

01121
9



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

"USO DE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA EN
HIDROLOGIA, APLICADOS A UN SISTEMA DE ALERTA
HIDROMETEOROLOGICA".

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JOSE LUIS ARAGON HERNANDEZ



DIRIGIDA POR: M.I. HECTOR ESLAVA MORALES

CD. UNIVERSITARIA, D. F.

FEBRERO 2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACION DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/054/02

Señor
JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **MJ. HÉCTOR ESLAVA MORALES**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"USO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN HIDROLOGÍA, APLICADOS A UN SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA"

- I. INTRODUCCION
- II. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
- III. CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA
- IV. APLICACIÓN A UN SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA
- V. CONCLUSIONES
- VI. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitario a 1 de abril de 2002
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GEB/GMP/msty

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: José Luis Aragón Hernández

FECHA: 11 de Febrero de 2003

FIRMA: [Firma manuscrita]

Con todo cariño para mis padres Gonzalo y Francisca, quienes me brindaron su apoyo, me enseñaron a ser perseverante en la vida y luchar por mis ideales. Para ti Papá porque en tu vida diste un ejemplo de integridad, de cariño con tu familia y sobre todo de valor ante la vida.

Donde quiera que estés ¡Te extraño!

A mis hermanos Epifanio, Isabel, Bricia, Alejandra, Felicitos, Federico, Francisco, Vicente, Justino, Félix, Cristina, Edilberto, que en algún momento de mi vida me han ayudado a ser mejor, y quisiera compartir con ustedes este logro y ser "Orgullosamente UNAM".

A todos mis amigos, compañeros y familiares, que en algún momento me brindaron su apoyo y su comprensión. En especial a mis sobrinos que espero que un futuro terminen una carrera.

Agradezco infinitamente a la Universidad Nacional Autónoma de México, que a través de su Facultad de Ingeniería me ha permitido ser parte de ella.

Agradezco a mis profesores, por la formación académica y personal que me brindaron al paso por las aulas.

Asimismo agradezco a la Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por haberme brindado todas las facilidades para realizar tanto el Servicio Social como el presente trabajo.

Mis más sinceros agradecimientos al Dr. Martín Jiménez Espinosa, por ser paciente y brindarme su valioso tiempo y experiencia en asesoría y la revisión de este trabajo. Al M.I. Marco Antonio Salas Salinas, por haberme proporcionado información desinteresadamente y brindarme la asesoría necesaria. Al M. I. Héctor Eslava Morales, por su colaboración en la revisión y comentarios para la mejora de este trabajo. Sin la colaboración de todos ustedes, simplemente esta tesis, no existiría

*A todos, personas e instituciones
¡Mil gracias!*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	3
1.1. Definición.....	3
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Sistemas existentes.....	4
1.4. Componentes.....	5
1.4.1. Hardware.....	6
1.4.2. Software.....	6
1.4.3. Datos.....	6
1.4.3.1. Tipos de datos.....	6
1.4.3.2. Tipos de tecnologías.....	7
1.4.4. Usuarios.....	7
1.4.5. Metodología.....	7
1.5. Funciones.....	8
1.6. Cartografía.....	9
1.6.1. Mapas.....	9
1.6.2. Georreferenciación.....	10
1.6.2.1. Escala.....	10
1.6.2.2. Sistemas de coordenadas.....	11
1.6.2.3. Proyecciones cartográficas.....	12
1.6.2.4. Datums.....	16
1.7. Aplicaciones.....	17
1.8. Captura o entrada de información.....	18
1.9. Producto o salida de información.....	19
1.10. Modelo Digital del Terreno.....	19
1.10.1. Mapa topográfico.....	20
1.10.2. Restitución fotogramétrica.....	20
1.11. Sistemas de Información Geográfica con aplicación en hidrología.....	20
1.11.1. MapInfo.....	21
1.11.2. ILWIS.....	21
1.11.3. PCRaster.....	21
1.11.4. IDRISI.....	22
1.11.5. ArcView.....	22
2. CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA.....	25
2.1. Introducción.....	25
2.1.1. El ciclo hidrológico.....	25
2.2. La cuenca hidrológica.....	25
2.2.1. Clasificación de las cuencas.....	26
2.2.2. Clasificación de corrientes.....	27
2.3. Características fisiográficas de las cuencas.....	28
2.3.1. El partaguas.....	28
2.3.2. Área de la cuenca.....	28
2.3.3. Orden de la red de drenaje.....	28
2.3.4. Longitud del cauce principal.....	29

2.3.5. Pendiente del cauce principal.....	29
2.3.6. Leyes de Horton.....	30
2.3.7. Densidad de drenaje.....	31
2.3.8. Frecuencia de corrientes.....	31
2.3.9. Relación entre área y distancia.....	32
2.3.10. Función ancho.....	32
2.3.11. Curva hipsométrica.....	32
2.4. Precipitación.....	33
2.4.1. Tipos de precipitación.....	34
2.4.2. Medición de la precipitación.....	34
2.5. Escurrimiento.....	35
2.5.1. Tipos de escurrimiento.....	36
2.5.2. Medición del escurrimiento.....	36
2.6. Infiltración.....	36
2.6.1. Factores que afectan la capacidad de infiltración.....	37
2.6.2. Medición de la infiltración.....	37
2.7. El hidrograma.....	37
2.7.1. Partes de un hidrograma.....	38
2.8. Modelos lluvia-escurrimiento.....	39
2.8.1. Métodos empíricos.....	40
2.8.1.1. Método de envolventes.....	40
2.8.1.2. Fórmula racional.....	40
2.8.2. Métodos del hidrograma unitario.....	41
2.8.2.1. Hidrograma unitario tradicional.....	41
2.8.2.2. Hidrograma unitario instantáneo.....	42
2.8.2.3. Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.....	43
2.8.2.4. Método de la curva S.....	44
2.8.2.5. Hidrogramas unitarios sintéticos.....	45
3. APLICACIÓN A UN SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA.....	48
3.1. Sistema de Alerta Hidrometeorológica.....	48
3.1.1. Componentes de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica.....	49
3.2. Marco de referencia.....	51
3.2.1. Localización.....	51
3.2.2. Población y sus características socioeconómicas.....	52
3.2.3. Orografía.....	55
3.2.4. Geología.....	55
3.2.5. Distribución de lluvias.....	56
3.2.6. Fenómenos meteorológicos extremos.....	57
3.2.7. Uso de suelo y vegetación.....	58
3.2.8. Clima.....	59
3.2.9. Temperatura.....	59
3.2.10. Hidrografía.....	59
3.3. Aplicación de metodología utilizando ArcView GIS versión 3.2.....	61
3.3.1. Modelo de Elevación Digital.....	62
3.3.2. Llenado de depresiones del terreno.....	65
3.3.3. Dirección de flujo.....	66
3.3.4. Acumulación de flujo.....	67
3.3.5. Cuenca.....	68
3.3.6. Red de drenaje.....	70
3.3.7. Subcuencas.....	72
3.3.8. Pendientes.....	74

3.3.9. Otras características.....	74
3.4. Integración de la metodología y Sistema de Alerta Hidrometeorológica.....	75
3.4.1. Características fisiográficas de la cuenca.....	77
3.4.2. Ubicación de estaciones.....	81
3.4.2.1. Estaciones hidrométricas.....	81
3.4.2.2. Estaciones pluviométricas.....	81
3.4.3. Líneas de vista.....	82
3.4.4. Determinación de polígonos de Thiessen.....	85
3.4.5. Inferencia del hidrograma de escurrimiento directo en un punto de interés.....	86
3.4.6. Umbrales.....	87
3.4.6.1. Umbrales de precipitación.....	87
3.4.6.2. Umbrales de gasto.....	88
4. CONCLUSIONES.....	89
5. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	91
ANEXOS.....	94
Anexo A. Manejo de ArcView GIS versión 3.2. con aplicación en hidrología.....	95
Anexo B. Tablas de resultados.....	101

INTRODUCCIÓN

En la década de los ochenta y principalmente durante los noventa, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Modelos Digitales de Terreno (MDT), se han aplicado en los ámbitos de impacto ambiental, planeación regional y de zonas urbanas, cambios en la vegetación y de uso de suelo, exploración de recursos no renovables y en estudios de riesgos geológicos. Estas herramientas contribuyen a la sistematización de los procesos de análisis espacial, facilitando las tareas de planeación regional y de soporte en la toma de decisiones. Los estudios enfocados a la evaluación y administración de recursos hidráulicos son importantes, ya que estos inciden en la viabilidad de proyectos de desarrollo regional.

La República Mexicana es afectada por diferentes fenómenos hidrometeorológicos, tales como ciclones tropicales, lluvias convectivas y frentes fríos, que generan lluvias intensas capaces de provocar inundaciones, corrientes de lodo y deslizamiento de laderas, por lo que cada uno de estos efectos frecuentemente se relaciona con desastres.

Los efectos de estos fenómenos hidrometeorológicos pueden ser muy diversos, desde fuertes vientos, marea de tormenta y oleaje asociado a los ciclones tropicales, como flujos de agua con gran velocidad, capaces de arrastrar rocas, arena, escombros y desbordamiento de ríos asociados a lluvias intensas. Estos acontecimientos pueden llegar a provocar grandes destrucciones de la infraestructura con que cuenta la población e incluso llegar a la pérdida de vidas humanas.

Para contribuir en cierta forma a la disminución de los daños que se pueden originar, se pueden realizar con anticipación diversas acciones como la de avisar del peligro a que estarían expuestos los pobladores, y esto se logra mediante un Sistema de Alerta Hidrometeorológica (SAH).

Poner en marcha un Sistema de Alerta Hidrometeorológica requiere de una base teórica importante, así como de personal capacitado e instituciones para el desarrollo y manejo de dicho sistema, así como también del manejo de diferentes tipos de información, dentro de la cual destaca el correspondiente al análisis hidrológico que se tiene que realizar en la cuenca o subcuencas que afectan directamente con su escurrimiento a la ciudad o ciudades que se requieran proteger de dichos efectos que este pudiera provocar, además de tener un buen conocimiento de la topografía de la zona en estudio.

Una de las instituciones que cuentan con personal calificado para el desarrollo de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica es el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), que es un organismo técnico desconcentrado de la Secretaría de Gobernación (SEGOB), y en cuya organización cuenta con la Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos que se encarga principalmente de brindar apoyo técnico al Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) para alertar a la población de posibles fenómenos hidrometeorológicos, así como también de investigar sus posibles causas. Dentro de sus proyectos de investigación, se han preocupado en la necesidad de automatizar los procedimientos necesarios para realizar las diferentes actividades a realizar y principalmente las relacionadas a los análisis hidrológicos.

Dentro de las actividades relacionadas con la hidrología, podemos destacar la determinación de las características fisiográficas de una cuenca y, debido a la cantidad de información que es necesario procesar, se hace indispensable el uso de herramientas tales como los Sistemas de Información Geográfica, los cuales permiten obtener dichas características en áreas grandes que, utilizando métodos tradicionales, tomaría mucho tiempo obtener los resultados esperados.

De esta manera se pretende obtener las características fisiográficas de las cuencas a través de métodos más eficientes y automáticos, como lo es un SIG. Los resultados obtenidos se utilizarán en la instalación de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica, en alguna ciudad del país.

Los objetivos fundamentales que se pretenden con este trabajo son:

1. Conocer el estado del arte de los Sistemas de Información Geográfica, especialmente los dedicados al área de hidrología superficial.
2. Analizar las variables de hidrología que puedan ser estimadas mediante un SIG, así como el proceso de automatización necesario para su implementación expedita.
3. Aplicación a un Sistema de Alerta Hidrometeorológica, mediante la obtención de las características fisiográficas de las subcuencas; así como de los datos necesarios para la definición de los modelos lluvia-escurrimiento para ser aplicados en dichas subcuencas.
4. Determinación de la ubicación de las estaciones telemétricas que serán empleadas en el SAH, por medio de un análisis de líneas de vista y de criterios hidrológicos.

Este trabajo se divide en cinco capítulos. De éstos, tres capítulos son fundamentales porque contienen la información de los conceptos básicos de los temas a tratar, y son imprescindibles para lograr nuestros objetivos, así como también albergan la metodología utilizada para determinar las características fisiográficas de una cuenca.

El primer capítulo comprende los conceptos básicos relacionados con los Sistemas de Información Geográfica, sus principios elementales de funcionamiento y áreas de aplicación, así como también una evaluación de los Sistemas de Información Geográfica con aplicación en hidrología, y sus correspondientes fuentes de información, como lo son los Modelos Digitales de Terreno que son utilizados para diferentes análisis.

En el segundo capítulo se tratan los conceptos básicos de hidrología. Estos conceptos nos refieren a la caracterización fisiográfica de una cuenca, así como también a una descripción detallada de los modelos lluvia-escurrimiento necesarios para determinar el escurrimiento de una cuenca a partir de la medición de la precipitación en la misma y sus características fisiográficas.

En el tercer capítulo se trata el tema fundamental, la Aplicación a un Sistema de Alerta Hidrometeorológica, y hace una integración con los dos capítulos anteriores. Se desarrolla una metodología a partir del análisis de un modelo de Elevación digital (MED) y mediante el uso de un SIG y tomando en cuenta los conceptos fundamentales de la hidrología se determinan las características fisiográficas de la cuenca en estudio. Los resultados obtenidos e integrados con la ubicación de las estaciones hidrometeorológicas, serán de vital importancia para la puesta en marcha de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica para una ciudad o ciudades que sean afectadas regularmente por estos fenómenos.

En el capítulo cuatro se ponen de manifiesto las conclusiones a las que se ha llegado, después de hacer la aplicación a una cuenca en particular, analizar y comparar los resultados de sus características fisiográficas. Además de hacer una interpretación final de la utilidad de las líneas de vista y polígonos de Thiessen obtenidas con el Sistema de Información Geográfica utilizado.

Por último, en el capítulo cinco, se hace un listado de las referencias y bibliografía utilizadas, así como también paginas de internet visitadas para llevar a cabo el desarrollo del trabajo de tesis.

1. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

1.1. Definición

Actualmente dar una definición de un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés), es un tanto difícil, debido a la diversidad de aplicaciones en que se puede utilizar esta poderosa tecnología, por lo cual, a continuación se presentan algunas:

"Un sistema compuesto por elementos informáticos (hardware y software) y métodos diseñados para permitir la adquisición, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión". (NCGIA, 2000)

"Un modelo informatizado del mundo real, descrito en un sistema de referencia ligado a la Tierra, establecido para satisfacer unas necesidades de información específicas respondiendo a un conjunto de preguntas concreto". (Rodríguez Pascual, 1993)

"Es un sistema de información que se diseña, para trabajar con datos referenciados por coordenadas espaciales o geográficas. En otras palabras, un SIG es un sistema de base de datos con capacidades específicas para referenciar espacialmente datos, así como también un conjunto de operaciones para trabajar [análisis] con los datos". (Star y Estes, 1990)

"Sistemas automatizados para capturar, almacenar, recuperar, analizar, y exhibir datos espaciales". (Clarke, 1990)

"Un sistema de información geográfica es una herramienta de software que permite capturar, almacenar, organizar, presentar y realizar análisis sobre información geográficamente referenciada, es decir que posee coordenadas terrestres. La tecnología GIS integra operaciones de bases de datos comunes tales como búsquedas o análisis estadísticos apoyados por la ayuda y beneficios ofrecidos por el desplegado gráfico de dicha información (mapas)". (ESRI, 2000)

"Es un conjunto de mapas de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas incluidos en el sistema de información. De este modo, resulta posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas para tener un mejor conocimiento de esa zona". (Bosque Sendra, Joaquín, 1991).

Como se desprende de los análisis anteriores, un SIG se pueden definir de muy diversas formas. Algunas definiciones hacen énfasis en las bases de datos, otras en sus funciones y otras más al apoyo de toma de decisiones, pero todas tienen un punto central que es el hecho de trabajar con datos georreferenciados. Para el desarrollo de este trabajo tomaremos como válida la definición propuesta por ESRI, 2000, porque la considero la más adecuada y se adapta al perfil del tema seleccionado para este trabajo.

1.2. Antecedentes

Los Sistemas de Información Geográfica, como herramientas de manejo de análisis computacional, surgen de la aportación de diversas ciencias y técnicas tales como la geografía, la percepción remota, el análisis espacial, la cartografía, la informática y el desarrollo de bases de datos.

Durante los años 60's y 70's surgieron nuevas tendencias en la forma de utilizar los mapas para la evaluación de recursos y la planificación del uso de la tierra. En esa época se vio que los diferentes aspectos de la superficie de la tierra no eran independientes entre sí, y se empezó a reconocer la necesidad de evaluarlos de

una forma integrada y multidisciplinaria. Una manera de hacerlo era simplemente superponer copias transparentes de mapas de recursos, sobre mesas iluminadas y buscar los puntos de coincidencia en los distintos mapas de los diferentes datos descriptivos.

Posteriormente, esta técnica se adaptó a la emergente tecnología de la informática con el procedimiento de trazar mapas sencillos sobre una cuadrícula de papel ordinario, superponiendo los valores de esa cuadrícula y utilizando la sobreimpresión de los caracteres de la impresora por renglones para producir tonalidades de grises adecuadas a la representación de valores estadísticos, en lo que se conocía como sistema de cuadrícula (trama). Sin embargo, estos primeros métodos no estaban lo suficientemente perfeccionados como para ser aceptados por los cartógrafos.

A finales de la década de los 70's la tecnología de computadoras progresó rápidamente en cartografía, y se perfeccionaron cientos de sistemas informáticos para distintas aplicaciones cartográficas. Al mismo tiempo, se estaba avanzando en una serie de sectores conexos, entre ellos la edafología, la topografía, la fotogrametría y la telepercepción. En un principio, este rápido ritmo de desarrollo provocó una gran duplicación de esfuerzos en las distintas disciplinas conexas, pero a medida que se multiplicaban los sistemas y se adquiría experiencia, surgió la posibilidad de articular los distintos tipos de elaboración automatizada de datos espaciales, dando lugar a los Sistemas de Información Geográfica.

Canadá es el país considerado como el precursor de los Sistemas de Información Geográfica, debido a la necesidad de administrar sus extensos recursos naturales, lo cual ocurrió en la década de los años 60's, cuando Tomlison, Calkins y Marble desarrollaron el sistema de Canadá (Canadian Geographical Information System, CGIS).

En los años 70's y principios de los 80's, el SIG se había convertido en un sistema plenamente operativo; a medida que la tecnología de las computadoras se perfeccionaba, se hacía menos costosa y gozaba de una mayor aceptación. En las décadas de los 80's y los 90's se empezaron a instalar rápidamente estos sistemas en los organismos públicos, los laboratorios de investigación, las instituciones académicas, la industria privada y las instalaciones militares y públicas de diferentes países como Estados Unidos, Gran Bretaña, Alemania, Francia, Holanda, Japón, Rusia, y otros países.

En México el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica tuvo un primer inicio en los años 70's pero los problemas económicos que ha enfrentado nuestro país frenaron este desarrollo. En la década de los 90's se volvió a retomar este tema, desarrollándose principalmente en instituciones públicas.

1.3. Sistemas existentes

En el mercado del software se pueden encontrar en la actualidad una gran cantidad de Sistemas de Información Geográfica con diferentes características, de acuerdo a las necesidades y objetivos específicos que los usuarios requieran, y de acuerdo a ello podemos encontrar Sistemas de Información Geográfica de tipo comercial, educativo, y de investigación principalmente (tabla 1.1).

SIG	INSTITUCIÓN O COMPAÑÍA	PAÍS	AÑO	USO
PHOCUS	Carl Zeiss	Alemania		
SICAD	SIEMENS	Alemania	1979	Privado
GENAMAP	GENASYS	Australia	1986	Privado
TERRASOFT	Digital Resource System	Canadá		
CARTO PC/ MINIMAGE	Ecole des Mines DE Paris	Francia		Público
GGP	Hoskyns	Gran Bretaña	1985	Privado
GIMMS	GIMMS	Gran Bretaña	1981	Público
SMALL WORD	SMALL WORLD	Gran Bretaña		
SPANS	TYDAC	Gran Bretaña	1984	Privado
ILWIS	ITC	Holanda	1988	Privado
PCRaster	Universidad de Utrech	Holanda	1991	Público
SALADIN	IRIS	Holanda		
OVERMAP	Galileo SISCAM	Italia		
SIGSA	SIGSA	México	1980	Privado
SICORI	SICORI PEMEX	México		
SIIGE	INEGI	México	2001	Público
SIGA	CNA	México	1994	Público
AMAP	Spatial Information System	USA		
ARCINFO	ESRI	USA	1981	Privado
ARC VIEW	ESRI	USA	1991	Privado
ARGIS 4GE	UNISYS	USA	1989	Privado
ATLAS GIS	STRATEGIC MAPPING	USA		
ERDAS	ERDAS	USA		
GFIS/GEO manager	IBM	USA		
GRASS	Cuerpo de Ingenieros del Ejercito Americano	USA	1982	Público
GWN-DMT y GWN-GIS	Scientific information Group	USA	1986	Privado
IDRISI	Clark University	USA	1987	Privado
INFORMAP	Synercon Technology	USA	1985	Privado
LANDTRACK	Criterion	USA		
MAPBOX	DECISION IMAGES	USA		
MAPINFO	MAPINFO Co.	USA	1986	Privado
MOSS	Oficina de Gestion de Tierras	USA	1970	Público
ODYSEY	Laboratorio de Análisis Espacial de La Universidad de Harvard	USA		
OSU-MAP	Ohio State University	USA	1986	Público
PMAP	Spatial Information Sistem	USA	1989	Privado
PROSCAN	XEROX	USA		
SAGIS	Servicio de Parques	USA		
STRINGS y GEOBLOCKS	GEOBASED SYSTEMS	USA		
SYSTEM 9	Computervision/PRIME	USA		
FIGRIS Y MICROSTATION	INTERGRAPH	USA		
VISION SHL	VISION Solution	USA		

Tabla 1.1 Sistemas de Información Geográfica existentes

1.4. Componentes

Un SIG es un sistema de información que integra cinco componentes principalmente: hardware, software, datos geográficos, usuarios y metodología (figura 1.1).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 1.1 Componentes de un Sistema de Información Geográfica
(fuente: <http://mailweb.udlap.mx/>)

1.4.1. Hardware

El hardware es la computadora en la que opera un SIG. En cuanto a los elementos de hardware requeridos estos se pueden ejecutar desde cualquier plataforma existente (PC, Mac, Estaciones de trabajo) y sistemas operativos (Windows, Linux, Unix, Mac DOS).

Por otro lado debido al amplio poder gráfico, y gran capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos de un SIG, es necesario contar con dispositivos de entrada y salida, como son los estándares (teclado, monitor, mouse, impresora, etc.) y dispositivos que permitan la introducción y salida de datos en forma especial (tableta digitalizadora, escáner, plotter, etc.).

1.4.2. Software

El software proporciona las funciones y herramientas requeridas para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica. En términos generales, los componentes principales del software de un SIG son:

- Las herramientas necesarias para la captura y manipulación de la información geográfica
- Un administrador de bases de datos que almacene la información
- Herramientas que permitan la búsqueda, análisis y visualización de la información
- Una interfaz gráfica de usuario que permita el acceso a las herramientas antes mencionadas

1.4.3. Datos

Los datos son el componente más importante de un sistema de información geográfica. La información geográfica así como los datos estadísticos asociados a la misma son integrados por el sistema en una base de datos geográfica para así poder ser manipulada. Los datos geográficos son el componente que conlleva más recursos tanto financieros, de tiempo y humanos para su obtención, almacenamiento y manipulación, porque se requieren grandes volúmenes para resolver los problemas geográficos.

1.4.3.1 Tipos de datos

Con la implementación de los Sistemas de Información Geográfica surgió la necesidad de almacenar datos e información, de tal forma que sea de fácil acceso para cualquier usuario, lo cual llevó al uso de las bases de datos que contienen datos gráficos y alfanuméricos, que, integrados, forman una fuente de información completa con cierto nivel de exactitud y resolución.

Los datos gráficos son representaciones digitales de las entidades de un plano. Suelen incluir coordenadas, reglas y símbolos que definen los elementos cartográficos en un mapa. El SIG utiliza estos datos para generar un mapa o representarlo gráficamente en la pantalla de la computadora.

Los datos alfanuméricos describen las características de las entidades gráficas asociada a sus atributos y a los datos geográficamente referenciados.

1.4.3.2 Tipos de tecnologías

De acuerdo a la forma en que trabaja y almacena los datos (información) un SIG, existen tecnologías como son: la tecnología raster y vectorial. En la figura 1.2 se ilustran estos conceptos, así como su composición final.

La tecnología raster consiste en un conjunto de mapas individuales, todos referidos a la misma zona del espacio y todos ellos representados por medio de una cuadrícula o celda homogénea de forma rectangular o cuadrada. A cada celda se le asigna un valor el cual esta referenciado en principio a un sistema columna-fila y que representa las entidades cartográficas y sus atributos así mismo determinan la resolución.

La tecnología vectorial permite almacenar la información gráfica por medios analíticos, como formulas y pares de coordenadas que configuran puntos, líneas y áreas dando lugar a procesos de análisis más laboriosos, pero más precisos y con mayor nitidez.

Cada tecnología presenta sus propias desventajas e inconvenientes como lo muestra la tabla 1.2

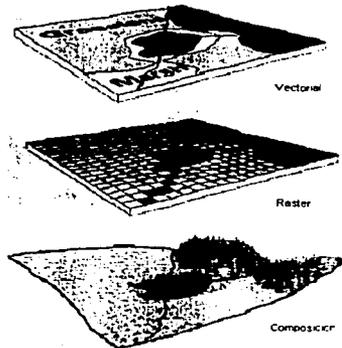


Figura 1.2 Tipos de tecnologías
(fuente: <http://www.library.ubc.ca/>)

La tecnología raster se caracteriza por ser muy simple y los cálculos sobre ella bastante sencillos; sin embargo la vectorial posee complejas estructuras que requieren sofisticados algoritmos para el análisis. No obstante, los datos vectoriales pueden ser almacenados compactamente y visualizados con gran precisión, a diferencia de lo que ocurre en el formato raster.

1.4.4. Usuarios

Los usuarios son los recursos humanos formados por la gente responsable del diseño, implementación y uso del SIG, que cuentan con diferentes niveles de conocimiento dependiendo del papel que jueguen dentro del proceso.

1.4.5. Metodología.

Se refiere principalmente a las diversas formas de comunicación hombre-computadora en la aplicación, dentro de las que podemos mencionar:

- Uso de menú de opciones
- Uso de formularios
- Empleo de ordenes y comandos
- Lotes de ordenes
- Operaciones sobre la pantalla

SIG	VENTAJAS	DESVENTAJAS
RASTER	El tratamiento de algoritmos es mucho más sencillo y simple de escribir que en los sistemas por vectores.	Las necesidades de almacenamiento son mucho mayores que las de los sistemas vectoriales.
	<p>Los sistemas de cuadrícula son más adecuados para las entradas en forma de retícula como en el caso de las imágenes de telepercepción.</p> <p>Los sistemas reticulares son más adecuados con los dispositivos de salida de forma reticular como las impresoras y muchas terminales gráficas.</p> <p>El mapa original puede representarse en su resolución original.</p>	<p>La representación de un recurso depende del tamaño de la celda y resulta especialmente difícil representar adecuadamente los rasgos lineales, como las líneas topográficas, carreteras, férreas, etc.</p> <p>La mayor parte de los datos de entrada están digitalizados en forma de vector y deben ser trasladados a formato reticular para poder almacenarlos en un sistema ráster.</p>
VECTORIAL	<p>Se necesita menos capacidad de almacenamiento que en los sistemas reticulares.</p> <p>El mapa original puede representarse en su resolución original.</p>	<p>Los algoritmos para las funciones realizadas son más complejos y menos confiables que los sistemas reticulares.</p> <p>Los datos espaciales de variación continua (como imágenes de satélite) no pueden ser representados en forma de vector, y hay que convertirlos al sistema reticular para procesar la información de ese tipo.</p>

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de los tipos de tecnologías

1.5. Funciones

Como se especificó anteriormente el término Sistema de Información Geográfica se aplica actualmente a los sistemas computarizados de almacenamiento, elaboración y recuperación de datos con equipo y programas específicamente designados para manejar los datos espaciales de referencia geográfica y los correspondientes datos cualitativos o atributos. En general la información espacial se representa en forma de "capas geográficas" ("layers" en inglés) que pueden ser relacionadas entre ellas mediante temas. En la figura 1.3 se pueden observar las capas que integran un mapa en un SIG. Este concepto permite el agrupamiento de la información geográfica, como capas que almacenan y que describen la topografía, la disponibilidad de agua, los suelos, tipo de cubierta vegetal, el clima, la geología, la población, la propiedad de la tierra, los límites administrativos y la infraestructura (carreteras, vías férreas, sistemas de electricidad o de comunicaciones).

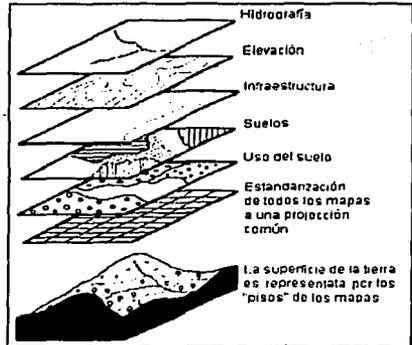


Figura 1.3 Esquema del agrupamiento de características geográficas en capas (layers)

(fuente: <http://www.isc.uniandes.edu.co/>)

Las funciones que realiza un SIG son las siguientes:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.- *Introducción, transformación y verificación de los datos.* Se refiere a los aspectos de captura y transformación, en formato digital, de los datos básicos obtenidos, desde diferentes fuentes: mapas, imágenes de satélite, fotografías y datos de campo, etc.

2.- *Almacenamiento y manejo de la base de datos.* Se relaciona con la estructura y organización interna de la información de los elementos por analizar, tomando en cuenta sus principales propiedades espaciales.

3.- *Procesamiento y análisis de la información.* Un SIG proporciona una serie de funciones de análisis de los aspectos espaciales y la combinación de ambos. Entre los procesos que se pueden realizar con tales funciones están los siguientes:

- Integración de mapas trazados a escalas diferentes, con proyecciones y leyendas distintas
- Capacidad de combinar distintas capas en una sola operación, que se conoce con el nombre de "superposición", en donde se incluyan datos descriptivos en cada uno de los mapas
- Cálculo de longitudes y áreas, aplicación de operadores booleanos, clasificaciones, sobreposiciones, análisis matemático y estadístico, interpolaciones, etc.

4.- *Salida y representación de los resultados.* Se refiere a las diversas formas en que pueden ser obtenidos los resultados del análisis (mapas, tablas, gráficas e imágenes) despliegues en pantalla, impresiones en papel y película, o en archivos en formato digital. Para visualizar mejor las funciones que realiza un SIG se puede ver el esquema mostrado en la figura 1.12.

1.6. Cartografía

La cartografía es la disciplina que estudia la forma de la tierra y sus proyecciones mediante las cuales el globo terráqueo puede ser representado en una forma plana por medio de los elementos llamados mapas.

1.6.1. Mapas

Los mapas son modelos de la realidad que almacenan de un modo económico grandes cantidades de datos, y lo hacen de tal modo que permiten y facilitan ciertos tipos de análisis de la estructura espacial de la información en ellos contenida. Para su buen uso es necesario conocer sus características técnicas como son: escala, resolución, precisión, y proyección. En cierto sentido los Sistemas de Información Geográfica heredaron estas funciones mejoradas y ampliadas.

Existen dos tipos de mapas básicos: los topográficos y los temáticos. En los primeros la información contenida es amplia, extensa y variada, representándose en ellos varios hechos simultáneamente, como características físicas del medio, curvas de nivel, ubicación de infraestructura, etc. Los segundos, por su parte, contienen una menor cantidad de información, generalmente referida a una sola variable, o tema, como el comportamiento del territorio y la información que surge de los actores que habitan el espacio.

Para la construcción de los mapas la cartografía se basa en los siguientes conceptos:

Punto (Nodo). Es un lugar en el espacio y representa una localización discreta que no tiene área, usualmente descrita por un símbolo especial o una etiqueta, como pueden ser cabeceras municipales, ubicación de casetas telefónicas, etc.

Línea (Arco). Es la distancia más corta entre dos puntos y representa objetos geográficos cuya forma es demasiado estrecha como para ser representada mediante un área, como pueden ser calles, corrientes de agua, etc.

Área (polígono). Es una región cerrada que surge por la comunión de puntos, entre un mínimo de tres líneas intersectadas con cada punto con dos de ellas.

Superficie. Describe elementos geográficos que tienen un valor por cada punto en la tierra, como puede ser la superficie de la tierra en donde cada punto tiene una cierta elevación.

1.6.2. Georreferenciación

La georreferenciación es un proceso para ubicar los elementos de un plano, carta o mapa en su posición correcta dentro de un marco gráfico, referido a un sistema de coordenadas manejado por un SIG.

Los conocimientos relativos a la representación de la información de la Tierra en una superficie plana o mapa, son fundamentales para entender y evitar la propagación innecesaria de errores en el manejo de información. Son pocos los usuarios de Sistemas de Información Geográfica que manejan cabalmente términos como escala, transformación de coordenadas, proyección, datum, y esto lleva a cometer errores importantes durante el ingreso de la información y, sobre todo, cuando se quiere juntar datos e información provenientes de fuentes distintas.

El geode, figura como la Tierra, es de revolución compleja, imposible de expresar mediante fórmulas matemáticas. Las figuras de revolución que más se acercan a esta forma son la esfera (Sistema de coordenadas y proyecciones cartográficas), para representar pequeñas zonas, y el elipsoide (Datum), para grandes zonas (figura que, incluso actualmente, se utiliza para representar toda la Tierra).

Cualquier objeto geográfico (una ciudad, el curso de un río, el pico de una montaña, etc.), solamente podrá ser localizado si podemos describirlo en relación a otro(s) objeto(s), cuya posición sea previamente conocida, o determinando su localización en una red coherente de coordenadas. Para definir la localización de un punto sobre la esfera o sobre el elipsoide se utiliza un sistema lógico de coordenadas esféricas cuyo origen se localiza en el centro de gravedad de este cuerpo. La ubicación de dicho punto se define mediante dos ángulos (longitud, latitud) y una distancia (m.s.n.m.).

1.6.2.1. Escala

Es la relación entre las dimensiones de los elementos representados en un mapa y el valor correspondiente, medido sobre la superficie de la Tierra.

$$\text{Escala} = \frac{1}{E} = \text{Distancia sobre el mapa entre la distancia sobre el terreno}$$

E = Módulo o denominador de la escala

Tipos de escala

Escala numérica. Da la relación entre la longitud de una línea en el mapa y la correspondiente en el terreno en forma de quebrado. La unidad representa el numerador. El denominador es la relación entre las dos longitudes.

$$E = \frac{1}{10,000} = 1:10,000$$

El módulo indica el valor por el que hay que multiplicarse una distancia en el mapa, para que sea igual a la del terreno y viceversa.

Escala gráfica. Representa las distancias del terreno sobre una línea recta graduada (figura 1.4).

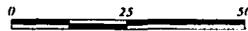


Figura 1.4 Escala gráfica

1.6.2.2. Sistemas de coordenadas

Sistema de coordenadas geográfico o terrestre

Es el sistema más antiguo de coordenadas y está compuesto de una red de líneas imaginarias (figura 1.5) trazadas sobre la superficie de la tierra denominadas: paralelos y meridianos. Las líneas imaginarias básicas son:

El ecuador. Divide la tierra en dos hemisferios iguales: hemisferio norte y hemisferio sur. Es considerado como el paralelo de origen (0°)

Paralelos. Son círculos menores y paralelos cuyos planos son perpendiculares al eje de los polos, que parten del ecuador hacia el norte ($+90^\circ$) y hacia el sur (-90°) disminuyendo su tamaño hasta terminar en los polos. Entre el ecuador y cada polo hay 90 grados de latitud. Cada grado se divide en 60 minutos y cada minuto en 60 segundos. La longitud de un grado de latitud es 110.51 Km cerca del ecuador y de 111.70 Km en los polos.

Meridianos. Son 180 círculos máximos de la esfera, cuyos planos contienen el eje de rotación o eje de los polos y por lo tanto pasan por los polos formando ángulos iguales entre sí. Dividen el ecuador y los paralelos en 360 grados de longitud. La longitud de un grado varía desde 111.29 Km en el ecuador hasta 0 Km en los polos. La longitud varía con el coseno de la latitud (principio fundamental de las proyecciones).

El meridiano de origen (también conocido como inicial o fundamental) es aquel que pasa por el antiguo observatorio británico de Greenwich, escogido convencionalmente como el origen (0°) de las longitudes sobre la superficie terrestre y como base para el orden de los husos horarios. Al este de Greenwich los meridianos son medidos por valores crecientes hasta $+180^\circ$. Al oeste, sus medidas son decrecientes hasta el límite mínimo de -180° .

Un punto de la superficie terrestre se representa por un valor de latitud y longitud. La longitud de un lugar es la distancia angular entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y el meridiano inicial. La latitud es la distancia angular entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y la línea del ecuador

Por ser un sistema que considera desvíos angulares a partir del centro de la Tierra, el sistema de coordenadas geográficas no es un sistema conveniente para aplicaciones en que se procuran distancias o áreas. Para estos casos, se utilizan otros sistemas de coordenadas o proyecciones cartográficas que serán descritas más adelante.

Coordenadas planas o rectangulares

El sistema de coordenadas planas, también conocido por sistema de coordenadas cartesianas (figura 1.6), se basa en la selección de dos ejes perpendiculares, usualmente los ejes horizontales (abscisas) y vertical (ordenadas), cuya intersección es denominada origen y establecida como base para la localización de cualquier punto del plano.

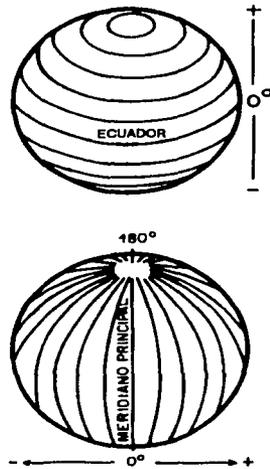


Figura 1.5 Representación de las líneas imaginarias

En este sistema de coordenadas, un punto es representado por dos números: uno correspondiente a la proyección sobre el eje 'x' (horizontal), asociado a la longitud y otro correspondiente a la proyección sobre el eje 'y' (vertical), asociado a la latitud.

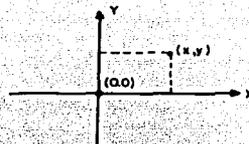


Figura.1.6. Sistema de coordenadas rectangulares

Coordenadas polares

Este sistema se utiliza para la localización de un punto a partir de otro conocido mediante el empleo de magnitudes lineales (distancia) y angulares (azimut, rumbo).

1.6.2.3. Proyecciones cartográficas

Una proyección cartográfica intenta representar la correspondencia biunívoca entre los puntos que representan la superficie curva de la tierra y los puntos sobre un plano de proyección o un sistema plano de meridianos y paralelos sobre el cual puede dibujarse un mapa.

Para trasladar una superficie curva a un plano, hay que establecer una correspondencia adecuada entre los puntos de la curva y el plano por medio de los denominados sistemas de proyección.

Las deformaciones se manifiestan sobre las distancias, las áreas o los ángulos y su eliminación simultánea en estos tres campos es incompatible.

Clasificación

La clasificación de una proyección cartográfica se hace principalmente a partir de tres métodos: Por su clase, por su forma y por su procedimiento de construcción. En la tabla 1.3 se presenta un resumen de las mismas.

Por grado de deformación:

1. *Conformes*. En toda su extensión tienen la misma forma en la esfera y en el plano, es decir que un rectángulo en la esfera está representado por un rectángulo en el plano. Las deformaciones angulares son nulas. Normalmente muestran una distorsión de las superficies. Estos mapas conformes se utilizan principalmente cuando es necesaria la conservación de ángulos y direcciones, como en los mapas de navegación.

2. *Equivalentes*. Son aquellas que conservan las relaciones de superficie, es decir conservan la misma superficie en el plano y en la esfera a igualdad de escala. Cambia la forma principalmente en los extremos. Muestran deformaciones angulares. Son utilizados especialmente para hacer resaltar la distribución de productos agrícolas o industriales en estudios económicos.

3. *Equidistantes*. Son aquellas cuya separación entre paralelos es constante en todo el campo de la proyección. La escala es verdadera entre un punto (o dos puntos) y el resto de los puntos en el mapa o a lo largo de cada meridiano.

Por su forma:

1. *Cuadrangulares*. Aquellas proyecciones con contorno rectangular con paralelos y meridianos que se cortan formando ángulos rectos, como las proyecciones cilíndricas.

Clase (Grado de deformación)	Forma	Procedimiento de construcción	
Equidistantes	Semicirculares	Cónicas	Cónica Equiárea (Alberts)
			Cónica simple
			Cónica de Bonne
			Cónica perspectiva central
			Cónica Conforme (Lambert)
Conformes	Cuadrangulares	Cilíndricas	Cilíndrica de Mercator
			Cilíndrica de Gall
			Universal Transversal Mercator (UTM)
			Cilíndrica Transversa de Mercator o Conforme de Gauss
			Cilíndrica Equivalente o Equiárea
Equivalentes	Circulares	Azimutales	Gnomónicas
			Estereográficas
			Ortográficas
			Equidistantes
/	Ovales	Calculadas	Sinusoidal
			Homolográfica de Mollweide
			Homolosa Intermumpida de Goode
	Mixtas	Proyección de Eckert	

Tabla 1.3 Clasificación de las proyecciones cartográficas

- Semicirculares.** Aquellas proyecciones cuyo cáneva tiene una forma semicircular con paralelos en forma de semicircunferencia concéntrica de magnitud decreciente hacia los polos como las proyecciones cónicas.
- Circulares.** Son aquellas proyecciones cuyo cáneva tiene forma circular con paralelos de la misma forma y meridianos concéntricos como las proyecciones azimutales.
- Mixtas.** Proyecciones cuyo cáneva presenta una forma más o menos definida como en la proyección de Eckert.
- Ovales.** Es uno de los grupos más funcionales para las representaciones de los continentes por sus condiciones geométricas de equivalencia y conformidad, como las proyecciones de Mollweide, Sinusoidal, etc.

Por su desarrollo de construcción:

Se proyecta la esfera sobre una superficie desarrollable que puede ser tangente o secante a la esfera.

1. Cilíndricas. La superficie de la esfera se proyecta sobre la superficie desarrollable de un cilindro que envuelve a la esfera y puede ser tangente o secante a ella. Es una proyección "conforme", porque conserva las formas. Se proyecta sobre la superficie del cilindro, la superficie esférica de la Tierra, desde un punto de vista determinado (centro de la Tierra). Cuando desarrollamos el cilindro cortándolo a lo largo de una de sus generatrices, se transforma en un rectángulo, uno de cuyos lados es la longitud del círculo máximo terrestre. En todas las proyecciones de este grupo los paralelos, son representados por líneas rectas horizontales, cuya longitud es la misma que la del ecuador y la separación entre ellos varía con la latitud. El polo aparece como una línea recta igual al ecuador (en la realidad es un punto). Los meridianos también son líneas rectas verticales y están espaciados de igual manera y cuya longitud solo es correcta en el ecuador. Útiles para mapas esquemáticos de latitudes bajas como Colombia, Venezuela, etc.

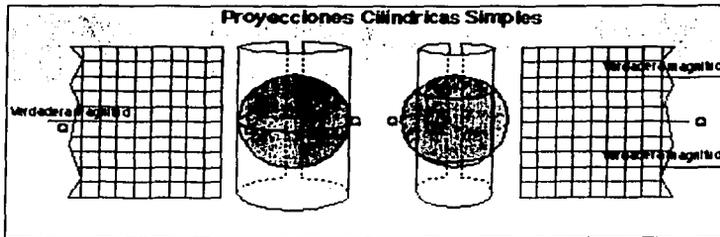


Figura 1.7 Proyecciones cilíndricas

(fuente: <http://nivel.euitto.upm.es/~mab/tematica/htmls/proyecciones.html#concepto>)

2. **Cónicas.** La superficie de la tierra se proyecta sobre la superficie desarrollable de un cono tangente o secante a la esfera. Conservan las áreas pero no los ángulos (proyecciones equivalentes). Se basan en el principio de llevar a la superficie desarrollable de un cono, parte de la superficie de una esfera. Existen también proyecciones cónicas conformes, es decir, que conservan las áreas, como la proyección de Lambert. Los paralelos son circulares o corresponden a arcos de circunferencia concéntricos. Los meridianos son radiales. El eje del cono coincide con el eje de la esfera. El cono puede ser tangente a la esfera a una latitud indeterminada, pero no a los 90° ni a los 0° , porque se convierte en azimutal o en cilíndrica. Se adaptan bien a la representación de regiones situadas en latitudes medias.

3. **Azimutales.** Se obtienen proyectando la superficie terrestre sobre un plano tangente, desde un cierto centro de perspectiva o punto de vista, del cual depende el sistema resultante. Los meridianos que pasan por el centro de la proyección están representados por líneas rectas y su rumbo o azimut es constante y verdadero. De esta propiedad se deriva el nombre de azimutales. Los paralelos están representados por circunferencias concéntricas de magnitud decreciente hacia los polos. Toda la superficie se proyecta sobre un único plano de proyección.

4. **Calculadas.** Son aquellas proyecciones en las cuales se procura corregir los problemas que traen las proyecciones equivalentes y conformes mediante el empleo de cálculos matemáticos trigonométricos y modificaciones a los sistemas originales.

A continuación se hará una breve descripción de las proyecciones cartográficas más utilizadas, en el mundo e incluso México.

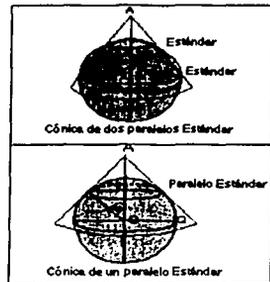


Figura 1.8 Proyecciones cónicas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Proyección Cilíndrica de Mercator

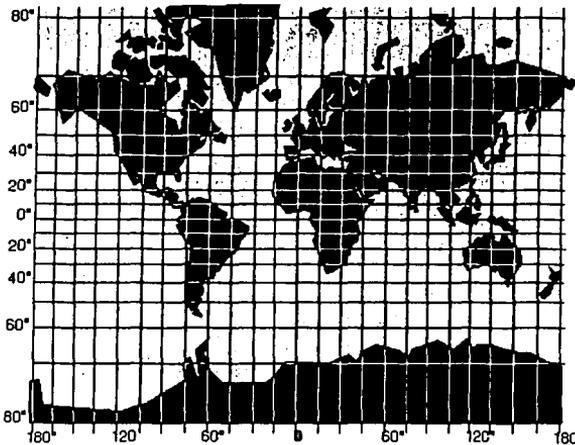


Figura 1.9 Proyección cilíndrica de Mercator
(fuente: <http://nivel.cuitto.upm.es/~mab/tematica/htmls/proyecciones.html>)

Esta proyección es probablemente la más famosa de todas las proyecciones, y toma el nombre de su creador (1569). Es una proyección que carece de distorsiones en la zona del Ecuador. Una de las características de esta proyección es que la representación de una línea con un azimut (dirección) constante se dibuja completamente recta. Esta línea se llama línea de rumbo o loxódromo. De esta forma, pueden ser seguidas muy fácilmente por un barco o un avión, con solo conectar los puntos de salida y destino con una línea recta, lo que permite mantener el curso constante durante todo el viaje.

Esta Proyección se usa extensivamente para representar los mapas mundiales, pero las distorsiones que crea en las regiones polares son bastantes grandes, dando la falsa impresión sobre las extensiones, por lo tanto su uso es restringido.

Es cilíndrica tangente al Ecuador. Los meridianos son líneas paralelas verticales y equidistantes, no se cruzan en los polos como sucede en la realidad. Los paralelos son líneas paralelas horizontales con igual longitud, contrariando la realidad que hace que ellos tengan menor diámetro a medida que se alejan del Ecuador.

Universal Transversal de Mercator (UTM)

La superficie de proyección es un cilindro transverso y la proyección es conforme. El meridiano central de la región de interés, el Ecuador y los meridianos situados a 90° del meridiano central son líneas rectas; el resto de los meridianos y paralelos son curvas complejas; la escala es verdadera a lo largo de dos líneas paralelas al meridiano central (secante), con un factor de escala igual a 1. La escala aumenta con la distancia en relación al meridiano central. A 90° de este meridiano, la escala se torna infinita.

En la proyección UTM la Tierra está comprendida entre latitudes 84°N y 80°S dividida en 60 zonas o husos de 6° de longitud. Cada zona está dividida en 20 bandas (desde la C a la X omitiendo la I y la O) con una separación o altura de 8° de latitud a excepción de la banda X que cuenta con 12° de latitud, las bandas de la C a la M están en el hemisferio Sur y de la N a la X en el hemisferio norte, tal como se muestra en la figura 1.10. Dentro de cada zona o huso, el meridiano central, toma un valor de 500,000 m. El ecuador es asignado a un valor de 0 m para el hemisferio norte y un valor arbitrario de 10,000,000 m para el hemisferio sur.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

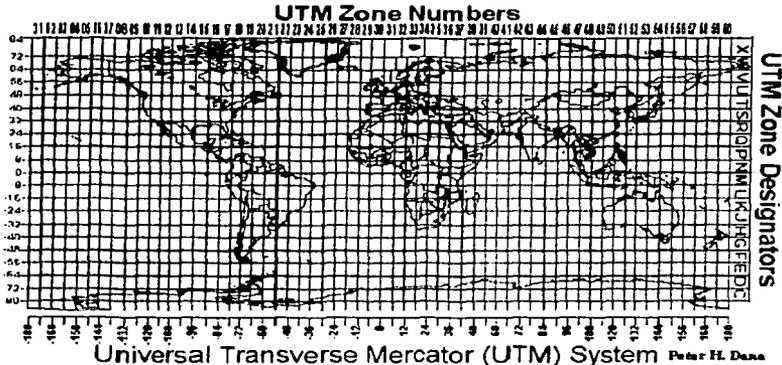


Figura 1.10 Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)
 (fuente: http://www.uco.es/%67Ebb1rofra/documentos/utm/coordenadas_utm.html)

Cónica Conforme de Lambert

Esta es una proyección estándar que se utiliza para representar áreas cuya extensión este-oeste es grande en comparación con la norte-sur. Los paralelos son arcos concéntricos de espaciamiento variable (más juntos en el centro del mapa); los meridianos son rayos equidistantes en el mismo círculo y por lo tanto son perpendiculares tanto en la superficie terrestre como en la proyectada; la escala es verdadera en un paralelo estándar (tangente) o en dos paralelos estándar (secante); el polo cercano al primer paralelo estándar es un punto y el polo en el hemisferio opuesto está en el infinito.



Figura 1.11 Proyección Cónica Conforme de Lambert
 (fuente: http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario_spa/cartogrf/hmt/sistem_coord)

1.6.2.4. Datums

Para caracterizar un datum se utiliza una superficie de referencia y una superficie de nivel y se basa principalmente en elipsoides. Una superficie de referencia (datum horizontal) consiste en cinco valores: la latitud y longitud de un punto inicial, el azimut de una línea que parte de este punto y dos constantes necesarias para definir el elipsoide de referencia. Así, se forma la base para el cálculo de los levantamientos de control horizontal en el cual se considera la curvatura de la Tierra. La superficie de nivel (datum vertical)

se refiere a las altitudes. Para la definición del datum se escoge un punto más o menos central con relación al área de inclusión del datum. Un datum se ajustan a una región en vez de que a la superficie terrestre completa.

Con la puesta en órbita de satélites se pudo definir un elipsoide general para representar toda la Tierra. Este elipsoide se conoce como *World Geodetic System* (WGS) y a partir del inicial definido en 1960, se ha ido mejorando (1966, 1972) hasta su versión WGS84 (definido en 1984). Cada datum tiene asociado un solo elipsoide, mientras que un elipsoide puede ser usado en la definición de muchos datums.

Cabe mencionar que entre los sistemas de coordenadas, proyecciones cartográficas y datums se puede hacer conversión de coordenadas, así como también dentro de cada uno.

1.7. Aplicaciones

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas que presentan una gran funcionalidad para desarrollar una gran cantidad de propósitos, para lo cual se requiere información y datos georreferenciados, o tablas con información ligadas a mapas.

En la actualidad existen tres grandes grupos de campos de aplicación.

1.- Aplicaciones en planeación y ordenamiento territorial.

- Propuesta de aprovechamiento de los recursos naturales
- Desarrollo y planeación urbana
- Políticas públicas, toma de decisiones, planeación integrada
- Protección civil: riesgos, desastres, catástrofes
- Planeación estratégica de redes carreteras, ubicación de puentes y túneles
- Redes de distribución de agua potable y alcantarillado

2.- Aplicación en estudios ambientales.

- Bases de datos nacionales, continentales y mundiales de variables ambientales
- Bases de datos específicas: suelos erosión, vegetación, cuencas hidrológicas
- Integración y análisis de variables en estudios específicos
- Aplicaciones forestales
- Cambios en el uso de suelo
- Estudios de impacto ambiental

3.- Aplicaciones en estudios económicos y sociales.

- Tenencia de la tierra, catastro rural y urbano
- Censos económicos y de población, actividades electorales
- Dotación y prestación de servicios urbanos
- Análisis de mercados
- Mantenimiento y conservación de infraestructura de transporte
- Sistemas de navegación para automóviles

Dentro del primer y segundo grupo podemos encontrar las áreas que trataremos en este trabajo correspondiente a la protección civil y las cuencas hidrológicas, donde se analizará el riesgo por inundación, en una población vulnerable provocada por fenómenos hidrometeorológicos.

1.8. Captura o entrada de información

Existen diversas formas y dispositivos para introducir información a un SIG (figura 1.12). Estos procedimientos son diferentes dependiendo de la tecnología que se esté utilizando (raster o vectorial)

Como se mencionó anteriormente la captura de información es sin duda la tarea que requiere la mayor inversión de tiempo, la que demanda la mayor parte de los recursos económicos, y una de las más importantes cuando se utiliza un SIG. La captura de información implica tres pasos.

1.- Captura de información espacial.

Los procesos para generar cartografía digital se llevan a cabo mediante diferentes procesos, que son procedimientos para establecer la liga de elementos gráficos con la base de datos y la impresión de los mapas.

La digitalización es un proceso fundamental en la transformación de un modelo gráfico a un modelo numérico a través de códigos que permiten caracterizar la ubicación y naturaleza del objeto a partir de identificadores alfanuméricos.

Dentro de los dispositivos de entrada de información están:

Tableta digitalizadora (Digitalización manual). Es una mesa o tablero plano, sobre el cual se puede disponer un mapa de papel en cuyo interior se encuentra una red de hilos metálicos que pueden detectar magnéticamente, la posición de otro componente de la tableta, un cursor, el cual puede ser movido libremente por el usuario. Al detectar la posición del cursor y recibir la orden a través de los botones, la tableta envía a la computadora las coordenadas donde éste se ha colocado. Es el mecanismo más utilizado para entrada de datos espaciales. Por sus características es de carácter vectorial.

Escáner (Digitalización automática). Un escáner captura la información gráfica a partir de la detección de líneas, mapas y otros documentos. En este caso los documentos se colocan sobre una pantalla de cristal, el aparato trabaja enviando un rayo de luz muy fino, el cual es reflejado sucesivamente por una pequeña porción del mapa tratado. La luz reflejada es captada por el escáner, que en función de su intensidad, codifica un valor numérico, al mismo tiempo que registra su posición espacial. Se trata de un método que reduce considerablemente el tiempo de captura de información gráfica. Este dispositivo es de tipo raster.

Imágenes de satélite. Una fuente muy importante para los SIG raster son las imágenes de satélite. Se generan a partir de la distribución espacial de la respuesta espectral de los elementos que componen la escena, entendiéndose como respuesta espectral la variación de intensidad de energía radiante en función de su longitud de onda. La resolución de estas imágenes es variable dependiendo de los sensores remotos utilizados, pudiendo alcanzar hasta 1 metro o menos. Estas imágenes pueden ser tratadas para obtener información del uso de suelo, inundaciones, calidad del agua, etc.

2.- Captura de información no espacial asociada (atributos)

Constituye un tipo de información que por si sola no conlleva propiedades de localización. Puede referirse a todos y cada uno de los rasgos espaciales cartográficos contenidos en la base de datos del SIG, representados por puntos, líneas o áreas tanto en formato vectorial como raster.

3.- Interrelación entre base de datos espaciales y no espaciales

La base de datos gráficos (puntos, líneas y áreas) deben relacionarse con la base de datos constituida por los atributos no espaciales. Esto se hace a través de identificadores comunes en ambas bases de datos, con lo cual la base tabular puede ser, de alguna manera, espacialmente representada.



Figura 1.12 Operaciones y dispositivos de entrada y salida de información en un SIG
(fuente: <http://www.165.158.1.110/IMAGES>)

1.9. Producto o salida de información

La salida de datos es la operación de presentar los resultados del análisis y la manipulación de la información dentro del SIG, de una manera comprensible a un usuario, o bien presentarla en un formato que permita su transferencia a otro sistema como son los mapas, gráficas, tablas, etc. (figura 1.12).

Los medios o dispositivos de salida de información son:

Pantalla. Es el primer medio de salida de resultados que la computadora puede utilizar para mostrar lo que ha realizado a petición del usuario. Este mecanismo es esencialmente raster.

Impresora. Estos dispositivos son de dos tipos principalmente: inyección de tinta y láser. Las impresoras son dispositivos de tipo raster.

Plotter. Estos dispositivos existen de varios tipos y son dirigidos por la computadora para realizar los dibujos. Son de tipo vectorial.

1.10. Modelo Digital del Terreno

Hasta el momento hemos hablado de los Sistemas de Información Geográfica en dos dimensiones, en los cuales solo existen objetos geográficos puntuales, lineales y poligonos, pero un Modelo Digital del Terreno (MDT), es una representación simplificada de una variable que se mide en el cuarto tipo de objeto geográfico planteado, que es una superficie ondulada con tres dimensiones. Dos de estas dimensiones se refieren a los ejes de un espacio ortogonal plano (x,y), la tercera mide la altura (z) de la variable temática representada en cada punto del

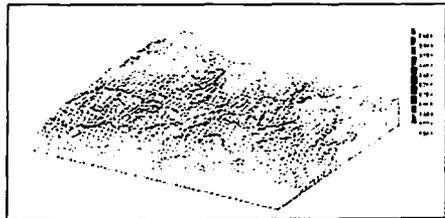


Figura 1.13 Modelo Digital del Terreno

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

espacio. Un MDT generalmente representa la topografía del terreno, es decir, las alturas de cada punto de un territorio, como lo indica la figura 1.13.

En esta sección es fundamental destacar que los MDT comprenden además de los Modelos de Elevación Digital, al conjunto de atributos físicos de una región terrestre, tales como: área de captación, red de drenaje, pendientes de terreno, tipo y textura del suelo, uso del suelo, cobertura vegetal, estructuras geológicas, fronteras naturales (parteaguas, ríos lagos) y artificiales (límites políticos y/o de propiedad), obras hechas por el hombre (poblados, presas, vías de comunicación, líneas de energía), entre otros.

Por su parte los MED corresponden a la representación clásica de la topografía y son ampliamente utilizados en la caracterización hidrológica. Puede decirse entonces que los MED sirven para caracterizar propiamente la fisiografía de una cuenca, mediante la representación de sus atributos en formato digital.

Existen dos métodos para la obtención de Modelos Digitales del Terreno como se describe a continuación:

1.10.1. Mapa topográfico

Consiste en digitalizar las líneas que conecten puntos con igual nivel topográfico o elevación (curvas de nivel) y las cotas de nivel puntuales. Su densidad varía de acuerdo al tipo de terreno que se esté tratando, debido a que en zonas planas guardan una mayor distancia que en las zonas de relieve. Para su empleo se digitaliza cada curva como una línea vectorial y se le asocia un valor temático numérico, que es justamente la altura de esa línea. El resultado de esta operación es la obtención de un fichero informático de líneas vectoriales asociado a una serie de alturas.

1.10.2. Restitución fotogramétrica

Consiste en un modelo estereoscópico, de pares de fotografías aéreas del terreno. Para ello se han desarrollado dispositivos y aparatos que facilitan, en gran medida, estas tareas y generan finalmente un fichero informático conteniendo, en las mayorías de las ocasiones, una rejilla densa de puntos con tres valores numéricos (x,y,z).

A partir de los dos métodos de obtención de datos anteriores se cuenta, finalmente, con un fichero informático de puntos muestrales, en cada uno se cuenta con los valores (x,y,z). A continuación se inicia un proceso de interpolación espacial para generar los valores de 'z' en otros puntos no muestrales (puntos estimados) que formarán parte del MDT. Los procedimientos de interpolación son muy variados según se desee obtener el modelo, dentro de los que podemos mencionar:

- 1.- *Métodos de interpolación a partir de puntos muestrales para obtener un modelo raster*
- 2.- *Procedimientos de interpolación que no realizan análisis de autocorrelación (directos)*
- 3.- *Métodos de interpolación que analizan la autocorrelación espacial de la variable*
- 4.- *Interpolación a partir de curvas de nivel*
- 5.- *Creación de un modelo de datos a partir de una red de triángulos irregulares*

Actualmente existe software, que permite crear el MDT a partir de los ficheros de datos (x, y, z), como pueden ser los mismos Sistemas de Información Geográfica, destacando principalmente el Surfer versión 7.0.

1.11. Sistemas de Información Geográfica con aplicación en hidrología

Como mencionábamos anteriormente los Sistemas de Información Geográfica se han desarrollado de una forma muy rápida debido a la necesidad de manejar cantidades de información muy grandes así como también por llevar a cabo diferentes actividades con un ahorro de tiempo importante. El área de hidrología no ha sido la excepción, y últimamente han incursionado en este campo con el fin de facilitar la obtención de

información que permita conocer las características fisiográficas de una cuenca en particular a partir de Modelos de Elevación Digital. Los Sistemas de Información Geográfica más utilizados y conocidos para tal efecto son:

1.11.1. MapInfo

MapInfo Profesional, es un software cartográfico líder en el mundo y utilizado muy ampliamente como una herramienta para la realización de trabajos de cartografía en diversas disciplinas. Sirve para cualquier proyecto cartográfico donde no se requiera la variable 'z' (tres dimensiones), y se oriente principalmente a la tecnología vectorial y en menor medida a la raster.

Este software contiene un sistema de información geográfica que permite referenciar la información en un mapa temático y procesarla con cierto grado de complejidad, maneja los elementos de mapas como líneas, áreas o redes que permiten relacionar componentes de estructura física, morfología, espacios económico-culturales y su referencia estadística a distintos niveles de aproximación.

Principales ventajas:

- Fácil de utilizar
- Manipulación de cartografía
- Análisis temático
- Solución de bajo costo

1.11.2. ILWIS

ILWIS (Integrated Land and Water Information System), es un software desarrollado por el ITC holandés (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences). El sistema fue diseñado desde el primer momento para plataformas PC, primero para sistema operativo DOS y posteriormente para Windows.

ILWIS, es un Sistema de Información Geográfica que incorpora potentes herramientas para tratamiento digital de imágenes. Permitiendo almacenar, analizar y transformar datos, a partir de los cuales se genera información para realizar modelos y simulaciones de procesos que se dan en la superficie terrestre.

Dentro de sus principales ventajas podemos destacar las siguientes:

- 1.- *Introducción de datos al sistema*
- 2.- *Presentación de Resultados*
- 3.- *Preproceso de datos*
- 4.- *Visualización de datos*
- 5.- *Tratamiento digital de imágenes*
- 6.- *Análisis de datos*
- 7.- *Cálculos estadísticos*

Requerimientos de hardware:

Pentium, 16-32 Mb de RAM y una tarjeta de gráficos con acelerador y una resolución de 1024 x 768. Sistema operativo: Microsoft Windows 3.1 o posterior, Windows 95 ó Windows NT 4.0.

1.11.3. PCRaster

PCRaster, es un Sistema de Información Geográfica, desarrollado por el departamento de Geografía Física de la Universidad de Utrecht, Holanda. Este SIG consiste en un conjunto de herramientas para salvar, manipular, analizar y obtener información geográfica. Este es un sistema raster que utiliza diferentes clases

de datos que controlan los mecanismos del programa. Esto significa que la información de las clases de datos es agregada a todos los datos espaciales, basado sobre los tipos de atributos que los datos representan.

PCRaster ofrece un grupo muy completo de herramientas con aplicación en las áreas siguientes:

- Modelos ambientales con funciones clásicas de SIG
 - Modelos cartográficos
 - Modelos dinámicos (modelado en espacio y tiempo)
- Modelos geoestadísticos (predicción y simulación)

Además maneja diferentes clases de datos como son: mapas, tablas, series de tiempo y datos puntuales, los cuales se manipulan desde un ambiente DOS, a través del cual podemos realizar operaciones con los diferentes comandos y operadores que este paquete reconoce.

Requerimientos de hardware:

Para versión DOS se requiere un equipo 386 o equivalente, 4 MB en RAM, y monitor SVGA

1.11.4. IDRISI

IDRISI es un Sistema de Información Geográfica y un procesador de imágenes desarrollado por la Graduate School of Geography en la Universidad de Clark, Worcester, Massachussets. USA.

Este programa es uno de los mas usados en el tratamiento digital e imágenes teledetectadas, utiliza la técnica raster para representar los mapas. Mediante la técnica raster, la representación de las entidades geográficas y sus atributos se encuentran fundidos en un mismo archivo. El área de estudio se subdivide en una fina malla de celdas, cuadradas generalmente, dentro de las cuáles introducimos el valor o atributo que la superficie de la tierra posee en ese punto.

El programa se compone de alrededor de 100 módulos escritos en programación PASCAL que permiten la realización de filtrados, clasificación, extracción y modificaciones de las características e información que contiene una imagen. Estos módulos están incluidos en tres amplios grupos:

- *Grupo Core.* Provee fundamentalmente utilidades para la entrada, almacenamiento, manejo y despliegue de imágenes en formato raster
- *Grupo de análisis.* Provee herramientas para el análisis de imágenes en formato raster
- *Grupo de periféricos.* Asociados a la conversión de imágenes entre IDRISI y otras formas de almacenamiento de información

Requerimientos de hardware:

El software funciona bajo condiciones simples de hardware. Es suficiente una PC 486 con 8 Mb de RAM y 66 Mhz, 80 MB en disco duro, monitor a color SVGA con 1 Mb en tarjeta gráfica para poder visualizar las composiciones de imágenes en 3 bandas y una impresora a color.

1.11.5. ArcView

ArcView es un Sistema de Información Geográfica que permite integrar herramientas de análisis tradicional con información geográfica en mapas visuales.

ArcView permite analizar la información de múltiples modos. Se puede combinar información de diferentes capas y encontrar lugares donde unas características particulares coincidan. Este programa tiene un completo

entorno para la realización de mapas. Así el programa proporciona una completa colección de tipos de letra y símbolos y además proporciona clasificaciones automáticas de información, gráficos de negocios, etc. Este programa permite actualizar antiguos mapas o crearlos por medio de la tableta digitalizadora o el escáner . Los mapas pueden ser instantáneamente actualizados gracias a una interface gráfica que proporciona ArcView, además permite añadir imágenes, sonidos y videos a los mapas.

ArcView permite la lectura de los mapas de datos de múltiples formatos como los procedentes de ARC/INFO, AutoCAD (DXF y DWG) o Micro Station (DGN). Además puede abrir imágenes con extensión TIFF, JPEG, EPS, BMP, GIF y muchas otras. Puede usar directamente las tablas de datos en formato ASCII, Oracle, dBASE, INFO, ACCESS, Excel., FoxBase, SQL Server, y otras muchas.

Por último ArcView permite un avanzado análisis espacial con un MED con el cual se puede realizar múltiples estudios. Se pueden crear "buffers" basados en una distancia especificada o en un atributo, se puede unir información de un nivel a otro, se puede seleccionar información interactiva o explícitamente basado en el criterio del usuario, superponer niveles de información para crear una nueva información, y etc.

En muchos de los Sistemas de Información Geográfica existentes y en especial los que tienen aplicación en hidrología se puede programar con la finalidad de hacer aplicaciones de acuerdo a las necesidades particulares de cada usuario, tal es el caso de Arc View GIS con lenguaje de programación "Avenue" , Idrisi con "Visual Basic" y/o "Visual C ++", MapInfo con "MapBasic", PCRaster con " Dynamic Modelling Language ", etc.

A continuación en la tabla 1.4 se hace una comparación de las potencialidades y diferentes herramientas de los Sistemas de Información Geográfica con aplicación en hidrología.

S. Si tiene la función
N. No tiene la función

FUNCIONES	MAPINFO	ILWIS	PCRASTER	ARCVIEW	IDRISI
<i>Estructuras</i>					
Raster	N	S	S	N	S
Vectorial	S	S	N	S	S
<i>Entrada de datos</i>					
Tableta digitalizadora	S	S	N	S	S
Escáner	S	S	N	S	S
Imágenes de satélite	S	S	N	S	S
<i>Conversión</i>					
Raster-Vectorial	N	S	N	S	S
Vectorial-Raster	S	S	S	S	S
<i>Análisis</i>					
Distancia	S	S	S	S	S
Área	S	S	S	S	S
Buffer(punto, línea, área)	S	S	S	S	S
Modelización cartográfica	S	S	S	S	S
<i>Superficies:</i>					
Pendientes	N	S	S	S	S
Orientaciones	N	S	S	S	S
Generar Curvas de nivel	N	S	N	S	S
<i>Polígonos:</i>					
Superposición pol./pol.	S	S	N	S	S
Superposición línea/pol.	S	S	N	S	S
Superposición punto/pol.	S	S	N	S	S
<i>Varios:</i>					
Polígonos de Thiessen	N	S	N	S	S
Operadores booleanos	N	S	S	S	S
Estadísticas básicas	S	S	S	S	S
<i>Análisis de imágenes:</i>					
Correcciones	N	N	N	S	S
Filtros	N	S	N	S	S
Histograma	N	S	N	S	S
Mosaico	N	S	N	S	S
<i>Visualización</i>					
Múltiples mapas	S	S	S	S	S
Elementos cartográficos	S	S	S	S	N
Salvar pantalla	S	S	S	S	S
Animación	N	N	S	N	S
3D	S	S	S	S	S
Relieve sombreado	S	S	S	S	S

Tabla 1.4. Comparación de Sistemas de Información Geográfica con aplicación en hidrología

2. CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA

2.1. Introducción

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

Para su estudio se divide en hidrología subterránea e hidrología superficial o aplicada, esta última es la que comúnmente se estudia en la ingeniería y cuyas finalidades son: obtener la avenida máxima que con una cierta frecuencia, ocurre en un cierto lugar y, el diseño y operación de proyectos de ingeniería para el control y aprovechamiento del agua.

2.1.1. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se considera el concepto fundamental de la hidrología y como todo ciclo, no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evaporan nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo para ser almacenadas como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar (figura 2.1).

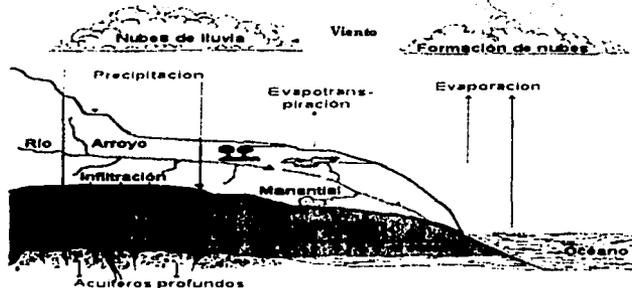


Figura 2.1. El ciclo hidrológico
(fuente: <http://www.cevni.org.mx/>)

2.2. La cuenca hidrológica

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia el mismo punto de salida (figura 2.2).

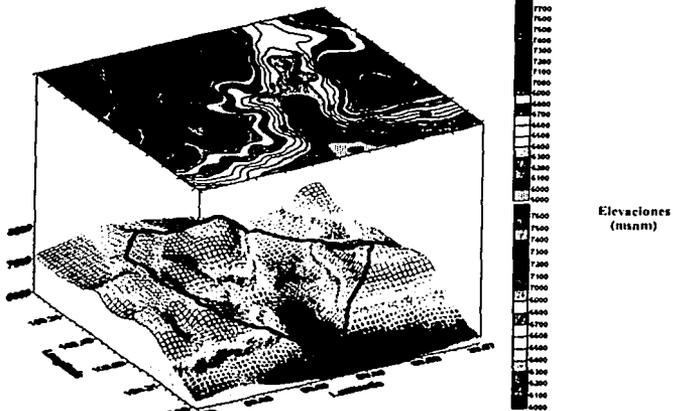


Figura 2.2 La cuenca hidrológica

2.2.1. Clasificación de las cuencas

Por el tipo de salida existen dos tipos de cuenca:

Exorreicas: El punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar (figura 2.3a).

Endorreica: El punto de salida esta dentro de los límites de la cuenca y por lo general es un lago (figura 2.3b).

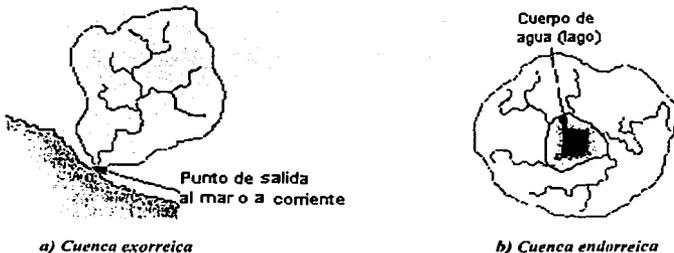


Figura 2.3 Tipos de cuencas
(fuente: <http://www.ccvn.org.mx/gestion.htm#1>)

De acuerdo a su tamaño las cuencas pueden ser (referencia 21):

- Pequeñas $A \leq 250 \text{ km}^2$
- Grandes $A > 250 \text{ km}^2$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En hidrología, una cuenca no se clasifica solamente por su tamaño, es importante además introducir el concepto de cuenca homogénea.

Una cuenca es homogénea cuando tiene las mismas características físicas y de almacenamiento en toda su área. Por ejemplo, si una cuenca en una zona montañosa tiene una pendiente relativamente uniforme en las laderas que vierten a la corriente y además el cauce de la corriente tiene una pendiente longitudinal constante, y el uso del suelo es similar sobre toda el área, la cuenca puede considerarse como homogénea.

En general, las cuencas homogéneas tienen limitaciones de tamaño y es difícil encontrar cuencas montañosas homogéneas mayores de 25 km², y cuencas de llanura homogéneas mayores de 100 km².

Por las razones anteriores es conveniente clasificar las cuencas, como:

Pequeña. Si tiene las características de una cuenca homogénea.

Grande. Cuando una cuenca no es homogénea.

2.2.2. Clasificación de corrientes

Las corrientes se clasifican de varias maneras, pero las más interesantes son:

Por el tiempo en que transportan agua. Según esta clasificación las corrientes pueden ser:

Perennes. Estas corrientes transportan agua durante todo el año y siempre están alimentadas, totalmente o en parte por el agua subterránea, es decir, son efluentes. El punto más bajo del cauce se encuentra siempre abajo del nivel de aguas freáticas (figura 2.4a).

Intermitentes. Estas corrientes transportan agua durante la época de lluvias de cada año, cuando el nivel freático asciende hasta quedar por encima del punto 'A'. En época de secas el nivel freático queda por debajo de dicho punto y la corriente no transporta agua, salvo cuando se presente alguna tormenta (figura 2.4b).

Efimeras. En estas corrientes el nivel freático está siempre por abajo del punto 'A' y transportan agua inmediatamente después de una tormenta, y, en este caso alimenta a los almacenamientos de agua subterránea, es decir son efluentes (figura 2.4c).

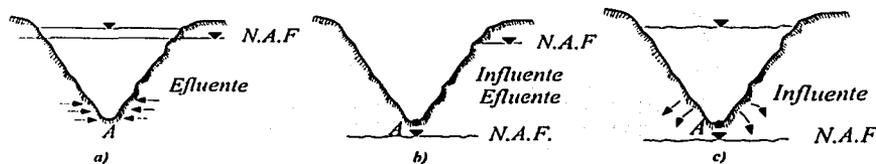


Figura 2.4 Clasificación de corrientes por el tiempo en que transportan agua

Por su posición topográfica o edad geológica. De acuerdo con esta clasificación los ríos pueden ser:

De montaña o juveniles. Son características de cotas elevadas sobre el nivel del mar, tienen grandes pendientes y pocas curvas, y debido a las altas velocidades que alcanza el agua, sus cauces están generalmente formados por cantos rodados y por un poco de grava y casi nada de finos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De planicie o viejo. Al contrario que los anteriores, se encuentran cercanos a las cotas del nivel del mar y presentan numerosos meandros por las bajas velocidades del agua.

De transición o maduros. Están en una situación intermedia entre los dos anteriores: presentan algunas curvas, con velocidades de agua moderadas, y sus cauces están formados básicamente por gravas, con algo de cantos rodados y arena.

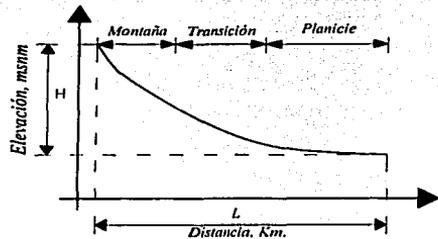


Figura 2.5 Clasificación de corrientes por su posición topográfica o edad geológica

2.3. Características fisiográficas de las cuencas

2.3.1. El parteaguas

El **parteaguas** es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas (figura 2.6).

2.3.2. Área de la cuenca

El área de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas (figura 2.6).

2.3.3. Orden de la red de drenaje

La red de drenaje de una cuenca está integrada por un cauce principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden hacia las partes más altas de las cuencas. Las **corrientes tributarias** son las corrientes secundarias que llegan al cauce o corriente principal. La **corriente o cauce principal de una cuenca** es la corriente que pasa por la salida de la misma (figura 2.6). Esta definición se aplica solamente a las cuencas exorreicas.

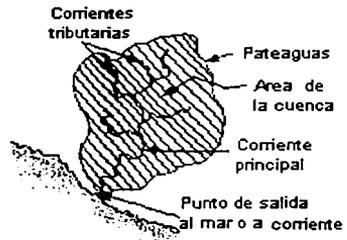


Figura 2.6 Área de una cuenca
(fuente: <http://www.ccvni.org/nc/gestion.htm#1>)

De lo anterior se desprende que todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal. La red de drenaje tiene una única salida. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida se llaman **cuencas tributarias o subcuencas**.

La clasificación más utilizada actualmente es la de Horton-Strahler, la cual clasifica a las corrientes según el siguiente procedimiento:

1. Los cauces que se originan en una fuente son definidos como corrientes de primer orden;
2. Cuando las corrientes de orden ω se unen, se crea una corriente de orden $\omega + 1$;

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3. Cuando dos corrientes de diferente orden convergen, el segmento de corriente inmediatamente aguas abajo se toma como la continuación de la corriente de mayor orden;
4. El orden Ω de la cuenca es el de la corriente de mayor orden.

En la figura 2.7 se muestra una red de drenaje de un río, que fue utilizada por Strahler para dar a conocer su sistema de ordenación de corrientes, en ella se pueden apreciar las siguientes características: La red tiene una única salida. Los nodos internos son puntos donde las líneas o segmentos de ríos se unen; los nodos externos son fuentes de una línea o segmento de corriente, que nace de estos. Los enlaces son segmentos de corriente entre nodos; los enlaces interiores conectan nodos interiores y los enlaces exteriores están entre una fuente y un nodo interior.

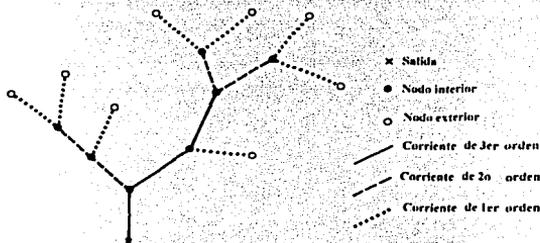


Figura 2.7 Sistema de ordenación de corrientes de Strahler

2.3.4. Longitud del cauce principal

Es la distancia horizontal que recorre la corriente de mayor orden desde su inicio hasta el sitio de interés.

2.3.5. Pendiente del cauce principal

La pendiente del cauce principal es uno de los indicadores del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta, dado que la pendiente varía a lo largo del cauce y es necesario definir una pendiente media, para ello existen varios métodos y a continuación se enuncian tres:

La pendiente geométrica es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividida entre su longitud medida en planta (figura 2.8a).

$$S_g = \frac{H}{L}$$

La pendiente compensada es la de una línea recta que, apoyándose en el extremo de aguas debajo de la corriente, hace que se tengan áreas iguales entre el perfil del cauce y arriba y debajo de dicha línea (figura 2.8b).

$$S_c = \frac{H}{L}$$

La pendiente media de Taylor y Schuarz, es la de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión (figura 2.8c).

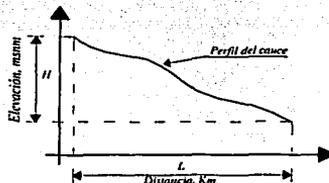


Figura 2.8a La pendiente geométrica

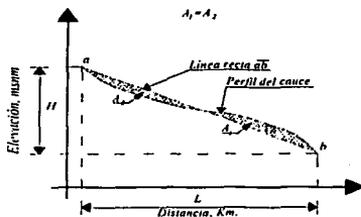


Figura 2.8b Pendiente compensada

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

$$S_m = \left[\frac{m}{\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2} + \dots + \sqrt{S_m}} \right]^2$$

$$S_m = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

Donde:

- S . Pendiente del cauce principal.
- L . Longitud total del cauce, en m.
- H . Diferencia de elevaciones, en m.
- m Número de ΔX que hay en la longitud L .
- l_i . Es la longitud del tramo i .
- S_i . Pendiente del tramo i .

Pendiente media para las longitudes de los tramos iguales.

Pendiente media para las longitudes de los tramos diferentes.

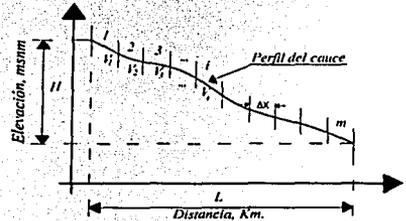


Figura 2.8c La pendiente media

2.3.6. Leyes de Horton

Horton (1945) fue el primero en sugerir algunas leyes empíricas para que posteriormente fueran confirmadas usando el sistema de ordenación de Strahler, y las cuales se presentan a continuación:

Ley de los números corrientes.

$$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_{\omega}}$$

Ley de las longitudes de las corrientes.

$$R_L = \frac{\bar{L}_{\omega}}{\bar{L}_{\omega-1}}$$

Ley de áreas de las corrientes.

$$R_A = \frac{\bar{A}_{\omega}}{\bar{A}_{\omega-1}}$$

Ley de las pendientes de las corrientes.

$$R_S = \frac{\bar{S}_{\omega-1}}{\bar{S}_{\omega}}$$

Donde:

R_B . Constante para una red de drenaje dada y es denominada "Grado de Bifurcación".

N_{ω} . Número de corrientes de orden ω .

\bar{L}_{ω} . Longitud promedio de una corriente de orden ω , en Km.

\bar{A}_{ω} . Área promedio que contribuye al escurrimiento de una corriente de orden ω , en Km².

\bar{S}_{ω} . Pendiente promedio de una corriente de orden ω , adimensional.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

A través de los años se ha observado que para cuencas naturales tienen cierto rango de variación. Para R_p de 3 a 5, para R_L de 1.5 a 3.5, y para R_A de 3 a 6.

El promedio de las longitudes, áreas y pendientes de corrientes para cada orden ω está dado respectivamente por:

$$\bar{L}_\omega = \frac{1}{N_\omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} L_{\omega_i}, \quad \bar{A}_\omega = \frac{1}{N_\omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} A_{\omega_i}, \quad \bar{S}_\omega = \frac{1}{N_\omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} S_{\omega_i}$$

Donde:

L_{ω_i} . Longitud de una corriente de orden ω , en Km.

A_{ω_i} . Área que contribuye al escurrimiento de una corriente de orden ω , en Km².

S_{ω_i} . Pendiente de una corriente de orden ω , adimensional.

2.3.7. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje se define como la longitud total de corriente por unidad de área.

$$D_d = \frac{L_T}{A}$$

Donde:

D_d . Densidad de drenaje, en 1/Km.

L_T . Longitud total de todas las corrientes en una cuenca, en Km.

A . Área total de la cuenca, en Km².

La densidad de drenaje depende del nivel de resolución del mapa donde se lleva a cabo la medición de las longitudes de las corrientes.

Otro parámetro que podemos considerar es la densidad de corrientes que se define como el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área.

$$D_s = \frac{N_C}{A}$$

Donde:

D_s . Densidad de corrientes, en 1/Km².

A . Área de la cuenca, en Km².

N_C . Número de corrientes perennes e intermitentes.

2.3.8. Frecuencia de corrientes

La frecuencia de corrientes se define como el número de segmentos de corrientes por unidad de área.

$$F = \frac{\sum_{\omega=1}^{\omega} N_\omega}{A_D}$$

Donde:

F . Frecuencia de corrientes, en 1/Km².

A_D . Área total de la cuenca, en Km².

N_ω . Número de corrientes de orden ω .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La frecuencia de corrientes también es una cantidad que depende del nivel de resolución del mapa por lo tanto tiene una relación con la densidad de drenaje. Melton (1958) fue quien encontró una muy buena relación entre ellas, y está dada por:

$$F = 0.694D_d^2$$

Donde:

F : Frecuencia de corrientes, en 1/Km².

D_d : Densidad de drenaje, en 1/Km.

2.3.9. Relación entre área y distancia

Las observaciones y mediciones en diferentes cuencas han demostrado que existe una relación de la forma, representada por la siguiente expresión:

$$L = 1.27A^{0.6}$$

Donde:

L : Longitud del cauce principal, en Km.

A : Área de la cuenca, en Km².

2.3.10. Función ancho

La función ancho $N(X)$, es una importante descripción de una cuenca que muestra importantes efectos sobre la forma y pico del hidrograma. Esta función mide el número de enlaces en una distancia X dada desde la salida de la cuenca. La distancia X puede ser la longitud real o distancia topológica. Considerando la distancia topológica. La distancia topológica es medida en términos del número de enlaces desde la salida de la cuenca. La figura 2.9 muestra la derivación ancho basada en la distancia topológica, y donde se puede ver fácilmente la relación existente con la respuesta del hidrograma.

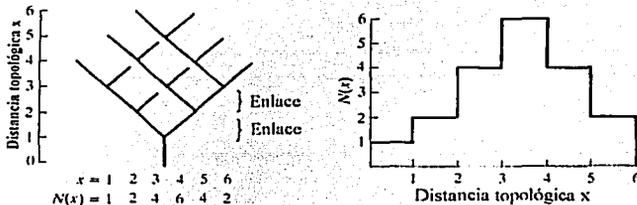


Figura 2.9 Función ancho

2.3.11. Curva hipsométrica

El concepto de curva hipsométrica adimensional lo introdujo Langbein (1947), para estudiar la topografía de una cuenca hidrológica, según muestra la figura 2.10a. La curva hipsométrica es la relación del porcentaje de área de la cuenca (es el área 'a' dividida por el área de la cuenca 'A', y que se encuentra por arriba de la curva de nivel en cuestión), con respecto a su porcentaje de elevación. El porcentaje de elevación se define como una elevación dada dividida por la elevación o relieve máximo de la cuenca. Figura 2.10b. Las tres formas posibles de las curvas hipsométricas se muestran en la figura 2.10c, para las cuales existen diversas interpretaciones dependiendo del autor que las analiza.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

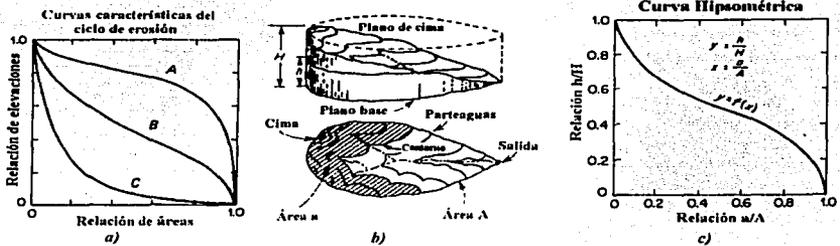


Figura 2.10 La curva hipsométrica

Según Davis (1899), las cuencas evolucionan después de alguna elevación tectónica brusca dando como resultado erosión y degradación. Tomando como modelo las curvas de la figura 2.10c la curva 'A' corresponde a una cuenca joven, la curva 'B' corresponde a una curva madura, y la curva 'C' corresponde a una curva vieja.

Según Scheidegger (1987), la elevación es un proceso continuo y que a través de la historia de la cuenca esta tiene una tendencia a balancear las fuerzas del aumento tectónico y degradación por erosión y otros mecanismos. Argumentó que "si un terreno muestra alguna forma de carácter permanente estos dos procesos antagónicos son un equilibrio dinámico". Scheidegger atribuyó las diversas formas de la curva hipsométrica a los niveles de actividad de los procesos antagónicos. De acuerdo a lo anterior la curva 'A' corresponde a una actividad alta, la curva 'B' a una actividad media, y la curva 'C' a una actividad baja. El nivel de actividad no necesariamente esta relacionado con la edad de la cuenca.

Una tercera interpretación, es que la forma de la curva hipsométrica es una medida del equilibrio relativo, en términos de la elevación tectónica y la actividad de erosión de la cuenca. Esto puede o no ser una medida de la edad de la cuenca. Por lo anterior la curva 'A' muestra un inequilibrio entre procesos opuestos, la curva 'B' corresponde a un equilibrio dinámico de agravación y degradación. La erosión continúa durante la fase de equilibrio entrando a una reducción general en relieve, pero manteniendo la misma elevación relativa y distribución de área. La curva 'C', puede elevarse cuando un afloramiento de roca resistente a la erosión es expuesto primero a una diferencia bastante grande entre las elevaciones de las partes de la cuenca capaces de erosionarse y no erosionarse.

Willgoose (1989), usando un modelo de desarrollo de series argumentó, que las formas de las curvas hipsométricas son como un reflejo de la historia tectónica de las cuencas y de varios procesos erosivos operando en la cuenca como un resultado del equilibrio dinámico de la edad.

2.4. Precipitación

La precipitación es el agua que proviene de la atmósfera, que incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevadas. La precipitación es la fuente primaria del agua de 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 formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.4.1. Tipos de precipitación

El enfriamiento del aire al ascender verticalmente origina no solo la condensación y el desarrollo de nubes, sino también la precipitación; en consecuencia es común reconocer varios tipos de precipitación, según el modo por el cual el aire adquirió el movimiento ascendente, y son: convectiva, orográfica y ciclónica.

Por convección. Se produce al chocar dos nubes con diferente temperatura, la de mayor temperatura se eleva más que la de menor temperatura, esta encuentra una temperatura menor que provoca una condensación en la nube y provoca su precipitación.

Orográfica. Se produce al moverse las nubes por el efecto del viento y topan con una montaña, estas se elevan y se encuentran con una temperatura menor, los gases de las nubes se condensan y ocurre la precipitación.

Ciclónica. En los centros o áreas de baja presión el aire tiende a converger, así que grandes masas de aire se encuentran y superponen formando frentes. El aire más caliente en los frentes se eleva oblicuamente sobre el frío siendo el ascenso más lento y su enfriamiento más lento que el del aire que asciende por convección, por lo tanto, la precipitación resultante de tal enfriamiento, abarca mayor extensión y dura más tiempo.

2.4.2. Medición de la precipitación

La precipitación se mide en altura de lluvia y la unidad es el milímetro (mm).

Los aparatos más usuales en México para medir la precipitación son: los pluviómetros y los pluviógrafos.

El pluviómetro está formado 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'. Estos instrumentos sirven para medir la cantidad e intensidad de lluvia por lo general cada 24 horas.

El pluviógrafo tiene un mecanismo para producir un registro continuo. 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. Estos instrumentos miden la lluvia a lo largo del tiempo. El registro obtenido se llama pluviograma.

Los aparatos de medición de la precipitación, generalmente se localizan en una estación climatológica y miden la lluvia puntual, y para los cálculos ingenieriles es necesario conocer la lluvia media de una cuenca de una tormenta dada para lo cual existen diversos métodos que a continuación se describen:

Promedio aritmético. Consiste simplemente en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usadas en el análisis.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{p_i}$$

Donde:

\bar{h}_p . Altura de precipitación media, en mm.

h_{p_i} . Altura de precipitación registrada en la estación i, en mm.

n. Número de estaciones bajo análisis.

Polígonos de Thiessen. Es el método más utilizado y consiste en determinar el área de influencia de cada estación y posteriormente obtener un promedio pesado con respecto al área total.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi}$$

Donde:

\bar{h}_p . Altura de precipitación media, en mm.

h_{pi} . Altura de precipitación registrada en la estación i, en mm.

n . Número de estaciones bajo análisis.

A_i . Área de influencia de la estación, en Km².

A_T . Área total de la cuenca, en Km².

Para obtener el área de influencia de cada estación de forma manual se siguen los siguientes pasos:

1. Dibujar en un plano la cuenca y las estaciones más cercanas.
2. Unir, mediante líneas rectas las estaciones más próximas entre sí. Con ello se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas.
3. Trazar líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos. Las líneas correspondientes a cada triángulo convergen en un solo punto.
4. Cada estación quedará rodeada por las líneas rectas del paso 3, que forman los polígonos de Thiessen y, en algunos casos, en parte por el parteaguas de la cuenca. El área de los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente.

Método de las Isoyetas. Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, líneas que unen puntos de igual precipitación llamadas isoyetas.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi}$$

Donde:

\bar{h}_p . Altura de precipitación media, en mm.

h_{pi} . Altura de precipitación promedio entre cada dos isoyetas, en mm.

n . Número de estaciones bajo análisis.

A_i . Área entre cada dos isoyetas y el parteaguas, en Km².

A_T . Área total de la cuenca, en Km².

2.5. Esguerrimiento

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

El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre (una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada) hasta llegar a la salida de la cuenca, sigue diversos caminos que se pueden considerar como inciertos. Por todo lo anterior, es conveniente dividir estos caminos en tres clases: esguerrimiento superficial, esguerrimiento subsuperficial y esguerrimiento subterráneo.

2.5.1. Tipos de escurrimiento

Escurrimiento Superficial. Está formado por el flujo en la superficie del terreno y por el escurrimiento en corrientes. El flujo en la superficie del terreno se genera una vez que la precipitación alcanza la superficie del terreno, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan, posteriormente se comienzan a llenar las depresiones del terreno, y al mismo tiempo el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos. El escurrimiento en corrientes, se genera cuando en su trayectoria más próxima y con cauce bien definido, el agua fluye sobre el terreno se sigue infiltrando, e incluso se evapora en pequeñas cantidades. Este escurrimiento es el que más rápido llega hasta la salida de la cuenca. Por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo.

Escurrimiento subsuperficial. Es una parte del agua de precipitación que se infiltra, a través de la superficie de la tierra escurre cerca de la superficie del suelo y en forma más o menos paralela a él hasta llegar al cauce de la corriente. Este escurrimiento puede ser tan rápido como el escurrimiento superficial o tan lento como el escurrimiento subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo.

Escurrimiento subterráneo. Es la parte de la precipitación que se infiltra hasta el nivel freático e incluso niveles inferiores al mismo. Es el escurrimiento que más tarda en llegar hasta la salida de la cuenca (Puede tardar años en llegar), y, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta en particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña o muy permeable. Este escurrimiento es el que alimenta las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el escurrimiento base.

2.5.2. Medición del escurrimiento

Aforar una corriente significa determinar a través de mediciones el gasto que pasa por una sección dada. Por lo general estas mediciones se llevan a cabo en una estación hidrométrica.

En nuestro país se usan básicamente tres métodos para aforar corrientes que son: Sección de control, Relación sección-pendiente y Relación sección-velocidad

Sección de control. La sección de control de una corriente se define como aquella en la que existe una relación única entre el tirante y el gasto. De los muchos tipos de secciones de control que se pueden usar para aforar una corriente, los más comunes son los que producen un tirante crítico y los vertedores.

Relación sección-pendiente. Este método se utiliza para estimar el gasto máximo que se presentó durante una avenida reciente en un río. Para su aplicación se quiere solamente contar con topografía de un tramo del cauce y las marcas del nivel máximo del agua durante el paso de la avenida.

Relación sección-velocidad. Consiste básicamente en medir la velocidad en varios puntos de la sección transversal y después calcular el gasto por medio de la ecuación de continuidad.

2.6. Infiltración

La infiltración es el proceso por medio del cual el agua penetra en los estratos del suelo, satisface la deficiencia de humedad del suelo, y puede formar parte del agua subterránea. Este Proceso es producido por la acción de la fuerza de gravedad y las fuerzas capilares.

Las pérdidas es la diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y lo que escurre por la salida de la misma. Las pérdidas están constituidas principalmente por la intercepción de agua por el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, retención en depresiones y que posteriormente se evapora o se infiltra.

$$f = i - r$$

- Donde:
- f . Infiltración o pérdidas acumuladas, en mm/hr.
 - i . Altura de precipitación acumulada, mm/hr.
 - r . Escurrimiento directo acumulado, en mm/hr.

Además de que en la práctica es difícil separar estos cuatro componentes de las pérdidas, la porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que se acostumbra calcularlas bajo este nombre.

2.6.1. Factores que afectan la capacidad de infiltración

La capacidad de infiltración se define como la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en un suelo en un determinado tiempo. La infiltración juega un papel de primer orden en la relación lluvia escurrimiento y depende de un gran número de factores dentro de los que podemos destacar:

- Textura del suelo
- Contenido de humedad inicial
- Contenido de humedad de saturación
- Cobertura vegetal
- Uso de suelo
- Aire atrapado
- Lavado de material fino
- Compactación
- Temperatura sus cambios y diferencias

2.6.2. Medición de la infiltración

La infiltración, al contrario de la precipitación, varía de considerablemente de un sitio a otro, por lo que las mediciones que se hacen solo se consideran representativas de áreas muy pequeñas. Los aparatos para medir la infiltración se llaman infiltrómetros.

Los infiltrómetros se clasifican principalmente en dos tipos:

- De carga constante
- Simuladores de lluvia

En la literatura consultada, en el cálculo de la infiltración, es utilizada la metodología basada en los simuladores de lluvia. Esto significa que se necesitan registros simultáneos de precipitación y escurrimiento, para aplicar los siguientes métodos:

- Método de la capacidad de infiltración media
- Método del coeficiente de escurrimiento
- Método de los números de escurrimiento

Para conocer la aplicación y desarrollo de estos métodos se recomienda consultar la referencia 1, donde se describen de una forma detallada y precisa.

2.7. El hidrograma

La ingeniería hidrológica se preocupa de tres características principales de los ríos que son: volúmenes mensuales y anuales disponibles para almacenamiento y utilización; los periodos de estiaje, que limitan la

utilización del agua de las corrientes, y las avenidas. En general son de mucha importancia los análisis de los hidrogramas en cuanto a la atenuación al daño por inundaciones, predicción de avenidas o para fijar las descargas de diseño de un gran número de estructuras que deben transportar el agua proveniente de avenidas.

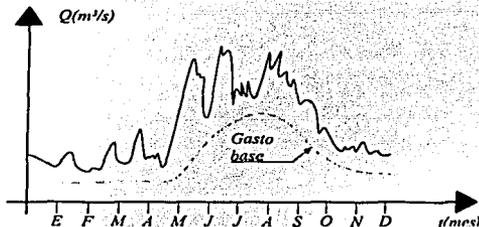


Figura 2.11 El hidrograma.

El hidrograma es una gráfica que representa los gastos con respecto al tiempo, es decir, que relaciona el gasto que se mide (el gasto es el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo) al pasar de manera continua durante todo un año por una sección transversal de un río y se grafican los valores obtenidos contra en tiempo (figura 2.11).

2.7.1. Partes de un hidrograma

Si la escala de tiempo es ampliada de tal forma que se pueda observar el escurrimiento producido por una sola tormenta, se tendría una gráfica como la que se muestra en la figura 2.12. Los hidrogramas varían de tormenta a tormenta y de una cuenca a otra, pero en general es posible distinguir las siguientes partes en cada Hidrograma:

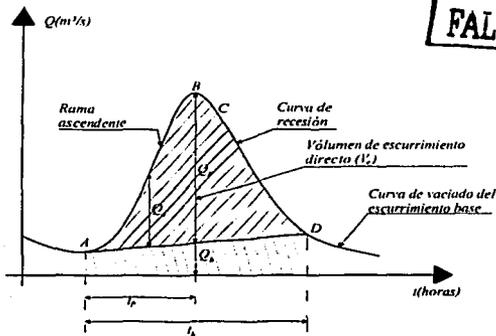


Figura 2.12 Partes de un hidrograma

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Donde:

A: Inicio del escurrimiento directo. (Punto de levantamiento). En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta, durante la misma o incluso cuando ha transcurrido ya algún tiempo después de que cesó de llover, dependiendo de varios factores como el tamaño de la cuenca, sistema de drenaje, suelo, intensidad y duración de la lluvia.

B : *Pico del hidrograma.* Es el gasto máximo que se produce por la tormenta. Es el punto más importante de un hidrograma para fines de diseño.

C : *Termina el flujo por tierra. (Punto de inflexión).* En este punto es aproximadamente cuando termina el flujo sobre el terreno, y, de aquí en adelante, lo que queda de agua en la cuenca escurre por las corrientes y como escurrimiento subterráneo.

D : *Final del escurrimiento directo e inicio del escurrimiento base.* De este punto en adelante el escurrimiento es sólo de origen subterráneo. Normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura en la curva de recesión, aunque pocas veces se distingue de fácil manera.

T_p : *Tiempo de pico.* Es el tiempo que transcurre desde el punto de inicio del escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma.

T_b : *Tiempo base.* Es el tiempo que transcurre desde el punto de inicio y hasta el final del escurrimiento directo. Es el tiempo que dura el escurrimiento directo.

Rama ascendente. Es la parte del hidrograma que va desde el punto de inicio del escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma.

Rama descendente (Curva de recesión). Es la parte del hidrograma que va desde el pico del hidrograma hasta el final del escurrimiento directo. Tomada a partir del punto de inflexión, es una curva de vaciado de la cuenca.

Q_p . Gasto de pico.

Q_b . Gasto base.

Q_d . Gasto directo.

$Q_r = Q_d + Q_b$

Uno de los procesos más complicados en las características de los hidrogramas es la obtención del punto 'D', en otras palabras la separación del gasto base del gasto directo, y para ello existen diferentes métodos dependiendo de las características de las corrientes y de la cuenca, dentro de lo cual se pueden mencionar tres:

- Método de la línea reta
- Método de flujo base fijo
- Método de la pendiente variable

2.8. Modelos lluvia-escurrimiento

El no contar con registros adecuados de escurrimiento en un sitio en particular, que nos permitan hacer el diseño y operación de las obras hidráulicas, nos lleva a crear modelos que nos permitan determinar el escurrimiento a partir de la precipitación y características de la cuenca. Los principales parámetros que intervienen en este proceso son:

- Área de la cuenca
- Altura total de precipitación
- Características de la cuenca

2.8.1. Métodos empíricos

Los métodos empíricos desarrollados para relacionar la lluvia y el escurrimiento sólo toman en cuenta el área de la cuenca, por lo que su aplicación muchas veces es restringida.

2.8.1.1. Método de envolventes

La idea fundamental de este método es relacionar el caudal máximo Q con el área de la cuenca de la siguiente forma:

$$Q = \alpha A^\beta$$

Donde:

Q . Gasto máximo.

α, β . Coeficientes empíricos.

Existe una gran cantidad de formulas de este tipo, pero las más utilizadas son las de Creager y Lowry.

Envolvente de Creager

$$q = 1.303 C_c (0.386 A)^{0.7} A^{-1}$$

Donde:

$$q = \frac{Q}{A}$$

$$\alpha = \frac{0.936}{A^{0.048}}$$

q . Gasto máximo por unidad de área, en $m^3/s/km$

Q . Gasto máximo, en m^3/s .

A . Área de la cuenca, en Km^2 .

C_c . Es un coeficiente empírico, en Km . $100 \leq C_c \leq 200$.

Se puede tomar un valor de $C_c = 100$ como mundial y para México consultar la referencia 1.

Envolvente de Lowry

$$q = \frac{C_L}{(A + 259)^{0.85}}$$

Donde:

q . Gasto máximo por unidad de área de la cuenca en $m^3/s/Km^2$.

C_L . Es un coeficiente empírico.

A . Área de la cuenca, en Km^2 .

Se puede tomar un valor de $C_L = 3500$ como mundial y para México consultar la referencia 1.

2.8.1.2. Formula racional

La formula racional es una de las más antiguas (1889) y una de las más utilizadas para el diseño de las obras de drenaje. Este modelo toma en cuenta el área de la cuenca además de la intensidad de la precipitación. Considera que el gasto máximo se alcanza cuando la precipitación se mantiene con una intensidad constante durante un tiempo igual al tiempo de concentración.

$$Q_P = 0.278 C_I A$$

Donde:

Q_p . Gasto máximo o de pico, en m^3/s .

C . Coeficiente de escurrimiento.

i . Intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, en mm/h .

A . Área en Km^2 .

Para estimar el tiempo de concentración se utiliza la formula de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

t_c . Tiempo de concentración, en hr.

L . Longitud del cauce principal, en m.

S . Pendiente del cauce principal, adimensional.

2.8.2. Métodos del hidrograma unitario

Para usar los métodos del hidrograma unitario siempre es necesario contar con al menos un hidrograma medido en la salida de la cuenca, además de los registros de precipitación en la cuenca (figura 2.13).

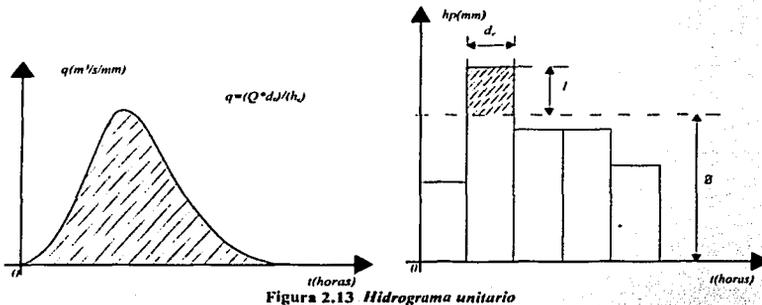


Figura 2.13 Hidrograma unitario

El hidrograma unitario es el hidrograma de escurrimiento directo provocado por una lluvia en exceso (h_e) de 1 mm, distribuida uniformemente en toda el área y en toda la duración de la lluvia en exceso (d_e).

2.8.2.1. Hidrograma unitario tradicional

El hidrograma unitario tradicional se aplica cuando una tormenta de diseño de cualquier magnitud, tiene una duración en exceso (d_e), igual a la del hidrograma unitario (d_u). Puede calcularse multiplicando las ordenadas del hidrograma unitario por la magnitud de la lluvia en exceso o tormenta de diseño.

Esto es:

$$Q_d = q h_e \quad d_e = d_u$$

Donde:

Q_d . Gasto de escurrimiento directo, en m^3/s .

q . Gasto de escurrimiento directo por unidad de precipitación en exceso, en $m^3/s/mm$.

h_e . Precipitación de la tormenta de diseño, en mm.

d_e . Duración de la lluvia en exceso, en hr.

d_p . Duración de la tormenta de diseño en, hr.

El procedimiento se lleva de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se calcula el hietograma medio de precipitación.
2. Se obtiene el hidrograma de escurrimiento directo, separándolo del gasto base.
3. Se calcula el volumen de escurrimiento directo.

$$V_{ED} = \Delta t \sum_{i=1}^n Q_{di}$$

Donde:

V_{ED} . Volumen de escurrimiento directo, en m^3 .

Δt . Intervalo de tiempo, en s.

Q_{di} . Gasto de escurrimiento directo en el i -ésimo intervalo, en m^3/s .

4. Se obtiene la altura de precipitación en exceso.

$$h_e = 0.001 \frac{V_{ED}}{A}$$

Donde:

h_e . Altura de precipitación en exceso, en mm.

A . Área de la cuenca, en Km^2 .

5. Se determina la duración de la lluvia en exceso, en hr.
6. Se calculan las ordenadas del hidrograma unitario.

$$q = \frac{Q_d}{h_e}$$

7. Se traza el hidrograma unitario.

2.8.2.2. Hidrograma unitario instantáneo

Este criterio se utiliza cuando la altura de precipitación he no es uniforme en la duración en exceso de la tormenta (d_e). Esta teoría supone que la tormenta corresponde a varias sucesivamente.

Esto es:

$$Q_{di} = q h_e$$

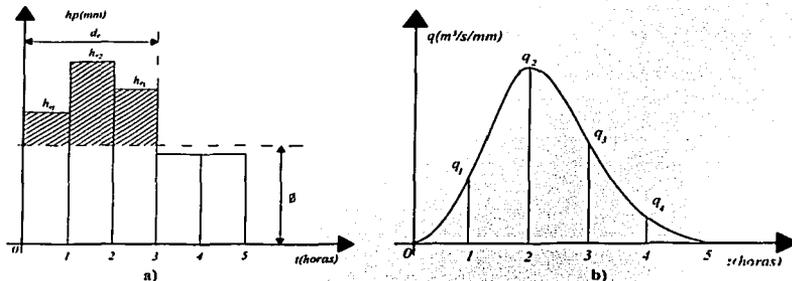


Figura 2.14 Hidrograma Unitario Instantáneo.

El procedimiento es el siguiente:

Se parte del conocimiento de que conocemos el hietograma de precipitación de la tormenta en exceso (figura 2.14a) y el hidrograma unitario de escurrimiento (figura 2.14b), el hidrograma unitario instantáneo se obtiene sustituyendo los valores en las siguientes ecuaciones:

$$Q_{d_1} = q_1 h_{e_1}$$

$$Q_{d_2} = q_2 h_{e_2} + q_1 h_{e_1}$$

$$Q_{d_3} = q_3 h_{e_3} + q_2 h_{e_2} + q_1 h_{e_1}$$

$$Q_{d_n} = q_n h_{e_n} + q_{n-1} h_{e_{n-1}} + \dots + q_1 h_{e_1}$$

En el caso de conocer el hietograma de precipitación de la tormenta en exceso y las ordenadas del hidrograma unitario instantáneo, podemos determinar el hidrograma unitario a partir de las siguientes expresiones:

$$q_1 = \frac{Q_{d_1}}{h_{e_1}}$$

$$q_2 = \frac{Q_{d_2} - q_1 h_{e_1}}{h_{e_2}}$$

$$q_3 = \frac{Q_{d_3} - q_2 h_{e_2} - \dots - q_1 h_{e_1}}{h_{e_3}}$$

$$q_n = \frac{Q_{d_n} - h_{e_2} q_{n-1} - h_{e_1} q_{n-2} - \dots - h_{e_1} q_1}{h_{e_n}}$$

2.8.2.3. Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico

Rodriguez Iturbide y Valdés (1979) fueron los primeros en introducir el concepto de Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (HUIG), que llevó a la renovación en la investigación en geomorfología. El análisis se enfocó en el viaje de una gota de agua a través de la cuenca escogida al azar. La gota de agua viaja a través de la cuenca haciendo transiciones, de corrientes de orden mas bajo a las corrientes de orden mas alto.

Una transición se define como un cambio de estado, donde el estado es el orden de la corriente, donde la gota está viajando.

El viaje de una gota está gobernado por las reglas siguientes:

Para una gota que cae en una ladera, su estado correspondiente es a_ω , donde ω es el orden de la corriente asociada.

Del estado a_ω , necesariamente se pasa al estado r_ω correspondiente.

De un estado r_ω , se puede pasar a cualquier estado r_j si $j > \omega$.

Necesariamente se pasa por r_Ω y de ahí con probabilidad de 1 al estado $\Omega + 1$ que es la salida.

Las reglas anteriores definen un conjunto finito de trayectorias que puede seguir una gota hasta alcanzar la salida de la cuenca.

Así, para la cuenca de orden 3 de la figura 2.7, las trayectorias posibles son:

- $S_1: a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{salida.}$
- $S_2: a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{salida.}$
- $S_3: a_2 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{salida.}$
- $S_4: a_3 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{salida.}$

El concepto fue rescatado por Gupta (1980), quien demostró a partir de las condiciones anteriores que el HUIG, es igual a la función de densidad de probabilidad del tiempo de viaje TB a la salida de la cuenca, de una gota que cae en la cuenca, aleatoriamente con distribución espacial uniforme, y está dada por:

$$P(T_R \leq t) = \sum_{S_i \in S} P(T_{S_i} \leq t) P(S_i)$$

Donde:

T_R . Tiempo de viaje a la salida de la cuenca.

T_{S_i} . Tiempo de viaje en una trayectoria particular S_i .

S . Es el conjunto de todas las trayectorias posibles que una gota puede tomar después de caer en la cuenca.

En la referencia 12, el método del HUIG se describe de una forma completa, y además cuenta con un algoritmo para realizar los cálculos.

2.8.2.4. Método de la curva S

La curva S es un hidrograma formado por la superposición de un número de hidrograma unitarios suficientes para llegar al gasto de equilibrio (figura 2.15). Este criterio se utiliza para calcular el hidrograma unitario correspondiente a una tormenta de diseño con una duración en exceso (d_e) cualquiera, y la altura de precipitación (h_e) de la tormenta, es uniforme en la (d_e).

$$d_e \neq d_e$$

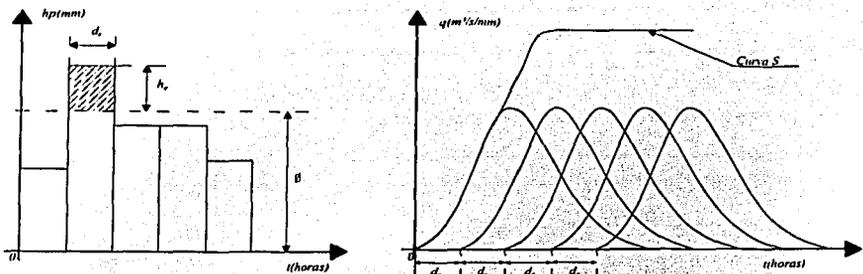


Figura 2.15 La curva S

Para determinar el hidrograma de la tormenta de diseño se siguen los pasos que a continuación se mencionan:

1. Se desplaza el hidrograma unitario en el tiempo, un tiempo igual a la (d_e).
2. Se suman las ordenadas de todos los hidrogramas en el tiempo.
3. Todos los puntos se unen, obteniéndose la curva S.
4. Se desplaza la curva S un tiempo igual a la (d_e) de la tormenta de diseño y se obtiene S' .
5. Se obtiene la diferencia entre las dos curvas $Dif = S - S'$.
6. A la diferencia se le multiplica por la relación entre los (d_e) $HU = Dif \left(\frac{d_e}{d_e'} \right)$, y así se obtienen las ordenadas de un nuevo hidrograma unitario para una duración (d_e').
7. Como para este caso ya se cumple la igualdad de los de del nuevo hidrograma unitario y de la tormenta, $Q_d = q h_e$.

2.8.2.5. Hidrogramas unitarios sintéticos

De forma general en nuestro país existen zonas de estudio donde se carece de instrumentos de medición como son las estaciones hidrométricas y climatológicas que nos permita conocer un hidrograma o en su caso registros de precipitación, por ello es necesario contar con métodos con los que puedan obtenerse hidrogramas unitarios a partir de las características físicas de las cuencas, con la ayuda de hidrogramas unitarios obtenidos con otras cuencas. Estos hidrogramas se denominan hidrogramas unitarios sintéticos, de los cuales los más conocidos son el hidrograma unitario triangular propuesto por el U.S.B.R. y el hidrograma unitario adimensional, propuesto por el Soil Conservation Service.

Hidrograma unitario triangular

Este método fue desarrollado por Mockus y se muestra en la figura 2.15.

De donde, de la geometría del hidrograma tenemos:

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

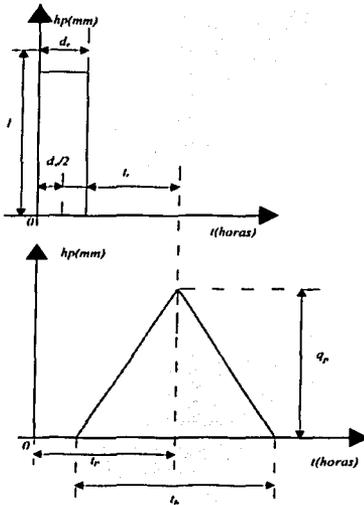


Figura 2.16 Hidrograma unitario triangular

Hidrograma unitario adimensional

El hidrograma unitario adimensional fue propuesto por el Soil Conservation Service, y se puede usar cuando el hidrograma unitario triangular no es suficiente y si la extensión de la curva de recesión del hidrograma puede afectar el diseño. El hidrograma unitario adimensional, es obtenido a partir de varios hidrogramas registrados en una gran variedad de cuencas.

$$q_p = \frac{0.555A}{t_b}$$

$$t_b = 2.67t_p$$

$$t_p = 0.5d_e + t_r$$

$$t_r = 0.6t_c$$

$$t_c = 0.00032S \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right)$$

Kirpich.

$$t_c = 0.005 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$$

Chow.

$$d_e = 2\sqrt{t_c}$$

Cuencas grandes.

$$d_e = t_c$$

Cuencas pequeñas.

Donde:

q_p . Gasto de pico en $m^3/s/mm$.

A . Área de la cuenca, en Km^2 .

t_b . Tiempo base, en hr.

t_p . Tiempo de pico, en hr.

t_r . Tiempo de retraso, en hr.

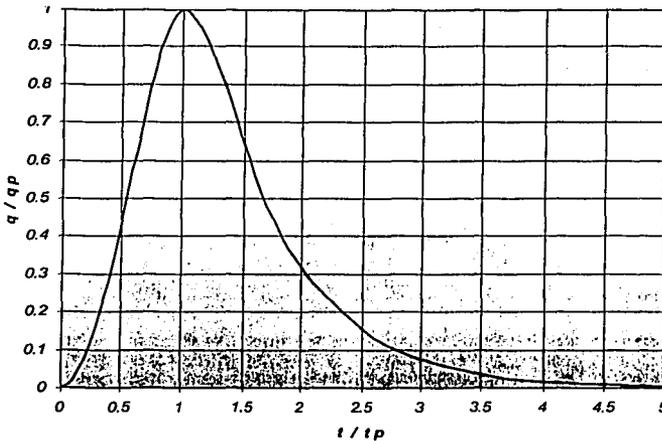
t_c . Tiempo de concentración, en hr.

d_e . Duración en exceso de la tormenta, en hr.

L . longitud del cauce principal, en m.

S . Pendiente del cauce principal, calculada con los métodos estudiados en la sección 2.3.5., adim.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



t/t_p	q/q_p
0	0
0.1	0.015
0.2	0.075
0.3	0.16
0.4	0.28
0.5	0.43
0.6	0.6
0.8	0.89
1	1
1.2	0.92
1.4	0.75
1.6	0.56
1.8	0.42
2	0.32
2.2	0.24
2.4	0.18
2.6	0.13
2.8	0.098
3	0.075
3.5	0.036
4	0.018
4.5	0.009
5	0.004

Figura 2.17 Hidrograma unitario adimensional

Para obtener un hidrograma unitario a partir del hidrograma unitario adimensional para una cuenca en particular se recomienda lo siguiente:

1. Se obtiene q_p , t_b y t_p .

$$q_p = \frac{0.555A}{t_b}$$

$$t_b = 2.67t_p$$

$$t_p = 0.5d_e + t_r$$

2. Se multiplican las ordenadas de hidrograma unitario adimensional por q_p .

$$q = q_p \left(\frac{q}{q_p} \right)$$

3. Se multiplican las abscisas del hidrograma unitario adimensional por t_p .

$$t = t_p \left(\frac{t}{t_p} \right)$$

4. Se traza el hidrograma unitario.

Donde:

q_p . Gasto de pico, en $m^3/s/mm$.

A . Área de la cuenca, en Km^2 .

t_p . Tiempo de pico, en hr.

t_r . Tiempo de retraso en hr.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3. APLICACIÓN A UN SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA

Para reducir los daños en una región debido a un fenómeno natural, se pueden poner en práctica medidas estructurales e institucionales. Las medidas estructurales se refieren, entre otras, a la construcción de obras tales como presas para controlar avenidas, muros perimetrales para aislar una zona de los flujos de agua, el aumento de la altura de los bordos de los ríos y el dragado de cauces para aumentar la capacidad de desalojo de sus corrientes.

Por otra parte, las medidas institucionales consisten en la aplicación de reglamentos sobre uso de suelo, el cumplimiento de especificaciones de la construcción para que las viviendas resistan, en cierto grado, los efectos de los fenómenos naturales, en reubicar definitivamente casas habitación de las zonas de peligro a sitios más seguros, en operar sistemas de alerta, etc.

3.1. Sistema de Alerta Hidrometeorológica

Una zona es propensa a inundarse cuando se encuentra en zonas topográficas de bajo nivel, como pueden ser valles y las orillas de los cauces y los ríos, que no necesariamente tiene que ser el sitio donde se presentó la precipitación. La inundación se produce cuando el agua pluvial que se presenta en una zona, excede durante cierto tiempo, su capacidad de desalojo de este líquido, por lo que la inundación de una región depende principalmente del área donde ocurre la precipitación, de la cantidad y duración de la lluvia, del escurrimiento superficial y de los ríos que la cruzan.

Para que se presenten los escurrimientos provocados por la lluvia deben de transcurrir varios minutos e incluso horas después de iniciada la tormenta, por lo que es posible anticiparlos, y advertir del peligro a la población. Esta idea es la base teórica de los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica.

El Sistema de Alerta Hidrometeorológica está basado en un conjunto de estaciones climatológicas e hidrométricas, ubicadas en las diferentes cuencas hidrológicas en que se divide la región en estudio (figura 3.1). Estas estaciones miden la intensidad de lluvia y los niveles de los cauces, y envían información en tiempo real a un puesto central de registro (figura 3.2). En este lugar se procesa la información de acuerdo con los modelos lluvia-escurrimiento correspondientes para estimar los gastos esperados en las zonas vulnerables y los pronósticos de los tiempos de la avenida. Al rebasarse los umbrales previamente establecidos, o al pronosticarse inundaciones se tratará de maximizar el tiempo para que se activen las alarmas, indicando a los usuarios, generalmente autoridades de Protección Civil, sobre el peligro de una posible inundación que pudiese provocar daños en ciertas áreas de la cuenca y poder poner así en marcha un plan de emergencia previamente establecido.

En el Centro Nacional de Desastres (CENAPRED) se han desarrollado sistemas como el descrito anteriormente, que se han instalado en varias ciudades del país. A continuación se presentan algunos conceptos básicos y figuras tomadas del "Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Acapulco Guerrero", informe interno del CENAPRED (referencia 13) en los que se plantea la filosofía de los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica.

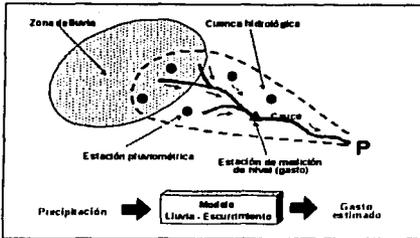


Figura 3.1 Medición del fenómeno hidrometeorológico
(fuente: CENAPRED)

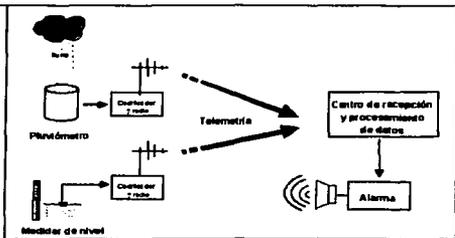


Figura 3.2 Sistema de medición y alerta
(fuente: CENAPRED)

De acuerdo a lo anterior, un Sistema de Alerta Hidrometeorológica, tiene como objetivo informar a las comunidades expuestas a daños por fenómenos hidrometeorológicos, para que con anticipación a la ocurrencia de sus efectos más severos las personas se alejen de las zonas de peligro y se emprendan acciones para reducir la pérdida de vidas humanas o pérdidas materiales que pudiera provocar.

3.1.1. Componentes de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica

Los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica están formados por varias partes que se complementan entre sí (figura 3.3).

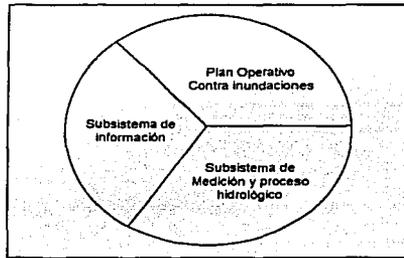


Figura 3.3 Componentes de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica
(fuente: CENAPRED)

El plan operativo consiste en el conjunto de instrucciones específicas para realizar de modo eficiente el traslado de las personas a los lugares seguros. Considera que los caminos hacia estos lugares sean cortos y no queden interrumpidos durante la ocurrencia del fenómeno hidrometeorológico. Deben formularse antes de la temporada en que suelen presentarse tales fenómenos.

El subsistema de información incluye los procedimientos para enterar a la población de los lugares seguros, las rutas hacia estos sitios desde sus viviendas, del momento de iniciar una evacuación.

El subsistema de medición y procesamiento hidrológico estima los efectos que producirá la lluvia en una región, en los minutos u horas posteriores a su ocurrencia, para advertir del peligro que podría generarse en

algunas zonas de una ciudad. Su objetivo es calcular, de preferencia con base en mediciones de lluvia o niveles de agua en cauces, los eventos que causan daños (escurrimientos, flujos de lodo, etc.), para que se actuase anticipadamente con la intención de disminuir sus consecuencias. Este subsistema se apoya en un estudio de ingeniería que permite obtener la magnitud de los efectos de la lluvia en las zonas que podrían sufrir mayores daños.

En la siguiente figura se destaca que tanto el plan operativo contra inundaciones como el subsistema de informaciones deben estar elaborados antes de la ocurrencia de un fenómeno hidrometeorológico importante, tomando en cuenta los tipos de peligro en las zonas de la región donde pueden ocurrir daños.

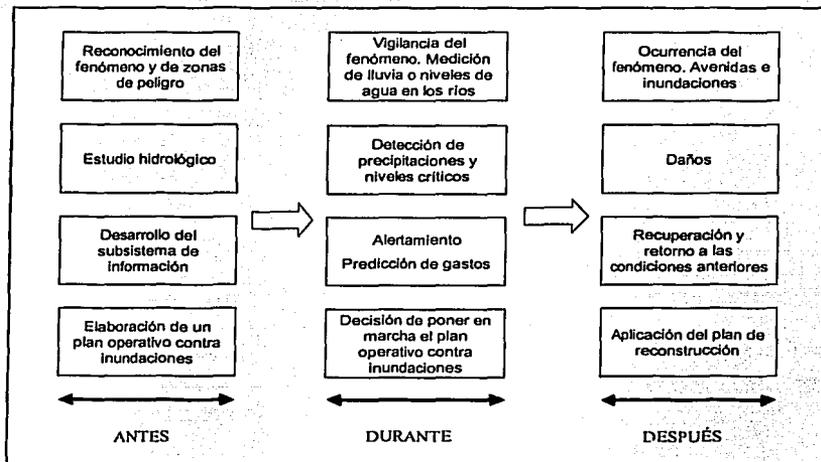


Figura 3.4 Actividades antes, durante y después de un fenómeno hidrometeorológico (fuente: CENAPRED)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.2. Marco de referencia

A continuación se presentan algunos datos y estadísticas que nos permiten entender la problemática que enfrenta la región del bajo Pánuco, tomados de los resultados del "Diagnostico de la Región Golfo-Norte", estudio elaborado por la comisión Nacional del Agua (referencia 8).

3.2.1 Localización

La cuenca del río Pánuco se encuentra situada geográficamente en la parte oriental de la Republica Mexicana entre los paralelos 19° y 24° de latitud norte y los meridianos 97° 45' y 101° 20' de longitud oeste (figura 3.5).

La cuenca del río Pánuco tiene como límites: al norte los estados de Nuevo León y Tamaulipas, al sur los estados de México, Tlaxcala y Puebla, al este el estado de Veracruz y al oeste los estados de San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro.

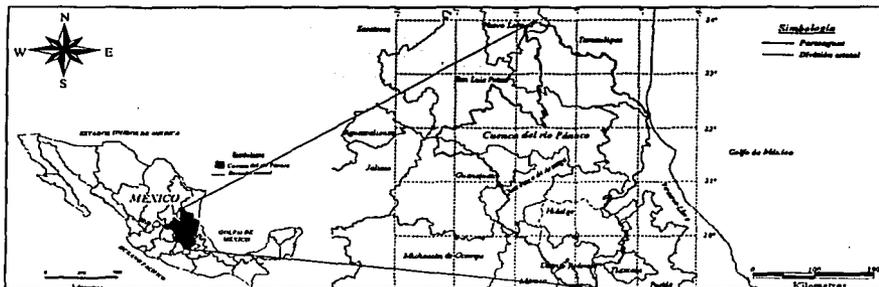


Figura 3.5 Localización de la cuenca del río Pánuco

La cuenca del río Pánuco es una de las regiones hidrográficas más importantes del país, tanto por la superficie que ocupa de 101, 305 Km², (4.97% del territorio nacional) que la sitúa en cuarto lugar, como por el volumen de escurrimientos, en que ocupa el quinto lugar en la Republica Mexicana.

Hidrológicamente la cuenca del río Pánuco se divide en alto y bajo Pánuco, abarcando la primera el Valle de México (Región administrativa No XIII) y la segunda gran parte de la Región Administrativa No. IX (68% del total) y juntas integran la Región hidrológica No.26 (figura 3.6) de acuerdo por la división establecida por la Dirección de Hidrología de la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1974).

Las regiones hidrológicas vecinas son: al norte las de San Fernando-Soto La Marina (R.H. 25) y El Salado (R.H. 37), al sur la del Balsas (R.H 18), al este la de Tuxpan-Nautla (R.H 27) y al oeste la del Lerma (R.H 12).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

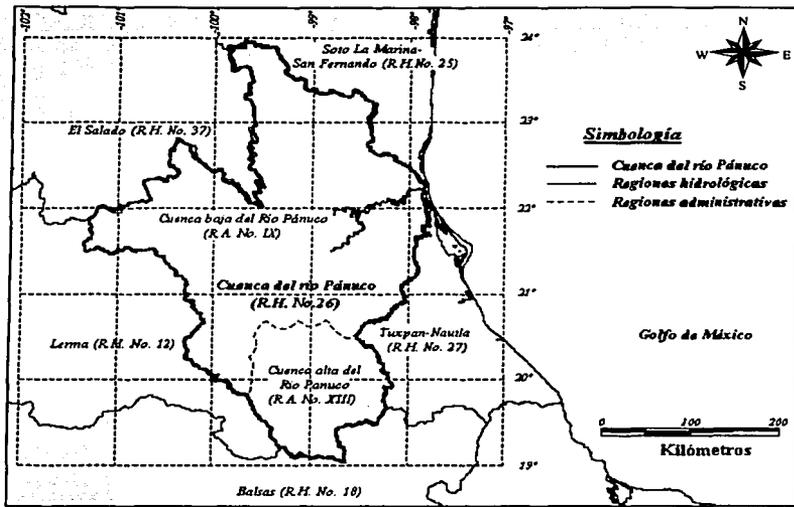


Figura 3.6 Regiones hidrológicas vecinas

La cuenca del bajo Pánuco recibe aportaciones procedentes de numerosas corrientes que se originan y fluyen por las siguientes entidades federativas:

Entidad	Área en Km ²	Porcentaje
México	2 422	2.80
Puebla	72	0.10
Hidalgo	16 956	20.00
Querétaro	9 351	11.00
Veracruz	10 295	12.10
Guanajuato	5 243	6.20
San Luis Potosí	23 503	27.70
Tamaulipas	16 615	19.50
Nuevo León	490	0.60
Total	84, 956	100.00

Tabla 3.1 Participación de cada estado en la cuenca del bajo Pánuco
(fuente: SARH)

Mientras que por su parte el alto Pánuco abarca un área de 16,349 Km² agrupando parte de los siguientes estados: México, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Veracruz y el Distrito Federal.

3.2.2. Población y sus características socioeconómicas

En la cuenca viven 22,160,293 personas (24.46 % de la población total del país), de la cual el 84.74% (18,778,632 personas) corresponde al alto Pánuco y el 15.265% (3,381,661 personas) al bajo Pánuco (INEGI 1995). En esta cuenca existen dos concentraciones importantes, una es la correspondiente a la Zona

Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y la segunda es el corredor Cd. Madero-Tampico (figura 3.7).



Población por subcuenca

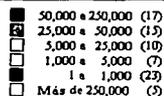


Figura 3.7. Población por subcuenca
(fuente: INEGI 1995)

Los municipios con mayor población en la cuenca del Bajo Pánuco son:

Bajo Pánuco	
Municipio	Habitantes
Cd. Madero Tamps.	182,325
Tampico, Tamps.	295,442
El Mante, Tamps.	112,602
Cd. Victoria Tamps.	263,063
Altamira, Tamps.	127,664
Cd Valles, SLP.	146,604
San Luis Potosí, SLP	670,532
San Juan del Río, Oro.	179,668
Total	1,977,900

Tabla 3.2 Municipios con mayor población
(fuente: INEGI 2000)



Densidad de población por subcuenca

(Habitantes por Kilómetro cuadrado)

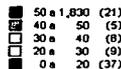


Figura 3.8 Densidad de población por subcuenca
(fuente INEGI 1995)

Los municipios que se muestran en la tabla 3.2 agrupan más del 50% de la población total de la cuenca del bajo Pánuco. Además, se observa de la figura 3.8, que la zona con mayor densidad de población después de la ZMCM, es el corredor Cd. Madero-Tampico con más de 50 personas por Km².

Existe un índice que permite diferenciar entidades federativas y municipios según el impacto global de las carencias que padece la población, como resultado de la falta de acceso a la educación, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios insuficientes y las relacionadas con la residencia en localidades pequeñas, llamado Índice de marginación, desarrollado por el Consejo Nacional de Población (CONAPO).

Según los criterios establecidos por CONAPO, el grado de marginación de la cuenca del bajo Pánuco es alto, ya que casi el 45% de la población vive en un nivel de marginalidad entre alto y muy alto (figura 3.9) y el 11% es analfabeta.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

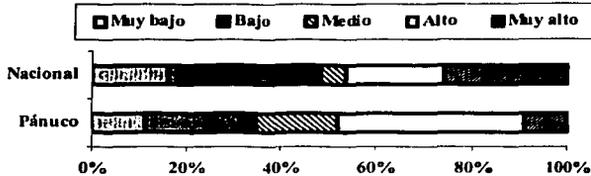


Figura 3.9 Distribución de la población por grado de marginación (fuente: CNA)

En esta misma zona se registran los niveles más bajos de cobertura de los servicios de agua potable, alcantarillado, energía eléctrica (figura 3.10) y cobertura médica (un médico por cada 1,200 habitantes).

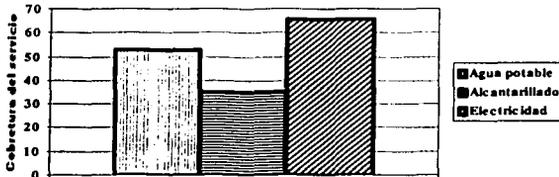


Figura 3.10 Cobertura de servicios (fuente: CNA)

El crecimiento natural y social de la población es reducido, alrededor del 0.75% anual; la categoría migratoria de la región se clasifica como en equilibrio; no se hacen patentes, a nivel regional, fenómenos de expulsión o de atracción poblacional, aunque a nivel localidad sigue la tendencia de fuerte atracción hacia las grandes concentraciones humanas y de expulsión desde las pequeñas.

Las actividades económicas más relevantes de la cuenca del bajo Pánuco son:

Agricultura, ganadería y pesca: Las actividades agrícolas son de riego y de temporal predominando en gran medida la última. Las actividades pecuarias representan del orden del 3% del nacional y se realizan básicamente en el norte de Veracruz, en San Luis Potosí y en Tamaulipas, se estima que la distribución del ganado es de: bovino 57%, porcino 13%, ovino 5% y caprino 25%, y una gran variedad de aves. La pesca es también importante en la zona, tanto en la explotación de recursos marinos del golfo de México, como en la pesca de agua dulce en la zona lagunar del río Tamesí y en diversos cuerpos de agua naturales y artificiales (presas).



Figura 3.11 Zona lagunar del río Tamesí.

Minería y extracción de petróleo: La minería se desarrolla principalmente en Hidalgo, San Luis Potosí y Querétaro, mientras que la actividad petrolera se lleva a cabo en Tamaulipas.

Industria manufacturera: Este sector se ha desarrollado fundamentalmente en la Zona Metropolitana de Tampico y en San Juan del Río, donde se han instalado numerosas industrias de las ramas química,

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

petroquímica, destaca el complejo petroquímico de Cd. Madero, celulosa y papel, entre otras; también es relevante la industria azucarera, conformada por varios ingenios localizados en Veracruz, San Luis Potosí y Tamaulipas, de entre ellos sobresalen los de Cd. Valles, en San Luis Potosí y Cd. Mante y Xicoténcatl, en Tamaulipas.

Electricidad: Existen tres grandes centrales termoeléctricas: El Sáuz, en Querétaro, Villa de Reyes, en San Luis Potosí y Altamira, en Tamaulipas, con una capacidad instalada conjunta de 1,700 megawatts (MW), la capacidad en hidroeléctricas apenas llega a los 20 MW.

Transportes y comunicaciones: La región cuenta con transporte ferroviario y con una red carretera que la comunican con el resto del país; sin embargo, la red interna de caminos es escasa con relación a la gran cantidad de localidades que es necesario integrar. En la región se localizan dos de los principales puertos del golfo de México: Tampico, que aprovecha una de las pocas corrientes fluviales navegables en México en la desembocadura del río Pánuco, y el puerto industrial de Altamira; estos puertos son la salida y entrada de exportaciones e importaciones por vía marítima, para la región y para el centro y noreste del país, con productos provenientes de todo el mundo.

3.2.3. Orografía

La cuenca del río Pánuco está conformada por una unidad orogénica: la Sierra Madre Oriental, una región geomórfica: la Planicie Costera Nororiental y una porción de la Altiplanicie Mexicana, por ello la zona se caracteriza por un relieve que varía desde las zonas planas y de lomerío suave, en la Planicie Costera, hasta las serranías de gran altitud y pendiente abrupta de la Sierra Madre.

La cuenca del bajo Pánuco se desarrolla tanto en la Sierra Madre Oriental (que penetra a la región por el Suroeste, pasando por los estados de Hidalgo y San Luis Potosí, desviándose hacia el estado de Nuevo León, alcanzando alturas hasta de 1000 m.s.n.m.) y sus estribaciones, como en la Planicie Costera del Golfo, en la planicie de inundación del río Pánuco, en la Mesa Central (altiplano), y hacia el sur en una pequeña porción del eje Neovolcánico. Esta morfología tiene gran influencia sobre la diversidad de climas y sobre la distribución de la precipitación en la región. La Sierra Madre constituye un frente orográfico, o barrera montañosa, que obstaculiza el paso de humedad hacia el altiplano.

3.2.4. Geología

La cuenca del bajo Pánuco se encuentra en gran parte dentro de la provincia noreste de México y en menor medida en el sureste del altiplano. La primera incluye a la Sierra Madre Oriental que está constituida principalmente por rocas sedimentarias cuyos espesores llegan a tener más de 4,000 m y forman una franja de montañas plegadas y afalladas; predominan las rocas calizas.

La llanura costera de Tamaulipas y parte de Veracruz, está caracterizada por la existencia de rocas sedimentarias clásticas de origen marino que, a diferencia de las de la Sierra Madre Oriental, no presentan plegamientos importantes. Las rocas de esta provincia ofrecen una fisonomía de lomeríos con pendientes suaves, las más antiguas son las lutitas.

El material que aflora está constituido en gran medida por sedimentos marinos no consolidados. Las zonas topográficamente más bajas, se encuentran rellenas por material aluvial no consolidado y constituyen los suelos; estos suelos tienen espesores variables, desde 0.1 m hasta 3 m ó más.

El origen y disposición de las rocas tienen efecto sobre la disponibilidad del agua superficial y subterránea. En las porciones de serranía que conforman un frente orográfico, donde abundan rocas permeables, se encuentran las zonas de recarga de los acuíferos profundos (profundidad del orden de varias decenas de metros), los suelos y las rocas impermeables favorecen el escurrimiento superficial y los suelos permeables están asociados a los acuíferos someros (profundidad de decenas de metros).

De esta forma, las zonas de recarga de los acuíferos profundos se encuentran en la Sierra Madre y los almacenamientos subterráneos se encuentran en el altiplano y desde la Sierra Madre hasta la Planicie Costera. los acuíferos someros se encuentran tanto en el altiplano como en la planicie costera del golfo de México (figura 3.12).

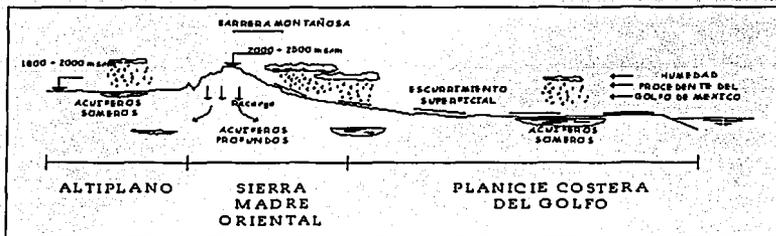


Figura 3.12 Relación entre las características físicas y la disponibilidad de agua en la región (fuente: CNA)

3.2.5. Distribución de lluvias

La distribución de la lluvia en la zona depende de las características morfológicas y geológicas antes explicadas y de los fenómenos meteorológicos que ahí acontecen.

De acuerdo con la información disponible en 60 años de registro entre 1931 y 1990, en algunos sitios del altiplano la precipitación llega a tener valores de 400 mm por año, al norte del paralelo 23° la precipitación anual oscila entre los 600 y 800 mm y en contraste, en la zona conocida como la Huasteca (límites de Veracruz, San Luis Potosí e Hidalgo), la precipitación llega a los 2,000 mm o más. En el mismo periodo, la precipitación media anual en toda la región hidrológica 26 fue de 950 mm. En esta cuenca la lluvia normal anual varía desde los 400 mm hasta los 2,400 mm. La distribución de la lluvia mensual, en toda la región, muestra una concentración en el periodo de mayo a octubre, lapso en que se acumula el 70% de la precipitación anual (figura 3.13).

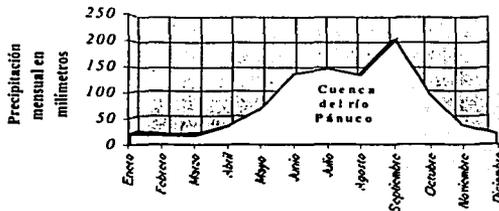


Figura 3.13 Distribución de la lluvia en la cuenca del río Pánuco en el año (fuente: CNA)

Por su ubicación geográfica, la cuenca del río Pánuco recibe humedad del golfo de México por la influencia de los vientos alisios del este, y al norte está condicionada por la oscilación del anticiclón del Atlántico. De mayo a octubre, el desplazamiento hacia el norte de la zona subtropical de alta presión da lugar a que los alisios aumenten gradualmente su intensidad y también a que se desplace hacia el norte la zona intertropical de convergencia, la cual transporta humedad del Ecuador hacia el norte. De junio a noviembre, la presencia de los fenómenos tropicales como lluvias convectivas, ondas y ciclones tropicales, determinan la lluvia en prácticamente toda la región. En ese periodo, normalmente se originan en el Atlántico ciclones tropicales que tienen su mayor frecuencia de aparición en septiembre, generalmente el valor máximo de precipitación se registra durante ese mes. Los ciclones tropicales al acercarse a los litorales nacionales favorecen la precipitación a lo largo de su trayectoria, y en ocasiones también la inducen en las altiplanicies centrales del territorio nacional. Los estados de Tamaulipas y Veracruz son dos de los estados con mayor frecuencia de entrada de ciclones tropicales en el litoral del golfo de México y el Caribe.

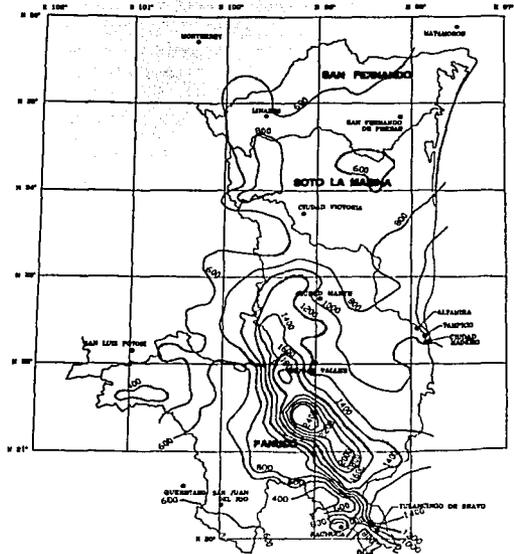


Figura 3.14 Isoyetas medias anuales 1930-1990 (fuente: CNA)

3.2.6. Fenómenos meteorológicos extremos

Hay dos fenómenos meteorológicos extremos que tienen particular importancia en esta región del país y que producen efectos negativos sobre el hombre, el ambiente y la economía de la zona: las sequías y las inundaciones. Las primeras producen una escasez relativa del agua en un lapso prolongado que tiene por consecuencia una reducción en la disponibilidad del agua para los usos del hombre y para mantener al medio natural; las segundas son un riesgo para la seguridad del hombre, para la infraestructura, para los cultivos y también para el medio natural, estas son más frecuentes que las primeras y están asociadas a la presencia de las avenidas producidas por las precipitaciones extraordinarias que ocurren en la época de lluvias.

Hay dos fenómenos meteorológicos extremos que tienen particular importancia en esta región del país y que producen efectos negativos sobre el hombre, el ambiente y la economía de la zona: las sequías y las inundaciones. Las primeras producen una escasez relativa del agua en un lapso prolongado que tiene por consecuencia una reducción en la disponibilidad del agua para los usos del hombre y para mantener al medio natural; las segundas son un riesgo para la seguridad del hombre, para la infraestructura, para los cultivos y también para el medio natural, estas son más frecuentes que las primeras y están asociadas a la presencia de las avenidas producidas por las precipitaciones extraordinarias que ocurren en la época de lluvias.



Figura 3.15 Efectos del huracán Gert en la zona, septiembre de 1993

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Las inundaciones son provocadas por la lluvia en exceso que se presenta cuando ocurren perturbaciones tropicales en todos sus niveles, desde ondas tropicales hasta huracanes. Durante los últimos 50 años han incidido en la región un total de 43 eventos, casi uno por año.

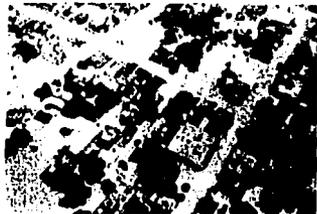


Figura 3.16 Vista aérea de zona afectada por Gert

El caso más sorprendente ocurrió en septiembre de 1955 cuando en el lapso de 30 días se presentaron 3 ciclones: "Gladys", "Hilda" y "Janet", dejando incommunicado a un gran sector del bajo Pánuco. El puerto de Tampico y Tamuín, en Tamaulipas y las poblaciones de Pánuco y el Higo, en Veracruz, sufrieron graves daños, permaneciendo aisladas por varias semanas. El gasto máximo registrado en esa ocasión, a la altura de Tampico, fue de 18,000 m³/s; Tampico tenía 158 mil habitantes y de esa población fue afectada el 50%, también se informaron daños a la agricultura en una superficie de 400,000 hectáreas (referencia 8).

El último evento que ocasionó grandes trastornos fue el huracán Gert, en septiembre de 1993. Este fenómeno generó lluvias extraordinarias provocando que, en los ríos Tamaoán, Moctezuma y Pánuco, se alcanzaran niveles extraordinarios con los consecuentes efectos negativos en Tamuín, Tampico y otras poblaciones (referencia 8).

Hasta ahora las medidas tomadas para contrarrestar el grave problema de las inundaciones han consistido en contar con sistemas de alerta adecuados, sin embargo existen proyectos identificados, desde hace varias décadas, para mitigar sus efectos, tal es el caso de los proyectos de las presas Tamesí y Pujal Coy, que no ha sido posible construir por razones financieras.

3.2.7. Uso de suelo y vegetación

La cuenca del río Pánuco presenta una gran diversidad en ecosistemas: pastizales, matorral xerófilo, bosque espinoso, bosque de coníferas y encino, bosque tropical perennifolio, bosque tropical subcaducifolio, bosque tropical caducifolio, bosque mesófilo, selva mediana sub-perennifolia, selva baja espinosa caducifolia, selva baja espinosa decidua, selva alta perennifolia y zonas agrícolas.



Figura 3.17 Altiplano, zona semidesértica, cactáceas y mezquite



Figura 3.18 Planicie Costera, zona húmeda, bosque tropical perennifolio

La erosión es uno de los factores que más impacta al ambiente en la cuenca. Los principales elementos que influyen en la erosión son: La accidentada orografía de las geoformas existentes, la lluvia y la composición física y química del suelo.

El grado de erosión en la cuenca del Pánuco es de nivel alto, desde 21 ton/ha/año hasta 196 ton/ha/año, en las cuencas de los ríos Moctezuma, Verde y Tamesí. (referencia 8).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.2.8. Clima

En la región de la cuenca existen varios tipos de climas debido a sus diversas altitudes y conformaciones topográficas, predominando el clima cálido-húmedo.

El clima húmedo y semihúmedo, se localiza a lo largo de la vertiente este de la Sierra Madre Oriental presentando, también el clima semihúmedo y una zona de transición con una superficie mediana de extensión.

En la zona cercana a la costa paralela a ella, se localizan climas húmedos, semihúmedos y una zona de transición que se presenta también en la vertiente este de la Sierra Madre Oriental en el Valle de Ocampo y en la zona del nacimiento del río Frío. En la zona norte y en la costa de parte noroeste se localiza el clima semiárido, que predomina en la mayor parte de la superficie de la región. El clima árido se localiza en pequeñas porciones de la ladera occidental de la Sierra Madre Oriental, donde además se presentan algunas franjas de climas semiáridos (referencias 8 y 20).

3.2.9 Temperatura

La temperatura media anual varía de los 22° C a los 26° C en la zona. Sólo en la región montañosa se observan temperaturas inferiores a los 18° C (referencias 8 y 20).

3.2.10. Hidrografía

Como se mencionó anteriormente la cuenca del río Pánuco se encuentra dividida en dos zonas: el bajo y alto Pánuco.

Colector general del alto Pánuco

El origen del colector general es el formador del río Tula después de la confluencia río San Juan se conoce como río Moctezuma y en la llanura costera, como Pánuco. La cuenca del alto Pánuco, se divide en tres subcuencas: la del río San Juan, la del río Tula y la correspondiente a la laguna de Metztlitlán.

Principales afluentes

Río	Aportadores
Metztlitlán	Arroyo Las Granadas
	Arroyo de Regla
	Río Mezquitlán
Amajaque	Río Barranca de Tlatepeche
San Juan	Río Prieto
	Río San Sebastián
	Río Caracol
Tula	Colector general de desagüe de la ZMCM

Tabla 3.3 Afluentes principales del Alto Pánuco

Colector general del bajo Pánuco

El bajo Pánuco está formado por las cuencas de los ríos Moctezuma, Extórax, Bajo Amajac, Tempopal, Tropaón, Pánuco y Guayalejo o Tamesí.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 3.19 Zona lagunar del río Tamesí

La zona de la cuenca del Pánuco se inicia a 1640 msnm, después de la confluencia de los ríos San Juan y Tula, lugar a partir del cual el colector general toma el nombre del río Moctezuma, sigue un rumbo NNE hasta que por la margen izquierda confluye con el río Extórax. A una altura de 930 m.s.n.m. y nuevamente cambia su rumbo a ENE. Aguas abajo, cerca de Tamazunchale, S.L.P. a 120 m.s.n.m. y por la margen derecha, confluyen con el río Amajac, inicia entonces su recorrido por la planicie costera y cambia su rumbo a NE hasta la confluencia con el río Tampaón.

Desde la confluencia del río Tempoal hasta la del río Tampaón, el Moctezuma sigue un rumbo NNE por una zona de topografía suave donde las elevaciones no exceden los 150 m.s.n.m., lo que provoca la formación de algunas pequeñas lagunas marginales.

A partir de la confluencia con el Tampaón, que ocurre a 20 msnm, el río Moctezuma recibe el nombre de río Pánuco y sigue un rumbo general de ENE hasta su desembocadura en el golfo de México, aguas abajo de las ciudades de Tampico y Cd. Madero Tamps. 16 Km antes de su desembocadura, el Pánuco recibe por su margen izquierda al río Tamesí (referencias 2 y 24).

Principales afluentes

Río	Aportadores
Extórax	Río Tierra Blanca
	Río Tolinán
Amajac	Río Tulancingo
	Río Amajaque
	Río Claro
Tempoal	Río Tenexco
	Río Garcés
	Río Hules
	Río San Pedro
	Río Altamira
Tampaón	Río Arroyo las Albercas
	Río Verde
	Río Gallinas.
	Río Valles
Tamesí	Arrollo Maravillas
	Río Jaumave
	Río Sabinas
	Río Comandante
	Río El Cojo
Río Tantuán	

Tabla 3.4 Afluentes principales del bajo Pánuco

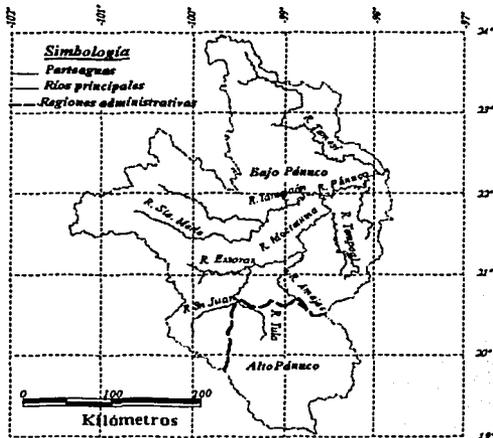


Figura 3.20 Principales afluentes del río Pánuco

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3. Aplicación de metodología utilizando ArcView GIS versión 3.2

Con la finalidad de comprender la potencialidad del uso de los Sistemas de Información Geográfica en hidrología, y su correspondiente aplicación en los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica, se hará una aplicación, en la parte baja de la cuenca del río Pánuco. Después de revisar las ventajas y desventajas y hacer una comparación de las características y funciones de los Sistemas de Información Geográfica con aplicación en hidrología (ArcView GIS versión 3.2, MapInfo Profesional versión 5.5, IDRISI, PCRaster, e ILWIS versión 2.2) se decidió que ArcView GIS versión 3.2, es el más adecuado para satisfacer nuestros propósitos.

La importancia actual del uso de técnicas de computo y la estrecha relación que existe entre la hidrología y la geografía, hacen que el empleo de un SIG en hidrología constituya un paso esperado en el avance de esta ciencia.

La topografía juega un papel muy importante en la forma en que el agua puede distribuirse y fluir a través de una superficie. Las herramientas de análisis hidrológico de ArcView GIS versión 3.2 provee diferentes funciones que permiten describir las características físicas de una superficie. Utilizando un Modelo de Elevación Digital, (MED o DEM por sus siglas en inglés) es posible determinar las características fisiográficas de una cuenca hidrología y cuantificar otros conceptos, útiles en los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica.

La forma más común de representar digitalmente la forma de la tierra es a través de un modelo basado en mallas de celdas o almacenamiento raster de información. Estos datos son utilizados en ArcView GIS versión 3.2 para cuantificar las características mencionadas anteriormente. La precisión de estos datos es determinada primeramente por la resolución del modelo (tamaño de celda) y resulta de vital importancia para la determinación de las características fisiográficas de una cuenca.

Los métodos para hacer la extracción de las características fisiográficas de una cuenca a partir de un Modelo de Elevación Digital pueden ser muy variados, dependiendo del tipo de información que se requiera y el origen del MED. Para obtener dicha información es necesario cumplir al menos con tres pasos elementales que permiten hacer los análisis deseados: llenado de depresiones del terreno, dirección de flujo y acumulación de flujo (figura 3.21).

A continuación se presenta un diagrama que muestra una metodología para la determinación y extracción de las características fisiográficas de una cuenca, mediante el análisis de un MED, siguiendo una técnica basada en diferentes programas ("scripts") o extensiones que nos permite automatizar los diferentes cálculos. El algoritmo de los "scripts" se realiza en lenguaje de programación "Avenue". Todas las extensiones se obtuvieron de internet. Pagina oficial de Environmental Systems Research Institute (www.arcscripts.esri.com).

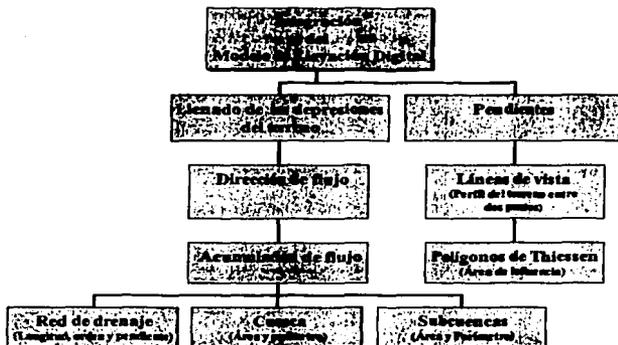


Figura 3.21 Diagrama de metodología para determinar las características fisiográficas de una cuenca

3.3.1. Modelo de Elevación Digital

Para obtener el MED nos enfrentamos a diferentes problemas principalmente relacionados con la magnitud del área requerida (cerca de 100,000 Km²). Primeramente se intento utilizar un MED del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), basados en cartas a escala 1:250,000 y que finalmente no fue posible porque se requería más de una carta (11 en total). Por este camino se enfrentó el problema de la unión de las mismas y que fueran reconocidas por el programa como una sola, lo cual no fue posible. Finalmente se optó por utilizar el procedimiento descrito en la sección 1.10.

El Modelo de Elevación Digital se determinó a partir del software Geomododelos de Altimetría del Territorio Nacional (GEMA), de INEGI, basado en cartas escala 1:250,000, que contiene el relieve de la República Mexicana. Posteriormente fueron procesados en el Software Surfer versión 7.0, para darles un formato adecuado.

Para hacer la extracción de los datos del programa GEMA, fue necesario conocer primeramente la ubicación de la cuenca del río Pánuco y los mosaicos de un grado por un grado, a la cual pertenece (figura 3.22), según las coordenadas geográficas terrestres. La extracción de los mosaicos se realiza uno a uno y se les dio el tratamiento adecuado que el instructivo del programa indica para convertirlos de formato binario a un arreglo de números reales. Posteriormente, fueron juntados y recortados de acuerdo a nuestras necesidades, con lo cual quedaron listos para ser manipulados en Surfer versión 7.0. Los datos hasta ese momento fueron puntos con coordenadas (x,y,z) correspondientes a los mosaicos que fueron extraídos.

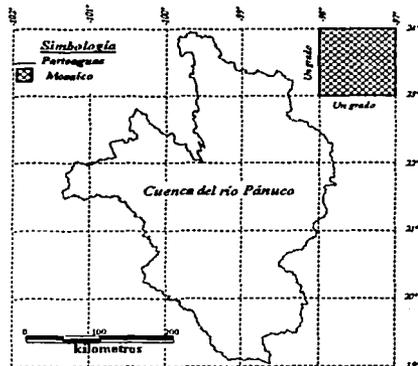


Figura 3.22 Mosaicos correspondientes a la cuenca del río Pánuco

El software Surfer versión 7.0, se utilizó con dos finalidades: La primera para dar formato al archivo, lo cual permitirá ser leído por Arc View GIS versión 3.2.

La segunda fue para hacer algunas pruebas de interpolación espacial de los datos que se obtuvieron del GEMA. Para cada mosaico de un grado por un grado se obtuvieron 160,000 puntos, por lo tanto para los 25 mosaicos correspondieron 4,000,000 de puntos. La interpolación se hace para hacer más nutrida la malla de puntos (menor de 5,000,000 de puntos) y que posteriormente se reflejará en la resolución del MED. La interpolación que utilizamos con Surfer Versión 7.0 fue la de Kriging con 2236 filas y 2236 columnas, lo cual permitió obtener 4,999,696 puntos.

En este aspecto el equipo de cómputo utilizado (PC Pentium III, memoria RAM de 128 Mb, disco duro de 10 Gb) fue una limitante así como también el software Surfer versión 7.0 que nos permite solamente manipular 5,000,000 de puntos, y por lo tanto para nuestro trabajo no se realizó este proceso. En este punto cabe mencionar que Surfer versión 7.0 hace la interpolación para mosaicos de grados rectangulares o cuadrados solamente.

Una vez obtenido el archivo con el formato adecuado para ArcView GIS versión 3.2, se realizaron los procedimientos necesarios (los procedimientos realizados con el SIG ArcView GIS version 3.2 se describen en la anexo 'A') para obtener el Modelo de Elevación Digital contrastado (figura 3.23) con el sombreado del MED (figura 3.25). El numero de celdas de este modelo es de 3,251,916 celdas y el tamaño de celda mínima que se obtuvo fue de 300 m (0.09 Km²).

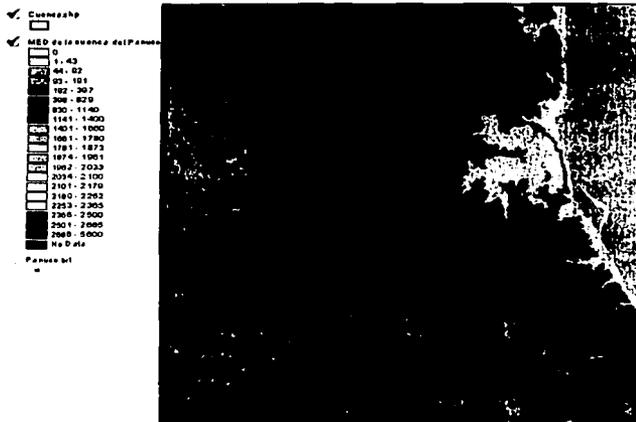


Figura 3.23 Modelo de Elevación Digital contrastado

En la figuras 3.23 y 3.24 se puede apreciar la topografía de la cuenca del río Pánuco, de donde se pueden distinguir principalmente 3 zonas bien definidas, que son: baja, media y alta. La primera correspondiente a la zona costera de golfo de México (0-100 m), la segunda es la Sierra Madre Oriental (100-1,000 m) y la última el altiplano mexicano y parte del eje Neovolcánico (más de 1,000 m)

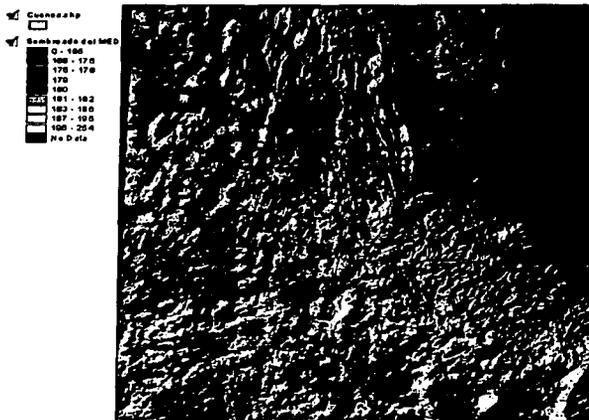


Figura 3.24 Sombreado del Modelo de Elevación Digital

La resolución del MED está en función del tamaño de celda. Entre menor sea esta, es mucho mejor para determinar las características fisiográficas de una cuenca hidrográfica. En la figura 3.25 se muestra un MED con tamaño de celda de 2,500 m de lado (6.25 Km²).

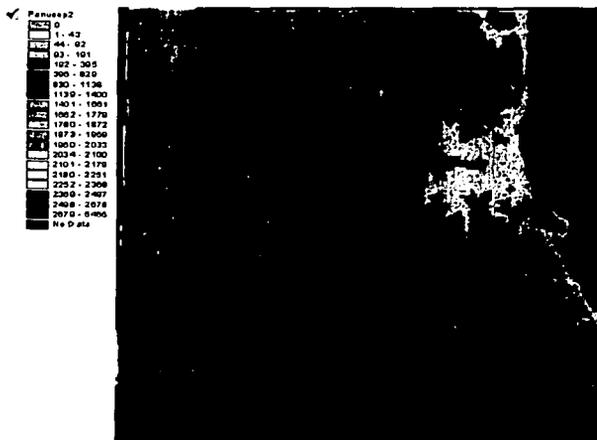
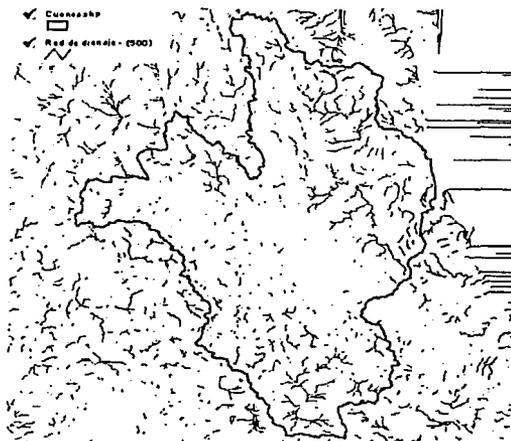


Figura 3.25 Modelo de Elevación Digital con celda de 2500 m por lado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3.2. Llenado de las depresiones del terreno

En el desarrollo de este trabajo se presentó una gran dificultad, la cual después de un tiempo se resolvió. Esta consistió en que al momento de determinar la red de drenaje, esta se construía presentando siempre sus corrientes que no se definían correctamente, es decir la red de drenaje no estaba unida completamente porque presentaba tramos en que la corriente no existía (figura 3.26), y se llegó a creer que estaba en función de la resolución del MED.



Después de analizar este problema y consultar bibliografía especializada se llegó a la conclusión que esto sucedía debido a la presencia de depresiones de terreno naturales o generadas por la interpolación espacial que propician una interrupción en el proceso de acumulación de celdas.

Para resolver esta problemática, existen algunos métodos dependiendo del software que se este utilizando. Para el caso de Arc View GIS versión 3.2 consiste en el llenado de las depresiones hasta una cierta altura que permita su drenado. Este proceso es iterativo hasta obtener un MED sin ninguna depresión (celdas deprimidas), cuando las celdas o áreas que presentan este problema son muchas.

Figura 3.26 Red de drenaje con corrientes no definidas

Este problema se presenta principalmente en dos situaciones: la primera es cuando la celda deprimida tiene una elevación menor que las ocho celdas que la rodean (figura 3.28) y la segunda es cuando las celdas que la rodean tienen la misma elevación (zonas planas o sin pendiente).

En la figura 3.27 se presentan las celdas deprimidas en el MED, que representan un 0.257 % (8360 celdas) del total de las celdas del modelo de elevación digital (3251916 celdas), esto implica que por cada mosaico de un grado por un grado, existen 335 celdas que presentan depresión.

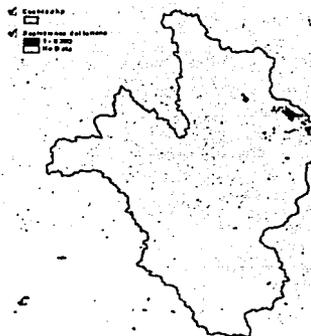


Figura 3.27 Celdas que presentan depresiones de terreno

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3.3. Dirección del flujo

Una de las claves del modelado hidrológico lo constituye la determinación de la dirección de flujo de cualquier punto de una cuenca (cualquier celda). El proceso de cálculo de la dirección de flujo consiste en determinar la dirección de máxima pendiente hacia abajo de la malla hacia una de sus ocho celdas vecinas. La dirección del flujo es determinada por el "aspecto" o dirección de la pendiente, esto es, la dirección donde se produce la mayor velocidad de cambio de elevación en un modelo digital de elevación. Existen ocho direcciones posibles de flujo de una celda, considerando las ocho celdas adyacentes: 1=E, 2=SE, 4=S, 8=SW, 16=W, 32=NW, 64=N y 128=NE (figura 3.28).

Dado que el flujo de agua a través de la superficie es siempre en la dirección de máxima pendiente, una vez que la dirección de flujo es conocida es posible determinar cuales y cuántas celdas fluyen hacia una celda particular. Esta información puede ser utilizada para definir los límites de las cuencas y la red de drenaje.

En la figura 3.29 se muestra la dirección de flujo para la cuenca del río Pánuco, además en la figura 3.31 se presenta una gráfica donde observamos el número de celdas y su dirección.

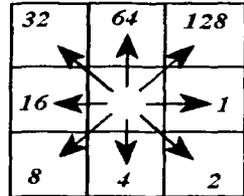


Figura 3.28 Direcciones de drenaje local

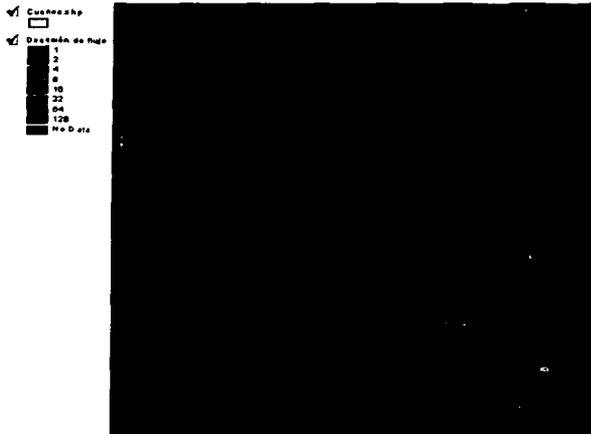


Figura 3.29 Dirección de flujo de la cuenca del río Pánuco

Como podemos observar en la figura 3.30, la dirección con mayor número de celdas es la correspondiente a la dirección este, lo cual se debe principalmente a la manera en que el programa realiza la asignación de dirección local (si dos o mas celdas de la vecindad con la pendiente más fuerte son encontradas, entonces, la dirección de drenaje local se asigna mediante una selección un poco arbitraria que resulta de una sobrestimación de las direcciones de drenaje hacia el este).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

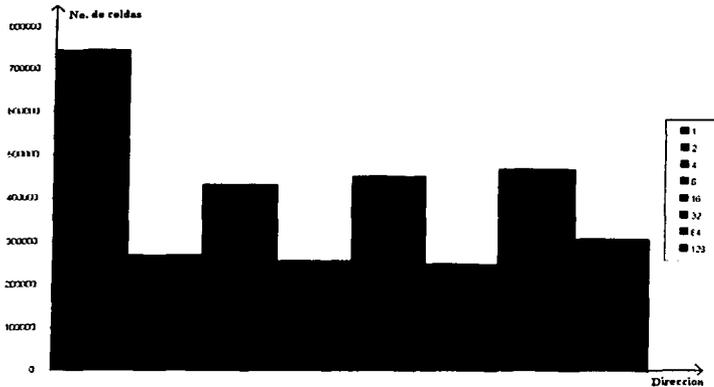


Figura 3.30 Celdas y su dirección

3.3.4. Acumulación de flujo

Constituye el peso acumulado en una celda determinada de todas celdas que fluyen pendiente abajo hacia la misma. De este modo es posible conocer rápidamente la cantidad de agua que puede recibir una celda determinada.

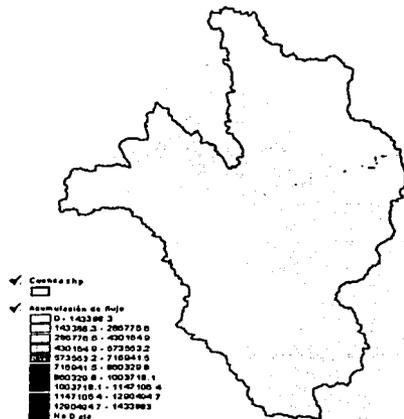


Figura 3.31 Acumulación de flujo para la cuenca del río Pánuco

Asimismo, el cálculo de flujos acumulados posibilita también determinar la cantidad de agua de lluvia que puede fluir por una celda dada, asumiendo que toda la lluvia se convierte en escurrimiento superficial y que no existe infiltración, evapotranspiración u otras pérdidas de agua.

En la figura 3.31 se presenta la acumulación de flujo para la cuenca hidrológica en cuestión. Como podemos apreciar se distingue una corriente principal que formará parte de la red de drenaje que se determinará más adelante. A partir de este momento se pueden determinar las características fisiográficas de la cuenca en estudio, como el parteaguas, subcuencas y red de drenaje con sus respectivas características.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3.3.5. Cuenca

La cuenca pudo delimitarse automáticamente (determinación del parteaguas) a partir del MED, utilizando como entrada de información, la dirección y acumulación de flujo, lo cual permitió conocer el área de contribución.

En la figura 3.32 se presenta delimitada la cuenca del río Pánuco realizada con Arc View versión 3.2, además de la cuenca del río Pánuco digitalizada a partir del mapa de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), escala 1:1,000,000, con lo que será posible realizar una comparación entre ambas.

De la figura 3.32 se observa que la mayor parte de la cuenca que se obtiene con Arc View GIS versión 3.2 (cuenca achurada, Cuenca.shp) coincide con la cuenca digitalizada de la SARH (parteaguas en color rojo, Parteaguas.shp) y es por demás aceptable, pero en su parte noroeste, que corresponde en parte a los estados de San Luis Potosí y Tamaulipas, no sucede lo mismo. En esta parte la cuenca que se obtuvo a partir del MED toma un poco más de área de lo que le corresponde, según la cuenca digitalizada a partir del mapa de la SARH.

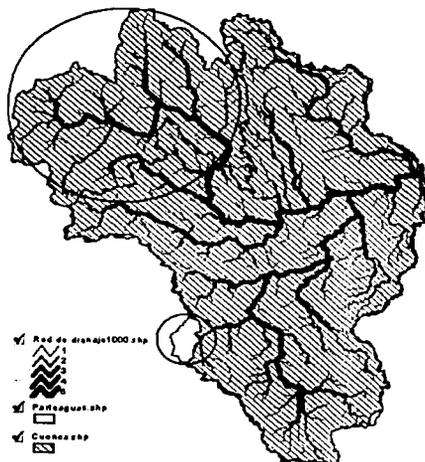


Figura 3.32 Cuenca resultado del análisis con ArcView GIS versión 3.2 y cuenca digitalizada de la SARH

Lo descrito anteriormente es uno de los problemas a los que nos enfrentamos al utilizar un MED. El problema puede tener dos hipótesis:

a) Cuando las celdas que representan una zona muy plana con pendiente cercana a cero (figura 3.33c), y la diferencia de elevaciones dentro y fuera del parteaguas de la cuenca digitalizada es mínima (menos de 1 m), al hacer el llenado de las depresiones del terreno, el programa llena algunas celdas de la parte baja hasta una elevación adecuada que permita unir la parte alta al noroeste de la zona en cuestión y al noreste (figura 3.33b), con lo cual hace que las celdas del flujo acumulado se unan y reconozca parte de la cuenca que no le pertenece.

b) Cuando la diferencia de elevaciones son mínimas (menos de 1 m), el programa hace su llenado de las depresiones y une las celdas para formar la acumulación de flujo, y por lo tanto la reconoce como parte de su área de aportación. Entonces lo anterior nos indica que el parteaguas de la cuenca del Pánuco, digitalizada de la SARH está mal. Para corroborar alguna de las dos hipótesis anteriores sería necesario verificarlo físicamente haciendo un análisis minucioso de la topografía de la zona.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

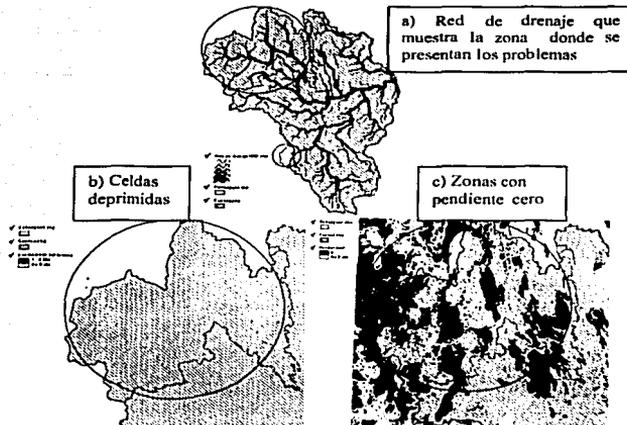


Figura 3.33 Problemas que influyen en la definición del parteaguas de la cuenca del río Pánuco

Haciendo un análisis más minucioso, de las figuras anteriores se desprende que el problema que nos interesa se localiza exactamente en la intersección entre el círculo mayor, el parteaguas, y la red de drenaje (figura 3.33a), observamos, que en esta zona en particular existen varias celdas que presentan depresión del terreno (figura 3.33b), además de que la pendiente es igual a cero (figura 3.33c).

Como los problemas anteriores son similares a lo que se presenta con la cuenca del Valle de México, la cual, forma parte de la cuenca del río Pánuco porque sus aguas son desalojadas artificialmente por medio de colectores, y el programa la toma en cuenta, entonces, concluimos que la hipótesis a) es la verdadera, por lo tanto se procederá a corregir este problema.

El procedimiento consiste en recortar la parte del MED que nos esta causando problemas, que son las partes altas del noroeste de la zona en cuestión. Con este procedimiento estamos obligando al parteaguas a definirse por donde debe de pasar, evitando así el llenado de depresiones en la zona con pendiente cercana a cero, y por consecuencia la acumulación de flujo de la zona recortada, pero por otro lado, se cae en un proceso artesanal y que para casos donde de antemano el parteaguas de la cuenca que nos interesa no se conoce, se podrían tener grandes dificultades en la delimitación del parteaguas.

Con el proceso de recorte utilizado se obtuvo el parteaguas de la cuenca del río Pánuco de la figura 3.34 (cuenca achurada), que como podemos observar es prácticamente idéntico al digitalizado del mapa de la SARH. El área de la cuenca que arrojó Arc View versión 3.2 es de 96,855.74 Km². En la tabla 3.5 se hace una comparación de áreas de la misma cuenca con otros datos obtenidos de diferentes fuentes.



Figura 3.34 Cuenca resultada de recortar el MED

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Comparación de áreas de la cuenca del río Pánuco		
Cuenca	Área (Km ²)	ER (%)
1. Con ArcView GIS versión 3.2	96,855.74	0
2. Digitalizada de plano SARH	97,390.17	0.6
3. http://www.crrw.utexas.edu/gis/gishydro02/GISHydro2002.htm	98,000	1.2
4. Boletín hidrológico	101,305.00	4.6

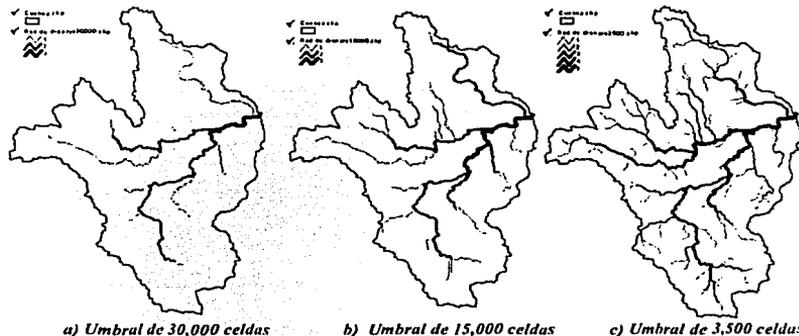
Tabla 3.5 Comparación de áreas

Analizando los datos anteriores, podemos concluir que el resultado obtenido presenta una variación muy pequeña con respecto a los resultados obtenidos con base en un SIG (error relativo de 1.2%) y presenta una mayor diferencia con los datos que maneja el boletín hidrológico No. 32 de la SARH (error relativo de 4.6 %). Por lo tanto el área que se obtiene con ArcView GIS versión 3.2 es por demás aceptable.

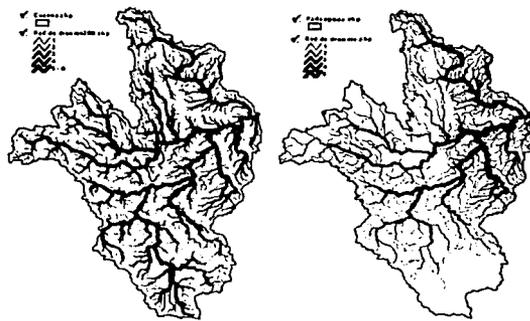
3.3.6. Red de drenaje

La red de drenaje puede ser delineada a partir del MED utilizando la información de la dirección y acumulación de flujo. Además, es posible asignarle orden, longitud y pendiente a cada uno de los distintos cursos que conforman la red de drenaje de una cuenca dada. Para asignar el orden ArcView GIS versión 3.2, utiliza el método de Strahler descrito en la sección 2.3.3.

La determinación de la red de drenaje de una cuenca con ArcView GIS versión 3.2 se basa en un umbral mayor de cero que representa la acumulación mínima de celdas para determinar una corriente (longitud mínima para definir una corriente). Esto permite determinar las corrientes principales de la cuenca, así como también influirá en el orden de la red de drenaje. Entre más grande sea el umbral utilizado, el orden de la red de drenaje será menor y viceversa, tal como se muestra en la figura 3.35.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



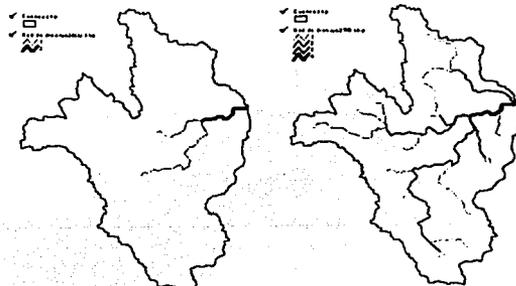
d) Umbral de 250 celdas

e) Red de drenaje digitalizada del plano de la SARH

Figura 3.35 Red de drenaje con diferentes umbrales, y tamaño de celda de 300 m por lado

Haciendo referencia a las figuras anteriores, se observa que todas las figuras muestran una red de drenaje con el mismo patrón de definición, para el umbral menor de la figura 3.35a (30,000 celdas) presenta una red de drenaje con una menor densidad (orden 3) que la mostrada en la figura 3.35d (250 celdas), que resulta de orden 6. Además, esta última configuración es la más parecida a la red de drenaje digitalizada del plano de la SARH (figura 3.35e), pero difiere en el orden de la red de drenaje, tal como se muestra en la figura. El orden de la red de drenaje digitalizada es de 5, mientras que la que se obtuvo con Arc View GIS versión 3.2 es de orden 6. Otro aspecto importante que hay que destacar es que la red de drenaje que tiene orden 5 (figura 3.35c), y su densidad de corrientes es muy diferente a la red de drenaje digitalizada.

Otro aspecto que cobra importancia en la definición de la red de drenaje es el tamaño de la celda, tal como lo deja ver la figura 3.36a, donde la red de drenaje con umbral de 3, 500 celdas y tamaño de celda de 2,500 m de lado (6.25 Km²) difiere en la densidad de corrientes con respecto a la figura 3.35c que se determinó con un tamaño de celda de 300 m por lado (0.09 Km²) y el mismo umbral de 3,500 celdas. Este mismo patrón se observa en la figura 3.36b en comparación con la figura 3.35d, que se manifiesta en la longitud de las corrientes y el orden de las mismas.



a) Red de drenaje con umbral de 3, 500 celdas

b) Red de drenaje con umbral de 250 celdas

Figura 3.36 Red de drenaje con diferentes umbrales y con tamaño de celda de 2,500 m por lado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3.7. Subcuencas

Asimismo, a partir de una cuenca delineada, es factible delinear nuevas subcuencas. Debido que muchas subcuencas pueden resultar de dimensiones muy pequeñas y sin interés para la aplicación, el usuario tiene la posibilidad de especificar el tamaño mínimo deseado para las subcuencas.

Para la determinación de subcuencas, como se mencionó anteriormente en el caso de la red de drenaje, se puede especificar el tamaño mínimo de ellas. Este tamaño mínimo se basa en un umbral mayor que cero, que representa el número de celdas mínimas que se deben de juntar para formar una subcuenca (área mínima para definir una subcuenca). Entre más grande sea el umbral, el número de subcuencas será menor y viceversa.

En la figura 3.37 se presentan las subcuencas correspondientes a la cuenca del río Pánuco con diferente umbral.

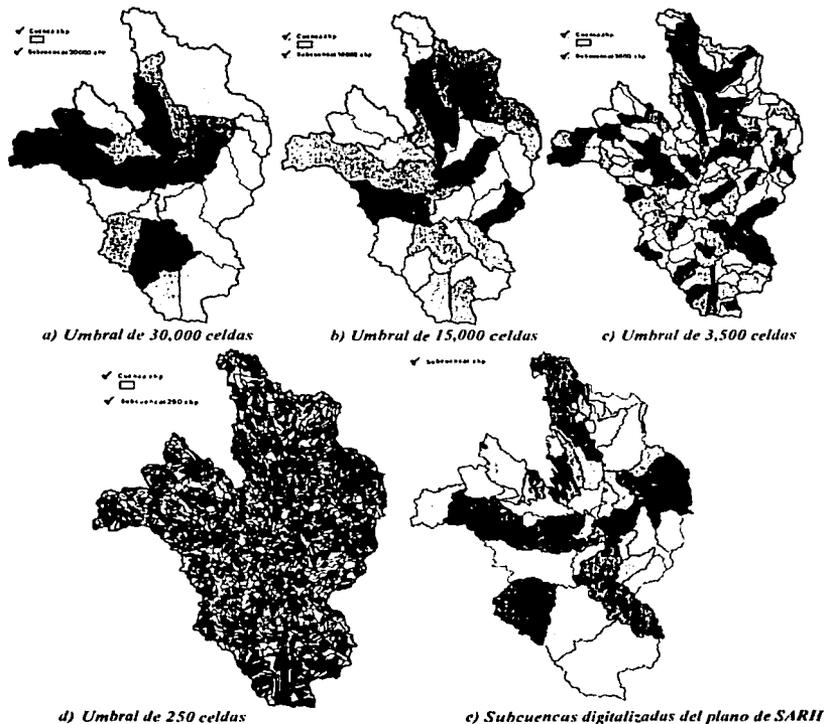
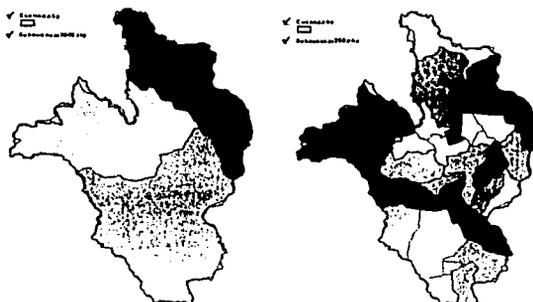


Figura 3.37 Subcuencas con diferentes umbrales y tamaño de celdu de 300 m por lado

Como se mencionaba anteriormente, para el caso de la red de drenaje inflúa su densidad, este mismo razonamiento aplica para el caso de las subcuencas, pero con una pequeña diferencia que radica en la comparación hecha entre las subcuencas resultado del análisis con Arc View GIS versión 3.2 y las subcuencas digitalizadas. Las subcuencas que presentan una similitud con las obtenidas mediante la digitalización a partir del mapa de la SARH corresponden a las obtenidas con un umbral de 15,000 celdas y con tamaño de celda de 300 m por lado, mientras que el umbral para la red de drenaje fue de 250 celdas con el mismo tamaño de celda.

El tamaño de celda también afecta en la definición de las subcuencas. Comparando las figuras 3.38a y 3.38b definidas a partir de celdas con tamaño de 2,500 m por lado y umbrales de 3,500 y 250 celdas respectivamente, con sus correspondientes, que son las figuras 3.37c y 3.37d definidas con tamaño de celda de 300 m por lado, se refleja en dos grandes aspectos que son: la definición de las subcuencas es menos detallada y el segundo es que disminuye el número de subcuencas y por lo tanto el área de aportación de cada una aumenta, al aumentar el tamaño de la celda.



a) Subcuencas con umbral de 3500 celdas

b) Subcuencas con umbral de 250 celdas

Figura 3.38 Subcuencas con tamaño de celda de 2,500 m por lado

Como se vio anteriormente, la selección del umbral afecta la definición, densidad y número de elementos en la definición de la red de drenaje y de las subcuencas, así como en las como también en el tiempo de determinación de la siguiente forma: entre más grande sea el número del umbral, el proceso será más rápido y viceversa.

La selección del número de umbral puede llevar a un proceso iterativo, para obtener una red de drenaje y subcuencas de acuerdo a nuestras necesidades, porque la definición de estas características depende tanto del tamaño de la celda como del umbral mismo. El número de umbral adecuado se determina con base en experiencias; sin embargo, un buen número de umbral para iniciar un proceso de este tipo es:

$$\text{No. de Umbral} = \text{No. de Celdas} / 500$$

Pero todo dependerá para que fin se vayan a utilizar los resultados.

Cuando se emplea el mismo número de umbral para determinar la red de drenaje y las subcuencas, implica que a cada subcuenca le corresponde una y solo una corriente.

Cuando se trabaja con un MED con tamaño de celda de 100 m, el número de umbral 75 celdas da origen a una red de drenaje muy similar a una que se obtiene manualmente con planos escala 1:50,000.

3.3.8. Pendientes

Los mapas de pendiente (grado o porcentaje), aspecto de la pendiente, relieve de sombras, son algunos de los productos derivados del análisis topográfico a partir de un MED. También permite realizar mapas de pendientes con algún intervalo deseado. Con el procedimiento mencionado se pueden determinar zonas con pendiente muy baja (zonas planas con pendiente cero), y/o zonas con pendientes grandes (zonas de cañada).

En la figura 3.39 se muestra las pendientes correspondientes a la cuenca del Pánuco, donde se pueden apreciar los cambios topográficos que presenta el MED, en una franja bastante grande; paralela a la costa, la pendiente es muy baja y lo que corresponde a la Sierra Madre oriental la pendiente es considerable.

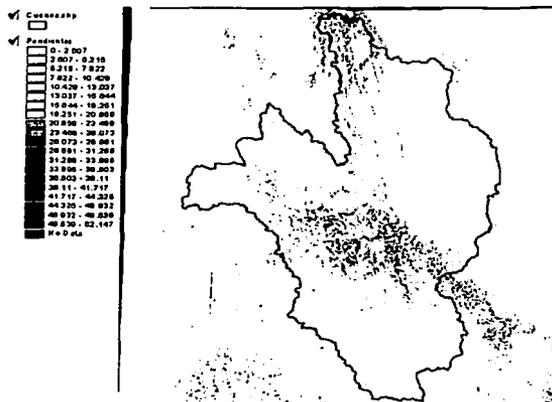


Figura 3.39 Pendientes de la cuenca del río Pánuco

3.3.9. Otras características

Como se representó en el diagrama de metodología para determinar las características fisiográficas de una cuenca (figura 3.21), existen otras características que podemos determinar a partir del análisis de un Modelo de Elevación Digital, como son: líneas de vista y polígonos de Thiessen, las cuales se utilizarán en la siguiente sección, en lo que se refiere a la aplicación del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de la parte baja del río Pánuco.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4. Integración de la Metodología y Sistema de Alerta Hidrometeorológica

El uso de un SIG, como Arc View GIS versión 3.2, nos ha permitido determinar algunas de las características fisiográficas de una cuenca de una manera automatizada, pero para aprovechar de una forma mas completa el SIG se hará una aplicación a un Sistema de Alerta Hidrometeorológica en la parte baja de la cuenca, es decir en la salida de la cuenca del río Pánuco (figura 3.40).

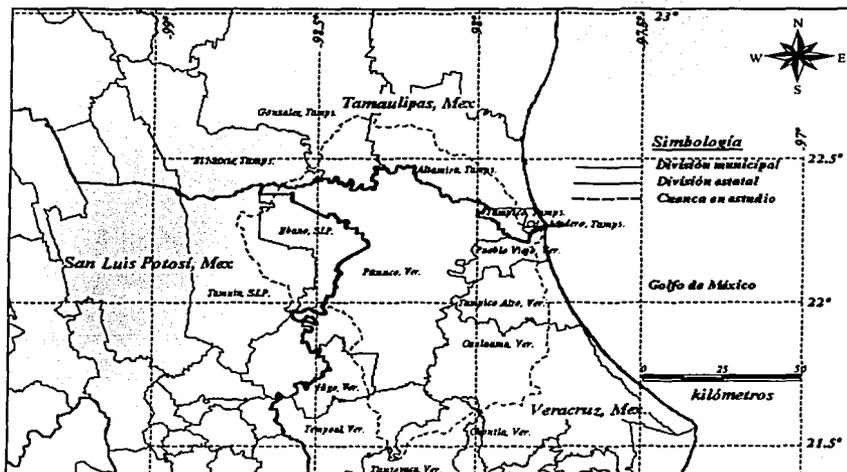


Figura 3.40 Localización de la zona de estudio

Municipio	Habitantes
Altamira, Tamps.	127,664
Cd. Madero, Tamps.	182,325
Tampico, Tamps.	295,442
González, Tamps.	41,455
El Mante, Tamps.	112,602
Ozuluama, Ver.	24,394
Pánuco, Ver.	90,657
Chontla, Ver.	15,072
Higo, Ver.	18,446
Tempoal, Ver.	36,359
Tantoyuca, Ver.	94,829
Pueblo Viejo, Ver.	50,329
Ebano, SLP	39,687
Tamuín, SLP	35,087
Tampico Alto, Ver.	12,643
Σ	1,176,991

Tabla 3.6 Población en los municipios de la zona de estudio (fuente: INEGI 2000)

La zona de estudio (Parte baja de la cuenca) comprende 15 municipios de los estados de Tamaulipas (5), Veracruz (8) y San Luis Potosí (2), con una población total de 1,176,991 habitantes hasta el año 2000 (tabla 3.6). Por su parte la población que se encuentra dentro de la cuenca en estudio es de 529,351 habitantes (INEGI 1995)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

La aplicación en esta zona de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica, se da por las siguientes razones:

- Existen varios núcleos poblacionales y agrícolas de importancia a nivel nacional
- Esta zona, frecuentemente se ve afectada por ciclones tropicales y otros fenómenos hidrometeorológicos, que a su vez, provocan inundaciones, y por consecuencia, pérdidas humanas y materiales
- Como se mencionó en la sección 3.1, un Sistema de Alerta Hidrometeorológica se utiliza para alertar a la población afectada por fenómenos hidrometeorológicos para alejarse de las zonas de peligro, y así poder emprender acciones para reducir las pérdidas, sobre todo, de vidas humanas y materiales que pudieran provocar

Para hacer esta aplicación es necesario conocer las características fisiográficas de la cuenca en estudio, en este caso la del río Pánuco; hacer uso de datos tales como: precipitación y gasto, para poder predecir el escurrimiento que pasa por algún punto predeterminado de una corriente. Para poder utilizar los resultados que se obtienen con un SIG, como Arc View GIS versión 3.2, se ha visto que el Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (referencia 12) es un modelo lluvia-escurrimiento que tiene una respuesta hidrológica relacionada con la morfología de la cuenca, evitando así las limitaciones a que se enfrenta con el uso de los métodos tradicionales basados en la calibración del hidrograma unitario, al no contar con registros históricos de escurrimientos en el sitio de interés.

Aplicar este método a una cuenca con un área cercana a los 100,000 Km² cae fuera de las hipótesis consideradas para la aplicación de cualquier método lluvia-escurrimiento y en especial el HUIG, las cuales son (referencia 18):

1. La intensidad de la precipitación pluvial es constante en su duración o un período especificado. Esto requiere utilizar una tormenta de poca duración, llamada tormenta unitaria, para la derivación del hidrograma unitario.
2. La lluvia efectiva se distribuye en toda la cuenca de drenaje. Esto especifica que el área de drenaje debe ser lo bastante pequeña como para que la lluvia sea casi constante en toda el área. Si la cuenca hidrológica es muy grande se requiere la subdivisión. Después se aplica la teoría del diagrama unitario a cada subcuenca.
3. La base del hidrograma del escurrimiento directo es constante para cualquier lluvia efectiva de duración unitaria.
4. Las ordenadas de los hidrograma unitarios para escurrimiento directo de un tiempo con base común, son directamente proporcionales a la cantidad total de escurrimiento directo representada por cada hidrograma.
5. El hidrograma del escurrimiento directo para un periodo dado de lluvia refleja todas las características físicas combinadas de la cuenca.

Para cumplir con las hipótesis anteriores se delimitó la cuenca con base a las estaciones hidrométricas que se encuentran en la zona (figura 3.42) y que cubren las tres principales corrientes en la parte baja de la cuenca del río Pánuco y que resultaron ser:

Estaciones hidrométricas:

*Tamesi
Las Adjuntas
Cañada Rica*

3.4.1. Características fisiográficas de la zona de estudio

Con los resultados obtenidos del análisis de la cuenca del río Pánuco (sección 3.3), se delimitó la cuenca, basándose en las subcuencas obtenidas del mismo análisis y las estaciones hidrométricas seleccionadas anteriormente. En primer lugar se hizo la georreferenciación de las estaciones hidrométricas y posteriormente se hizo el recorte de las subcuencas que están aguas abajo de las mismas y también las subcuencas que son aportadoras de las 3 corrientes principales y no hayan sido cubiertas por las estaciones hidrométricas (figura 3.43). Todas estas subcuencas pasan a formar parte de nuestra zona de estudio.

Los resultados de las características fisiográficas del análisis son:

Zona de estudio

En la figura 3.41 se muestra la cuenca correspondiente a la zona de estudio, resultado del recorte hecho entre las subcuencas y las estaciones hidrométricas; además las incluyen las localidades con más de 1,000 habitantes que representan el 88.32 % de la población (467,545 habitantes) que se encuentra dentro de la cuenca, y tan sólo representa el 5.13 % del total de las localidades (INEGI 1995).

La zona de estudio tiene un área de 7645.47 Km² y un perímetro de 426.01 Km, que son dos resultados importantes para poder aplicar cualquier modelo lluvia-escorrentamiento.

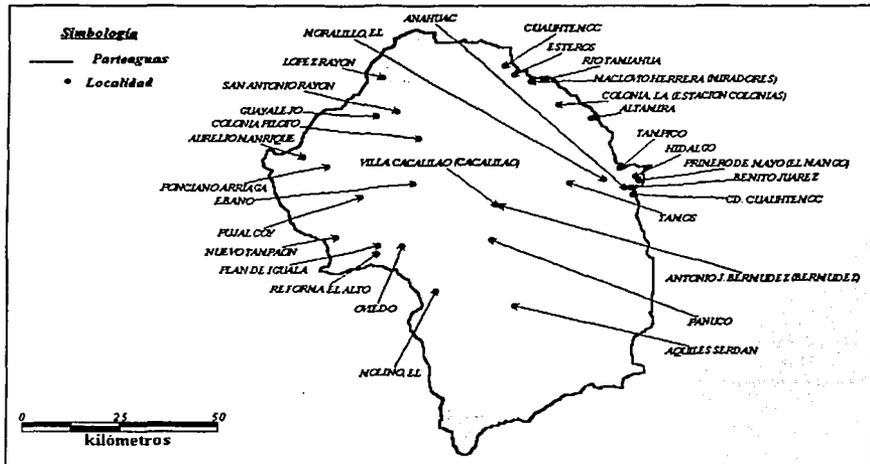


Figura 3.41 Cuenca de la zona de estudio

Red de drenaje de la zona de estudio

La figura 3.42 nos muestra la red de drenaje de la zona de estudio correspondiente a un umbral de 250 celdas, que además incluye las estaciones hidrométricas que se utilizaron para delimitarla y que corresponden a los tres principales ríos de la zona de estudio. Cabe destacar que la ordenación de la red de drenaje la realizó el programa según los criterios de Horton-Strahler (Sección 2.3.3)

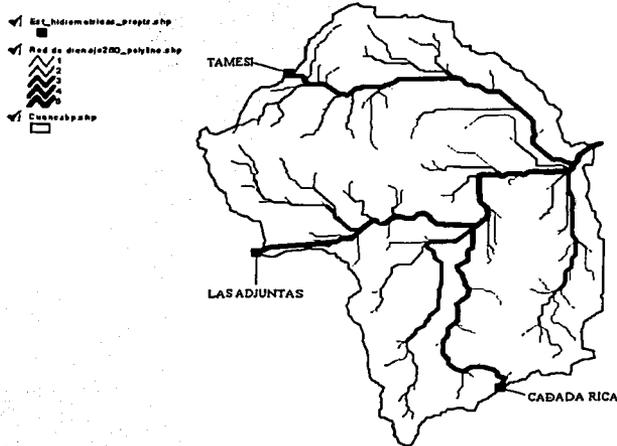


Figura 3.42 Red de drenaje de la zona de estudio y estaciones hidrométricas

Subcuencas de la zona de estudio

En la siguiente figura se muestran las 11 subcuencas con umbral de 3,500 celdas, que resultaron del recorte entre estas y las estaciones hidrométricas. En la tabla 3.7 se presentan sus dos principales características que son área y perímetro, el ID es un identificador que utiliza el SIG Arc View GIS versión 3.2.

ID	Área (Km ²)	Perímetro (Km)
1	518.25	99.70
2	917.59	134.03
3	1028.80	176.28
4	867.23	166.44
5	1072.42	185.87
6	113.14	79.48
7	286.32	129.82
8	1065.13	175.12
9	98.63	55.73
10	773.55	161.49
11	904.42	166.49
Σ	7645.47	1530.46

Tabla 3.7 Área y perímetro de las subcuencas

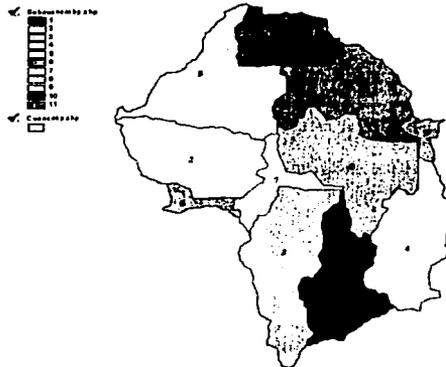


Figura 3.43 Subcuencas de la zona de estudio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las características fisiográficas que se obtuvieron, son valores que se pueden tomar como una aproximación de los valores verdaderos que se deben utilizar para realizar un proyecto hidrológico o un Sistema de Alerta Hidrometeorológica, por lo tanto se deben de tomar con reserva por las consideraciones hechas a lo largo del trabajo.

Por las condiciones que presenta la zona de estudio, para aplicar un Sistema de Alerta Hidrometeorológica será necesario hacer un transito de avenidas en los cauces de la zona de estudio (sección 3.4.5), por lo tanto, se obtendrán los parámetros geomorfológicos de las principales subcuencas de aportación de orden tres, y que resultaron ser la 1,2,3 y 4 (figura 3.44). En la tabla I del anexo 'B' se muestran el número de corrientes para cada orden, su longitud, pendiente y área tributaria de cada subcuenca de orden tres.

Como se mencionó anteriormente, para poder aplicar el modelo lluvia-escorrentido Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico es indispensable contar con los parámetros geomorfológicos, que se obtienen a partir de las características fisiográficas de la cuenca de la zona de estudio bajo el procedimiento que se describe a continuación.

Con la información de la tabla I, se determinó el número de corrientes, y el promedio de las longitudes, pendientes y áreas tributarias, que se muestran en la tabla 3.8.

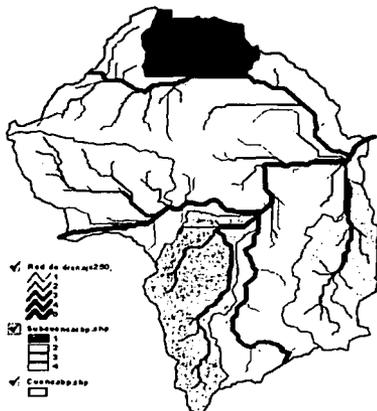


Figura 3.44 Principales subcuencas de aportación

Orden ω	N_{ω} (No.)	\bar{L}_{ω} (Km)	\bar{S}_{ω}	\bar{A}_{ω} (Km ²)
Subcuenca 1				
1	7	5.68	0.00146	45.42
2	2	14.37	0.00005	201.20
3	1	4.17	0.00794	518.25
Subcuenca 2				
1	13	6.41	0.00127	46.11
2	4	11.73	0.00171	182.97
3	1	17.76	0.00023	917.59
Subcuenca 3				
1	13	4.59	0.00209	34.67
2	3	16.27	0.00128	213.99
3	1	47.09	0.00044	1028.80
Subcuenca 4				
1	12	7.64	0.00121	54.38
2	3	5.00	0.00103	179.35
3	1	37.48	0.00026	867.23

Tabla 3.8 Características fisiográficas de las subcuencas de orden tres

Para calcular los parámetros geomorfológicos de las subcuencas de orden 3, se emplearon los datos de la tabla 3.9, a los cuales se le calcularon sus logaritmos en base diez (tabla 3.9) con la finalidad de realizar un regresión lineal entre el orden ω y los logaritmos de N_{ω} , \bar{L}_{ω} , \bar{S}_{ω} y \bar{A}_{ω} , en forma independiente

La definición de un logaritmo es: "para todo número positivo a , donde $a \neq 1$, $y = \log_a x$, significa que $x = a^y$ ".

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

ω	N_w	\bar{L}_w	\bar{S}_w	\bar{A}_w
Subcuenca 1				
1	0.84510	0.75438	-2.83650	1.65729
2	0.30103	1.15741	-4.30103	2.30363
3	0.00000	0.62012	-2.10000	2.71454
Subcuenca 2				
1	1.11394	0.80661	-2.89646	1.66382
2	0.60206	1.06922	-2.76637	2.26237
3	0.00000	1.24954	-3.64782	2.96265
Subcuenca 3				
1	1.11394	0.66206	-2.67937	1.53991
2	0.47712	1.21127	-2.89166	2.33039
3	0.00000	1.67293	-3.35655	3.01233
Subcuenca 4				
1	1.07918	0.88305	-2.91781	1.73545
2	0.47712	0.69925	-2.98576	2.25370
3	0.00000	1.57376	-3.58503	2.93813

Tabla 3.9 Cálculo de logaritmos

La regresión lineal simple es la recta que mejor ajusta los datos (x, y) .

$$y = a + bx$$

Donde:

$$a = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Ordenada al origen de la recta.

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Pendiente de la recta.

De las regresiones lineales realizadas se determinó la pendiente (es decir el valor de b), para cada una (tabla 3.10).

Subcuenca	N_w	\bar{L}_w	\bar{S}_w	\bar{A}_w
1	-0.42255	-0.06713	0.36825	0.52822
2	-0.55697	0.22147	-0.37568	0.64967
3	-0.55697	0.50543	-0.33859	0.74384
4	-0.53959	0.34536	-0.33361	0.58966

Tabla 3.10 Pendientes de las rectas de cada regresión lineal

La magnitud de las pendientes es el logaritmo R_B , R_L , R_S y R_A , respectivamente. Por lo tanto, para obtener el valor de los parámetros geomorfológicos de las leyes de Horton, se utiliza la definición de logaritmo $x = a^y$, donde:

- x . Es el parámetro geomorfológico correspondiente.
- a . Base del logaritmo (10).
- y . Es la magnitud de la pendiente.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Subcuenca	R_B	R_L	R_S	R_A
1	2.65	1.17	2.33	3.37
2	3.61	1.67	2.38	4.46
3	3.61	3.20	2.18	5.54
4	3.46	2.21	2.16	3.89

Tabla 3.11 Parámetros geomorfológicos de las leyes de Horton

Los parámetros geomorfológicos de las leyes de Horton que se muestran en la tabla 3.11, son los datos fundamentales para utilizar el modelo lluvia-escorrentamiento Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico, que aunque caen dentro del rango de variaciones establecido en la sección 2.3.6 se deben de considerar como valores aproximados y para un análisis real se debe de tomar en cuenta los aspectos mencionados como son: la resolución del MED y los umbrales para determinar las características fisiográficas.

3.4.2. Ubicación de estaciones

Los tipos de estaciones requeridas para un Sistema de Alerta Hidrometeorológica son: estaciones hidrométricas y pluviométricas y cada una debe de reunir ciertas características para su buen funcionamiento.

3.4.2.1. Estaciones Hidrométricas

La selección del sitio adecuado para instalar una estación hidrométrica debe de tomar en cuenta las condiciones siguientes (referencia 1):

Accesibilidad. La estación debe ser accesible en cualquier tiempo y bajo cualquier condición, especialmente durante avenidas.

Suficiencia. La estación debe ser capaz de cubrir todo el rango de gastos que puedan ocurrir. El nivel mínimo de la zanja o tubería en el caso de los limnigrafos y de la regla en el de los limnímetros, debe estar por debajo de la elevación correspondiente al gasto mínimo posible y la posición máxima del flotador o de la regla debe quedar arriba de la elevación correspondiente al gasto máximo posible.

Estabilidad. La sección transversal donde se instale la estación debe estar en un tramo recto, lo más estable posible, de manera que las variaciones que tenga la curva elevaciones-gastos sean razonablemente pequeñas.

Permanencia. La estación debe estar situada de tal manera que nunca sea destruida por una avenida. Una de las características mas deseables de un registro es que sea continuo y que este formado en un mismo sitio. Además no debe estar afectado o por tomas o desvíos, por lo que la estación debe de situarse, en lo posible, aguas arriba de ellos

3.4.2.2. Estaciones pluviométricas

Para la selección del sitio de una estación pluviométrica se basa en los criterios siguientes:

Igualdad. Las áreas de influencia correspondiente a cada estación deben tener un peso con respecto al área total de la cuenca, muy similar.

Visibilidad. Debe de existir línea de vista.

Accesibilidad. La estación debe ser accesible en cualquier tiempo y bajo cualquier condición, por ello se debe de tratar en lo más posible, ubicarlas en áreas urbanas o en caso dado cerca de alguna vía de comunicación.

Importancia. Debe cubrir en orden de importancia las partes altas, medias y bajas de la cuenca para tener un periodo de tiempo necesario para dar aviso a las autoridades correspondientes.

Suficiencia. La información debe de ser redundante para no perder precisión en la información, en caso de perder una estación a consecuencia del fenómeno hidrometeorológico. Si se llegara a dar la pérdida de una o más estaciones se debe de hacer la reasignación de áreas de influencia.

Permanencia. La estación debe estar situada de tal manera que nunca sea destruida por las personas de la comunidad cercana donde se situó la estación o por un fenómeno hidrometeorológico.

En la figura 3.45 se muestra la ubicación de las estaciones tanto pluviométricas como hidrométricas. Las estaciones fueron propuestas, basándose lo más apegado posible a los criterios descritos anteriormente, y tratando de que fuesen las mismas, o lo mas cerca posible a las ya existentes en la zona, además de que existiera línea de vista, concepto que se tratará en la siguiente sección

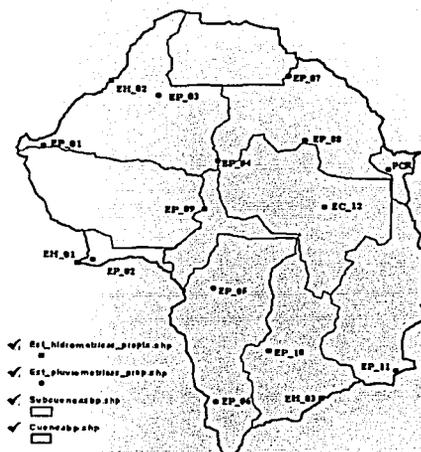


Figura 3.45 Ubicación de las estaciones propuestas

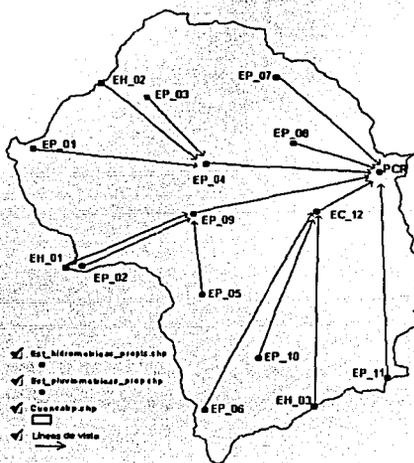


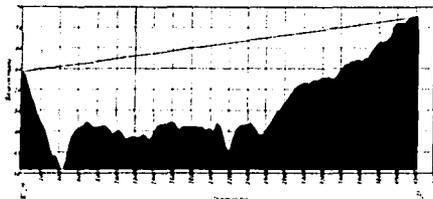
Figura 3.46 Dirección de las líneas de vista

3.4.3. Líneas de vista

Una línea de vista, es un perfil topográfico entre dos puntos que permite tener visibilidad y comunicación vía radio, para poder tener enlace de telemetría entre el puesto central de registro (PCR) y las estaciones pluviométricas (EP) y estaciones hidrométricas (EH), o en su caso entre dos estaciones de las cuales una de ellas debe de contar con una antena repetidora para la retransmisión de datos hacia el PCR (figura 3.46).

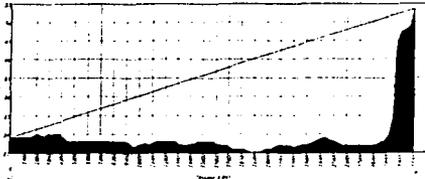
Los perfiles topográficos de las líneas de vista de las estaciones hacia el puesto central de registro, o hacia una estación con antena repetidora se muestran en la figura 3.47.

LÍNEA DE PÉDRA



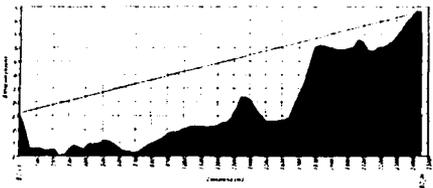
a) De Tulillo, Ebano a Chijol Diecisiete

LÍNEA DE PÉDRA



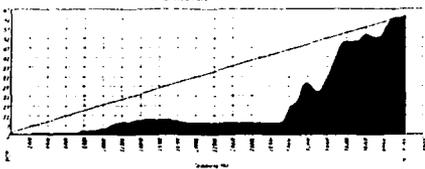
b) De Las Adjuntas a Nacata

LÍNEA DE PÉDRA



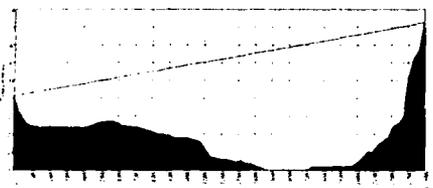
c) De Tamesí González a Chijol Diecisiete

LÍNEA DE PÉDRA



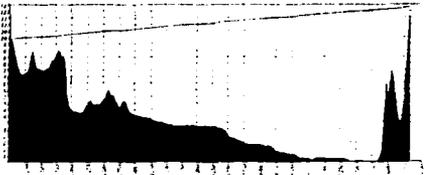
d) De Chijol Diecisiete al Puesto Central de Registro

LÍNEA DE PÉDRA



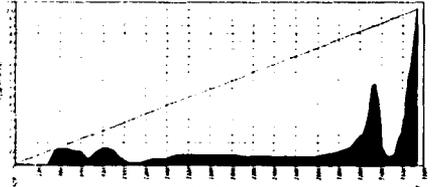
e) De Santa Trinidad Pánuco a Nacata

LÍNEA DE PÉDRA



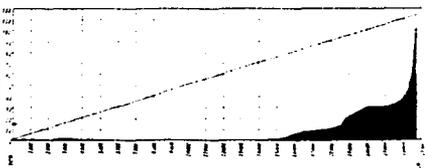
f) De Horcón de Potrero a Las Piedras

LÍNEA DE PÉDRA



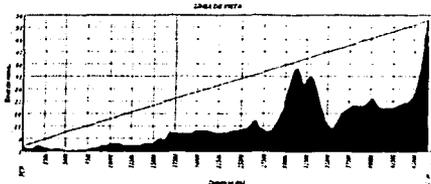
g) De San Carlitos al Puesto Central de Registro

LÍNEA DE PÉDRA

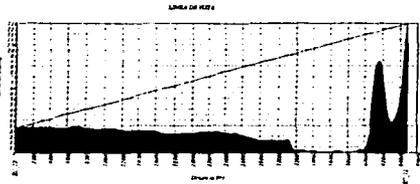


h) De Ochoa al Puesto Central de Registro

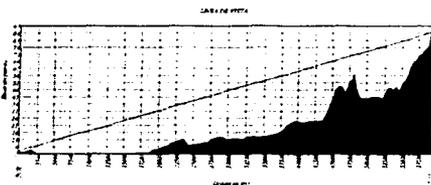
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



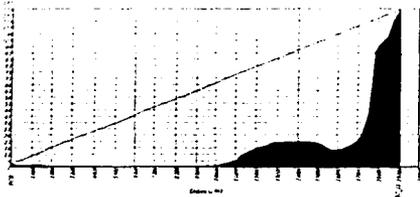
i) De Nacata al Puesto Central de Registro



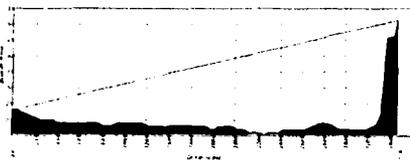
j) De PSA. P. Piedras, Chicayan a Las Piedras



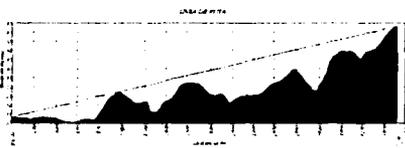
k) De Ozuluama al Puesto Central de Registro



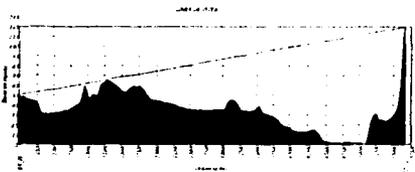
l) De Las Piedras al Puesto Central de Registro



m) De Las Adjuntas (EH) a Nacata



n) De Tamesí a Chijol Diecisiete



o) De Cañuda Rica a Las Piedras

Figura 3.47 Perfiles topográficos de las estaciones propuestas

Las figuras anteriores nos muestran las líneas de vista del Puesto Central de Registro que se encuentra en la estación pluviométrica Tampico, Tampico (DGE) en la Ciudad de Tampico, Tamaulipas a 6 estaciones pluviométricas (Chijol Diecisiete, San Carlitos, Ochoa, Nacata, Ozuluama, y Las Piedras), y otras 9 líneas de vista, 6 entre estaciones pluviométricas (de Tullillo, Ebano a Chijol Diecisiete, de Tamesí González a Chijol Diecisiete, de Las Adjuntas a Chijol Diecisiete, de Santa Trinidad, Pánuco a Nacata, de Horcón de Potrero a Las Piedras, de PSA. P. Piedras, Chicayan a Las Piedras) de donde se desprende que las estaciones

pluviométricas Chijol Diecisiete, Nacata y Las Piedras son estaciones con repetidora, y 3 líneas de vista entre las estaciones hidrométricas y las estaciones pluviométricas con repetidora (de Tamesí Chijol Diecisiete, de Tullillo, Ebano a Nacata y de Cañada Rica a Las Piedras).

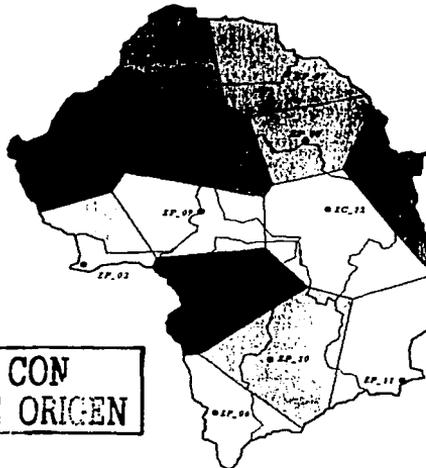
Como se mencionó anteriormente, las líneas de vista se obtuvieron tomando en cuenta los criterios establecidos en la sección 3.4.2 y desde luego la topografía del sitio de estudio, pero existe otro factor importante que podría implicar que al momento de hacer pruebas de comunicación vía radio no se llegara a concretar en algunas estaciones propuestas, aunque las líneas de vista de la figura 3.44 indiquen lo contrario. Esto se debe a que no se tomó en cuenta la curvatura de la tierra y para distancias mayores a 25 Km esta se debe de considerar.

3.4.4. Determinación de polígonos de Thiessen

Los polígonos de Thiessen, es un método para calcular la lluvia media en una zona dada (cuenca en estudio). Este método se utiliza porque en los instrumentos de medición (pluviómetros) solamente se mide la lluvia puntual, es decir la altura de lluvia que cae en el sitio donde esta instalado el aparato, la cual difiere de la que cae en los sitios cercanos.

En la figura 3.48 se muestran los polígonos de Thiessen, con sus respectivas estaciones pluviométricas.

- ✓ Est_Pluviométricas_grep.shp
 - ✓ Subcuencasbp.shp
 - ✓ Cuencasbp.shp
 - ✓ Pato_Thiessen.shp
- | | |
|---|---------------------------|
| ■ | CHIJOL DIECISIETE |
| ■ | MORCÓN DE POTRERO |
| ■ | LAS ADJUNTAS |
| ■ | LAS PIEDRAS |
| ■ | NACATA |
| ■ | OCHOA |
| ■ | OZULUAMA |
| ■ | PSA. P. PIEDRAS, CHICAYAN |
| ■ | SAN CARLITOS |
| ■ | SANTA TRINIDAD, PÁNUCO |
| ■ | TAMESÍ GÓNZALEZ |
| ■ | TAMPICO, TAMPICO (DOE) |
| ■ | TULLILLO, EBANO |



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.48 Ppolígonos de Thiessen correspondientes a las estaciones pluviométricas propuestas

En la tabla 3.12 se presenta la información de cada estación como son: nombre, clave, localización, además se presenta el área de influencia y peso con respecto al área total de la cuenca de las estaciones pluviométricas, resultado de la obtención de los polígonos de Thiessen.

Estación	Clave	Área*(Km ²)	Peso ²	Longitud	Latitud
TAMPICO, TAMPICO (DGE)	PCR	396.23	5.18	-97.86666667	22.21666667
TULLILO, EBANO	EP 01	519.03	6.79	-98.68333333	22.28333333
LAS ADJUNTAS	EP 02	339.78	4.44	-98.56999897	21.97859697
TAMESÍ, GÓZGALEZ	EP 03	886.41	11.59	-98.41666667	22.41666667
CHIJOL, DIECISIETE	EP 04	510.51	6.68	-98.27550989	22.24241319
SANTA TRINIDAD, PÁNUCO	EP 05	636.04	8.32	-98.28333333	21.90000000
HORCÓN DE POTRERO	EP 06	373.52	4.89	-98.27586147	21.59865806
SAN CARLITOS	EP 07	598.66	7.83	-98.10956469	22.46623525
OCHOA	EP 08	483.69	6.33	-98.06996369	22.29414536
NACATA	EP 09	620.36	8.11	-98.30668811	22.11379783
PSA. P. PIEDRAS, CHICAYAN	EP 10	799.68	10.46	-98.15000000	21.73333333
OZULUAMA	EP 11	564.59	7.38	-97.85031180	21.67899820
LAS PIEDRAS	EP 12	916.97	11.99	-98.01874186	22.11778014
	Total	7,645.47	100.00%		
LAS ADJUNTAS	EH 01			-98.6052810	21.9732100
TAMESI	EH 02			-98.5277600	22.4564130
CAÑADA RICA	EII 03			-98.0000000	21.6217300

1. Área de influencia de la estación.

2. Peso con respecto al área total de la cuenca

Tabla 3.12 Características de las estaciones pluviométricas e hidrométricas

3.4.5. Inferencia del hidrograma de escurrimiento directo en un punto de interés

Cuando una avenida viaja por un cauce, su duración aumenta y la magnitud de su gasto máximo disminuye, dando origen al pronóstico de crecientes, que consiste en la determinación progresiva, en función del tiempo, de la forma de esa avenida a lo largo del río y su objetivo es cuantificar los niveles y/o el tiempo de ocurrencia en puntos de la corriente donde no se conoce el hidrograma, además de integrar eventos de subcuencas de aportación. De esta forma, la anticipación con la que se pueda pronosticar las probables características de la avenida en un sitio en particular, resulta de gran interés para tomar las medidas preventivas que se requieran.

Con los datos y la información contenida en las secciones 3.4.1 a 3.4.4 se hará una explicación del procesamiento hidrológico acerca de la forma de llevar a cabo el procedimiento de la inferencia del hidrograma de escurrimiento directo en un punto de interés, para lo cual es necesario contar con los datos y la información de la zona de estudio y que es la siguiente (figura 3.49):

1. Hidrogramas Unitarios Instantáneos Geomorfológicos
2. Hidogramas proporcionados por las estaciones pluviométricas
3. Hidogramas de escurrimiento directo o de entrada proporcionados por las estaciones hidrométricas

El procedimiento para llevarlo a cabo es el siguiente:

1. De las estaciones pluviométricas propuestas para la zona de estudio, se obtienen datos de lluvia (hidogramas).
2. Con los datos de lluvia y el método de los polígonos de Thiessen se calcula la precipitación media para cada subcuenca.
3. Con los parámetros geomorfológicos calculados (tabla 3.12), se obtienen los hidogramas unitarios instantáneos geomorfológicos para cada subcuenca (ver referencia 12).
4. Con la precipitación media y los hidogramas calculados en el inciso 3) se determinan los hidogramas de escurrimiento directo de cada subcuenca de orden tres.

5. De las estaciones hidrométricas propuestas para la zona de estudio, se obtienen los hidrogramas de entrada.
6. Con los hidrogramas de entrada y los hidrogramas de escurrimiento directo de cada subcuenca se realiza el transito de avenidas en los cauces de la zona de estudio, para poder conocer el gasto en un punto de interés o pronosticar en el tiempo la evolución de una avenida (el hidrograma de escurrimiento directo).

Para realizar el transito de avenidas para los cauces de la zona de estudio existen diferentes métodos como son los hidráulicos y los hidrológicos. Los métodos hidrológicos son más numerosos y más simples. El método de Muskingum (ver referencia 1 y/o 26), es uno de los más utilizados en la actualidad por la buena aproximación a la realidad. El procedimiento descrito anteriormente es solamente para dar una idea al lector del proceso que se debe de seguir, por lo tanto su aplicación numérica no se hará en este trabajo porque no es parte de los objetivos planteados.

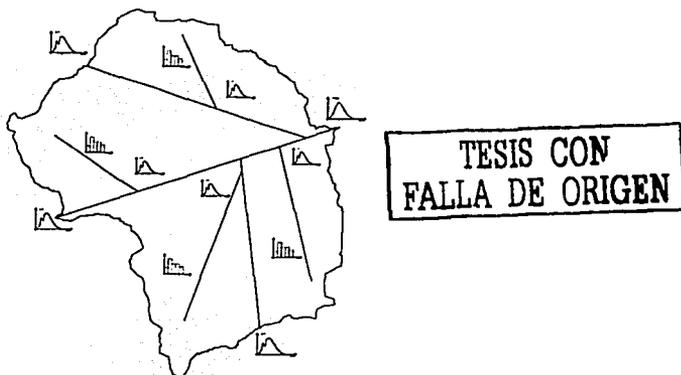


Figura 3.49 Diagrama de explicación del procesamiento hidrológico

3.4.6. Umbrales

Para el caso de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica, los umbrales son valores críticos, ya sea de gasto o de precipitación, con los que se activa una señal de alarma para advertir a la población del peligro de inundaciones. Los umbrales se establecen con base en la probabilidad de que se produzcan daños a las personas o a sus bienes.

3.4.6.1. Umbrales de precipitación

Determinar un umbral de lluvia único para una cuenca en particular para advertir de los efectos que puede desencadenar un fenómeno hidrometeorológico (inundaciones, flujo de lodos, deslizamientos de laderas, etc), es difícil, dadas las múltiples circunstancias que se pueden presentar en el lugar afectado (asentamientos irregulares, escasa infraestructura hidráulica, etc.).

La respuesta hidrológica de una cuenca a la precipitación, depende, entre otros factores, del estado de saturación inicial del suelo, la pendiente del terreno, estado de los cauces, adecuación de la infraestructura, así como también del uso y tipo de suelo.

Las características de la precipitación que se deben tener en cuenta para definir un umbral de lluvia son la intensidad, duración y extensión de la misma, en cualquiera de sus tres tipos: orográfica, convectiva y ciclónica, que se pudieran presentar en la cuenca en estudio.

Por lo tanto, para determinar un umbral adecuado a las condiciones del sitio, es necesario contar con un estudio minucioso de las características del terreno mencionadas anteriormente, así como también de un análisis estadístico de los registros históricos de precipitación y su origen.

3.4.6.2. Umbrales de gasto

Para el caso de los umbrales de gasto existen dos procedimientos para su determinación:

El primero consiste en realizar un estudio topográfico de los cauces de los ríos, con la finalidad de tener información detallada de su forma (longitudinal y transversal). Posteriormente se emplean métodos hidráulicos y estadísticos para calcular el gasto máximo, como puede ser, proponer valores de acuerdo con los resultados de los modelos lluvia-escorrentía, para que, a partir de la lámina de lluvia que se presenta en promedio cada 5, años se obtenga el escurrimiento directo máximo (referencia 13). Finalmente, de acuerdo a la geometría de las secciones transversales del cauce se pueden determinar las zonas susceptibles a ser desbordadas.

El segundo procedimiento para estimar el gasto máximo que puede tener el escurrimiento que fluye por los cauces antes de desbordarse es mediante registros históricos de los niveles de agua que alcanzan tales corrientes. Para determinar los niveles máximos de agua alcanzados, se puede investigar con la población directamente afectada, para reconstruir las avenidas que hayan provocado daños a la misma, y apoyarse también en el método de aforo de gastos llamado relación sección-pendiente (ver sección 2.5.2 y/o referencia 1).

Ambos procedimientos se pueden aplicar por separado o conjuntamente, lo cual se haría partiendo de la reconstrucción de la avenida con las huellas del agua proporcionada por la población.

En los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica, para cada cuenca de interés existe un umbral de gasto. Cuando el flujo de agua excede el umbral con los valores de la lluvia pronosticada se activa una prealarma (color amarillo). Cuando se superan los umbrales con la lluvia medida por las estaciones se enciende la señal de alarma (color rojo).

Así, si los umbrales de gasto y de lluvia definidos con cualquier procedimiento de los mencionados anteriormente son superados, el sistema advertirá de la ocurrencia del desbordamiento y el tiempo en que éste ocurrirá, con la finalidad de que los usuarios (generalmente personal de Protección Civil), tomen las medidas necesarias.

4. CONCLUSIONES

Para todo estudio hidrológico, las características fisiográficas de una cuenca juegan un papel de vital importancia, ya que a partir de éstas se puede conocer la respuesta de hidrológica de la misma. Además, con la ayuda de los modelos lluvia-escurrimiento es posible determinar la avenida de diseño, con la cual se hace el diseño o revisión de las estructuras hidráulicas. Para el caso de la implementación de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica para alguna ciudad, es necesario pronosticar el gasto en diferentes puntos predeterminados a lo largo de un cauce, en respuesta a una tormenta.

En el desarrollo de este trabajo se propuso una metodología basada en el análisis de un Modelo de Elevación Digital (MED), mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), en este caso ArcView GIS versión 3.2, con la cual es posible determinar las características fisiográficas de una cuenca como son: el parteaguas, red de drenaje, subcuencas y pendientes con sus correspondientes características. En un Sistema de Alerta Hidrometeorológica es necesario además determinar la precipitación media de la zona en estudio mediante los polígonos de Thiessen. Por otro lado, es indispensable enviar información desde las estaciones pluviométricas e hidrométricas vía radio. Con ArcView GIS versión 3.2 estas dos actividades se pueden resolver de una manera sencilla, rápida y con buena precisión.

El uso de Sistemas de información Geográfica ha facilitado la aplicación de técnicas de análisis digital, e intensificado el uso de los Modelos de Elevación Digital para la extracción de muchas características hidrológicas de un área de estudio, destacando para este trabajo las características fisiográficas de una cuenca (parteaguas, red de drenaje, subcuencas, pendientes, etc.). Dentro de sus ventajas principales están: un importante ahorro en tiempo y la automatización de procedimientos para manejar gran cantidad de información de forma rápida, los cuales son de vital importancia en la toma de decisiones en protección civil, así como también para resolver de una mejor manera muchos de los problemas que a diario se presentan en el sector privado y gubernamental.

Para poder aplicar la metodología descrita en este trabajo, primeramente es necesario contar con un Modelo de Elevación Digital, que es la base para extraer posteriormente las características fisiográficas de la zona de estudio.

Un MED presenta ciertas limitaciones como pueden ser la calidad y resolución del modelo. La calidad se refiere a la exactitud y precisión de los datos (coordenadas x,y,z) y la resolución, al espaciamiento de los mismos. La calidad y resolución de un MED son dos importantes características que afectan sensiblemente los resultados. Para el caso de la definición de la red de drenaje, ésta puede presentar el mismo patrón de definición pero con una menor o mayor densidad, dependiendo de la resolución, y para el caso del delineado de las subcuencas puede aumentar o disminuir el número de las mismas. El delineado del parteaguas y subcuencas y la definición de la red de drenaje, es más precisa cuando la resolución y la calidad del MED aumenta, evitando así el delineado y definición respectivamente de tramos rectos (cuando se definen tramos rectos es porque con la información que se cuenta no es suficiente, y por lo tanto muchos de ellos son irreales) y por lo tanto los resultados serán más exactos.

Una desventaja que presentan los Modelos de Elevación Digital es que pueden llegar a requerir una gran cantidad de memoria RAM y en disco duro por lo que el costo podría elevarse.

Antes de extraer las características fisiográficas de una cuenca a partir de un MED, se requiere obtener sus propiedades, haciendo el llenado de las depresiones del terreno; posteriormente se obtiene la dirección de flujo y finalmente, se hace la acumulación de flujo. Estas propiedades son fundamentales para estimar las características fisiográficas, por lo tanto, se debe hacer énfasis en ellas. Para el caso del llenado de las depresiones del terreno se pueden presentar pequeños problemas al momento de hacer la acumulación de flujo, debido a que es un proceso iterativo, e incluso, puede producir resultados equivocados si las áreas deprimidas comprenden espacios de varios cientos de celdas, dando lugar al drenado de celdas que no

corresponden a las correctas, lo que en ocasiones lleva a delinear equivocadamente el parteaguas y, por consiguiente, el resto de las características fisiográficas de la cuenca.

Las características fisiográficas obtenidas de forma automatizada en este trabajo son: parteaguas, área y perímetro de cuencas y subcuencas, orden, longitud y pendiente de las corrientes que son resultados importantes para llevar a cabo el análisis hidrológico que se implemente. Para el caso particular de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica, los resultados obtenidos son relevantes porque nos permiten calcular los parámetros geomorfológicos y así utilizar un modelo lluvia-escorrentamiento, en este caso el Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico, y pronosticar el gasto crítico de los cauces (umbrales de gasto), que podría causar algún daño a la población de la zona en estudio. Los resultados obtenidos tienen muy buena precisión y su discrepancia con otros métodos no varía en gran medida (error máximo de 5%, comparación hecha con áreas de la cuenca obtenidas con métodos tradicionales), a pesar de que se utilizó un MED con baja calidad y resolución (datos provenientes de planos escala 1:250, 000, con tamaño de celda 300 m por lado), pero, como se mencionó anteriormente la capacidad del equipo utilizado impuso una restricción en cuanto al tamaño de la celda, pero no lo fue así con la resolución, porque la escasez y los altos costos de topografía digital proveniente de escalas más grandes en nuestro país es muy común.

Además, con el análisis de un MED mediante un SIG, es posible determinar líneas de vista entre dos o más puntos, lo cual es de gran importancia porque nos permite determinar la ubicación más conveniente de las estaciones pluviométricas e hidrométricas, y también determinar el área de influencia de cada una de ellas de manera automática, utilizando el método de polígonos de Thiessen, para complementar el estudio hidrológico para poner en marcha un Sistema de Alerta Hidrometeorológica.

Con los resultados mencionados se cumple con los objetivos planteados al principio de este trabajo.

Cabe destacar que el método que se utilizó para determinar las características fisiográficas de una cuenca no es el único, ni tampoco lo es el SIG ArcView GIS Version 3.2. Existen otros Sistemas de Información Geográfica con diferentes procedimientos para realizar las mismas tareas.

Los Sistemas de Información Geográfica con aplicación en hidrología son una herramienta fundamental, en nuestros días y debemos utilizarla como tal, sin dejar a un lado la importantísima labor del ingeniero civil, porque es fundamental que al frente del manejo y manipulación de estas herramientas esté una persona con conocimientos de los conceptos hidrológicos, así como también de los computacionales.

Finalmente, es recomendable realizar una segunda etapa de este trabajo, la cual, consistiría en programar en el lenguaje propio del SIG y automatizar el cálculo de los hidrogramas unitarios de las cuencas en estudio, así como el pronóstico de los escurrimientos en un punto de interés.

5. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio Mijares, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de superficie. Editorial LIMUSA. México. 2001. 303 pp.
2. Bras L., Rafael. Hydrology: An introduction to hidrologic science. Editorial Addison-wesley. USA. 1990. 643 pp.
3. Boletín hidrometeorológico No. 32 (Cuenca del río bajo Pánuco, Región hidrológica No. 26). SARH. 1974. Tomos I y II.
4. Bosque Sendra, Joaquín. Sistemas de Información Geográfica. Ediciones Rialp, S.A. Madrid. 2000. 451 pp.
5. Bosque Sendra, Joaquín, Escobar Martínez, Francisco Javier, García Hernández, Ernesto y Salado García, María J. Sistemas de Información Geográfica (Prácticas con PC Arc/Info e IDRISI). Editorial RAMA. Madrid, España. 1994. 480pp.
6. Chow, Ven Te, Maidment, David R., Mays, Larry W. Hidrología aplicada. Editorial Mc Graw Hill. Colombia. 1995. 584 pp.
7. Cuadrat, José María y Pita, María Fernanda. Climatología. Editorial CÁTEDRA. Madrid, España. 2000. 496 pp.
8. Diagnóstico de la región IX. Golfo Norte. Resumen ejecutivo. Grupo de Servicios, Ingeniería y Proyectos, S.A. de C.V. Comisión Nacional del Agua.
9. Díaz Cisneros, Luis Rafael. Sistemas de Información Geográfica. UAEM. 1992. 381 pp.
10. Djokic, Dean y Maidment, David. Hydrologic and Hydraulic modeling support with Geographic Information Systems. Environmental Systems Research Institute, Inc. United States of America. 2000. 216 pp.
11. Enciso González, José Luis. Proceso de fotointerpretación-Sistema de Información Geográfica como instrumento para el análisis urbano. Tesis Maestría. Maestro en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México. 1998. 120 pp.
12. Eslava Morales, Héctor. Programación y aplicación del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico. Tesis Maestría. Maestro en Ingeniería Hidráulica. Facultad de Ingeniería. UNAM. México. 1997. 74 pp.
13. Fuentes Mariles, Oscar, Jiménez Espinosa, Martín, Eslava Morales, Héctor, Quaa Wepen, Roberto, Franco Sánchez, Miguel A., González Prado, Javier. Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Acapulco, Guerrero. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Diciembre de 2000. 115, pp.
14. GEOS. Boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, A.C. No. 2. Volumen 21. Agosto del 2001. México. 146 pp.
15. Gutiérrez Puebla, Javier y Goud, Michael. Sistemas de Información Geográfica. Editorial Síntesis. Madrid, España. 1994. 251 pp.

16. Linsley, Ray K., Kohler, Max A. y Paulhus, Joseph L. H. Hidrología para ingenieros. 2ª. Edición. McGraw Hill. México. 1998. 386 pp.
17. Manual de Map Info.
18. Merritt, Fredericks S, Loftin, M. Kent y Ricketts, Jonathan T. Manual del Ingeniero Civil. Editorial Mc Graw Hill. 4ª. Edición. Tomo II. USA. 1999.
19. Mobayed, Khodr Nabil. Modelo distribuido de lluvia-escorrenfia basado en el manejo de variables geo-referenciadas y el escalamiento fisiográfico de cuencas. Tesis Doctorado. Doctor en Ingeniería Hidráulica. Facultad de Ingeniería. UNAM. México. 2001. 154 pp.
20. Monografía de la cuenca baja del Río Pánuco. SARH. 1980.78 pp.
21. Morales García, Alfonso. Semestre 2000-2. Apuntes de la clase de hidrología. México. 2000.
22. Rodríguez Castillo, Alejandro. Desarrollo de una base de datos geográfica y estadística de la Republica Mexicana, de utilidad en aplicaciones de sistemas de información geográfica. Tesis Licenciatura. Ingeniero en Computación. Facultad de Ingeniería. UNAM. México. 1998.103 pp.
23. Rodríguez Iturbide, I. and Valdés J. B., Fiallo. The geomorphologic structure of the hydrologic response. Water Resources Research. Vol. 15. No. 8. 1979.
24. Rosengaus Moshinsky, Michael. Efectos destructivos de ciclones tropicales. Editorial MAPFRE. México. 1998. 251 pp.
25. Salas, Salinas, Marco Antonio. Diagnostico sobre inundaciones ocurridas en las principales cuencas de la Republica Mexicana (Regiones Hidrológicas No. 26 y 27). Centro Nacional de Prevención de Desastres. 1992. 18 pp.
26. Salas Salinas, Marco Antonio. Método de Muskingum-Cunge. Análisis de sensibilidad y límites de aplicación. Tesis Maestría. Maestro en Ingeniería Hidráulica. Facultad de Ingeniería. UNAM. México. 1995. 76 pp.
27. Tamayo, Jorge L. Geografía general de México. Talleres gráficos de la nación.. México. 1949. 583pp.
28. Tamayo, Jorge L. Geografía moderna de México. Editorial Trillas. México. 1990. 400pp.
29. Tapia Varela, Guadalupe. Geomorfología morfogenética de la vertiente tributaria oriental del ex-lago de Texcoco. Tesis Licenciatura. Licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México. 1999. 211 pp.
30. Valdés J. B., Fiallo and Rodríguez Iturbide I. A rainfall-runoff analysis of the geomorphologic IUH. Water Resources Research. Vol. 15. No. 6. 1979.
31. Vega Colín, Genaro. El papel de la cartografía digital en el funcionamiento de los sistemas de información geográfica. Tesis Licenciatura. Licenciado en geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México. 2001. 154 pp.
32. Whitener, Angela, Loree, Paula y Daniel Larry. Inside MapInfo Profesional. Editorial OnWordPress. USA. Segunda edición. 1999. 496 pp.

Paginas de Internet consultadas

1. <http://www.aeroterra.com/HTMs/Gis.htm>
2. <http://www.conapo.gob.mx/>
3. <http://www.cna.gob.mx/>
4. <http://www.cwrw.utexas.edu/>
5. http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario_spa/cartogrf.htm#sistem_coord
6. <http://www.eafit.edu.co/departamentos/civil/Vias/Agrimensural/sld#.htm>
7. <http://www.esri.com/>
8. <http://www.geoinformacion.com/ediciones/1998/septiembre/proyeccion.html>
9. <http://www.geosys.es/espaniol/distribucion/ilwis/presentacion.htm>
10. <http://www.itc.nl/>
11. <http://www.inegi.gob.mx/>
12. <http://www.isc.uniandes.edu.co/~c21388/hidrocarburos/homeGIS.htm>
13. <http://nivel.cuitto.upm.es/~mab/tematica/htmls/proyecciones.html#concepto>
14. <http://www.pcraster.nl/>
15. <http://www.uco.es/~bb1rofra/documentos/proyecciones/ORTH>
16. http://www.uco.es/%7Ebb1rofra/documentos/utm/coordenadas_utm.html
17. <http://www.uctv.com/>

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**"USO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN HIDROLOGÍA,
APLICADOS A UN
SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA"**

ANEXOS

Anexo A. Manejo de ArcView GIS versión 3.2. con aplicación en hidrología.....	95
Anexo B. Tablas de resultados.....	101

ANEXO A

Manejo del SIG ArcView GIS versión 3.2 con aplicación en hidrología

Esta parte muestra, primero, el algoritmo usado en el presente trabajo para obtener las características fisiográficas de la cuenca que desea estudiarse. Posteriormente, se adecua la información para ser usada en el método del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (HUIIG) y así, obtener el hidrograma de escurrimiento directo de la cuenca.

La metodología descrita a continuación supone que el software usado es el Sistema de Información Geográfica (SIG) conocido como ArcView GIS versión 3.2 y que la información utilizada está en formato de texto.

Por principio de cuentas, es necesario contar con ArcView versión 3.2, además de las siguientes extensiones (scripts):

Areal Rain	Elaboración de polígonos de Thiessen
Basin 1	Identificación de la red de drenaje y obtención de la subcuenca de aportación de la corriente seleccionada
Hydrologic Modeling v1.1(sample)	Llenado de las depresiones del terreno e identificación de subcuencas en toda la zona de estudio
LineSlope analyst Extensión	Cálculo de la pendiente de la red de drenaje, por tramos
PE 6.0 for Spatial Analyst	Elaboración de los perfiles topográficos
Spatial Analyst, y	Conversión de archivos a formato matricial "*.grd"
Xtools Extensión	Cálculo de áreas y perímetros, además de herramientas para manipular los archivos en formato "*.shp" en edición

Las extensiones anteriores se pueden obtener de internet. Pagina de Environmental Systems Research Institute (www.arcscripsts.esri.com).

El procedimiento para llegar a los resultados presentados en este trabajo es el siguiente:

a) **Para iniciar ArcView GIS versión 3.2**

1. El programa se ejecuta desde el botón inicio, con la siguiente ruta
2. Inicio/Programas/ESRI/ArcView GIS 3.2/ArcView GIS 3.2
3. Se despliega la ventana de dialogo 'Welcome to ArcView GIS'
4. Seleccionar la casilla de verificación *As a blank project*
5. Dar clic en el botón *OK*
6. Maximizar las ventanas '*Untitled*' y '*ArcView GIS 3.2*'
- 7.

b) **Definición del directorio de trabajo**

1. Del menú File seleccionar *Set Working Directory...* para que toda la información generada se guarde en una carpeta de trabajo (de preferencia la misma carpeta donde se guardó el proyecto)
2. Con la ventana de dialogo '*Work Directory*', en la casilla *Specify new work directory*, escribir el directorio de la carpeta de trabajo
3. Dar clic en el botón *OK*

c) **Procedimiento para leer el archivo de datos topográficos**

1. En la parte izquierda de la ventana '*Untitled*', seleccionar el icono *Tables*
2. En la parte superior de la misma dar clic en el icono *Add*
3. En la ventana de dialogo '*Add table*', buscar la carpeta donde se ubica el archivo que contiene las triadas de valores(x,y,z). En *List File of Type*: seleccionar *Delimited Text (*.txt)*
4. Seleccionar el archivo
5. Dar clic en el botón *OK*, para abrir la tabla con las triadas de valores x,y,z
6. Cerrar la tabla, dando clic en el icono cerrar de la parte superior derecha de la misma

7. De la parte izquierda de la ventana 'Untitled', seleccionar el icono *Views*
8. Dar clic en el icono *New*, para mostrar la ventana principal del programa ('*View 1*')
9. Del menú *File* seleccionar *Save Proyec As...*

NOTA: Antes de proseguir será necesario darle un nombre al proyecto para guardarlo

10. Con la ventana de dialogo '*Save Proyec As*', en *Directories* buscar la carpeta de trabajo. En *File Name* dar un nombre (por default se guardará con extensión *apr*)
11. Dar clic en el botón *OK*
12. Del menú *File* seleccionar *Extensions...*
13. En la ventana de dialogo '*Extensions*', seleccionar las casillas de verificación de las extensiones siguientes:
 - *Areal Rain*
 - *Basin*
 - *Hidrologic modeling v1.1 (sample)*
 - *LineSlope analyst Extensión*
 - *PE 6.0 for Spatial Analyst*
 - *Spatial Analyst*
 - *Xtools Extensión*
14. Al dar clic en el botón *OK* y en la pantalla se mostraran nuevos iconos y menús correspondientes a las extensiones seleccionadas
15. Del menú *View* seleccionar *Add Event Theme...*
16. En la ventana de dialogo '*Add Event Theme*', desplegar el combo de *Table:* y seleccionar la tabla que contenga las triadas (x,y,z) de los datos topográficos
17. Para el campo de *Xfield* e *Yfield:* seleccionar la columna que contenga los datos de la coordenada 'x' e 'y' respectivamente
18. Al dar clic en el botón *OK*, en la parte izquierda de la ventana '*View 1*' se mostrará el tema con los datos (x,y,z)

El siguiente paso es proyectar los datos para que ArcView GIS versión 3.2 trabaje correctamente (al trabajar con áreas y distancias, conviene proyectar los mapas a Universal Translator Mercator [UTM] o, a Cónica Conforme de Lambert [CCL], según sea el caso¹).

19. Del menú *View* seleccionar *Properties...*
20. Con la ventana de dialogo '*View Properties*', en el combo *Map Units:* seleccionar *meters*. En el combo *Distance Units:* seleccionar *kilometers*
21. Hacer clic en el botón *Projection...*
22. Se despliega una ventana llamada *Projection Properties*. Para el caso de UTM, dentro de la ventana de dialogo deberá seleccionarse la casilla de verificación *Standard*, para seleccionar una proyección cartográfica preestablecida. De la lista *category* escoger la proyección cartográfica *UTM-1927*. Para la opción *Type:* seleccionar la zona que corresponda al lugar geográfico donde este ubicado el proyecto (para México corresponden 6 zonas UTM: de la 11 a la 16)
23. Para proyectar con base en la Cónica Conforme de Lambert, en la misma ventana de dialogo: seleccionar la casilla de verificación *Custom* (la configuración de la ventana de dialogo cambiará). En la opción *Projection* seleccionar *Lambert Conformal Conic*, con los siguientes datos²:
 - *Spheroid:* *Clarke 1866*
 - *Central Meridian:* *-102*
 - *Reference Latitude:* *12*
 - *Estándar Parallel 1:* *17.5*
 - *Standard Parallel 2:* *29.5*
 - *False Easting:* *2,500,000*
 - *False Northing:* *0*

¹ La selección de UTM o CCL depende en primer lugar de la extensión del área de estudio. Si ésta es pequeña, es posible trabajar en UTM, pero si la zona en cuestión es demasiado grande, lo apropiado es usar CCL.

² Estos datos son los usados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

24. Aceptar los nuevos cambios dando clic en el botón *OK*
25. En la ventana de dialogo '*View Properties*', dar clic en el botón *OK*

d) **Elaboración del MED**

1. Del menú *Theme* seleccionar *Convert to Grid...*
2. Con la tabla '*Convert*', en la casilla *Grid Name* escribir el nombre del futuro MED. En *Directories*: buscar la carpeta de trabajo (por lo general el mismo programa la muestra)
3. Dar clic en el botón *OK*
4. Se desplegará una tabla llamada '*Conversion Extent*', en el combo *Output Grid Extent* seleccionar *Same As* (nombre del tema con los datos (x,y,z). En el combo *Output Grid Cell Size* seleccionar *As Specified Below*
5. En la casilla *Cellsize* escribir el tamaño de la celda (las casillas *Number of Rows* y *Number of Columns* se actualizan automáticamente pulsando la tecla *Enter*
6. Dar clic en el botón *OK*
7. En la ventana '*Conversion Field:*' seleccionar la columna que contenga los valores de la coordenada Z.
8. Dar clic en el botón *OK*
9. Con En la ventana de dialogo '*Attribute Join:*', en *Join feature attributes to grid?* dar clic en el botón *No*
10. Con En la ventana de dialogo '*Convert to Grid:*', en *Add grid as theme to the View?*. Dar clic en el botón *Yes* (ver figuras 3.23 a 3.25)

e) **Llenado de las depresiones del terreno**

Cuando existen zonas muy planas, el algoritmo del programa para identificar la dirección del flujo tiene problemas para encontrar por dónde fluye el escurrimiento. Para esos casos es necesario ejecutar una subrutina, incluida en el mismo programa, que trata de identificar aquéllas celdas que no cuentan con drenaje (por encontrarse a una menor elevación que las de su alrededor.

1. Del menú *Hydro* seleccionar *Fill sinks*. Asegurándose que el tema que contiene los datos topográficos esté activado. Como resultado se obtiene un tema (MEDbis), que es MED pero modificado al haberse realizado la depresión de algunas celdas para definir la dirección del flujo
2. Para observar las celdas deprimidas del menú *Hydro* seleccionar *Identify sinks* (ver figura 3.27)

f) **Dirección y acumulación de flujo**

1. Con el MED bis activado, seleccionar el icono *Initiate*
2. Con la ventana de dialogo '*Flow Direction Grid*', en *Make a Choice*: seleccionar *Create from the Elevation Grid*
3. Dar clic en el botón *OK*
4. Con la ventana de dialogo '*Load a GRID*', en *Shall we add the Flow Direction Grid into the View*, dar clic en el botón *Yes*
5. Con la ventana de dialogo '*Flow Accumulation Grid*', en *Make a Choice*: seleccionar *Create from the Flow Direction Grid*
6. Dar clic en el botón *OK*
7. Con la ventana de dialogo '*Load a GRID*', en *Shall we add the Flow Accumulation Grid into the View*, dar clic en el botón *Yes* (ver figuras 3.29 y 3.31 respectivamente).

g) **Red de drenaje**

1. Seleccionar el icono *RIV (StreamNetwork)*.
2. Con la ventana de dialogo '*Stream Network*', en *Specify the cellflow accumulation threshold to create stream Network*: escribir el valor para el umbral
3. Dar clic en el botón *OK*
4. Con la ventana de dialogo '*Choose the Stream Ordering method:*', dar clic en el botón *Yes* para seleccionar el ordenamiento de la red de drenaje de Horthon-Strahler
5. Con la ventana de dialogo '*Stream renNetwork-Save As*', en *Directories*: buscar la carpeta de trabajo. En *File name*: dar un nombre al tema de la red de drenaje (*.shp)
6. Seleccionar el icono *LineSlope*, para obtener las pendientes de la red de drenaje

7. De la ventana de diálogo 'Select', en *Select the line theme for which you want to calculate slope*, seleccionar el tema correspondiente a la red de drenaje
8. Dar clic en el botón *OK*
9. De la ventana de diálogo 'Select', en *Select the surface theme*, seleccionar el tema correspondiente al MEDbis.
10. Dar clic en el botón *OK* (ver figura 3.35 y 3.36)

h) Recorte de la red de drenaje

1. Del menú *Xtools* seleccionar la opción *Clip With Polygon(s)*
2. Aparecerá una caja de diálogo llamada: 'Clip! **SELECT INPUT THEME**' y, para la opción *Select the theme that contains features that you wish to clip*, seleccionar el archivo shape (*.shp) que contiene a la red de drenaje
3. Dar clic en el botón *OK*
4. Nuevamente aparece la caja de diálogo 'Clip! **SELECT INPUT THEME**', esta vez con la opción *Select the polygon theme that will be used to clip features from the previous theme*, deberá seleccionar el archivo *shape (*.shp)* que contiene los polígonos que delimitan la zona de interés
5. Dar clic en el botón *OK*
6. En la ventana 'Name output theme', ubicar el directorio de trabajo y asignar el nombre al archivo de resultado que contendrá la red de drenaje modificada
7. Del lado izquierdo de la pantalla, aparecerá un nuevo tema con el nombre asignado previamente

Nota: Para hacer el recorte de la red de drenaje o cualquier objeto es necesario que esté en formato *shape (shp)*

i) Definición del orden de las corrientes

Al obtener la red de drenaje con el icono *RIV* y haber seleccionado el ordenamiento *Horton-Strahler*, la tabla asociada con este tema *Attributes of red de drenaje.shp*, incluye una columna donde está definido el orden de cada corriente, por lo que sólo deberá indicársele al programa cómo debe presentar los resultados.

1. Doble clic sobre el tema que contiene la red de drenaje (Red de drenaje.shp)
2. A continuación aparece una ventana de diálogo llamada 'Legend Editor'. Sobre la opción *Legend Type*, seleccionar *Unique Value*
3. A continuación aparece otra ventana de diálogo llamada 'Values Field'. En esta deberá seleccionarse la opción *Order*
4. Acto seguido aparecerán todos los órdenes de corriente existentes en el tema

Para una mejor visualización, cambiar el grosor de cada orden de modo que a mayor orden mayor grosor. Esto se consigue haciendo doble clic sobre el símbolo de la corriente y seleccionando en *size* 1, 2, 3, etc.

Nota: De esta forma se le puede dar presentación a cualquier objeto.

j) Parteaguas

1. Seleccionar el icono *BAS (BasinDelineate)*, y con el puntero del *mouse* (círculo con un punto en el centro) dar clic sobre la red de drenaje en la salida de la cuenca. A partir de este punto hacia aguas arriba se delinearán el parteaguas de la cuenca
2. De la ventana de diálogo '*Analysis extent*', en *Shall we analice*: dar clic en *Yes*
3. De la ventana de diálogo '*Drainage Basin-Save As*', en *Directories*: buscar la carpeta de trabajo. En *File name* poner nombre al tema de parteaguas (*.shp)
4. De la ventana de diálogo '*Drainage Basin Characteristics*', en *Shall we derive Basin characteristics from the Grid?*, dar clic en el botón *Yes* (ver figura 3.34)

k) Subcuencas

1. Con el tema *Acumulación de flujo* seleccionado, del menú *Hydro*, seleccionar *Watershed*
2. Con la ventana de diálogo '*Watershed*', en la casilla *Enter the minimum number of cells for a watershed*: escribir el valor del umbral (ojo, es conveniente que el umbral especificado aquí sea el mismo que el

indicado para generar la red de drenaje, debido a que así las subcuencas obtenidas corresponderán a la red de drenaje previamente definida)

3. Dar clic en el botón *OK*
4. Con la ventana de dialogo '*Hydro.Watershed*', en *Select the flow direction grid theme*, seleccionar el tema correspondiente a la dirección de flujo
5. Dar clic en el botón *OK*
6. Con el tema watershed seleccionado, del menú *Theme*, seleccionar *Convert to Shapefile...*
7. De la ventana de dialogo '*Convert watersheds*', en *Directories*: buscar la carpeta de trabajo. En *File name*, poner nombre al tema de subcuencas (*.shp)
8. En la ventana de dialogo '*Convert to Shapefile*', en *Add shapefile as theme to the view*., dar clic en *Yes*
9. Del menu *Xtools*, seleccionar *Update Area, Perimeter, Acres, and Length*
10. De la tabla '*CALCULATE FEATURE SIZE*', en *Select Themes to Calculate Feature Size*, seleccionar el tema correspondiente a las subcuencas calculadas
11. Dar clic en el botón *OK* (ver figura 3.37 y 3.38)

l) Pendientes

1. Con el *MED* activado, del menú *Surface* seleccionar la opción *Derive Slope*, y automáticamente en la parte izquierda de la pantalla aparecerá un tema con las pendientes calculadas (ver figura 3.39)
2. Para hacer un mapa con un rango o un solo valor de pendiente
 - a) Del menú *Analysis* seleccionar la opción *Map Query*
 - b) En la ventana de dialogo *Map Query1*, en la opción *Layer* con doble clic seleccionar el tema de pendientes y utilizar los signos de igualdad para definir el rango o valor de pendientes deseado.
 - c) Dar clic en *Evaluate*

m) Perfiles topográficos

1. Con el *MEDbis* seleccionado, dar clic en el icono *PE*
2. Con la ventana de dialogo '*Temporary File*', dar clic en *OK*
3. Con la ventana de dialogo '*Required Extensión*', en *PE+ not loaded!! Some of the functionality will be disable*, dar clic en *OK*
4. Con la ventana de dialogo '*PROFILE EXTRACTOR*', seleccionar la herramienta *Draw cross section line (single segment)*
5. Se desliza el puntero del mouse con la herramienta activada (una cruz) hasta el primer punto de interés, se oprime el botón izquierdo del mouse y se desliza hasta el segundo punto, soltar botón izquierdo
6. De la misma ventana de dialogo, dar clic en *New View*
7. Con la ventana de dialogo '*Profile 1*', en *Z factor* darle un valor mayor que cero, lo mismo para 'x' e 'y' una vez que su correspondiente casilla de verificación sea seleccionada
8. Dar formato según convenga con *Type* y *Symbol*, dando clic en *Preview* hasta obtener lo que se desee
9. Dar clic en *OK* (Ver figura 3.47)

ñ) Polígonos deThiessen

Para poder calcular los polígonos de Thiessen, es necesario tener un tema con la ubicación de las estaciones, siguiendo el procedimiento siguiente:

1. En Excel hacer una tabla con al menos tres columnas, (nombre de estación, longitud norte, latitud oeste)
2. Guardarlos con formato de Texto delimitado por tabulaciones (*.txt)
3. En el menú *Windows* seleccionar el proyecto (*.apr)
4. Agregar la tabla con el procedimiento descrito en los pasos 1-8 de los Procedimientos para leer el archivo con los datos topográficos
5. Con el tema de las estaciones seleccionado, en el menú *Areal Rain* seleccionar *Calculate*
6. Con la ventana de dialogo '*Areal Rain Calculate*', en *Select field to identify POINTS* (e. g. *Rainfall estation number*), seleccionar de preferencia la columna que contenga los nombres de las estaciones
7. Dar clic en *OK*

8. Con la ventana de dialogo '*Areal Rain Calculate*', en *Select field to identify RAIN (rainfall values to calculate areal rain)*, dar clic en *Cancel*, en el caso de que no se cuente con datos de lluvia
9. Con la ventana de dialogo '*Areal Rain Calculate*' en *RAIN field not selected. Do you want to calculate only Thiessen Polygons area and weight?*, dar clic en *Yes*
10. Con la ventana de dialogo '*Areal Rain Calculate*', en *OK: Select polygon theme for boundary, Cancel: Use buffered group of points*, seleccionar el tema que contenga la cuenca para delimitar con ella los poligonos de Thiessen y dar clic en *OK*, en el caso de que queramos los poligonos de Thiessen sin delimitar, dar clic en *Cancel*
11. Con la ventana de dialogo '*Save As*', en *Directories* buscar la carpeta de trabajo. En *File Name* dar nombre al tema de los poligonos de Thiessen (*.shp)
12. Dar clic en *OK* (ver figura 3.48)

ANEXO B

Tablas de Resultados

SUBCUENCA 1			
Orden	Longitud (Km)	Pendiente	Área tributaria Km ²
1-1	0.75	0.00000	25.33
1-2	2.25	0.00000	24.29
1-3	5.76	0.00090	49.14
1-4	8.80	0.00170	70.80
1-5	17.32	0.00240	93.89
1-6	1.65	0.00000	24.19
1-7	3.24	0.00520	30.34
Promedio	5.680	0.00146	45.425
2-1	8.10	0.00010	164.16
2-2	20.64	0.00000	238.24
Promedio	14.369	0.00005	201.200
3-1	4.17	0.00794	518.250

SUBCUENCA 2			
Orden	Longitud (km)	Pendiente	Área tributaria (Km ²)
1-1	4.66	0.00000	53.90
1-2	2.33	0.00000	38.95
1-3	14.06	0.00020	89.00
1-4	4.41	0.00090	26.51
1-5	0.64	0.00000	23.79
1-6	14.38	0.00200	74.68
1-7	1.48	0.00000	28.24
1-8	10.26	0.00020	40.40
1-9	3.75	0.00130	36.04
1-10	5.96	0.00300	49.59
1-11	1.95	0.00410	23.67
1-12	8.43	0.00240	50.21
1-13	10.97	0.00240	64.48
Promedio	6.406	0.00127	46.112
2-1	12.26	0.00040	165.46
2-2	11.05	0.00065	183.94
2-3	0.42	0.00000	68.64
2-4	23.17	0.00580	313.82
Promedio	11.728	0.00171	182.965
3-1	17.76	0.00023	917.590

SUBCUENCA 3			
Orden	Longitud (Km)	Pendiente	Área tributaria (Km ²)
1-1	8.98	0.00010	35.64
1-2	18.89	0.00070	53.85
1-3	2.75	0.00180	30.52
1-4	1.72	0.00170	29.82
1-5	0.81	0.00370	24.11
1-6	1.06	0.00190	23.20
1-7	1.97	0.00050	34.73
1-8	2.37	0.00080	27.59
1-9	8.11	0.00070	63.02
1-10	1.65	0.00360	27.67
1-11	4.30	0.00490	36.36
1-12	3.38	0.00330	28.85
1-13	3.71	0.00350	35.30
Promedio	4.593	0.00209	34.666
2-1	25.63	0.00120	260.00
2-2	0.85	0.00120	94.47
2-3	22.32	0.00145	287.49
Promedio	16.265	0.00128	213.989
3-1	47.09	0.00044	1028.800

SUBCUENCA 4			
Orden	Longitud (Km)	Pendiente	Área tributaria (Km ²)
1-1	4.00	0.00000	50.37
1-2	7.81	0.00080	52.67
1-3	1.91	0.00000	30.95
1-4	10.94	0.00080	35.91
1-5	3.45	0.00060	28.47
1-6	7.60	0.00130	56.90
1-7	5.79	0.00100	39.84
1-8	6.40	0.00080	60.02
1-9	17.95	0.00140	92.50
1-10	7.90	0.00200	96.92
1-11	4.79	0.00330	30.71
1-12	13.14	0.00250	77.31
Promedio	7.639	0.00121	54.381
2-1	2.97	0.00000	97.32
2-2	0.95	0.00210	101.57
2-3	11.09	0.00100	339.16
Promedio	5.003	0.00103	179.348
3-1	37.48	0.00026	867.230

Tabla 1 Características fisiográficas de las principales subcuencas de aportación