s.n.m y la superficie que da por encima de dicha altitud, por lo tanto caracteriza en cierto modo el relieve.

Cuadro 7.1 Generación de la curva hipsométrica

Altitud (m.s.n.m)	Área Parcial (Km ²)	Área Acumulada (Km ²)	Áreas que quedan sobre las altitudes (Km ²)	% del total que queda sobre la altitud
1760	0	0	571,462	100
1800	3,772	3,772	567,690	99,34
1850	28,287	32,059	539,403	94,39
1900	24,859	56,918	514,544	90,04
1950	18,573	75,490	495,972	86,79
2000	17,887	93,377	478,085	83,66
2050	26,230	119,607	451,855	79,07
2100	29,030	148,637	422,825	73,99
2150	37,716	186,354	385,108	67,39
2200	49,374	235,728	335,734	58,75
2250	40,574	276,302	295,160	51,65
2300	36,745	313,047	258,415	45,22
2350	38,402	351,449	220,013	38,5

2400	47,317	398,766	172,696	30,22
2450	38,802	437,568	133,894	23,43
2500	31,088	468,656	102,806	17,99
2550	27,202	495,858	75,604	13,23
2600	20,573	516,430	55,032	9,63
2650	14,058	530,488	40,974	7,17
2700	10,915	541,403	30,059	5,26
2750	8,229	549,632	21,830	3,82
2800	5,829	555,461	16,001	2,8
2850	4,057	559,518	11,944	2,09
2900	3,429	562,947	8,515	1,49
2950	2,914	565,862	5,600	0,98
3000	2,000	567,862	3,600	0,63
3050	1,543	569,405	2,057	0,36
3100	1,314	570,719	0,743	0,13
3150	0,457	571,176	0,286	0,05
3200	0,171	571,348	0,114	0,02
3256	0,114	571,462	0,000	0

Fuente: Elaboración propia

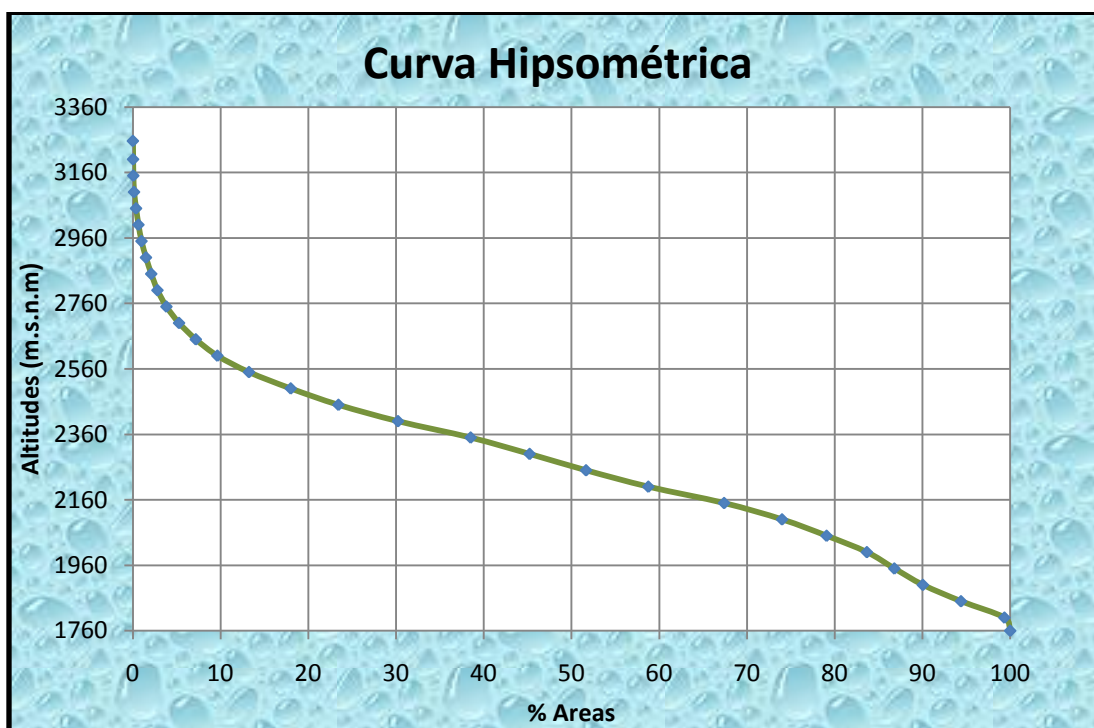


Fig. 7.2 Curva Hipsométrica

Fuente: Elaboración propia

7.4.3 Altitud media

Es la ordenada de la curva hipsométrica que divide a la cuenca en dos partes iguales (50% de área). La cota correspondiente a la curva hipsométrica, es la cota 2266 m.s.n.m.

7.5 Rectángulo equivalente

El rectángulo equivalente es una transformación geométrica, que permite representar a la cuenca, de su forma heterogénea, con la forma de un rectángulo de misma área y perímetro.

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16A}}{4}$$

Ec. 7.5

$$l = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16A}}{4}$$

Ec. 7.6

Donde:

P : Perímetro de la cuenca

A: Área de la cuenca

L : Lado mayor del rectángulo equivalente

l : Lado menor del rectángulo equivalente

Por lo tanto:

$$L = 81,91 \text{ Km}$$

$$l = 6,98 \text{ Km}$$

Cuadro 7.1 Longitudes del rectángulo equivalente

Altitud (m.s.n.m)	Área Parcial (Km ²)	Longitud parcial L(n) = An/l
1760	0	0,00
1900	56,918	8,15
2000	36,460	5,22
2100	55,260	7,92
2200	87,090	12,48
2300	77,319	11,08
2400	85,719	12,28
2500	69,890	10,01

Altitud (m.s.n.m)	Área Parcial (Km ²)	Longitud parcial L(n) = An/l
2600	47,775	6,84
2700	24,973	3,58
2800	14,058	2,01
2900	7,486	1,07
3000	4,914	0,70
3100	2,857	0,41
3200	0,628	0,09
3256	0,114	0,02

Fuente: Elaboración propia

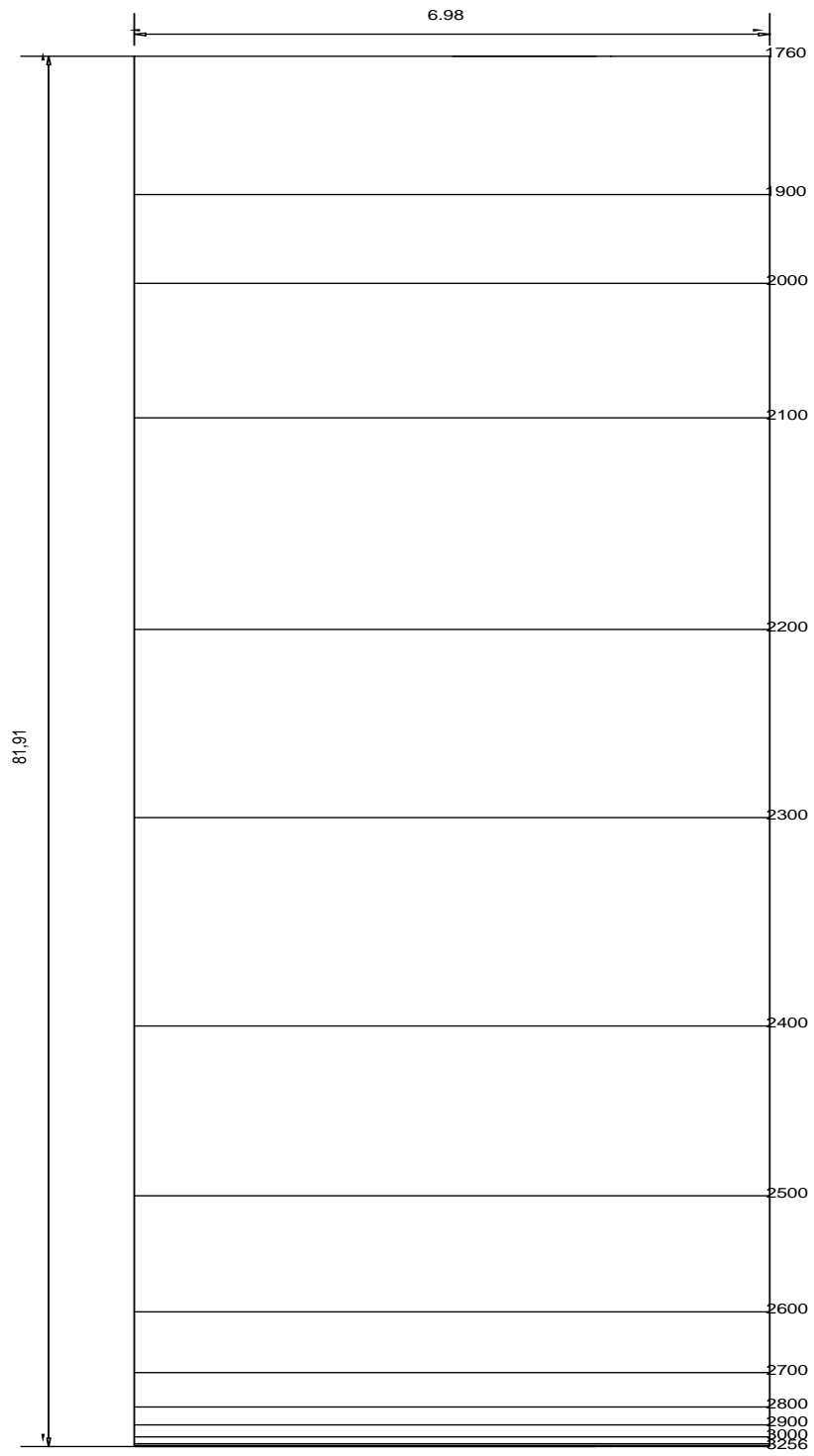


Fig. 7.3 Rectángulo equivalente
Fuente: Elaboración propia

8.1 Análisis de lluvias máximas

El objetivo del estudio de lluvias máximas es obtener la frecuencia y la magnitud de las avenidas que se van a presentar en la cuenca; para alcanzar dicho objetivo, seguiremos los siguientes pasos:

- Determinación de la precipitación máxima en 24 horas de duración para diferentes periodos de retorno.
- Determinación de la precipitación máxima correspondiente a las precipitaciones de duración inferior a las 24 horas que también se analizarán para diferentes periodos de retorno.

8.2 Precipitación máxima en 24 horas

Para el correspondiente análisis se consideraron las precipitaciones máximas diarias basadas en la información de los pluviómetros de las distintas estaciones que se encuentran dentro de la cuenca o muy cercanas a ella, las mismas que se encuentran en el anexo I.

Dependiendo de los registros de datos de precipitaciones máximas en 24 horas, se escogerá un modelo estadístico que represente en forma satisfactoria el comportamiento de la variable. La ley estadística que usaremos es la DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL.

8.2.1 Distribución probabilística

La ley de distribución de las precipitaciones de máxima intensidad está definida a partir de la ley Gumbel, es una distribución de eventos hidrológicos extremos, en su análisis se emplean secuencias de observaciones máximas y mínimas de un conjunto de datos, es decir se analizan valores extremos.

Esta distribución toma en cuenta que el número de estaciones cuya característica de distribución de probabilidad (K_{Di}) y moda (E_{Di}) de la altura de lluvia máxima caída en un día (h_{dT}), asuma en un único valor K_D y E_D .

La ley Gumbel se expresa:

$$\Phi_{h_{Td}} = e^{-e^{-y}} \quad \text{Ec. 8.1}$$

El desarrollo de dicha distribución es el siguiente:

- La probabilidad de no ocurrencia $\Phi_{h_{Td}}$, en función del periodo de retorno T es:

$$\Phi_{h_{Td}} = 1 - \frac{1}{T} \quad \text{Ec. 8.2}$$

- La ley de Gumbel (modificada) para valores grandes de T, puede expresarse como:

$$1 - e^{-y} = e^{-e^{-y}} \quad \text{Ec. 8.3 o sea}$$

$$\frac{1}{T} = e^{-y} \quad \text{Ec. 8.4}$$

- Aplicando logaritmos, queda: $\ln(T) = y$, pero como la variable reducida se define como:

$$y = \frac{(h_{Td} - \mu)}{\alpha} \quad \text{Ec. 8.5}$$

- Transformando a logaritmo $\ln(T)$ a $\log(T) = \frac{\ln(T)}{\log(e)} = \frac{\log(T)}{0.434}$ y el parámetro de escala está definido como:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S = \frac{1}{\alpha} = \frac{1,28255}{S} \quad \text{Ec. 8.6}$$

$$\alpha = \frac{S}{1,2825} \quad \text{Ec. 8.7}$$

Remplazando valores resulta:

$$h_{Td} = \mu * \left(1 + \frac{\frac{S}{1,2825} \log(T)}{0,434 * \mu} \right) = \mu \left(1 + \frac{S * \log(T)}{0,557 * \mu} \right)$$

Ec. 8.8

Donde la característica es:

$$K_D = \frac{S_D}{0.557 * E_D}$$

Ec. 8.9

Donde la moda es:

$$E_D = X_D - 0.45 * S_D$$

Ec. 8.10

Donde:

X_D : Media aritmética

S_D : Desviación estándar

Finalmente, la ecuación de Gumbel modificado para lluvias máximas es:

$$h_{Td} = E_D * [1 + K_D * \log(T)]$$

Ec. 8.11

Cuadro 8.1 Parámetros estadísticos para la distribución Gumbel

ESTACIÓN	AEROPUERTO	SAN PEDRO B.V.	GAMONEDA	JUNACAS	SAN AGUSTIN	YESERA NORTE	YESERA SUR	SANTA ANA (PUENTE)
MEDIA	56,11	47,59	53,47	45,68	34,13	53,06	40,41	47,26
DESVIACION	16,06	18,71	20,51	19,35	12,16	14,09	8,05	21,73
VARIANZA	257,79	350,01	420,77	374,40	147,78	198,59	64,88	472,26
MODA (E)	48,88	39,17	44,23	36,97	28,65	46,71	36,79	37,48
E*nro	2590,67	391,71	1017,39	924,22	343,86	1354,70	294,30	337,29
CARACT. (K)	0,59	0,86	0,83	0,94	0,76	0,54	0,39	1,04
K*Nro	31,25	8,57	19,15	23,49	9,14	15,71	3,14	9,37
Nro Datos	53	10	23	25	12	29	8	9

Fuente: Elaboración propia

Para calcular las alturas de lluvias máxima diaria referida a diferentes periodos de retorno, debe obtenerse la moda y característica ponderada; que están descritas según los siguientes aspectos:

- a) **Confiabilidad de la estación:** Donde el peso de cada estación se calcula a partir del número de años de registro (n_i) que esta tenga.

Las ecuaciones son las siguientes:

$$E_D = \frac{\sum_{i=1}^m E_{Di} * n_i}{\sum_{i=1}^m n_i} \quad \text{Ec. 8.12}$$

$$K_D = \frac{\sum_{i=1}^m K_{Di} * n_i}{\sum_{i=1}^m n_i} \quad \text{Ec. 8.13}$$

Donde:

E_D : Moda ponderada (mm)

E_{Di} : Moda de cada estación (mm)

n_i : Número de datos de cada estación (adimensional)

K_D : Característica ponderada (mm)

K_{Di} : Característica de cada estación (mm)

- b) **Predominio de la estación:** Donde el peso de cada estación es su área de influencia (a_i); estas áreas son obtenidas a partir de los polígonos de Thiessen.

$$E_D = \frac{\sum_{i=1}^n E_{Di} * a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad \text{Ec. 8.14}$$

$$K_D = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Di} * a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad \text{Ec. 8.15}$$

Donde:

E_D : Moda ponderada (mm)

E_{Di} : Moda de cada estación (mm)

a_i : Área de influencia de cada estación (km²)

K_D : Característica ponderada (mm)

K_{Di} : Característica de cada estación (mm)

Para realizar los posteriores cálculos se obtendrán los resultados mediante la utilización del método de confiabilidad de la estación (método a), ya que estos no sólo dan confiabilidad por su extensión de registro, sino que van por el lado de la seguridad.

La moda ponderada es: **42,924 mm**

La característica ponderada es: **0,709 mm**

Cuadro 8.2 Lluvias máximas diarias para cada estación

ESTACIÓN	hdT (mm)				
	Periodo de retorno (T = Años)				
	10	50	100	500	1000
AEROPUERTO	77,72	97,88	106,56	126,72	135,40
SAN PEDRO B.V.	72,86	96,40	106,54	130,09	140,23
GAMONEDA	80,94	106,60	117,65	143,31	154,36
JUNACAS	71,72	96,01	106,47	130,76	141,23
SAN AGUSTIN	50,42	65,64	72,20	87,42	93,97
YESERA NORTE	71,93	89,56	97,16	114,79	122,38
YESERA SUR	51,14	61,17	65,49	75,52	79,83
SANTA ANA (PUENTE)	76,46	103,70	115,44	142,68	154,42

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.3 Lluvias máximas diarias para la cuenca del río Santa Ana

PERIODO DE RETORNO [años]	ALTURAS DE LLUVIA [mm]
10	73,359
50	94,633
100	103,795
500	125,068
1000	134,230

Fuente: Elaboración propia

8.3 Precipitación máxima para periodos de tiempo inferiores a 24 horas

Para obtener los valores de las lluvias máximas en periodos inferiores a las 24 horas y ante la carencia de pluviógrafos en la zona, se estimaron éstos a partir del desarrollo de la forma de Gumbel que no es nada más que la ley de regresión de valores modales.

- La ecuación de Gumbel está descrita de la siguiente forma:

$$\log(h_{tT}) = \log E_D + \beta * (\log t - \log t_d) \quad \text{Ec. 8.16}$$

- Desarrollada la ecuación tenemos:

$$\log\left(\frac{h_{tT}}{E_D}\right) = \beta * \log\left(\frac{t}{t_d}\right) \quad \text{Ec. 8.17}$$

- Eliminando logaritmos se obtiene:

$$\left(\frac{h_{tT}}{E_D}\right) = \left(\frac{t}{t_d}\right)^\beta \quad \text{Ec. 8.18}$$

- Finalmente la ecuación resulta de la siguiente manera:

$$h_{tT} = E_D * \left(\frac{t_i}{t_d}\right)^\beta \quad \text{Ec. 8.19}$$

Donde:

h_{tT} : Precipitación máxima correspondiente a la duración t (horas)

E_D : Valor modal de la precipitación máxima diaria.

t_i : Tiempo en horas

t_d : Equivalente de lluvia diaria para cuencas menores a 20 km^2 posee un valor igual a 2, y para cuencas mayores a 20 km^2 , un valor de 12.

β : Coeficiente angular que varía entre 0.2 y 0.3 (depende de la región). En este estudio se adoptó el valor de 0.2, ya que con este valor se incrementan los valores de precipitación y el cálculo estará de lado de la seguridad.

- Agregando el periodo de retorno, la fórmula de precipitación máxima para una duración de lluvia inferior a la diaria, es la siguiente:

$$h_{tT} = E_D * \left(\frac{t_i}{t_d}\right)^\beta * (1 + K_D * \log T)$$

Ec. 8.20

De esa manera se obtienen las curvas P.D.F. para cada estación las cuales se muestran en los siguientes cuadros.

Cuadro 8.4 Lluvias máximas menores a las diarias de la cuenca el río Santa Ana

PERIODO DE RETORNO [años]	DURACION DE LLUVIAS EN [horas]									
	0,5	1	1,5	2	4	5	6	8	10	15
10	70,175	70,476	70,652	70,777	71,765	72,086	72,349	72,767	73,092	73,687
50	90,700	91,001	91,177	91,302	92,576	92,990	93,330	93,868	94,288	95,056
100	99,539	99,840	100,016	100,141	101,539	101,993	102,366	102,956	103,417	104,259
500	120,064	120,365	120,541	120,666	122,350	122,897	123,346	124,058	124,613	125,628
1000	128,903	129,204	129,380	129,505	131,313	131,900	132,382	133,146	133,742	134,830

Fuente: Elaboración propia

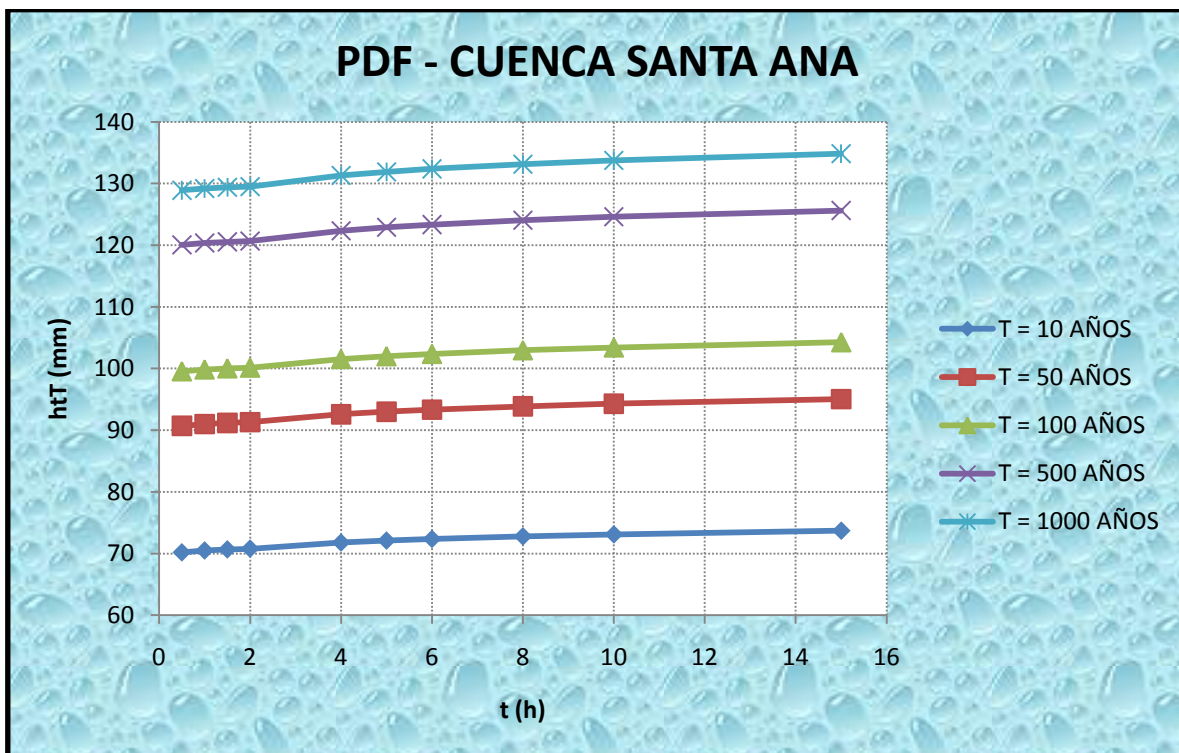


Fig. 8.1 Precipitación máxima probable de la cuenca Santa Ana

Fuente: Elaboración propia

8.3.1 Curvas intensidad duración y frecuencia (I.D.F)

La precipitación, como variable de estado hidrológico, se puede caracterizar a través de la intensidad, de su distribución en el espacio y tiempo, su frecuencia o probabilidad de ocurrencia.

La intensidad, es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. La duración, corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta. La frecuencia, es el número de veces que se repite una tormenta, de características de intensidad y duración definidas en un periodo de tiempo más o menos largo, tomado generalmente en años.

Se analizará las relaciones intensidad – duración – frecuencia de las lluvias observadas, determinándose para los diferentes intervalos de duración de la lluvia el tipo de ecuación y el número de parámetros de esa ecuación que mejor caracterizan aquellas relaciones.

Cuadro 8.5 I.D.F. para diferentes periodos de retorno de la cuenca del río Santa Ana

PERIODO DE RETORNO [años]	DURACION DE LLUVIAS EN [horas]									
	0,5	1	1,5	2	4	5	6	8	10	15
10	140,350	70,476	47,101	35,388	17,941	14,417	12,058	9,096	7,309	4,912
50	181,399	91,001	60,784	45,651	23,144	18,598	15,555	11,734	9,429	6,337
100	199,078	99,840	66,677	50,071	25,385	20,399	17,061	12,870	10,342	6,951
500	240,127	120,365	80,360	60,333	30,588	24,579	20,558	15,507	12,461	8,375
1000	257,806	129,204	86,253	64,753	32,828	26,380	22,064	16,643	13,374	8,989

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.6 Ecuaciones de intensidad para diferentes periodos de retorno

T (AÑOS)	ECUACIÓN
10	$I = 70,450 * t^{-0,985}$
50	$I = 90,963 * t^{-0,985}$
100	$I = 99,798 * t^{-0,985}$
500	$I = 120,312 * t^{-0,986}$
1000	$I = 129,147 * t^{-0,986}$

Fuente: Elaboración propia

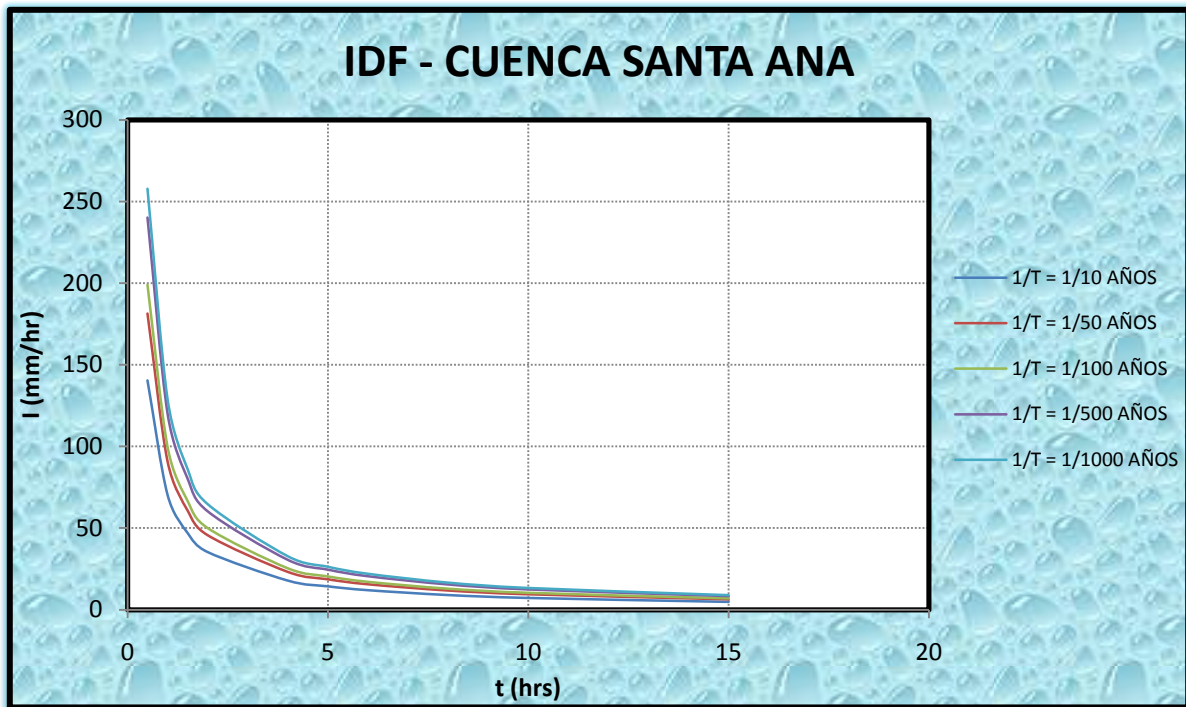


Fig. 8.2 Curvas I.D.F. para la cuenca Santa Ana
Fuente: Elaboración propia

9.1 Entorno Arcgis

9.1.1 Definición

ArcGIS es un “software” SIG, diseñado por la empresa californiana *Enviromental Systems Research Institute (ESRI)* para trabajar a nivel multiusuario. Representa la evolución constante de estos productos, incorporando los avances tecnológicos experimentados en la última década en el área de la informática y telecomunicaciones para capturar, editar, analizar, diseñar y publicar información geográfica.

9.1.2 ArcGis de escritorio (DESKTOP)

ArcGIS Desktop integra tres módulos: “**ArcCatalog**”, “**ArcMap**” y “**ArcToolBox**”.

- “**ArcCatalog**”: Esta herramienta facilita la identificación de los archivos, su localización y su administración (renombrar, borrar, mover), y permite visualizar su organización.

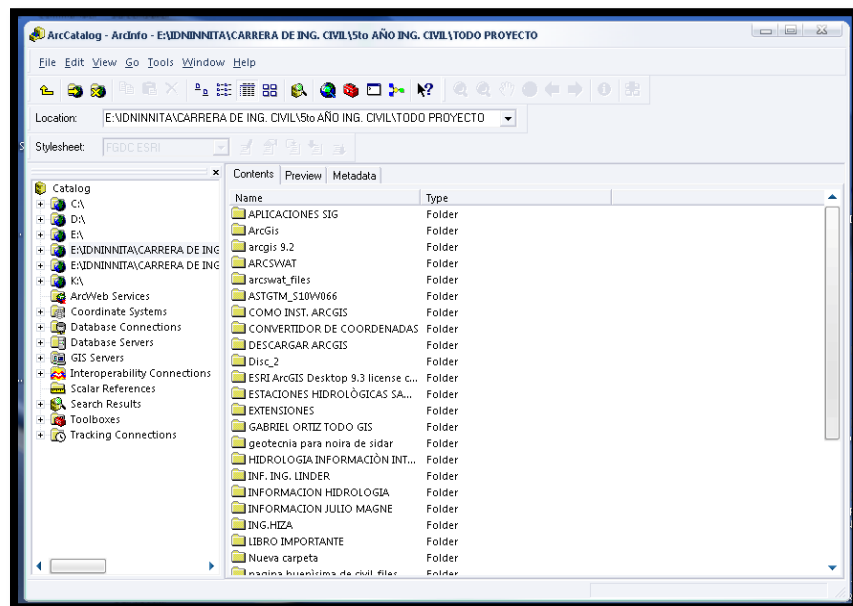


Fig. 9.1 Presentación de ArcCatalogo
Fuente: Elaboración propia

- “ArcMap” es la aplicación central de ArcGIS. Este módulo permite la visualización, consulta, análisis y presentación de los datos geográficos.

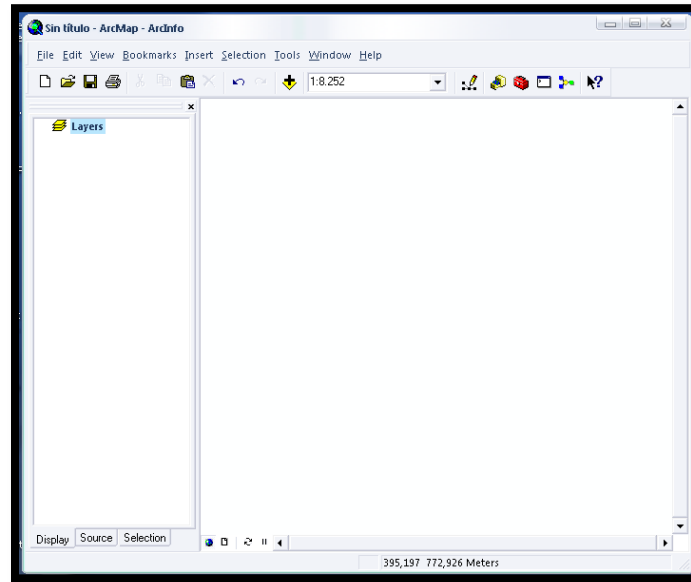


Fig. 9.2 Presentación de ArcMap

Fuente: Elaboración propia

- “ArcToolBox” es un conjunto de herramientas que permiten convertir archivos desde y hacia otros formatos, así como realizar análisis complejos, gestionar proyecciones, y realizar otras operaciones relativas a la geometría de los datos y a sus tablas asociadas.

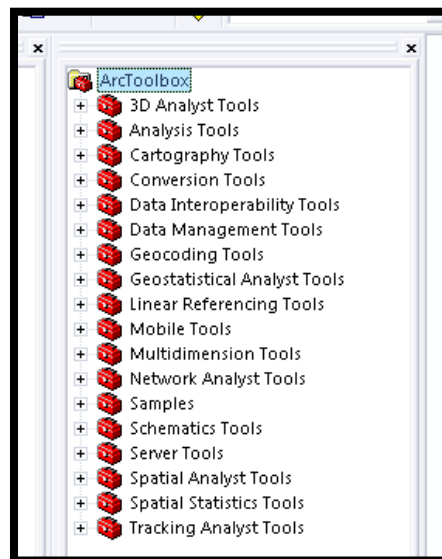


Fig. 9.3 Presentación de ArcToolbox

Fuente: Elaboración propia

9.2 Modelo digital de terreno (MDT)

El manejo de la información territorial y, en particular, de la información referente a elevaciones se ha realizado mediante el uso de modelos analógicos, tales como los mapas y planos por todos conocidos, situación que en los últimos tiempos, ha variado sensiblemente con la introducción de modelos de naturaleza digital, y en particular los denominados Modelos Digitales del Terreno (MDT).

Si la cartografía de curvas de nivel constituía la base para el estudio de los componentes de un entorno hidrológico, ahora es el MDT quien, bajo los conceptos y formulaciones existentes hoy en día para la generalidad de la cartografía en soporte digital, se encargará de proporcionar la información altitudinal detallada.

9.2.1 Obtención de un MDT

Para la obtención de un MDT, se realizó de la siguiente manera:

Se obtiene de la página web: www.gdem.aster.ersdac.or.jp, en la cual se debe registrar para posteriormente poder obtener el MDT de la zona en estudio.

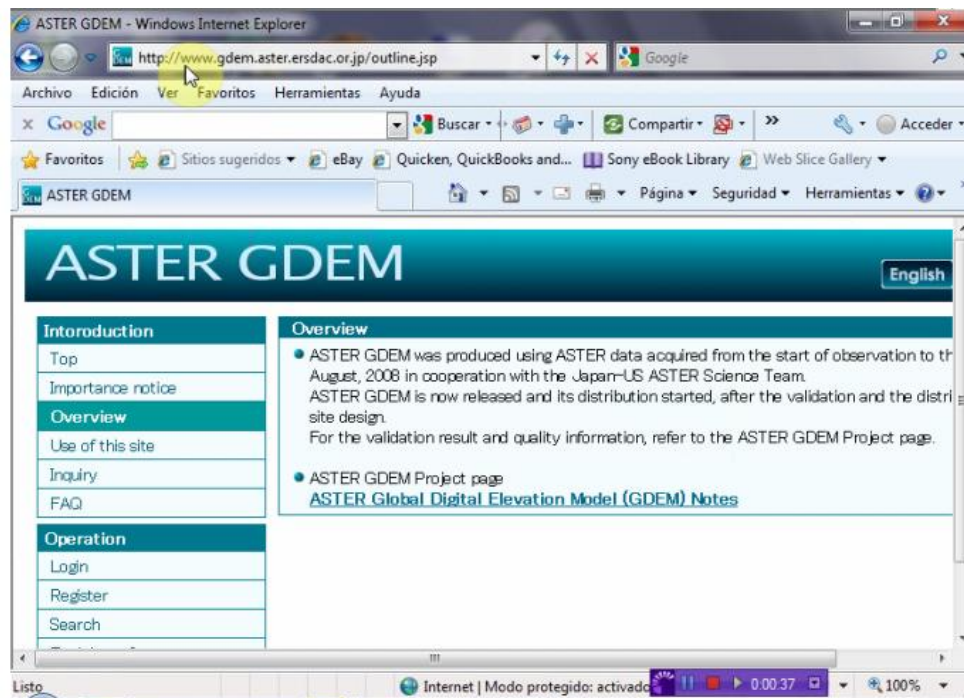


Fig. 9.4 Obtención del MDT mediante la web
Fuente: Elaboración propia

Luego que se registra en la página, se realiza la búsqueda del lugar de estudio y se procede a descargar el MDT deseado.

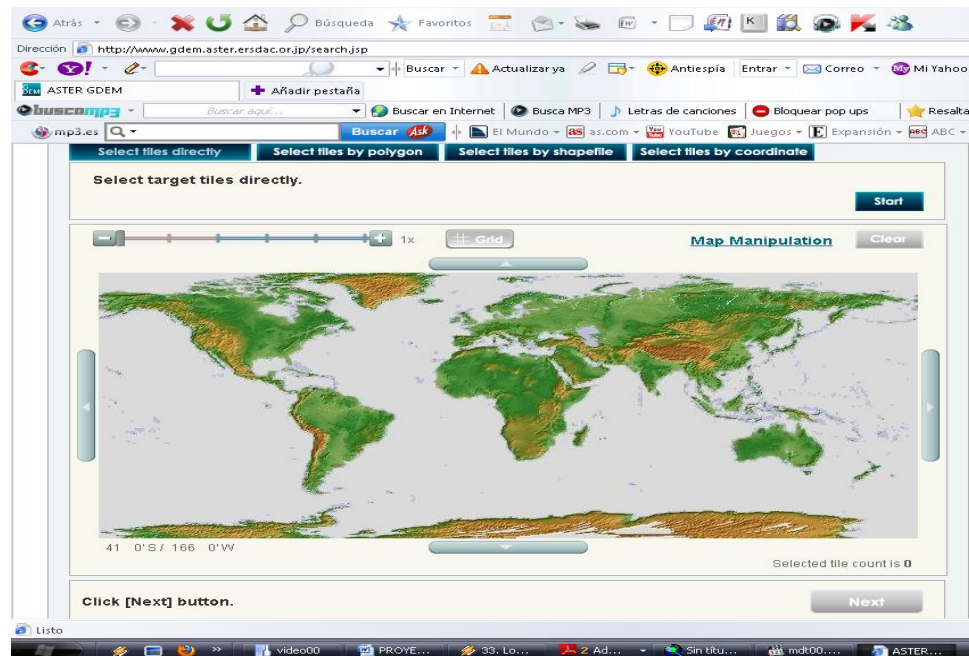


Fig. 9.5 Vista general de la ventana de descarga
Fuente: Elaboración propia

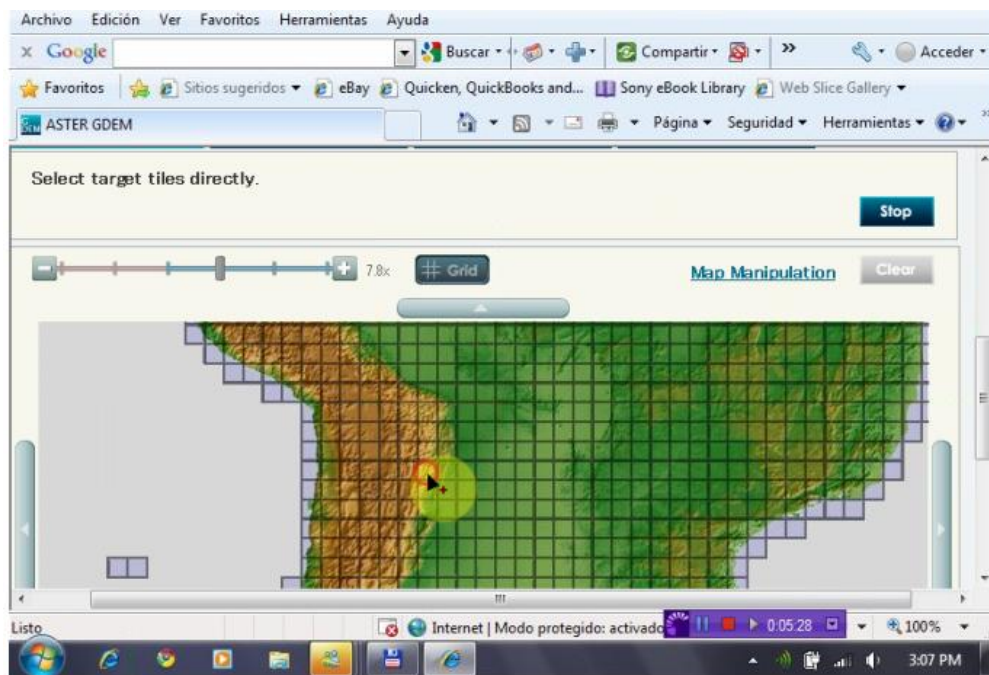
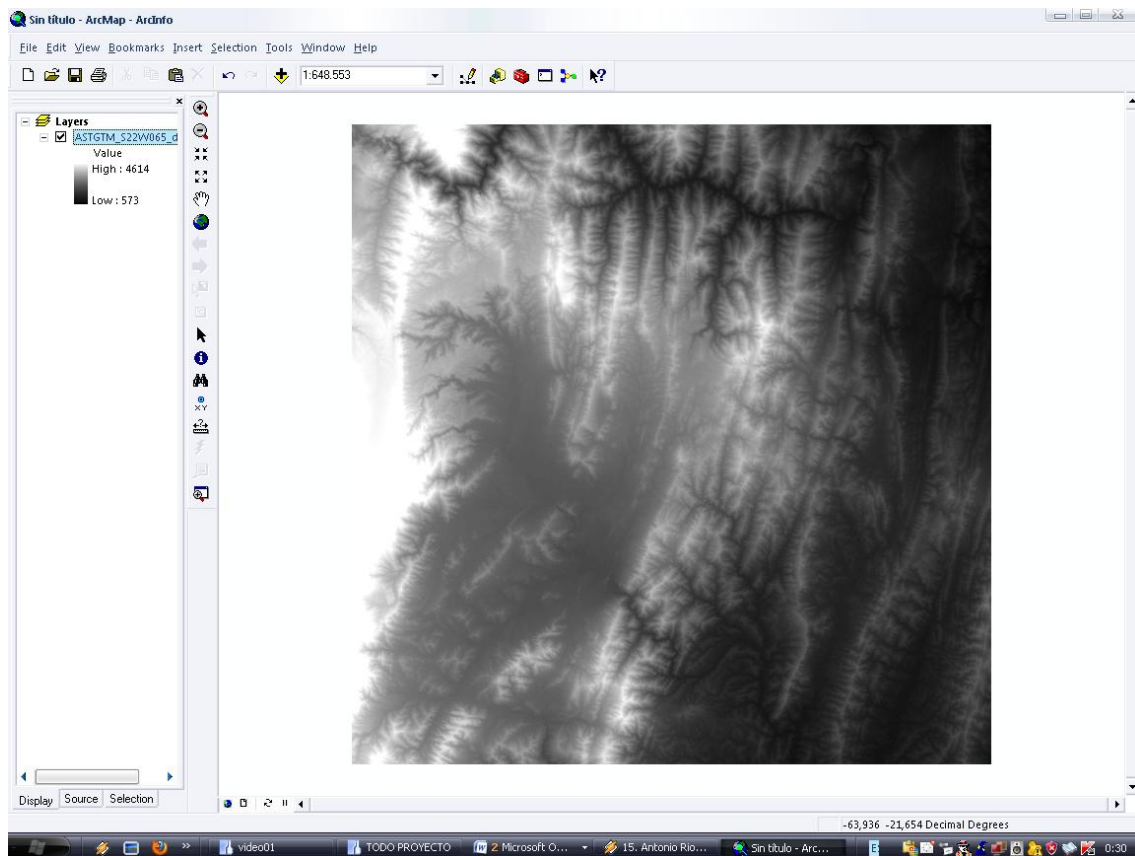


Fig. 9.6 Vista de la ventana de la selección del MDT
Fuente: Elaboración propia

9.2.2 Procesado inicial de un MDT

Para el procesamiento se empleó el programa ArcGis 9.3, que es un programa especializada para el tratamiento de información geográfica. Este programa trabaja mediante el cargado de extensiones, los cuales son menús que se los pueden seleccionar para distintos tipos de análisis, procesamiento u otra operación que se desee realizar.



*Fig. 9.7 MDT cargado en el programa
Fuente: Elaboración propia*

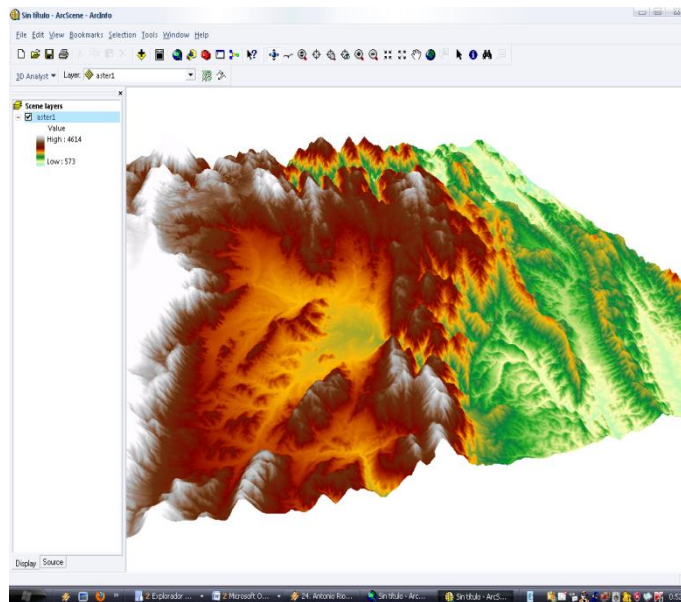


Fig. 9.8 Vista en 3D del MDT
Fuente: Elaboración propia

Para iniciar el proceso de análisis del modelo digital de terreno (MDT) debemos cortar el MDT, de acuerdo a nuestra área de estudio, debido a que el MDT original es de gran tamaño, por lo cual nos conviene trabajar sólo con el área de interés. Para posteriormente evaluar al MDT y obtener las áreas erróneas que se deben corregir.

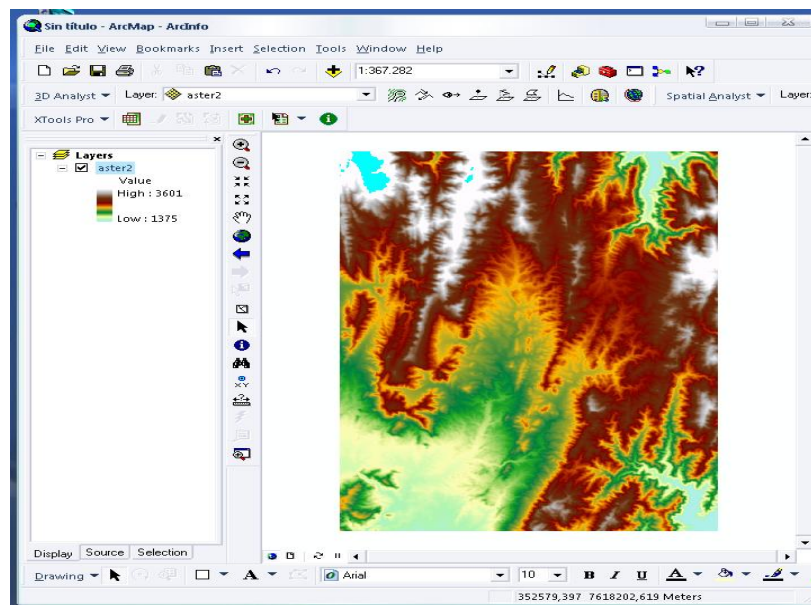
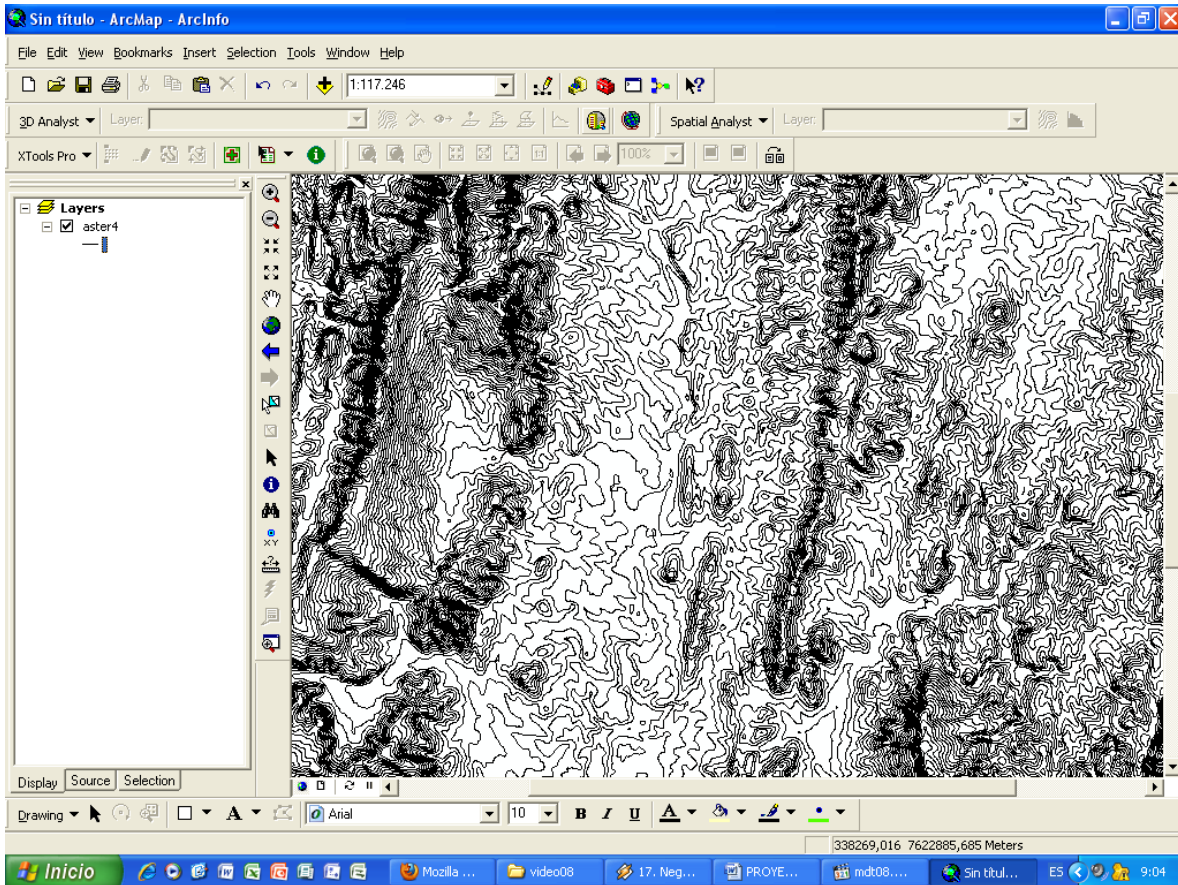


Fig. 9.9 Áreas erróneas del MDT
Fuente: Elaboración propia

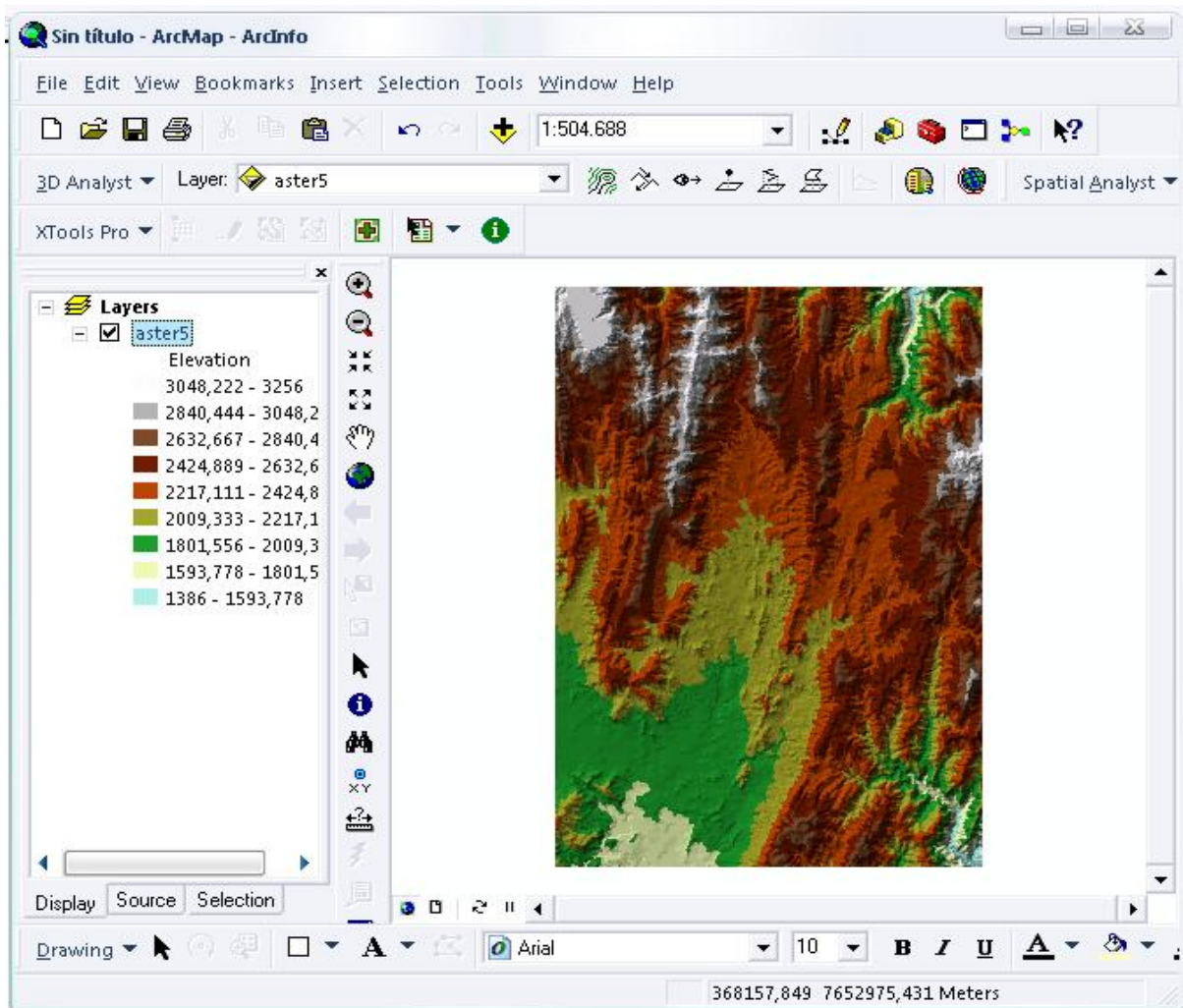
De la figura anterior, las áreas que se presentan de color celeste con áreas que presentan errores, los cuales se corregirán posteriormente.

Para proceder a la corrección de los datos, realizamos la creación de curvas de nivel para nuestro estudio trabajamos un intervalo de 22 m entre cada curva de nivel.



*Fig. 9.10 Curvas de nivel generadas a partir del MDT
Fuente: Elaboración propia*

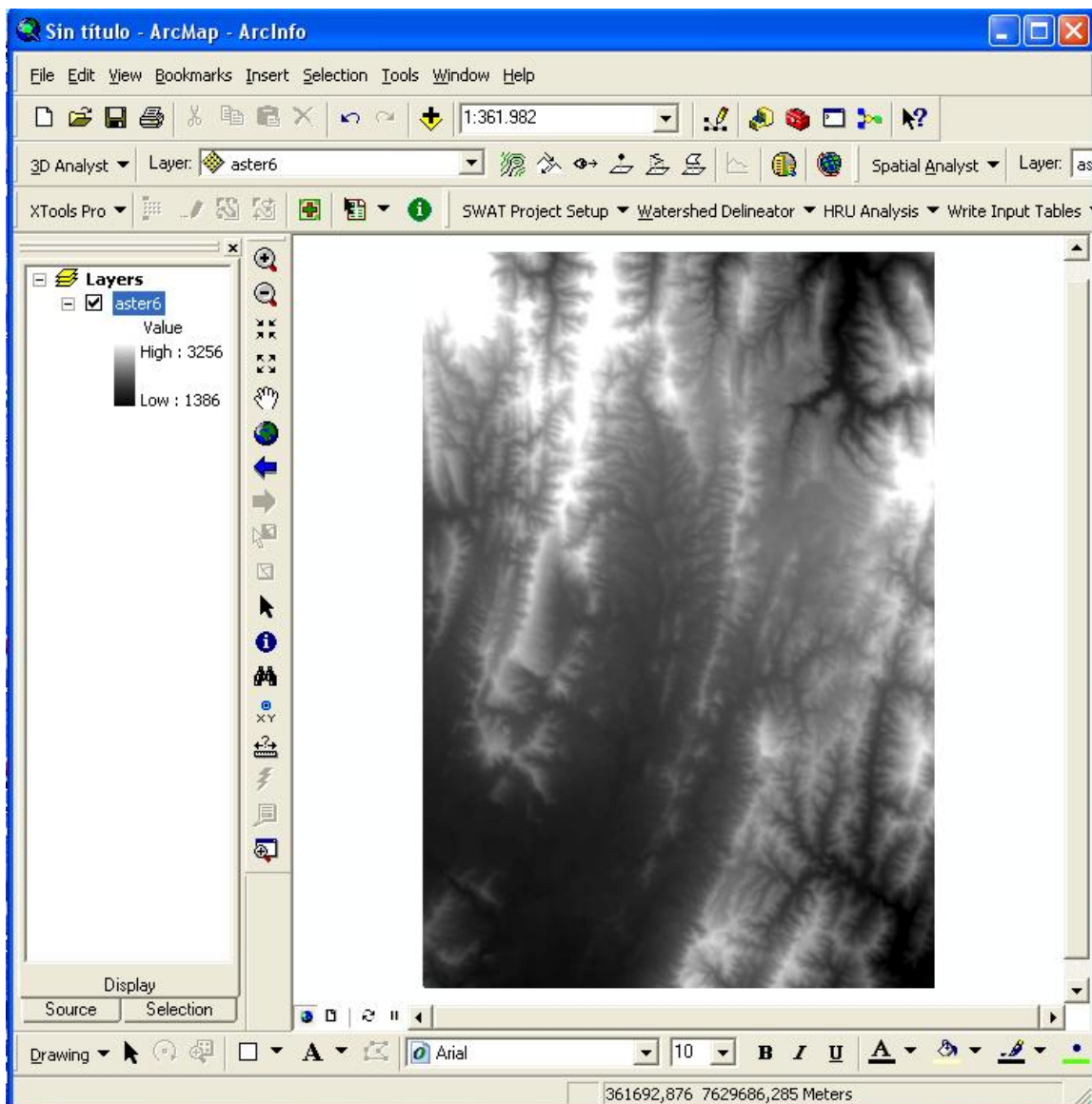
En lugares donde se ve de color blanco pertenecen a los datos erróneos, los cuales se corregirán mediante la generación de un TIN, el cual interpolará las curvas de nivel con el propósito de llenar los espacios vacíos por la información errónea.



*Fig. 9.11 Ajuste de MDT mediante TIN
Fuente: Elaboración propia*

Se puede observar que los lugares donde se tenían datos erróneos, se realizaron una interpolación correcta, la cual ahora ya tiene datos correctos en toda el área de estudio.

Una vez que se tiene los datos correctos mediante TIN, se genera nuevamente el MDT corregido, en este proceso se realiza una conversión mediante la extensión de 3D análisis → convert → TIN a RASTER, con lo cual obtenemos el modelo de elevación digital corregido como se muestra en la siguiente figura.



*Fig. 9.12 Modelo de elevación digital
Fuente: Elaboración propia*

9.3 Mapa base para el cálculo

La estimación de caudales máximos en el presente estudio está conformada con la interacción de mapas rasterizados; esto quiere decir que dependiendo del tamaño de pixel con el que se trabaje ésta almacena distintos tipos de información, mediante los cuales puede generar otros mapas de acuerdo a la necesidad de los mismos.

El uso de programas que utilizan sistemas de información geográfica, en este caso el ArcGis; para poder hacer operaciones de cálculo implica que los mapas a ser utilizados estén en formato raster, es por esta razón que se trabajó con los siguientes mapas bases.

- Mapa de pendientes (para generar coeficientes de escorrentía)
- Mapa de cobertura vegetal (para la generación de coeficientes de escorrentía)
- Mapa de uso actual de tierra (para generar coeficientes de escorrentía)
- Mapa de intensidades para diferentes periodos de retorno (estimación de caudales)

La interacción de estos mapas mediante metodologías de los sistemas de información geográfica da como resultado los siguientes mapas, necesarios para ser empleados en la estimación de caudales máximos.

- Mapa de coeficientes de escorrentía para diferentes periodos de retorno.
- Mapa base de caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

Para poder generar los diferentes mapas que se requiere, se debe realizar en primer lugar la delimitación de la cuenca y sus parámetros, para lo cual se utilizó la extensión ArcSwat y el MDT corregido.

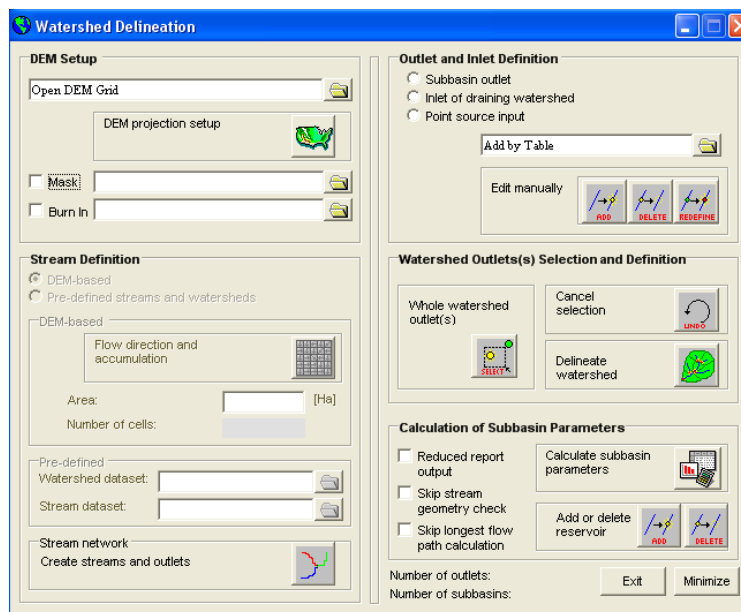
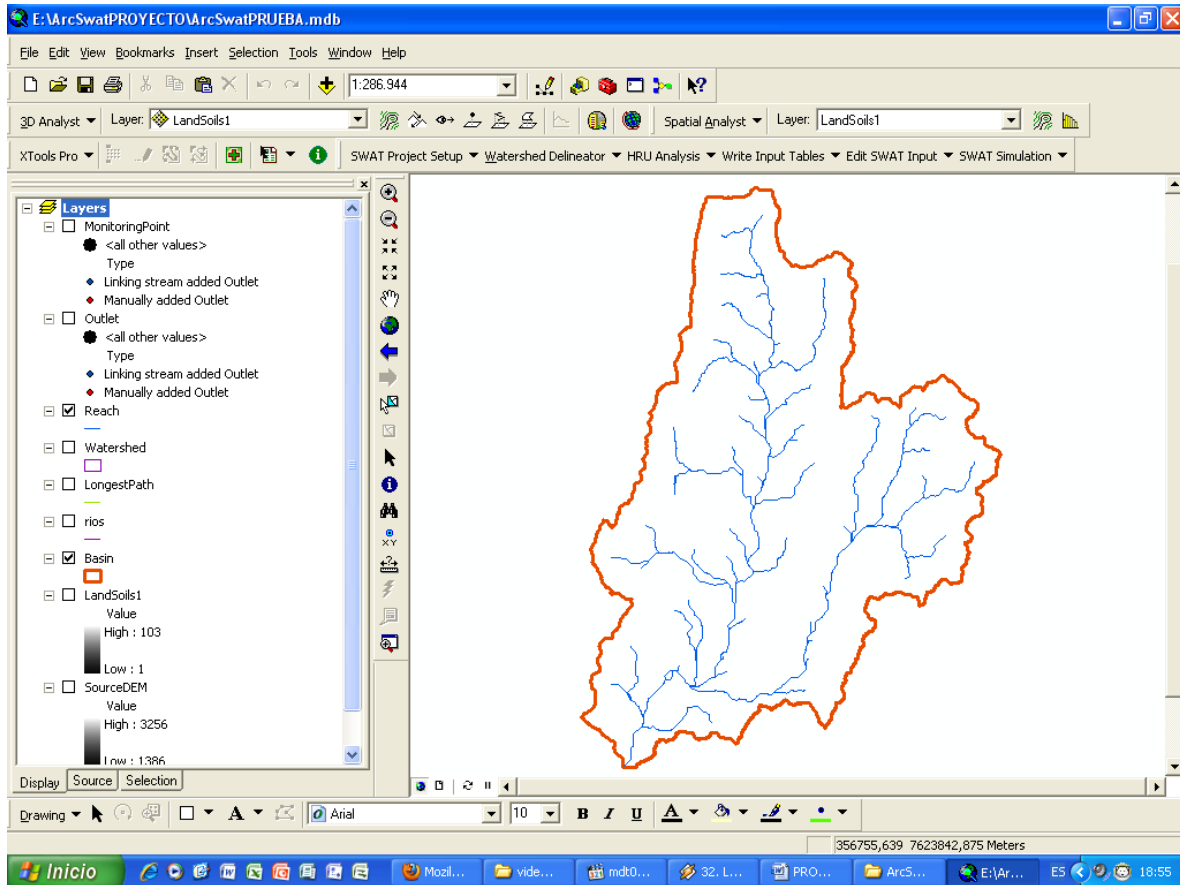


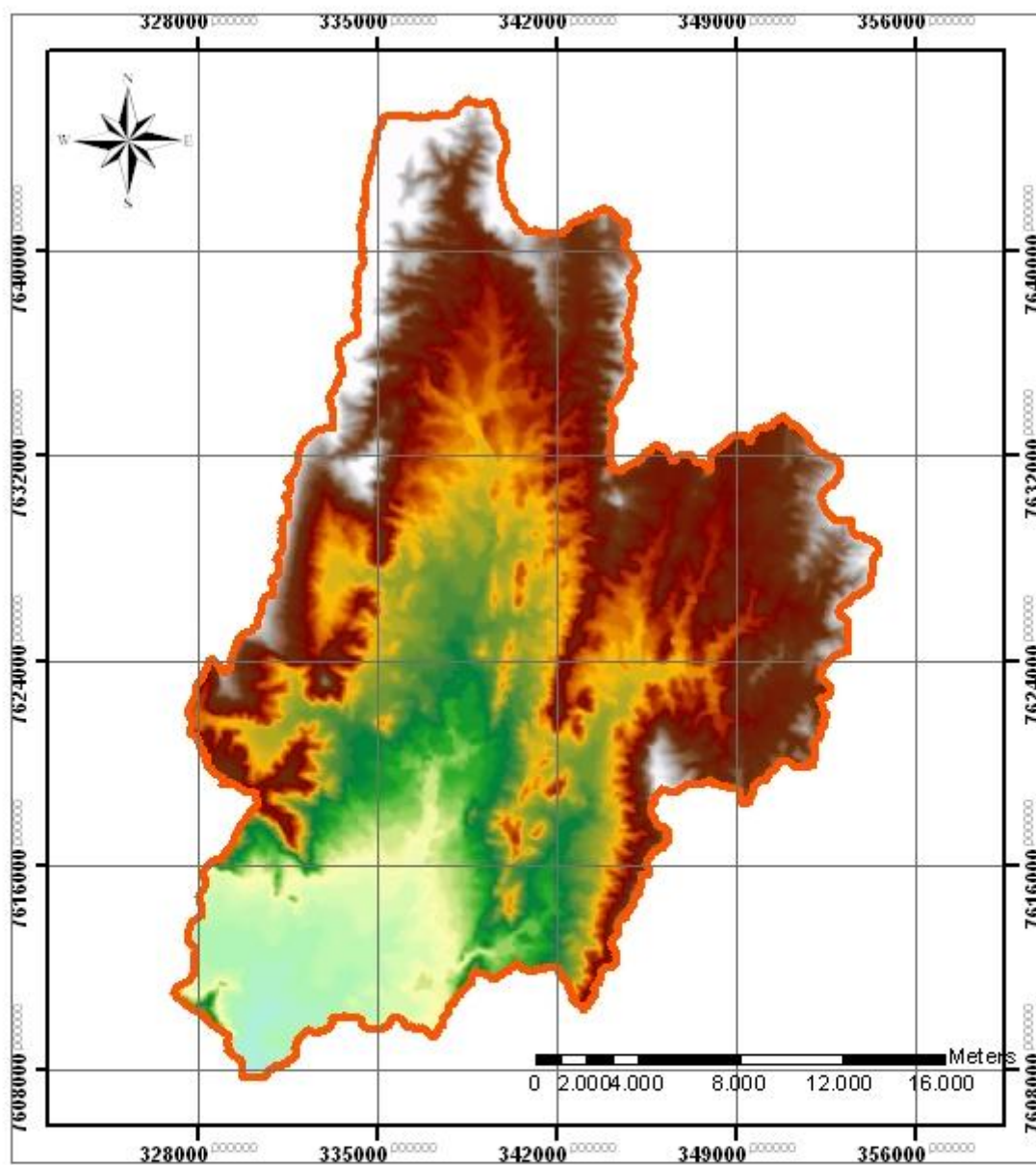
Fig. 9.13 Ventana de una herramienta de ArcSwat
Fuente: Elaboración propia

Con la extensión ArcSwat, se obtiene de forma automática la delimitación de la cuenca, red hidrográfica y sus diferentes parámetros, área, perímetro, cota máxima, cota mínima, etc.

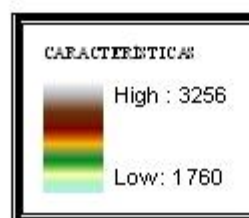


*Fig. 9.14 Delimitación de la Cuenca y red de drenaje.
Fuente: Elaboración propia*

Teniendo ya delimitada la cuenca de interés se procede a realizar el recorte del MDT corregido con el área de estudio para luego proceder a realizar la generación de los mapas que se requiera.

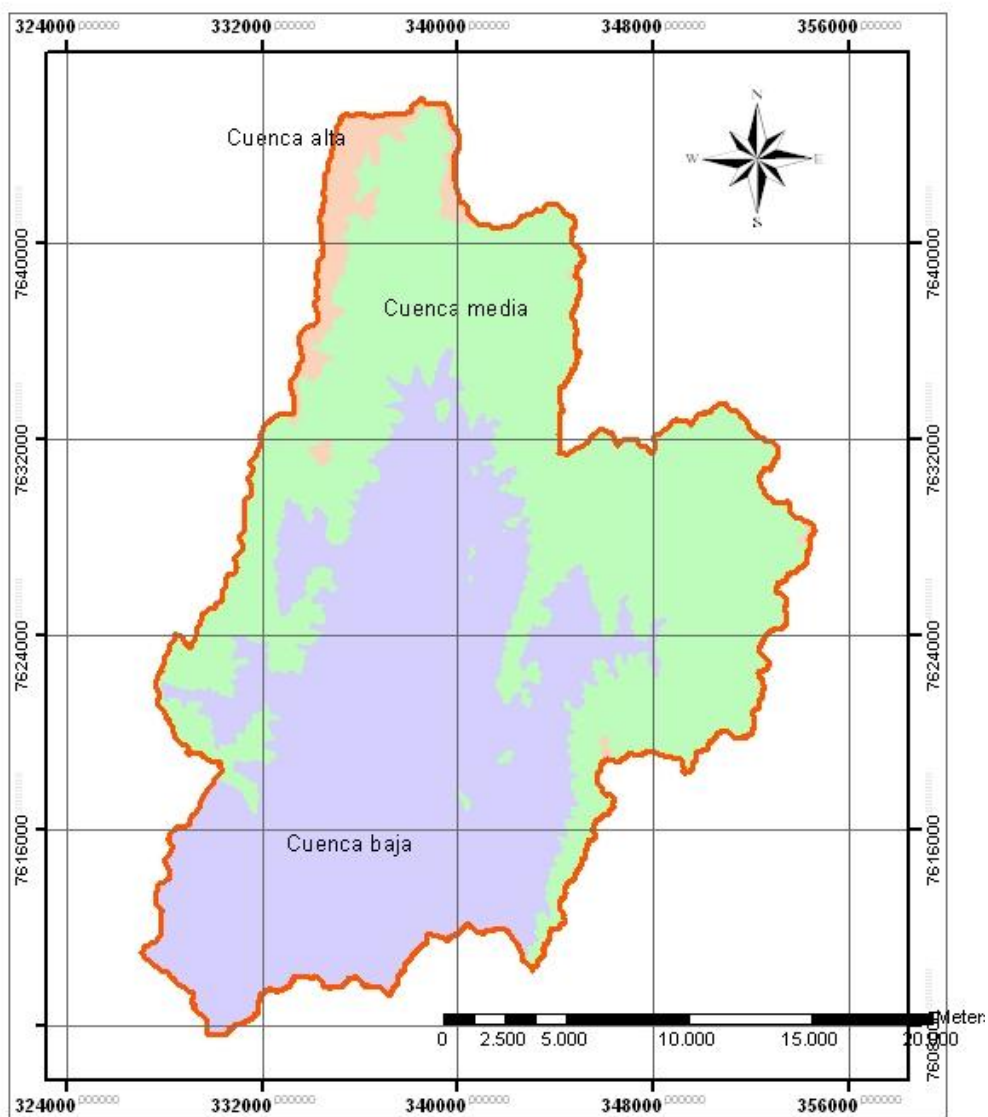
MAPA DE MODELO DIGITAL DE TERRENO DE LA CUENCA SANTA ANA

Fuente: Elaboración propia



Una vez que tenemos recortado el MDT para nuestra cuenca en específica, realizamos la obtención del mapa de la cuenca alta, media y baja.

MAPA DE DIVISI3N DE LA CUENCA SANTA ANA



ID	NOMBRE	RANGO (m.s.n.m.)	Area (Ha)
1	Cuenca baja	0 - 2258,67	258,910
2	Cuenca media	2258,67 - 2757,33	269,536
3	Cuenca alta	2757,33 - 3256	21,015

9.3.1 Mapa de pendientes

La pendiente puede describirse de la manera más simple como la inclinación de una determinada superficie de la tierra o de un determinado relieve. El relieve está definido como las elevaciones o irregularidades de la superficie de la tierra consideradas en conjunto.

Analizar y representar gráficamente la pendiente es importante; por los siguientes aspectos:

- Tiene mucha influencia en la estabilidad de laderas, movimientos en masa, drenaje natural del suelo, velocidad y capacidad de transporte del agua, procesos de acumulación de material, procesos de formación y erosión del suelo.
- Es una propiedad del suelo que determina el uso actual y potencial.

El mapa de pendientes usado en este estudio se obtuvo a partir del MDT, corregido para nuestra área de estudio.

9.3.1.1 Resultados

Según el mapa de pendientes, el territorio de la cuenca del río Santa Ana presenta 6 clases de relieves en términos de pendientes según superficie.

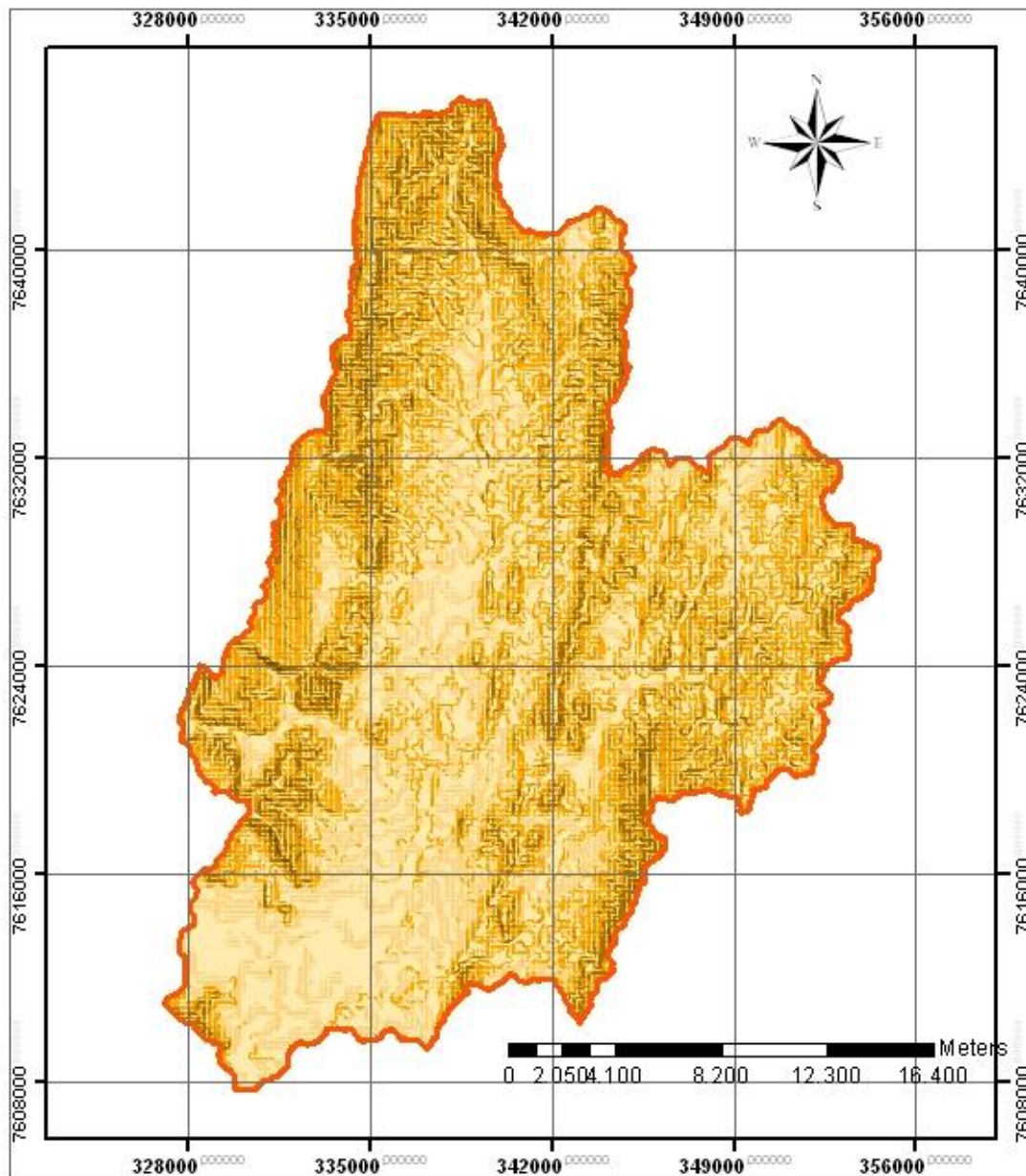
A continuación; se presenta un cuadro resumen de los datos obtenidos del mapa de pendientes.

Cuadro 9.1 Cuadro resumen del mapa de pendientes

Pendiente (%)	Especificaciones	Area (km ²)	% del Area
0-2	Zona con pendiente llana	197,332	34,53%
2-10	Zona con pendiente suave	123,917	21,68%
10-15	Zona con pendiente moderada	124,379	21,76%
15-30	Zona con pendiente fuerte	76,794	13,44%
30-50	Zona con pendiente muy fuerte	47,666	8,34%
>50	Zona con pendiente escarpada	1,373	0,24%

Fuente: Elaboración propia

MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA SANTA ANA



ID	Pendiente (%)	Especificaciones	Area (M2)
1	0-2	Zona con pendiente llana	197,332
2	2-10	Zona con pendiente suave	123,917
3	10-15	Zona con pendiente moderada	124,379
4	15-30	Zona con pendiente fuerte	76,794
5	30-50	Zona con pendiente muy fuerte	47,666
6	>50	Zona con pendiente escarpada	1,373

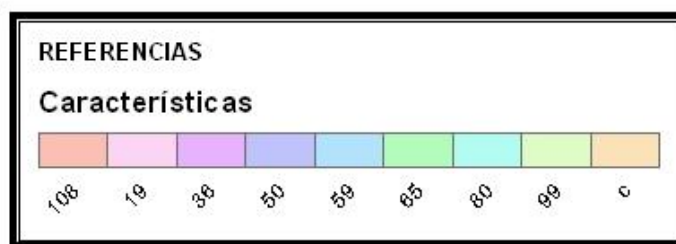
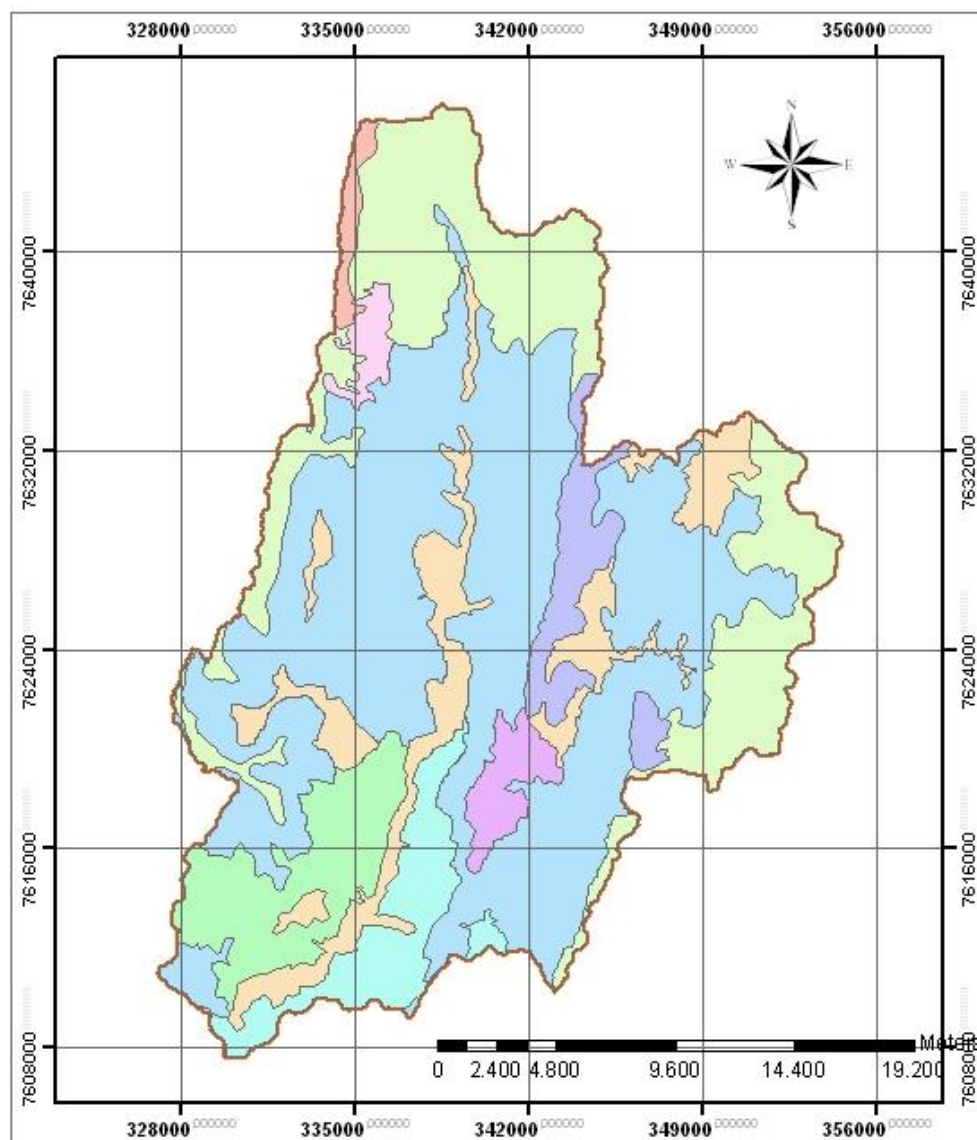
9.3.2 Mapa de cobertura vegetal

Este mapa se limita sólo a la vegetación natural debido a su importancia en el paisaje, entre otros aspectos, como regulador de procesos hídricos, protector o regulador de procesos erosivos, hábitat de la fauna silvestre y como recurso de uso básico en la actividad productiva del poblador local.

El mapa de cobertura vegetal tiene como principal objetivo describir las principales características de los tipos de vegetación natural identificados, como información básica para la aptitud de la tierra y estimaciones hidrológicas.

El coeficiente de escorrentía depende de numerosos factores, uno de ellos en la cobertura vegetal existente en la zona de estudio, y que este factor conjuntamente con la pendiente varía el valor que adoptará C , dependiendo de las características de ambos, por ejemplo los coeficientes de escorrentía variarán de una cobertura vegetal de bosque a otra de pastizales, los mismos que tendrán una variación dependiendo de su pendiente.

MAPA DE COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA SANTA ANA



Cuadro 9.2 Leyenda del mapa de vegetación

Código Mapa	Código UNESCO	Área (m ²)	Área (km ²)	% Área	Descripción		
					Clase de formación	Subclase	Grupo
19	2A3c	6711950	6,712	1,17	Bosque ralo	Siempre verde	Semidecduo
36	3A3c	11861500	11,862	2,08	Matorral	Siempre verde	Semidecduo
50	3B4c	23057050	23,057	4,03	Matorral	Caducifolio	Deciduo por sequia
59	3C4c	268316930	268,317	46,95	Matorral	Xeromorfico	Deciduo por sequia
65	3C5c	42307600	42,308	7,40	Matorral	Xeromorfico	Espinoso
80	4C5c	31672000	31,672	5,54	Matorral enano	Xeromorfico	Espinoso
99	5F9c	122186600	122,187	21,38	Herbácea	Graminoide baja	Sinusia arbustiva
108	5F12d	5559840	5,560	0,97	Herbácea	Graminoide baja	Sin sinusia
c	6	59789026,8	59,789	10,46	Áreas agrícolas y pasturas (sembradas y de sucesión secundaria)		
		Total	571,46	100,00			

Fuente: Zonisig.

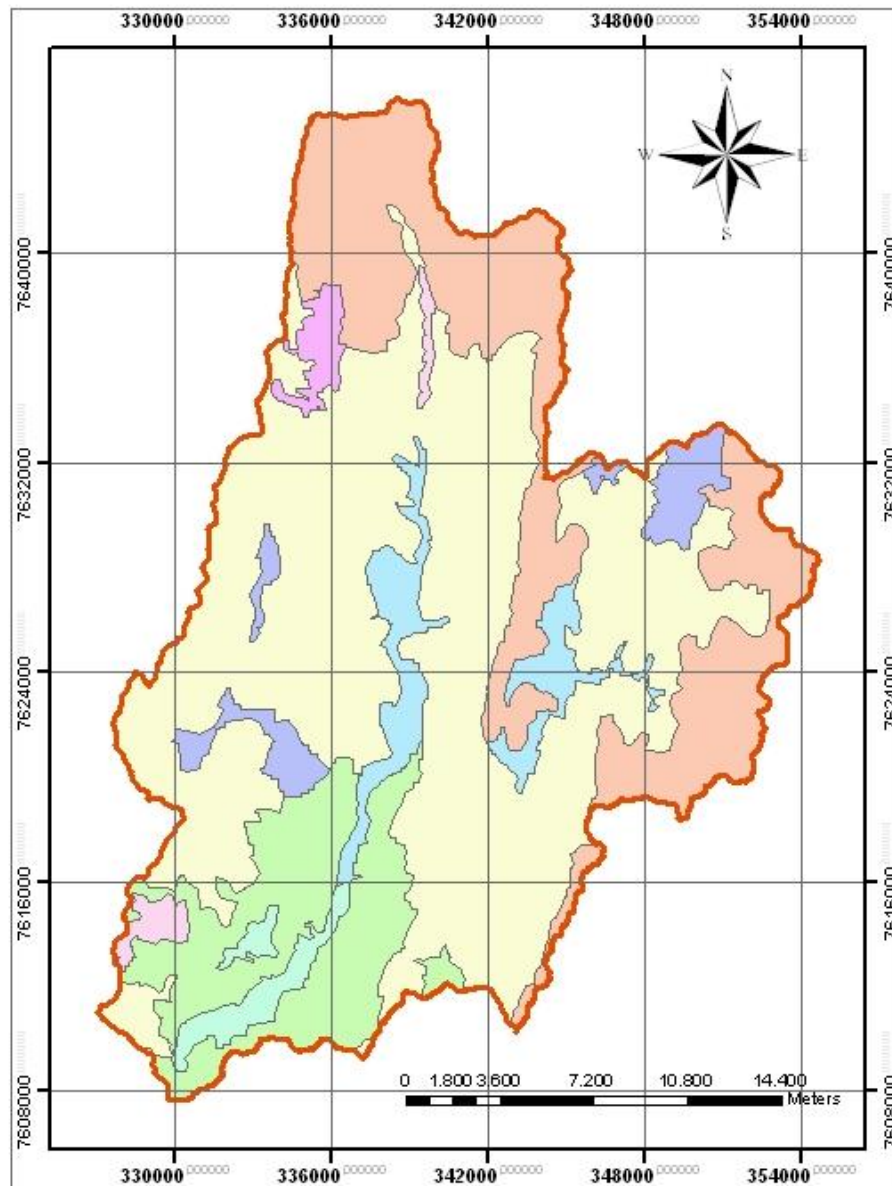
9.3.3 Mapa de uso de la tierra

El análisis del uso actual permite establecer el grado de especialización de los factores de producción de acuerdo al nivel tecnológico, los efectos diferenciales que pueden tener las actividades humanas en cada ecosistema o unidad de terreno y establecer los niveles de sostenibilidad o de alteración y depredación de los recursos naturales, especialmente de la vegetación natural originando o agravando procesos de degradación del paisaje como la erosión del suelo, disminución de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo entre otros.

El mapa de uso actual de la tierra tiene como objetivo:

- Identificar y mapear las diferentes formas de ocupación del paisaje por actividades la población local en la cuenca del río Santa Ana.
- Describir las diferentes unidades de uso mapeadas con énfasis en la alteración de la vegetación natural y procesos de degradación o de erosión del suelo.

MAPA DE USO DE TIERRA DE LA CUENCA SANTA ANA



Cuadro 9.3 Cuadro resumen de mapa de uso de la tierra

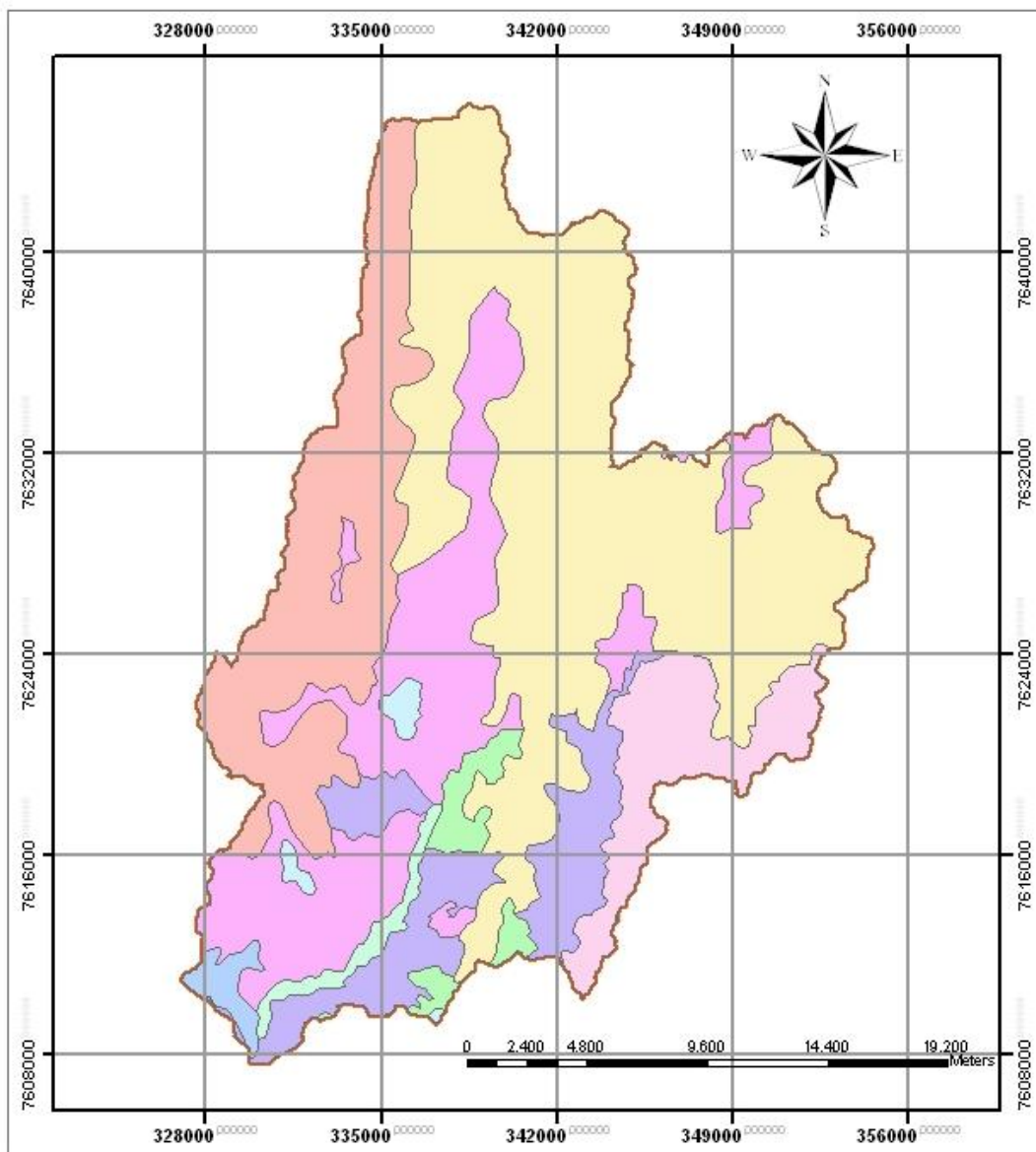
CÓDIGO MAPA	DESCRIPCIÓN	ÁREA (Km²)	% ÁREA
	USO AGROPECUARIO INTENSIVO		
1	Agrícola intensivo con cultivos anuales	6,14	1,07
2	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales	10,93	1,91
	USO AGROPECUARIO EXTENSIVO		
7	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos	130,62	22,86
9	Agropecuaria extensiva con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	27,25	4,77
11	Agropecuaria extensiva con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	70,15	12,28
	USO AGROSILVOPASTORIL		
14	Silvopastoril con vacunos, caprinos, ovinos y extracción de productos del bosque	6,76	1,18
17	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	19,47	3,41
18	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	300,15	52,52
	TOTAL	571,461	100,000

Fuente: Zonisig.

9.3.4 Mapa de tipo de suelo

El mapa de tipo de suelo tiene importancia en nuestro estudio, debido a que para poder determinar el coeficiente de escorrentía necesitamos saber el tipo de suelo que presenta nuestra cuenca.

MAPA DE TIPO DE SUELO DE LA CUENCA SANTA ANA



REFERENCIAS	
CARACTERISTICAS	
	1
	14
	2
	22
	28
	3
	33
	X
	9

Cuadro 9.4 Cuadro resumen de mapa de Tipo de Suelo

CÓDIGO MAPA	DESCRIPCIÓN (FAO)	ÁREA (Km²)	% ÁREA
1	Consociación Leptosol	41,08	7,19
2	Asociación Leptosol - Cambisol - Regosol	237,32	41,53
3	Asociación Leptosol - Cambisol - Phaeozem	4,26	0,75
4	Asociación Leptosol - Phaeozem	7,16	1,25
9	Asociación Regosol - Solonetz- lixisol	52,53	9,19
14	Asociación Cambisol - Leptosol	99,19	17,36
22	Asociación Phaeozem - Cambisol	111,26	19,47
28	Consociación Calcisol	5,93	1,04
33	Asociación Calcisol - Lixisol	12,74	2,23
TOTAL		571,46	100,00

Fuente: Zonisig.

9.3.5 Mapa de intensidades de lluvia para diferentes periodos de retorno

La ley de distribución de las precipitaciones de máxima intensidad está definida a partir de la ley Gumbel (Chow et Al), esta ley es una distribución de eventos hidrológicos extremos en su análisis se emplean secuencias de observaciones máximas y mínimas de un conjunto de datos, es decir se analizan valores extremos, esta distribución toma en cuenta que el número de estaciones cuya característica de distribución de (K_{Di}) y moda (E_{Di}) de la altura de lluvia máxima caída en un día (h_{dT}), asuma un único valor K_D y E_D , por lo consiguiente esto puede considerarse que para toda la cuenca existirá un único valor de intensidad referido a un determinado periodo de retorno que estará distribuido en toda la cuenca.

La intensidad se obtendrá de las curvas I.D.F., para una lluvia con un periodo de retorno igual al tiempo de concentración de la cuenca.

9.3.4.1 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda una gota de agua, situada en el punto más alejado (desde el punto de vista hidráulico) en alcanzar el punto de desagüe de la cuenca. Constituye uno de los parámetros más importantes en los modelos de precipitación – escorrentía, pues la duración de la tormenta de diseño se define en base a él.

Existen numerosas expresiones para determinar el tiempo de concentración, en algunas expresiones que se utilizaron para el cálculo del tiempo de concentración se ha propuesto las siguientes ecuaciones empíricas que a continuación se muestran:

➤ Giandotti.

$$t_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1,5 * L}{25,3 * S * L}$$

Ec. 9.1

➤ California.

$$tc = 0,066 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

Ec. 9.2

➤ Ventura – Heras.

$$tc = 0,05 \sqrt{\frac{A}{S}}$$

Ec. 9.3

➤ Kipich.

$$tc = 0,871 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Ec. 9.4

Donde:

L: Longitud del río principal (km)

S: Pendiente media (m/m)

A: Superficie de la cuenca (km²)

H: Desnivel (m)

Cuadro 9.5 Tiempos de Concentración

DATOS		METODOS	Tc (h)	PROMEDIO
A (km ²) =	571,642	Giandotti	5,480	5,18
L (km) =	48,63	California	5,436	
S (m/m) =	0,025	Ventura - Heras (*)	7,560	
H (m) =	1496	Kirpich	4,635	

* Método no promediado

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de concentración asumido para la cuenca del río Santa Ana es de 5 h, este es el promedio de los valores cercanos entre sí del cuadro 9.5.

9.3.4.2 Metodología

Para la elaboración de los mapas que representen de forma espacial el valor de la intensidad distribuida en toda la cuenca se realizó los siguientes pasos:

- Se ubicó las estaciones elegidas para el estudio mediante una tabla Excel que contenga la ubicación X Y, y el valor de la intensidad como un valor de Z, teniendo la tabla en ArcGis se la convierte en un Shape para poder realizar la correspondiente interpolación.
- Una vez ubicadas las estaciones con un único valor de intensidad se interpolaron de tal manera que el resultado de la interpolación es un mapa en formato raster que abarca toda el área de la cuenca del río Santa Ana.

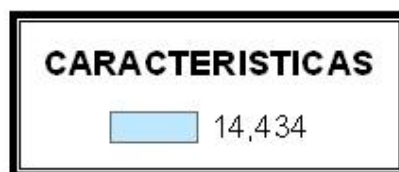
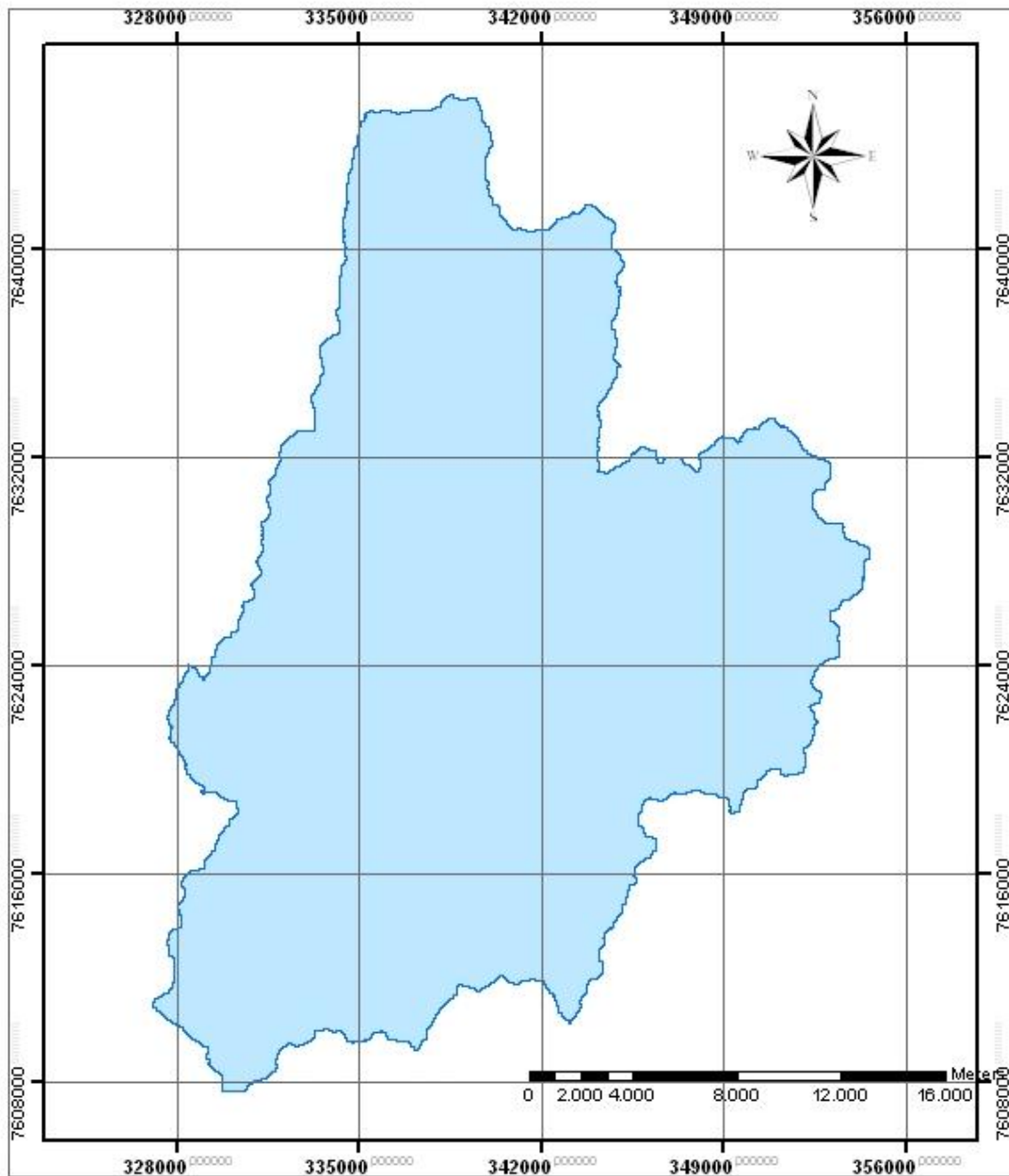
El procedimiento indicado anteriormente se realiza para los diferentes periodos de retorno y así obtener los diferentes mapas de intensidades utilizados en este estudio.

Cuadro 9.6 Intensidades para distintos periodos de retorno

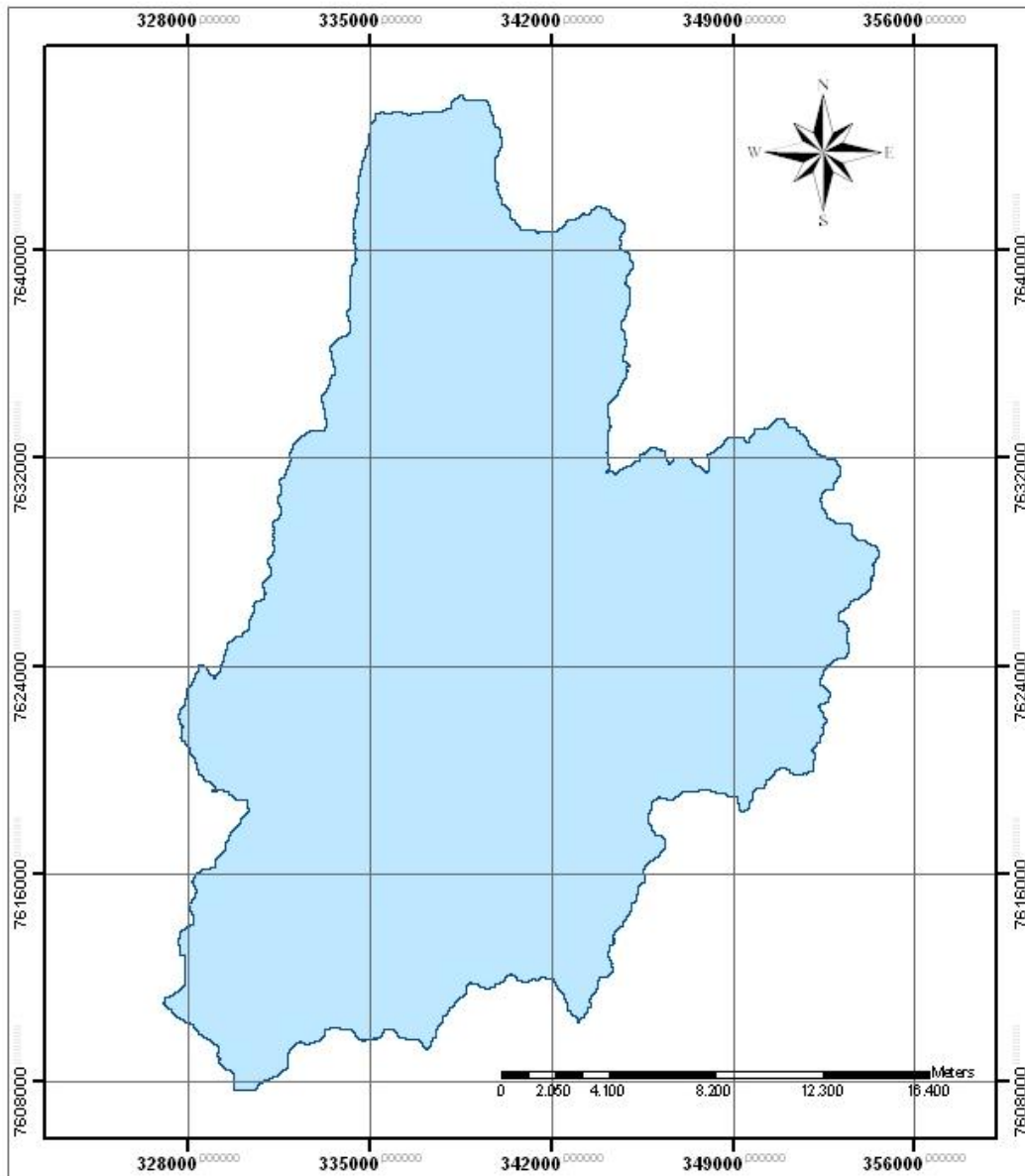
T (AÑOS)	ECUACIÓN (tc = 5 h)	I	htT / tc
		(mm/h)	
10	$I = 70,450 * t^{-0,985}$	14,417	14,434
50	$I = 90,963 * t^{-0,985}$	18,598	18,637
100	$I = 99,798 * t^{-0,985}$	20,399	20,447
500	$I = 120,312 * t^{-0,986}$	24,579	24,611
1000	$I = 129,147 * t^{-0,986}$	26,380	26,418

Fuente: Elaboración propia.

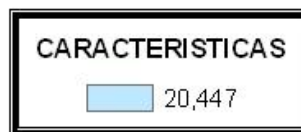
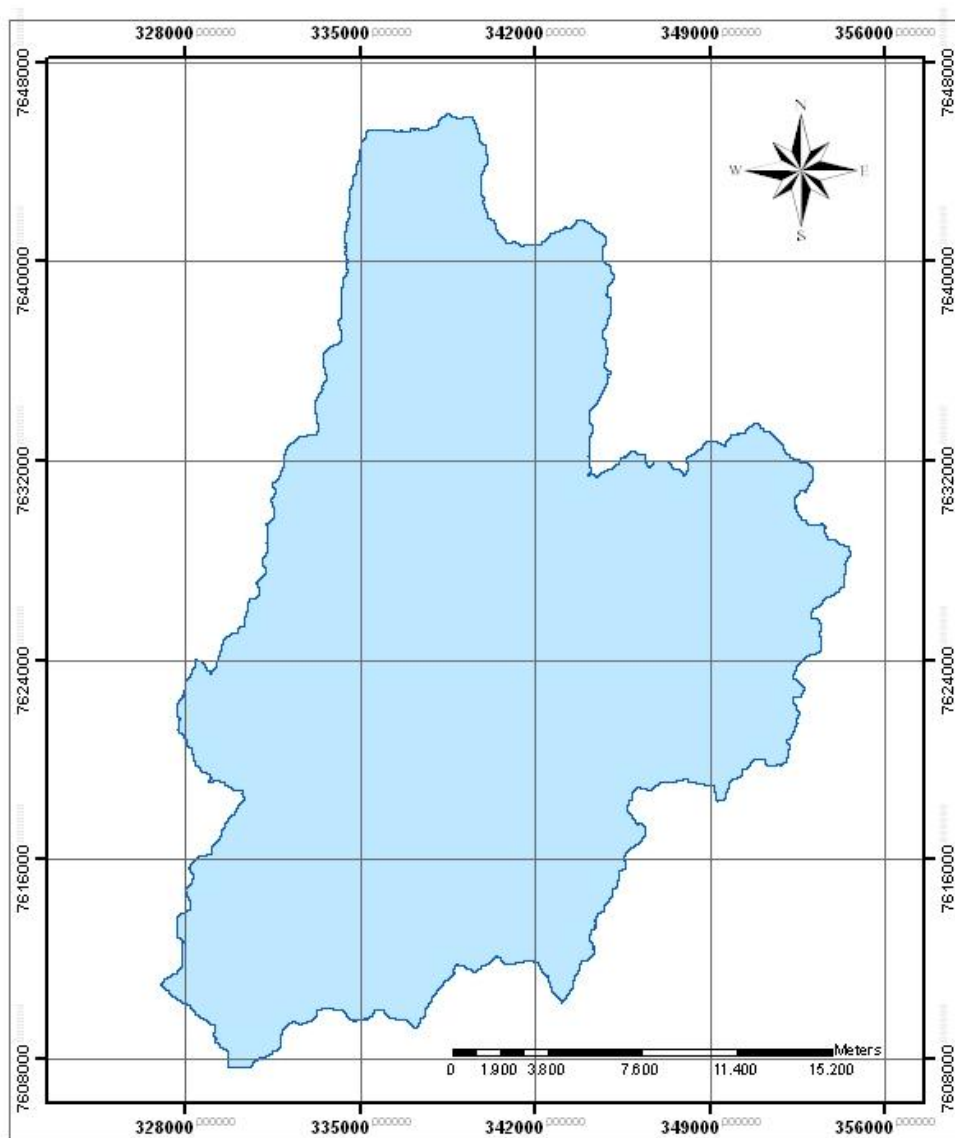
MAPA DE INTENSIDADES T = 10 AÑOS



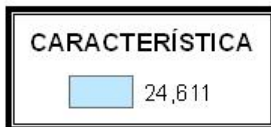
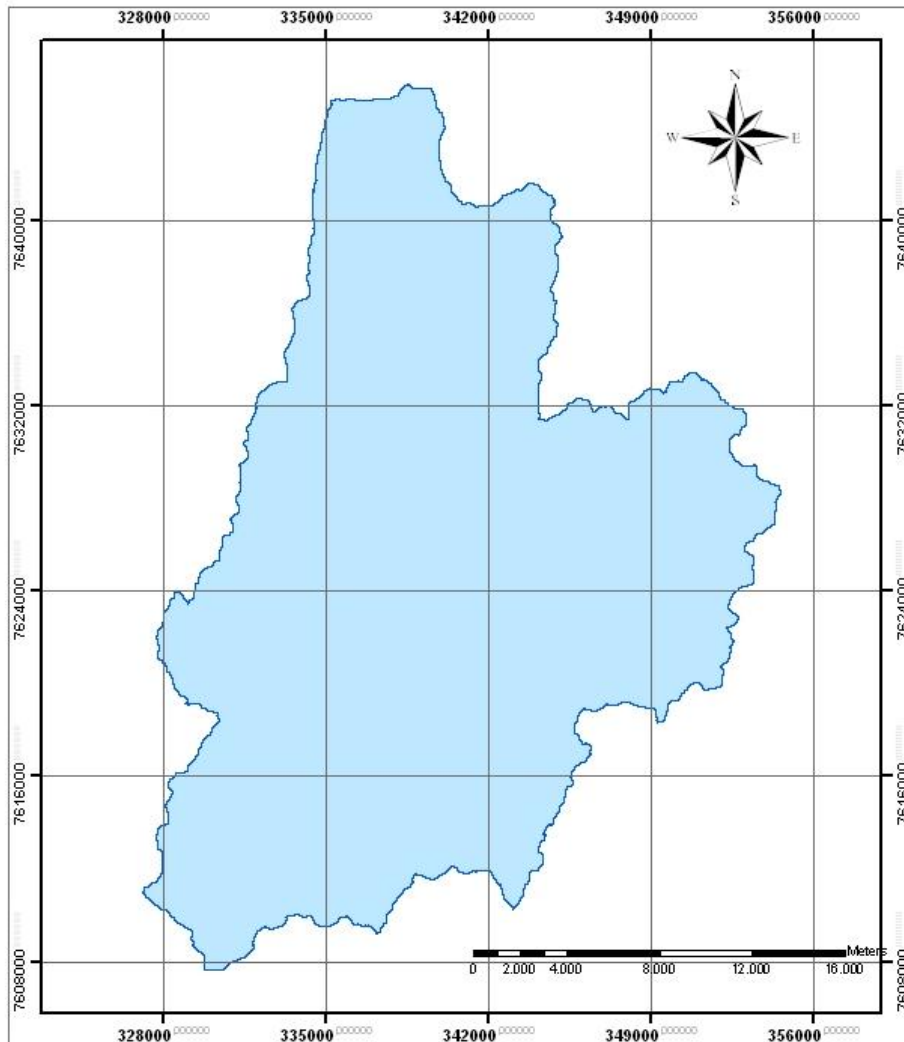
MAPA DE INTENSIDADES T = 50 AÑOS



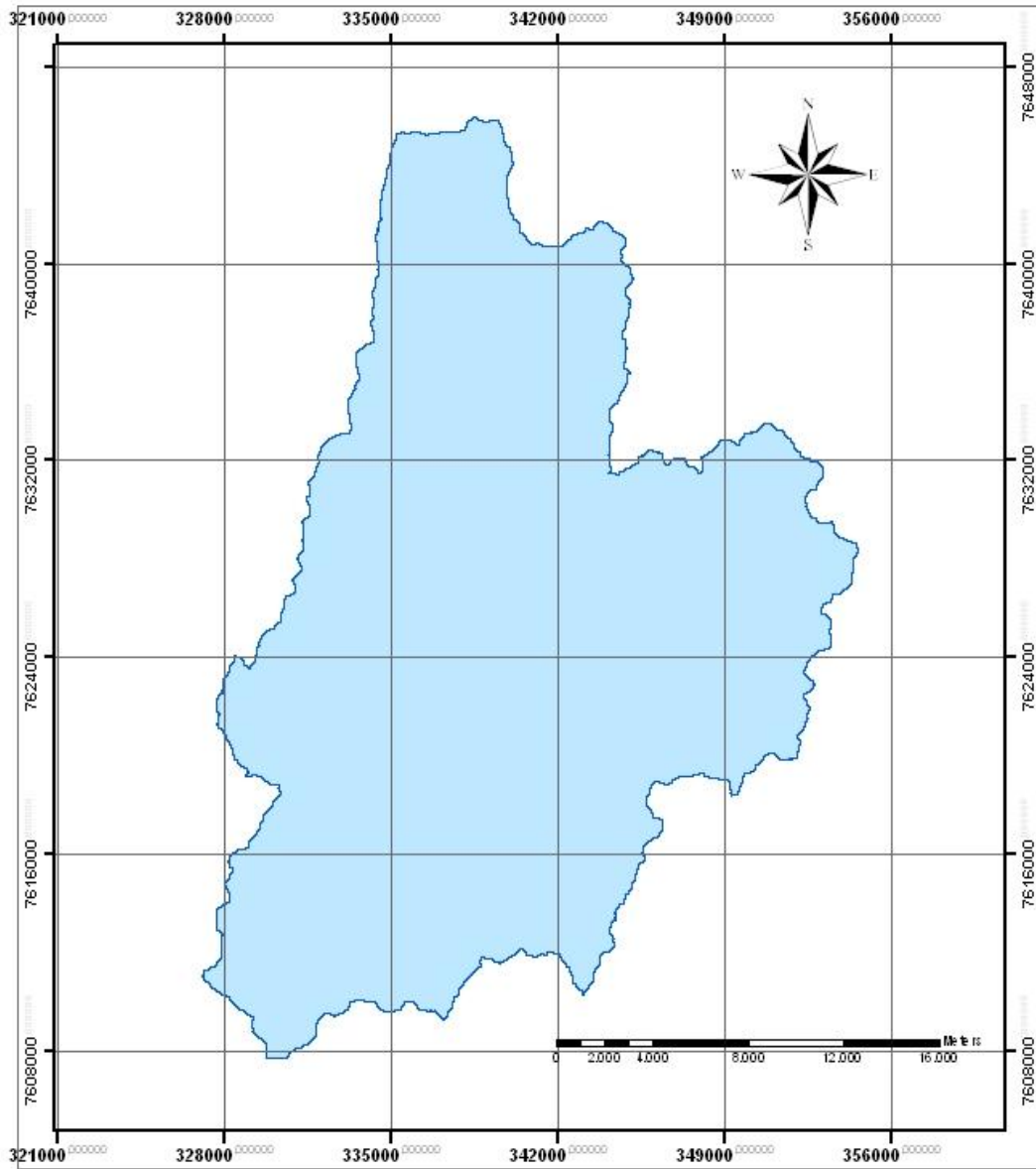
MAPA DE INTENSIDADES T = 100 AÑOS



MAPA DE INTENSIDADES T = 500 AÑOS



MAPA DE INTENSIDADES T = 1000 AÑOS



9.3.6 Mapa de coeficientes de escorrentía para diferentes periodos de retorno

El método de la ecuación racional requiere 3 datos, área de la cuenca, intensidad para un determinado periodo de retorno y el coeficiente de escorrentía. El coeficiente de escorrentía depende de numerosos factores como: del tipo de terreno, tipo de cobertura vegetal existente, la pendiente, etc. El coeficiente de escorrentía puede tomar valores comprendidos entre cero y uno.

Cuadro 9.7 Coeficientes de escorrentía

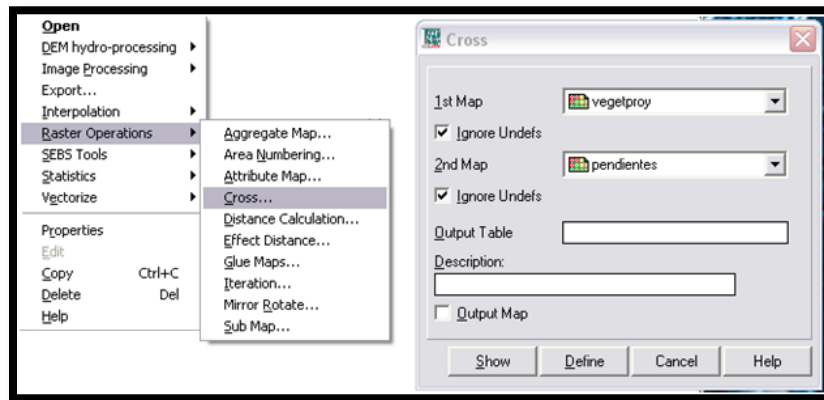
Características de la Superficie	Periodo de Retorno en Años						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto / techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc) Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano 0 - 2 %	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio 2 - 7 %	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente > 7 %	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
Condición promedio (cubierta de pasto menor del 50% al 75% del área)							
Plano 0 - 2 %	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio 2 - 7 %	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente > 7 %	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Condición promedio (cubierta de pasto mayor al 75% del área)							
Plano 0 - 2 %	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio 2 - 7 %	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente > 7 %	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Áreas de cultivo							
Plano 0 - 2 %	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio 2 - 7 %	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente > 7 %	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano 0 - 2 %	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio 2 - 7 %	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente > 7 %	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano 0 - 2 %	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio 2 - 7 %	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente > 7 %	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58
Semiurbanas	0.35						
Afloramientos Rocosos	0.75						

Fuente: Hidrología Aplicada Chow et Al.

9.3.7 Metodología

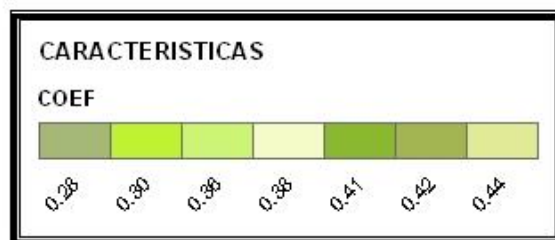
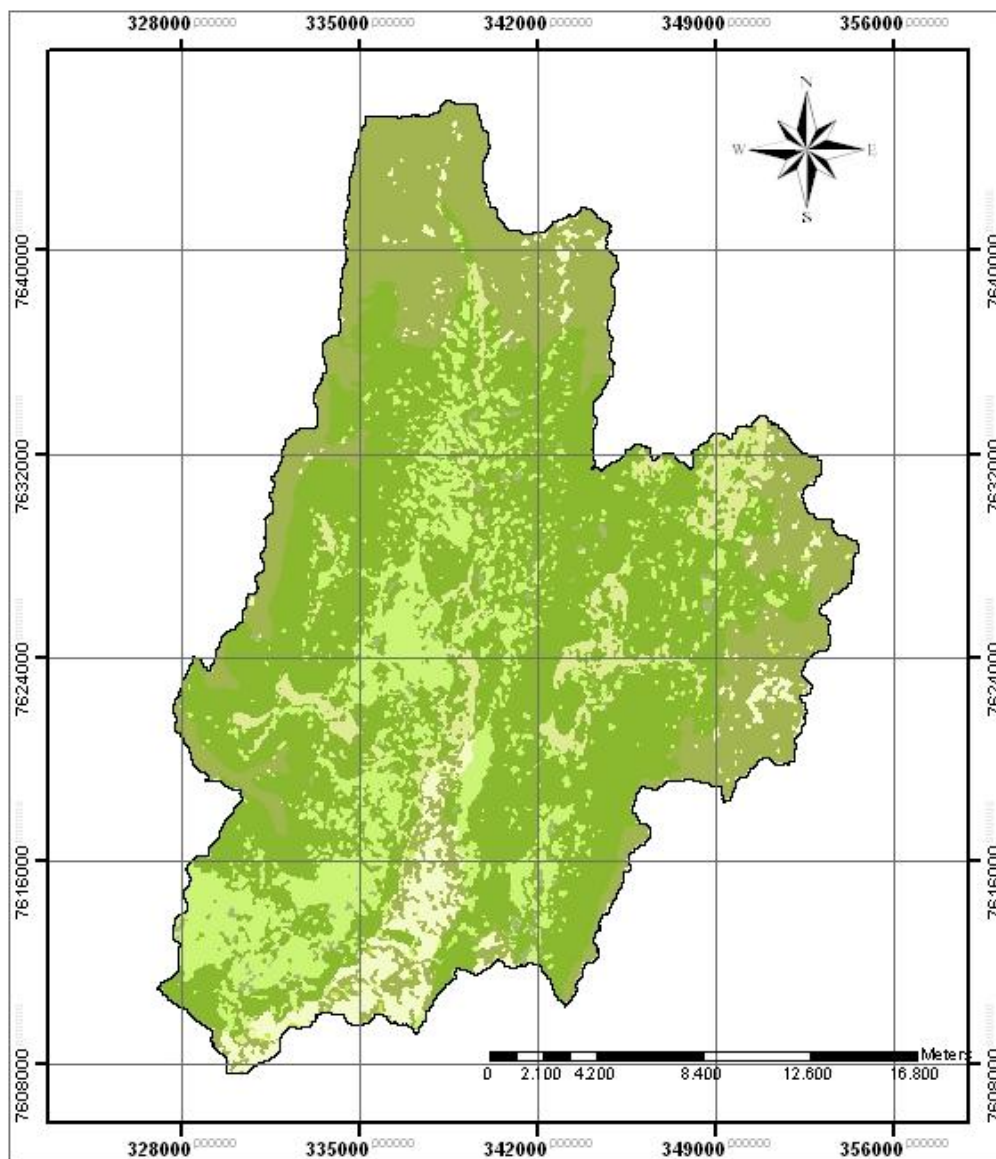
La metodología empleada para la elaboración del mapa de coeficiente de escorrentía comprende los siguientes pasos:

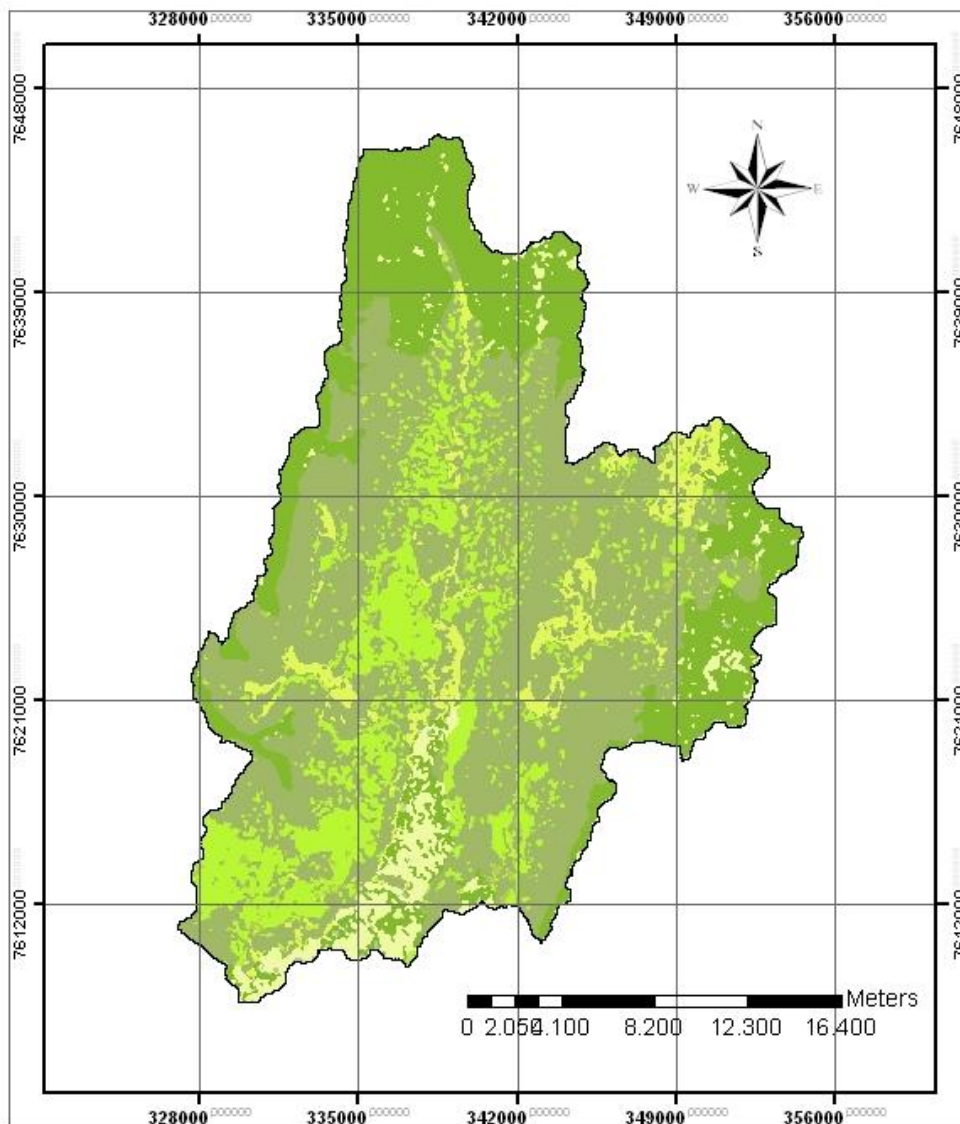
- Se estableció una relación entre el mapa de cobertura vegetal, uso de la tierra con el mapa de pendientes a través de un cruce de mapas como se muestra en la figura 9.15

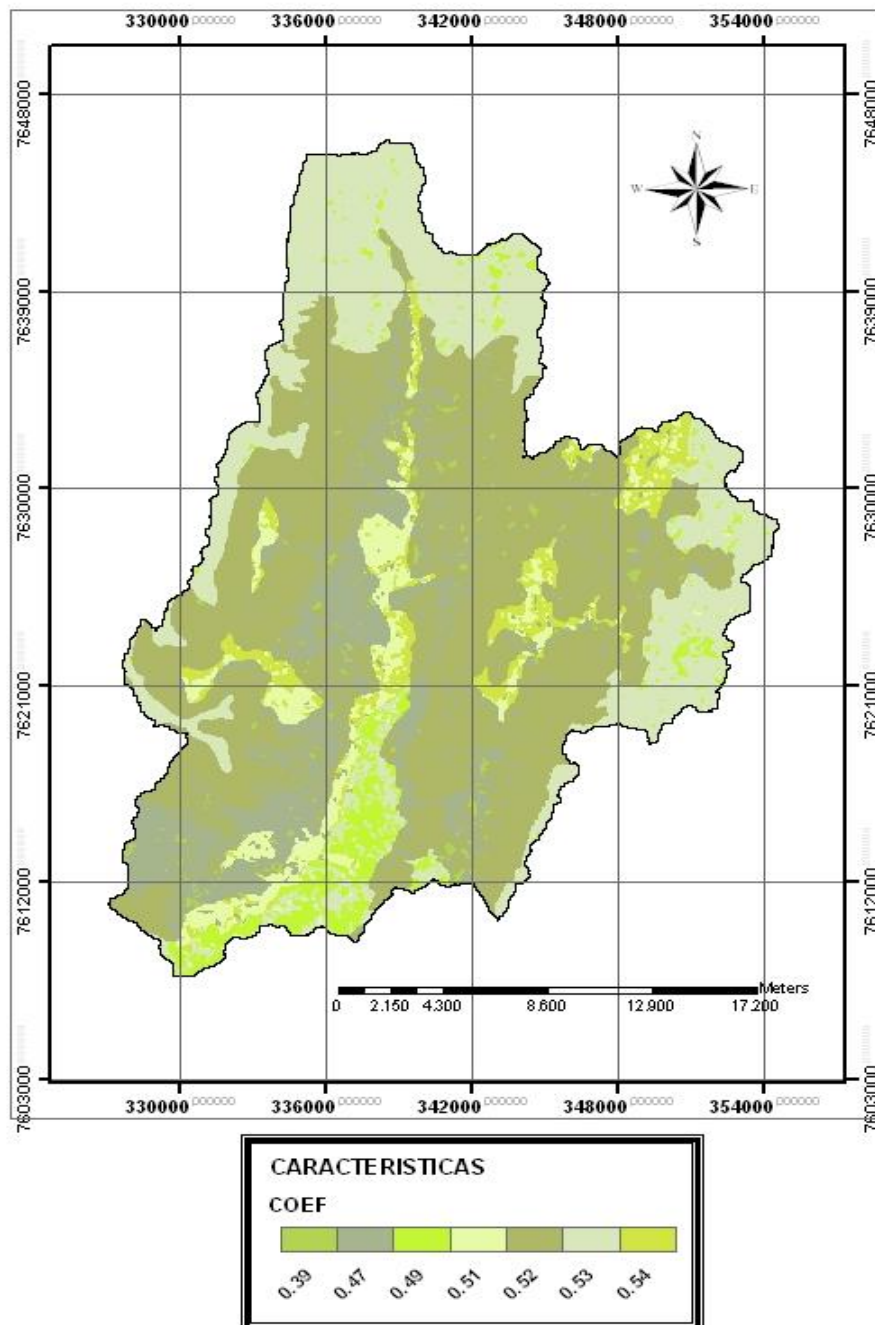


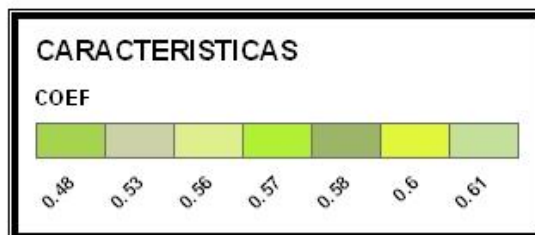
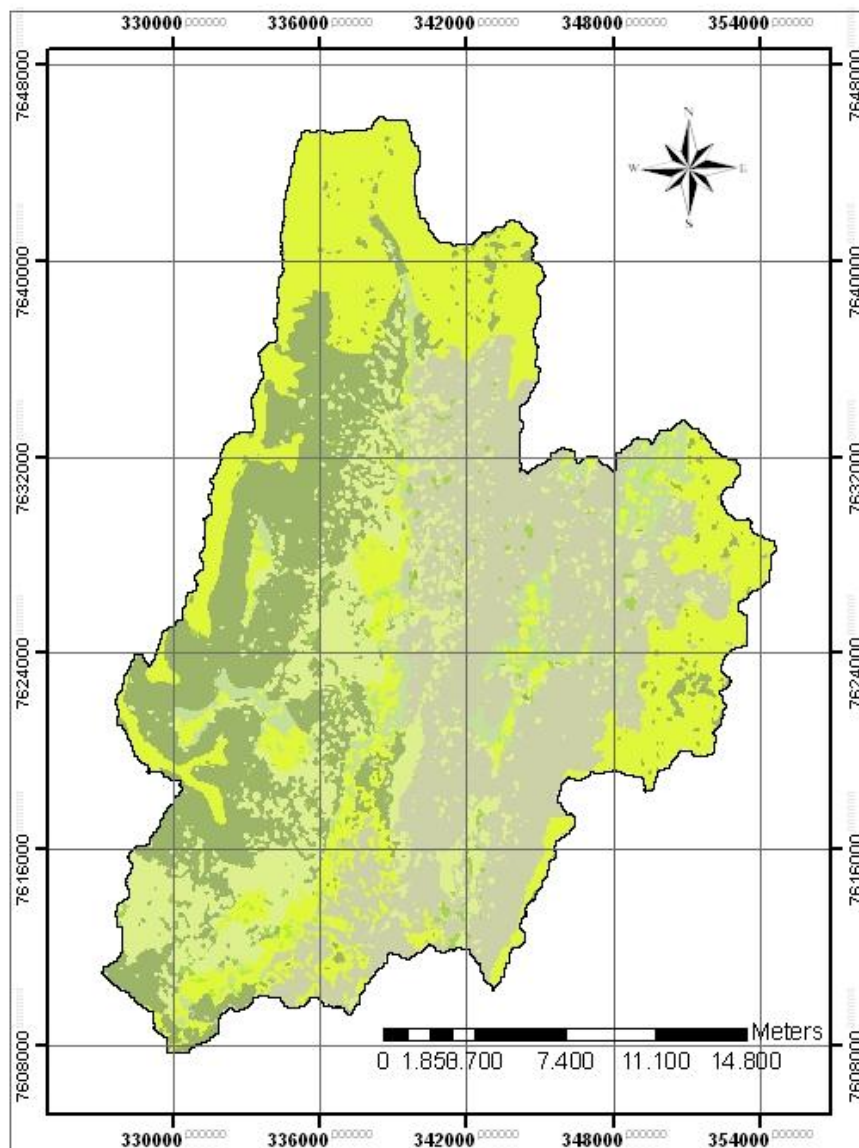
*Fig. 9.15 Cruce de mapas.
Fuente: Elaboración propia*

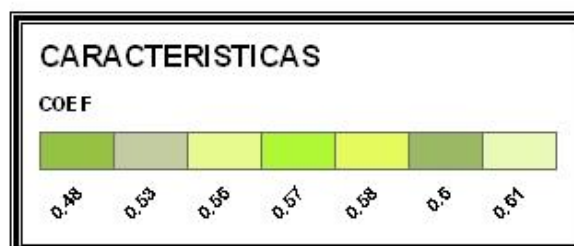
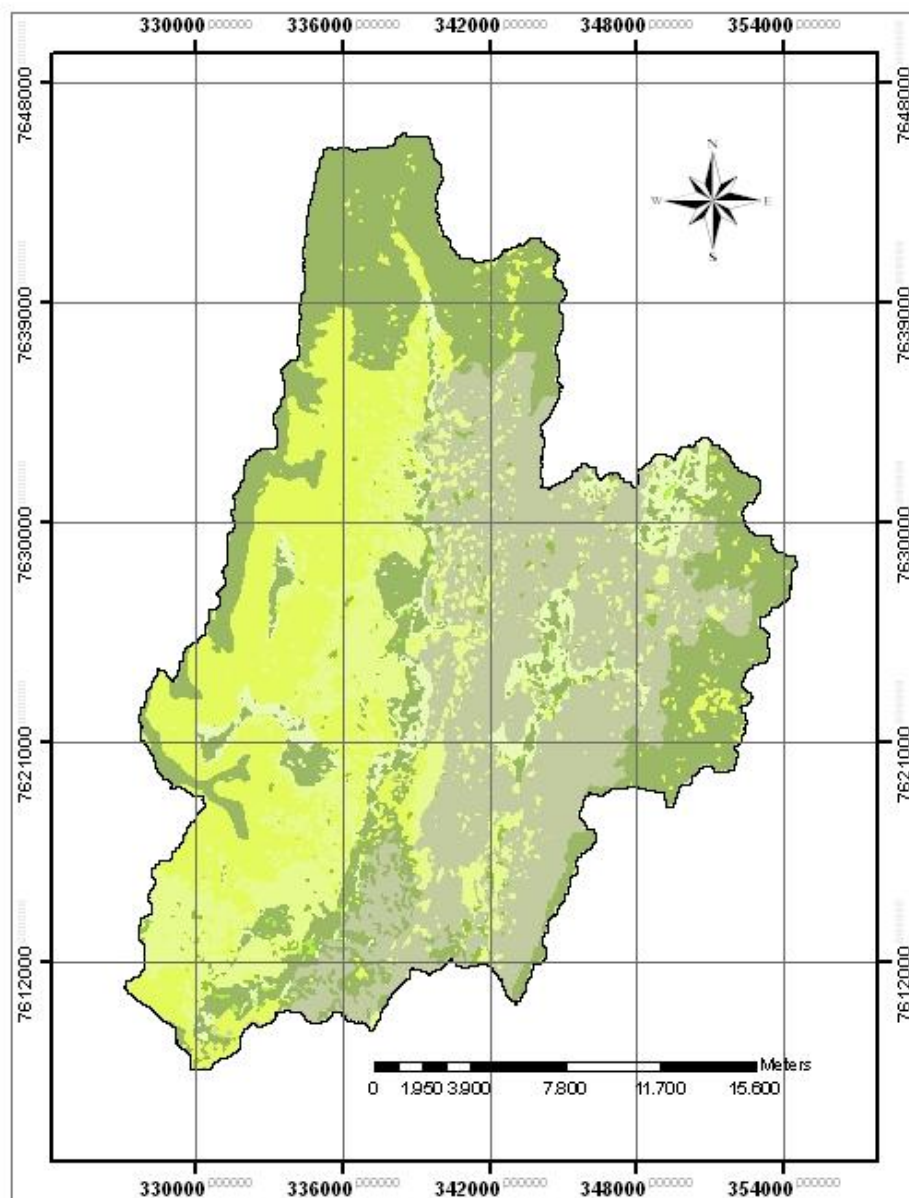
Esta operación relaciona a cada pixel con la interacción de cada valor que éste contenga, dando como resultado una tabla en la que relaciona la vegetación y la pendiente, a través de este mapa y con la operación de atributos de mapas se asigna el valor de “C” correspondiente al tipo de vegetación y la pendiente para cada periodo de retorno referido a las tablas de Chow et Al, en este estudio se realizó los mapas de coeficientes de escorrentía para los periodos de retorno de 10, 50, 100, 500, 1000 años.

MAPA DE COEFICIENTE DE ESCORRENTIA T = 10 AÑOS

MAPA DE COEFICIENTE DE ESCORRENTIA T = 50 AÑOS

MAPA DE COEFICIENTE DE ESCORRENTIA T = 100 AÑOS

MAPA DE COEFICIENTE DE ESCORRENTIA T = 500 AÑOS

MAPA DE COEFICIENTE DE ESCORRENTIA T = 1000 AÑOS

9.4 Metodología para la estimación de caudales máximos por el método racional

Para evaluar el caudal que producirá una precipitación, la aproximación más sencilla es el método racional, esta técnica se usa ampliamente en nuestro medio, debido a su aparente simplicidad, cuya fórmula es la siguiente:

$$Q = C * i * A \quad \text{Ec. 9.5}$$

Supongamos una precipitación constante de intensidad i (mm/h) que cae sobre una cuenca de superficie A (km²). Si toda el agua caída produjera escorrentía, el caudal generado sería:

$$Q_{(m^3/s)} = \frac{i * A}{3.6} \quad \text{Ec. 9.6}$$

Si la superficie está en hectáreas o deseamos obtener el caudal en l/seg, será preciso introducir los factores correspondientes.

En casos reales, nunca toda el agua precipitada produce escorrentía, su cálculo no es sencillo.

Para una primera aproximación, basta con aplicar un coeficiente de escorrentía “C”, con lo que finalmente, la fórmula general resultaría:

$$Q = \frac{C * i * A}{3.6} \quad \text{Ec. 9.7}$$

Donde:

Q = caudal (m³/s)

C = coeficiente de escorrentía

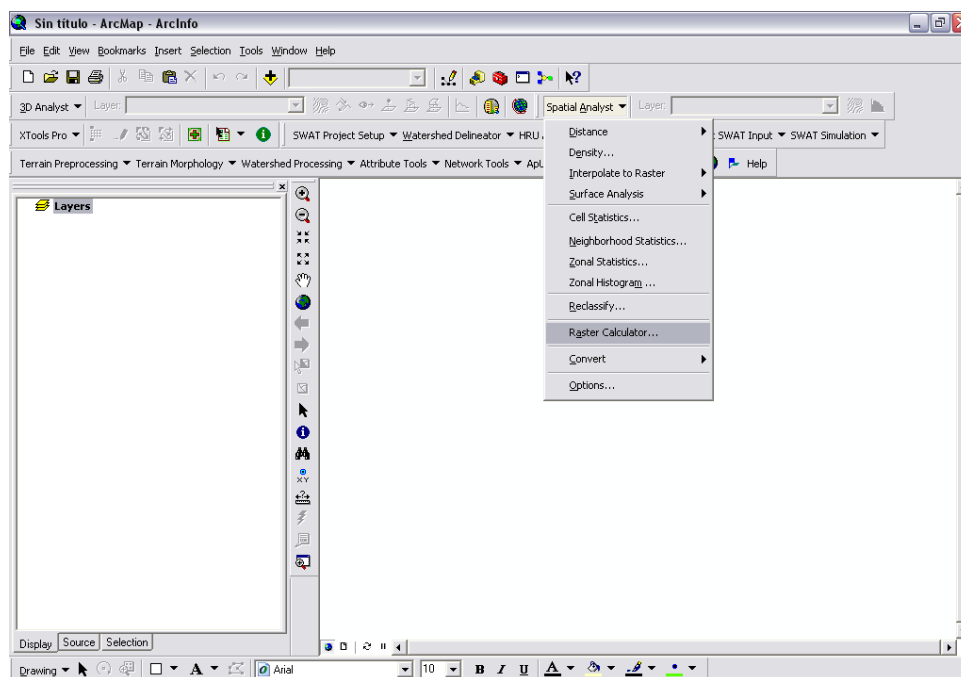
i = intensidad de precipitación, (mm/h)

A = superficie de la cuenca, (km²)

9.4.1 Metodología

La metodología empleada para la estimación de caudales máximos comprende los siguientes pasos:

- Dentro del programa ArcGis, contando con los mapas de área, intensidades y coeficientes de escorrentía en formato raster, el programa permite hacer el cálculo de mapas en la extensión de spatial analyst.



*Fig. 9.16 Determinación de caudal.
Fuente: Elaboración propia*

- Dentro del cuadro de diálogo se procede a poner la expresión del método racional, donde cada parámetro está con las unidades correspondientes.
- Esta operación da como resultado un mapa de caudales para cada coeficiente de escorrentía que está definida por el área que le corresponde, de esta manera el caudal máximo será la sumatoria de todos los caudales comprendidos dentro de la cuenca del río Santa Ana.

9.5 Estimaciones para diferentes periodos de retorno

Cuadro 9.8 Cuadro resumen para caudal máximo con un periodo de retorno de 10 años

Intensidad (mm/h)	Coefficiente de Escorrentía (Adim)	Periodo de Retorno (años)	Área (km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)
14,434	0,280	10,0	6,742	7,569
14,434	0,300	10,0	2,233	2,686
14,434	0,360	10,0	90,017	129,933
14,434	0,380	10,0	26,439	40,283
14,434	0,410	10,0	289,003	475,094
14,434	0,420	10,0	130,433	219,649
14,434	0,440	10,0	26,595	46,919
Caudal Máximo de la cuenca Santa Ana				922,133

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 9.9 Cuadro resumen para caudal máximo con un periodo de retorno de 50 años

Intensidad (mm/h)	Coefficiente de Escorrentía (Adim)	Periodo de Retorno (años)	Área (km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)
18,637	0,350	50,0	5,812	10,531
18,637	0,370	50,0	1,331	2,550
18,637	0,430	50,0	90,017	200,387
18,637	0,450	50,0	26,439	61,593
18,637	0,480	50,0	289,003	718,159
18,637	0,510	50,0	130,433	344,377
18,637	0,590	50,0	26,595	81,232
Caudal Máximo de la cuenca Santa Ana				1418,829

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 9.10 Cuadro resumen para caudal máximo con un periodo de retorno de 100 años

Intensidad (mm/h)	Coefficiente de Escorrentía (Adim)	Periodo de Retorno (años)	Área (km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)
20,447	0,390	100,0	6,591	14,600
20,447	0,470	100,0	90,549	241,722
20,447	0,490	100,0	26,434	73,569
20,447	0,510	100,0	32,647	94,569
20,447	0,520	100,0	257,687	761,079
20,447	0,530	100,0	130,433	392,642
20,447	0,540	100,0	27,121	83,183
Caudal Máximo de la cuenca Santa Ana				1661,363

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 9.11 Cuadro resumen para caudal máximo con un periodo de retorno de 500 años

Intensidad (mm/h)	Coefficiente de Escorrentía (Adim)	Periodo de Retorno (años)	Área (km²)	Caudal máximo (m³/s)
24,611	0,480	500,000	6,834	22,425
24,611	0,530	500,000	163,769	593,375
24,611	0,560	500,000	88,206	337,682
24,611	0,570	500,000	3,101	12,085
24,611	0,580	500,000	121,893	483,313
24,611	0,600	500,000	160,612	658,796
24,611	0,610	500,000	27,047	112,790
Caudal Máximo de la cuenca Santa Ana				2220,468

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 9.12 Cuadro resumen para caudal máximo con un periodo de retorno de 100 años

Intensidad (mm/h)	Coefficiente de Escorrentía (Adim)	Periodo de Retorno (años)	Área (km²)	Caudal máximo (m³/s)
26,418	0,480	1000,000	6,834	24,072
26,418	0,530	1000,000	163,769	636,949
26,418	0,560	1000,000	88,206	362,480
26,418	0,570	1000,000	3,101	12,972
26,418	0,580	1000,000	121,893	518,805
26,418	0,600	1000,000	160,612	707,175
26,418	0,610	1000,000	27,047	121,073
Caudal Máximo de la cuenca Santa Ana				2383,526

Fuente: Elaboración propia.

10.1 Introducción

Los resultados estimados en el presente trabajo se contrastan y analizan con los resultados obtenidos en otros estudios realizados en la cuenca del río Santa Ana y estimaciones realizadas en este estudio con otras metodologías que utilizan el número de curva (CN) como es la metodología del Hidrograma Sintético de S.C.S. (Soil Conservation Service).

10.2 Método del S.C.S para abstracciones

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos. El método deriva de una serie de curvas, cada una de las cuales lleva el número CN, que varía de 1 a 100. Un número de curva CN = 100, indica que toda la lluvia escurre, y un número CN = 1, indica que toda la lluvia se infiltra; por lo que los números de curvas representan coeficientes de escorrentía. Los conceptos generales utilizados en este método son los de considerar que la precipitación efectiva P_e , es siempre menor, o aproximadamente igual que la precipitación total P .

$$P_e = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{P + 0.8 * S} \quad (\text{Ec. 10.1})$$

Donde:

- Pe: Precipitación efectiva o de diseño, (cm)
- P: Precipitación total, (cm)
- S: Infiltración potencial máxima, (cm)

El SCS estableció una relación para estimar S , a partir del número de curva CN, mediante las siguientes ecuaciones, según utilice el sistema de medidas inglesas o internacional, respectivamente:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \text{ (pulg)} \quad (\text{Ec. 10.2})$$

$$S = \frac{2540}{CN} - 25.4 \text{ (cm)} \quad (\text{Ec. 10.3})$$

Sustituyendo la ecuación (10.3) en la ecuación (10.1) y realizando operaciones resulta:

$$P_e = \frac{\left(P - 0,2 * \left(\frac{2540}{CN} - 25,4 \right) \right)^2}{P + 0,8 * \left(\frac{2540}{CN} - 25,4 \right)}$$

$$P_e = \frac{N(P + 5,08) - 508)^2}{N(N(P - 2,32) + 2032)} \quad \text{(Ec. 10.4)}$$

Donde:

- Pe: Precipitación efectiva o de diseño, (cm)
P: Precipitación total, (cm)
N: Número de Curva

Los autores del método, para obtener la ecuación (10.4), para datos experimentales se basaron en una relación entre Ia y S , la cual es:

$$Ia = 0.2 * S \quad \text{(Ec. 10.5)}$$

Donde:

- Ia : Pérdidas ó sustracciones iniciales, en mm, es definido como la precipitación acumulada hasta el inicio de la escorrentía y es una función de la intercepción, almacenamiento en depresiones e infiltración antes del comienzo de la escorrentía.
 S : Infiltración potencial máxima, en mm

Para poder determinar el número de curva (CN) se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros: condición hidrológica, grupo hidrológico de suelo, uso de la tierra y tratamiento, condición de humedad antecedente (CHA); los cuales se detallan a continuación.

10.2.1 Condición hidrológica

La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca para favorecer o dificultar el escurrimiento directo, esto se encuentra en función de la cobertura vegetal, puede aproximarse de la siguiente forma.

Cuadro 10.1 Condición hidrológica

COBERTURA VEGETAL	CONDICIÓN HIDROLÓGICA
> 75% del área	Buena
Entre 50% y 75% del área	Regular
< 50% del área	Pobre

Fuente: "HIDROLOGÍA" Autor: Máximo Villón

10.2.2 Grupo hidrológico

Define los grupos de suelos, los cuales pueden ser:

Cuadro 10.2 Clasificación hidrológica de los suelos

TIPOS DE SUELOS	DESCRIPCIÓN
<p>"A"</p> <p>Infiltración entre 7,62 – 11,43 mm/h</p>	<p>Son suelos que tienen altas tasas de infiltración (bajo potencial de escurrimiento) aún cuando están enteramente mojados y están constituidos mayormente por arenas o gravas profundas, bien y hasta excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.</p>
<p>"B"</p> <p>Infiltración entre 3,81 – 7,62 mm/h</p>	<p>Son suelos que tienen tasas de infiltración moderadas cuando están cuidadosamente mojados y están constituidos mayormente por suelos profundos de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión del agua.</p>
<p>"C"</p> <p>Infiltración</p>	<p>Son suelos que tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados y están constituidos mayormente por suelos con</p>

entre 1,27 – 3,81 mm/h	un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo, o suelos con una textura que va de moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja tasa de transmisión del agua.
“D” Infiltración entre 0 – 1,27 mm/h	Son suelos de alto potencial de escurrimiento, de tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente mojados y están formados mayormente por suelos arcillosos con un alto potencial de esponjamiento, suelos con índice de agua permanentemente alto, suelos con arcilla o capa de arcilla en la superficie o cerca de ella y suelos superficiales sobre material casi impermeable.

Fuente: “HIDROLOGÍA” Autor: Máximo Villón

10.2.3 Uso de la tierra y tratamiento

El uso de la tierra es la cobertura de la cuenca e incluye toda clase de vegetación, escombros, pajonales, desmontes, así como las superficies de agua (lagos, pantanos, ciénegas, etc.) y superficies impermeables (carreteras, cubiertas, etc.)

El tratamiento de la tierra se aplica sobre todo a los usos agrícolas de la tierra e incluye las prácticas mecánicas tales como sistemas de bordos, curvas de nivel, terraplenado y ejecución de prácticas para el control de erosión y rotación de cultivos.

El método SCS distingue tres clases de tierras, según su uso y tratamiento éstas son:

- Tierras cultivadas.
- Tierras cubiertas de pastos o hierbas
- Tierras cubiertas de bosques y arboledas

10.2.4 Condición de humedad antecedente (CHA)

La condición o estado de humedad tiene en cuenta los antecedentes previos de humedad de la cuenca; determinado por la lluvia total, en periodo de 5 días anteriores a la tormenta.

La SCS nos presenta una tabla para poder determinar el número de curva en función de los parámetros estudiados con anterioridad, la cual se presenta para condición de humedad antecedente II (promedia).

Cuadro 10.3: Número de Curva (NC) en función del uso del suelo y del grupo hidrológico del suelo

<i>Uso del Suelo</i>	<i>Grupo Hidrológico del Suelo</i>				
	A	B	C	D	
Tierras cultivadas	con tratamiento de conservación	72	81	88	91
	sin tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales	Condición pobre	68	79	86	89
	Condición buena	39	61	74	80
Praderas		30	58	71	78
Bosques	Cubierta pobre	45	66	77	83
	Cubierta buena	25	55	70	77
Espacios abiertos: con césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	Buena condición: cubierta de pastos sobre más del 75% del área	39	61	74	80
	Condición aceptable: cubierta de pastos sobre el 50 a 75% del área	49	69	79	84
Áreas comerciales y de tiendas (85% impermeable)		89	92	94	95
Zonas industriales (75% impermeable)		81	88	91	93
Zonas Residenciales	Tamaño medio de la parcela (m ²)	Promedio de % impermeable			
	500	65	77	85	90
	1000	38	61	75	83
	1350	30	57	72	81
	2000	25	54	70	80
Tejados, parkings, superficies impermeables en general	4000	20	51	68	79
		98	98	98	98
		98	98	98	98
Calles y carreteras	Pavimentadas, con bordillos y bocas de tormenta	98	98	98	98
	De grava	76	85	89	91
	De tierra	72	82	87	89

Fuente: Análisis de lluvias y determinación de caudales mediante SIG

10.3 Determinación del grupo hidrológico

Cuadro 10.4 Número de Curva (NC) en función del uso del suelo y del grupo hidrológico del suelo

GRUPO HIDROLÓGICO	AREA (Km ²)	% AREA
A	77,015	13,48
B	395,383	69,19
C	88,930	15,56
D	10,135	1,77

Fuente: Elaboración propia

10.4 Determinación del número de curva

Cuadro 10.5 Determinación del número de curva para la cuenca Santa Ana

GRUPO HIDROLÓGICO	USO DE TIERRA	AREA (Km ²)	CN	NÚMERO DE CURVA PARA LA CUENCA SANTA ANA ES = 78,6 QUE ES IGUAL A 79
A	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	32,2825	72	
A	Agropecuaria extensiva con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	6,8175	70	
A	Agropecuaria extensiva con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	19,2475	72	
A	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	1,972	72	
A	Agropecuaria extensiva con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	0,235	58	
A	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales	8,67	72	
A	Agrícola intensivo con cultivos anuales	0,865	62	
A	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales	2,1875	66	
A	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	4,715	72	
A	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales	0,0225	58	
B	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos	13,9625	79	
B	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	166,8575	79	
B	Agrícola intensivo con cultivos anuales	74,665	76	
B	Silvopastoril con vacunos, caprinos, ovinos y extracción de productos del bosque	6,7875	69	
B	Agropecuaria extensiva con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	2,05	71	
B	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	9,6725	75	
B	Agropecuaria extensiva con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	5,0475	71	
B	Agropecuaria extensiva con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	9,4175	79	
B	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	7,3975	75	
B	Agropecuaria extensiva con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	38,8375	84	
B	Agrícola intensivo con cultivos anuales	32,1425	81	
B	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos	3,3075	61	
B	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	17,3875	75	
B	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	7,4825	75	

B	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	0,3675	71
C	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	2,085	80
C	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos	38,9975	86
C	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales	7,145	78
C	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	2,4825	78
C	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	11,0775	86
C	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos	18,33	86
C	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos	8,2025	86
C	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	0,61	79
D	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	0,0275	91
D	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	10,1075	91

Fuente: Elaboración propia

CN = 79

10.5 Estimación del caudal máximo

La parte medular del método es la utilización del cuadro 10.5, el cual es el resultado de una serie de estudios llevados a cabo por el SCS, sobre las intensidades, duraciones y cantidades de lluvia que deben de ser empleadas al calcular el gasto de pico de una avenida de determinado periodo de retorno.

Cuadro 10.6 Gasto unitario en función del tiempo de concentración

Tc	q	Tc	q	Tc	q
hrs	m ³ /s/mm/km ²	hrs	m ³ /s/mm/km ²	hrs	m ³ /s/mm/km ²
0,1	0,337	1,0	0,158	8,0	0,039
0,2	0,300	1,5	0,120	10,0	0,034
0,3	0,271	2,0	0,100	12,0	0,030
0,4	0,246	2,5	0,086	14,0	0,027
0,5	0,226	3,0	0,076	16,0	0,025
0,6	0,208	4,0	0,064	18,0	0,023
0,7	0,195	5,0	0,054	20,0	0,021
0,8	0,190	6,0	0,048	22,0	0,020
0,9	0,168	7,0	0,043	24,0	0,019

Fuente: Hidrología Autor: Máximo Villón

El proceso para el cálculo del caudal máximo utilizando la metodología del SCS, es como sigue:

Paso 1.

Se determina las siguientes características fisiográficas de la cuenca:

- Área de la cuenca
- Tiempo de concentración
- Número de curva

Paso 2.

Calcular las lluvias de duración de 6 horas y periodos de retorno de acuerdo a las avenidas de proyecto.

Paso 3.

Con base al número de curva de la cuenca, se calcula la tormenta de diseño para cada una de las lluvias determinadas en el paso anterior, por medio de la ecuación 10.4.

Paso 4.

Del cuadro 10.6, en función de la magnitud del tiempo de concentración se determina el valor del gasto unitario (q), interpolando, linealmente si es necesario.

Paso 5.

Por último, se multiplican el gasto unitario, la tormenta de diseño, el área de la cuenca y obtenemos el gasto máximo en m^3/seg .

Datos:

Cuadro10.7 Datos para la obtención del Caudal máximo.

Periodo de retorno (años)	Precipitación (mm)	Número de curva (adim)	Área de la cuenca (Km ²)	Tiempo de Concentración (h)
10	72,086	79	571,462	5
50	92,990			
100	101,993			
500	122,897			
1000	131,900			

Fuente: Elaboración propia

Determinación de la tormenta de diseño:

$$P_e = \frac{N(P + 50.8) - 5080}{N(N(P - 203.2) + 20320)}$$

Pe = mm

P = mm

Cuadro 10.8 Obtención de la tormenta de diseño.

P (mm)	Pe (mm)
72,086	27,215
92,990	42,979
101,993	50,192
122,897	67,643
131,900	75,398

Fuente: Elaboración propia

Obtención del gasto unitario del cuadro 10.5 para tc = 5 Hrs:

$$q = 0,054$$

Determinar el caudal máximo:

$$Q_{max} = q * P_e * A$$

Cuadro 10.9 Caudal máximo mediante el método de número de curva.

Periodo de retorno (años)	Pe (mm)	Qmax (m ³ /s)
10	27,215	839,826
50	42,979	1326,287
100	50,192	1548,872
500	67,643	2087,392
1000	75,398	2326,703

Fuente: Elaboración propia

10.6 Hidrograma adimensional del SCS

SCS sugiere este hidrograma cuando se tiene como datos el tiempo al pico y caudal al pico y utilizando el cuadro 10.9 se puede calcular el hidrograma resultante, multiplicando las coordenadas por t_p y Q_p .

Cuadro 10.10 Coordenadas del hidrograma adimensional

t/tp	Q/Qp
0,00	0,000
0,10	0,015
0,20	0,075
0,30	0,160
0,40	0,280
0,50	0,430
0,60	0,600
0,70	0,770
0,80	0,890
0,90	0,970
1,00	1,000
1,10	0,980
1,20	0,920
1,30	0,840
1,40	0,750
1,50	0,650
1,60	0,570
1,80	0,430
2,00	0,320
2,20	0,240
2,40	0,180
2,60	0,130
2,80	0,098
3,00	0,075
3,50	0,036
4,00	0,018
4,50	0,009
5,00	0,004

Fuente: Hidrología Autor: Máximo Villón

El tiempo base, t_b , puede aproximarse a:

$$t_b = 2,67 * t_p$$

(Ec. 10.7)

Adicionalmente, un estudio de muchas cuencas ha demostrado que:

$$t_r = 0.6 * t_c$$

(Ec. 10.8)

Donde:

- tr : Tiempo de retardo, (h)
 tc: tiempo de concentración de la cuenca, (h)

El tiempo de ocurrencia al pico, tp, puede expresarse como:

$$tp = \frac{D}{2} + 0,6 * tc$$

(Ec. 10.9)

D : Duración de la lluvia, (h)

tp: Tiempo al pico, (h)

Siendo para la duración de la lluvia:

$$D = 2 * \sqrt{tc}$$

(Ec. 10.10)

tc: Tiempo de concentración, (h)

Como el área del HU debe ser igual a una escorrentía de 1 cm, puede demostrarse que:

$$Qp = \frac{2,08 * A}{tp} \left[\frac{m^3}{s * cm} \right]$$

(Ec. 10.11)

Donde:

Qp: Caudal pico, (m³/s*cm)

tp: Tiempo pico, (h)

A: Área de la cuenca, (km²)

Para calcular el caudal máximo generado por una precipitación efectiva se tiene que:

$$Qp = \frac{2,08 * Pe * A}{tp} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

(Ec. 10.12)

Donde:

Q_p : Caudal pico, (m^3/s)

t_p : Tiempo pico, (h)

A : Área de la cuenca, (km^2)

Pe : Precipitación efectiva (cm)

Cuadro 10.11 Caudales picos para diferentes periodos de retorno

D (h)	t_r (h)	t_p (h)	t_b (h)	P (mm)	Pe (mm)	Pe (cm)	Q_{max} (m^3/s)
4,472	3,000	5,236	13,980	72,086	27,215	2,722	617,93
				92,990	42,979	4,298	975,703
				101,993	50,192	5,019	1139,379
				122,897	67,643	6,764	1535,517
				131,900	75,398	7,540	1711,679

Fuente: Hidrología Autor: Máximo Villón

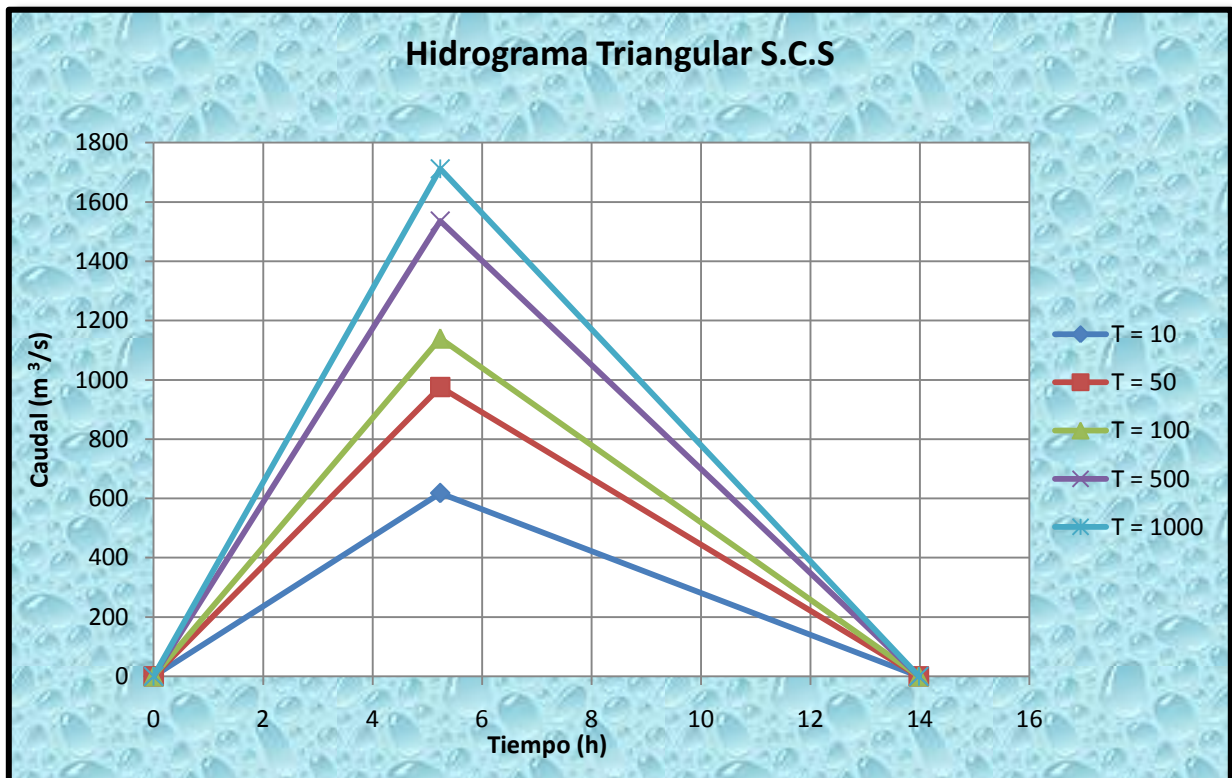


Fig. 10.1 Hidrograma triangular S.C.S

Fuente: Elaboración propia

Cuadro. 10.12 Coordenadas del hidrograma sintético

t/tp	Q/Qp	t (hrs)	Q (m ³ /s) T = 10 años	Q (m ³ /s) T = 50 años	Q (m ³ /s) T = 100 años	Q (m ³ /s) T = 500 años	Q (m ³ /s) T = 1000 años
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,10	0,015	0,524	9,269	14,636	17,091	23,033	25,675
0,20	0,075	1,047	46,345	73,178	85,453	115,164	128,376
0,30	0,160	1,571	98,869	156,112	182,301	245,683	273,869
0,40	0,280	2,094	173,020	273,197	319,026	429,945	479,270
0,50	0,430	2,618	265,710	419,552	489,933	660,272	736,022
0,60	0,600	3,142	370,758	585,422	683,627	921,310	1027,007
0,70	0,770	3,665	475,806	751,291	877,322	1182,348	1317,993
0,80	0,890	4,189	549,958	868,376	1014,047	1366,610	1523,394
0,90	0,970	4,712	599,392	946,432	1105,198	1489,451	1660,329
1,00	1,000	5,236	617,930	975,703	1139,379	1535,517	1711,679
1,10	0,980	5,760	605,571	956,189	1116,591	1504,807	1677,445
1,20	0,920	6,283	568,496	897,647	1048,229	1412,676	1574,745
1,30	0,840	6,807	519,061	819,591	957,078	1289,834	1437,810
1,40	0,750	7,330	463,448	731,777	854,534	1151,638	1283,759
1,50	0,650	7,854	401,655	634,207	740,596	998,086	1112,591
1,60	0,570	8,378	352,220	556,151	649,446	875,245	975,657
1,80	0,430	9,425	265,710	419,552	489,933	660,272	736,022
2,00	0,320	10,472	197,738	312,225	364,601	491,365	547,737
2,20	0,240	11,519	148,303	234,169	273,451	368,524	410,803
2,40	0,180	12,566	111,227	175,627	205,088	276,393	308,102
2,60	0,130	13,614	80,331	126,841	148,119	199,617	222,518
2,80	0,098	14,661	60,557	95,619	111,659	150,481	167,745
3,00	0,075	15,708	46,345	73,178	85,453	115,164	128,376
3,50	0,036	18,326	22,245	35,125	41,018	55,279	61,620
4,00	0,018	20,944	11,123	17,563	20,509	27,639	30,810
4,50	0,009	23,562	5,561	8,781	10,254	13,820	15,405
5,00	0,004	26,180	2,472	3,903	4,558	6,142	6,847

Fuente: Elaboración propia

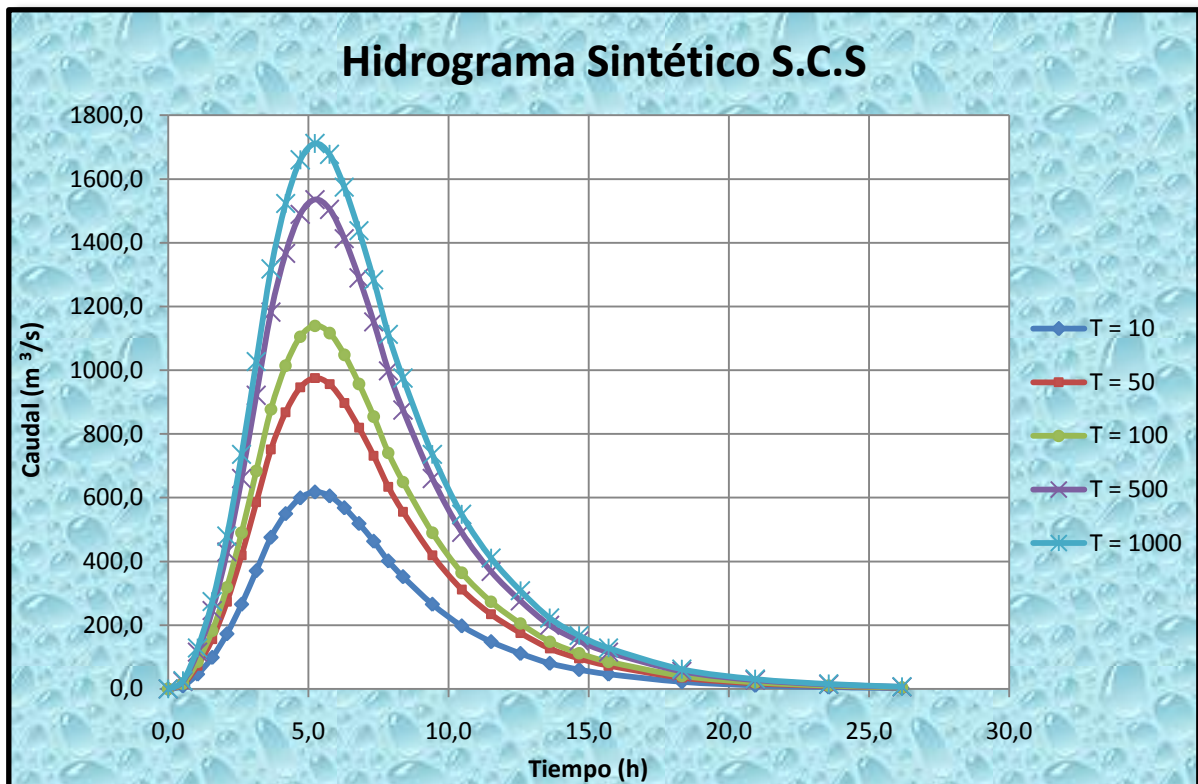


Fig. 10.2 Hidrograma Sintético S.C.S
Fuente: Elaboración propia

10.6 Comparación de resultados

Se puede observar en el cuadro 10.13 y el cuadro 10.14 la diferencia porcentual que existe entre este estudio con otros estudios realizados en la cuenca, no se tiene una diferencia significativa comparando con los caudales estimados por Castellón, los cuales fueron estimados por los métodos indicados en el mismo cuadro, la variación se debe a criterios adoptados por el autor y procesos de cálculo.

Se observa que algunos métodos están por el lado de la seguridad y otros son conservadores en sus resultados.

Cuadro. 10.13 Resumen de caudales estimados

Método	Caudales Máximos (m ³ /s)				
	10	50	100	500	1000
SIG (Fernández)	922,13	1418,83	1661,36	2220,47	2383,53
Método Numero de Curva (Fernández)	839,83	1326,29	1548,87	2087,39	2326,70
Hidrograma sintético S.C.S (Fernández)	617,93	975,70	1139,38	1535,52	1711,68
Método Racional (Castellón)		1521,31	1671,62		2170,93
Fórmula Passenti (Castellón)		805,07	884,61		1148,84
Hidrograma triangular (Castellón)		1035,60	1137,92		1477,81

Fuente: Elaboración propia

Cuadro. 10.14 Variación de resultados en %

Método	Variación en % para T = Años				
	10	50	100	500	1000
Método Numero de Curva (Fernández)	8,926	6,522	6,771	5,993	2,384
Hidrograma sintético S.C.S (Fernández)	32,989	31,232	31,419	30,847	28,187
Método Racional (Castellón)		-7,223	-0,617		8,919
Fórmula Passenti (Castellón)		43,258	46,754		51,801
Hidrograma triangular (Castellón)		27,010	31,507		37,999

Fuente: Elaboración propia

Método	Resumen
Método Número de Curva (Fernández)	La variación en el resultado de este método referente a la determinación del caudal máximo mediante SIG, se debe esencialmente a la obtención del número de curva, debido que este valor se obtiene mediante tablas.
Hidrograma sintético S.C.S (Fernández)	Este método tiene una diferencia con respecto a la determinación del caudal máximo mediante SIG, debido a que para generar las coordenadas del hidrograma sintético S.C.S utilizamos el cuadro 10.9, dichos valores son extraídos de una gran cantidad de hidrogramas registrado en una considerable variedad de cuencas, las cuales no pertenecen a nuestro medio. En este estudio y en nuestro medio en general para los estudios basados en la hidrología se cuenta con muy pocos datos y tablas calibradas para poder realizar cálculos más reales, motivo por el cual debemos adoptar, asumir valores, tablas, parámetros de otros países y poder tener una aproximación en la estimación de parámetros hidrológicos.
Método Racional (Castellón)	La discrepancia de valores respecto a la determinación del caudal mediante SIG empleado en este estudio se debe al criterio adoptado del valor del coeficiente de escorrentía que lo adopta como 0.55, como único valor en la cuenca. Determinando el caudal mediante SIG no adoptamos un único valor del coeficiente de escorrentía, sino que se toma en cuenta la variación de la cobertura vegetal, la pendiente y tipo de suelo de la cuenca, así logrando obtener un mejor resultado.
Fórmula Passenti (Castellón)	La diferencia de valores que se obtiene en relación con la determinación del caudal mediante SIG se debe al criterio adoptado por Castellón al determinar el valor de c en la fórmula empírica de Passenti, también debido a la variación de la altura de lluvia máxima en 24 horas ya que los años de registro de lluvias varían con 7 años de diferencia.
Hidrograma triangular (Castellón)	La desigualdad que se observa en los resultados con respecto a la determinación del caudal máximo mediante SIG se debe fundamentalmente a la precipitación máxima obtenida. Aunque se realizó por el mismo método ésta varía debido a la diferencia de los años de registros en ambos estudios.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados y la metodología empleada aplicando programas de Sistemas de Información Geográfica; se llega a las siguientes conclusiones:

- Al realizar este estudio se pudo conocer la gran importancia de los Sistemas de Información Geográfica, basados en la obtención de las características físicas y morfológicas de la cuenca.
- Se pudo determinar las precipitaciones máximas e intensidades para luego ser utilizadas en el método racional y así determinar el caudal máximo mediante el sistema de información geográfica.
- El método de cálculo de caudales por el método racional, utilizando las técnicas del SIG, permite obtener resultados aceptables, debido a que trabaja con mayor precisión porque se toma en cuenta la variabilidad de cobertura vegetal, tipo de suelo, etc.; en la cuenca de estudio.
- Se recomienda la utilización de las técnicas del SIG para la determinación de los caudales máximos porque:
 - Utilizando los SIG se disminuye el tiempo de trabajo el cual representa la disminución del costo en estudios hidrológicos.
 - Con los SIG obtenemos las características físicas y morfométricas de la cuenca en forma rápida, precisa y automática; evitando que se obtenga estos valores de forma tradicional.
 - Este procedimiento nos beneficia con sus herramientas en el manipuleo y almacenamiento en una base de datos de grandes volúmenes de información.
 - Nos permite la obtención automática del mapa de pendientes ayudándonos a tener información de la variabilidad de las pendientes en una cuenca.
 - Este programa nos permite generar el cruce de mapas digitales (superposición de mapas), para obtener datos más reales del coeficiente de escurrimiento.
 - Es un software de fácil manejo y aplicación para el operador.

RECOMENDACIONES

- Implementar la utilización de los SIG como instrumento tecnológico de trabajo para capturar, almacenar, consultar, analizar y presentar todo tipo de información como base de datos, para poder realizar distintos tipos de cálculos en ingeniería civil, ya sea en el área de hidráulica, vías de comunicación o estructuras.
- Incentivar la actualización permanente teórica y práctica de los diferentes Hardwares y softwares, en las áreas de la ingeniería civil que así lo requieran.
- Motivar a los futuros profesionales en la actualización permanentemente para afrontar los nuevos retos en el ejercicio de su profesión en forma eficaz y eficiente de acuerdo al avance tecnológico.