



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Aplicación de los sistemas de información
geográfica para la elaboración de
estudios hidrológicos en cuencas del
Estado de Morelos**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geomático

P R E S E N T A

Eliseo Urióstegui Pineda

ASESOR DE INFORME

Ing. José Benito Gómez Daza



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

RESUMEN

En el presente trabajo se pretende plantear una metodología que permita realizar un análisis de riesgo de inundación y programación de acciones bien diseñadas sin la afectación de los diferentes periodos de retorno en las cuencas del Estado de Morelos: Río Apatlaco, Río Yautepec, Río Cuautla, Amacuzac, Río Tembemebe, Lago de Tequesquitengo y Río Nexapa en el cual se vienen dando problemas de inundación e infraestructura dañada en los cauces de forma reiterada en los últimos años. Se propone afrontar el problema desde el método de análisis hidrológico-hidráulico con el fin de obtener más rápida la información de los cauces con respecto a sus niveles a diferentes periodos de retorno. Todo esto se llevará a cabo empleando las herramientas que nos ofrecen los sistemas de información geográfica, aprovechando el potencial que tienen estas en la correlación espacial de los elementos del territorio. Sus aplicaciones en el campo de los riesgos naturales son indispensables para obtener unos resultados óptimos, y poder basar en ellos, la toma de decisiones fundamentales por parte de los organismos públicos o privados para proteger a la población de cara a los desastres naturales y la construcción de infraestructura sin que sufra daños.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| RESUMEN | |
| INTRODUCCIÓN | 20 |
| OBJETIVOS | 8 |
| 1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA..... | 9 |
| 1.1 ¿Qué son los SIG? | 9 |
| 1.2 Antecedentes de los SIG | 10 |
| 1.3 Etapas de un proyecto que emplee SIG | 12 |
| 1.3.1 Adquisición de datos..... | 13 |
| 1.3.2 Pre procesamiento | 13 |
| 1.3.3 Manejo de Datos | 13 |
| 1.3.4 Manipulación y análisis | 14 |
| 1.3.4.1 Funciones analíticas de un SIG | 14 |
| 1.3.5 Generación del producto..... | 15 |
| 1.4 Características de los SIG..... | 16 |
| 1.4.1 Mapas interactivos..... | 16 |
| 1.4.2 Datos Geográficos..... | 16 |
| 1.4.3 Modelos de Geoprocesamiento | 16 |
| 1.4.4 Modelos de datos | 17 |
| 1.4.5 Metadatos..... | 17 |
| 1.5 Representación de los modelos sig (ráster y vector) | 17 |
| 1.5.1 Ráster | 17 |
| 1.5.2 Vectores | 18 |
| 1.5.3 Ventajas y Desventajas de un modeo a otro | 19 |
| 2 CARTOGRAFIA..... | 20 |
| 2.1 La cartografía y parte de su historia | 20 |
| 2.2 Elipsoide y datum | 211 |
| 2.2.1 Elipsoide | 211 |
| 2.2.2 Datum..... | 222 |
| 2.2.3 Datum y elipsoides utilizados en México. | 23 |
| 2.3 Proyecciones cartográficas..... | 23 |
| 2.3.1 ¿Qué es una proyección? | 23 |
| 2.3.2 Tipos de proyección | 233 |
| 2.3.2.1 Azimutales o perspectivas..... | 213 |
| 2.3.2.2 Cilíndrica | 224 |
| 2.3.2.3 Cónicas | 235 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

| | | |
|---------|--|------|
| 2.4 | Proyección usadas en México | 255 |
| 2.4.1 | Coordenadas Geográficas..... | 25 |
| 2.4.2 | UTM (Universal Transversal de Mercator)..... | 26 |
| 2.4.3 | Cónica Conforme de Lambert..... | 28 |
| 2.4.4 | Proyecciones cartográficas utilizadas en México | 29 |
| 3 | HIDROLOGÍA Y SIG | 29 |
| 3.1 | Escurrimiento superficial, cuenca hidrográfica y agua superficial | 311 |
| 3.2 | Relación SIG e hidrología..... | 322 |
| 3.3 | Aplicaciones SIG en el campo de la hidrología..... | 344 |
| 3.4 | ¿Qué es modelbuilder? | 34 |
| 4 | PROCESAMIENTO DE DATOS PLUVIOGRÁFICOS PARA LA OBTENCIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO QUE TIENE INFLUENCIA EN EL ESTADO DE MORELOS..... | 36 |
| 4.1 | Interpolación | 36 |
| 4.1.1 | Métodos de interpolación..... | 37 |
| 4.1.1.1 | IDW | 37 |
| 4.1.1.2 | Kriging | 38 |
| 4.1.1.3 | Natural Neighbor (Vecino natural) | 39 |
| 4.1.1.4 | Spline | 40 |
| 4.1.1.5 | Spline con barreras | 41 |
| 4.2 | Precipitación | 411 |
| 4.2.1 | Datos de precipitación..... | 441 |
| 4.2.2 | Dxxxxxxxprecipitación. | 444 |
| 4.3 | Base de datos climatológica nacional (sistema clicom) | 455 |
| | La obtención de los datos climatológicos diarios del CLICOM se obtuvieron al ingresar vía web al portal del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B,C, (http://clicom- mex.cicese.mx)..... | 465 |
| 4.3.1 | Estaciones climatológicas en cuencas..... | 4847 |
| 4.4 | Determinación de faltantes..... | 48 |
| 4.5 | Análisis probabilístico para la determinación de precipitaciones a diferentes periodo de retorno (ax). | 51 |
| 4.6 | Lluvia media | 54 |
| 4.6.1 | Método aritmético..... | 544 |
| 4.6.2 | Método de polígonos de Thiessen | 55 |
| 4.6.2.1 | Método de polígonos de Thiessen con Arcgis. | 576 |
| 4.6.3 | Método de isoyetas. | 577 |
| 4.6.3.1 | Determinación de isoyetas con Arcgis.. | 578 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

| | | |
|---------|---|------|
| 5 | NÚMERO DE CURVA | 60 |
| 5.1 | Generalidades del número de curva..... | 60 |
| 5.2 | Metodología..... | 611 |
| 5.3 | Infiltración | 622 |
| 5.3.1 | Tipo de suelo: | 63 |
| 5.3.1.1 | Contenido de humedad del suelo | 63 |
| 5.3.1.2 | Cobertura vegetal | 63 |
| 5.3.1.3 | Uso y manejo de tierra..... | 63 |
| 5.3.2 | Coefficiente de escurrimiento | 63 |
| 5.4 | USO DE SUELO Y VEGETACIÓN..... | 65 |
| 5.5 | EDAFOLOGÍA..... | 68 |
| 5.5.1 | Acrisoles..... | 69 |
| 5.5.2 | Andosol | 70 |
| 5.5.3 | Cambisoles | 700 |
| 5.5.4 | Castañozems | 711 |
| 5.5.5 | Feozems | 711 |
| 5.5.6 | Fluvisol | 722 |
| 5.5.7 | Litosol | 722 |
| 5.5.8 | Luvisoles | 72 |
| 5.5.9 | Regosoles | 733 |
| 5.5.10 | Rendzina | 733 |
| 5.6 | RESULTADOS..... | 733 |
| 6 | ESTUDIO HIDROLÓGICO, LOCALIDAD DE CUENTEPEC, MUNICIPIO DE TEMIXCO, ESTADO DE MORELOS. | 755 |
| 6.1 | Estudio hidrológico | 755 |
| 6.1.1 | Objetivo..... | 755 |
| 6.1.2 | Descripción de la zona de proyecto | 76 |
| 6.1.2.1 | Fisiografía | 77 |
| 6.1.2.2 | Hidrología | 789 |
| 6.1.3 | Metodología para determinación avenidas máximas probables.. | 83 |
| 6.1.4 | Metodología con enfoque hidrometeorológico..... | 844 |
| 6.1.5 | Tiempo de concentración Tc | 889 |
| 6.1.5.1 | Precipitación media de diseño..... | 890 |
| 6.1.6 | Gastos máximos por el método de la formula racional..... | 922 |
| 6.1.7 | Gastos máximos método del hidrograma unitario..... | 984 |
| 6.1.8 | Gastos máximos por el método de Ven Te Chow..... | 99 |
| 6.1.9 | Resumen de avenidas máximas. | 1033 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

| | |
|--------------------|-----|
| CONCLUSIONES..... | 205 |
| BIBLIOGRAFÍA | 106 |

FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1-1 Esquema SIG..... | 10 |
| Figura 1-2 Estructura de un modelo Ràster | 18 |
| Figura 1-3 Estrcutrua formato vectorial | 19 |
| Figura 1-4 Transformaciòn de un formato vector-raster o raster-vector. | 19 |
| Figura 2-1 Elipsoide | 22 |
| Figura 2-2 Sistema de referencia (Datum Local y Geocéntrico) | 222 |
| Figura 2-3 Proyección Azimutal | 24 |
| Figura 2-4 Proyección Cilíndrica | 24 |
| Figura 2-5 Proyección Cónica | 255 |
| Figura 2-6 Sistema de Coordenadas Geográficas. | 266 |
| Figura 2-7 Características de las Zonas UTM. | 277 |
| Figura 2-8 Proyección Cónica Conforme de Lambert 2 paralelos tipo. | 29 |
| Figura 3-1 Modelo digital de elevaciòn..... | 32 |
| Figura 3-2 Delimitaciòn de la cuenca con Modelbuilder..... | 355 |
| Figura 4-1 Datos interpolados de precipitaciones de entrada e interpolada. | 36 |
| Figura 4-2 Método de interpolaciòn IDW | 38 |
| Figura 4-3 Método de interpolaciòn kriging | 39 |
| Figura 4-4 Método de interpolaciòn vecino natural | 40 |
| Figura 4-5 Método de interpolaciòn spline | 411 |
| Figura 4-6 Pluviómetros..... | 422 |
| Figura 4-7 Pluviógrafos | 433 |
| Figura 4-8 Pluviógramas | 444 |
| Figura 4-9 Hietogramas | 444 |
| Figura 4-10 Clicom | 466 |
| Figura 4-11 Zona de estudio | 477 |
| Figura 4-12 Estaciones climatológicas | 47 |
| Figura 4-13 Determinaciòn de datos Faltantes | 49 |
| Figura 4-14 Métodos de interpolaciòn en ARCGIS | 49 |
| Figura 4-15 Uniòn de base de datos y estaciones climatológicas | 50 |
| Figura 4-16 Agregar informaciòn interpolada | 511 |
| Figura 4-17 Software AX..... | 52 |
| Figura 4-18 Diferentes periodos de retorno para las estaciones del clima . | 522 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

| | |
|--|------|
| Figura 4-19 Diferentes periodos de retorno asociados a las estaciones climatológicas..... | 533 |
| Figura 4-20 Periodos de retorno asociados a estaciones climatológicas | 544 |
| Figura 4-21 Polígonos de Thiessen | 55 |
| Figura 4-22 Determinación de polígonos de Thiessen | 566 |
| Figura 4-23 Resultado de los polígonos de Thiessen | 56 |
| Figura 4-24 Polígonos de Thiessen asociados a unos Tr-2 años | 57 |
| Figura 4-25 Isoyetas | 58 |
| Figura 4-26 Generación de Isoyetas con ArcGIS..... | 59 |
| Figura 4-27 Resultado de método de interpolación IDW | 59 |
| Figura 4-28 Isoyetas asociadas a un Tr-2 años | 600 |
| Figura 5-1 Selección del número de escurrimiento N, para condiciones de humedad previa media | 64 |
| Figura 5-2 Uso de Suelo en las cuencas de Morelos | 688 |
| Figura 5-3 Resultado Número de Curva | 733 |
| Figura 5-4 Número de Curva..... | 74 |
| | |
| Figura 6-1 Localización de la zona de estudio..... | 766 |
| Figura 6-2 Región Hidrológica Administrativa | 79 |
| Figura 6-3 Región Hidrológica | 80 |
| Figura 6-4 Cuenca de estudio | 80 |
| Figura 6-5 Estaciones climatológicas de influencia | 81 |
| Figura 6-6 Edafología cuenca de análisis | 82 |
| Figura 6-7 Uso de suelo..... | 83 |
| Figura 6-8 Pendiente media del cauce principal | 85 |
| Figura 6-9 Subcuenca de análisis..... | 87 |
| Figura 6-10 Polígonos de Thiessen | 102 |
| Figura 6-11 Curvas método número de escurrimiento..... | 103 |
| Figura 6-12 Relación entre “Z” y d/tr. (CNA, 1987)..... | 1022 |
| Figura 6-13 Gráficas de gastos asociados a diferentes Tr..... | 103 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta básica de trabajo; gracias a las múltiples posibilidades que ofrecen para almacenar, gestionar y analizar la información espacial de forma precisa, hoy se pueden considerar una tecnología básica en la toma de decisiones en diversos campos, como en áreas de la Hidrología, Ecología, Geología, Estadística, etc. Este tipo de estudios puede resultar un tarea larga y complicada, por este motivo los SIG se han convertido en una potente herramienta para planificar y gestionar los recursos, gracias a que disponen de múltiples opciones para su análisis y evaluación. Mediante el uso de los SIG podemos gestionar y generar modelos digitales, llevar a cabo la delimitación y caracterización de cuencas, estudiar y analizar la distribución espacial de los recursos o evaluar la pérdida de suelo mediante modelos de erosión.

Esta información es imprescindible a la hora de gestionar los recursos ya que su análisis es clave en la toma de decisiones en proyectos de desarrollo socioeconómico y ambiental. Tradicionalmente el estudio y delimitación de cuencas hidrológicas se ha realizado interpretando los mapas cartográficos, pero hoy en día los SIG proporcionan una amplia gama de aplicaciones y procesos que permiten realizar esta labor de una forma más sencilla y rápida. La gran mayoría del software GIS ponen a nuestra disposición varias herramientas para delinear y caracterizar cuencas tomando siempre como base fundamental el modelo digital de terreno del área de estudio. De esta forma podemos describir los componentes físicos de una superficie mediante la identificación de sumideros, el cálculo de la dirección del flujo y la acumulación, o la creación de redes de corrientes. Por su parte las herramientas de interpolación que presentan muchos de los SIG existentes permiten analizar la distribución espacial de variables partiendo de datos puntuales en ubicaciones concretas. Este análisis se puede llevar a cabo incluso desde una perspectiva estadística lo que nos facilita información acerca de la precisión del modelo que realizamos de cierta variable. Es precisamente esta característica lo que convierte a los SIG en una herramienta especialmente útil para analizar la distribución espacial de las precipitaciones ya que en ocasiones la variabilidad de los registros pluviométricos, la existencia de datos erróneos o la falta de información llega a dificultar su estudio.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

OBJETIVOS

Obtener de una manera más rápida y efectiva el cálculo de avenida máxima en un río, barranca a diferentes periodos de retorno, para las tomas de decisiones en el Estado de Morelos, como el identificar las zonas de inundación, programación de trabajos de desazolve, programación de obras hidráulicas sin que se vean afectadas por las avenidas e identificación de las Zonas Federales mediante el uso de los SIG, se analizarán series de datos temporales de precipitaciones, se procesará y obtendrán polígonos de Thiessen, isoyetas, generación de la obtención de número de curva en base a los datos del uso de suelo y vegetación, tipo de suelo y los parámetros geomorfológicos de la cuenca (área de la cuenca, perímetro, corriente principal, desniveles de la cuenca, de la corriente principal y pendiente media) con el fin de obtener los caudales de la zona de interés.

Una vez presentado el objetivo general del estudio, los objetivos específicos del mismo son:

- Análisis estadístico de series de precipitaciones máximas diarias para nueve estaciones meteorológicas en las cuencas del Estado de Morelos.
- Distribución en histogramas tipo de las precipitaciones pertenecientes a eventos excepcionales significativos, producidos en los últimos 20 a 50 años.
- Obtención mediante tecnología SIG de las capas base “geomorfología, pendiente y usos del suelo”, para su uso en los paquetes informáticos en hidrología de superficie.
- Delimitación de sub-cuencas y puntos de drenaje que componen toda la cuenca mediante el software.
- Transformación de las precipitaciones de cada subcuenca en caudales base, mediante el método del hidrograma unitario (precipitación – escorrentía), usando Arcgis y la obtención shapes de polígonos de Thiessen e isoyetas a diferentes periodos de retorno.
- Modelización de cauces o zonas de estudio por el método del análisis unidimensional de cuencas, usando tecnología SIG y los softwares HEC-GeoRas y HEC-RAS.
- Modelización de zonas inundables por el método del análisis bidimensional de cuencas, usando el programa de simulación hidráulica IBER 2D.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

1.1 ¿Qué son los SIG?

Dentro de los sistemas de información geográficos encontramos diferentes significados a su definición de los cuales algunos de ellos que se tienen son:

- Un Sistema de Información es un proceso que consta de un conjunto de etapas que tiene como fin servir para la toma de decisiones. El proceso comienza con el planeamiento, la recolección de datos y el almacenamiento de los mismos, para luego ser analizados y usados. Estos datos son procesados y arrojan determinados resultados que el usuario obtiene para seguir determinadas acciones.
- Según F. J. Moldes (Moldes 1995) un SIG es un “conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permiten la gestión de datos organizados en base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas”.
- La NCGIA, un SIG es “un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión” (NCGIA 1990, vol. 1, p. 1-3).
- Otros autores insisten más en su componente informática: «Un sistema de información geográfica es un tipo especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, es decir, datos espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes» (Bracken y Webster, 1989).
- Una definición muy extendida es la difundida por el NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis) de EE. UU: «Un sistema de hardware-software, y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión» (NCGIA, 1990).

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Una vez tenidas ciertas definiciones podríamos decir que un SIG: Es un conjunto de herramientas tanto hardware como software que nos permite la manipulación de datos geográficos y bases de datos con una serie de procedimientos para visualizar y generar resultados en determinadas acciones. Figura 1-1.



Figura 1-1. Esquema SIG

1.2 Antecedentes de los SIG

En la década de los años 50 se inicia dentro de la Geografía una corriente que propone nuevos conceptos, métodos y técnicas de análisis que acabarán conformando, 10 años más tarde, el llamado paradigma cuantitativo o de análisis espacial, principal fundamento teórico de los SIG. Otras innovaciones tecnológicas y nuevos conceptos, métodos y técnicas de análisis de datos (estadístico-matemáticas, modelado) desarrollados en los años 60 y 70, propiciaron, junto a la disponibilidad de nueva información (de teledetección), el nacimiento de los SIG.

El origen de los SIG se remonta pues, 40 años atrás, cuando un grupo de diversos especialistas acometieron con instrumental informático el procesamiento de volúmenes considerables de datos geográficos para diferentes propósitos: planeamiento regional, percepción del paisaje, asignación de usos del suelo, etc.; el hecho de no tratarse de "técnicos" informáticos condicionó, en cierta medida, la evolución de los SIG. A mitad de la década

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

de los 60, estos pioneros desarrollaron los primeros "prototipos SIG", hoy legendarios, como SYMAP, GRID, IMGRID y otros, que funcionaban en equipos grandes y costosos, que precisaban muchas instrucciones "manuales", y cuya finalidad última era formar e imprimir mapas.

El primer ejemplo de Sistema de Información Geográfica que encontramos es el denominado Canadian Geographical Information System (CGIS). Era el año 1964 y se utilizó en el inventario SIG Y SU APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Tesis Doctoral 43 planeamiento de la ocupación del suelo en grandes zonas de Canadá, donde IBM fue la empresa informática que aportó el hardware necesario.

En pocos años mejoró el hardware y se perfeccionaron los programas, de tal forma que se dilató el ámbito de las aplicaciones y creció la aceptación entre los profesionales. Entre 1970 y 1972 se afianza la expresión "Sistemas de Información Geográfica" y se anuncia su lanzamiento, enfatizando en su capacidad para abordar problemas prácticos, casi siempre en el contexto de un modelo social de un sistema técnico en muchas materias y muy sensible a todo lo que diera muestras de progreso y desarrollo.

En la década de los ochenta, diversos factores se sumaron para hacer de los SIG actuales herramientas maduras y versátiles, muy distintas de sus antecesores. Por un lado, aparecieron avances técnicos que afectaron a todas las fases de manejo de información: en la captura (datos de teledetección por satélite y los de GPS), y en la visualización, más precisos y veloces. Por otro, se ganó en velocidad y exactitud en los procesos de cálculo, por la aplicación de algoritmos más eficientes en el tratamiento de las bases temáticas y la geometría de los objetos, a la par que los resultados se diversificaron en nuevos formatos.

El incremento de las posibilidades de análisis geográfico ha venido unido, inicialmente, a la creación de sistemas 'raster', dada la mayor facilidad para ello de este tipo de representación del espacio. Sin embargo, la realización de inventarios no encaja bien con una descripción 'raster'. Por ello han subsistido dos líneas de desarrollo, el enfoque 'raster' y el vectorial. A veces se elaboran sistemas mixtos, que mantienen la base de datos vectorial para el inventario y la recuperación selectiva de los datos, y la transforman a

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

‘raster’ cuando necesitan realizar algunos análisis, en especial la superposición de mapas. A finales de los años setenta y con el desarrollo de una estructura topológica para los datos espaciales, han aparecido en el mercado Sistemas de Información Geográfica vectoriales con mayores capacidades analíticas y de uso más general, como es el caso de ARC/INFO. La mayoría de estos programas han sido elaborados por empresas comerciales como ESRI, INTERGRAPH (TIGRIS), SIEMENS (SICAD), GE SMALLWORLD (Core Spatial Technology).

La tendencia actual de los SIG está claramente dirigida hacia la especialización. La posibilidad de implementación en ordenadores personales y el desarrollo de bases de datos distribuidas y corporativas, ha originado la aparición de múltiples entornos de análisis, específicos para multitud de campos. Así pues, existen programas SIG especializados en la toma y representación de datos, SIG exclusivamente de análisis espacial en formato raster, SIG para la gestión, servidores de mapas a través de internet, SIG enfocado al manejo de redes: eléctricas, de gas, de abastecimiento de agua y saneamiento, telefónicas, etc. Así como teniendo auge en los teléfonos inteligentes para las tomas de decisiones al instante y en cualquier lugar. Con todo ello, podemos asegurar que los SIG han logrado ocupar una posición importante dentro de lo que hoy en día se denomina sociedad de la información, si se tiene en cuenta el gran número de programas SIG o relacionados existentes en el mercado.

1.3 Etapas de un proyecto que emplee SIG

Un proyecto que involucre el uso de SIG normalmente consta de 5 etapas (Star et al. 1990):

- Adquisición de datos.
- Preprocesamiento.
- Manejo de datos.
- Manipulación y análisis.
- Generación del producto.

La etapa de adquisición de datos consiste en identificar y obtener los datos necesarios para la aplicación. Estos datos pueden provenir de distintas fuentes, por ejemplo: fotos, planos, mapas, datos GPS.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

En la etapa de pre procesamiento los datos de la etapa anterior son convertidos o adaptados a los efectos de poder ser interpretados en un SIG (A un mismo formato ya sea shape, y sistema de coordenadas).

En la etapa de manejo de datos se realizan funciones para la creación y el acceso a las bases de datos de los SIG.

En la etapa de manipulación y análisis se realizan funciones que trabajan con los datos para obtener nueva información. Por ejemplo, podemos marcar una región y consultar la altura promedio en ese terreno o los puntos cuya pendiente supere los 45 grados, obtener la delimitación de una cuenca con base en un DEM, etc.

La generación del producto es la fase que consta de los resultados finales de un SIG. Estos resultados pueden ser gráficos de barras, mapas marcando zonas con determinadas características requeridas por el usuario, un valor numérico que indique la altura media del terreno, bases de datos, publicación en una vía web.

A continuación, se describen con más detalle cada una de estas etapas:

1.3.1 Adquisición de datos

Esta etapa consiste en reconocer y obtener los datos necesarios para nuestra aplicación. Los datos que se necesitan pueden ser de naturaleza muy variada: fotos, gráficos, tablas, mapas, texto, información GPS, etc. Estos pueden o no estar en formato digital. En el caso de que no lo estén, se requerirá un pre procesamiento previo para poder ingresarlos al SIG.

1.3.2 Pre procesamiento

Los datos obtenidos en la etapa anterior, a menudo, suelen requerir un proceso de transformación para poder ser ingresados al SIG. Este proceso incluye, por ejemplo, hacer que los datos sean compatibles con el tipo y formato de datos que maneja el sistema, compatibilizar el sistema de coordenadas, crear campos en común entre los datos espaciales y las bases de datos, entre otras tareas.

La aplicación de las funciones de la etapa de pre procesamiento tiene como objetivo producir un mapa temático o layer.

1.3.3 Manejo de Datos

El software de esta etapa debe permitir a un usuario crear una base de datos, insertar, modificar y eliminar datos de la base y realizar consultas

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

acerca de los datos, así como también tener permisos de acceso a los datos y operaciones permitidas sobre los mismos.

Los SIG suelen tener un sistema manejador de bases de datos mediante el cual el usuario puede especificar un requerimiento por medio de consultas (por ejemplo, en SQL o QBE).

Otro aspecto importante que deben proveer los DBMS es el chequeo de la integridad de los datos en las operaciones de altas, bajas o modificaciones a la base de datos (ej.: en una base de datos en formato arco-nodo no se debería permitir borrar un nodo si aún existen arcos que lo referencien).

Además, los DBMS deben proveer de un mecanismo de sincronización para evitar inconsistencias en los datos producto del acceso simultáneo de varios usuarios.

Al igual que un sistema operativo facilita el uso de una computadora, el DBMS debe facilitar al usuario el manejo de los datos de la base de datos.

1.3.4 Manipulación y análisis

Tanto la etapa de manejo de datos como la de manipulación y análisis tienen objetivos similares, excepto que la última trata con los datos espaciales y la primera con los datos temáticos (no espaciales).

En esta etapa se trabaja con información espacial con la intención de responder algún requerimiento particular. Algunas de las operaciones que se realizan en esta etapa modifican la forma o estructura de una capa de un modo específico. Se pueden obtener nuevas capas de datos a partir de las ya existentes y así sucesivamente como creando nuevas bases de datos o complementado la ya existente, los cuales pueden servir de datos de entrada para otros análisis.

1.3.4.1 Funciones analíticas de un SIG

Las funciones analíticas son el elemento más característico de un SIG. Facilitan el procesamiento de los datos almacenados en el propio sistema de modo que sea posible generar nueva información como resultado de consultas, que ayuden en la toma de decisiones. Un SIG permite que información procedente de diversas fuentes sea convertida a un formato común para su posterior análisis. Es lo que se denomina integración de la información.

Algunas de las capacidades de análisis que presentan estos sistemas son:

- Consultas a la base de datos
- Análisis espaciales (distancias, longitudes, perímetros, superficies, proximidad, trayectos, etc.)
- Georreferenciación y geocodificación

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

- Análisis de redes (distancias y recorridos mínimos a través de una red, rutas, accesibilidad, etc.)
- Análisis estadísticos de variables temáticas (patrones de comportamiento, tendencias y evolución de datos)
- Modelado cartográfico
- Superposición de mapas (coberturas o temas diversos)
- Análisis de modelos digitales del terreno (pendientes, visibilidad, relieve, orientación, cuencas de drenaje.)

Los SIG también poseen la capacidad de generar mapas temáticos que muestran de manera muy ilustrativa e intuitiva los resultados de las distintas operaciones realizadas con los datos almacenados en la base de datos. La mayoría de aplicaciones SIG permiten la generación de gráficos, tablas de atributos, mapas clasificados por temas, curvas de nivel, etc. y además permiten la salida a impresoras, trazadores, vídeo, internet, intranet, etc.

1.3.5 Generación del producto

En esta etapa se producen las diferentes salidas que pueden obtenerse mediante un SIG. Entre las salidas más comunes podemos citar a los mapas, gráficos, visualizadores web e información tabular. Dentro de la categoría de mapas, los más frecuentemente usados son:

- Los mapas temáticos: muestran las variaciones espaciales de uno o más atributos.
- Los mapas de coropletas sirven para mostrar espacialmente un mismo atributo continuo estratificado en rangos. Un ejemplo típico es mostrar las zonas cuya precipitación se encuentre en un determinado rango de mm/año.
- Mapa de contorno: sirven para mostrar mediante líneas ubicaciones con igual valor de atributo. Ejemplos de este tipo son: isobaras, isotermas y curvas de nivel.
- Mapa de puntos: muestra espacialmente puntos cuyo tamaño está relacionado con el valor de un atributo en esa ubicación.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Los gráficos y las tablas constituyen una alternativa viable para comunicar información de manera simple y sintética. Entre los más usados en los SIG se encuentran:

- Gráfico de barras: sirve para observar diferencias entre categorías. La longitud de la barra indica el valor del atributo.
- Gráfico de tortas: es útil para mostrar la proporción de un atributo respecto del total.
- Scatter plots: permiten observar el comportamiento de un atributo contra otro.

1.4 Características de los SIG

Los SIG se estructuran en diferentes conjuntos de información:

- Mapas interactivos
- Datos geográficos
- Modelos de Geoprocesamiento
- Modelos de datos
- Metadatos

1.4.1 Mapas interactivos

Proporcionan una visión interactiva de la información geográfica que permite dar respuesta a cuestiones concretas, y presentar un resultado de dichas respuestas. Los mapas proporcionan al usuario las herramientas necesarias para interactuar con la información geográfica. Sirven mucho para las tomas de decisiones.

1.4.2 Datos Geográficos

En la base de datos se incluye información vectorial y matricial (raster), modelos digitales del terreno, redes lineales, información procedente de estudios topográficos, topologías y atributos.

1.4.3 Modelos de Geoprocesamiento

Son flujos de procesos y operaciones de tratamiento de la información espacial, que permiten automatizar tareas que se repiten con frecuencia, pudiendo enlazar unos modelos con otros (Dentro de este análisis se emplea con las herramientas del Model Builder).

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

1.4.4 Modelos de datos

La información geográfica en la base de datos geográfica, es algo más que un conjunto de tablas almacenadas en un Sistema Gestor de Base de Datos. Incorpora, al igual que otros sistemas de información, reglas de comportamiento e integridad de la información. Tanto el esquema, como el comportamiento y las reglas de integridad de la información geográfica juegan un papel fundamental en un SIG.

1.4.5 Metadatos

Son los datos que describen la información geográfica, facilitando información como propietario, formato, sistema de coordenadas, extensión, escalas, metodologías empleadas etc. de la información geográfica. Un catálogo de metadatos permite al usuario organizar, realizar búsquedas y acceder a información geográfica compartida. Cualquier catálogo de metadatos debe tener herramientas disponibles para generar, editar y sincronizarse de forma automática con la información que describen. La generación de metadatos se basa a ciertas normas técnicas para su generación, emitidas por el INEGI mediante el diario oficial de la federación.

1.5 Representación de los modelos SIG (ráster y vector)

En un Sistema de Información Geográfica, existen elementos que pueden ser representados mediante formas geométricas: Vectores (Punto, Línea, Polígono) o Ráster (Celdillas con información). Son formas de ilustrar el espacio, que nos ayudan a comprender mejor los elementos objeto de estudio según su naturaleza.

1.5.1 Ráster

Los modelos ráster prácticamente constan de una matriz de celdas o píxel organizada en filas y columnas en la que cada celda o píxel contiene un valor, en la cual se tiene información, ya sea de precipitación, temperatura, elevación o de un valor numérico de una base de datos (Es de las más comunes y empleados) Figura 1-2. Los modelos ráster viene siendo fotografías, imágenes de satélite, imágenes digitales, ortofotos e incluso algún archivo escaneado (todo lo que de vea por píxel o celda de un mismo tono o valor).

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

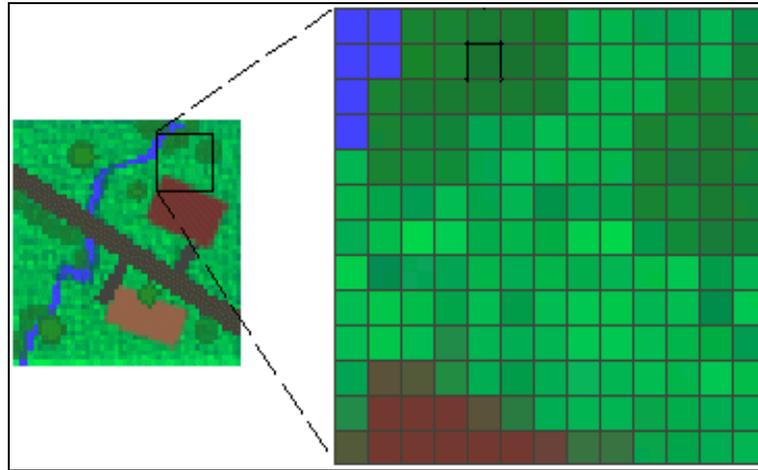


Figura 1-2. Estructura de un modelo Ráster

Los datos temáticos representan entidades como, el uso del suelo, vegetación, pendiente, precipitaciones, elevaciones.

Si bien la estructura de datos ráster es simple, es útil para una amplia variedad de aplicaciones.

Dentro de los SIG, los usos de los datos ráster se pueden dividir en 4 categorías principales:

- Ráster en forma de mapa base (Ortofotos, Imágenes de Satélite, etc.).
- Ráster en forma de mapas de superficie (Elevaciones, precipitaciones, densidad de población, concentraciones, elevaciones, etc.).
- Ráster en forma de atributos de entidad (Fotografías digitales, documentos escaneado con una ubicación geográfica).
- Ráster en forma de mapas temáticos (Tipo de vegetación, uso de suelo).

1.5.2 Vectores

Los datos vectoriales se definen por los puntos, líneas y polígonos y sus relaciones asociadas que abarcan los datos geoespaciales. Las entidades y superficies del mundo real pueden representarse como datos vectoriales almacenados en un SIG. Figura 1-3.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

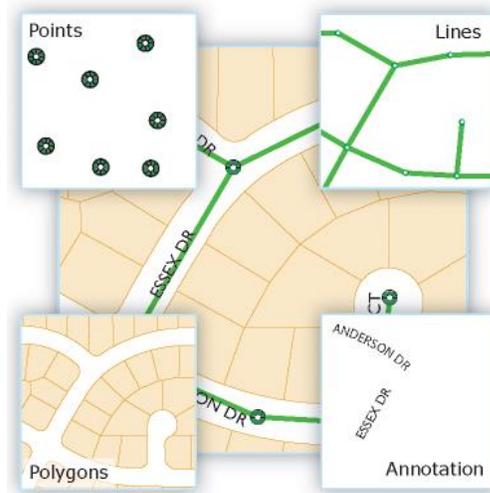


Figura 1-3. Estructura formato vectorial

1.5.3 Ventajas y Desventajas de un modelo a otro.

La elección de un modelo u otro dependerá de si las propiedades topológicas son importantes para el análisis y reflejar más de un atributo en un mismo espacio. Siendo así el modelo de datos vectorial es la mejor opción, ya que es más precisa. Por ello, si el análisis que nos interesa no requiere de acudir a estas propiedades topológicas, es mucho más rápido, sencillo y eficaz el uso del formato Raster. Se puede también realizar una transformación de un modelo a otro. Figura 1-4 y Tabla 1-1.

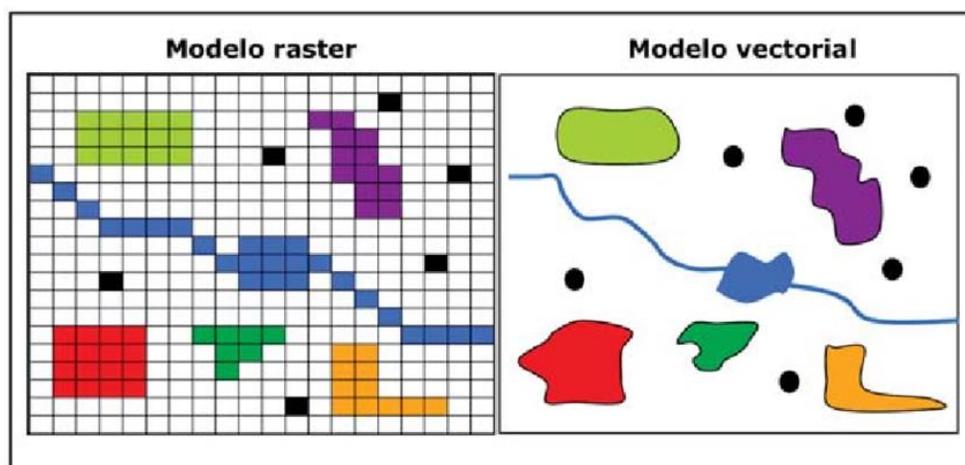


Figura 1-4. Transformación de un formato vector-ráster o ráster-vector.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de los modelos

| Ventajas Modelo Ráster | Ventajas Modelo Vector |
|---|--|
| Estructura de datos sencilla | Proporciona una estructura de datos compacta, ocupa menos memoria. |
| La operación de superposición se realizar de forma fácil. | Codifica de manera más eficaz las relaciones topológicas entre elementos. Mejora para el análisis de redes y obtención de valores (Longitud y áreas) |
| Representa mejor elevada la variabilidad espacial | Está diseñada para trabajar con gráficos, coberturas de AutoCAD. |

| Desventajas Modelo Ráster | Desventajas Modelo Vector |
|--|--|
| Ocupan más memoria, por lo que se requieres computadoras de mayor capacidad y de procesamiento. | Tiene una estructura de datos más compleja que el raster. |
| Relaciones topológicas son más difíciles de representar. | Operaciones de superposiciones son más difíciles de obtener. |
| El mapa resulta menos “estético”, los límites resultan más groseros. Este fenómeno puede superarse reduciendo el tamaño de pixel, pero incrementa en gran medida el volumen del archivo. | La representación de mapas con elevada variabilidad es ineficiente. Manejo y mejora de imágenes digitales y digitales eficaz en el modelo vectorial. |

2 CARTOGRAFÍA

2.1 La cartografía y parte de su historia

Ciencia que se ocupa de la representación gráfica de la superficie de la tierra. (Alonso Lerch Federico, 1986).

La Cartografía se define como el arte de hacer mapas o como la técnica de confeccionar y representar sobre un plano todos los componentes del espacio terrestre, incluyendo las actividades y desarrollos del hombre (IGAC. Principios de Cartografía Temática, 1993).

La Cartografía tiene como objeto en reunir y analizar los datos y medidas de las diversas regiones de la Tierra, y representar éstos gráficamente a una escala reducida, pero de tal modo que todos los elementos y detalles sean plenamente verificables (Erwin Raisz).

Cuando hablamos de historia sobre Cartografía se habla sobre el afán de entender y comunicar de saber cómo está la tierra que nos rodea, el territorio en el que se vive. La historia de esta ciencia abarca desde los primeros trazos en la arena hasta el uso de técnicas geodésicas, fotogramétricas, la teledetección, o de servicios de mapas en Internet.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

- Tablilla babilónica (2,300 a.C.): Se utilizaba para el cobro de impuestos.
 - Códices Cartográficos: Los pueblos Mesoamericanos los utilizaban para conocer sus alrededores.
 - Tales de Mileto (siglo VIII a.C.): Primer Mapamundi.
 - Anaximandro de Mileto (580 a.C.): Trazo el perímetro de la tierra y el mar (acúneme).
 - Aristóteles (Siglo II a.C.): fue el primero en medir el ángulo de inclinación con respecto al Ecuador.
 - Eratóstenes (Siglo I a.C.): estableció las medidas de la Tierra.
 - Ptolomeo (Siglo II d.C.): Publica un método acerca de la determinación de coordenadas con base en meridianos y paralelos.
- Mapas Portulanos (siglo IV d.C.): Se elaboran gracias al descubrimiento de la brújula y los navegantes de la época.
- Martín Waldseemüller (1509): Hace un Mapamundi donde traza el mapa de América, con ayuda de las expediciones de cartógrafos como Juan de la Costa y Américo Vespucio.
 - Abraham Ortelius (1570): Crea un atlas Moderno donde involucra diferentes mapas del siglo XVI.
 - Gerardus Mercator (1569): Proyecto paralelos y Meridianos en un mapa de proyección cilíndrica, que ayudo a la evolución de los mapas portuarios.
 - Revolución Industrial (Siglo XIX): Se inventa la Fotografía y el Avión que hacen posible fijar la imagen del territorio desde el Aire.
 - Siglo XX: Gracias a los avances tecnológicos se crean los satélites artificiales, con los que se ha explorado totalmente la Tierra.
 - Actualmente: se maneja la cartografía digital en donde se puede representar en 3D cualquier lugar de la superficie terrestre.

2.2 Elipsoide y datum

2.2.1 Elipsoide

La superficie de la Tierra, se conoce que es uniforme. La superficie de las masas de la Tierra muestra grandes variaciones verticales entre las montañas y los valles; donde está formada por la corteza oceánica y continental. La tierra se dice que es Geoide este a su vez la superficie equipotencial (de gravedad) que corresponde al nivel medio del mar. Debido a que la superficie topográfica es bastante irregular y por ende no puede ser representada a través de algún modelo matemático simple. Se representa como si fuera mar, sin tomar en cuenta la superficie terrestre.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Para poder realizar cálculos de posición, distancias y direcciones sobre la superficie de la tierra, se es necesario un marco de referencia matemático que lo permita, el cual en base a que se considera que la tierra es un geode se optó el elipsoide como el marco de referencia más conveniente, dado que provee una figura simple y se aproxima a la verdadera forma de la tierra. Figura 2-1.



Figura 2-1. Elipsoide

2.2.2 Datum

El datum es un punto origen asociado a una superficie de referencia (Elipsoide), de la cual se propagarán las coordenadas posteriores, este está considerado por la coincidencia geoidal y elipsoidal. Existen dos tipos de Datum (Globales y Locales).

El datum Local o llamado regional es válido solamente en una región o en área local de la superficie terrestre. Los Globales son como su nombre lo dice, son lo que engloban todo el geode o superficie. Figura 2-2.

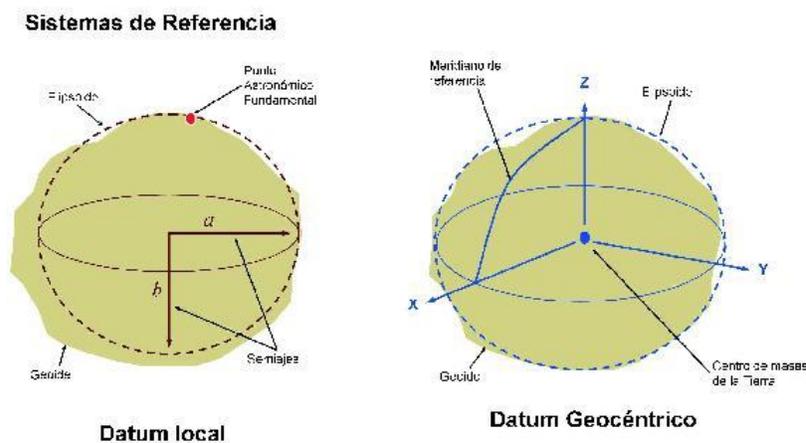


Figura 2-2. Sistema de referencia (Datum Local y Geocéntrico)

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

2.2.3 Datum y elipsoides utilizados en México.

Tabla 2.1 Datums en México

| Datum | Elipsoide Geodésico de referencia (asociado al datum) |
|---|---|
| NAD 27 Datum Norteamérica de 1927 | Clarcke 1866 Clarcke |
| WGS84 Sistema Geodésico mundial de 1984 | WGS84 Sistema Geodésico mundial 1984 |
| ITRF92 Marco Referencia Terrestre Internacional 1992 | GRS80 Sistema Geodésico Referencia 1980 |
| ITRF2010 Marco Referencia Terrestre Internacional de 2010 | GRS80 Sistema Geodésico Referencia 1980 |
| NAD 83 Datum Norteamericano de 1983 | GRS80 Sistema Geodésico Referencia 1980 |

2.3 Proyecciones cartográficas

2.3.1 ¿Qué es una proyección?

Una proyección cartográfica es un sentido llano, es la representación gráfica de la superficie curva y tridimensional de la tierra sobre una superficie plana, siendo formalmente fórmulas matemáticas para transformar coordenadas tridimensionales a coordenadas bidimensionales.

2.3.2 Tipos de proyección

- Azimutales
- Cónicas
- Cilíndricas

2.3.2.1 Azimutales o perspectivas

La superficie de la tierra se proyecta sobre la base de un plano imaginario que toca el planeta. Este sistema se utiliza sobre todo para representar las zonas polares, latitudes altas, o para mostrar un hemisferio completo. Toda la superficie se proyecta sobre un único plano de proyección. Conserva los azimuts en su verdadera magnitud para un punto del mapa y causa, alteraciones en las direcciones.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

La verdadera dirección sobre la esfera es a lo largo de un círculo máximo y no a lo largo de una línea loxodrómica, excepto cuando las dos coinciden. Todas las líneas loxodrómicas, excepto los meridianos y el ecuador son círculos o espirales de rumbo constante. Esta proyección se caracteriza por tener simetría radial alrededor del punto central. Figura 2-3.

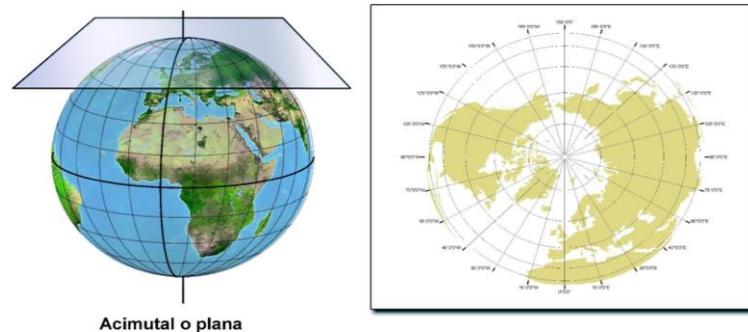


Figura 2-3. Proyección Azimutal

2.3.2.2 Cilíndrica

La superficie de la tierra se proyecta en un cilindro imaginario que envuelve el planeta. Es el mejor sistema para representar el área del Ecuador y los trópicos, latitudes bajas, pero la distorsión aumenta a medida que nos acercamos a los polos. Un modelo cilíndrico ocurre sobre todas las proyecciones, las cuales se desarrollan transformando la superficie esférica a un cilindro tangente o secante. En todos los casos las líneas de igual deformación son rectas paralelas a las líneas tipo, teniendo la mínima deformación a lo largo de las líneas de tangencia o intersección. (UTM) Figura 2-4.

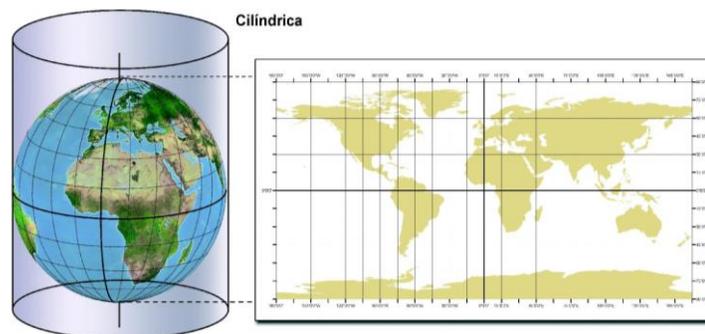


Figura 2-4. Proyección Cilíndrica

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

2.3.2.3 Cónicas

La superficie de la tierra se proyecta sobre un cono encima del planeta. Este sistema resulta muy útil para la representación de las zonas templadas, latitudes medias. Un modelo cónico resulta si la transformación se hace a la superficie de un cono recto tangente según un círculo menos intersecándola en dos círculos menores de la esfera (secante). Las líneas de igual deformación son paralelas a los círculos menores. (CCL) Figura 2-5.

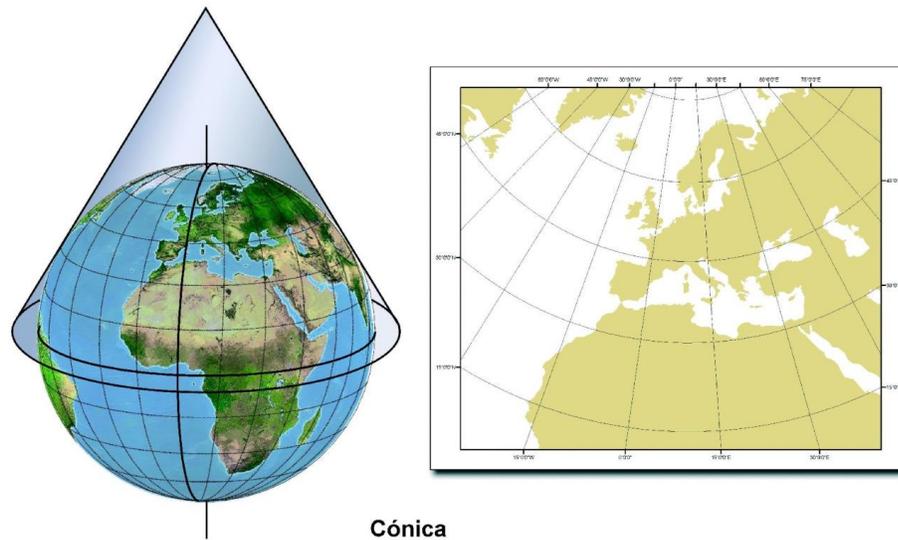


Figura 2-5 Proyección Cónica

2.4 Proyección usada en México

2.4.1 Coordenadas Geográficas

La latitud y la Longitud conforman un conveniente sistema de coordenadas para fijar una posición sobre la superficie terrestre. Las líneas de igual latitud se denominan paralelos y constituyen círculos que se hacen más pequeños conforme se aproximen al norte. Las líneas de igual longitud denominan meridianos y constituyen meridianas. Figura 2-6.

LATITUD: de un punto es el ángulo entre el normal elipsoide a través del punto P y el plano ecuatorial. La latitud es cero en el ecuador y aumenta hacia los polos hasta un valor máximo de 90 grados en el polo norte y sur.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

LONGITUD: es el ángulo entre la elipse meridiana que pasa a través de Greenwich y la elipse meridiana que contiene el punto en cuestión. La Longitud es medida a lo largo del ecuador desde el meridiano de Greenwich 0 grados hacia al este o al oeste en 180 grados.

ALTITUD: de un punto define su situación, teniendo como referencia de altura nivel medio del mar. La posición de un punto en coordenadas geodésicas está totalmente definido por la terna de coordenadas (Latitud, Longitud y Altitud). Existe altitud elipsoidal y optométrica, obteniendo una tercera altura, con las diferencias de estas y llamada altura geode. Fig 2-6.

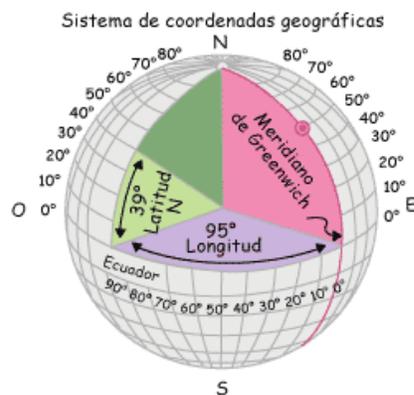


Figura 2-6. Sistema de Coordenadas Geográficas

2.4.2 UTM (Universal Transversal de Mercator)

UTM es un sistema de coordenadas planas basado en la proyección Transversal de Mercator. En este sistema se define en 60 zonas cada una dividida en Meridianos centrales a cada 6° de Longitud de 84° de latitud Norte y 80° de Latitud Sur. Se extienden 3° de longitud a ambos lados del meridiano central.

La cuadrícula del sistema de coordenadas está dada en Letras (Altitud de 8°) y Números (Longitudes de 6°), ésta se enumera a partir de los 180 ° Oeste (empezando con la zona 1) hasta los 180° Este (terminado con la zona 60) y enumerando por letras la longitud que empieza con la letra C desde los 80° de latitud Sur, Hasta los 84° de latitud Norte.

Las propiedades del sistema son:

- Forma: Es conformal y por lo tanto representa con exactitud áreas pequeñas.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

- La distorsión de áreas grandes es mínima en cada zona.
- Área: La distorsión es mínima en cada zona.
- Dirección: Ángulos locales son verdaderos.
- Distancia: La escala es constante a lo largo del meridiano central. Se aplica un factor de escala que corresponde a 0.9996 para reducir la distorsión lateral dentro de cada zona y siendo adimensional.

En cada zona se sobrepone una cuadrícula rectangular y las coordenadas se expresan en metros con respecto al Ecuador y al este de un eje de referencia. Para determinar posiciones en el Hemisferio Norte se le asigna al meridiano central un falso este de 500,000 metros, esto para manejar números positivos ya que 1° corresponde a 111° y siendo 3° corresponden a 333,000 metros así evitando tener números negativos y un falso norte de 0. Para mediciones en el hemisferio Sur se asigna un falso este de 500,000 metros y un falso norte de 10, 000,000 metros, esto de la misma manera para evitar tener números negativos. En la República Mexicana se localizan 6 zonas, correspondiendo de la 11 a la 16 Norte: Zona 11 (Meridiano central 87°); Zona 12 (Meridiano central 93°); zona 13 (Meridiano central 99°); Zona 14 (Meridiano central 105°); Zona 15 (Meridiano central 111°); Zona 16 (Meridiano central 117°). Teniendo en cuenta que el Estado de Morelos se encuentra en la zona 14 Norte. Fig 2-7.

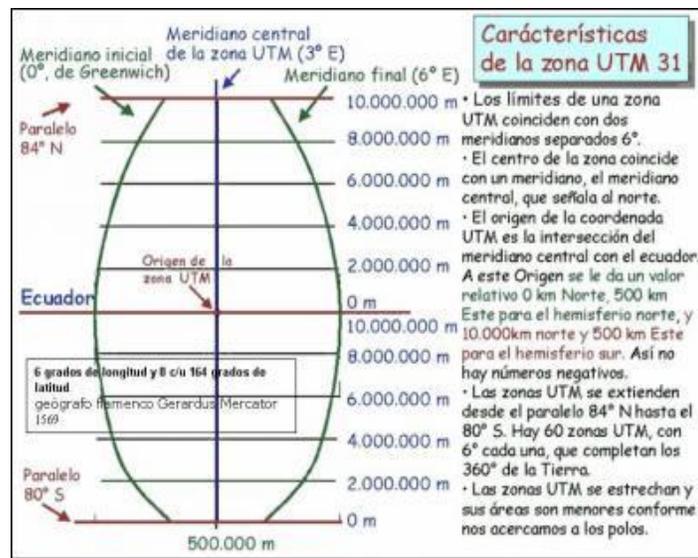


Figura 2-7. Características de las Zonas UTM

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

2.4.3 Cónica Conforme de Lambert

La proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL) es desarrollada a partir de un cono cuya forma está determinada por los dos paralelos estándares o paralelos tipos. Los paralelos estándar son escogidos de tal forma que dos terceras partes del ámbito Norte-Sur de la proyección se encuentren entre ellos, hagan secante en dos puntos, un sexto se encuentra al norte del paralelo estándar superior y un sexto al sur del paralelo estándar inferior. Sólo una zona de la proyección puede incluirse en un cono particular. En esta proyección los meridianos son líneas rectas y los paralelos de latitud son arcos concéntricos. La proyección puede extenderse en el sentido este-oeste pero no en la dirección norte-sur sin incurrir en fuerte errores. La distorsión de escala depende solamente de la altitud. Esto hace que la proyección cónica de Lambert sea apropiada para áreas que se extienden en dirección este-oeste. Las coordenadas X y Y, respectivamente, en un sistema de coordenadas planas, representadas en metros. Fig 2-8.

Las propiedades de la proyección Lambert son:

Forma: Es conforme y por lo tanto representa con exactitud áreas pequeñas.

Áreas: La distorsión es mínimo cerca de los paralelos estándar.

La escala se reduce entre los paralelos e incrementa al alejarse de ellos.

Dirección: Ángulos locales son verdaderos.

Distancia: La escala es correcta a lo largo de los paralelos estándares.

Los parámetros oficiales para la proyección CCL son:

Latitud del primer paralelo estándar: 17°30 N

Latitud del segmento paralelo Estándar: 29° 30´ N

Latitud del origen del proyecto 12°N

Longitud del meridiano central: 102°W

Este del Origen: 2,500,000

Norte del Origen: 0

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

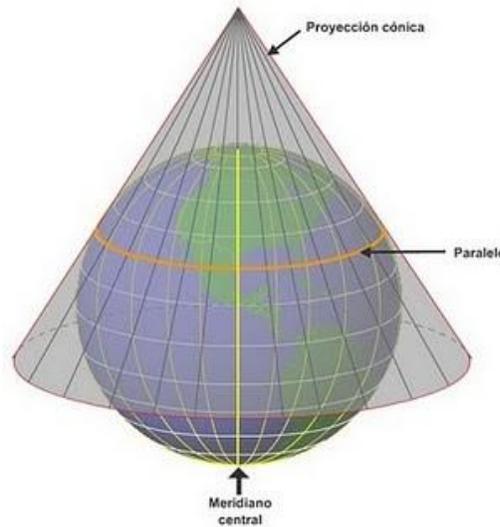


Figura 2-8. Proyección Cónica conforme de Lambert 2 paralelos tipo.

2.4.4 Proyecciones cartográficas utilizadas en México

Tabla 2.3 Proyecciones empleadas en México.

| | Información espacial o Geográfica |
|--------------------------------|--|
| Sistema Coordinado | Geográfico (latitud y longitud) o proyectado (X,Y) |
| Datum | NAD 27, ITRF92, NAD83, ITRF2010, WGS84 Y NAD 83 |
| Proyección Cartográfica | CCL O UTM (Zonas 11-16) |

3 HIDROLOGÍA Y SIG

La Hidrología es la disciplina científica que se dedica al estudio de las aguas de la Tierra, incluyendo su presencia, distribución y circulación a través del ciclo hidrológico, así como de sus interacciones con los seres vivos. Así mismo, trata de las propiedades físicas y químicas del agua EN todas sus fases.

De esta forma, los técnicos especializados en recursos hídricos, estudian los procesos fundamentales del ciclo hidrológico para poder describir tanto la cantidad como la calidad del agua que se desplaza a través del mismo (evaporación, escorrentía, infiltración, flujo subterráneo, y otros

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

componentes), y en qué condiciones y con qué características lo hace, así como los factores externos que influyen tanto en la calidad como en la cantidad de dicho flujo de agua (vertidos contaminantes, extracciones para riego o abastecimiento, infraestructuras hidráulicas, etc.), conocimientos que posteriormente les permiten planificar, diseñar, construir y operar todo tipo de proyectos destinados al control, uso y gestión de los recursos hídricos.

Por otro lado y debido a la complejidad del propio ciclo hidrológico, los diferentes aspectos del mismo son estudiados a su vez por varias subdisciplinas, entre las que cabe destacar la hidrometeorología, que se centra en el estudio del agua localizada en la capa inferior de la atmósfera, la hidrometría, que se encarga de las mediciones del agua superficial, especialmente precipitación y flujo de las corrientes, la hidrografía, que se encarga de la descripción y la confección de mapas de los grandes cuerpos de agua, tales como lagos, mares interiores y océanos, o la hidrología del suelo, que se centra en el estudio del agua que se encuentra en la zona saturada debajo de la superficie del suelo, y en la física suelo-agua en la zona no saturada.

Todas estas subdisciplinas y la hidrología en general, se nutren así mismo de otras ramas de la ciencia, como la geología, la edafología, la topografía, la fisiología vegetal, etc., que son necesarias para comprender y analizar por completo el ciclo hidrológico, empleando muchos de los principios y métodos de estas otras ramas. De esta forma, y como cualquiera puede entender, un flujo de agua se comportará hidráulica o hidrológicamente diferente si discurre por un terreno de sustrato regular, fino y liso, que, si lo hace por uno irregular, pedregoso o rocoso, al igual que lo hará diferente si discurre por un terreno yermo que por un terreno con abundante vegetación, o si discurre por un terreno llano o por un terreno accidentado.

Por todo ello, y debido a la complejidad que este tipo de estudios han alcanzado en estos últimos años, la realización de simulaciones por ordenador de los sistemas hidrológicos naturales o artificiales (SIG, HEC RAS, etc.), y la utilización de técnicas de detección remota, como es el caso de la obtención y procesamiento de ortofotos o imágenes de satélite, se ha convertido en una herramienta habitual y fundamental para la realización de este tipo de estudios.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

3.1 Esgurrimiento superficial, cuenca hidrográfrica y aguas superficiales

Es el fenómeno natural del ciclo hidrológico de los ríos y arroyos y las masas de agua interiores (lagos, embalses, etc.), que a su vez alimentan y conforman las grandes masas de agua del planeta, en este caso, mares y océanos.

El escurrimiento superficial es la parte del ciclo hidrológico que comprende el movimiento del agua desde que, a través de una precipitación llega al suelo, hasta que vuelve directamente a la atmósfera a través de la evaporación o evapotranspiración, o bien pasa a formar parte del agua subterránea a través de procesos de infiltración.

Como es lógico, el escurrimiento superficial está directamente influenciado por un gran número de factores, como pueden ser la intensidad y duración de las precipitaciones, la permeabilidad del terreno, el tipo y densidad de vegetación existente, la pendiente del terreno, la extensión de la cuenca hidrográfrica, la profundidad del nivel freático, etc.

De esta forma, el agua caída sobre una superficie de terreno determinada, se concentra en determinados puntos de la misma formando flujos de agua, que a su vez se unen con otros flujos, formándose con ello la red de drenaje de dicha superficie, estando todo este fenómeno directamente relacionado con la topografía de la misma, lo que hace que los modelos digitales del terreno, sean la base de todo estudio hidrológico.

Dentro de esta red de drenaje global de dicha superficie, cada curso de agua en particular (río, arroyo, barranco, etc.) drena un área determinada que se denomina área de captación o cuenca hidrográfrica, estando los límites geográficos de esta área, definidos por las zonas más elevadas del terreno, las cuales constituyen lo que conocemos como divisorias de agua.

De esta forma, el conjunto de todos los cursos de agua (ríos principales, afluentes, tributarios, arroyos, etc.) que confluyen en un curso de agua principal, se denomina red de drenaje superficial.

Finalmente, la cantidad de agua expresada en volumen (litros o m³) que circula por unidad de tiempo (horas o segundos), en un punto determinado de cualquier curso de agua, se denomina caudal. Fig 3-1.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

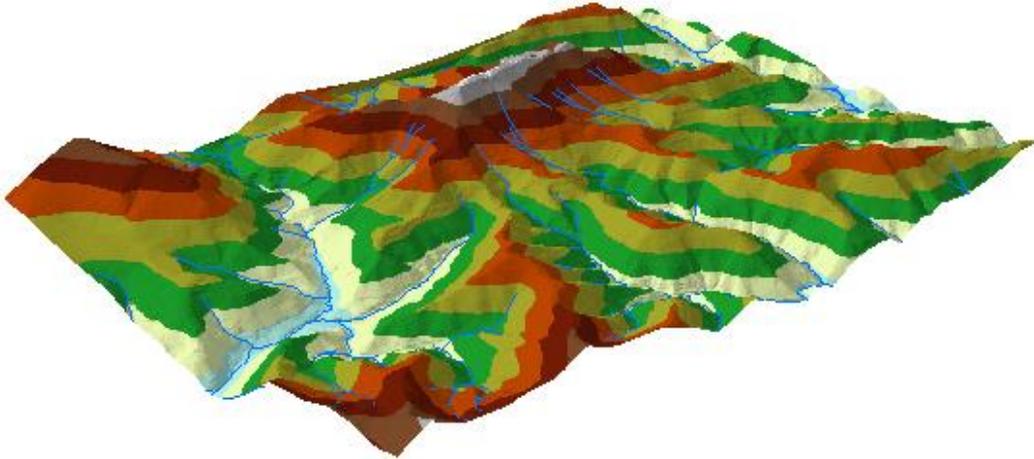


Figura 3-1. Modelo digital de elevación.

3.2 Relación SIG e hidrología

A lo largo de los últimos años, el desarrollo e implantación de los SIG en España ha sido rápido y continuo, convirtiéndose en una herramienta fundamental para el procesado de todo tipo de datos geográficos y la resolución y optimización de todo tipo de cuestiones técnicas relacionadas con el medio ambiente, como pueden ser:

- Estudios de Impacto Ambiental
- Estudio y seguimiento de poblaciones animales
- Optimización y análisis de rutas
- Optimización de localización de infraestructuras (Análisis multivariante)
- Estudios de Ruidos
- Estudios hidrológicos (Que es en lo que se centra esta Tesis)
- Gestión de residuos
- Estudios y proyectos de planificación y desarrollo urbano, etc.

Esta enorme utilidad de los SIG, ha provocado que, actualmente en el mercado existan un gran número de software tipo SIG entre los que se puede destacar los programas Idrisi, MapInfo, gvSIG (gratuito), Autodesk Map o Geomedia, si bien, el más utilizado en México por la mayor parte de las empresas y/o consultoras, y con el cual se trabajó en este tema de tesis, es ArcGIS, desarrollado por la empresa ESRI.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

En la actualidad, el campo de la Hidrología ha encontrado en los Sistemas de Información Geográfica un potente aliado para el estudio y gestión de los recursos hídricos, y es por ello que cada vez más técnicos, recurren a los SIG para la elaboración de modelos hidrológicos, los cuales suponen una herramienta fundamental para la correcta gestión de dichos recursos. Así mismo, representan una herramienta fundamental en la integración de la información necesaria para el manejo y procesamiento de todo tipo de datos hidrológicos y de calidad del agua.

Por todo ello, al hablar de los SIG y su aplicación de la hidrología, hay que tener en cuenta dos consideraciones fundamentales, una, que se trata de una herramienta que incrementa enormemente nuestra capacidad productiva, ya que nos ahorra una gran cantidad de tiempo que antes se perdía elaborando y procesando manualmente una gran cantidad de información, y otra, que sus aportaciones nos ayudan a analizar y comprender más fácilmente los sistemas y modelos hidrológicos, al combinar de forma rápida y sencilla, la ingente cantidad de datos tabulares (tablas) que suelen utilizarse en este tipo de trabajos, con los datos espaciales. Estos dos puntos hacen que de forma generalizada se haya extendido su uso, entre otros muchos campos, en las investigaciones ligadas a la hidrología.

Los SIG cuentan con un gran número de utilidades que les confieren una gran operatividad, como puede ser el procesado de datos y el análisis espacial. Además, en lo referente a la componente espacial, permiten acelerar el desarrollo e implementación de modelos hidrológicos de todo tipo.

Por otro lado, la estructura de datos en capas es muy intuitiva y permite que los modelos puedan interpretarse con apenas esfuerzo, es decir, los SIG permiten al técnico visualizar y comprender de forma clara las relaciones espaciales de los modelos hidrológicos, ya que en ningún momento se pierde la coherencia espacial durante los pasos previos de la modelización, de tal forma que tanto los valores de entrada, como los valores intermedios y los valores de salida mantienen en todo momento su georreferenciación y sus relaciones topológicas, aspectos absolutamente fundamentales para este tipo de trabajos.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

3.3 Aplicaciones SIG en el campo de la hidrología

Según la agrupación de Maidment (1991), es posible agrupar las aplicaciones de los SIG en el campo de la hidrología en cuatro categorías diferentes:

- Evaluación e inventarios hidrológicos.
- Determinación de parámetros hidrológicos.
- Construcción de modelos hidrológicos sencillos (sin análisis estadístico).
- Construcción de modelos hidrológicos integrados.

De esta forma, el presente curso persigue formar al alumno en las principales aplicaciones que los Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS, ArcHydroTools, HEC-GeoRAS) y software asociados (HEC-RAS) tienen en el campo de la hidrología, para que éste sea capaz de emplear dichas aplicaciones y herramientas en su trabajo como técnico especializado en hidrología, de tal forma que esté capacitado para, entre otras cuestiones, determinar y analizar cuencas hidrográficas y redes de drenaje, construir modelos hidrológicos y plantear medidas de gestión de los recursos hídricos.

Por ello, los principales objetivos del presente curso son los siguientes:

- Generar cuencas hidrográficas y redes de drenaje, y analizar los principales parámetros de las mismas a través de las herramientas hidrológicas de ArcGIS, tanto de Spatial Analyst como de ArcHydroTools.

3.4 ¿Qué es Modelbuilder?

Modelbuilder es una aplicación que se utiliza para crear, editar y administrar modelos. Los modelos son flujos de trabajo que encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento y suministran la salida de una herramienta a otra herramienta como entrada. Modelbuilder también se puede considerar un lenguaje de programación visual para crear flujos de trabajo. Modelbuilder es muy útil para construir y ejecutar flujos de trabajo sencillos, pero también proporciona métodos avanzados para ampliar la funcionalidad de ArcGIS, ya que permite crear y compartir los modelos a modo de herramienta, puede incluso utilizarse para integrar ArcGIS en otras aplicaciones.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Los beneficios de utilizar Modelbuilder pueden resumirse como sigue:

- Modelbuilder es una aplicación fácil de usar para crear y ejecutar flujos de trabajo que contienen una herramienta de secuencia de comandos.
- Puede crear sus propias herramientas con Modelbuilder. Las herramientas que crea con Modelbuilder se pueden utilizar en secuencias de comandos de Python y otros modelos.
- Modelbuilder, junto con las secuencias de comandos, es una forma de integrar ArcGIS en otras aplicaciones.
- Un ambiente de programación visual – Encadenar herramientas, incorporar el resultado de una herramienta.
- como ingreso de la siguiente herramienta.
- El lenguaje de programación es visual y no basado en texto.
- Permite rápidamente Transformar sus ideas en software.
- Software, en este caso, significa algo que le instruye a ArcGIS que haga lo que uno quiere hacer. Fig 3-2.
- Los Modelos que uno crea son herramientas de geoprocetamiento.

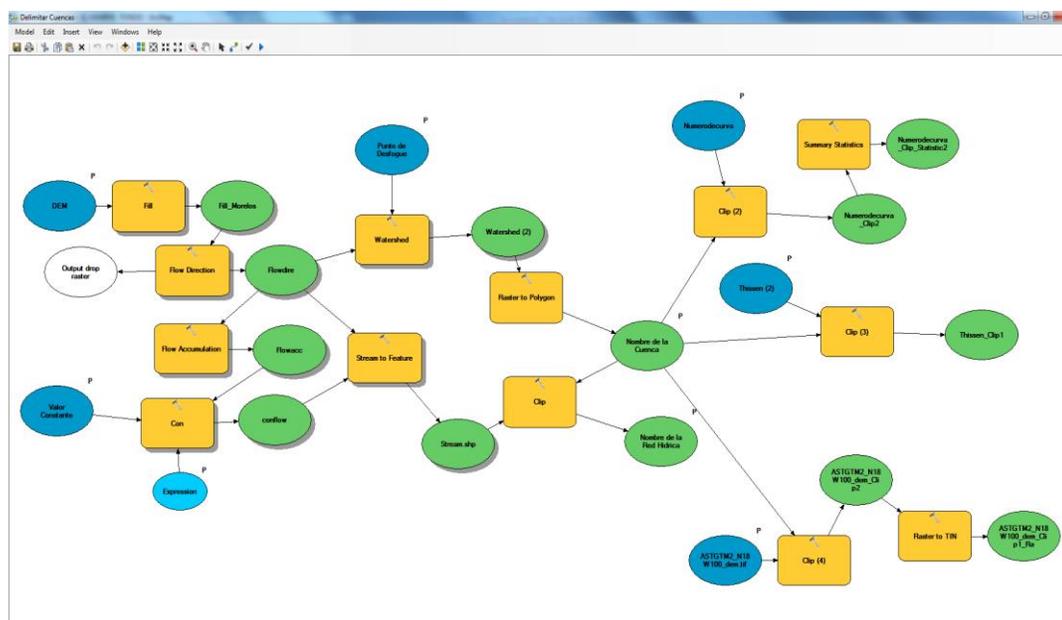


Figura 3-2. Delimitación de la cuenca con Modelbuilder

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

4 PROCESAMIENTO DE DATOS PLUVIOGRÁFICOS PARA LA OBTENCIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO QUE TIENE INFLUENCIA EN EL ESTADO DE MORELOS.

4.1 Interpolación

La interpolación consiste en hallar un dato dentro de un intervalo en el que conocemos los valores en los extremos.

Puede utilizarse para prever valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como: elevación, precipitaciones, concentraciones químicas y niveles de ruido. La suposición que hace que la interpolación sea una opción viable es que los objetos distribuidos espacialmente están correlacionados espacialmente; es decir, las cosas que están cerca tienden a tener características similares. Por ejemplo, si llueve de un lado de la calle, se puede prever con un alto nivel de confianza que está lloviendo del otro lado de la calle. Tendría menos certeza sobre si está lloviendo en todo el pueblo, y menos aún acerca del estado del tiempo en el condado vecino.

Los métodos de interpolación presentan diversas características y peculiaridades. El objetivo fundamental de su empleo no es, en nuestro caso, el de obtener valores donde no los hay, sino generar una representación lógica y aproximada de la distribución de la variable en el espacio, pero conservando el valor y la posición real de los elementos.

La base de la interpolación en los Sistemas de Información Geográfica es creando una superficie de elevación a partir de un conjunto de mediciones de muestras asociados a un campo (puntos). Fig 4-1.

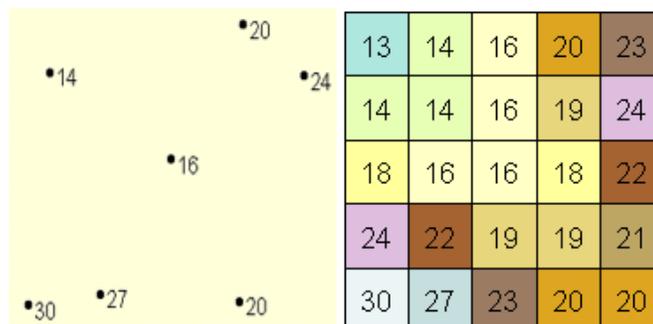


Figura 4-1. Datos interpolados de precipitaciones de entrada e interpolada

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Dentro de los Sistemas de Información Geográfica y el software Arcgis de la familia de ESRI se utilizan 7 métodos de interpolación, todos formando una superficie continua y dando un elemento raster de salida. Los datos de interpolación son:

4.1.1 Métodos de interpolación.

1. IDW
2. KRIGING
3. NATURAL NEIGHBOR (VECINO NATURAL)
4. SPLINE
5. SPLINE CON BARRERAS

Estas herramientas de interpolación se dividen en métodos determinísticos y de estadísticas geográficas. Los métodos determinísticos de interpolación asignan valores a las ubicaciones basándose en los valores medidos circundantes y de fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante (los cuales son IDW, VECINO NATURAL, TENDENCIAS Y SPLINE. El método de interpolación Kriging está basado en modelos estadísticos que incluyen la relación estadística entre puntos medidos. Proporcionando alguna medida de certeza o exactitud de las predicciones. El método de topo to raster, utilizan un método de interpolación diseñado específicamente para crear superficies continuas a partir de líneas de curvas de nivel.

4.1.1.1 IDW

El primero que se describe es inverso de la distancia, IDW por sus siglas en inglés y es considerado el método más simple de interpolación; López (1995) refiere a que asigna el peso más grande al punto más cercano y este peso disminuye a medida que aumenta la distancia dependiendo del coeficiente potencia β . El peso de un punto utilizando este método se expresa como:

$$W_i = N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta / \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta$$

Dónde:

N = número total de estaciones

$d_{e,i}$ = distancia entre el sitio a estimar e y la estación i

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

β = Coeficiente de potencia.

El valor del punto se estima tomando con base en un promedio ponderado de los datos de las mediciones. A cada estación se le asigna un peso en virtud de la localización con respecto a otras y con respecto al punto a estimar. Para una red de N estaciones, la ecuación básica es:

$$p_e = \sum_{i=1}^N w_i p_i$$

Dónde:

p_e = dato estimado en el sitio e

p_i = dato medido en la estación i

w_i = denota el peso de la estación

i = representa el punto estimado en el sitio e

N = número total de estaciones cercanas al sitio e, que se utilizarán para estimar el dato en el sitio e.

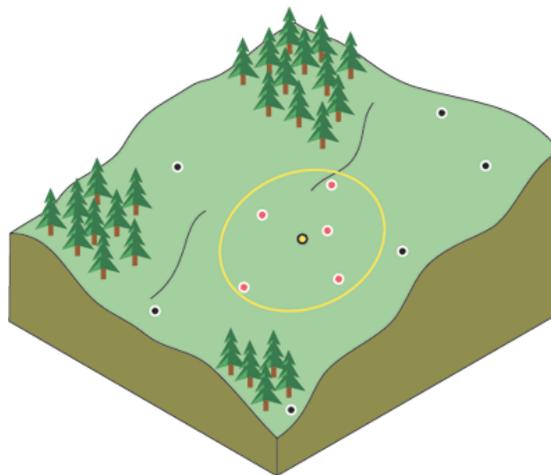


Figura 4-2 Método de interpolación IDW

(Fuente: http://blog.sina.com.cn/s/blog_816800900101f2lk.html)

4.1.1.2 Método de interpolación kriging

Otro método empleado es el método kriging que se basa en una función continua que explica el comportamiento de una variable en las distintas direcciones de un espacio geográfico y permite asociar la variabilidad de la

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor. Este método de interpolación es conocido como método de Sibson o de “rodo de área”. Sus propiedades básicas son que es local, utiliza sólo un subconjunto de muestras que circundan a un punto de consulta y asegura que las alturas interpoladas estarán dentro del rango de las muestras utilizadas. No infiere tendencias ni produce picos, depresiones, crestas o valles que no estén ya representados por las muestras de entrada. La superficie pasa por las muestras de entrada y es suave en todas partes, excepto en las ubicaciones de las muestras de entrada. Fig 4-4.

Este método de interpolación funciona como los polígonos de Thiessen.

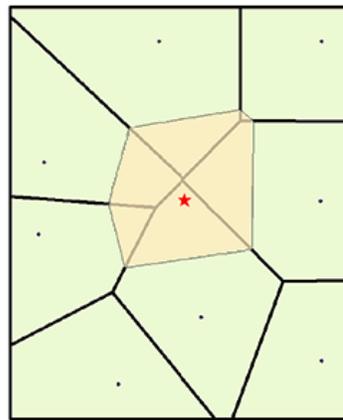


Figura 4-4. Método de interpolación vecino natural

4.1.1.4 Método de interpolación spline

Este método de interpolación estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.

Este método es mejor para generar superficies que varían levemente, como la elevación, la altura de las tablas de agua o las concentraciones de contaminación.

EL tipo de interpolación impone dos condiciones:

- La superficie debe pasar exactamente por los puntos de datos.
- La superficie debe tener una curvatura mínima (la suma acumulativa de los cuadros de los términos de la derivada segunda de la superficie tomada sobre cada punto de la superficie debe ser mínimo). Fig 4-5.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

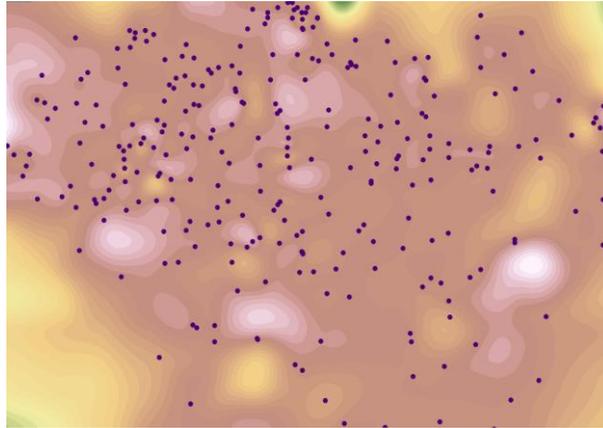


Figura 4-5. Método de interpolación spline

4.1.1.5 Método de interpolación spline con barreras

Se aplica un método de curvatura mínima, como el implementado a través de una técnica multicuadrícula unidireccional que va de una cuadrícula inicial gruesa, inicializada en este caso como el promedio de los datos de entrada, a través de una serie de cuadrículas más finas hasta que se produce una aproximación de una superficie de curvatura mínima en el espacio de fila y columna deseadas.

4.2 Precipitación

La precipitación es la fuente primaria del agua en la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. La meteorología es el estudio de todos los fenómenos atmosféricos. El estudio de los fenómenos relacionados con el agua atmosférica, que son los que interesan en la ingeniería hidrológica, se denomina hidrometeorología. Aun cuando está dentro de la meteorología, la hidrometeorología constituye por sí mismo toda una ciencia, cuyo tratamiento ocuparía un volumen mayor que el presente.

4.2.1 Medidas de Precipitación

Los aparatos más usuales en México para medir la precipitación son los pluviómetros y los pluviógrafos. Los pluviómetros están formados por un recipiente cilíndrico graduado de área transversal a al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia, y cuya área de captación es A . Se

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

acostumbra colocar en el embudo un par de mallas para evitar la entrada de basura u otros objetos. El área de captación A es normalmente diez veces mayor que el área del recipiente a , con el objeto de que, por cada milímetro de lluvia, se deposite un centímetro en el recipiente. De este modo, es posible hacer lecturas a simple vista hasta de una décima de milímetro de lluvia, que corresponde a un milímetro depositado en el recipiente. En México se toman lecturas de los pluviómetros diario a las 8 am. Fig 4-6.

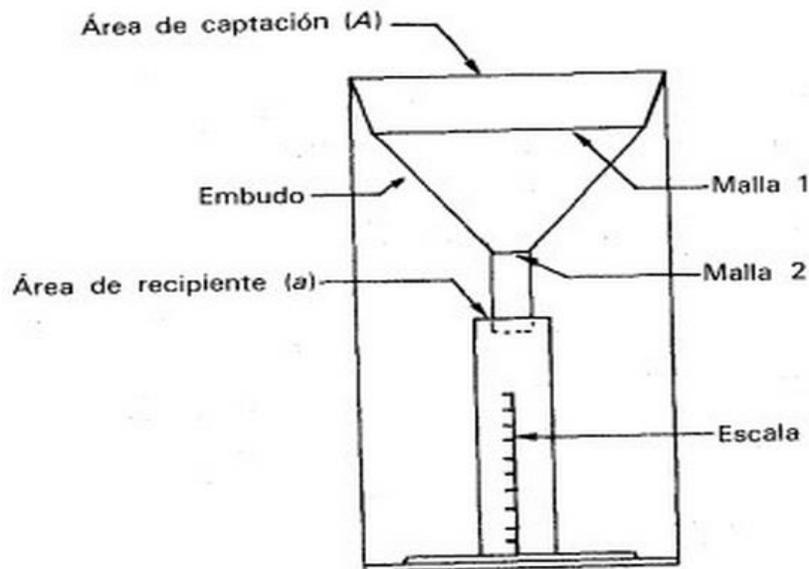


Figura 4-6. Pluviómetros

Los pluviógrafos son semejantes a los pluviómetros, con la diferencia de que tienen un mecanismo para producir un registro continuo de precipitación. Este mecanismo está formado por un tambor que gira a velocidad constante sobre el que se coloca un papel graduado especialmente. En el recipiente se coloca un flotador que se une mediante un juego de varillas a una plumilla que marca las alturas de precipitación en el papel.

El recipiente normalmente tiene una capacidad de 10mm de lluvia y, al alcanzarse esta capacidad, se vacía automáticamente mediante un sifón. Fig 4-7.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

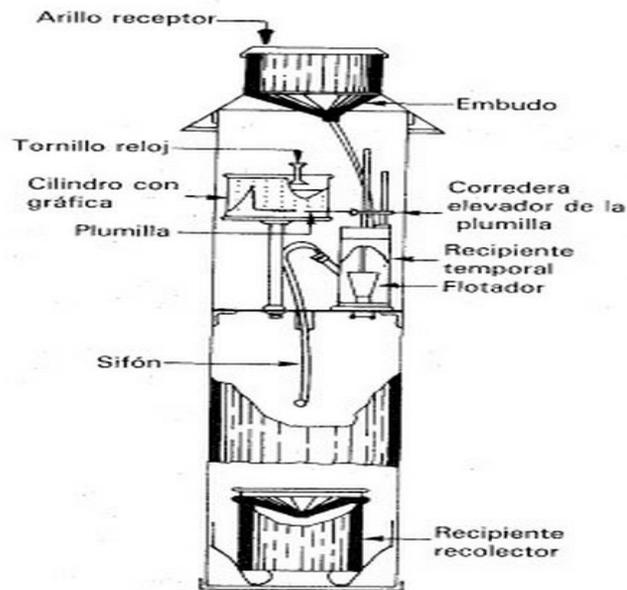


Figura 4-7. Pluviógrafos

El pluviógrafo antes descrito es el de uso más común en México, aunque existen otros tipos en el mundo. Algunos ejemplos son el de resorte, que en lugar de flotador usa un reporte que se deforma con el peso del agua y que es más preferible cuando se miden alturas de nieve, y el balancín, que tiene dos recipientes colocados en un balancín, de modo que cuando uno de ellos se llena desequilibra la balanza, que gira dejando el otro recipiente en posición de ser llenado. En algunos aparatos el volumen de agua necesaria para hacer girar el balancín es el correspondiente a 0.25mm de lluvia.

En este tipo de pluviógrafos, al girar el balancín se acciona un interruptor que produce un impulso eléctrico que a su vez mueve la plumilla para registrar la altura de precipitación correspondiente.

El registro que se obtiene de un pluviógrafo se llama pluviograma. Del pluviograma se obtiene una gráfica de precipitación acumulada contra el tiempo llamada curva masa de precipitación. A partir de una curva masa de precipitación es posible dibujar diagramas de barras que representen a las variaciones de la altura de precipitación o de su identidad en intervalos de tiempo previamente seleccionados.

Estos diagramas de barras se llaman hietogramas. Fig 4-8 y Fig 4-9.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

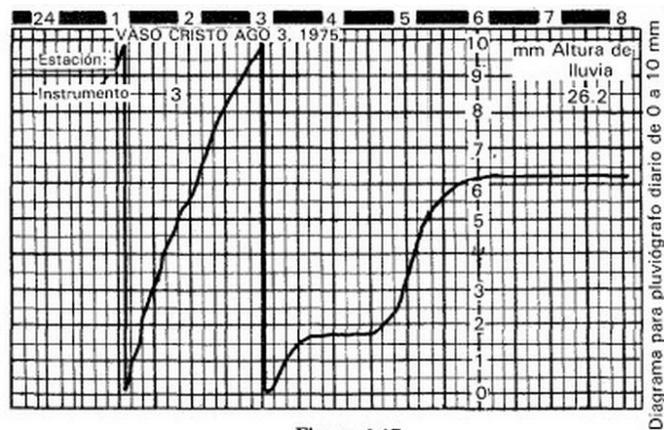


Figura 4-8. Pluviógramas

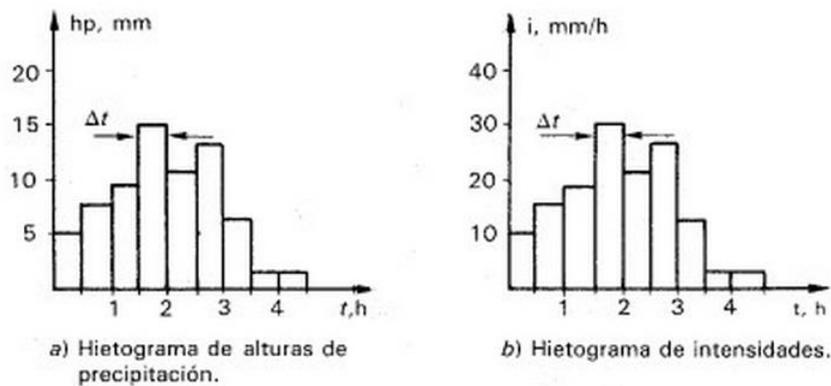


Figura 4-9. Hietogramas

4.2.2 Datos de precipitación

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país. El Servicio Meteorológico Nacional, depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

El SMN es una dependencia la cual se concentra en la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológicos que pueden afectar las distintas actividades económicas y sobre todo originar la pérdida de vidas humanas. El SMN realiza el acopio de la información climatológica nacional y tiene como funciones principales:

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

1. Mantener informado al Sistema Nacional de Protección Civil, de las condiciones meteorológicas que puedan afectar la población y a sus actividades económicas.
2. Difundir al público boletines y avisos de las condiciones del tiempo, especialmente durante la época de ciclones, que abarca de mayo a noviembre.
3. Proporcionar al público información meteorológica y climatológica.
4. Concentrar, revisar, depurar y ordenar la información, generando el Banco Nacional de Datos Climatológicos, para consulta al público.

Existen también otras dependencias como el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) la cual forma parte de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), las cuales tiene sus res de estaciones agro climatológicas; sin embargo, las que se cuentan con mejor registro y se es más oficial son las que se registran por el SMN y son emitidas por la CONAGUA.

4.3 Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM)

CLICOM es una página que utiliza una base de datos de estaciones climáticas superficiales de México administrada por el Lic. Alejandro González Serratos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa Climate Computing project. Las observaciones son diarias del CLICOM representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información, pero se pueden encontrar datos de 1920 a 2013.

El propósito de esta página es dar a conocer una herramienta web que procesa los datos diarios en su formato original (CLICOM Estaciones) y en un formato de malla (CLICOM en Malla).

La herramienta del CLICOM Estaciones, permite hacer gráficas (ciclo anual y series de tiempo de temperaturas, precipitación, evaporación y unidades de calor), descargarlas, así como los datos de las gráficas en texto como se muestra en la Sección de Ayuda, la interface de visualización de las gráficas se hace seleccionando primero un estado del país, ya sea una estación climática directamente del mapa, o bien se hace una búsqueda de una

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

estación por su nombre y de igual manera se pueden seleccionar las estaciones con mayor y menor registros de 25 años de datos.

La obtención de los datos climatológicos diarios del CLICOM se obtuvieron al ingresar vía web al portal del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B,C, (<http://clicom-mex.cicese.mx>). Fig 4-10.

The screenshot shows the 'Descarga de Datos' (Data Download) page of the CLICOM web application. The interface is organized into several sections:

- Header:** Includes the CICESE logo on the left and the CONACYT logo on the right. A navigation bar contains links for 'Inicio', 'Descarga de Datos', 'Unidades Calor', 'Ayuda', and 'Contacto'.
- Descarga de Datos:** The main section title.
- Parametros:** Contains search filters:
 - Búsqueda:** A dropdown menu for 'Estado' is set to 'Morelos'. There is an empty text input for 'Estación'.
 - Años Efectivos:** Two checkboxes are checked: 'Mayor 25 Años' and 'Menor 25 Años'. A 'Buscar' button is located below.
 - Descarga:** A dropdown menu for 'Variables' is set to 'Precipitación'. Below it, radio buttons allow selecting the file format: '.CSV (Excel)' (selected) and '.MAT (Matlab)'. A 'Descargar' button is at the bottom.
- Resultados:** A list of 16 climate stations in Morelos, each with a small icon to its right. The stations listed are: ATLATLAHUACAN, MOR; COLONIA EMPLEADO, MOR; CUAUTLA (SMN), MOR; CUERNAVACA (DGE), MOR; CUAUTLA (DGE), MOR; EL RODEO, MOR; HUAJINTLAN, MOR; HUAUTLA, MOR; C.B.T.A.154 HUITZILAC, MOR; OAXTEPEC, MOR; TEMILPA, MOR; TEMIXCO, MOR; TEPALCINGO, MOR; TEQUESQUITENGO, MOR; TETELCINGO, MOR; TICUMAN, MOR; and TILZAPOTLA, MOR.
- Estaciones Seleccionadas:** A section for selected stations, currently empty, with a '>>' button and an '(X)' button for removal.

At the bottom of the page, there is a footer with logos for SMN, REDESCLIM (Red de Desastres Hidrometeorológicos y Climáticos), INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), and peaccBC (Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático).

Figura 4-10. Clicom

Una vez ya ingresada la página web lo primero que se realiza es un análisis sobre cuál es la zona que se pretende estudiar. El resultado de dicho análisis se obtuvo ubicando en el Estado de Morelos las 8 cuencas hidrográficas que cubren a dicho estado y las estaciones climatológicas que se encuentran sobre las cuencas (Información en formato KMZ, descargado desde la página de la CONAGUA), para la realización de su respectivo análisis.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

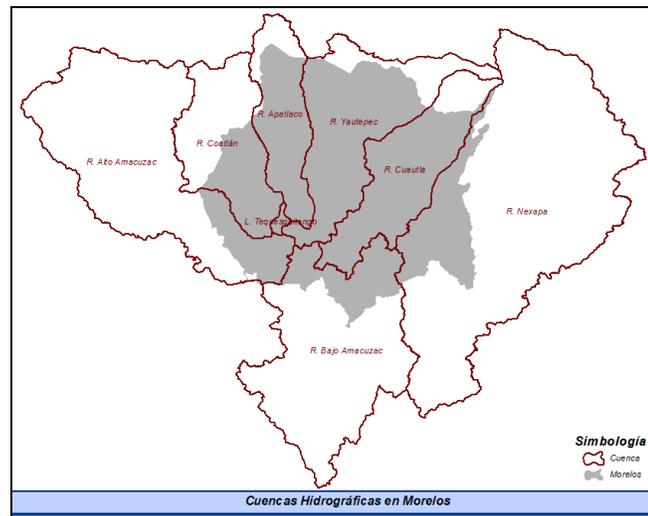


Figura 4-11. Zona de estudio

Se obtuvieron 288 estaciones climatológicas del SMN que cubren todas las cuencas hidrográficas que intersecan al Estado de Morelos con sistema del CLICOM.

4.3.1 Estaciones climatológicas en cuencas

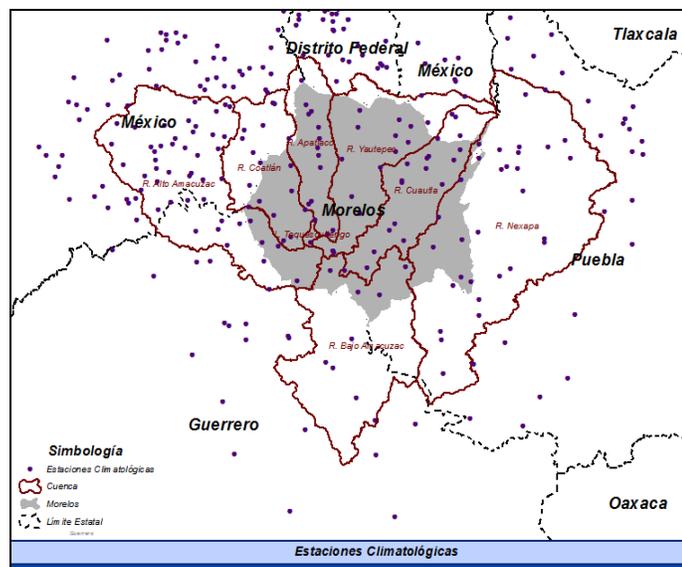


Figura 4-12. Estaciones climatológicas

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Identificadas las 288 estaciones climatológicas que cubren las 8 cuencas hidrográficas (Cuenca Apatlaco, Cuenca Coatlán, Cuenca Alto Amacuzac, Cuenca Yautepec, Cuenca Cuautla, Cuenca Nexapa, Cuenca Lago de Tequesquitengo y Cuenca Bajo Amacuzac), y se encuentran localizadas dentro de los Estados de Morelos, Distrito Federal, Estado de México, Puebla y Guerrero.

La información que se descargó fue la precipitación máxima diaria (de las estaciones climatológicas) por Estado desde el CLICLOM en formato csv.

Posteriormente se obtuvieron las precipitaciones máximas anuales de los registros máximos diarios para los diferentes años con los que se cuentan con información pluviométrica, para todas las estaciones climatológicas.

4.4 Determinación de datos faltantes

Se capturaron las precipitaciones máximas anuales de cada una de las estaciones climatológicas que se determinaron en el área de estudio, integrándolas en una base de datos para realizar su interpretación, análisis y manipulación de la información obtenida.

El análisis se realizó estación por estación, en las cuales unos de los criterios fue la eliminación de datos de precipitaciones máximas anuales para ciertos años que no se tiene una lógica y comparadas a estaciones cercanas están mucho por afuera de los rangos, ya que algunos son valores muy pequeños (1 mm, 5 mm) siendo datos incongruentes.

Analizadas las estaciones en base al año del cual se empezaron a registrar datos y hasta el último año de registro, se determinaron y ubicaron los datos faltantes; ya sea porque no fueron registrados por una y otra medición de precipitación, estuvieran fuera de operación o tuvieran un mal registro, para un posterior análisis del relleno de dichos datos faltantes.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

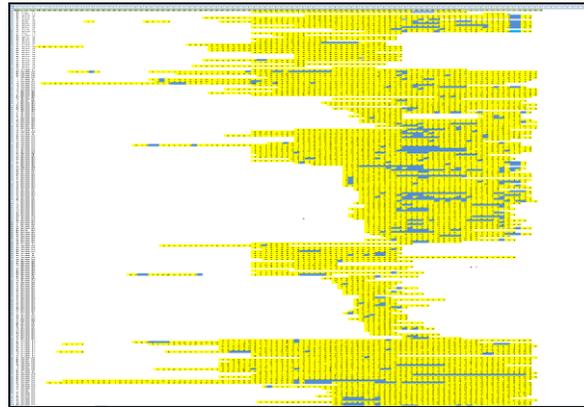


Figura 4-13. Determinación de datos faltantes

Localizados los datos faltantes de la base de datos de las precipitaciones máximas anuales de las estaciones climatológicas ya elaborada. Los sistemas de información Geográfica y el software ARCMAP de la familia de ESRI (Arcgis) se tiene la herramienta de métodos de interpolación, que nos permite interpolar los datos con los que se cuenta de cada estación climatológica y posteriormente sea llenados datos faltantes.

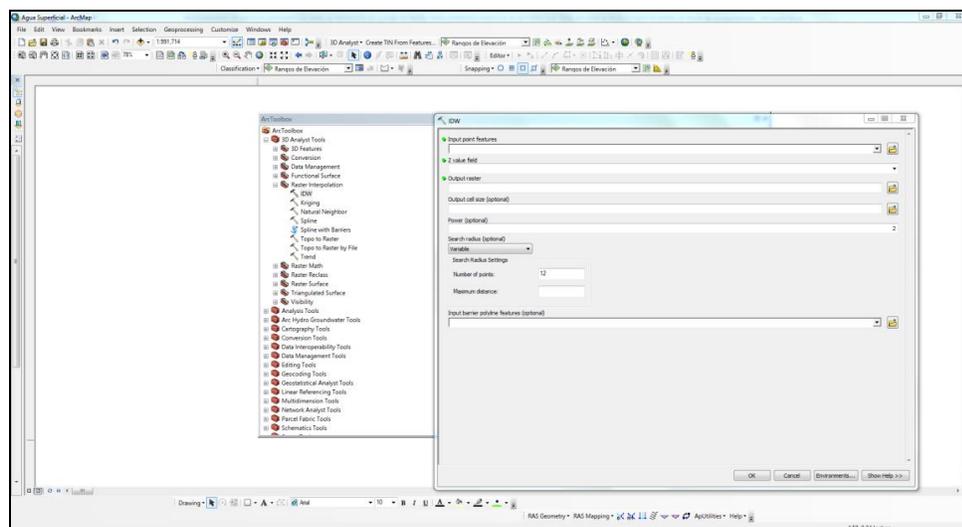


Figura 4-14. Métodos de interpolación en ARCGIS

Se realizó la unión de la base de datos de las estaciones con la capa (shape) de las estaciones climatológicas para su procesamiento. Fig 4-15.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

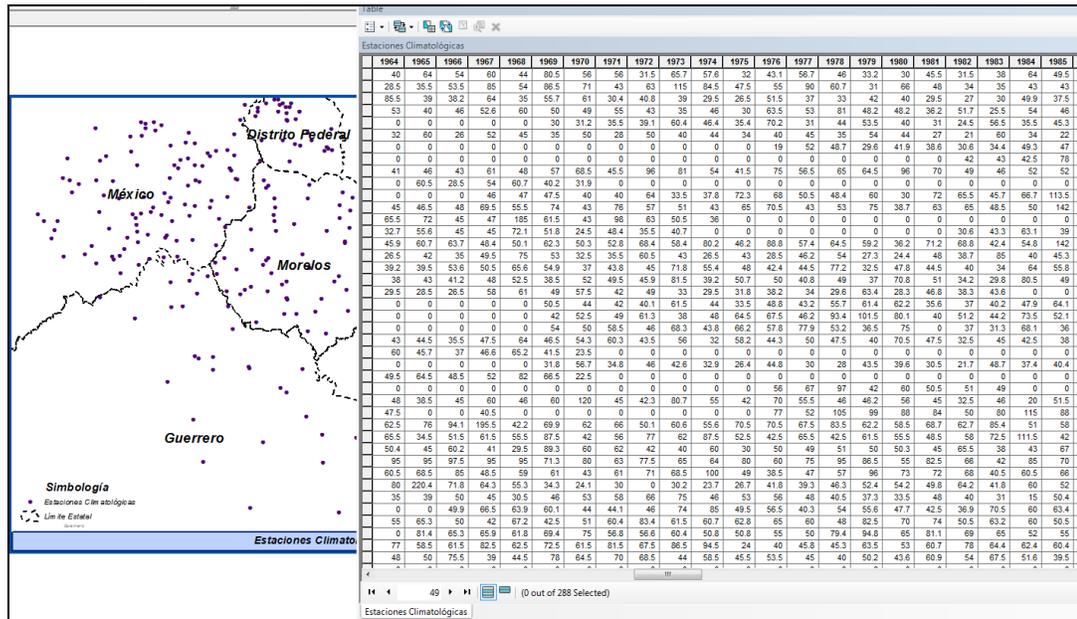


Figura 4-15. Unión de base de datos y estaciones climatológicas

Con la capa unida entre la base de datos y el shape, se realizó un análisis de los datos a interpolar, de los cuales se interpolaron datos del año 1969 a 2012, ya que años anteriores a 1969 no se cuenta con suficiente información en las estaciones o no registraban datos para esas fechas y solo las estaciones que se cuenta con datos de precipitación.

El método de interpolación más favorable para este relleno de datos es el kriging, ya que nos realiza un análisis estadístico por ciertas áreas y nos arroja un promedio por zonas. Para los años 1969 a 2012 se realizó la interpolación año por años y así lograr obtener 43 imágenes ráster con información de las precipitaciones máximas anuales para poder realizar el relleno de estos datos, del cual con la herramienta agregar información en Z, que en este caso en valor z es el que se generó con la información resultante de la interpolación y así agregar el valor interpolado para todos los años analizados.

Una vez agregada la información de los modelos generados se procedió a completar los datos faltantes de todas las estaciones climatológicas (Años 1969 – 2012). Fig 4-16.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

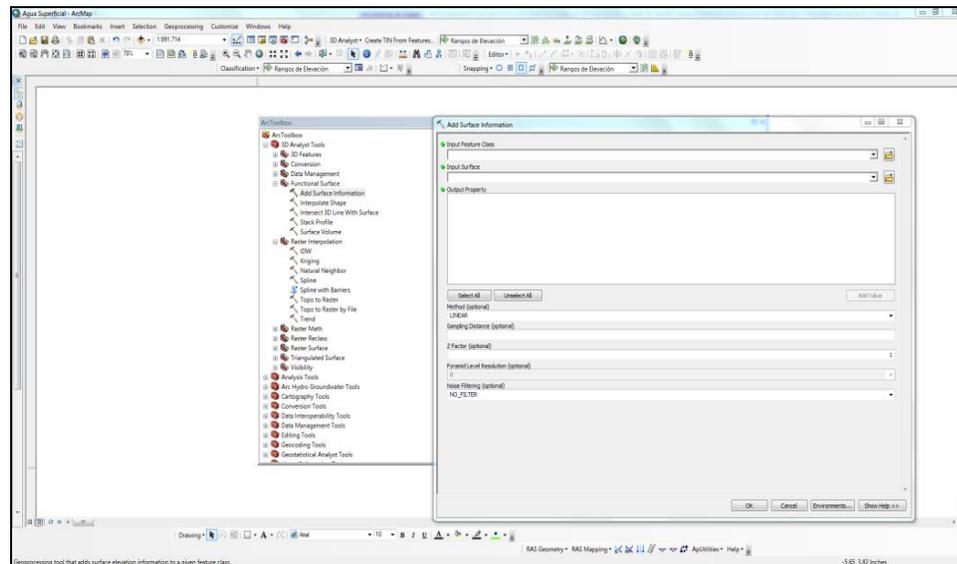


Figura 4-16. Agregar información interpolada

De las 288 estaciones climatológicas, se descartaron 89 de ellas ya que contaban con una serie menor a 15 años de registros y se localizaban dispersos entre cada año. Por lo cual la información final es de 199 estaciones climatológicas que cubren todas las cuencas hidrográficas que conforman o cubren al Estado de Guerrero para realizar sus respectivos estudios.

4.5 Análisis probabilístico para la determinación de precipitaciones a diferentes periodos de retorno (AX)

El software AX fue creado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en 1992. El software ajusta distintas funciones de probabilidad al conjunto de datos de eventos máximos anuales y calcula el error estándar de cada una de ellas respecto de la muestra. Aplica las funciones de distribución de probabilidad Normal, Log-normal, Gumbel, exponencial, Gamma, y doble Gumbel. De las 199 estaciones climatológicas se procedió al análisis de frecuencia de cada una de ellas para obtener los periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 Años). Los métodos para calcular los parámetros de las funciones de probabilidad que utiliza el software AX, son por momentos y por máxima verosimilitud;

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

además, las funciones Log normal y Gamma pueden calcularse para dos o tres parámetros. La función de probabilidad mencionada se calcularon los valores de gastos máximos asociados a diferentes periodos de retorno para las estaciones hidrométricas en análisis, se obtuvo la función que menor error cuadrático estándar presenta de cada estación. Fig 4-17.

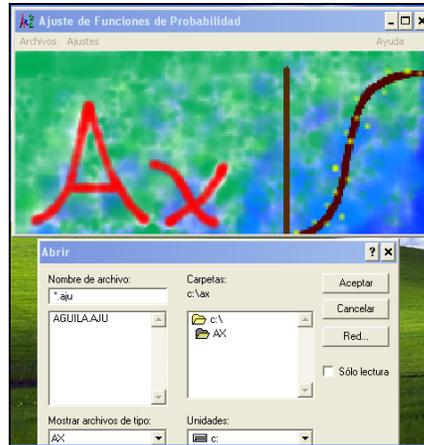


Figura 4-17. Software AX

Se realizó el ajuste de probabilidad mediante el software referido, y se determinó el gasto asociado a diferentes periodos de retorno los cuales son: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1,000, 2,000, 5,000 y 10,000 años, para todas las estaciones climatológicas seleccionadas. Fig 4-18.

| Función | Momentos | | Máxima Verosimilitud | | No | Tr | Dato cal |
|---|--------------|--------------|----------------------|--------------|----|--------|----------|
| | 2 parámetros | 3 parámetros | 2 parámetros | 3 parámetros | | | |
| Normal | 4.639 | ----- | 4.639 | ----- | 1 | 2. | 37.13 |
| Lognormal | 3.750 | 3.724 | 3.605 | 44.116 | 2 | 5. | 51.65 |
| Gumbel | 3.663 | ----- | 3.644 | ----- | 3 | 10. | 61.37 |
| Exponencial | 4.687 | ----- | 19.930 | ----- | 4 | 20. | 70.77 |
| Gamma | 45.091 | 45.091 | 11111.000 | 11111.000 | 5 | 50. | 83.08 |
| Doble Gumbel | 4.300 | | | | 6 | 100. | 92.46 |
| Mínimo error estándar: 3.605 | | | | | 7 | 200. | 101.96 |
| Calculado por la función: Lognormal (m x. ver.) 2 p. | | | | | 8 | 500. | 114.81 |
| <input type="button" value="Aceptar"/> <input type="button" value="Imprimir"/> <input type="button" value="Ayuda"/> | | | | | 9 | 1000. | 124.9 |
| <input type="button" value="Cerrar"/> <input type="button" value="Imprimir"/> | | | | | 10 | 2000. | 135.25 |
| <input type="button" value="Guardar"/> <input type="button" value="Ayuda"/> | | | | | 11 | 5000. | 148.27 |
| <input type="button" value="Cerrar"/> <input type="button" value="Imprimir"/> | | | | | 12 | 10000. | 159.58 |

Figura 4-18. Diferentes periodos de retorno para las estaciones climatológicas.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

De las 199 estaciones se realizaron el ajuste de probabilidad, extrapolando y obteniendo los diferentes periodos de retorno de cada una de ellas. Se capturaron en una base de datos, para posteriormente ser unida a la capa cartográfica de estaciones climatológicas y obtener sus isoyetas y polígonos de thiesen. Fig 4-19.

| NOMBRE | CLAVE | TR2 | TR5 | TR10 | TR20 | TR50 | TR100 | TR200 | TR500 | TR1000 | TR2000 | TR5000 | TR10000 |
|------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Achi Chico D-4 | 17068 | 61.32 | 76.19 | 84 | 90.46 | 97.72 | 102.57 | 106.99 | 112.36 | 116.12 | 119.67 | 124.1 | 127.27 |
| AHUEHUETZINGO | 17069 | 56.9 | 70.48 | 100.12 | 141.99 | 190.38 | 225.06 | 259.11 | 303.61 | 337.12 | 370.49 | 413.91 | 446.47 |
| ALPONOCAN | 17060 | 57.19 | 86.02 | 93.54 | 98.78 | 105.11 | 109.88 | 114.76 | 121.59 | 127.07 | 132.95 | 141.21 | 148.43 |
| ALPUYECA | 17072 | 57.13 | 68.9 | 75.06 | 80.15 | 85.89 | 89.73 | 93.23 | 97.49 | 100.52 | 103.38 | 106.68 | 109.33 |
| APANCINGO | 17061 | 61.88 | 79.96 | 89.67 | 97.83 | 107.16 | 113.47 | 119.31 | 126.47 | 131.61 | 136.51 | 142.22 | 146.83 |
| ATLIXCO | 21012 | 52.6 | 69.49 | 80.67 | 91.4 | 105.29 | 115.69 | 126.06 | 139.74 | 150.07 | 160.41 | 174.06 | 184.39 |
| AXOCHIAPAN | 17030 | 63.56 | 76.21 | 84.59 | 92.62 | 103.02 | 110.81 | 118.57 | 128.81 | 136.55 | 144.29 | 154.52 | 162.25 |
| AXUTLA (CFE) | 21015 | 64.4 | 79.04 | 86.79 | 93.24 | 100.57 | 105.48 | 110.01 | 115.52 | 119.46 | 123.2 | 127.53 | 131.01 |
| BALCON DIABLO | 21016 | 44.27 | 57 | 73.49 | 92.29 | 115 | 131.34 | 147.36 | 168.34 | 184.22 | 199.89 | 220.31 | 235.98 |
| C.A.E SAN JUAN TETLA | 21164 | 33.46 | 54.98 | 85 | 117.54 | 156.08 | 193.74 | 210.9 | 246.45 | 273.23 | 299.59 | 335.29 | 362.5 |
| CHAVARRIA | 17062 | 60.52 | 73.09 | 81.41 | 89.39 | 99.72 | 107.47 | 115.18 | 125.36 | 133.05 | 140.74 | 150.9 | 158.59 |
| CHIAUTLA DE TAPIA | 21116 | 56.27 | 70.59 | 78.35 | 84.89 | 92.42 | 97.54 | 102.28 | 108.13 | 112.34 | 116.36 | 121.06 | 124.86 |
| CHIETLA | 21024 | 60.73 | 73.96 | 81.37 | 87.76 | 95.27 | 100.46 | 105.35 | 111.46 | 115.92 | 120.23 | 125.33 | 129.5 |
| CHILA DE LA SAL | 21198 | 59.37 | 75.82 | 84.47 | 91.61 | 99.65 | 105 | 109.9 | 115.84 | 120 | 123.93 | 128.82 | 132.33 |
| CUAUTLITA | 17073 | 60.36 | 84.62 | 104.98 | 123.87 | 147.16 | 164.16 | 180.95 | 203.02 | 219.58 | 236.13 | 258.31 | 274.11 |
| CUEMTEPEC | 17058 | 68.1 | 78.75 | 81.49 | 83.51 | 86.03 | 87.99 | 90.05 | 93.02 | 95.49 | 98.16 | 101.88 | 104.9 |
| E.T.A 040 AMACUZAC | 17044 | 58.15 | 75.3 | 95.47 | 114.16 | 136.25 | 152.14 | 167.74 | 188.1 | 203.57 | 218.82 | 238.85 | 254.39 |
| E.T.A 118 YECAPITLA | 17043 | 59.6 | 80.03 | 89.45 | 96.39 | 103.66 | 109.19 | 114.64 | 121.76 | 127.12 | 132.47 | 139.53 | 145.04 |
| ECHEVERRIA | 21034 | 46.34 | 55.5 | 61.56 | 67.37 | 74.9 | 80.54 | 86.16 | 93.57 | 99.18 | 104.78 | 112.18 | 117.78 |
| EL BATAN | 21163 | 44.99 | 72.21 | 182.08 | 268.92 | 368.13 | 439.2 | 508.95 | 600.11 | 668.68 | 738.04 | 826.32 | 893.57 |
| EL HIGUERON | 17074 | 57 | 65.35 | 69.87 | 73.69 | 78.08 | 81.06 | 83.83 | 87.24 | 89.69 | 92.04 | 94.77 | 96.99 |
| EL LIMON | 17057 | 56.16 | 76.16 | 89.4 | 102.1 | 118.54 | 130.86 | 143.13 | 159.33 | 171.57 | 183.8 | 199.97 | 212.2 |
| LA VIGIA | 17066 | 55.56 | 78.47 | 98.74 | 117.92 | 141.55 | 158.79 | 175.8 | 198.02 | 214.84 | 231.67 | 254 | 270.67 |
| ESCUELA DE BIOLOGIA UAEM | 17037 | 69.99 | 82.87 | 91.4 | 99.59 | 110.18 | 118.11 | 126.02 | 136.45 | 144.34 | 152.22 | 162.64 | 170.51 |
| HUAQUECHULA | 21123 | 53.64 | 71.24 | 83.94 | 96.81 | 114.48 | 128.49 | 143.14 | 163.61 | 180.19 | 197.64 | 220.15 | 240.22 |
| HUECAHUAXCO | 17045 | 43.78 | 60.46 | 87.54 | 122 | 162.68 | 191.86 | 220.48 | 257.9 | 286.24 | 314.57 | 352.05 | 379.47 |
| HUEHUETLAN EL CHICO | 21124 | 45.01 | 66.7 | 83.11 | 99.53 | 121.22 | 137.63 | 154.04 | 175.74 | 192.15 | 208.56 | 230.26 | 246.67 |
| HUEHUETLAN EL GRANDE | 21045 | 62.75 | 73.65 | 80.87 | 87.79 | 96.75 | 103.47 | 110.16 | 118.99 | 125.66 | 132.33 | 141.14 | 147.81 |
| HUEJOTZINGO | 21046 | 49.98 | 61.81 | 68.98 | 75.15 | 82.38 | 87.38 | 92.08 | 97.94 | 102.22 | 106.35 | 111.23 | 115.21 |
| HUEYAPAN | 17046 | 55.53 | 89.69 | 97.51 | 102.33 | 108.01 | 112.19 | 116.42 | 122.19 | 126.81 | 131.66 | 138.69 | 144.41 |
| HUILANGO | 21192 | 56.82 | 70.47 | 78.86 | 86.53 | 96.08 | 103.02 | 109.8 | 118.64 | 125.34 | 132.03 | 140.18 | 147.07 |
| HUITZILAC | 17047 | 75.12 | 95.43 | 108.88 | 121.78 | 138.47 | 150.98 | 163.45 | 179.9 | 192.33 | 204.75 | 221.17 | 233.59 |
| IXCAMILPA | 21048 | 54.37 | 64.27 | 70.15 | 75.4 | 81.8 | 86.35 | 90.75 | 96.38 | 100.58 | 104.73 | 109.73 | 113.89 |
| IZUCAR DE MATAMOROS (DGE) | 21049 | 53.3 | 67.9 | 77.05 | 85.53 | 96.21 | 104.06 | 111.8 | 121.97 | 129.74 | 137.54 | 145.13 | 155.28 |
| IZUCAR DE MATAMOROS (SMN) | 21132 | 56.13 | 78.46 | 108.42 | 138.67 | 174.36 | 199.99 | 225.15 | 257.99 | 282.75 | 307.51 | 339.83 | 365.01 |
| JOJUTLA (DGE) | 17031 | 55.07 | 67.15 | 75.15 | 82.83 | 92.76 | 100.2 | 107.62 | 117.4 | 124.8 | 132.19 | 141.96 | 149.35 |
| JOLALPAN | 21050 | 52.36 | 70.51 | 89.93 | 107.15 | 127.52 | 142.19 | 156.6 | 175.44 | 189.66 | 203.89 | 222.59 | 236.82 |
| LAGUNILLAS DE RAYON | 17036 | 52.57 | 69.45 | 78.48 | 84.85 | 92.3 | 97.69 | 102.97 | 109.89 | 115.12 | 120.35 | 127.29 | 132.67 |
| MOYOTEPEC | 17054 | 49.04 | 66.76 | 78.49 | 89.74 | 104.31 | 115.22 | 126.1 | 140.44 | 151.29 | 162.13 | 176.45 | 187.29 |
| NEXPA | 17038 | 50.55 | 64.35 | 73.49 | 82.25 | 93.6 | 102.1 | 110.57 | 121.75 | 130.19 | 138.64 | 149.8 | 158.24 |
| PROGRESO | 17071 | 62.69 | 82.73 | 96.01 | 108.73 | 125.21 | 137.56 | 149.86 | 166.09 | 178.36 | 190.62 | 206.82 | 219.08 |
| PUEBLA (DGE) | 21035 | 50.14 | 63.17 | 86.8 | 134.54 | 191.73 | 232.73 | 272.92 | 325.57 | 365.57 | 404.56 | 457.83 | 497.01 |
| PUEBLO DE IXTLA | 17076 | 60.06 | 75.38 | 85.53 | 95.26 | 107.85 | 117.29 | 126.69 | 139.1 | 148.47 | 157.85 | 170.23 | 179.6 |
| PUEBLO DE OCUTUCO E-5 | 17048 | 57.06 | 74.23 | 85.6 | 96.5 | 110.62 | 121.19 | 131.73 | 145.63 | 156.14 | 166.64 | 180.53 | 191.03 |
| SAN ANDRES CALPAN | 21167 | 45.1 | 64.3 | 82.62 | 99.6 | 120.16 | 135.06 | 149.71 | 168.84 | 183.3 | 197.76 | 217.12 | 230.54 |
| SAN BALTAZAR DE TETELA | 21071 | 39.74 | 51.08 | 58.93 | 66.67 | 77.03 | 85.06 | 93.3 | 104.62 | 113.62 | 122.96 | 134.84 | 145.28 |
| SAN GABRIEL | 17032 | 67.58 | 84.43 | 95.58 | 106.28 | 120.13 | 130.51 | 140.85 | 154.5 | 164.81 | 175.12 | 188.74 | 199.04 |
| SAN ISIDRO HUILOTEPEC | 21235 | 46.17 | 60.83 | 68.54 | 74.9 | 82.07 | 86.84 | 91.21 | 96.5 | 100.21 | 103.71 | 108.07 | 111.2 |
| SAN JUAN COATZINGO | 21230 | 77.8 | 99.53 | 129.76 | 158.66 | 192.44 | 216.66 | 240.42 | 271.6 | 294.93 | 318.27 | 348.79 | 371.47 |
| SAN JUAN TETLA SIETE NORTE | 21214 | 46 | 58.82 | 65.56 | 71.12 | 77.39 | 81.56 | 85.38 | 90.01 | 93.25 | 96.32 | 100.13 | 102.87 |
| SAN JUAN TLACOTENCO | 17039 | 52.42 | 62.42 | 67.84 | 72.42 | 77.7 | 81.28 | 84.61 | 88.71 | 91.67 | 94.49 | 97.8 | 100.47 |
| SAN MARTINITO | 21213 | 43.68 | 73.04 | 98.6 | 116.78 | 137.86 | 153.02 | 167.89 | 187.37 | 202.04 | 216.7 | 236.26 | 251.46 |
| SAN PABLO HIDALGO | 17056 | 54.13 | 71.27 | 82.62 | 93.5 | 107.59 | 118.14 | 128.66 | 142.54 | 153.02 | 163.51 | 177.36 | 187.84 |
| SAN PEDRO BENITO JUAREZ E-1 | 21193 | 50.73 | 64.09 | 72.02 | 79.11 | 87.74 | 93.89 | 99.82 | 107.42 | 113.1 | 118.7 | 125.44 | 131.07 |
| SANTA CRUZ CUAUTOMATITLA E-2 | 21195 | 47.17 | 70.14 | 90.76 | 110.88 | 135.89 | 164.19 | 172.18 | 195.79 | 213.64 | 231.32 | 255.32 | 272.55 |
| SANTA CRUZ TEJALPA | 21205 | 53.41 | 82.38 | 104.87 | 123.37 | 145.47 | 161.51 | 177.28 | 197.94 | 213.57 | 229.06 | 249.71 | 265.77 |
| TECAJEC | 17063 | 53.27 | 64.44 | 71.18 | 77.28 | 84.78 | 90.17 | 95.41 | 102.18 | 107.27 | 112.31 | 118.43 | 123.56 |

Figura 4-19. Diferentes periodos de retorno asociados a las estaciones climatológicas

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

| Nombre | T2 | T5 | T10 | T20 | T50 | T100 | T200 | T500 | T1000 | T2000 | T5000 | T10000 |
|-----------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 9004 Calvetti | 46.7 | 55.9 | 66.73 | 84.73 | 109.22 | 122.21 | 141.90 | 162.27 | 183.61 | 206.81 | 231.95 | 259.02 |
| 9014 Corona Santa Ursula Coaxaco | 47.4 | 60.89 | 89.46 | 127.89 | 188.77 | 268.50 | 373.99 | 518.99 | 713.99 | 973.99 | 1313.99 | 1813.99 |
| 9020 Coronación Alta el Piedregal | 50.8 | 64.16 | 77.79 | 102.24 | 139.74 | 194.81 | 269.81 | 373.99 | 518.99 | 713.99 | 973.99 | 1313.99 |
| 9022 El Guante | 53.3 | 68.83 | 101.71 | 139.15 | 194.67 | 269.67 | 373.99 | 518.99 | 713.99 | 973.99 | 1313.99 | 1813.99 |
| 9026 Milpa Alta | 41.2 | 57.17 | 74.70 | 95.12 | 120.17 | 131.17 | 153.60 | 180.81 | 213.22 | 253.99 | 303.99 | 363.99 |
| 9041 San Francisco Tlahuepatlan | 52.3 | 67.72 | 77.89 | 100.80 | 130.80 | 171.11 | 223.60 | 293.60 | 383.60 | 503.60 | 663.60 | 873.60 |
| 9043 Santa Ana Tacoteenco | 39.9 | 58.85 | 89.28 | 128.56 | 188.47 | 268.50 | 373.99 | 518.99 | 713.99 | 973.99 | 1313.99 | 1813.99 |
| 9051 Toluca | 42.0 | 52.4 | 65.81 | 85.43 | 112.68 | 139.74 | 189.74 | 259.74 | 359.74 | 489.74 | 659.74 | 889.74 |
| 9070 Campo Exp. Coyacan | 49.4 | 67.29 | 79.13 | 102.48 | 135.18 | 178.18 | 243.18 | 328.18 | 443.18 | 598.18 | 803.18 | 1078.18 |
| 9071 Colonia Educacion | 41.8 | 53.47 | 61.18 | 80.58 | 105.12 | 122.12 | 147.12 | 180.12 | 223.12 | 283.12 | 363.12 | 473.12 |
| 9090 Ajacoc | 53.1 | 72.1 | 84.46 | 108.20 | 141.66 | 183.61 | 243.61 | 323.61 | 423.61 | 553.61 | 723.61 | 943.61 |
| 9016 Cuajimalpa | 53.8 | 70.93 | 82.23 | 103.96 | 137.06 | 177.06 | 237.06 | 317.06 | 417.06 | 547.06 | 727.06 | 957.06 |
| 9018 Encanto de las Lunetas | 53.8 | 67.90 | 84.19 | 103.58 | 127.58 | 164.48 | 213.48 | 283.48 | 373.48 | 493.48 | 643.48 | 843.48 |
| 9024 Hacienda Peña Prieta | 42.8 | 53.93 | 61.42 | 80.81 | 105.81 | 122.81 | 147.81 | 180.81 | 223.81 | 283.81 | 363.81 | 473.81 |
| 9030 La Venta Cuernavaca | 53.7 | 68.32 | 85.82 | 110.74 | 145.80 | 190.80 | 250.80 | 330.80 | 430.80 | 560.80 | 740.80 | 970.80 |
| 9033 Huerfanes | 41.1 | 53.79 | 61.79 | 80.88 | 105.88 | 122.88 | 147.88 | 180.88 | 223.88 | 283.88 | 363.88 | 473.88 |
| 9037 Pasa Anasco | 45.0 | 58.89 | 64.72 | 72.23 | 81.66 | 89.25 | 96.51 | 103.59 | 110.59 | 117.59 | 124.59 | 131.59 |
| 9039 Pasa Anasco | 44.1 | 56.77 | 65.98 | 73.23 | 83.63 | 91.44 | 99.23 | 106.48 | 113.28 | 120.08 | 126.88 | 133.68 |
| 9042 San Gregorio Atlixpaco | 36.8 | 56.5 | 59.73 | 61.68 | 63.67 | 65.72 | 67.84 | 70.02 | 72.27 | 74.57 | 76.92 | 79.32 |
| 9044 San Lorenzo | 46.8 | 61.34 | 62.70 | 63.91 | 65.02 | 66.07 | 67.17 | 68.32 | 69.52 | 70.77 | 72.07 | 73.42 |
| 9046 Corona Santa Fe | 50.7 | 65.91 | 83.60 | 103.91 | 137.86 | 183.61 | 243.61 | 323.61 | 423.61 | 553.61 | 723.61 | 943.61 |
| 9048 Tarango | 50.1 | 66.45 | 74.14 | 77.68 | 82.19 | 85.77 | 89.43 | 93.15 | 96.92 | 100.75 | 104.68 | 108.61 |
| 9054 General Anaya | 45.8 | 58.20 | 63.65 | 70.24 | 78.26 | 86.84 | 95.97 | 104.74 | 113.16 | 121.24 | 129.00 | 136.44 |
| 9058 Varadero Milpa Alta | 35.9 | 44.87 | 50.77 | 56.42 | 63.74 | 69.25 | 74.71 | 80.31 | 85.96 | 91.66 | 97.41 | 103.21 |
| 9059 Cuernavaca | 47.9 | 61.10 | 69.81 | 79.29 | 89.13 | 97.25 | 103.25 | 108.03 | 112.61 | 117.00 | 121.21 | 125.21 |
| 12000 AERANGU (CFE) | 37.1 | 51.65 | 61.27 | 70.77 | 83.08 | 92.46 | 101.96 | 111.61 | 121.41 | 131.36 | 141.46 | 151.71 |
| 12014 BUENAVISTA DE CUÉLLAR | 72.3 | 89.95 | 99.56 | 107.72 | 117.14 | 123.57 | 129.95 | 136.95 | 142.29 | 147.41 | 152.41 | 157.21 |
| 12015 CASCAPIENANGO | 56.3 | 70.93 | 81.71 | 102.32 | 130.72 | 169.11 | 217.45 | 275.69 | 343.93 | 422.17 | 510.41 | 608.65 |
| 12018 CERIAS GRANDE | 51.3 | 70.79 | 81.64 | 91.83 | 102.00 | 109.72 | 116.92 | 123.92 | 130.49 | 137.06 | 143.63 | 150.20 |
| 12020 COPALLO | 44.8 | 60.31 | 75.68 | 98.16 | 130.81 | 175.12 | 232.20 | 303.20 | 388.20 | 488.20 | 603.20 | 733.20 |
| 12025 CHAUHURIO | 69.7 | 89.17 | 92.45 | 100.23 | 109.11 | 115.11 | 120.61 | 125.41 | 130.21 | 134.61 | 138.61 | 142.21 |
| 12040 MUJIZCO (SERN) | 56.3 | 70.19 | 79.37 | 88.19 | 99.59 | 108.14 | 116.68 | 124.78 | 132.44 | 140.00 | 147.56 | 155.12 |
| 12041 EGUALA (SERN) | 51.7 | 72.54 | 106.43 | 152.17 | 209.25 | 276.61 | 353.61 | 441.61 | 540.61 | 650.61 | 771.61 | 903.61 |
| 12067 SAN JUAN TETELCERIGO (CFE) | 45.5 | 54.19 | 58.71 | 62.45 | 66.65 | 69.45 | 72.02 | 74.12 | 75.73 | 76.93 | 77.73 | 78.33 |
| 12090 TONALAPA DEL SUR | 54.1 | 64.60 | 70.44 | 76.34 | 81.62 | 84.89 | 88.51 | 92.09 | 95.23 | 97.93 | 100.27 | 102.27 |
| 12095 PASEA VALERO TILGUAHO | 37.0 | 48.91 | 59.28 | 68.64 | 76.77 | 83.92 | 89.76 | 94.96 | 100.24 | 105.08 | 109.81 | 114.24 |
| 12116 MUJIZCO (SERN) | 60.2 | 74.39 | 84.99 | 96.08 | 111.74 | 124.40 | 137.96 | 147.27 | 153.18 | 158.17 | 162.43 | 166.27 |
| 12118 EGUALA (SERN) | 58.8 | 72.07 | 82.07 | 92.07 | 102.07 | 112.07 | 122.07 | 132.07 | 142.07 | 152.07 | 162.07 | 172.07 |
| 12117 DIGATEPINAL DE CUARTEMBOC | 55.5 | 68.64 | 77.83 | 86.87 | 96.90 | 105.16 | 112.31 | 118.46 | 124.00 | 129.15 | 133.84 | 138.18 |
| 12128 TETIPAC | 74.0 | 100.53 | 131.53 | 167.85 | 214.44 | 269.76 | 327.26 | 386.46 | 445.56 | 505.06 | 564.06 | 622.56 |
| 12134 ZACAHUÁN | 53.2 | 64.26 | 71.58 | 79.17 | 87.62 | 94.41 | 101.19 | 107.68 | 113.68 | 119.28 | 124.48 | 129.28 |
| 12164 E.T.A. 27A COCUILA | 61.5 | 86.12 | 102.4 | 118.81 | 138.23 | 153.37 | 168.47 | 180.38 | 193.42 | 206.47 | 219.52 | 232.58 |

Figura 4-20. Periodos de retorno asociados a estaciones climatológicas

4.6 Lluvia media

En general, la altura de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Los aparatos descritos en el subtema de precipitación registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en que está instalado el aparato y para los cálculos ingenieriles, es necesario conocer la lluvia media en una zona dada, como puede ser una cuenca.

El primer proceso que se le puede hacer a una serie de datos de lluvia es la determinación de la precipitación máxima de una región. Para la evaluación de la lluvia promedio en una región se tiene básicamente 3 métodos: Método del promedio aritmético, Método de los polígonos de Thiessen y el Método de las isoyetas

4.6.1 Método aritmético

Consiste simplemente en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usada en el análisis:

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

- Método aritmético
- Polígonos de Thiessen
- Isoyetas

$$h_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{pi}$$

Donde h_p es la altura de precipitación media, h_{pi} es la altura de precipitación registrada en la estación i y n es el número de estaciones bajo análisis.

4.6.2 Método de polígonos de Thiessen

Este método para determinar la precipitación en una zona, se aplica cuando se sabe que las medidas de precipitación en los diferentes pluviómetros sufren variaciones, teniendo además el condicionante que la cuenca es de topografía suave o en lo posible plana.

El procedimiento para el cálculo es el siguiente:

- Se unen los pluviómetros adyacentes con líneas rectas.
- Se trazan mediatrices a las líneas que unen los pluviómetros. Recordar que una mediatriz es una línea recta perpendicular a un segmento de recta y que parte de su punto medio. Como las figuras formadas son triángulos, las mediatrices se encuentran en un punto dentro del mismo, ver Figura 4-21.
- Se prolongan las mediatrices hasta el límite de la cuenca.
- Se calcula el área formada por las mediatrices para cada pluviómetro.

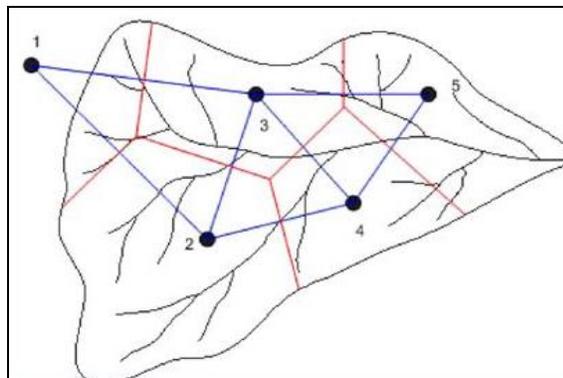


Figura 4-21 Polígonos de Thiessen

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

4.6.2.1 Determinación de polígonos de Thiessen con Arcgis

Con el software Arcmap (Arcgis) se obtuvieron los polígonos de Thiessen, para poder conocer sobre la precipitación en cada zona a diferentes periodos de retorno que se obtuvieron mediante el software AX. Fig 4-22 y Fig 4-23.

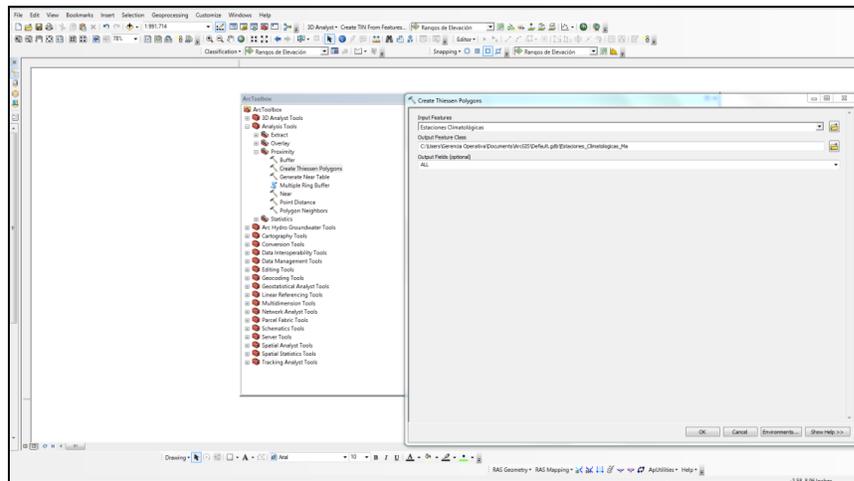


Figura 4-22. Determinación de polígonos de Thiessen

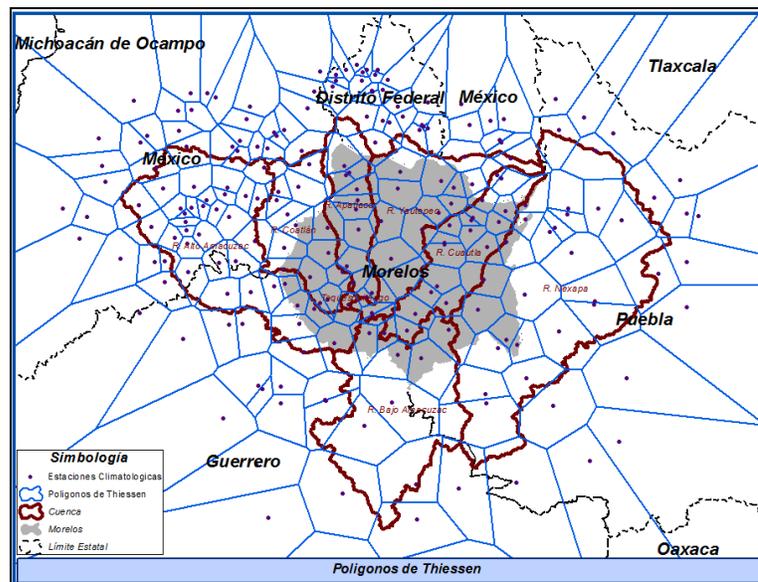


Figura 4-23. Resultado de los polígonos de Thiessen

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

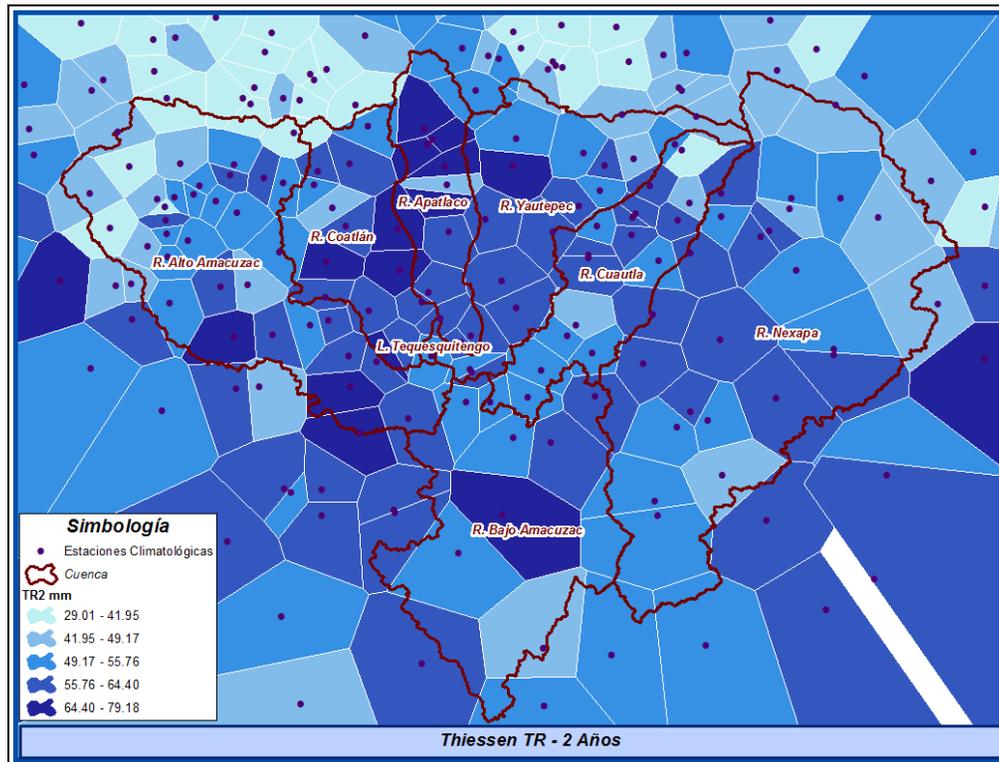


Figura 4-24 Polígonos de Thiessen asociado a unos Tr-2 años

4.6.3 Método de isoyetas

El método de los polígonos de Thiessen se aplica con mayor precisión a zonas con topografía suave o plana. En este sentido no tiene en cuenta las variaciones producidas por la orografía local, es decir los sistemas montañosos y valles que lo conforman, ya vimos que hay lluvias definidas por accidentes orográficos. Cuando se cuentan con regiones montañosas, se aplica el método de las isoyetas, es importante decir que una isoyeta es una línea curva que une los puntos que tienen igual valor de precipitación, en este sentido es análoga a las curvas de nivel.

El procedimiento para el cálculo es el siguiente:

1. Por facilidad se puede partir de los triángulos construidos en el método de los polígonos de Thiessen. Se debe tener en cuenta el valor de precipitación de cada uno de los pluviómetros.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

2. Se asume que la precipitación varía en forma lineal entre uno y otro pluviómetro, es decir sobre la línea que los une se puede trazar a intervalos regulares la curva que hace falta.
3. Se grafican las isoyetas.
4. Se calcula el área formada por dos isoyetas consecutivas (Ver Figura 4-25).

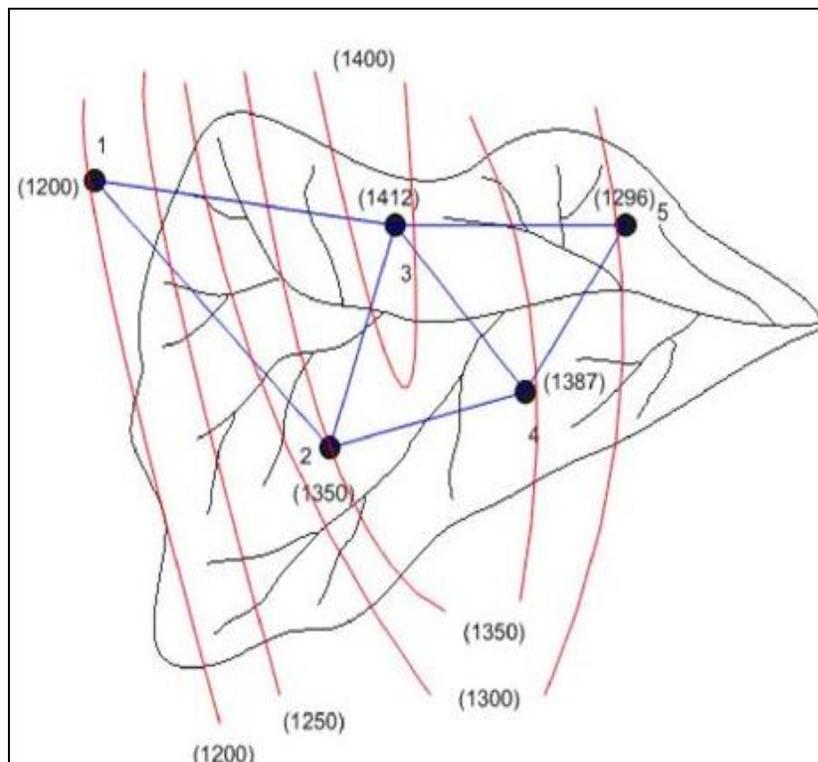


Figura 4-25. Isoyetas

4.6.3.1 Determinación de Isoyetas con Arcgis

Para la determinación de Isoyetas empleando los sistemas de información geográfica (Arcmap), se realizó una vez ya obtenidas la capa de estaciones climatológicas asociadas a sus periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000 años) se generaron las isoyetas, primero creando imágenes Raster en base a métodos de interpolación como lo es el IDW, para todas las estaciones en base al periodo de retorno y así posteriormente con la herramienta Contour, obtener las isoyetas para cada periodo de retorno. (Ver Figuras 4-26, 4-27 y 4-28).

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

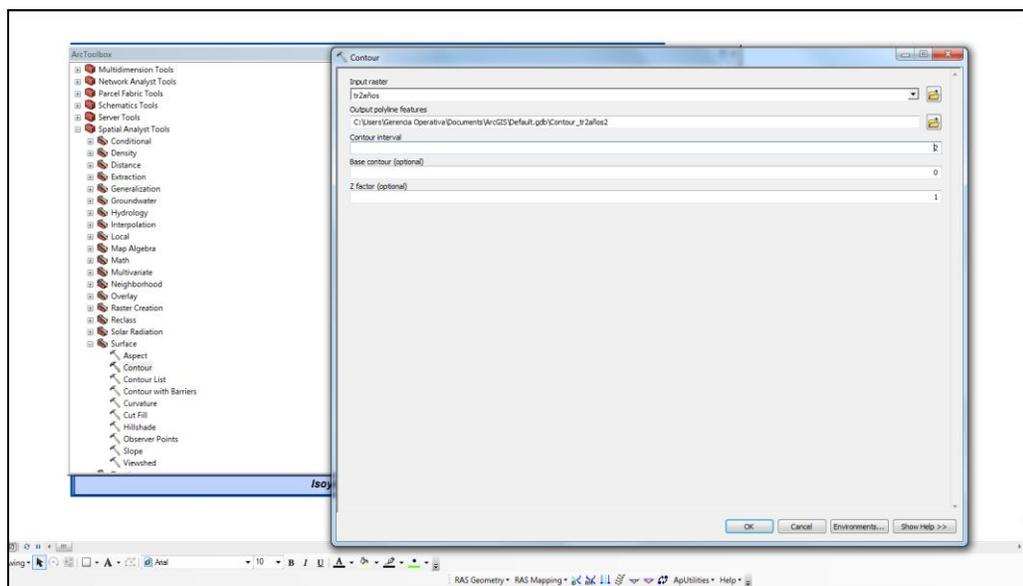


Figura 4-26. Generación de Isoyetas con ARGIS

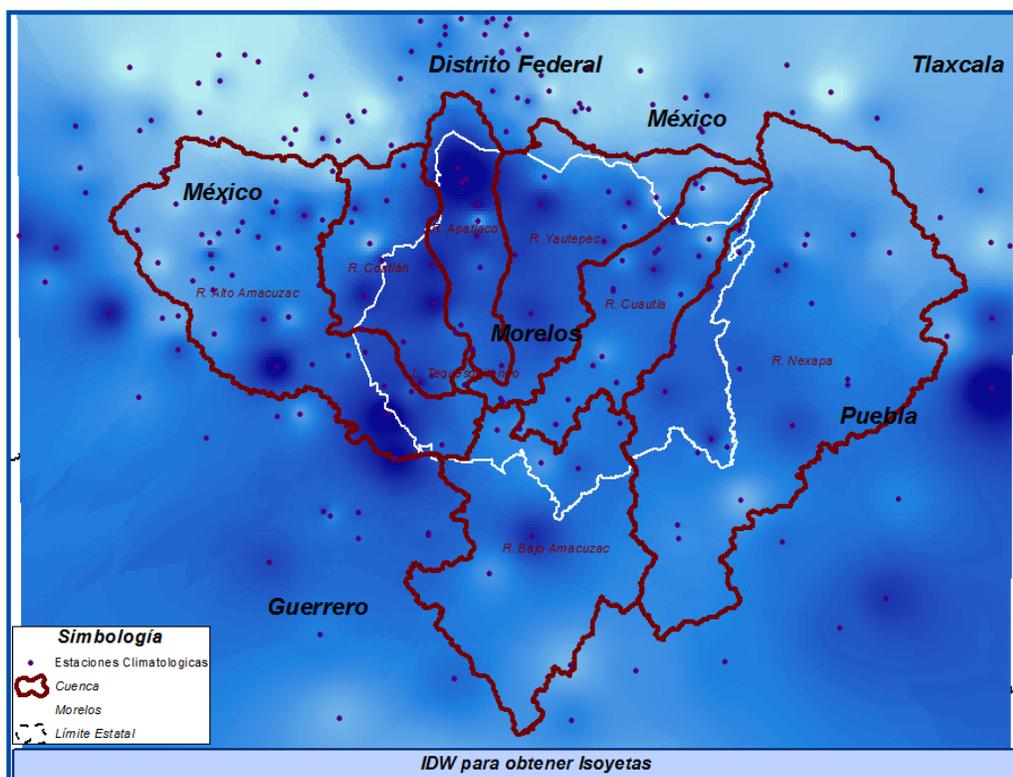


Figura 4-27. Resultado de método de interpolación IDW

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

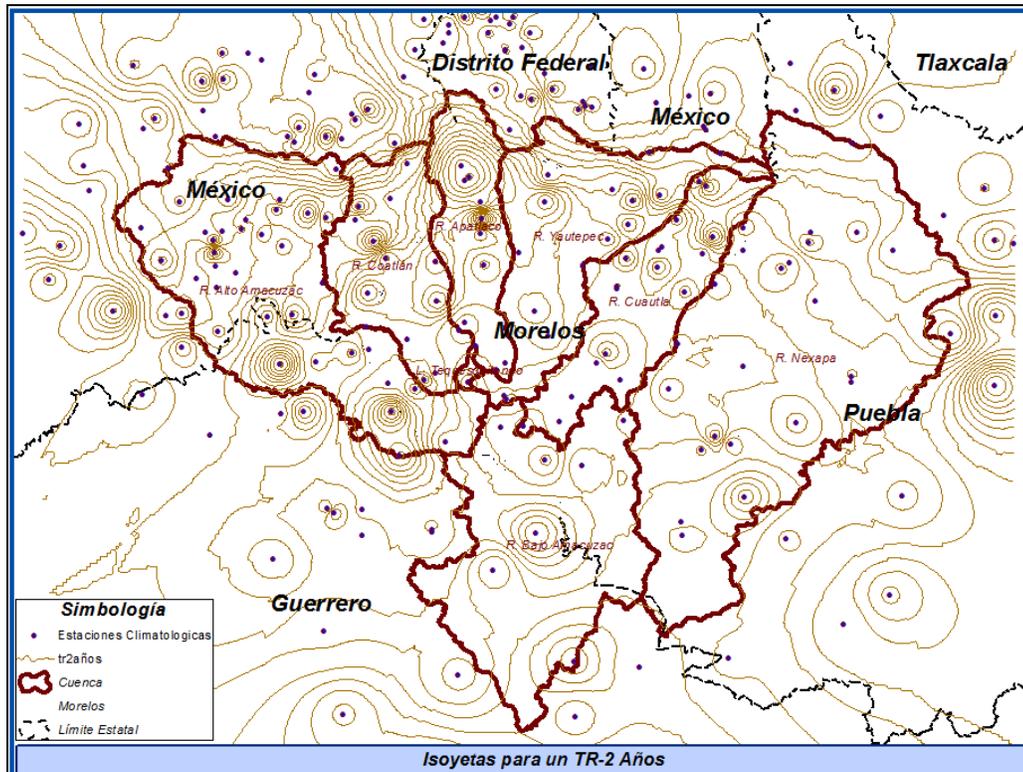


Figura 4-28. Isoyetas asociadas a un Tr-2 años

5 NÚMERO DE CURVA

5.1 Generalidades del número de curva

La situación común y generalizada a la cual se enfrenta y se enfrentará en el futuro, cualquier profesional o técnico que tenga que proyectar embalses, estructuras de captación o derivación de aguas intermitentes o permanentes, manejo de cuencas y su planificación en el medio rural morelense, es de cuencas no aforadas.

Cuando un ingeniero en un proyecto hidráulico debe conocer la máxima descarga, para diseñar la sección transversal de un canal, vertedero de una presa, alcantarillas, sifones, la aproximación que debe realizarse en el área de ingeniería rural, es a través de relaciones lluvia-escorrentamiento (modelos), y con el análisis de frecuencias de precipitaciones, convertir la lluvia de

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

diseño en un caudal de diseño, por tanto, el escurrimiento es considerado indirectamente. Es decir, que, si se trata de evaluar volúmenes de escurrimiento directo que genera una determinada cuenca vertiente o de determinar hidrogramas de escurrimiento, máximas descargas o efectuar tránsito de estas crecidas por una estructura hidráulica, el ingeniero actualmente deberá recurrir a modelos para cuencas no aforadas.

El Modelo del Número de Curva, es internacionalmente utilizado y particularmente en cuencas no aforadas, para resolver aspectos relacionados con el rendimiento de agua de escurrimiento directo de una cuenca determinada.

Para cuencas donde no se dispone de registros de caudales, el Método del Número de Curva puede utilizarse, para estimar la altura de escurrimiento directo a partir de una determinada altura de lluvia, a partir de un número índice (número de curva) que determina la respuesta característica para el escurrimiento, de una específica condición hidrológica y, de uso y tipo de suelo.

El Método fue desarrollado originalmente por el *Soil Conservation Service*, para las condiciones en los EE.UU. Sin embargo, a partir de ahí se adaptó a condiciones en otras partes del planeta, incluso algunos centros regionales de experimentación han agregado criterios adicionales, no obstante, el método es utilizado ampliamente en todo el mundo.

5.2 Metodología

En este estudio se propone una metodología para la obtención de una manera automática del número de curva mediante herramientas SIG, siendo este número de curva un parámetro hidrológico que utiliza los métodos del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EEUU para el cálculo de la escorrentía.

La metodología propuesta está basada a la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permiten trabajar con datos de muy diversas índoles que se den en una misma localización geográfica. La generación de mapas a escala regional del número de curva se realiza mediante la aplicación de tablas de reclasificación y operaciones de superposición de las distintas capas de información de las que depende.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

La metodología propuesta se ha aplicado a las cuencas hidrográficas: alto Amacuzac, bajo Amacuzac, Apatlaco, Coatlán, Tequesquitengo, Cuautla, Yautepec, Nexapa, que tienen una superficie aproximadamente de 13966.20 km² y que son las cuencas hidrográficas que cubren al Estado de Morelos.

La metodología que se propone en el presente trabajo para generar automáticamente un mapa del número de curva se apoya en los SIG. Estos son sistemas gestores de base de datos geográficos, en lo que se manejan datos muy diversos que se dan en una misma localización geográfica. Cuatro de sus principales funciones son:

1. Entrada de datos
2. Manejo de Datos (almacenamiento y búsqueda)
3. Manipulación y análisis de los datos
4. Salida de datos, tanto en forma de tabla como en mapa

Se pueden representar mediante dos tipos de estructura de datos en un SIG: vectorial y raster.

5.3 Infiltración

En el ciclo hidrológico, una parte importante del movimiento del agua viene determinada por la infiltración. La infiltración es el proceso por el que la precipitación se mueve hacia abajo a través de la superficie del suelo, aumentando la humedad del suelo.

Los factores que afectan la capacidad de infiltración dependen principalmente de:

- ✓ TIPOS DE SUELO
- ✓ CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO
 - ✓ COBERTURA VEGETAL
 - ✓ USO Y MANEJO DE TIERRA
 - ✓ COMPACTACIÓN

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

5.3.1 Tipo de suelo

Cada tipo de suelo tiene diferente capacidad de infiltración, f , medida en mm/hr. Por ejemplo, es fácil deducir que una precipitación de mediana a alta intensidad que cae sobre tierras gravilosas-arenosas infiltrará rápidamente, siempre que la capa saturada esté por debajo de la superficie del terreno, y alcanzar relativamente rápido las capas subterráneas. En cambio, esa misma precipitación, en tierras arcillosas infiltrará muy poco y la superficie quedará cubierta de agua incluso en lluvias de baja intensidad.

5.3.1.1 Contenido de humedad del suelo

Para un mismo suelo, la capacidad de infiltración disminuye al aumentar el contenido de humedad en superficie y también de la profundidad de la capa subterránea, inversamente, la capacidad de infiltración aumenta en la medida que disminuye el contenido hídrico.

5.3.1.2 Cobertura vegetal

Las diferentes coberturas vegetales tienen marcados efectos en la capacidad de infiltración, como, por ejemplo, el diferente efecto no sólo en la porosidad superficial de una cobertura forestal con relación a una pradera o campo natural.

5.3.1.3 Uso y manejo de tierra

Este concepto tiene también marcada influencia en la capacidad de infiltración, como ejemplo de un uso del suelo que disminuye la capacidad de infiltración, es el monocultivo, que conduce entre otras cosas, desde el punto de vista físico únicamente a disminuir la porosidad superficial, especialmente a nivel de macroporosidad. Las prácticas de manejo de tierras, como construcción de terrazas de desvío o incluso de terrazas convencionales, modifican el padrón del escurrimiento superficial. Incluso, prácticas agronómicas de manejo, como los abonos verdes, la incorporación de estiércol, el mínimo laboreo, tienden a incrementar la capacidad de absorción o infiltración de los suelos.

5.3.2 Coeficiente de escurrimiento

La compactación de las superficies está vinculada directamente a la porosidad superficial y su relación directa como el fenómeno analizado. Es obvio, que suelos con problemas de compactación en su perfil, tendrán

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

menor capacidad de infiltración que suelos bien agregados y sueltos en superficie.

El coeficiente de escurrimiento de una tormenta, o de otro evento, se define como:

$$C_e = V_e / P$$

Relación entre el volumen escurrido y volumen caído sobre la cuenca, siendo un coeficiente adimensional. Fig 5-1.

| Selección del número de escurrimiento N, para condiciones de humedad previa media | | | | | |
|--|---|---------------|-----|-----|-----|
| Uso de la tierra | Condición de la cobertura vegetal de la superficie. | Tipo de suelo | | | |
| | | A | B | C | D |
| Bosques cultivados | Ralo, baja transpiración | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | Normal, transpiración media | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | Espeso, alta transpiración | 25 | 55 | 70 | 77 |
| Caminos | De tierra | 72 | 82 | 87 | 89 |
| | Superficie dura | 74 | 84 | 90 | 92 |
| Bosques naturales | Muy ralo, muy baja transpiración | 56 | 75 | 86 | 91 |
| | Ralo, baja transpiración | 46 | 68 | 78 | 84 |
| | Normal, transpiración media | 36 | 60 | 70 | 76 |
| | Espeso, alta transpiración | 26 | 52 | 62 | 69 |
| | Muy espeso, muy alta transpiración | 15 | 44 | 54 | 61 |
| Descanso, sin cultivo | Surcos rectos | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Cultivos en surco | Surcos rectos | 70 | 80 | 87 | 90 |
| | Surco en curva del nivel | 67 | 77 | 83 | 87 |
| | Terrazas | 64 | 73 | 79 | 82 |
| Cereales | Surcos rectos | 64 | 76 | 84 | 88 |
| | Surco en curva del nivel | 62 | 74 | 82 | 85 |
| | Terrazas | 60 | 71 | 79 | 82 |
| Leguminosas sembradas con maquinaria o al voleo | Surcos rectos | 62 | 75 | 83 | 87 |
| | Surco en curva del nivel | 60 | 72 | 81 | 84 |
| | Terrazas | 57 | 70 | 78 | 82 |
| Pastizal | Pobre | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Normal | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | Bueno | 39 | 61 | 74 | 80 |
| | Curva de nivel, pobre | 47 | 67 | 81 | 88 |
| | Curva de nivel, normal | 25 | 59 | 75 | 83 |
| | Curva de nivel, bueno | 6 | 35 | 70 | 79 |
| Potrero permanente | Normal | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Superficie impermeable | | 100 | 100 | 100 | 100 |

Figura 5-1. Selección del número de escurrimiento N, para condiciones de humedad previa media.

El coeficiente de escurrimiento depende de las características y condiciones del suelo; a continuación, se hace mención de algunos de los procesos más importantes del ciclo hidrológico para reconocer la cantidad de factores involucrados en el C_e ; en principio, se tienen: interceptación, detención superficial, almacenamiento de la humedad en el suelo, escurrimiento superficial, infiltración, flujo subsuperficial, evapotranspiración y

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

percolación. La interceptación es el primer proceso que actúa redistribuyendo y modificando la precipitación sobre un área. La cantidad de precipitación que finalmente llega a la superficie del terreno depende en gran parte de la naturaleza y de la densidad de la cubierta vegetal (si existe), o de las características de la cobertura artificial (casas, edificios, estacionamientos, carreteras con pavimentos, etc.). La cobertura, natural o artificial, intercepta parte de la precipitación, deteniéndola temporalmente en su superficie, de donde se evapora para regresar a la atmósfera durante o después de la tormenta, o bien cae al terreno.

Otros factores que influyen en el coeficiente de escurrimiento son: intensidad de la lluvia, pendiente del terreno y proximidad del nivel freático; por todo lo anterior, debe seleccionarse con rigurosidad un coeficiente de escurrimiento razonable que logre representar los efectos integrados de todos estos factores.

Uno de los métodos para calcular el coeficiente de escurrimiento fue desarrollado por los hidrólogos del U.S. Soil Conservation Service (Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos) y es conocido como el “Método del número de curva” o “N” (valor relativo de escurrimiento directo que produce cada complejo hidrológico). Entre mayor sea el “N”, mayor será el volumen de escurrimiento de una tormenta en la cuenca. Por comodidad, los números de curva se tabulan en un rango de 0 a 100; para condiciones combinadas o especiales de la cuenca, los “N” pueden ser “pesados” o estimados por interpolación (SARH, 1982, Maidment, 1993).

5.4 Uso de suelo y vegetación

La recopilación de información para la generación del número de curva, fue en base a información de INEGI, de las capas de Uso de Suelo y Vegetación con claves de identificación Usvs3g y Usvs3v, que contienen información de vegetación y agricultura de la serie IV, así como la capa de edafología y el de las subcuencas que cubren el Estado de Morelos. Teniendo las capas para poder obtener el número de curva se analizaron de forma general sobre las bases de datos para ver qué información es con la que se cuenta y nos ayude a la generación del Número de curva. Fig. 5-2. Teniendo las capas de uso de suelo y vegetación con clave de identificación Usvs3g y Usvs3v se realizó dentro de los sistemas de información geográfica con la

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

herramienta unión la unión de estas capas para unificar los campos faltantes de una y otra tabla, donde el campo queda integrado con los usos de suelo y vegetación existentes como: Bosques, cultivos de temporal, riego, zonas urbanas, agua, praderas, selva, etc., todas estas conjuntadas en un solo campo. Tablas 5.1 y 5.2.

Tabla 5.1 Información de las capas y claves de identificación (Fuente: INEGI Estado de Morelos)

| NOMBRE DE LA CAPA | TIPO | CLAVE DE IDENTIFICACIÓN |
|----------------------|-----------|-------------------------|
| Suelo | Polígonos | Usvs3g |
| Vegetación | Polígonos | Usvs3v |
| Erosión | Polígonos | Usvs3r |
| Aspecto matorral | Polígonos | Usvs3a |
| Nomadismo agrícola | Polígonos | Usvs3n |
| Altura de vegetación | Polígonos | Usvs3h |
| Cobertura arbórea | Polígonos | Usvs3d |

Tabla 5.2 Información de eventos en Serie y datos de campo
(Fuente: INEGI Estado de Morelos)

| EVENTO | FUENTE DE DATOS ESPACIALES | RESOLUCIÓN | METODOLOGÍA | FECHA DE REFERENCIA EDITORIAL | FECHA DE DATOS DE CAMPO | INTERVALO |
|----------|--|---|--|-------------------------------|-------------------------|-----------|
| SERIE I | Fotografía aérea Escalas de 1:50000 a 1:80000(1968-1986). B/N y sepia. | Grano de emulsión/ escala de vuelo. | Tecnología analógica. Equipos ópticos * mecánicos. Transferido a formato digital por digitalización manual y de barrido. | 80's | (1968) 1971*1986 | * |
| SERIE II | Compuestos (espaciomapas) de imágenes Landsat TM(1993) Multiespectral. | Pixel de 50 metros de origen. Interpretación sobre imagen impresa a escala 1:250,000. | Tecnología analógica. Equipos ópticos y mecánicos. Transferido a formato digital de manera manual. | 90's | 1993-1998 | 10 años |
| SERIE | Imágenes | Pixel de 27.5 | Tecnología | 2002-2005 | 2002-2003 | 10 años |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

| | | | | | | |
|----------|---|---------------|--|------------------------|----------------|--------|
| III | Landas ETM (2002). Multiespectral | m | Digital: plataforma PC y software SIG | | | |
| SERIE IV | Imágenes SPOT (2007 y 2008) Multiespectral. | Pixel de 10 m | Tecnología Digital: plataforma PC y software SIG | 2006-2009 | 2007-2008 | 5 años |
| SERIE V | Imágenes SPOT (2012 y 2013) Multiespectral. | Pixel de 10 m | Tecnología Digital: plataforma PC y software SIG | En etapa de planeación | 2012 * 2013 | 5 años |

Una vez unida las capas de uso de suelo y vegetación se realizó un recorte sobre la zona de estudio, que corresponde a las subcuencas que cubren el Estado de Morelos y en base a la tabla de Selección del número de escurrimiento N, para condiciones de humedad previa media y los campos de Uso de la tierra y condición de la cobertura vegetal de la superficie de dicha tabla se asociaron como se muestra en la siguiente tabla para su posterior tratamiento y asignación de números de curva. Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Información de asignación de número de curvas
(Fuente: INEGI Estado de Morelos)

| Curvas | Resultados |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| Agricultura de riego | Cultivos en surco en curvas de nivel |
| Agricultura de temporal | Cultivos en surco en curvas de nivel |
| Bosque de encino | Superficie impermeable |
| Bosque de encino-pino | Bosques naturales normal |
| Bosque de oyamel | Bosques naturales normal |
| Bosque de pino | Bosques naturales normal |
| Bosque de pino-encino | Bosques naturales normal |
| Bosque de táscate | Bosques naturales normal |
| Bosque mesófilo de montaña | Bosque naturales muy espesos |
| Agua | 0 |
| Matorral desértico rosetófilo | Pastizal pobre |
| Palmar inducido | Pastizal pobre |
| Pastizal inducido | Pastizal normal |
| Pradera del alta montaña | Pastizal curva de nivel pobre |
| Selva baja caducifolia | Bosques naturales |
| Sin vegetación aparente | Camino de tierra |
| Tular | Agua y pequeño pastizal |
| Zona Urbana | Superficie impermeable |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

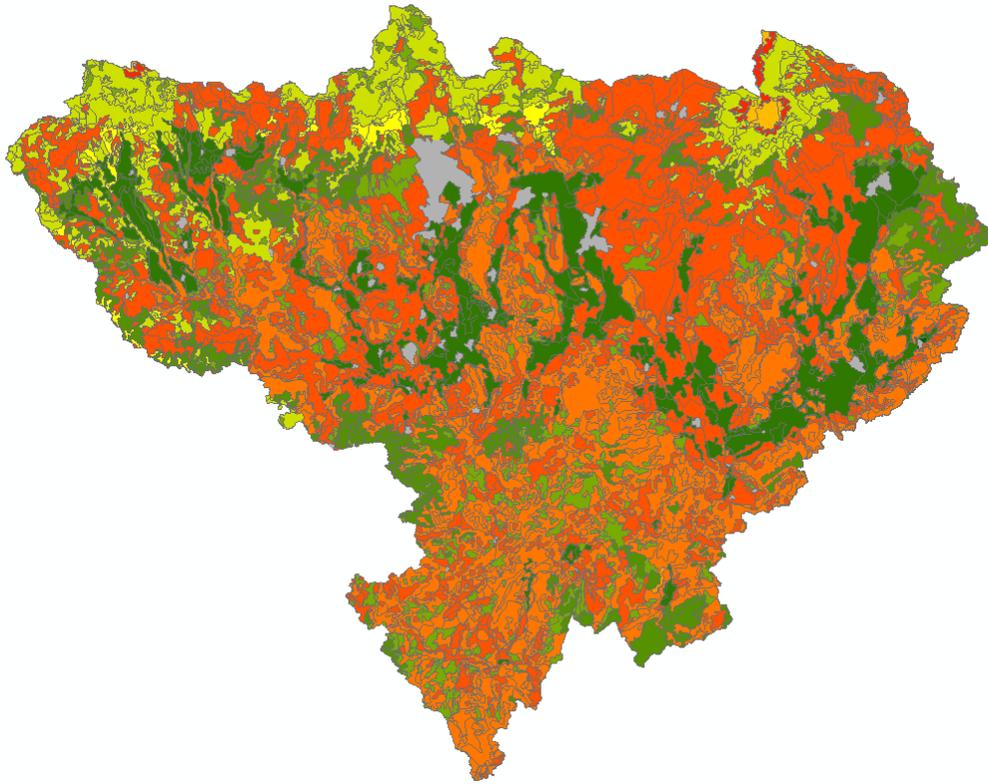


Figura 5-2. Uso de Suelo en las cuencas del estado de Morelos

5.5 Edafología

La carta edafológica que muestra la distribución geográfica de los suelos del país, así como sus características físico-químicas, clasificándolos de acuerdo con el sistema FAO/UNESCO modificado para adaptarlo a nuestro país.

Con dicha de edafología del INEGI, se trabajó con las capas de suelo dominante y la segunda calidad de suelo, donde nos indica que tipo de suelo existe y basados en la tabla de Selección del número de escurrimiento N, para condiciones de humedad previa media y los campos de Uso de la tierra y condición de la cobertura vegetal de la superficie se les fue asignado el tipo de suelo, la cual se obtuvo como resultado la siguiente tabla.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

Tabla 5.4 Resultados de las capas del suelo con claves y áreas
(Fuente: INEGI Estado de Morelos)

| Suelos | Clave | Área (km ²) |
|---------------------------|-------|-------------------------|
| Acrisol húmico | C | 81.99 |
| Acrisol órtico | C | 3.82 |
| Andosol húmico | B | 1176.12 |
| Andosol mólico | B | 274.96 |
| Andosol ócrico | B | 261.51 |
| Cambisol cálcico | C | 168.99 |
| Cambisol crómico | C | 208.41 |
| Cambisol éútrico | C | 193.48 |
| Cambisol ferrálico | C | 6.20 |
| Cambisol vértico | D | 121.81 |
| Castañozem cálcico | D | 187.97 |
| Castañozem háplico | D | 76.20 |
| Chernozem cálcico | B | 19.03 |
| Feozem calcárico | C | 340.63 |
| Feozem háplico | C | 2058.53 |
| Feozem lúvico | C | 338.84 |
| Fluvisol calcárico | B | 14.20 |
| Fluvisol dístrico | B | 25.56 |
| Fluvisol éútrico | B | 283.37 |
| H2O | H2O | 14.03 |
| Litosol | D | 2387.92 |
| Luvisol crómico | D | 242.77 |
| Luvisol férrico | D | 49.10 |
| Luvisol órtico | D | 12.03 |
| Regosol calcárico | B | 464.96 |
| Regosol dístrico | B | 254.23 |
| Regosol éútrico | B | 1267.82 |
| Rendzina | C | 1441.30 |
| Vertisol | D | 1948.45 |
| Vertisol pélico | D | 1948.45 |
| ZU | ZU | 39.46 |

El resultado de los tipos de suelos son los siguientes donde se explica en que consiste cada uno de ellos:

5.5.1 Acrisoles

Literalmente, suelo ácido. Suelos ácidos de climas húmedos, con un subsuelo arcilloso y pobre en general. Suelos propios para explotación

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

forestal. Suelos pobres en nutrientes, pueden dedicarse a explotaciones agropecuarias o práticos con elevados costos de fertilización y encalado. Son impermeables. Son características del grupo iguales para el subgrupo correspondiente.

- Acrisol Férrico. Acrisol con un subsuelo muy rojo y claro con piedritas llamadas “nódulos” generalmente redondas, duras y de color rojizo.
- Acrisol Húmico. Acrisol con alto contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo y con poco menos contenido de materia orgánica en las capas de abajo.
- Acrisol Órtico. Acrisol sin ninguna otra propiedad especial.

5.5.2 Andosol

Los Andosoles son los suelos volcánicos por antonomasia. Se forman sobre cenizas y vidrios volcánicos, así como a partir de otros materiales piroclásticos. Cuando son jóvenes atesoran colores oscuros, siendo altamente porosos, ligeros, permeables, de buena estructura y fáciles de trabar. Su fertilidad es considerable, aunque padecen algunas limitaciones que posteriormente detallaremos. Se trata de suelos muy aptos para la agricultura si las condiciones del relieve lo permiten. Como es lógico, su ubicación se circunscribe generalmente a las regiones con volcanismo activo o no muy antiguo. Tradicionalmente han sido una bendición para las culturas aborígenes y los pueblos en vías de desarrollo, que se suelen instalar sobre ellos a pesar de los riesgos naturales que amenazarán a sus moradores y asentamientos.

5.5.3 Cambisoles

Literalmente, suelo que cambia. Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas.

La capa superficial puede ser oscura, con más de 25 cm de espesor, pero pobre en nutrientes y en ocasiones no existe. Suelos pobres en materia orgánica. Suelos de características variables en su horizonte A. Son de color oscuro y claro.

Permeables.

- Cambisol Crómico. Cambisol que cuando está húmedo es de color pardo oscuro a rojo poco intenso.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

- Cambisol Districo. Cambisol con subsuelo pobre o muy pobre en nutrientes.
- Cambisol Eútrico. Cambisol con subsuelo rico o muy rico en nutrientes. Permeables.
- Cambisol Ferrálico. Cambisol con subsuelo bajo en CIC, es decir, con poco poder de almacenar nutrientes.
- Cambisol Húmico. Cambisol con una capa superficial oscura, a veces gruesa, de regular a buen contenido de materia orgánica pero pobre en nutrientes.
- Cambisol Vértico. Cambisol con subsuelo ligeramente agrietado en alguna época de la mayoría de los años.

Suelos pesados arcillosos. Necesitan drenaje. Algunos pueden dedicarse a la practicultura y otros a la agricultura. Fertilizándolos son buenos. Impermeables.

5.5.4 Castañozems

Literalmente, tierra castaña. Suelos de color castaño o pardo de climas semisecos. Tienen una capa superficial oscura, gruesa, rica en materia orgánica y nutrientes; puede haber cal o yeso en algún lugar del suelo. Suelos de alta productividad agrícola y practícola.

- Castañozem Cálculo. Castañozem con una capa de más de 15 cm de espesor rica en cal o yeso. Buenos para la agricultura y pastizales. Son permeables.
- Castañozem Haplico. Castañozem sin ninguna otra propiedad especial. Suelos de fertilidad moderada. Se superan dentro del grupo. Son de buena producción agrícola. Son de acumulación calcárea. Son permeables.
- Castañozem Lúvico. Castañozem con acumulación considerable de arcilla en el subsuelo. Moderada producción agrícola. Son muy permeables.

5.5.5 Feozems

Literalmente, tierra parda. Suelo con una capa superficial oscura, algo gruesa, rica en materia orgánica y nutriente. Son suelos que toleran exceso de agua, con drenaje, de fertilidad moderada. Permeables.

- Feozem Calcárico. Feozem con algo de cal a menos de 50 cm de profundidad. Alta fertilidad. Permeables.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

- Feozem Háptico. Feozem sin ninguna otra propiedad especial. Fertilidad moderada. Permeables.
- Feozem Lúvico. Feozem con un subsuelo más rico en arcilla que la capa superficial. Suelos de moderada producción agrícola. Se pueden superar. Muy permeables. Características semejantes al grupo.

5.5.6 Fluvisol

Literalmente, suelo de río. De fácil manejo. Necesitan fertilización. Son muy permeables. Suelos arenosos, ligeros. Textura gruesa.

- Fluvisol eútrico. Suelos con nutrientes moderados o altos. Son muy permeables. Textura media, suelo franco.
- Fluvisol calcárico. Suelos fértiles calcáreos, en la superficie, de fácil manejo. Son permeables. Suelo ligero.

5.5.7 Litosol

Literalmente, suelo de piedra. Suelo con menos de 10 cm. de espesor. No aptos para cultivos de ningún tipo. Pueden destinarse al pastoreo.

5.5.8 Luvisoles

Literalmente, suelo con acumulaciones de arcilla. Suelos con mucha arcilla acumulada en el subsuelo. Se diferencian de los Acrisoles en que son más fértiles en general. Suelos en los que su uso está en función con los suelos correspondientes al grupo.

- Luvisol Álbico. Luvisol del cual se han removido partículas finas de suelo (arcilla) de la capa superficial hacia abajo. Fertilidad baja o moderada. Adecuados a explotación forestal o prático. Impermeables.
- Luvisol Cálcico. Luvisol rico o muy rico en calcio.
- Luvisol Crómico. Luvisol que cuando está húmedo es de color pardo oscuro a rojo poco intenso (rojizo). Son pobres en materia orgánica. Son impermeables.
- Luvisol Férrico. Luvisol con un subsuelo muy rojo y claro con piedritas llamadas “nódulos” generalmente redondas, duras y de color rojizo. Suelos con baja capacidad de retención de agua. Producción baja. Requieren fertilización constante. Son impermeables.
- Luvisol Órtico. Luvisol sin otra característica especial.
- Luvisol Vértico. Luvisol con subsuelo ligeramente agrietado en alguna parte de la mayoría de los años.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

5.5.9 Regosoles

Cobija o capa de material suelto que cubre a la roca. Suelos poco desarrollados, sin estructura y de textura variable, muy parecidos a la roca madre. Suelos sueltos como dunas, playas, cenizas volcánicas, ningún horizonte. Muy permeables.

- Regosol Calcárico. Regosol con algo de cal a menos de 50 cm de profundidad.
- Regosol Dístico. Regosol con subsuelo pobre o muy pobre en nutrientes. Utilizaciones variables. Costoso mejoramiento del suelo. Muy permeables.
- Regosol Eútrico. Regosol con subsuelo rico o muy rico en nutrientes.

5.5.10 Rendzina

Connotativo de suelos someros que producen ruido con el arado por su pedregosidad. Suelos con menos de 50 cm de espesor que están encima de rocas duras ricas en cal. La capa superficial es algo gruesa, oscura y rica en materia orgánica y nutriente. Suelos de alta fertilidad. Se encuentran sobre material calcáreo. Permeables. Son buenos para agricultura. Contienen 0.58% de carbono orgánico.

5.6 Resultados

Finalmente teniendo los campos de uso de la tierra, condición de la cobertura vegetal de la superficie y el tipo de suelo se le empieza asignar el número de curva conforme lo indica la tabla, concatenando dichos campos y finalmente obteniendo el mapa de número de curva. Fig 5-3 y Fig 5-4.

| ClasificaciónHidrologicaDeSuelo | ClasificacionYUsoDeSuelo | UsodelaTierra | ClasificaciónHidrologicaSueloTipodeVegetación | NúmeroDeCurva | Area |
|---------------------------------|--------------------------|----------------------------|---|---------------|-----------|
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 0.310311 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 1.623039 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 15.632019 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 14.141042 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 2.266112 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 3.474301 |
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 0.661411 |
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 2.184775 |
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 0.14912 |
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 0.071169 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 0.158468 |
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 2.135041 |
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 1.118652 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 0.71959 |
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 0.72875 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 2.394544 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 5.810156 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 0.664513 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 7.767253 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 1.274277 |
| D | D AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | D CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 87 | 1.401155 |
| C | C AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | C CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 83 | 2.341816 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 0.414871 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 1.316375 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 0.025481 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 0.211621 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 0.169448 |
| B | B AGRICULTURA DE RIEGO | CULTIVOS EN SURCO EN CURVA | B CULTIVOS EN SURCO EN CURVAS DE NIVEL | 77 | 2.053414 |

Figura 5-3. Resultado Número de Curva

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

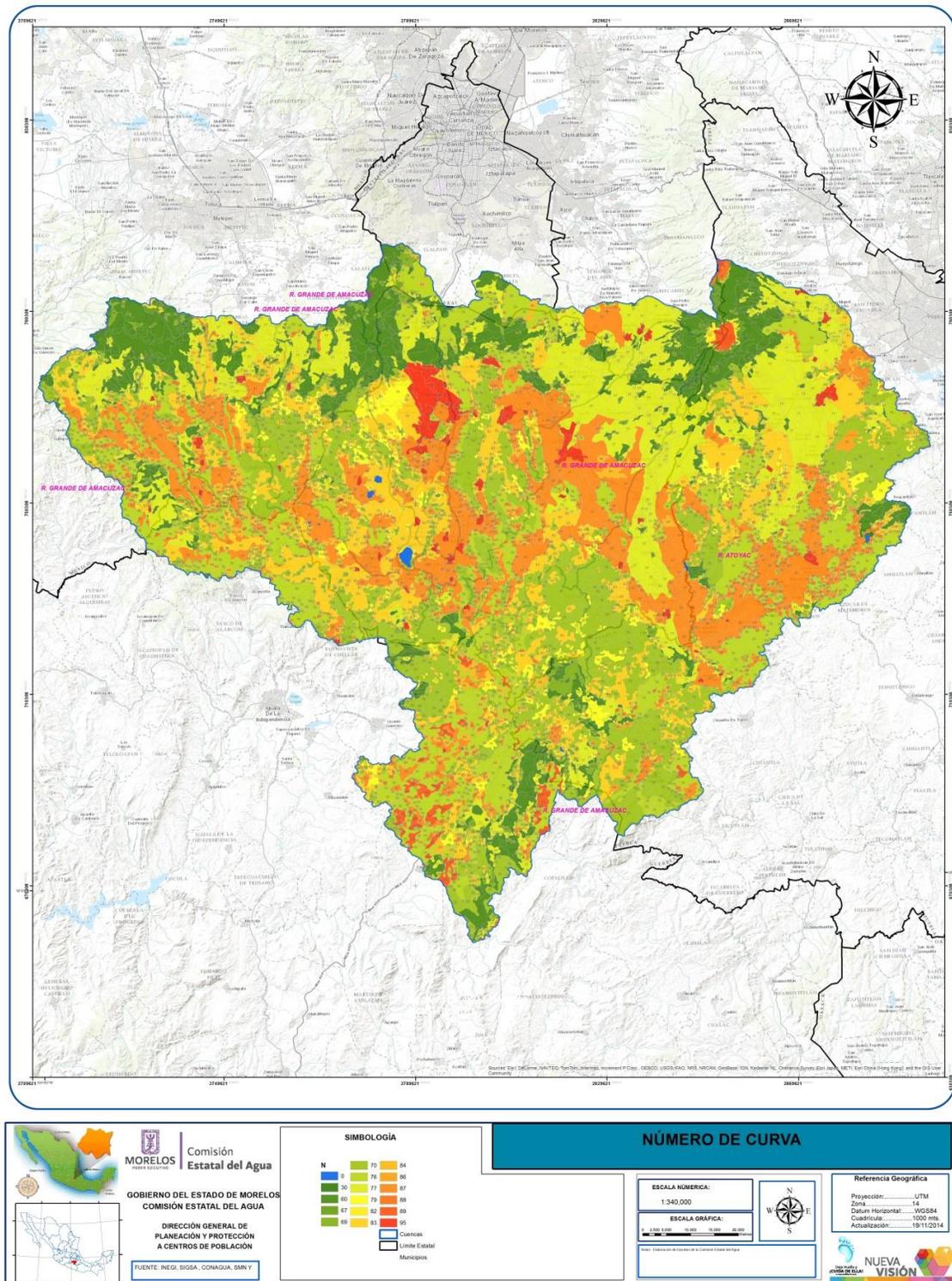


Figura 5-4. Número de Curva

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

6 ESTUDIO HIDROLÓGICO EN LA LOCALIDAD DE CUENTEPEC, MUNICIPIO DE TEMIXCO, ESTADO DE MORELOS

6.1 Estudio hidrológico

Para el diseño de los componentes principales de una red se recurre a

métodos para la estimación de gastos pluviales en la red. Estos métodos tienen como finalidad estimar la avenida que producirá una tormenta en una cuenca, cuanto cumpla con algunas de las condiciones siguientes: (Tzatchkov, 2007)

La cuenca en estudio está urbanizada y es relativamente chica; de manera que se considera que no es necesaria la simulación detallada de su funcionamiento mediante modelos matemáticos. Este caso incluye una cuenca asociada a un sistema principal de drenaje, aunque en el diseño de éste último se requiere de una simulación como la mencionada.

Estos caudales de aportación de agua pluvial en un sistema de drenaje, dependen de múltiples factores, los más importantes son: área por drenar (A), forma del área por drenar (F), pendiente del terreno (S), intensidad de lluvia (i) y el coeficiente de permeabilidad (k).

La determinación de la función $Q=f(A,F,S,i,k)$ ha conducido a los investigadores sobre éste tema, a tratar de obtener expresiones sencillas que relacionan a todos los factores que intervienen en ella. Una de las primeras investigaciones fue hecha en 1851 cuando surgió el método racional. Posteriormente se han desarrollado otros métodos los cuales han sido mayormente usados con un grado de aceptación: (Tzatchkov, 2007)

En el presente estudio se determinó los gastos de diseño de la cuenca de aportación de la zona de aportación de la barranca sin nombre en la subcuenca Coatlán, los cuales son obtenidos mediante métodos lluvia escurrimiento y servirán para realizar la revisión hidráulica de la infraestructura existente y que se proyecte para mitigar la problemática de inundación.

6.1.1 Objetivo

Realizar estudio hidrológico, con el que permita conocer las avenidas de diseño que se presentan en la cuenca de aportación dentro de la barranca Sin Nombre, para el diseño correcto de la descarga de la Planta de

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

6.1.2.1 Fisiografía

La Fisiografía, es la forma en que se presentan la superficie de la Tierra, En México es extraordinariamente variado, se puede encontrar desde cadenas montañosas hasta grandes planicies costeras pasando por valles, cañones, altiplanicies y depresiones entre otras formaciones.

La zona de análisis se encuentra dentro del Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur, el cual abarca los estados de Jalisco, Morelos, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y en todo el estado de Tlaxcala y la Ciudad de México. Se caracteriza por contener una serie de cadenas montañosas de origen volcánico y por su complejidad en la composición de las rocas, esta varía de basáltica a riolítica, producto de eventos lávico y piroclásticos. Los diferentes tipos de rocas se han acumulado en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario hasta el presente.

Ahora bien la cuenca de análisis, se localiza dentro de la subprovincia fisiográfica denominada Lagos y Volcanes de Anáhuac, Sierras y Valles Guerrerenses dicha subprovincia comprende la zona norte del Estado de Morelos y está compuesta por laderas escarpadas formadas por erosión de material de lahar, cuya característica es estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, constituidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas en antiguas cuencas lacustres, donde aparecen elevaciones aisladas. Además, se localiza dentro de las topoformas denominadas Lomerío y Sierra. En la Tabla 6.1 se describen los diferentes sistemas de topoformas según el sistema de clasificación reconocido en las cartas fisiográficas escala 1: 1, 000,000 editadas por el INEGI. Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Descripción de los sistemas de topoformas

| Sistema de topoformas | Descripción |
|------------------------------|--|
| Meseta | Terreno elevado y llano de gran extensión |
| Sierra | Línea de montañas. |
| Lomerío | Conjunto de lomas. |
| Llanura | Área sin elevaciones o depresiones prominentes. |
| Bajada | Franja de terreno suavemente inclinado formado en las bases de las cadenas montañosas. |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

| | |
|-----------------------|---|
| Valle | Depresión alargada e inclinada hacia el mar o una cuenca endorreica, generalmente ocupada por un río. |
| Cañón | Valle cortado con paredes casi verticales con un río que fluye en el fondo. |
| Campo de dunas | Terreno con montículos de arena acumulada por el viento. |

En la Tabla 6.2 se muestran los términos y especificaciones de cada sistema de toposformas editados por el INEGI.

Tabla 6.2 Términos de especificación fisiográfica

| Término | Descripción |
|--------------------------------|--|
| Abierto | Cuando los flancos son extendidos. |
| Alta | Topoformas con una altitud mayor al entorno geográfico. |
| Aluvial | Material fragmentario no consolidado, transportado y depositado por corrientes de agua. |
| Baja | Topoforma con una elevación poco considerable en el entorno geográfico. |
| Compleja | Conformada por rocas de diverso origen. |
| Desértico | Superficie terrestre con escasa pluviosidad y poca vegetación. |
| Disectado | Geoforma que presenta cortes. |
| Escarpado | Con pendientes abruptas. |
| Gran superficie | Topoforma de gran extensión. |
| Intermontano | Situado entre montaña. |
| Inundable | Sumersión del área por efecto de una subida temporal del nivel de un río lago o del mar. |
| Laderas tendidas | Porción de la superficie extendida. |
| Malpaís. | Superficie cubierta por roca volcánica, carente de vegetación. |
| Piso rocoso o cementado | Superficie de la topoforma formada por roca o material clástico compactado. |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

| Término | Descripción |
|-------------------|--------------------------------------|
| Ramificado | Geoforma con bifurcaciones. |
| Rocoso | Geoforma conformada por rocas. |
| Salina | Área con un alto contenido en sales. |
| Tendido | Extendido en forma horizontal. |
| Típico | Con características propias. |

6.1.2.2 Hidrología

La cuenca de análisis se ubica en la región Hidrológica RH18 Río Balsas, sobre la región del Alto Balsas, que a su vez sobre la Cuenca Río Coatlán, Subcuenca RH18Fe y finalmente barranca Sin Nombre. La corriente principal da origen a una corriente Colorada. Dicha cuenca se encuentra dentro del municipio de Temixco, Estado de Morelos. Fig 6-2 y Fig 6-3.



Figura 6-2. Región Hidrológica Administrativa

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

La clasificación de la cuenca hidrográfica, de acuerdo al tipo de salida de los escurrimientos corresponde a una cuenca tipo exorreica, y de acuerdo al tamaño pertenece a un tipo de cuenca pequeña (<250 km²).

Ahora bien, con el objeto de conocer la potencialidad hidrológica, es necesario analizar la información hidrométrica y climatológica de la zona de estudio. La primera, es la referente a los escurrimientos en un determinado sitio de los ríos o arroyos y consiste en los volúmenes de agua que están cuantificados históricamente con la ayuda de las estaciones hidrométricas existentes.

La segunda, que se refiere a datos climáticos, principalmente precipitaciones máximas anuales, que se han registrado históricamente en las estaciones climatológicas existentes, esta información es útil para el análisis hidrológico de sitios que no cuentan con medición directa de escurrimientos. Para llevar a cabo este análisis es necesario aplicar métodos o modelos denominados de Lluvia-Escurrecimiento, que se basan en la información observada en las estaciones climatológicas disponibles y en algunos factores hidrográficos y fisiográficos. La información climatológica es fundamental para los casos en que no se tiene hidrometría o cuando ésta es deficiente o insuficiente, ya que es a través de aquella como se puede obtener el volumen de agua escurrido en un determinado sitio. Asimismo, sucede que algunas estaciones climatológicas disponen de instrumentación para hacer mediciones de varios parámetros, pero sólo se recopilaron los registros históricos totales de precipitación máxima en 24 horas, para cada mes.

La cuenca de análisis tiene una estación climatológica que tienen influencia en dicha cuenca, ver Figura 6-5 y Tabla 6.3.

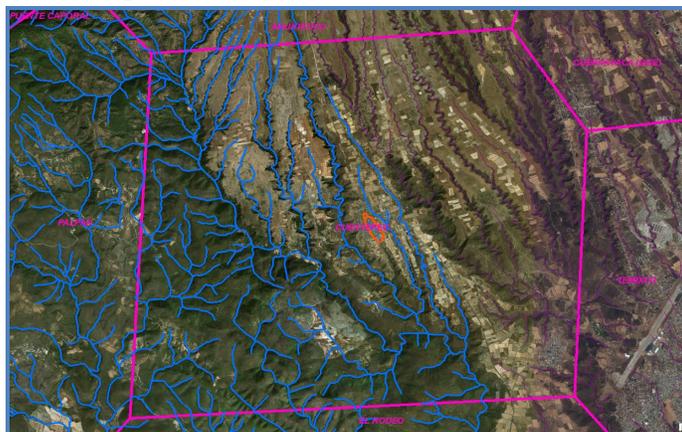


Figura 6-5. Estaciones climatológicas de influencia.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Tabla 6.3. Estaciones climatológicas

| Estación | Clave |
|-----------|-------|
| CUENTEPEC | 17058 |

Edafología y uso de suelo

La magnitud de las avenidas que se generan en una cuenca depende además de la precipitación, en gran parte del uso del suelo, de su cobertura vegetal, y del tipo de suelo (edafología). Por tal motivo, se recopiló y procesó la información cartográfica escala 1:250,000 disponible en el INEGI respecto de estas tres componentes básicas, con el propósito de establecer la modelación del proceso lluvia-escurrimiento en la cuenca estudiada y sus afluentes. En lo que respecta a la edafología de la cuenca de análisis, ésta presenta, Feozem.

Cada tipo de Unidad de Suelo contenidas sobre la cuenca en análisis se describe enseguida, de acuerdo a la Guía para la Interpretación de Cartografía Edafológica Editada por el INEGI.

Los feozems (del griego phaios, oscuro y del ruso zemlja, suelo), por el contrario, son muy fértiles y aptos para el cultivo, si bien son sumamente proclives a la erosión. Con frecuencia son suelos profundos y ricos en materia orgánica. Figura 6-6



Figura 6-6. Edafología cuenca de análisis

Uso de suelo

Ahora bien, respecto al uso de suelo que tiene mayor extensión territorial en la cuenca, corresponde: cultivos en surco en curvas de nivel, zona

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

urbana de acuerdo a los datos vectoriales 1:250,000 editado por el INEGI en su serie 5. Fig 6-7.

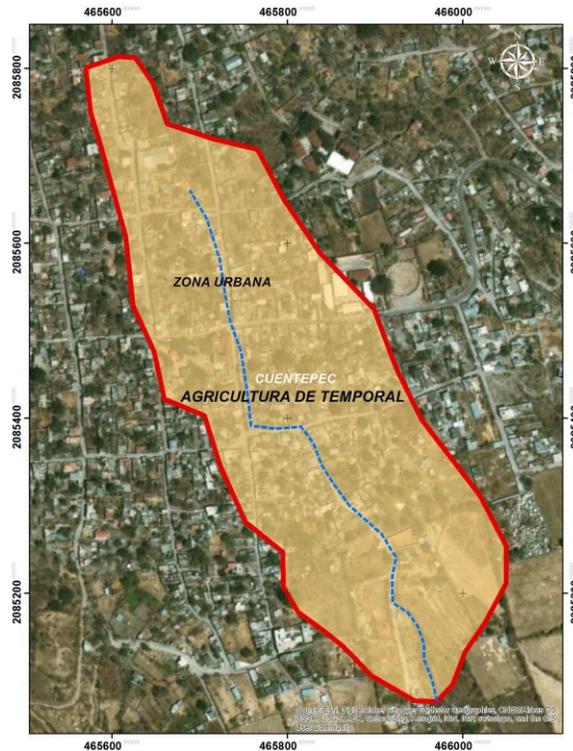


Figura 6-7. Uso de suelo

6.1.3 Metodología para la determinación avenidas máximas probables

En todo estudio hidrológico el conocimiento pleno de las distintas características que predominan en la zona en estudio constituye un factor importante para su culminación, por tal motivo se realiza una caracterización detallada de la cuenca para disponer de los elementos esenciales que den confiabilidad a los resultados finales del hidrológico, es decir los gastos pico de las posibles avenidas y la distribución en el tiempo de los caudales durante el paso de tales avenidas.

Los métodos para la estimación de avenidas se pueden dividir en métodos con enfoque hidrometeorológico y métodos con enfoque hidrométrico. Los primeros se basan en datos de precipitación y en la modelación del proceso lluvia-escorrentamiento, mientras los segundos aprovechan la información histórica de avenidas en el sitio específico, pudiendo o no tomar en cuenta información de precipitaciones.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Cabe mencionar que los métodos para estimar la avenida máxima probable a través de un modelo lluvia-escorrentamiento no están estandarizados, debido principalmente a que el proceso de transformación de lluvia en escorrentamiento es uno de los problemas más complejos en la hidrología y su modelación continúa siendo cuestionada. Por mencionar algunos de los factores más importantes se pueden citar que, entre otros, las variaciones espaciales y temporales de la lluvia, las características del suelo y el uso del suelo, la cobertura vegetal, la función de pérdidas y las condiciones antecedentes de humedad de la cuenca mantienen interrelaciones importantes que propician gran complejidad del fenómeno. Por estas razones, parece indudable que la transformación lluvia-escorrentamiento es el punto más débil de los métodos de estimación con enfoque hidrometeorológico. (Ramirez O, 2000).

Con base en lo expuesto, resulta deseable mejorar los métodos para la determinación de la probabilidad de excedencia del evento de diseño de las estructuras hidráulicas, lo cual lleva a la revisión de las técnicas con base hidrométrica.

En el análisis de frecuencias de avenidas desde el punto de vista del enfoque hidrométrico se realiza mediante una descripción probabilística de la ocurrencia de los gastos máximos anuales por medio de una función de distribución, a la cual se le determinan sus parámetros utilizando la información histórica disponible, que se considera como una muestra aleatoria. En hidrología se considera que éste enfoque es más acertado que el enfoque hidrometeorológico, debido a que se realiza la extrapolación de los gastos escorrentados en la cuenca directamente sin considerar un proceso de transformación como en los métodos hidrometeorológicos. (Ramirez O, 2000).

A continuación, se describe las metodologías para la estimación de la avenida máxima probable (gasto) asociado a diferentes periodos de retorno para el enfoque hidrometeorológico:

6.1.4 Metodología con enfoque hidrometeorológico.

Una vez determinada la cuenca de análisis se procedió a determinar las características principales de la cuenca general, lo cual correspondió a:

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

- Clasificación de acuerdo al tipo de salida de los escurrimientos.
- Clasificación de la Cuenca de acuerdo al tamaño. Corresponde a una cuenca pequeña ya que esta es menor a los 250 km²
- Pendiente media del cauce principal, (Se utilizó el criterio de Taylor Schwartz), cuyo valor se determinó como $S=0.04945$ Taylor Schwartz. Propone calcular la pendiente media como la de un canal de sección trapecial uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión.
- Longitud de cauce principal es de 0.706 km. Fig 6-8.

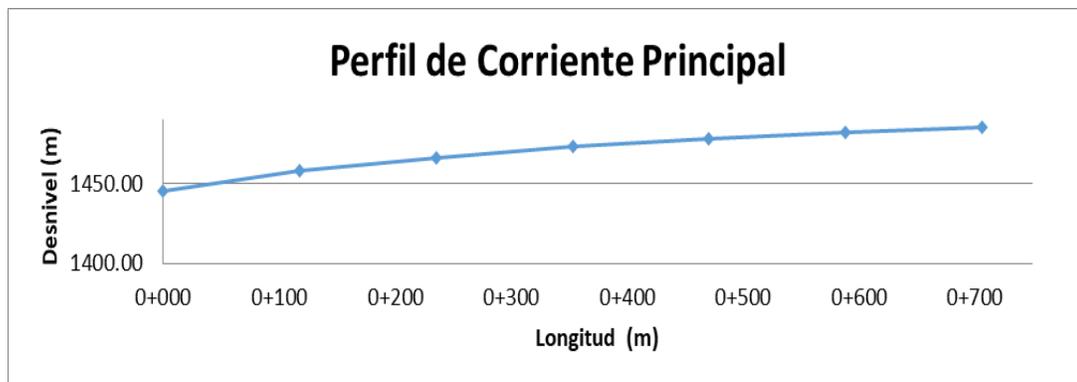


Figura 6-8. Pendiente media del cauce principal

Es importante mencionar que la metodología para estimar los diferentes gastos de diseño será la siguiente:

Mediante la utilización del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM), el catastro estatal con curvas 1:1000 y la Red Hidrográfica escala 1: 50,000 editadas por el INEGI, se determinaron los datos fisiográficos de la Subcuenca.

Es importante mencionar que el parteaguas de la subcuenca en análisis, se realizó con apoyo del Software ArcGis 10.3 sobre el Modelo Digital mencionado en el párrafo anterior. Fig 6-9 y Tabla 6.4.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

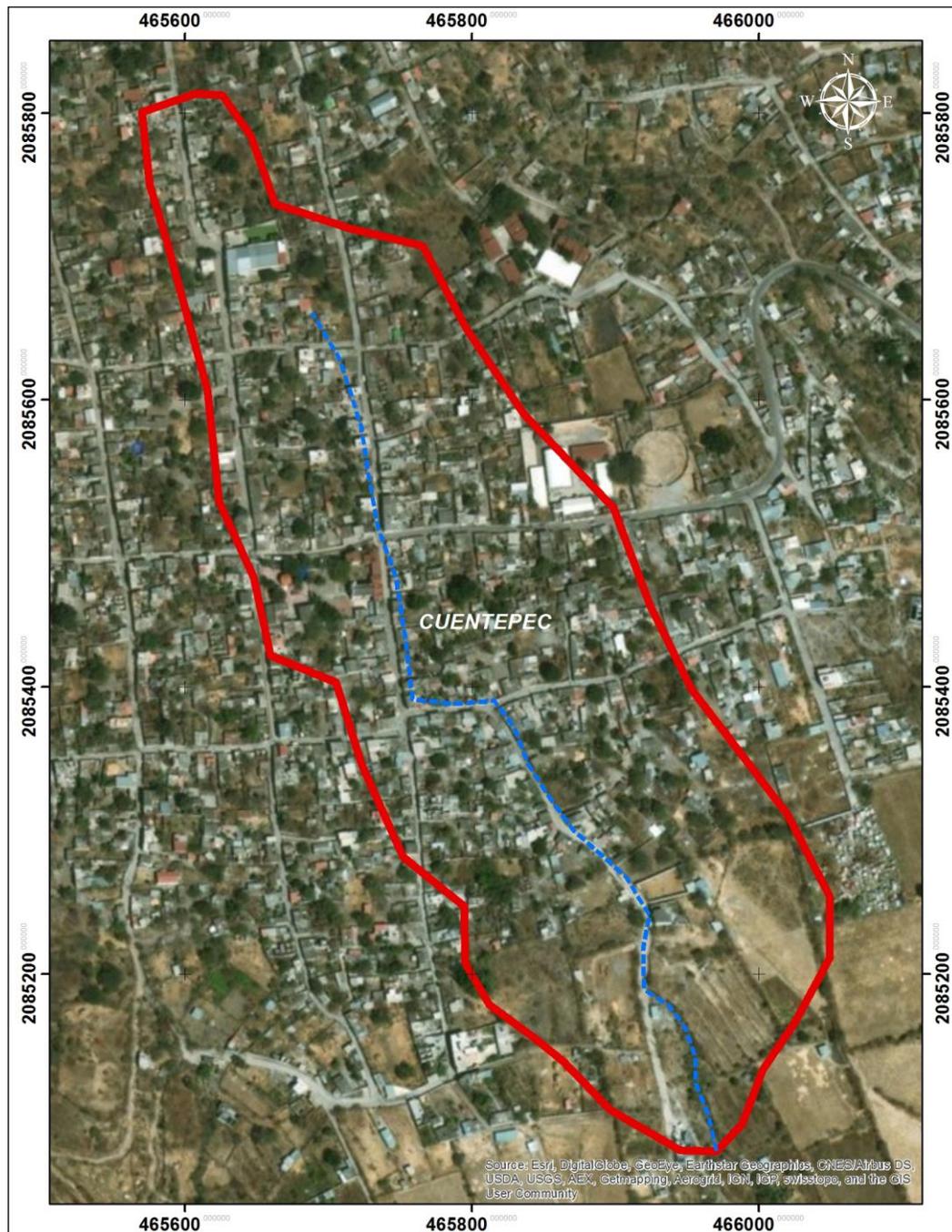


Figura 6-9. Subcuena de análisis

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Tabla 6.4 Subcuencas de análisis

| Nombre subcuenca | Área Cuenca |
|------------------|--------------------|
| | (km ²) |
| SUBCUENCA | 0.15 |

La hipótesis principal para determinar los gastos de diseño, obtendrá la aportación de la cuenca general para los diferentes periodos de retorno, estimando con esto la lluvia media de diseño para toda la cuenca, así como la pendiente media y tiempo de concentración, dichos parámetros se utilizarán en la subcuenca variando el área de cada una de estas, así como el número de curva.

Por lo tanto, a partir de la localización de las estaciones climatológicas seleccionadas a cargo de la CONAGUA, se determinó la zona de influencia de cada una mediante el trazo de los polígonos de Thiessen. Fig 6-10.

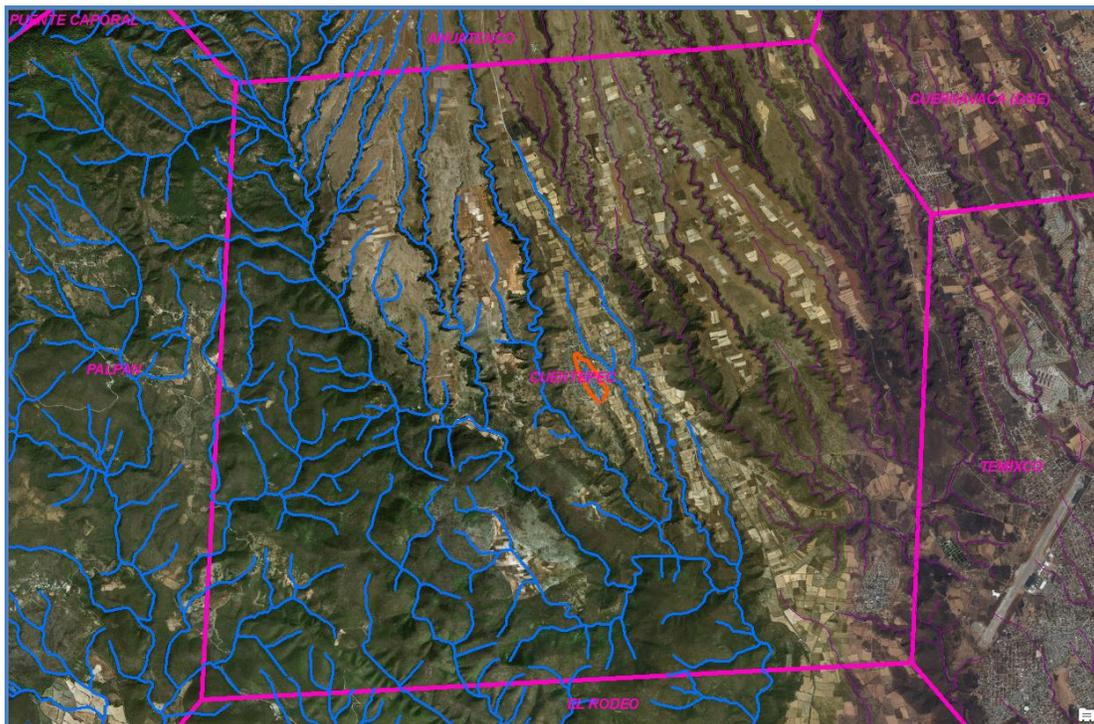


Figura 6-10. Polígonos de Thiessen

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Como se puede observar en la figura, las estaciones climatológicas de influencia corresponden a las estaciones con clave Cuentepec. Por lo que a partir del procesamiento de la información mencionada, se determinó la precipitación máxima probable para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 100, 200, 500, 1,000, 5,000 y 10,000 Años). La información de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de las estaciones analizadas, se procesaron mediante análisis de probabilidades. Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Resultados ajustes de probabilidad

| Tr | Precipitación máxima (mm) |
|-------|---------------------------|
| | Cuentepec |
| 2 | 65.70 |
| 5 | 84.11 |
| 10 | 95.7 |
| 20 | 106.47 |
| 50 | 120.05 |
| 100 | 130.05 |
| 200 | 139.94 |
| 500 | 152.94 |
| 1000 | 162.89 |
| 2000 | 172.90 |
| 5000 | 185.21 |
| 10000 | 195.68 |
| Área | 0.15 |
| % | 100% |

A continuación, se describe la metodología empleada para la determinación de las avenidas máximas de diseño para diferentes periodos de retorno, para la cuenca general, para mayor detalle se recomienda consultar la memoria de cálculo.

Es importante mencionar que el tiempo de concentración, la lluvia de diseño y la pendiente media del cauce principal se obtuvieron en la cuenca principal por lo que sólo se varió el número de curva y la superficie de la subcuenca comentada.

A continuación, se presenta la metodología empleada para la cuenca general, la cual como ya se mencionó servirá para determinar la lluvia media de diseño, así como el gasto general de la cuenca.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Con los valores obtenidos a partir de los ajustes de probabilidad que representan los valores de precipitación puntual de las estaciones climatológicas de influencia, se obtuvo la precipitación media, por el método de Polígonos de Thiessen, como ya se mencionó. El valor medio se consideró una distribución no uniforme de la lluvia en el espacio, por lo que medidamente el empleo de la Ecuación 1.1, donde “A” es el valor del área de la cuenca en kilómetros cuadrados y X_{punt} es la precipitación estimada en el análisis de frecuencias para cada periodo de retorno. (CNA, 1987). Tabla 6.6.

Ecuación 1.1

$$x_{med} = x_{punt} \left[\frac{1}{2.7183 \left(0.00284A \right)^{0.5}} \right]$$

Tabla 6.6. Precipitación máxima acumulada en 24 horas.

| Tr (años) | X24 (mm) |
|------------------|-----------------|
| 2 | 64.39 |
| 5 | 76.86 |
| 10 | 83.43 |
| 20 | 88.85 |
| 50 | 94.94 |
| 100 | 99.01 |
| 200 | 102.73 |
| 500 | 107.23 |
| 1,000 | 110.39 |

Los valores obtenidos mediante la Ecuación 1.1 se utilizaron para la obtención de las precipitaciones medias de diseño, que se detalla en la Sección precipitación media del año.

6.1.5 Tiempo de concentración T_c

El tiempo de concentración se define a partir de las características fisiográficas de la cuenca. Para su estimación se utilizaron las fórmulas de Rowe, Kirpich y de la USSCS, cada una de estas fórmulas se define mediante las siguientes expresiones. (CNA, 1987).

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Ecuación 1.2 Rowe

$$T_c = \left(\frac{0.87L^3}{D} \right)^{0.385} =$$

Ecuación 1.3 Ecuación de Kirpich

$$T_c = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} =$$

Ecuación 1.4 USSCS

$$T_c = \left(\frac{L^{1.15}}{3085D^{0.38}} \right) =$$

Resultados tiempo de concentración

| Ecuación | Tc (h) |
|----------|--------|
| Rowe | 0.15 |
| Kirpich | 0.16 |
| USSCS | 0.14 |

Para efectos del estudio se adoptó el Tc correspondiente a la fórmula de Kirpich ya que con dicha fórmula se considera la pendiente media del cauce principal:

Tiempo de concentración = Tc = 0.16 horas

6.1.5.1 Precipitación media de diseño

Para determinar la precipitación media de diseño se utiliza la fórmula de Emil Kuishling y C. E. Gransky, la cual se apega a las curvas de máxima intensidad y considera la duración de la tormenta igual al tiempo de concentración. (CNA, 1987).

Ecuación 1.5

$$H_{pd} = \frac{KT_c^{1-e}}{1-e}$$

Dónde:

Hpd = Precipitación media de diseño en el tiempo de concentración (mm)

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

K = Coeficiente de distribución (adimensional)

Tc = Tiempo de concentración (hr)

e = Parámetro que depende del tiempo de concentración de la cuenca (adimensional)

Para determinar el valor de “e” se emplean los valores presentados en la página 54 del instructivo de hidrología mencionado anteriormente (CNA,1987), y que se reproducen en la Tabla 6..

Tabla 6.7. Parámetro “e” expresión de mil Kuishling y C. E. Gransky

| Valor de “e” | Casos recomendados |
|----------------|--|
| De 0.45 a 0.50 | Cuencas muy grandes con Tc igual o mayor de 48 horas |
| De 0.50 a 0.55 | Cuencas grandes con Tc mayor de 24 horas y menor de 48 horas |
| De 0.55 a 0.60 | Cuencas medianas con Tc entre 6 y 24 horas |
| De 0.60 a 0.70 | Cuencas chicas con Tc entre 6 y 1 hora |
| De 0.70 a 0.80 | Cuencas muy pequeñas con Tc menor de 1 hora |

Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal” (CNA, 1987)

El coeficiente de distribución es e=0.77 m, para un tiempo de concentración Tc=0.16 hr.

Para determinar el valor K se utilizará la siguiente Ecuación 1.6

Ecuación 1.6

$$K = \frac{(1 - e)(x_{24})}{24^{(1-e)}}$$

Sustituyendo en la Ecuación 1.6 los valores de precipitación máxima acumulada en 24 hr para cada una de las cuencas de análisis, el valor de “e” obtenido a partir de la Tabla 6. y el tiempo de concentración Tc, se obtienen los valores de “K” y de precipitación media de diseño (h_{pd}). Tabla 6.8.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

Tabla 6.8. Lluvia de diseño (h_{pd}) para diferentes periodos de retorno

| Tr (años) | K | Hpd (mm) |
|------------------|----------|-----------------|
| 2 | 7.13 | 20.38 |
| 5 | 8.51 | 24.32 |
| 10 | 9.24 | 26.40 |
| 20 | 9.84 | 28.12 |
| 50 | 10.51 | 30.05 |
| 100 | 10.96 | 31.33 |
| 200 | 11.38 | 32.51 |
| 500 | 11.87 | 33.93 |
| 1,000 | 12.22 | 34.93 |

6.1.6 Gastos máximos por el método de la formula racional.

La fórmula definida para este método es la siguiente: (CNA, 1987)

Ecuación 1.7

$$Q_{\max} = 0.278 C_e I A$$

Dónde:

Q_{\max} = Gasto máximo, en m^3/s .

C_e = Coeficiente de escurrimiento, adimensional.

I = Intensidad de lluvia en el T_c , en mm/hr .

A = Área de la cuenca, en km^2 .

a) Coeficientes de escurrimiento.

La metodología empleada para obtener los coeficientes de escurrimiento utilizados para determinar la magnitud de las avenidas máximas probables con el método racional se basa en el cálculo de la lluvia en exceso o de escurrimiento directo para cada periodo de retorno analizado, que dividida entre los valores correspondiente de la lluvia de diseño se obtienen los respectivos coeficientes de escurrimiento. La expresión que define esta metodología es la siguiente.

Ecuación 1.8

$$C_e = \frac{H_e}{H_{pd}}$$

Dónde:

H_e =Lluvia en exceso o de escurrimiento, en mm .

H_{pd} = Lluvia media de diseño, en mm .

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

La forma de calcular la precipitación en exceso en éste estudio, es la desarrollada por la U. S. Soil Conservation Service (USSCS), en la cual interviene la magnitud de la lluvia de diseño, el uso actual del suelo, la vegetación, el tipo de suelo y su textura, además de las condiciones de humedad previa del mismo, que puede ser seca, media y húmeda. Con este criterio se determina lo que se llama el número N de escurrimiento y se utiliza la Ecuación 1.9 (CNA, 1987).

Ecuación 1.9

$$He = \frac{\left(Hp_d - \frac{508}{N} + 5.08 \right)^2}{\left(Hp_d + \frac{2032}{N} - 20.32 \right)}$$

Dónde:

He = Precipitación en exceso o de escurrimiento directo, en mm.

Hpd = Precipitación media de diseño, en mm.

N = Número de curva de escurrimiento, adimensional.

b) Número de curva de escurrimiento.

El número N de escurrimiento depende exclusivamente del uso del suelo, la cobertura vegetal, y del tipo de suelo; oscila, de acuerdo las diferentes referencias bibliográficas, entre 6 y 100, siendo los valores correspondientes para suelos muy permeables y suelos impermeables respectivamente (zonas urbanas pavimentadas). El método propone que, la altura de lluvia total P se relaciona con la altura de lluvia efectiva Pe mediante las curvas mostradas en la Fig 6-11

. (Aparicio, 1992)

Tipo A.- Suelos de gravas y de arenas de tamaño medio, limpias y mezclas de ambas. Estos generan el menor escurrimiento.

Tipo B.- Suelos de arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezcla de arena y limo. Generan escurrimiento inferior al medio.

Tipo C.- Suelos de arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad, mezcla de arena, limo y arcilla. Generan escurrimiento superior al medio.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Tipo D.- Suelos arcillosos de alta plasticidad, con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie. Generan el mayor escurrimiento. Fig 6-11.

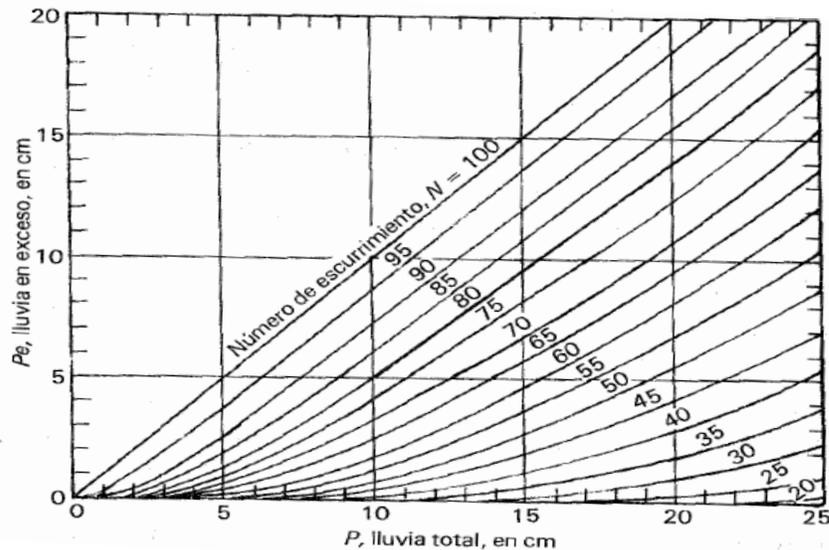


Figura 6-11. Curvas método número de escurrimiento. (Aparicio, 1992)

Con base en la clasificación del grupo hidrológico de suelos y la superficie correspondiente a cada uso de suelo y vegetación se obtuvieron los números de curva de escurrimiento para condiciones de humedad previa de tipo media, utilizando los valores mostrados en la Tabla 6.9

Tabla 6.9 Selección del número de escurrimiento N, para condiciones de humedad previa media

| Uso de la tierra | Condiciones de cobertura vegetal de la superficie | Tipo de suelo | | | |
|--------------------|---|---------------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Bosques cultivados | Ralo, baja transpiración | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | Normal, transpiración media | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | Espeso, alta transpiración | 25 | 55 | 70 | 77 |
| Caminos | De tierra | 72 | 82 | 87 | 89 |
| | Superficie dura | 74 | 84 | 90 | 92 |
| Bosques naturales | Muy ralo, muy baja transpiración | 56 | 75 | 86 | 91 |
| | Ralo, baja transpiración | 46 | 68 | 78 | 84 |
| | Normal, transpiración media | 36 | 60 | 70 | 76 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

| Uso de la tierra | Condiciones de cobertura vegetal de la superficie | Tipo de suelo | | | |
|---|---|---------------|-----|-----|-----|
| | | A | B | C | D |
| | Espeso, alta transpiración | 26 | 52 | 62 | 69 |
| | Muy espeso, muy alta transpiración | 15 | 44 | 54 | 61 |
| Descanso, sin cultivo | Surcos rectos | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Cultivo en surco | Surcos rectos | 70 | 80 | 87 | 90 |
| | Surco en curva de nivel | 67 | 77 | 83 | 87 |
| | Terrazas | 64 | 73 | 79 | 82 |
| Cereales | Surcos rectos | 64 | 76 | 84 | 88 |
| | Surco en curva de nivel | 62 | 74 | 82 | 85 |
| | Terrazas | 60 | 71 | 79 | 82 |
| Leguminosas sembradas con maquinaria o al voleo | Surcos rectos | 62 | 75 | 83 | 87 |
| | Surco en curva de nivel | 60 | 72 | 81 | 84 |
| | Terrazas | 57 | 70 | 78 | 82 |
| Pastizal | Pobre | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Normal | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | Bueno | 39 | 61 | 74 | 80 |
| | Curva de nivel, pobre | 47 | 67 | 81 | 88 |
| | Curva de nivel, normal | 25 | 59 | 75 | 83 |
| | Curva de nivel, bueno | 6 | 35 | 70 | 79 |
| Potrero permanente | Normal | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Superficie impermeable | --- | 100 | 100 | 100 | 100 |

Instructivo de Hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal (CNA, 1987).

Con la información anterior se determinaron los números de curvas parciales y el número general ponderado para toda la cuenca, donde éste último se estimó en $N=83.72$ Ver Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Número de escurrimiento para los diferentes usos de suelo y vegetación y ponderada.

| N | Número de Curva | Área (km ²) | Porcentaje | Ponderado |
|---|-----------------|-------------------------|------------|-----------|
| C CULTIVOS EN SURCOS EN CURVAS DE NIVEL Y ZONA URBANA | 92 | 0.15 | 100% | 92 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Sustituyendo los valores de lluvia media de diseño (Tabla 6) y el número “N” de escurrimiento en la Ecuación 1.9 se obtuvieron las alturas de lluvia en exceso o de escurrimiento directo para diferentes periodos de retorno, mostradas en la Tabla 6.7. Lluvia excedente o de escurrimiento directo.

Tabla 6.71 Lluvia excedente o de escurrimiento directo.

| Tr (años) | He (mm) |
|--------------|------------|
| 2 | 6.69 |
| 5 | 9.44 |
| 10 | 10.97 |
| 20 | 12.27 |
| 50 | 13.77 |
| 100 | 14.78 |
| 200 | 15.73 |
| 500 | 16.88 |
| 1,000 | 17.70 |

Coefficientes de escurrimiento. Tabla 6.12.

Una vez determinados los valores de lluvia excedente (He) y lluvia media de diseño (HPd), estos se aplicaron en la Ecuación 1.8 para obtener los coeficientes de escurrimiento para diferentes periodos de retorno. Los resultados se muestran en Ecuación 4.13.

Tabla 6.12. Coeficientes de escurrimiento

| Tr (años) | C |
|--------------|-------|
| 2 | 0.329 |
| 5 | 0.388 |
| 10 | 0.415 |
| 20 | 0.436 |
| 50 | 0.458 |
| 100 | 0.472 |
| 200 | 0.484 |
| 500 | 0.498 |
| 1,000 | 0.507 |

Intensidades de lluvia.

Para determinar la intensidad de lluvia se utiliza la fórmula de Emil Kuishling y C. E. Gransky, mostrada a continuación (CNA, 1987). Ecuación 1.10

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

$$I = \frac{K}{(1 - e)Tc^e}$$

Donde los valores de la variable “K” para los periodos de retorno analizados fueron determinados previamente con la Ecuación 1.6, cuyos resultados se muestran en la Tabla 63 Por lo que respecta al valor de “e”, este es el mismo que interviene en la misma expresión referida. Tabla 6.13.

Tabla 6.13 Intensidades de lluvia

| Tr (años) | I (mm/hr) |
|--------------|--------------|
| 2 | 126.32 |
| 5 | 150.80 |
| 10 | 163.67 |
| 20 | 174.31 |
| 50 | 186.27 |
| 100 | 194.24 |
| 200 | 201.53 |
| 500 | 210.37 |
| 1,000 | 216.56 |

Gastos máximos.

Aplicando los valores de los coeficientes de escurrimiento, intensidad de lluvia y el valor de área de la subcuenca de 0.15 km², en la Ecuación 1.7 se obtuvieron los gastos máximos para diferentes periodos de retorno mediante el método de la formula racional para la cuenca en análisis. Ver Tabla 6.14.

Tabla 6.14. Gastos máximos por el método racional.

| Tr (años) | Qmax (m ³ /s) |
|--------------|-----------------------------|
| 2 | 1.77 |
| 5 | 2.49 |
| 10 | 2.89 |
| 20 | 3.23 |
| 50 | 3.63 |
| 100 | 3.90 |
| 200 | 4.15 |
| 500 | 4.45 |
| 1,000 | 4.67 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

6.1.7 Gastos máximos por el método del hidrograma unitario triangular

El Hidrograma Unitario Triangular es aquel que resulta del histograma de la lluvia en exceso de una tormenta dada. Para la aplicación de éste método se aplica la formula mostrada a continuación. (CNA, 1987)

Ecuación 1.11

$$Q_{\max} = 0.556 \frac{He A}{n T_p}$$

Dónde:

He = Precipitación en exceso en el intervalo, en mm.

A = Área de la cuenca, en km²

n = parámetro, adimensional

T_p = Tiempo pico, en horas

El valor de la variable “n” se obtiene a partir del tamaño de la cuenca, y con las ecuaciones mostradas a continuación, considerando que la superficie de la subcuenca. (CNA, 1987)

Ecuación 1.12

$$n = \begin{cases} 2 & \text{Para cuencas con } A < 250 \text{ km}^2 \\ 2 + \frac{A - 250}{1583.33} & \text{Para cuencas con } A \geq 250 \text{ km}^2 \end{cases}$$

Para determinar el valor del tiempo pico (T_p), se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 1.13

$$T_p = 0.6T_c + \frac{de}{2}$$

Dónde:

de = Duración de la lluvia en exceso, en horas.

T_c = Tiempo de concentración, en horas.

Sustituyendo valores de la lluvia en exceso (He), la variable “n”, el de la superficie de la cuenca y el tiempo pico de 0.18 horas, en la Ecuación 1.11 se obtuvieron los gastos máximos mostrados en la Tabla para la cuenca de análisis.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

Tabla 6.15. Gastos máximos por el método del
Hidrograma Unitario Triangular (HUT)

| Tr (años) | Qmax. (m ³ /s) |
|--------------|------------------------------|
| 2 | 1.60 |
| 5 | 2.26 |
| 10 | 2.63 |
| 20 | 2.94 |
| 50 | 3.30 |
| 100 | 3.54 |
| 200 | 3.77 |
| 500 | 4.05 |
| 1,000 | 4.24 |

6.1.8 Gastos máximos por el método de ven te Chow.

El modelo propuesto por Ven Te Chow se basa en el concepto del hidrograma unitario y del sintético y es aplicable a una cuenca pequeña en la cual el escurrimiento es sensible a lluvias intensas y de corta duración y donde predominan las características físicas de la cuenca con respecto a las del cauce. La cuenca pequeña puede variar desde unos cuantos kilómetros cuadrados de extensión hasta un límite que Chow considera de 250 km². La ecuación que define al gasto máximo es la siguiente: (CNA, 1987).

Ecuación 1.14

$$Q_{\max} = A X Y Z$$

Dónde:

A = Área de la cuenca, en km².

X = Factor de escurrimiento, adimensional.

Y = Factor climático, adimensional.

Z = Factor de reducción del pico, adimensional.

El factor de escurrimiento “X” se determina mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

Ecuación 1.15

$$X = \frac{He}{Tc}$$

Dónde:

He = lluvia en exceso, en mm.

Tc = Tiempo de concentración, en horas.

Sustituyendo los valores de la lluvia en exceso (He) mostrados en la Tabla 6.7, y el tiempo de concentración (Tc) = 0.16 horas, se obtuvieron los siguientes valores de “X”. Ver Tabla 6.16.

Tabla 6.16. Valores de “X” para aplicarse en la fórmula de Chow

| Tr (años) | X |
|--------------|--------|
| 2 | 41.50 |
| 5 | 58.50 |
| 10 | 67.98 |
| 20 | 76.05 |
| 50 | 85.34 |
| 100 | 91.65 |
| 200 | 97.49 |
| 500 | 104.66 |
| 1,000 | 109.74 |
| 2,000 | 41.50 |
| 5,000 | 58.50 |
| 10,000 | 67.98 |

El factor climático, Y, se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 6.16

$$Y = 2.78 \frac{hp}{hpb}$$

Dónde:

hp = Altura de precipitación en la duración de la tormenta, en mm

hpb = Altura de precipitación en la estación base, en la duración de la tormenta, mm

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

Para el cálculo del factor “Y”, y como se trata de una cuenca pequeña, se supone que $h_p = h_{pb}$, por lo que el valor de para este parámetro es:

$$Y = 0.278$$

Para determinar el parámetro “Z”, primero se calcula la relación (d/tr), duración de la tormenta (d) entre el tiempo de retraso (tr), donde éste último se obtiene aplicando la siguiente expresión.

Ecuación 6.17

$$tr = 0.00505 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$$

Dónde:

tr = tiempo de retraso, en horas.

L = Longitud del cauce principal, en m.

S = Pendiente media del cauce, adimensional.

Aplicando en la expresión anterior los valores de longitud y pendiente media del cauce principal, que se obtuvo en la sección 4 se obtiene:

$$tr = \mathbf{0.20} \text{ horas}$$

Por lo que respecta a la duración de la tormenta, y debido a que se trata de una subcuenca intermedia-pequeña, se asume que ésta es igual al tiempo de concentración, es decir:

$$d = T_c = \mathbf{0.16}$$

Por lo que:

$$d/tr = \mathbf{0.80}$$

El método de Chow establece que si la relación entre el tiempo de concentración y el tiempo de retraso es mayor a dos, entonces el factor Z es igual a 1, de lo contrario es necesario determinar dicho factor a través de la

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

gráfica mostrada en la Fig 6-12, **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la cual emplea como dato de entrada la relación entre la duración de la tormenta y el de retraso.

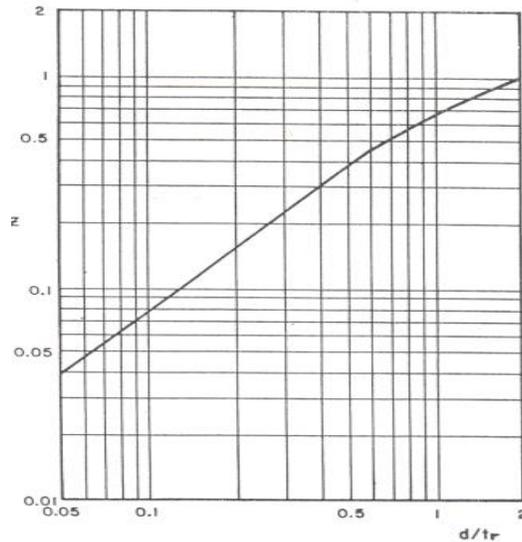


Figura 6-12. Relación entre “Z” y d/tr. (CNA, 1987)

En este caso, el valor de Z es:

Z = 0.58

Finalmente, sustituyendo el valor de la superficie de la subcuenca, los valores de “X” de la Tabla 6.16, así como el de Y=0.278 y el de Z=0.58, se determinaron los gastos máximos mostrados en 6.17.

Tabla 6.17. Gastos máximos por el método de Ven Te Chow

| Tr (años) | Qmax (m³/s) |
|------------------|-------------------------------|
| 2 | 1.02 |
| 5 | 1.44 |
| 10 | 1.68 |
| 20 | 1.88 |
| 50 | 2.11 |
| 100 | 2.26 |
| 200 | 2.40 |
| 500 | 2.58 |
| 1,000 | 2.71 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

6.1.9 Resumen de avenidas máximas.

En la Tabla 6.18 se muestra el resumen de gastos máximos obtenidos con los tres métodos indirectos analizados en el presente estudio para la Cuenca de análisis. En la Fig 6-12 se muestran la gráfica de gastos asociados a diferentes periodos de retorno obtenidos mediante tres métodos indirectos de lluvia-escurrimiento.

Tabla 6.18. Resumen gastos máximos obtenidos mediante aplicación de modelos lluvia-escurrimiento.

| Tr (años) | MÉTODOS | | | | Promedio |
|-----------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------|
| | Racional (m ³ /s) | H.U.T. (m ³ /s) | Ven Te Chow (m ³ /s) | SCS (m ³ /s) | |
| 2 | 1.765 | 1.60 | 1.02 | 0.90 | 1.324 |
| 5 | 2.488 | 2.26 | 1.44 | 1.24 | 1.859 |
| 10 | 2.891 | 2.63 | 1.68 | 1.44 | 2.159 |
| 20 | 3.235 | 2.94 | 1.88 | 1.61 | 2.414 |
| 50 | 3.629 | 3.30 | 2.11 | 1.80 | 2.710 |
| 100 | 3.898 | 3.54 | 2.26 | 1.94 | 2.911 |
| 500 | 4.451 | 4.05 | 2.58 | 2.23 | 3.327 |
| 1000 | 4.668 | 4.24 | 2.71 | 2.34 | 3.490 |

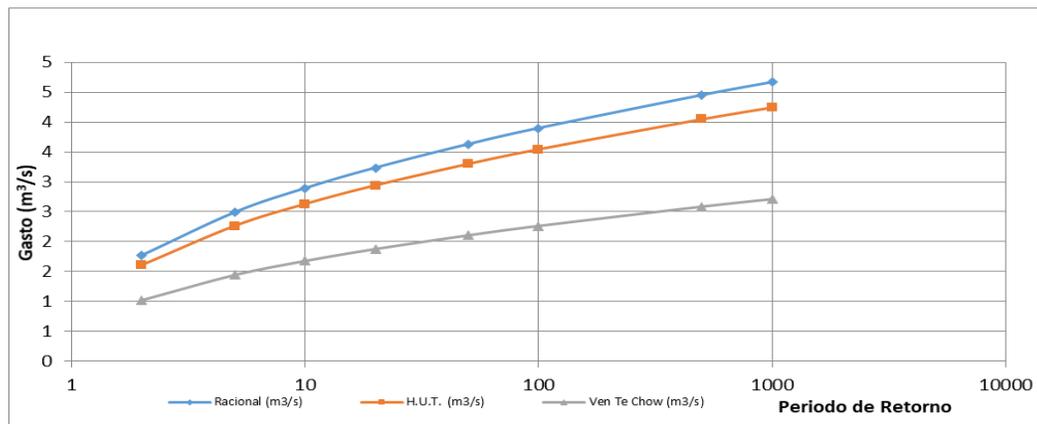


Figura 6-13. Graficas de gastos asociados a diferentes Tr

Para la selección del periodo de retorno, se utilizó las recomendaciones de la CONAGUA. Por lo que la obra en estudio entra dentro de la tipo de drenaje pluvial para poblados pequeños donde la recomendación de CONAGUA, especifica que se debe diseñar para periodos de retorno de 100 años. Tabla 6.19.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA
LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL
ESTADO DE MORELOS

Tabla 6.19. Periodos de retorno recomendados por la CONAGUA, para
diferentes obras hidráulicas.

| Descripción de la obra hidráulica. | T_r |
|---|-------------|
| <i>1.- Drenaje pluvial</i> | |
| Lateral libre en calles de poblados donde se tolera encharcamientos de corta duración | 2 |
| Lateral libre en calles de poblados donde no se tolera encharcamiento temporal | 5 |
| De zonas agrícolas | 5 |
| De zonas urbanas | |
| Poblados pequeños con < de 100,000 habitantes | 2 a 5 |
| Poblados medianos con 100,000 a un millón de habitantes | 5 a 10 |
| Poblados grandes con más de un millón de habitantes | 10 a 25 |
| Aeropuertos y estaciones de ferrocarril y de autobuses | 10 |
| Cunetas y contracunetas en caminos y carreteras | 5 |
| <i>2.- Estructuras de cruce (Puentes y alcantarillas)</i> | |
| Puentes carreteros en: | |
| Localidades que comunican poblados pequeños | 25 a 50 |
| Caminos regionales que comunican poblados medianos | 50 a 100 |
| Carreteras que comunican poblados grandes (Ciudades) | 500 a 1,000 |
| Puentes de ferrocarril en: | |
| Vías locales aisladas | 50 a 100 |
| Vías secundarias regionales | 100 a 500 |
| Vías primarias del país | 500 a 1,000 |
| Puentes canales o tuberías en conducción de agua | |
| Para riego en áreas menores a 1,000ha | 10 a 25 |
| Para riego en áreas de 1,000 a 10,000 ha | 25 a 50 |
| Para riego en áreas > de 10,000ha | 50 a 100 |
| De abastecimiento de agua potable | 100 a 500 |
| Alcantarillas para paso de cauces pequeños | |
| En caminos locales que comunican poblados pequeños | 10 a 25 |
| En caminos regionales que comunican poblados medianos | 25 a 50 |
| En caminos primarios que comunican poblados grandes | 50 a 100 |

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

CONCLUSIONES

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido utilizados como herramientas para la determinación de sus características fisiográficas (superficie, pendiente, red de drenaje, forma, etc.) además de variables tales como pérdida de suelos, balances hidrológicos, planeación y gestión hidráulica, transporte de sedimentos y contaminantes, modelación hidráulica para la determinación de áreas de inundación y sequías, cambio climático, fronteras agrícolas, cambios de uso de suelo, deforestación etc. Este trabajo tiene el propósito de representar un conjunto de herramientas que permitan la construcción de un SIG además de contar con datos fisiográficos del río Apatlaco, planteando la propuesta de prevención de desastres naturales y su mitigación, por lo que se estima conveniente la construcción de dicho SIG con el objeto de tener una total precisión de la capacidad de los cauces, arroyos, presas y vasos de almacenamiento, para así evitar problemas de conducción de las aguas pluviales.

El conocimiento del comportamiento de un río es indispensable para su aprovechamiento de una forma eficiente segura y sustentable, mediante el análisis de los registros de precipitación y escurrimiento. Para que cualquier técnica sea eficiente, el tamaño de la muestra debe ser lo suficientemente grande de forma tal que los rangos de incertidumbre sean mínimos y la información que arroje su análisis sea confiable. Los SIG proveen herramientas útiles, rápidas, automáticas y precisas para el cálculo de variables hidrológicas.

En este caso de estudio se obtuvieron polígonos de Thiessen e isoyetas con periodos de retorno de t_r-2 años hasta $t_r-10\ 000$ años, Número de curva (Unión de capas de uso de suelo y edafología) de las que se encuentran en el Estado, con los MDT automatizar la delimitación de la cuenca y obtener los parámetros morfológicos de la cuenca y al tener todos esta información generada en un par de horas se puede obtener el caudal en un cualquier punto del Estado de Morelos a diferentes periodos de retorno.

Indudablemente los SIG son una herramienta de gran apoyo para el desempeño laboral en la eficiencia y rendimiento en el campo de la hidrología.

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS

BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, M. F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, D.F: LIMUSA.
- Cengel. (2006). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. USA: McGraw-Hill.
- CNA. (1987). *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal*. México D.F.: Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Aguas Superficiales e ingeniería de Ríos.
- CONAGUA. (1999). *Oficio Nu, BOO.04.05, Recomendaciones de periodos de retorno para la estimacion de los gastos de diseño de las obras hidráulicas*. Mexico D.F.
- CONAGUA. (2007). *Manual de Agua Potable y Alcantarillado (MAPAS)*. México.
- CONAGUA. (2012). Registros de precipitaciones máximas anuales en 24 horas de la estación 17008- Huautla. México.
- INEGI. (2002-2003). Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación escala 1:250,000, serie III (Conjunto Nacional). México.
- INEGI. (2002-2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Ecala 1:250,000 Serie II (continuo Nacional). México.
- INEGI. (2010). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Recuperado el 2014, de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/index.html#
- Ramirez O, A. (2000). *Análisis de frecuencias conjunto para la estimación de avenidas de diseño* (Primera Edición ed.). Jiutepec Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- SMN. (2014). *Normales Climatológicas*. Recuperado el Julio de 2014, de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=28
- Sotelo. (1997). *Hidráulica General Vol. 1*. México D.F: LIMUSA.
- SRH. (1969). *Pequeños almacenamientos*. México D.F: SRH.
- USBR. (1960). *Desing of Small Dams*.
http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=21
- Libro Fundamentos de Hidrología de Superficie. Francisco Javier Aparicio Mijares FTP.FAO.ORG Ignacio TruebaJainaga Escuela Superior de Ingenieros Agronomos. Madrid
http://sig.cea.es/tipo_SIG
http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=21
- Libro Fundamentos de Hidrología de SuperficiE. Francisco Javier Aparicio Mijares.