



**UNIVERSIDAD MICHUACANA
DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL
TERRITORIO

**EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS
HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS DE LOS RÍOS
GRANDE Y CHIQUITO DE LA CIUDAD DE
MORELIA, MICHUACÁN.**

TESIS DE POSGRADO

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

ING. CLAUDIA E. SILVA MARTÍNEZ

ASESOR

DR. J. ELEAZAR ARREYGUE ROCHA

MORELIA, MICH. SEPTIEMBRE 2006.



RESUMEN

Dentro de los Estados de la República Mexicana, Michoacán es uno de estos que presentan serios problemas debido a la falta de una adecuada planificación territorial. Particularmente la capital de éste, es una ciudad situada al Noreste del Estado. Siendo una ciudad declarada como Patrimonio de la Humanidad en 1991, no obstante presenta diversos tipos de problemas, el más frecuente que se manifiesta, son las inundaciones en las zonas circundantes a la ciudad histórica.

La deplorable o nula planificación territorial, permite que un gran número de asentamientos humanos se establezcan en zonas aledañas al Río Grande y Río Chiquito, siendo afectados por las inundaciones que se presentan continuamente. El grado de susceptibilidad a este tipo de peligros se ha visto reflejado mediante las pérdidas económicas, originados por eventos de precipitaciones extraordinarias de los últimos diez años. La alta vulnerabilidad de algunas colonias, permite acrecentar el peligro al que están expuestas.

Con base a las características de la morfología de la cuenca y la red de drenaje del Río Grande, así como de su principal afluente, se analiza la influencia que estos factores tienen en la intensificación o posible atenuación de los procesos causados por las avenidas provocadas por estos ríos.

En el presente trabajo se analizó la problemática que se vive en la ciudad de Morelia en lo referente a la parte hidrológica e hidráulica, por lo que se decidió realizar un estudio minucioso de la cuenca del río grande (hasta ciudad industrial). Para esto se consideran los registros históricos de 7 estaciones meteorológicas que se localizan dentro del área de estudio, para realizar el balance hidrológico. Así mismo se recopiló la información correspondiente al historial de los caudales que permitieron calcular los posibles periodos de retorno de este tipo de avenidas. También se realizaron modelos hidráulicos para conocer el comportamiento y capacidad de los ríos en estudio.

Dentro de este estudio, se consideró analizar el proceso de erosión en la cuenca hidrográfica de Morelia, la cual demuestra la relación de la influencia que ha tenido el impacto antrópico, como el cambio de uso de suelo en la zona, lo cual permite que se acelere el proceso erosivo. Donde las características de los factores morfológicos, naturales, geológicos y climáticos, en acción conjunta son los reguladores más importantes en el ciclo hidrológico de las cuencas, por lo que su conservación es de suma importancia.

ÍNDICE

RESUMEN

I.- INTRODUCCIÓN	1
II.- CONCEPTOS BÁSICOS	4
II.1.- Hidrología	4
II.1.1.- Ciclo hidrológico	5
II.1.2.- Sistema hidrológico	6
II.1.3.- Cuenca hidrológica	7
II.1.3.1.- Precipitación	12
II.1.3.2.- Evapotranspiración	13
II.1.3.3.- Escurrimiento	13
II.2.- Hidráulica fluvial	14
II.2.1.- Erosión	14
II.2.2.- Cálculo de la pérdida de suelo	16
II.2.3.- Velocidad de asentamiento de las partículas	17
II.2.4.- Diagrama de Hjulstrom	18
II.2.5.- Clasificación del flujo	19
II.2.6.- Propiedades individuales de las partículas	20
II.2.7.- Ondulación en el fondo y resistencia al fluido	22
II.2.8.- Medición del transporte de sedimentos	23
II.3.- Distribución de valores extremos	25
II.4.- Modelos de escenarios	26
II.4.1.- Tipos de inundaciones	26

III.- ESTADO DEL ARTE	28
III.1.- El fenómeno de El Niño	28
III.2.- Antecedentes Internacionales	31
III.2.1.- Referencias de huracanes devastadores	31
III.2.1.1.- El Huracán asesino de Galveston USA	31
III.2.1.2.- Huracán San Zenón	32
III.2.1.3.- Huracanes recientes	33
III.2.2.- Reseña de grandes inundaciones históricas	35
III.2.2.1.- Sicilia, Italia	37
III.2.2.2.- Las catástrofes de Taranto, Italia	37
III.2.2.3.- Cardoso, Italia	38
III.2.2.4.- Lluvia excepcional en Piemonte, Italia	39
III.2.2.5.- Río Tanaro en Italia	39
III.2.2.6.- Valtellina, Italia	41
III.2.2.7.- Cuenca del Río Parana, Argentina	43
III.2.2.8.- Río San Carlos, Colombia	43
III.2.3.- Lluvias Excepcionales	44
III.3.- Antecedentes Nacionales	47
III.3.1.- Inundaciones de Chiapas	51
III.3.2.- Inundaciones de Veracruz	51
IV.- RESULTADOS	57
IV.1.- Localización	57
IV.2.- Metodología	58
IV.3.- Historia de la ciudad de Morelia	60
IV.3.1.- Antecedentes Locales	64
IV.4.- Geomorfología	75
IV.4.1.- Caracterización de la cuenca	75
IV.4.2.- Red hidrográfica	75
IV.4.3.- Pendientes	76
IV.4.4.- Vegetación	76

IV.4.5.- Suelos	77
IV.5.- Hidrología	77
IV.5.1.- Precipitaciones	77
IV.5.2. – Temperatura	81
IV.5.3.- Evapotranspiración	82
IV.5.4.- Escurrimientos	83
IV.5.5.- Balance hidrológico	84
IV.6.- Dinámica fluvial	85
IV.6.1.- Aporte de sedimentos	85
IV.6.2.- Transporte de sedimentos	86
IV.6.3.- Secciones transversales	90
IV.7.- Modelo de verificación	91
IV.7.1.- Aplicación del Hec Ras	91
IV.7.1.1.- Río Grande	92
IV.7.1.2.- Río Chiquito	99
IV.8.- Análisis de frecuencias	104
IV.8.1.- Precipitaciones	105
IV.8.2.- Caudales	108
IV.8.2.1.- Río Grande	108
IV.8.2.2.- Río Chiquito	110
V.- CONCLUSIONES	113

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lista de Figuras

Figura II.1.- Categorización de cuencas.

Figura II.2.- Caracterización de una cuenca exorreica.

Figura II.3.- Jerarquización de una cuenca hidrográfica, así como sus tributarios.

Figura II.4.- Los diferentes tipos de corriente que se pueden presentar en un río.

Figura II.5.- Comparación de los datos experimentales sobre velocidad de asentamiento con la Ley de Stokes y la Ley de Impacto.

II.6.- Diagrama de Hjulstrom, que relaciona el proceso de sedimentación con las curvas de velocidad de asentamiento de las partículas.

Figura II.7.- Clasificación de las configuraciones de fondo (Simona y Richardson, 1961).

Figura II.8.- Clasificación del transporte de sedimentos en un cauce.

Figura III.1.- La transferencia de temperatura de las aguas marinas por los vientos silicios.

Figura III.2.- El Huracán de "Galveston" en 1900; más de 8 mil muertos fue el saldo que dejó, además ha sido el huracán que más vidas ha cobrado en Texas.

Figura III.3.-El ciclón San Zenón en 1930; fue el peor en la historia de la nación caribeña, de la República Dominicana.

Figura III.4.-Uno de los huracanes más fuertes en la historia, es "el huracán del día del trabajo" que azotó en 1935 a las costas de Florida.

Figura III.5.- Devastación de la costa sur del Estado de Florida, USA provocada por el Huracán "Andrew" 1992.

Figura: III.6.- Efectos del aluvión en el poblado de Fornovolasco, Italia.

Figura III.7.- El poblado de Cardoso después del evento del 19 de junio de 1996 donde se muestran los materiales arrastrados y depositados al centro del habitado.

Figura III.8.- Puente de Ceva obstruido por troncos y basura flotante (parte Alta del Valle Tanaro).

Figura III.9.- Inundación de la ciudad de Asti (parte baja del Valle Tanaro).

Figura III.10.- El río Tanaro cerca del puente principal de Garessio, Italia, a las 12 horas y 15 horas respectivamente del día del 5 de Noviembre de 1994 (CNR-IRPI,Torino).

Figura III.11.- Rompimiento de la margen derecha del río Adda cerca del poblado Case Rossi (Municipio de Berbenno en Media Valtellina).

Figura IV.1.- Localización de la cuenca en estudio.

Figura IV.2.- Organigrama correspondiente a la investigación de la cuenca sur del Río Grande.

Figura IV.3.- Desarrollo urbano de la ciudad de Morelia, del periodo de 1619 a 1990(INEGI, 2000).

Figura IV.4.- Asentamientos sobre los antiguos cauces (INEGI 2000).

Figura IV.5.- eventos que se han presentado a través de la historia de la ciudad de Morelia.

Figura IV.6.- Distribución de las lluvias excepcionales en la ciudad de Morelia, durante el año.

Figura IV.7.- Imagen de la cuenca en estudio, donde se observa la red hidrográfica con la localización de las estaciones pluviométricas.

Figura IV.8.- Gráficas de las lluvias registradas en cada una de las estaciones pluviométricas.

Figura IV.9.- En la imagen se presenta la cuenca con el método de Thiessen.

Figura IV.10.- Método de las isoyetas aplicado a la cuenca en estudio.

Figura IV.11.- Temperatura media anual de la cuenca en estudio.

Figura IV.12.- Evapotranspiración para cada una de las estaciones que se localizan dentro de la cuenca.

Figura IV.13.- Escurrimientos del río Grande, registrados en la estación de Atapaneo.

Figura IV.14.- Sitios donde se tomaron las muestras de sedimentos.

Figura IV. 15.- Imágenes de la toma de muestras sobre el lecho del río Chiquito.

Figura IV.16.- Momento en que se toma la muestra del lecho del río.

Figura V.17.- Según la norma ASTM y la clasificación de suelos en base a la SUCS, es un material: GP Grava mal

Figura IV.18.- Se observa el proceso de la prueba de vacío para los sedimentos líquidos.

Figura IV.19.- Cárcamos de bombeo que e localizan sobre el río Grande.

Figura IV.20.- Secciones transversales de los puentes del libramiento poniente y Loma del Rey, sobre el Río Grande.

Figura IV.21.- Secciones transversales de los puentes de Isidro Favela y Tres puentes, sobre el Río Grande.

Figura IV.22.- Secciones transversales de los puentes de tres puentes, Río Grande con un gasto.

Figura IV.23.- Secciones transversales de los puentes de Avenida Michoacán y Jacarandas, Río Grande.

Figura IV.24.- Secciones transversales de los puentes Guadalupe Victoria y Guillermo Prieto, Río Grande.

Figura IV.25.- Secciones transversales de los puentes del libramiento Oriente del Río Grande con un gasto.

Figura IV.26.- Perfil longitudinal del Río Grande para un gasto de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, realizado con el software Hec-Ras.

Figura IV.27.- Perfil longitudinal del Río Grande para un gasto de $75 \text{ m}^3/\text{s}$, realizado con Hec-Ras.

Figura IV.28.- Perfil longitudinal del Río Grande para un gasto de $90 \text{ m}^3/\text{s}$, realizado con software en estudio.

Figura IV.29.-Perfil en 3D del Río Grande con un caudal de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ de la parte sur

Figura IV.30.- Perfil en 3D del río Grande con caudal de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ de la parte Norte.

Figura IV.31.- Perfil en 3D del río Grande con caudal de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ de la parte sur.

Figura IV.31.- Perfil en 3D del río Grande con caudal de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ de la parte Norte.

Figura IV.32.- Puentes que se localizan en el cauce del Río Chiquito y que se utilizaron para el modelo.

Figura IV.33.- Secciones transversales de los puentes del Campestre y Camelinas para un gasto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ del Río Chiquito.

Figura IV.34.- Secciones transversales de los puentes Antonio del Moral y Sansón Flores, con un gasto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 35.- Secciones transversales de los puentes José Rentarías y Ventura Puente, con un caudal de proyecto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 36.- Secciones transversales de los puentes Vicente Santa María y Virrey de Mendoza, con un gasto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 37.- Secciones transversales de los puentes Avenida Michoacán y Ferrocarril, con un caudal de proyecto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura IV.38.- Perfil longitudinal del Río Chiquito para un gasto de $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura IV.39.- Perfil longitudinal del Río Chiquito para un gasto de $70 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura IV.40.- Perfil longitudinal del Río Chiquito para un gasto de $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura IV.41.- Perfil en 3D del río Chiquito con caudal de $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura IV.42.- Periodo de retorno para lluvias de una y veinticuatro horas de la estación Morelia.

Figura IV.43.- Histograma de frecuencia de las lluvias máximas y de los eventos registrados en la Estación de Morelia.

Figura IV.44.- Periodo de retorno de Gumbel, aplicado las lluvias intensas de la Estación de la 21^a Zona Militar.

Figura IV.45.- Distribución de Gumbel, aplicado a los gastos históricos del Río Grande.

Figura IV.46.- Periodo de retorno para los gastos máximos históricos del Río Grande por medio del Método de Weibull.

Figura IV.47.- Distribución de Gumbel, aplicado a los gastos históricos del Río Chiquito.

Figura IV.48.- Periodo de retorno para los gastos máximos históricos del Río Chiquito por medio del Método de Weibull.

Lista de Tablas

- Tabla II.1.-Aporte de sedimentos según el área de la cuenca.
- Tabla II.2.- Valor del Factor de Forma relacionada con la redondez.
- Tabla III.1.- Periodos en que El Niño ha estado activo (IMN, Costa Rica).
- Tabla III.2.- Desastrosas inundaciones naturales. Tomadas de Selecciones Reader's Digest 1990.
- Tabla III.3.- Inundaciones y daños provocados por los huracanes en el 2005 (CNH; FIA y Televisa, 2005).
- Tabla III.4.- Impacto económico de los desastres en México. Valores en mdd (Cenapred 2005).
- Tabla III.5.- Huracanes históricos que han afectado la República Mexicana.
- Tabla III.6.- Inundaciones presentadas en el 2005 en la República Mexicana.
- Tabla IV.1.- Daños que han dejado diferentes lluvias intensas en la Ciudad de Morelia.
- Tabla IV.2.- Registro de daños ocasionados por las lluvias extraordinarias, que provocaron inundaciones en el 2005.
- Tabla IV.3.- Relación de las estaciones meteorológicas que se utilizaron en el análisis de la cuenca.
- Tabla IV.4.- Precipitación media de la cuenca en estudio.
- Tabla IV.5.- Resultados del Balance hidrológico, aplicado a la cuenca en estudio.
- Tabla IV.6.- AS.- Aporte de Sedimentos ($\text{m}^3/\text{km}^2\text{-año}$).
- Tabla IV.7.- Resultados de los valores de los coeficientes de entrega de sedimentos.
- Tabla IV.8.- Resultados del transporte de sedimentos

Tabla IV.9.- Valores de los periodos de retorno para lluvias de una hora de la estación meteorológica Morelia.

Tabla IV.10.- Periodo de retorno para lluvias registradas en Morelia.

Tabla IV.11. Periodo de retorno por Log-Normal de los caudales máximos del Río Grande, registrados por CNA en la estación de Atapaneo.

Tabla IV.12.- Periodo de retorno para Log-Pearson de los caudales máximos del Río Grande, registrados por CNA en la estación de Atapaneo.

Tabla IV.13. Periodo de retorno por Log-Normal de los caudales máximos históricos del Río Chiquito, registrados en la estación que se localizaba sobre avenida Solidaridad.



1.- INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el hombre ha sido atraído por las zonas fértiles y principalmente estos sitios se encuentran en muchos casos en zonas aluviales, donde pudieron encontrar muchísimas facilidades en virtud de su cercanía a fuentes de agua, comida, etc. Irónicamente, el mismo río o arroyo que provee sustento a las poblaciones circundantes, también expone a esas poblaciones a desastres naturales debido a inundación principalmente. Las inundaciones pueden ocurrir debido a precipitación atípicamente alta, fallas en represas, ríos bloqueados o rompimiento de represas o márgenes, incluso fugas en el sistema de drenaje público. Los desastres por inundaciones, después de las sequías, son los que afectan al mayor número de personas a nivel mundial (DNA, 1995).

Durante la última década, el número de sequías e inundaciones ha aumentado trágicamente, debido al deterioro de las condiciones medioambientales y al cambio climático global a causa del incremento del efecto invernadero por emisiones de gas. La gran mayoría de los sistemas fluviales del mundo se han visto alterados por las actividades del hombre, esta situación ha ido empeorando a causa de la pérdida de cobertura vegetal en las cuencas, los árboles y otras vegetaciones ya que ayudan a absorber y almacenar el agua durante la estación húmeda para que ésta esté disponible durante la estación de estiaje. La transformación de humedales en tierras agrícolas y urbanas, también ha empobrecido la capacidad de estas esponjas naturales de absorber y almacenar el excedente de agua durante la estación lluviosa. Esto significa, según el Instituto de Recursos Mundiales, que ahora las sequías son más frecuentes y severas principalmente en las zonas áridas, al mismo tiempo que la intensidad y frecuencia de las inundaciones aumenta, sobre todo en las regiones del mundo más propensas a ellas.

La Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia y el Pacífico (CESAP) en 2003, atribuyó que las inundaciones (y en algunos casos sequías), en dichas zonas, son debido a la vasta deforestación de las cuencas, a las prácticas de gestión del suelo, a la conversión en suelo utilizable de los humedales y llanuras inundables y a la rápida expansión de las áreas urbanas.

Dentro del contexto de la problemática del riesgo o de los elementos que atribuyen a que una amenaza se presente con mayor intensidad, están los fenómenos o amenazas naturales que no se pueden evitar, como en una lluvia torrencial, un huracán, un proceso de remoción en masa, un terremoto, etc. Los antrópicos son los que intervienen en la aceleración y en los procesos naturales. Entre los elementos antrópicos están la deforestación, el descontrolado crecimiento urbano, es decir una mala planeación para su crecimiento y desarrollo urbano, la contaminación del aire, el desmedro del paisaje y con ello el deterioro de la condición o calidad de vida.



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán*



Introducción

Se dice entonces que la deforestación es una amenaza de inicio lento que puede contribuir a desastres causados por inundaciones, procesos de remoción de masa (PRM) y sequías. El rápido avance de la deforestación en algunas partes del globo terrestre sirve de impulso al aumento anual de desastres de inundaciones en estas áreas, debido a que es mayor el coeficiente de escurrimiento superficial. De acuerdo a los datos tomados de una evaluación de recursos forestales, cada año, más de 17 millones de hectáreas de selvas tropicales y tierras silvestres se convierten a agricultura, zonas de engorda y para otros usos, y menos del 10% de los suelos deforestados, se vuelven a reforestar cada año (DNA, 1995).

Los eventos naturales potencialmente peligrosos se dividen en: atmosféricos (huracanes, tornados, granizos, tormentas tropicales, etc.); hidrológicos (inundaciones costeras, sequías, erosión y sedimentación, desbordamiento de ríos, etc.); sísmicos (fallas, temblores, licuefacción, Tsunamis, etc.); volcánicos; y geológico-hidrológicos (PRM, hundimientos, etc.).

Las inundaciones pueden ser eventos controlados por el hombre, dependiendo el uso que se le este dando al suelo y la cercanía de los asentamientos humanos con los cauces de ríos. Las inundaciones se producen principalmente por la ocurrencia de lluvias intensas o prolongadas, como sucede durante las tormentas tropicales y el paso de huracanes, unido a dificultades locales en el drenaje provocado por diferentes causas, principalmente por la acción negligente de las personas (Malilay, 2000; CENAPRED, 1992; in CRID).

Además las inundaciones son amenazas que se dan naturalmente, se convierten en desastres cuando hay afectaciones a las vías de comunicación, asentamientos humanos, etc., que se encuentran a su paso o que dichos escurrimiento fueron cambiados por el hombre. La ciudad como escenario de riesgo y desastre es ya bastante evidente en todo el mundo, los devastadores impactos económicos sufridos durante los últimos tiempos a raíz del Tsunami del 2004 en Indonesia, los impactos de los grandes huracanes (Wilma, Rita, Katerina, etc.), las grandes inundaciones y las tormentas que han azotado tanto el sureste de los Estados Unidos, como en los Estados del sur de nuestro país (Yucatán, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Tampico, Veracruz, etc.), así como en los países del Centro y Sur de América.

Uno de los peligros atmosféricos más desastrosos son los huracanes y podemos mencionar que los ciclones tropicales son el riesgo natural de recurrencia cíclica e inicio rápido más destructivo. Entre 80 y 100 ciclones tropicales ocurren cada año en el mundo. La devastación causada por vientos violentos, lluvias torrenciales y los fenómenos acompañantes, como son los oleajes de tormentas e inundaciones, llegan a formar una desorganización masiva de la comunidad.

La mayoría de las perturbaciones graves del clima se originan en el Oeste de África y cruzan el Atlántico hasta el Continente Americano, que es ahí donde suelen causar los mayores daños; cuando el verano en la región del Sahel del Oeste Africano es más lluvioso de lo normal, las condiciones se hacen propicias para la aparición de importantes huracanes; los vientos de la troposfera, provenientes del Este azotan el Atlántico Ecuatorial con gran intensidad; el calor de las capas de agua superficiales del mar nutre de vapor a las tormentas y las bajas presiones de la zona Ecuatorial las intensifican; los suaves vientos del Oeste sobre el Caribe proporcionan, en ocasiones, el cambio de trayectoria de los huracanes.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán



Introducción

Dentro de los fenómenos naturales que desmejoran la estabilidad en una localidad, son los huracanes, los cuales son los que más dañan a las poblaciones, ya que no solo inundan cosechas y ciudades, sino que en muchas ocasiones dejan pérdidas humanas por arrastre de las corrientes, así como por PRM ocasionados por la acumulación de agua en el suelo, daños en la infraestructura, afectaciones en la salud, entre otras; con ello un desequilibrio en la economía principalmente de la localidad afectada y posteriormente del país en que se presentan los fenómenos.

El acelerado crecimiento de una población, afecta tanto el que no exista un adecuado planeamiento que evite la urbanización dentro de zonas vulnerables o potencialmente amenazadas o expuestas al riesgo, ya sea por cualquier tipo de peligro hidrogeomorfológico.

En México las devastaciones se repiten por falta de planeación, recordando que los fenómenos naturales se presentan con igual frecuencia que en el pasado, pero el aumento de la población asentada en zonas vulnerables, por el crecimiento económico desigual, multiplica sus efectos destructivos y aumenta las pérdidas económicas, así como la pérdida de vidas humanas.

La dinámica de crecimiento de las ciudades, ha ido transformando las condiciones del crecimiento urbano, agudizando las diferencias entre zonas de gran modernidad y polos excluidos y empobrecidos. La falta de planificación y de políticas adecuadas para el impulso de un verdadero desarrollo urbano han complejizado los problemas profundizándose la degradación ambiental, siendo riesgos ante los desastres naturales que se presentan recurrentemente, afectando en una dimensión mayor a los sectores marginados, cuyos asentamientos se ubican en zonas más populosas y precarias de la gran ciudad.

El presente estudio esta enfocado a estudiar la problemática hidrológica e hidráulica que constantemente se presenta en la Ciudad de Morelia, es decir cada periodo de lluvias intensas se tienen colonias inundadas especialmente por las escorrentías del cerro Quinceo en la parte norte de la ciudad. Otra zona que también se ve afectada a menudo es la parte sureste de la ciudad, que es por donde ingresa el río Chiquito y cuando se tienen lluvias atípicas en la parte alta de la cuenca, esto provoca fuertes avenidas lo que pone en peligro las colonias que se localizan cerca de este afluente ya que se tendrán desbordamientos de este.

La red hidrográfica de la ciudad de Morelia está comprendida por tres ríos importantes, para lo cual en el presente estudio se abordara el caso del río Grande y principal afluente (Chiquito). La ciudad fue construida en la parte más elevada del valle donde se encontraba protegida de toda inundación que pudiese ser provocada por las avenidas de estos ríos. En la década de los 70's la ciudad de Morelia comienza a tener un rápido y acelerado crecimiento, sin tener una planeación que permita regular dicho crecimiento y provocando la invasión principalmente de los antiguos cauces de los ríos, como es el caso de la colonia Prados Verdes.



II.- CONCEPTOS BÁSICOS

La superficie terrestre constantemente sufre cambios importantes debido a la presencia del agua que es un recurso esencial en La Tierra. Según Aristóteles, uno de los antiguos sabios de la antigua Grecia, manifestaba en la Filósofa de Tales de Mileto (586 a.C.) que, *"Todos los seres son, en el fondo, agua o manifestaciones y transformaciones diferentes de ésta, por eso La Tierra flota sobre el agua"*.

El aumento de la población en el Mundo y el estilo de vida de alto consumo han provocado en las últimas décadas una fuerte demanda de recursos hídricos, que ha ido incrementándose a tasas crecientes. Esto ha generado que, entre los diversos sectores productivos exista una intensa competencia tanto espacial como temporal por el agua, buscando asegurar un adecuado suministro para sus respectivos usos. Esta situación ha llevado a la necesidad de desarrollar programas y proyectos regionales para el control y aprovechamiento integral de los recursos hídricos, la expansión urbana en todos los países del mundo, los grandes problemas de drenaje, las regiones agrícolas intensamente explotadas y la construcción de grandes embalses aguas arriba de concentraciones industriales y/o urbanas, ha llevado a buscar nuevas soluciones y criterios de diseño para el control y disminución de avenidas o crecidas.

II.1.- HIDROLOGÍA

La hidrología versa sobre el agua en el Planeta, su existencia, su distribución, sus propiedades y su influencia sobre el medio ambiente, siendo un agente clave dentro de la climatización, existencia y desarrollo de civilizaciones y aspectos ambientales del globo terráqueo, así como para asegurar el desarrollo social y económico de los pueblos.

Para comprender un poco de la hidrología es importante tomar en cuenta otras disciplinas como son la Meteorología, Hidráulica, Mecánica de Fluidos, Geología, Geomorfología, Agronomía, Silvicultura, Ecología, Oceanografía, Análisis de Sistemas, Estadística, entre otras, con la finalidad de llegar a la hidrología aplicada (IMTA, 2001; Bendient y Huber 2002; Kington, 1998).

En una región o área, las características hidrológicas, quedan determinadas por el clima así como por las condiciones meteorológicas, sin dejar de lado factores tales como la geología y geomorfología, edafología y vegetación. Donde los factores climáticos y meteorológicos que inciden en el régimen hidrológico de una cuenca se distinguen fundamentalmente, por el régimen de precipitación (intensidades, duración y frecuencia). Influye también, la existencia y



distribución de nieve y hielo, la humedad, temperatura del aire, los efectos del viento y la distribución de las masas de aire y de la radiación solar (Fuster, 2004).

Linsley et al., (1990) dicen que la Ingeniería Hidrológica está primeramente involucrada con tres características de flujo: el primero son los volúmenes mensuales y anuales disponibles para almacenamiento y su uso; el segundo es la tasa de bajo flujo que restringen los usos de agua; y el tercero se refiere a las inundaciones. La frecuencia tradicional de inundaciones es por definición a "largo período", es decir el flujo de avenidas que se esperaba que ocurra en promedio, en un año o en el fratiempo, tendrá un cambio de ocurrencia de 1% en cualquier año (Crawford, 2002).

La Hidrología aplicada en su definición más simple es la ciencia que estudia la distribución, cuantificación y utilización de los recursos hídricos disponibles en nuestro planeta. Estos recursos se distribuyen en la atmósfera, en la superficie terrestre y en las capas del suelo. Dentro de esta ciencia se contemplan diversos tópicos, los cuales dependen de la recolección de datos así como de métodos analíticos. Es aquí donde entra la ingeniería hidrológica en su parte superficial, ya que nos permite conocer qué tipos de caudales máximos podremos esperar, el control de inundaciones, erosión y control de sedimentos, la capacidad de un embalse para regular o asegurar un suministro para consumo humano o irrigación durante las sequías, así mismo los efectos que pueden producir algunas infraestructuras sobre las avenidas de las corrientes (Knighton, 1998). Otra actividad es el planeamiento de cómo están cambiando los ríos y corrientes en la medida que cambia el uso de suelo, donde parte de las cuencas son urbanizadas, deforestadas, o se disminuye la agricultura, entre otras (Linsley et al., 1990).

La Hidrología Superficial estudia la distribución de las corrientes de agua que circulan por la superficie de La Tierra, así como los almacenamientos en depósitos naturales lagos, lagunas o ciénegas. Por último, en la Hidrología del Agua Subterránea se incluyen los estudios de los almacenamientos subterráneos, o acuíferos, en lo referente a localización, volumen, capacidad de almacenamiento y posibilidad de recarga.

II.1.1.- Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico tiene una serie de reservas, o también conocidas como áreas de almacenamiento, además de una serie de procesos que provocan que el agua se mueva entre dichas reservas. Las reservas más grandes, son los océanos, que contienen aproximadamente un 97% del agua de La Tierra. El 3% restante es el agua dulce, tan importante para nuestra sobre vivencia. De ésta, aproximadamente el 78% está almacenada en la Antártica y Groenlandia. Aproximadamente el 21% de agua dulce que se encuentra en La Tierra, es agua almacenada en sedimentos y rocas debajo de la superficie de la terrestre. El agua dulce que vemos en los ríos, arroyos, lagos y en la lluvia, constituye menos del 1% del agua dulce en movimiento.

Para comprender la hidrología es necesario echar un vistazo al concepto del ciclo hidrológico, ya que es un término descriptivo aplicable a la circulación del agua en el planeta. De acuerdo a Campos (1998) el proceso de transporte recirculatorio y permanente, es debido principalmente



a la fuerza motriz que transmite una energía proporcionada por el Sol que permite la elevación del agua en forma de gas, mientras que otra causa esencial es la acción de la gravedad terrestre, ya que ésta permite que el agua condense y descienda generando la precipitación y posteriormente los escurrimientos (Bedient y Huber, 2002).

El ciclo hidrológico es un modelo o idealización del movimiento, distribución y circulación general del agua en La Tierra, y a pesar de que el concepto es simple, el fenómeno es considerablemente complejo y complicado. Chow (2000), le llama ciclo a la alteración del agua ya que no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua, donde el agua circula a través de la hidrosfera.

Se considera que el ciclo del agua es un equilibrio dinámico, lo que representa que la cantidad de agua contenida en la atmósfera, permanecerá siendo siempre la misma. En La Tierra, la precipitación excede a la evaporación; esto significa que en un promedio caerá más lluvia en un área de la que pueda evaporarse. En un cuerpo de agua, sin embargo, la evaporación excede a la precipitación, así el equilibrio se mantiene (Mostaza, 1998).

De la parte que llega al suelo, una parte circula por la superficie creando la escorrentía y concentrándose en pequeños surcos, algunos se integran a los arroyos los cuales posteriormente desembocan en ríos, que conducen el agua hacia los lagos, embalses o mares, donde se evapora o bien se infiltra en el terreno. Si el volumen infiltrado es abundante una parte puede percolar a grandes profundidades hasta recargar los acuíferos, es decir el agua subterránea emerge en manantiales o circula hacia los ríos nuevamente; mientras que otra solamente humedece el suelo, es decir se queda en la zona no saturada, volviendo a la atmósfera como evaporación del suelo y de las plantas, englobado en evapotranspiración. Bajo el dominio de la gravedad, tanto el escurrimiento superficial como el agua subterránea se mueven hacia zonas bajas y con el tiempo integran el escurrimiento total de un río para fluir hacia los océanos (Campos, 1998; Bedient y Huber, 2002).

La percepción del ciclo hidrológico antes descrito, da la impresión de ser un proceso continuo, aunque equivocado, debido a que en cada fase, el movimiento es errático tanto temporal como espacialmente, ya que las cualidades del agua también cambian durante el ciclo, siendo el gran mecanismo de desalinización de la naturaleza (OMM, 1977).

II.1.2.- Sistema hidrológico

Chow (2000), trata el concepto de sistema como fenómenos extremadamente complejos, sin embargo dice que, en ausencia de un conocimiento perfecto, puedan representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema, lo que describe como un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo, cuyos parámetros son la precipitación, evaporación, escorrentía, donde los componentes se pueden agrupar para analizar el sistema total. En cambio los subsistemas se pueden estudiar separadamente y combinar los resultados de acuerdo a las interacciones de los mismos.



Separando el sistema hidrológico en tres subsistemas tenemos: el sistema de agua atmosférica, el sistema de agua superficial y el sistema de agua subsuperficial. Recordando que el flujo subsuperficial es el que ocurre en la capa de suelo cercana a la superficie (Chow, 2000; Bedient y Huber, 2002).

La consideración de un gran sistema hidrológico, permite proporcionar un enfoque más cuantitativo y racional a la hidrología. Ya que este concepto se puede definir como un conjunto de elementos o procesos físicos unidos a través de alguna forma de interdependencia, que actúa sobre un grupo de variables de entrada para convertirlas en salida (Sánchez, 1974; Chow, 2000).

II.1.3.- Cuenca hidrológica

La representación de un proceso de lluvia-escorrentía lo podemos tomar como un sistema hidrológico. Una cuenca es una superficie de terreno que drena hacia una corriente en un cierto lugar. La divisoria o parteaguas es una línea imaginaria que separa la superficie del terreno cuyo drenaje fluye hacia un cierto arroyo, cuyos desagües escurren hacia otros ríos. La frontera del sistema se dibuja alrededor de la cuenca, tomando en consideración las cotas más elevadas que se localizan en el área de estudio.

La lluvia es la entrada, distribuida en el espacio sobre el plano superior, donde el caudal es la salida, concentrado en el espacio de la salida de la cuenca. La evaporación y el flujo superficial también se consideran como salidas, aunque son muy pequeñas comparadas con el caudal durante una tormenta. La estructura de la cuenca es el sistema de conjuntos de flujos que van sobre el suelo o a través de él e incluye sistemas tributarios que eventualmente convergen para convertirse en caudal a la salida de la cuenca.

Según Aparicio (1997), una cuenca hidrográfica es una zona de la superficie terrestre, en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Esta definición hace referencia a una cuenca superficial; asociada a cada una de estas cuencas superficiales, concurre también una cuenca subterránea, cuya forma vista en planta, es semejante a la superficial. De acuerdo al punto de salida se diferencian esencialmente dos tipos de cuencas es decir la exorreica y endorreica (Fig. II.1). En la cuenca exorreica el punto de salida se localiza en los límites de dicha cuenca y concierne a otra corriente o hacia el mar (A); mientras que en una cuenca endorreica el punto de concentración y posterior salida (subterráneo o por evapotranspiración) se encuentra dentro de los límites de la misma y generalmente es un lago (B).

Desde el punto de vista de una cuenca, el ciclo hidrológico puede representarse como una inducción establecida por la precipitación, a la que la respuesta corresponde por medio del escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta se presentan varios fenómenos que condicionan la relación entre una y otra, y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. Dichas características se clasifican en dos tipos: A) las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca, el tipo de suelo, etc.; y B) las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca, los cauces, etc., en la relación precipitación-escorrentía (Alcalá, 2004).

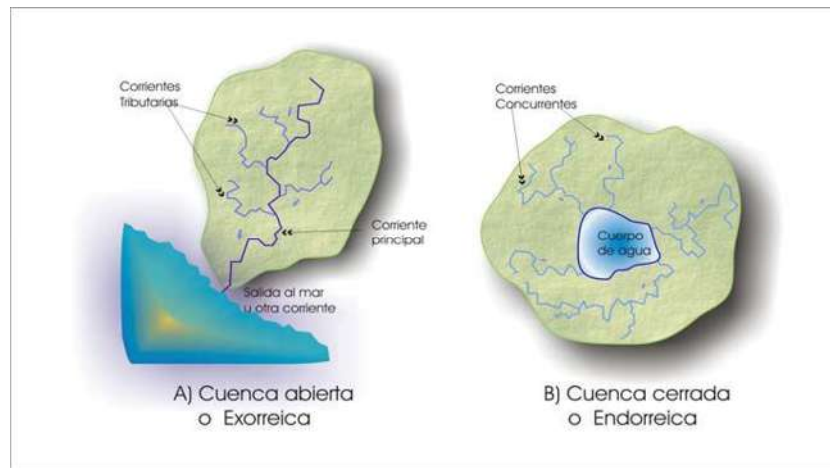


Figura II.1.- Categorización de cuencas.

El parteaguas o conocido también como línea divisoria, es una línea imaginaria formada por los puntos de máxima cota topográfica, separando las precipitaciones en la cuenca hidrográfica, de las cuencas colindantes y encaminando la escorrentía resultante para cada sistema fluvial, lo que no impide que en el interior de una cuenca existan picos aislados con una cota superior a cualquier punto de la divisoria (Monsalve, 1999). El cauce principal de una cuenca exorreica es la corriente que pasa por la salida de la misma. Las corrientes restantes de una cuenca del tipo exorreica se denominan corrientes tributarias (Fig. II.2). Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida se llaman subcuencas o cuencas tributarias.



Figura II.2.- Caracterización de una cuenca exorreica.



Horton en 1945 señala que entre más alto es el número de corrientes tributarias en una cuenca, más rápido será su respuesta al tiempo de concentración de la misma. Tomando en cuenta que en regiones con relieve débil, de roca resistentes o de suelo muy permeable con vegetación densa la densidad de drenaje es baja; no obstante en regiones de rocas débiles o suelos impermeables, escasa vegetación y relieve montañoso, se presenta alta densidad de drenaje (Campos, 1998).

Para ello, Horton (1945), propuso un cierto número de indicadores del grado de bifurcación, como se muestran en la Figura II.3, las cuales son: orden de corrientes, donde una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una de orden 2 tiene sólo tributarios de primer orden; dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2; dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc. El orden de una cuenca es el mismo que el de la corriente principal en su salida (Chow et al., 2000; Aparicio, 1997; Campos, 1998).

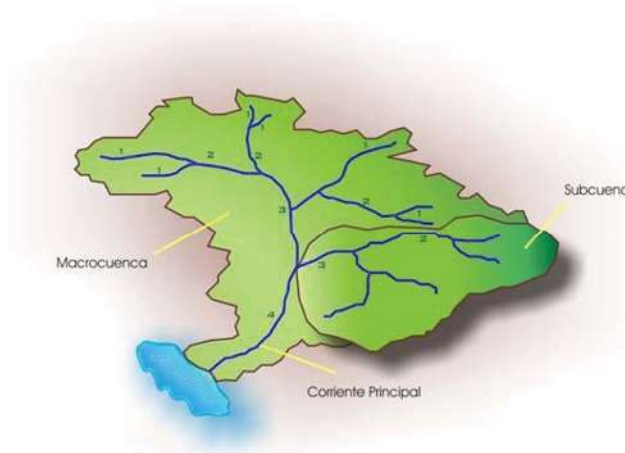


Figura II.3.- Jerarquización de una cuenca hidrográfica, así como sus tributarios.

La Cuenca Hidrográfica esta definida por las altas cumbres de la morfología, las cuales son fácilmente delimitables sobre un mapa topográfico o un modelo digital de elevación. En cambio la *Cuenca Hidrogeológica* es un concepto que engloba también a las aguas subterráneas, y que no siempre coincide con la cuenca hidrográfica, esto es de acuerdo a los substratos del terreno. Una cuenca hidrográfica constituirá también una cuenca hidrogeológica, es decir, podemos considerar que las delimitantes topográficas que dividen a la escorrentía superficial constituyen también la divisoria de la escorrentía subterránea entre cuencas adyacentes (Monsalve, 1999; Sánchez, 2001).

Las cuencas hidrográficas, que constituyen porciones de territorio delimitadas por líneas de parteaguas (o displuvio) y surcos de líneas de impluvio que recogen las aguas de escurrimiento y las concentran en un colector principal, pueden ser estudiadas desde el punto de vista morfométrico, es decir a través la definición de sus características geométricas. Guerra y



González (2002), de acuerdo con Strahler (1974), toman en cuenta la individualización de las tres categorías de elementos para describir la morfometría de una cuenca hidrográfica:

- a).- Propiedades lineares: comprenden la longitud (el ancho por lo general se considera infinito), el número y el orden jerárquico de los cursos de agua; de estos últimos viene considerada la proyección sobre un plano horizontal.
- b).- Propiedades areales: se constituyen por las áreas de las superficies de las cuencas, proyectadas sobre un plano horizontal; incluyen la descripción de las formas de las mismas cuencas.
- c).- Propiedades del relieve: se constituyen de la cota de puntos determinados de la cuenca hidrográfica, del desnivel entre dos puntos dados, de las pendientes de los taludes y de los cauces fluviales.

Este parámetro toma en consideración las principales características de una cuenca hidrográfica. En particular, esto resulta directamente proporcional a la intensidad de las precipitaciones. En cuanto se refiere al aspecto litológico, la densidad de drenaje es inversamente proporcional a la permeabilidad de los terrenos aflorantes y directamente proporcional a la erodabilidad de los suelos. Relativamente a la cobertura vegetal, los valores más bajos de la densidad de drenaje "D" se reencuentran en donde la cobertura vegetal es más densa. Elevadas densidades de drenaje se tendrán, por ejemplo, en correspondencia de terrenos arcillosos (impermeables) escasamente con vegetación, mientras en presencia de rocas calcáreas donde el reflujo puede ser en buena parte subterráneo, la infiltración de las aguas en cavidades y conductos de origen cárstico, se tendrán valores de "D" relativamente bajos.

En cuanto a "D", que pone en relación una propiedad linear de una cuenca con una propiedad areal, constituye uno de los parámetros morfométricos más significativos; está definida como la relación entre longitud total de todos los segmentos fluviales de una cuenca y el área de la misma (Horton, 1945).

La disposición y el tipo de la red hidrográfica, dependen principalmente de los factores estructurales y de las condiciones climáticas. Los ríos tienden a evitar los obstáculos constituidos por las rocas más resistentes, por lo cual siguen la dirección de los pliegues y de las fracturas; la red hidrográfica se desarrolla más densamente sobre terrenos impermeables, pero no se comportan igual en aquellos permeables.

Con base en la constancia de la escorrentía, los cursos de agua se clasifican de varias maneras, las más usuales son dos que a continuación se explican (Monsalve, 1999; Campos, 1998; Linsley et al., 1990; Aparicio, 1997):

- a) *Por el tiempo en que transportan agua.* Según esta clasificación las corrientes pueden ser perennes, intermitentes o efímeras (Fig. II.4).

En una corriente perenne el punto más bajo del cauce se encuentra siempre abajo del nivel de aguas freáticas (Fig. II.4 A). Estas corrientes transportan agua durante todo el año y siempre están alimentadas, totalmente o en parte por el agua subterránea, es decir, son efluentes. Estos son ríos de zonas templadas y de tropical húmedo, cuyas precipitaciones se encuentran repartidas a lo largo del año. Están constantemente reabastecidos, aunque pueden



experimentar cambios estacionales y diarios en su caudal, debido a las fluctuaciones de las precipitaciones y al aporte de cada tormenta.

Una corriente intermitente transporta agua solamente durante la época de lluvias de cada año, es decir el nivel freático asciende hasta quedar por encima del punto A (Fig. II.4 B). En época de secas el nivel freático queda por abajo de dicho punto y la corriente no transporta agua, salvo cuando se presenta alguna tormenta. Estos ríos son de zonas con clima tipo mediterráneo, en donde hay estaciones climáticas muy diferenciadas, con inviernos húmedos y veranos secos. También se les llaman ríos jóvenes, ya que recorren zonas montañosas y escurren a gran velocidad. Otras de sus características es que son caudalosos y angostos.

En el caso de las corrientes efímeras el nivel freático está siempre por debajo del punto A (Fig. II.4 C), y transportan agua inmediatamente después de una tormenta, en este caso, alimentan a los almacenamientos de agua subterránea. Son ríos de zonas con clima desértico o seco, en los cuales se puede estar sin escurrimientos durante años. Esto es debido a la poca frecuencia de las tormentas en las zonas áridas. Pero cuando existen descargas de tormenta, que muchas veces son torrenciales, los ríos surgen rápidamente y escurren a gran velocidad. Los cauces secos de las zonas áridas, reciben el nombre de wadis, ya que pueden llegar a tener crecidas violentas y muy breves.

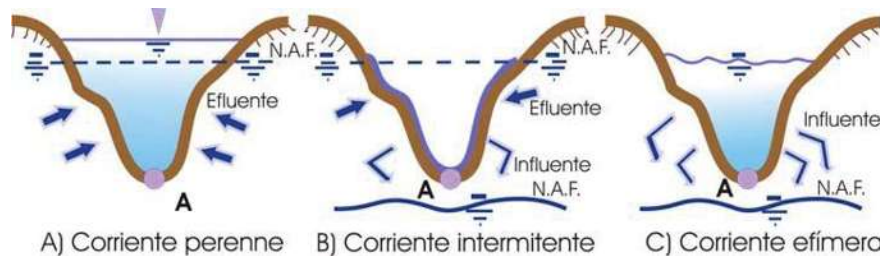


Figura II.4.- Los diferentes tipos de corriente que se pueden presentar en un río.

b) Por su posición topográfica o edad geológica. De acuerdo con esta clasificación los ríos pueden ser de montaña o juveniles, de transición o maduros, o bien de planicie o viejos.

Así mismo, en un mismo cauce se pueden encontrar los tres casos. Los ríos de montaña, característicos de cotas elevadas sobre el nivel del mar, tienen grandes pendientes y pocas curvas y, debidas a las altas velocidades que alcanza la escorrentía, sus cauces están generalmente formados por cantos rodados con un poco de grava y casi nada de finos.

Los ríos de planicie, presentan numerosos meandros debido a las bajas velocidades del agua y su cauce se forma por arenas y finos. En general, estos ríos se encuentran en cotas cercanas al nivel del mar. Los ríos de transición están en una situación intermedia entre los dos anteriores: presentan algunas curvas, con velocidades de agua moderadas y sus cauces están formados básicamente por grava, con algo de cantos rodados y arena (IMTA, 2001; Aparicio, 1997; Robert, 2003).



II.1.3.1.- Precipitación

La precipitación, es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye la lluvia, granizo y nieve, además del rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total (Bedient y Huber, 2002; Aparicio, 1997; Campos 1998). De acuerdo a su origen se distinguen los siguientes tipos:

- + las lluvias ciclónicas, que son provocadas por los frentes asociados a una borrasca o ciclón;
- + las lluvias de convección, se producen por el ascenso de bolsas de aire caliente y se presentan en verano;
- + las precipitaciones orográficas, se presentan cuando las masas de aire húmedo son obligadas a ascender cuando encuentran una barrera montañosa. El estudio de la precipitación es fundamental, debido a que constituye la principal o única entrada de agua a una cuenca.

Básicamente se tienen tres métodos para la evaluación de la precipitación media en una zona de estudio, los cuales son aplicables a intervalos muy diferentes como la duración de la tormenta, días, meses o años, como los que se describen a continuación:

Método del promedio aritmético de la cuenca. Es el método más simple de obtener la precipitación media, realizando un promedio aritmético de las cantidades de lluvia medidas en dicha área. El método es aplicable para áreas planas y con lluvias ciclónicas, donde los gradientes de precipitación no son tan fuertes, es decir, que el valor captado por cada pluviómetro no varía mucho respecto a la media. Lógicamente el número de pluviómetros deberá ser elevado y distribuidos uniformemente (Linsley et al., 1977; Campos 1998; Monsalve, 1999). De acuerdo a lo anterior se propone la siguiente fórmula para el cálculo de la precipitación media.

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i}{n}$$

donde:

$\bar{P}$ = precipitación media o promedio

P_i = precipitación registrada en cada estación

n = número de estaciones pluviométricas

Método de las curvas Isoyetas. Consiste en localizar en un mapa de tamaño adecuado las estaciones pluviométricas y sus promedios de lluvia registradas, a continuación se trazan líneas de igual cantidad de precipitación (curvas isoyetas). La precipitación promedio sobre un área se evalúa ponderando la precipitación entre isoyetas sucesivas por el área entre isoyetas. Para el cálculo se propone la siguiente fórmula.



$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) A_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^{n-1} A_{i,i+1}}$$

donde:

$\bar{P}$ = precipitación media o promedio

P_i = precipitación registrada

n = número de aparatos pluviométricos

A = Área de influencia del pluviómetro

Método de los polígonos de Thiessen. En 1911 Thiessen, considera la distribución no uniforme de los pluviómetros en el área, mediante una ponderación de cada uno de ellos. El método consiste en colocar en un mapa las estaciones pluviométricas delimitando la cuenca para la que se realiza el análisis, en seguida se forman triángulos con las estaciones más próximas entre ellas y posteriormente se trazan las mediatrices o bisectrices perpendiculares a cada lado de los triángulos formados, definiéndose unos polígonos alrededor de cada estación pluviométrica. Para lo anterior se propone la siguiente fórmula.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * P_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

II.1.3.2.- Evapotranspiración

Es el proceso por el cual el agua líquida pasa al estado de vapor en condiciones naturales. Para que exista la evaporación, debe haber una fuente de energía, que en condiciones naturales es la radiación solar, transformada en calor sensible de la atmósfera o de la superficie evaporante (Bedient y Huber, 2002). Además es el fenómeno que condiciona la característica energética de la atmósfera y altera las características de las masas de aire en ella existente. La importancia para los hidrólogos, es conocer las pérdidas de agua en las corrientes, canales, embalses, así como la cantidad de agua que debe ser adicionada para la irrigación (Monsalve, 1999).

II.1.3.3.- Escurrimiento

La escorrentía superficial es el fenómeno más importante desde el punto de vista de la ingeniería aplicada, ya que consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre (Monsalve, 1999). Según la OMM (1977), el escurrimiento es la parte de la precipitación que fluye por gravedad por la superficie del terreno, o en el interior del mismo. Maderey (1977), puntualiza que el escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes superficiales, sean éstas, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua.



Horton (1933), dijo que, desperdiciando la intercepción por vegetación, la escorrentía superficial es aquella parte de la lluvia que no es absorbida por el suelo mediante infiltración, si el suelo tiene una capacidad de infiltración " f ", entonces cuando la intensidad de lluvia " i " es menor que " f ", la lluvia es absorbida completamente y no existe escorrentía superficial.

Los factores que influyen en la escorrentía superficial se consideran tres aspectos: el primero se refiere a la naturaleza climática, como es la intensidad de precipitación, es decir, entre mayor sea, más rápido el suelo se saturará debido a la infiltración, provocando un exceso en el flujo que escurrirá superficialmente. El segundo aspecto corresponde a la naturaleza fisiográfica, que es de acuerdo al área y a la permeabilidad. El tercer aspecto es de naturaleza humana, donde interfieren o se encuentran las obras hidráulicas construidas dentro de la cuenca, así como la rectificación de los ríos.

II.2.- HIDRÁULICA FLUVIAL

El objetivo principal de la hidráulica fluvial es el de proteger y controlar los cauces de los ríos, además ha identificado como temática medular la morfología de los ríos, los sedimentos y sus propiedades, el transporte de sedimentos y la estabilidad de los cauces.

El natural y continuo desarrollo de las poblaciones y de sus economías han llevado a las ciudades a un crecimiento tal, que un fenómeno fluvial extremo implica mayor riesgo para sus habitantes, así como para la infraestructura habitacional, vial, industrial, de telecomunicaciones y agrícola.

Considerando la situación geográfica de algún punto en el Planeta, se puede considerar que algunos territorios están sujetos a fenómenos meteorológicos extraordinarios, que producen ciclones en forma considerada, los cuales a su vez, generan precipitaciones de gran intensidad o de duración considerable convirtiéndose en un riesgo potencial de daños para las poblaciones.

El intemperismo, el transporte, la depositación y la mitificación son elementos de la sedimentación. El proceso comienza en el instante en que los fragmentos son dislocados de la roca por el intemperismo. El carácter de los sedimentos dentro de la textura y estructura nos refleja la dinámica del transporte y su depositación. Entonces el proceso de erosión, transporte y depositación de partículas de sedimentos por agua, son controlados esencialmente por las características de las propias partículas así como por las características del fluido en movimiento (Robert, 2003; García y Maza, 1998; CNA IMTA, 2000).

II.2.1.- Erosión

La erosión es un proceso natural ligado a la dinámica evolutiva del Planeta y constituye un eslabón más del ciclo geológico de la Corteza Terrestre. La parte externa de este ciclo, tiene la finalidad de alcanzar equilibrios de masa y energía, a través de la movilización de materiales



desde las partes emergidas y más elevadas hacia sectores más bajos o deprimidos; así las cuencas marinas reciben los sedimentos que pierden los sistemas montañosos continentales.

Se trata de un proceso por el cual se desgastan y rebajan los materiales que afloran en la superficie terrestre y siempre significa pérdida de los mismos. Dentro de la erosión se distinguen varios tipos: la erosión glacial, fluvial (ríos o arroyos), litoral o marina, hídrica (agua excedente de precipitaciones), y eólica (viento). Cada una de estas variantes está relacionada a una determinada condición climática o posición en el paisaje. Aunque esta acción se ve fortalecida por las actividades humanas.

Existe un gran número de factores que controlan las tasas de erosión, de los más importantes son el régimen de lluvias, la cobertura vegetal, el tipo de suelos y la inclinación del terreno. Dentro de la importancia que juega el régimen de las gotas de lluvia se tiene el impacto de éstas sobre la superficie del suelo (Linsley et al., 1990).

Las tasas de erosión son mayores en pendientes altas que en pendientes suaves. Entre mayor sea la inclinación, más efectiva será la acción del agua de lluvia en erodar y transportar el sedimento pendiente abajo (Knighton, 1998). Las velocidades del flujo superficial son superiores en taludes con mayor pendiente, y los movimientos masivos del suelo son igualmente frecuentes en terrenos de gran talud. Así mismo, la longitud de la pendiente también es importante; entre más corta sea la pendiente, más pronto llegarán los sedimentos al río.

En muchas montañas de laderas escarpadas, estos agentes de erosión son tan activos que logran arrancar y eliminar casi toda la cobertura vegetal, y han llegado a morder profundamente en la roca compacta subyacente. El fenómeno denominado erosión, trata de un proceso dinámico que exige conducir los residuos de las rocas a un nuevo emplazamiento.

Existen parámetros erosivos que controlan la eficacia de la erosión en la superficie terrestre, los cuales están dados por el análisis de numerosos factores, debido al tamaño del suelo, a la complejidad del proceso erosivo y a la dificultad de medir con precisión la cantidad de residuos que en cada instante se desplazan, no resulta fácil determinar la velocidad con que la erosión rebaja los suelos "velocidad de denudación", ni la cantidad de detritos que transporta un determinado agente erosivo. Sin embargo, y a pesar de lo incompleto de los datos se puede confiar en ciertas estimaciones sobre la importancia relativa. La gravedad es solo la fuerza motriz inmediata que origina los desplazamientos. El viento y el agua, que son los principales agentes erosivos, dependen de la radiación solar en cuanto a su eficacia (Gilluly et al., 1964).

No es posible indicar con precisión todas las fuentes que producen los sedimentos que llegan a un río y que son transportados por su corriente. Sin embargo, de acuerdo con la definición anterior, la fuente principal la constituyen los suelos y rocas que se encuentran en la cuenca, el agua y el viento son, en nuestro medio, los principales agentes de erosión y de transporte. Por otro lado, dada la actividad del hombre en el medio que lo rodea, las fuentes del sedimento pueden clasificarse en naturales y artificiales (antrópicas).

Dentro de las fuentes naturales está la erosión superficial, dada por la intensidad de lluvia, la cual cuando agota la capacidad de infiltración del suelo de la cuenca, se inicia el llamado flujo



de agua por tierra, este escurrimiento superficial desprende y acarrea también partículas de las capas superficiales del terreno, donde la cantidad de material acarreado es tanto mayor cuanto más frecuente y violenta son las lluvias o los vientos, y menos densa es la cobertura vegetal del suelo; la erosión del cauce principal y sus tributarios, se presenta cuando ya se ha iniciado un escurrimiento superficial y como consecuencia de las irregularidades topográficas, se crea en primer lugar el arroyo, los cuales aumentan gradualmente su caudal y se transforman en torrentes, éstos últimos con gran capacidad erosiva y de transportación; los movimientos naturales del terreno.

En cuanto a las fuentes artificiales, se encuentra la destrucción de la vegetación, la cual para desgracia, el hombre destruye irracionalmente bosques y praderas para abrir terrenos al cultivo, al desarrollo urbano o industrial, pero sin duda el desmonte, la quema y el descepa de extensas zonas boscosa, son las actividades que más sedimentos producen, ya que de esa manera se priva al suelo de manto protector contra las lluvias; también las obras de ingeniería como son la construcción de caminos, vías férreas, presas, plantas industriales, ciudades, etc., provocan que gran cantidad de material sea removido, la mayoría exponiéndolos sin protección, lo cual facilita la transportación hacia las corrientes y cuerpos de agua (García y Maza, 1998).

Con lo anterior decimos que es de gran importancia el estudio de las propiedades de los sedimentos por su relación con las formas de fondo y, por consiguiente, con la resistencia y los regímenes de flujo.

II.2.2.- Cálculo de la pérdida de suelo

Algunos de los aspectos importantes que influyen en la pérdida de suelo, son la erosionabilidad superficial, la cobertura vegetal, las prácticas de cultivos y la ganadería. Esto ocurre cuando se ha cambiado el uso de suelo ya que la erosión se acelera. Aunque con la realización de adecuadas prácticas de laboreo agrícola y prácticas de conservación de suelo, se han disminuido significativamente el aporte de material sólido.

Para hacer estudios a detalle es necesario tener una base de datos de por lo menos un año si es de flujo sólido, y de 3 años de constante monitoreo, toma de muestras y observación, tanto en la cuenca como en el cauce. Es por ello, que se utilizan métodos empíricos para tener una aproximación del material que aporta una cuenca a su salida. Según García Sánchez (1997), menciona una diferencia en la definición entre el cálculo de erosión de suelo y el aporte de sedimentos. En cuanto al cálculo de erosión de suelos **A**, se refiere a la cuantificación del material sólido que se pone en movimiento en una tormenta o en un cierto periodo como producto de la erosión hídrica, mientras que el aporte de sedimentos **AS** corresponde al material sólido real que proporciona una cuenca a su salida, expresándose en m^3/km^2 -año o ton_m/km^2 -año.

Dentro de la gran variedad de métodos empíricos que se conocen para calcular el aporte de sedimentos y tomando en cuenta el criterio de los mismos, se presentan cuatro de ellos. Gottschalk (1964), propone calcular los valores promedio del **AS** para cuencas, de acuerdo a su tamaño, obtenida de mediciones realizadas en EUA (Tab. II.1).



Tamaño de la cuenca (km ²)	AS aporte de sedimentos (m ³ /km ² -año)
< 25.9	1810
25.9 a 259.0	762
259.0 a 2590.0	481
> 2590.0	238

Tabla II.1.-Aporte de sedimentos según el área de la cuenca.

La USAR (United States Bureau of Reclamation), se basa en mediciones realizadas en cuencas del suroeste de los EUA (García 1997), en donde la ecuación depende del área de la cuenca **Ac** (km²).

$$AS = 1421.8 (Ac)^{0.229}$$

Mientras que el método propuesto por NAMBA (1971) considera otros parámetros, como la precipitación media anual **P**, el desnivel máximo entre las cotas de la cuenca **H**, y una relación porcentual entre las áreas de suelo desnudo y las cubiertas por la vegetación **F**, como se observa en la siguiente ecuación.

$$AS = 0.292 P + 0.474 H - 0.118 F + 2.452$$

Existe una fórmula universal de pérdida de suelo (FUPS), también con criterio empírico propuesta inicialmente por Wischmeier y Schmidt en 1958, solo que este método se enfoca más a las pérdidas de suelo en parcelas, aunque ha sido modificada para aplicarse a cuencas, donde los factores en consideración son los siguientes: potencial erosivo de la lluvia (**R**), tipo de suelo (**K**), factor de longitud y pendiente del terreno (**SL**), factor de cobertura vegetal (**C**), factor que toma en cuenta las prácticas de cultivo y conservación del suelo (**P**), como lo muestra la siguiente ecuación.

$$AS = (224.2) R K SL C P$$

II.2.3.- Velocidad de asentamiento de las partículas

La propiedad más fundamental de una partícula en relación con su comportamiento durante el transporte, es su velocidad de asentamiento. Tal propiedad es determinada por su tamaño, su esfericidad y la densidad de la partícula. Existen dos leyes de asentamiento que son importantes para los sedimentos, una aplicable a las partículas finas y la otra a las partículas gruesas de acuerdo a la velocidad de asentamiento. La Figura II.5 muestra que las partículas pequeñas



(limos y arcillas), se asientan en condiciones de resistencia viscosa, mientras que las más grandes (arenas y grava hasta guijarros), se asientan en condiciones de inercia.

De acuerdo a la ley de Stokes, una esfera de diámetro cualquiera y de densidad dada, al estarse asentando en el agua, es atraída hacia abajo con una fuerza que depende del volumen de la partícula, de la aceleración de la gravedad y de la diferencia entre la densidad de la partícula y la del fluido. Si la esfera es muy pequeña (del orden inferior a 0.1mm de diámetro en agua), la resistencia ofrecida por el fluido es proporcional al producto del diámetro por la velocidad de la partícula y por la viscosidad del fluido. Por lo tanto la velocidad de asentamiento de las partículas es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula, en la cual se reúnen diversas constantes.

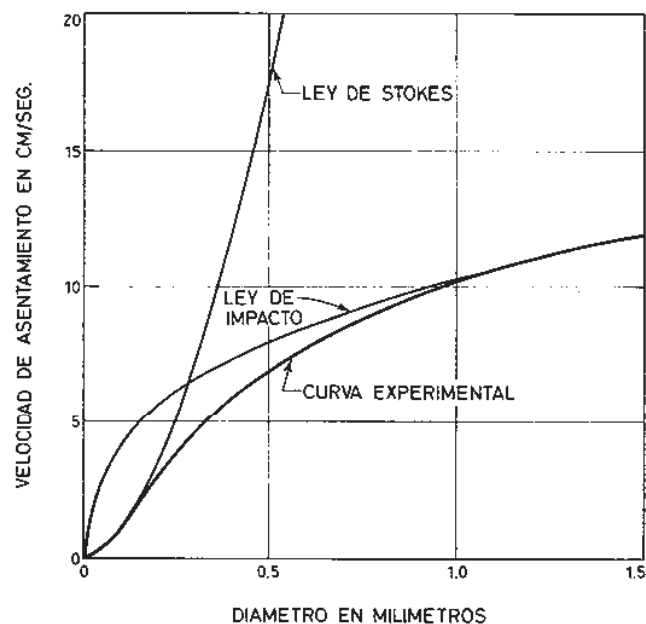


Figura II.5.- Comparación de los datos experimentales sobre velocidad de asentamiento con la Ley de Stokes y la Ley de Impacto.

La curva experimental se realizó con muestras de granos de cuarzo, como se observa en la Figura 2.6, existiendo una zona de transición que se extiende entre los diámetros 0.1mm al 1.0 mm, demostrando que las partículas pequeña siguen la ley de Stokes mientras que las partículas grandes tienen un comportamiento de acuerdo a la ley de impacto.

II.2.4.- Diagrama de Hjulstrom

Uno de los modelos de gran objetividad que frecuentemente se utilizan en el análisis sedimentológico, fue desarrollado por Hjulstrom (1939), el cual a base de una serie de



experimentos y aplicación de las leyes de Stokes, diseñó el diagrama que se observa en la Figura II.6. En este diagrama el diámetro de las partículas está representado a lo largo de las abscisas con una escala logarítmica. En el eje de las ordenadas, se encuentra la velocidad de las partículas en centímetros por segundo.

La curva que se encuentra en la parte superior del diagrama, representa las velocidades críticas necesarias para poner una partícula en movimiento. Mientras que las partículas muy pequeñas con un diámetro entre una milésima y una centésima de milímetro, necesitan grandes velocidades para levantarlas del fondo y ponerlas en suspensión.

La curva que se observa en la parte inferior derecha representa las velocidades de sedimentación y expresa naturalmente las condiciones en las cuales una partícula que se encuentra en suspensión en una corriente, pasará a formar parte del fondo cuando la velocidad de sedimentación exceda a la velocidad de arrastre.

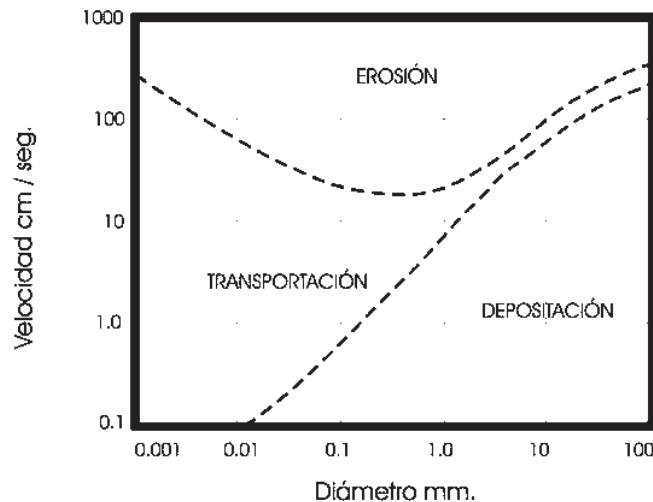


Figura II.6.- Diagrama de Hjulstrom, que relaciona el proceso de sedimentación con las curvas de velocidad de asentamiento de las partículas.

Cuando todas las partículas han sido puestas en suspensión, las más grandes se depositarán rápidamente, permaneciendo en el área de transporte un tiempo relativamente corto, como se puede ver en el diagrama. En cambio las partículas pequeñas, después que la velocidad de la corriente ha excedido la fuerza de cohesión que las unía y son puestas en suspensión en el fluido, permanecerán en ese estado un tiempo bastante considerable (Arreygue, 2003).

II.2.5.- Clasificación del flujo

Dentro de los criterios primarios de clasificación esta la variación del tirante del flujo en el tiempo y en el espacio, al considerar el tiempo como criterio, entonces un flujo puede ser



clasificado como *permanente*, lo que indica que el tirante no cambia con el tiempo. O bien como *no permanente*, implicando que el tirante cambia en el tiempo; si se agrega o se sustrae agua a lo largo del canal, cada consideración cambiará y entonces el flujo puede comportarse permanente pero no ser uniforme. Este tipo de flujo se le denomina como espacialmente variado. Si tomamos como criterio de clasificación el espacio, entonces un flujo puede ser clasificado como uniforme, si el tirante del flujo no varía con la distancia; o como no uniforme si el tirante varía con la distancia, el flujo no permanente también se clasifica como rápidamente variado, cuando llega a haber algún salto hidráulico, o gradualmente variado si existiera un almacenamiento aguas arriba.

De acuerdo a la mecánica de fluidos, existe una clasificación del flujo dependiendo de la proporción de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas de viscosidad, donde éste puede ser laminar, transicional o turbulento. La base para clasificarlo estriba en el parámetro adimensional conocido como el número de Reynolds como se observa en la siguiente ecuación (French, 1993):

El flujo laminar es en el que las fuerzas de viscosidad son relativamente más grandes que las fuerzas inerciales y de ahí que las fuerzas viscosas predominan en el flujo. En un flujo turbulento pasa lo contrario, las fuerzas inerciales son las que dominan la situación. Mientras que el flujo transicional es aquel que no se clasifica ni en laminar ni turbulento.

II.2.6.- Propiedades individuales de las partículas

De acuerdo a la resistencia que oponen las partículas al ser arrastradas y de su comportamiento al ser transportadas se pueden clasificar los sedimentos en cohesivos y no cohesivos.

Un material cohesivo es una mezcla de partículas del tamaño de coloide, arcillas, limos y del tamaño de las arenas finas, su límite superior es de 2mm de acuerdo con el Departamento de Agricultura de los EE.UU., la escala de Atterberg, y de la ASTM (American Society for Testing Materials).

Se consideran dos perspectivas para la caracterización del sedimento: características de grano individual y propiedades en volumen (Robert, 2003). Las principales características que interesan de un sedimento no cohesivo, son las partículas que forman el sedimento, es decir densidad, peso específico, tamaño, forma, y velocidad de caída, así como la relación entre peso y volúmenes. Además, se debe considerar la distribución de los tamaños de las partículas y el ángulo de fricción interna (Yang, 2003; Pérez y Rodríguez, 2005).

Tamaño es la propiedad que más se utiliza para clasificar al material arrastrado por un río. Los sedimentos naturales tienen diversas formas; por lo tanto, el tamaño de una partícula dependerá de la dimensión que se mida o del método que se utilice para obtener una medida característica. Sabemos de antemano que el sedimento no está constituido de partículas homogéneas, sino que éstas varían entre sí en peso, tamaño y forma, por ello es necesario determinar o seleccionar parámetros que permitan representar el comportamiento del conjunto de tamaños (García y Maza, 1998; Robert, 2003).



La ingeniería fluvial acostumbra a utilizar la clasificación propuesta por la American Geophysical Union, en esta clasificación se indica que existe una frontera natural, ya que se ha observado que las dimensiones de 0.062mm es el tamaño máximo que puede tener una partícula para que se deposite dentro del agua según la ley de Stokes, el movimiento de una partícula mayor provocaría turbulencia que alteran apreciablemente dicha ley de sedimentación. Ese límite se encuentra entre los limos y las arenas, que para muchos escurrimientos marca la frontera entre el material arrastrado y el material transportado en suspensión en forma permanente llamado también gasto de lavado (Julien, 1998; García y Maza, 1998).

Forma se refiere a su aspecto geométrico completo de una partícula sin considerar su tamaño o composición. Las partículas de formas geométricas muy diferentes, pero con el mismo volumen y densidad pueden comportarse en forma similar en un fluido, por lo que la forma puede definirse en términos de su comportamiento dinámico. La forma de las partículas puede ser muy variada y afecta su comportamiento dentro del agua (Tab. II.2).

REDONDEZ	DESCRIPCIÓN	SF
1. Muy angular	Partículas con superficies de fractura recientes, múltiples aristas y bordes cortantes.	0.12-0.17
2. Angular	Presentan esquinas y bordes ásperos, lastiman, no son tan cortantes o afiladas sino de formas más bien prismáticas.	0.17-0.25
3. Subangular	Se distinguen bordes y aristas, pero están despuntadas o ligeramente redondeadas.	0.25-0.35
4. Subredondeada	Se distinguen pero no se sienten las aristas ni los bordes. Se aprecia que estos han sido redondeados.	0.35-0.49
5. Redondeada	Tiende a equidimensional. No se diferencian esquinas o puntas al rolarlo con los dedos.	0.49-0.70
6. Bien Redondeada	Partículas con superficie lisa o pulida. Aproximadamente esférica o elipsoidales.	0.70-1.00

Tabla II.2.- Valor del Factor de Forma relacionada con la redondez.

Textura de la superficie de las partículas es una propiedad importante en la evaluación de la abrasión a la que han estado expuestas, es decir que tan rugosas pueden ser. La textura de los sedimentos en conjunto, o la apariencia superficial, que depende del tamaño de la partícula, forma, graduación y de su interacción con el flujo. Esto se refiere al grado de fineza o uniformidad del material. De acuerdo a la sensación producida al contacto con los dedos, es posible determinar el tipo de material o sedimentos identificados. Pueden ser rugosas (arenas finas, arenas limosas y limo arenoso); harinosa (limos); jabonosa (arcilla, turbas amorfas); y fibrosa (turba fibrosa).



Composición mineral es importante, debido a que esta influye en su densidad y peso específico. Influyendo así mismo el tamaño en la velocidad de caída de las partículas y con ello estimarse la distancia que el material ha sido transportado.

Velocidad de caída se define como la velocidad máxima que adquiere la partícula al caer dentro del agua. Su cálculo es fundamental para obtener los parámetros que se necesitan para el transporte de sedimentos, así como para conocer los regímenes de flujo. Donde la velocidad de caída de una partícula esférica se determina cuando la fuerza de arrastre se equilibra con el peso sumergido (Knighton, 1998; Caldiño et al., 2000; García y Maza, 1998).

La distribución granulométrica de los sedimentos. El material que se encuentra en el cauce no es homogéneo, por lo general es importante conocer la cantidad o distribución de partículas que lo conforman. Una manera es determinarla por medio de una curva granulométrica, ésta, es la representación gráfica de los resultados que se obtienen al cribar una muestra, obteniendo porcentajes de peso contra el diámetro de las partículas retenidas. Con ella se obtienen los diámetros representativos de la muestra.

Los cauces de los ríos al no tener material homogéneo, hacen necesario el uso de curvas de ajuste que sigan una determinada ley de probabilidad. En la mayoría de los casos cuando se tienen gravas y arenas, éstas se ajustan a una distribución de tipo log-normal; mientras que para cauces donde se tiene la mayoría de arenas se ajustan a una distribución logarítmica.

Concentración de sedimentos. La cantidad de partículas contenida en el seno de un líquido se expresa mediante la concentración que se puede dar en unidades de volumen (m^3/m^3), o de peso $\text{Kg.-fuerza}/\text{m}^3$, y en unidades de partes por millón, ya sea en volumen o peso (Julien, 1998; Pérez y Rodríguez, 2005).

II.2.7.- Ondulación en el fondo y resistencia al fluido

La fricción es la principal acción al movimiento de un líquido y esta fricción la provocan las partículas que conforman el cauce, se perturba cuando dichas partículas son arrastradas por el flujo provocando deformación de las características geométricas del cauce y del mismo escurrimiento. Ya que el movimiento de las partículas ocasiona ondulaciones en el fondo a mayor y menor equidistancia, induciendo una pérdida de energía debida tanto a la fricción como a la forma del fondo (CFE, 1981).

La resistencia al flujo se relaciona en forma directa con la profundidad e interactúa con la velocidad, en general, las formas de fondo son las que más contribuyen a la resistencia total del flujo; otro factor lo constituye la rugosidad efectiva del material de fondo. Así mismo, la resistencia al flujo es de importancia en las corrientes naturales, para conocer o estimar variables hidráulicas, como son velocidades y niveles para el diseño de obras de protección.

El cambio de gasto podría hacer un cambio en la configuración del fondo, el cual variaría la resistencia al flujo y a la profundidad. La resistencia al flujo en canales aluviales varía entre límites muy amplios y es extremadamente compleja porque la rugosidad debida a las formas de



fondo es una función de las características del flujo, de las propiedades del fluido, del sedimento y de la geometría del canal (Caldiño et al., 2000; Julien, 1998; Yang, 2003).

De acuerdo a los estudios realizados por Gilbert y Murphy (1914) y por USGS existen tres tipos de ondulaciones: de rizos, dunas y antidunas; las cuales están ligadas al número de Froude, esto es de acuerdo al tipo de régimen, así mismo con la clasificación dada por Simons y Richardson (1961). Los tipos de fondo que pueden presentarse en un cauce se observan en la Figura II.7.

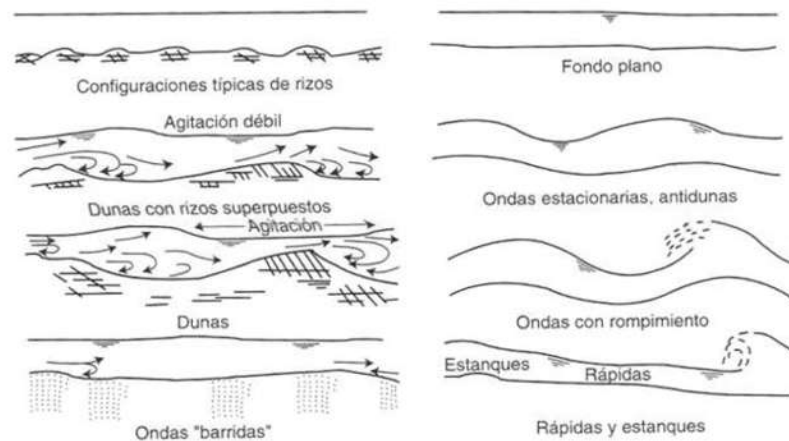


Figura II.7.- Clasificación de las configuraciones de fondo (Simons y Richardson, 1961).

El contacto entre el agua y las márgenes de la corriente causa una resistencia (fricción) que depende de la suavidad o rugosidad del canal. Dentro de las corrientes naturales la cantidad de vegetación influye en la rugosidad al igual que cualquier irregularidad que cause turbulencias

II.2.8.- Medición del transporte de sedimentos

Las primeras mediciones de sedimentos en suspensión se realizaron con botellas abiertas o trampas complejas con la finalidad de atrapar partículas, las cuales no cumplían el objetivo, debido a que un buen muestreador debe producir un mínimo de perturbaciones en el flujo y no se relaciona directamente con la velocidad del flujo (Linsley et al., 1990). Teniendo las muestras de sedimentos, se filtran y el sedimento se seca. La relación entre el peso de sedimento y el peso de la muestra es la concentración de sedimentos, que se expresa generalmente en partes por millón. Hasta el momento no existe aún un muestreador satisfactorio de carga de fondo de sedimentos. La dificultad en diseñar un muestreador radica en el problema de atrapar efectivamente todos los tamaños de partículas en la carga de fondo, sin perturbar el flujo local. Un tipo de muestreador de trampa, usado en investigaciones en cauces pequeños, consiste en una fosa excavada en el lecho del cauce para recoger los materiales depositados, los cuales se extraen más tarde para ser analizados (Julien, 1998; U.S. Interagency, 1963; Yang, 2003).



En campo, el material de grava en la superficie de los cauces en los lechos del río es frecuentemente analizado por un muestreo sistemático estratégicamente referido como método de muestreo de números de malla, este método fue aplicado por primera vez en los 50's y ampliamente usado para caracterizar gravas fluviales expuestas; consiste en medir el diámetro axial de un número de partículas seleccionadas aleatoriamente del material expuesto. En práctica, una malla es tendida sobre la superficie, y las partículas atraviesan las intersecciones de la malla siendo muestreadas y medidas. Las dimensiones de la malla deben ser de un tamaño suficiente para asegurar la independencia de medición (dos veces el tamaño de la partícula mayor).

Las técnicas fotográficas son utilizadas frecuentemente para recolectar un gran volumen de información del tamaño de grano. En este método, se utilizan fotografías tomadas de una rejilla de dimensiones conocidas, dando un número de cuadrantes con tamaño específico, de los cuales el número de granos expuestos en cada cuadrante son contados. (Robert, 2003).

El transporte de un sedimento se puede clasificar de acuerdo a la Figura II.8 y a los siguientes aspectos. Considerando que el subíndice **B** indica de fondo, mientras que el subíndice **S** indica en suspensión.

- ✦ Transporte en la capa de fondo o arrastre de fondo (GB).
- ✦ Transporte de fondo en suspensión (GBS o gBS).
- ✦ Transporte de fondo total (gBT). Donde: $gBT = gB + gBS$.
- ✦ Transporte de lavado (gL).
- ✦ Transporte en suspensión (gS).
- ✦ Transporte total (gT).

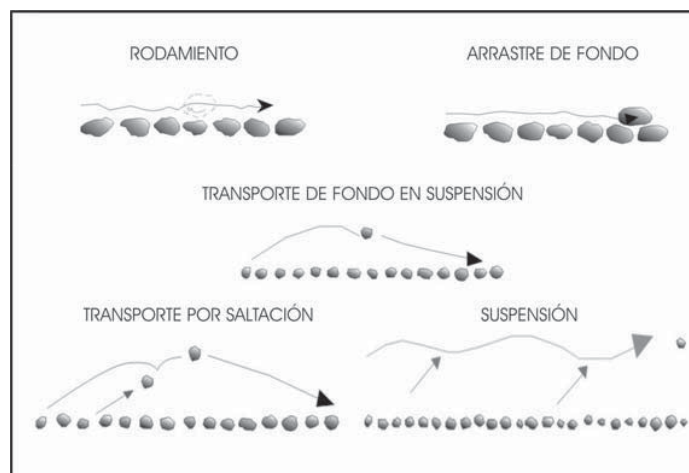


Figura II.8.- Clasificación del transporte de sedimentos en un cauce.

La evaluación de los diferentes tipos de transporte de sedimentos requiere tanto de procedimientos como de información técnica relacionada con las características y propiedades



físicas y mecánicas de los sedimentos, la hidráulica e ingeniería de ríos, así como de la información hidrológica que permite calcular los gastos (Robert, 2003; Yang, 2003; Knighton, 1998).

II.3.- DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXTREMOS

El análisis de frecuencias es un procedimiento para estimar la probabilidad de ocurrencia o periodicidad de ocurrencias de eventos pasados o futuros. De este modo la representación gráfica de la probabilidad, con o sin suposiciones de distribuciones de probabilidad, es un método de análisis.

El análisis de frecuencias de datos hidrológicos requiere que la información sea homogénea e independiente. La restricción de homogeneidad asegura que todas las observaciones provengan de la misma población. La restricción de independencia asegura que un evento hidrológico, tal como una gran tormenta aislada, no entre al conjunto de datos más de una vez (Monsalve, 1999).

Existen modelos matemáticos no lineales como las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno de la lluvia (IDT), los cuales se ajustan a registros pluviométricos, es decir datos de precipitación de las tormentas más intensas de cada año, registradas en los observatorios climatológicos que se tienen en diferentes sitios del país. Cuando la intensidad, para la duración, y el periodo correspondiente, son conocidos, entonces se pueden aplicar diferentes métodos de aproximación.

Según Koutsoyiannis et al., (1998), en Estados Unidos los mapas han sido desarrollados desde 1961 por el US Weather Bureau, posteriormente por la NOAA para el Oeste, Este y Centro. Estos mapas han sido reproducidos en algunos manuales y libros de texto de hidrología como en Chow (1964); Linsley et al., (1977); Viessman et al., (1989); Ponce (1989); Maidment (1993); Chow et al., (1994). Koutsoyiannis et al., (1998), etc. En el Reino Unido e Irlanda los mapas han sido realizados por el Instituto de hidrología, mapas similares se han hecho en Australia, India, SWA-Nambia e Italia (in Pereyra et al., 2004).

La República Mexicana cuenta con mapas de curvas IDT (isoyetas) elaboradas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, aunque no se conoce la metodología. No obstante a la escasez de registros pluviométricos, estos mapas son muy utilizados en ingeniería, para los proyectos de obras hidráulicas (Pereyra et al., 2004).

Los métodos estadísticos, permiten ajustar una función de distribución de probabilidades aplicado a los gastos máximos históricos y a lluvias intensas históricas. Para utilizar estos métodos se requiere conocer una serie de información. Algunos de los métodos estadísticos son de Nash, Gumbel, Lebediev, Log Pearson III, Pearson, Mínimos cuadrados, lognormal, Pearson III, Wakeby, Weimull y General de Valores Extremos (GVE), entre otros.



II.4.- MODELOS DE ESCENARIOS

Considerando la velocidad con la cual los cambios humanos están alterando el medio ambiente hidrológico, el tiempo puede producir series que no son homogéneas ni útiles para análisis de frecuencias. Dada la necesidad de obtener estimativos para definir la probabilidad que será aplicable en el futuro, la ingeniería hidrológica ha hecho énfasis en procedimientos para predecir las variables hidrológicas por una gran variedad de métodos indirectos.

El uso de software es facilitar el trabajo y realizarlo más rápidamente y sujeto a menos errores que la solución manual correspondiente.

Tradicionalmente los cálculos hidrológicos e hidráulicos se realizaban manualmente sin el apoyo de una computadora. La elaboración de la información se desarrolla individuando y desarrollando la cuenca directamente en las cartas topográficas. Así mismo la determinación de los coeficientes de escurrimiento a través del procedimiento de "overlayng maps" (sobre posición de mapas), del uso de suelo, de las características de la permeabilidad, características de inclinación del terreno, etc. Análogamente se hacía con la elaboración de los datos de las precipitaciones, cuando era todo manual.

Ahora todo este trabajo se puede realizar con la ayuda de una computadora, donde se puede auxiliar de software apropiados a cada necesidad. Los programas que actualmente se conocen son flexibles, la generación actual de computadoras facilita la utilización de estos programas con un "graphical user interface" que permite la manipulación de datos con simples pasajes gráficos con el Mouse, además existen programas que permiten códigos de programación muy avanzados y que pueden ser aplicados a la hidrología como a la hidráulica (Caivano, 2003).

II.4.1.- Tipos de inundaciones

Las inundaciones son amenazas que ocurren naturalmente y se convierten en desastres cuando hay asentamientos humanos en zonas aluviales. La presión poblacional es ahora tan grande que ha habido que contemplar los riesgos asociados con inundaciones debido a la necesidad cada vez más grandes de encontrar un lugar donde vivir. La amenaza de inundaciones ha aumentado porque la gente se ha mudado a tierras de aluvión y se ha establecido ahí a un ritmo mayor que el ritmo al que los ingenieros pueden diseñar mejores protecciones contra inundaciones.

La combinación del aumento en la población con una deficiente administración de recursos han creado nuevos tipos de inundación. La conversión de bosques a tierras de pastoreo o de cultivo en la cuenca de captación se traduce a una menor cantidad de agua retenida en las partes superiores de la cuenca. El aumento en el escurrimiento fluye rápidamente hacia la planicie, con el efecto de crear inundaciones más frecuentes, más inesperadas y más severas.

Inundación repentina.- normalmente se les define como inundaciones que ocurren dentro de las primeras seis horas de lluvia intensa, y comúnmente están asociadas con nubes cúmulo altas, tronadas, ciclones tropicales, o el paso de frentes de clima frío. Este tipo de inundaciones suelen



ser el resultado del aflujo de una lluvia torrencial, particularmente si las pendientes de la cuenca de captación no pueden absorber y retener una parte significativa del agua. Otras causas de inundaciones repentinas son la falla de presas o el desalojo repentino de bloqueos en ríos. Este tipo de inundación es una amenaza potencial, sobre todo cuando el terreno es inclinado, el escurrimiento superficial es alto, el agua corre a través de cañones angostos, además son probables las lluvias severas.

Inundación fluvial.- son causadas normalmente por precipitación sobre cuencas de captación extensas. Las inundaciones ocurren en sistemas de ríos con afluentes que descargan las aguas de áreas geográficas grandes e incluyen muchas cuencas fluviales independientes. A diferencia con las inundaciones repentinas, las inundaciones fluviales suelen gestarse lentamente, a menudo son estacionales, y pueden continuar por varios días o semanas. Los factores que regulan la magnitud de la inundación incluyen las condiciones del terreno (el grado de humedad de la Tierra, la cobertura vegetal, superficie urbana impermeable como el concreto) y el tamaño de la cuenca de captación. Los registros históricos de la inundación de poblaciones situadas en las principales zonas de aluviones no son confiables para efecto de protección ante inundaciones debido a la variabilidad de las contribuciones de los tributarios (DHA, 1995; Cenapred).

Inundaciones costeras.- algunas inundaciones se deben a ciclones tropicales. Las inundaciones catastróficas causadas por las lluvias a menudo se agravan por las olas de tormenta impulsadas por los vientos a lo largo de la zona costera. El agua salada puede inundar la Tierra como consecuencia de mareas altas, oleaje de tempestad o Tsunamis, ya sea por separado o en combinación. Al igual que en la inundaciones fluviales, la lluvia intensa es extendida sobre un área geográfica grande provocando inundaciones extremas en las cuencas fluviales costeras.

Otro tipo de inundación que es cada vez más común, es la inundación repentina en zonas urbanas. Las edificaciones y los caminos que cubren el terreno impiden que se infiltre el agua de lluvia, con lo cual ésta escurre sobre las superficies impermeables, formando ríos artificiales. El descuido a falta de mantenimiento de los sistemas de desagüe, particularmente después de temporadas largas sin lluvias en las que el polvo, desechos y vegetación, han bloqueado el flujo natural del agua, pueden agravar la frecuencia de las inundaciones repentinas.



III.- ESTADO DEL ARTE

III.1.- EL FENÓMENO DE EL NIÑO

El Niño, es un calentamiento anómalo en gran escala, que se presenta con la invasión de aguas superficiales cálidas desde la parte ecuatorial occidental del Océano Pacífico tropical (cerca de Indonesia y de las costas Australianas), hacia la región ecuatorial oriental y a lo largo de las costas de Ecuador, Perú y la parte norte y centro de Chile, desplazando las aguas frías de la Corriente de Humboldt (Fig. III.1). Los mecanismos naturales previos a la ocurrencia de "El Niño" se manifiestan como un período largo de fuertes vientos alisios producidos por la intensificación del Centro de Altas Presiones Permanente del Pacífico Sudeste, lo que provoca una acumulación de agua en el Pacífico Oeste, reflejada como un nivel medio del mar más alto que lo normal en ese sector del océano y un nivel medio del mar más bajo que lo normal en el Pacífico Sudeste. Cuando el sistema atmosférico se relaja bruscamente, el agua acumulada en el Pacífico Oeste vuelve hacia el este, las que impactan al continente sudamericano aproximadamente a la altura de las Islas Galápagos, provocando un desplazamiento de aguas ecuatoriales de alta temperatura, baja salinidad y pobres en elementos nutrientes hacia las costas de Ecuador y Perú; estas aguas a su vez desplazan hacia la costa Norte y Centro de Chile una masa de agua subtropical de alta temperatura y densidad.

El Niño es el componente oceánico, mientras que la oscilación meridional es el componente atmosférico. Esta combinación da lugar al término ENSO (El Niño Southern Oscillation). El Niño aparece cada 2 a 7 años, con intensidad y duración variables y, por lo general, alcanza su nivel máximo en torno a la Navidad (Diciembre), de donde toma el nombre de El Niño (en referencia al Niño Jesús). Durante el fenómeno se producen variaciones importantes en las temperaturas y en los regímenes pluviales, con efectos positivos o negativos en la agricultura. Los cuales dependerán decisivamente de la fecha en que se produce el evento El Niño y el calendario agrícola de una determinada región. La Niña es el equivalente a "frío" o sequía.

El episodio más antiguo e histórico de El Niño se remonta a 1578, cuando lluvias e inundaciones torrenciales devastaron las cosechas en el norte del Perú. En tiempos recientes se observaron diferentes episodios de El Niño (1969, 1972, 1976, 1979, 1982-1983, 1986-1987, 1991-1995, 1997-1998, etc.), donde provocaron grandes inundaciones y sequías en las regiones adversas, todo esto en diversas partes del mundo, así como una disminución de las poblaciones ícticas, que causaron daños estimados en más de 10 mil millones de dólares en USA. El último episodio fuerte del fenómeno fue en 1997/98, con sequías e inundaciones en diversas zonas de América Latina, América del Sur y de Asia sudoriental que produjeron graves perjuicios a la producción y a la infraestructura agrícola (Tab. III.1).



A principios de diciembre de 2004 existía la incertidumbre en torno a la posibilidad de que se presentara un evento de El Niño. Aunque se tenían registros de las temperaturas superficiales que alcanzaron los umbrales típicos de El Niño alrededor de 3 ó 4 meses, así como otros indicadores importantes tales como el índice de oscilación meridional (SOI) ha sido en general débilmente negativo y no se han registrado variaciones atmosféricas notables en los vientos y la nubosidad del Pacífico. Sin embargo, aunque no haya indicaciones fuertes sobre un episodio de El Niño claramente definido, la persistencia de temperaturas más calientes de lo normal en el Pacífico tropical podría influir en los regímenes climáticos (FAO, 2004).

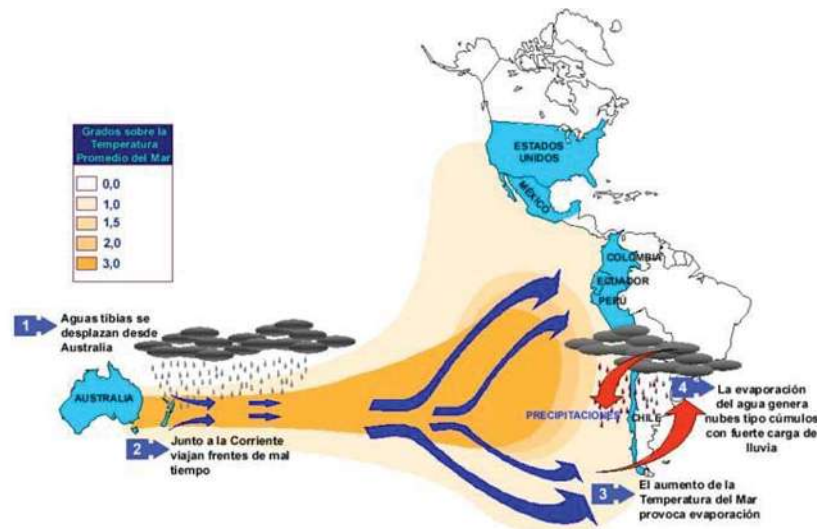


Figura III.1.- La transferencia de temperatura de las aguas marinas por los vientos alisios.

PERIODOS DE ENSO	
marzo - noviembre de 1953	abril 1982 – julio 1983
abril 1957- junio 1958	agosto 1986 - febrero 1988
junio 1963 - febrero 1964	marzo 1991 - julio 1992
mayo 1965 - junio 1966	febrero - septiembre 1993
abril 1972 - marzo 1973	junio 1994 - marzo 1995
agosto 1976 - marzo 1977	abril 1997 - abril 1998
julio 1977 - enero 1978	mayo 2002 - marzo 2003

Tabla III.1.- Periodos en que El Niño ha estado activo (IMN, Costa Rica).

Los efectos que deja al paso un huracán depende de la velocidad de los vientos, de manera que va aumentando y provocando mayores efectos, de acuerdo a la escala de Saffir-Simpson, donde los huracanes se tipifican en categorías, que van desde una depresión tropical, hasta llegar a formarse un huracán de categoría cinco, la cual es desastrosa si llega a tocar Tierra. El NOAA;



FEMA; CNH, hacen un continuo monitoreo del oleaje en las costas, lo cual permite alertar a la población cuando se acerca una amenaza de este tipo.

Depresión tropical.- en ella existe un aumento en el oleaje de alrededor de un metro respecto a los niveles normales, los vientos van desde pocos kilómetros por hora hasta los 60km/h.

Tormenta tropical.- se forma cuando la intensidad de los vientos aumentan, la cual esta dentro del rango de 60km/h a 118km/h, con aumento de hasta 3m en el oleaje respecto a los niveles normales.

Categoría I.- Cuando los vientos superan los 120km/h se convierte en huracán de grado uno, con daños estructurales mínimos, con aumento en el oleaje hasta los 4 metros.

Categoría II.- Al llegar los vientos a 150km/h pasa a huracán de grado dos, presentándose daños en los tejados, llegando a desprenderse, además de caídas de los árboles.

Categoría III.- Superando los 180km/h, los daños estructurales son más severos en las casas dejándolas sin techos, además se presentan inundaciones por el aumento en el nivel de más de 4m.

Categoría IV.- Los vientos pasan de 200km/h, el oleaje llega a 5m de altura respecto a su nivel normal, presentándose graves inundaciones más allá de la costa, daños graves en la estructura de las casas con caídas de muros, destrucción de las estructuras de madera, y combinando esto, el arrastre de agua, lodo, escombros y árboles.

Categoría V.- Ya con vientos que superan los 245km/h, las inundaciones llegan a ser de más de 6m respecto a su nivel normal, con daños graves en las estructuras de las casas y en ocasiones pérdida total de ellas. Esta es la categoría más alta, en la que los vientos llegan a superar los 300km/h.

Un "ciclón tropical" es el término científico para una circulación meteorológica cerrada, que se desarrolla sobre aguas tropicales. Estos sistemas a gran escala, no frontales y de baja presión, ocurren en todo el mundo sobre zonas que se conocen como "cuencas tropicales de ciclones" (NOAA, 1987). El nombre para ellos varía: en el Atlántico y el noreste del Pacífico tienen el nombre de "huracanes" de acuerdo con la palabra Maya para diablo, en el noroeste del Pacífico "tifones", en las Islas Filipinas y China como baguíos, en Australia como *willy-willies* y en el Pacífico sur u Océano Índico simplemente "ciclones".).

Estas depresiones tropicales se desarrollan como fuertes tormentas caracterizadas por vientos centrípetos. Generados sobre aguas cálidas oceánicas a bajas latitudes, siendo especialmente peligrosos debido a su potencial destructivo, su zona de influencia es de origen espontáneo y movimientos erráticos. Los eventos asociados con huracanes son los vientos que exceden 119km/h. Los daños son causados por el impacto del viento en las estructuras fijas y por los objetos que vuelan como consecuencia del mismo. Así mismo, las fuertes precipitaciones de varios días de duración anterior y posterior al huracán. El nivel de las precipitaciones depende de la humedad ambiental y de la velocidad y magnitud del huracán. Dado que las precipitaciones pueden saturar los suelos llegan a causar inundaciones como consecuencia del exceso de escorrentía; pueden causar derrumbes como consecuencia del sobrepeso del terreno y la lubricación de los materiales de la superficie; y/o pueden dañar los cultivos al debilitar el soporte de las raíces (OAS, 1991).



III.2.- ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Desde tiempos inmemoriales, vendavales y lluvias torrenciales marcan el ritmo de las estaciones, a merced de los caprichos de la meteorología. Ciertamente es que Europa se ha visto libre de huracanes, ciclones o de los tifones mortíferos que azotan de manera regular algunas partes del globo. A pesar de eso, el norte de Europa sufre numerosos temporales cada año, es decir al menos 100 ciclones alcanzan las islas británicas. El mal tiempo va acompañado a veces de trombas de agua que provocan graves inundaciones. En 1953, las roturas de los diques de protección anegaron gran parte de los Países Bajos, provocando la muerte de 1,800 personas. Como consecuencia de regímenes pluviales anormalmente abundantes y persistentes, las avenidas espectaculares y destructivas han afectado recientemente a numerosas cuencas fluviales en gran parte de Europa. Sin olvidar la incontenible crecida de las aguas invernales que en 1994-1995 padecieron Italia, Alemania, Bélgica, Francia y los Países Bajos. En el verano de 1997, los desbordamientos de la cuenca del Oder afectaron muy gravemente a Europa Central.

III.2.1.- Referencias de huracanes devastadores

Desde 1851, el Centro Nacional de Huracanes en Miami ha llevado un minucioso registro. Max Mayfield, Director del Centro Nacional de Huracanes en Miami Estados Unidos, asegura que nada tiene que ver con el calentamiento de la Tierra, esta atraviesa periodos de intensa actividad ciclónica que se repite aproximadamente cada 25 o 40 años. Lo que explica por ejemplo, lo ocurrido el año pasado, cuando en menos de un mes, se presentaron grandes huracanes principalmente en el Atlántico.

Los huracanes más catastróficos, han terminado con la vida de millones de personas, así mismo han dejado millones de dólares en pérdidas económicas alrededor del mundo, no importando credo, raza ni nacionalidad.

III.2.1.1.- El Huracán asesino de Galveston USA

El desastre natural más mortífero en la historia de Estados Unidos fue un huracán que pasó a través de Galveston, Texas, en 1900. El 8 de septiembre de 1900 empezó a llover en Galveston, el 9 de septiembre se informó a la población que el agua en la costa superaba el nivel de la calle (Fig. III.2), y los ciudadanos rápidamente empezaron a dirigirse hacia el centro de la isla, en búsqueda de refugio. A las 5:00 pm se informó de vientos con velocidades de 164 Km/hr. La marea llegó a 4.5 metros con rompimientos de olas de hasta 7.5 metros. El día 10 por la mañana, 6,000 residentes de Galveston estaban muertos. La mayoría de ellos fueron golpeados por escombros o se ahogaron. Quedaron destruidas más de 3,500 casas, y un tercio de la ciudad quedó nivelada por los vientos, olas y escombros. Se estima también que otras 2,000 personas murieron en el área de la Bahía de Galveston (Corazón, 2002; Selecciones 1990).



Figura III.2.- El Huracán de "Galveston" en 1900; más de 8 mil muertos fue el saldo que dejó, además ha sido el huracán que más vidas ha cobrado en Texas.

III.2.1.2.- Huracán San Zenón

El despertar del día 4 de agosto de 1930 fue algo traumático para los habitantes de la ciudad de Santo Domingo que no creyeron en la llegada del ciclón, haciendo caso omiso a la información meteorológica de este país (Fig. III.3). Los barrios más afectados fueron Villa Duarte y Villa Francisca, en ciudad Nueva algunos muertos y en Gazcue no hubo muertes. Del manicomio del Hospital Padre Billini, se sacaban cadáveres de sus escombros, perros hambrientos cruzaban por las calles de los barrios más dañados con parte de cuerpos humanos, una gran cantidad de cadáveres y heridos se encontraban entre los escombros, otros que se protegieron en un aljibe encontraron la muerte por las torrenciales lluvias que lo rebosaron, todos murieron, el aljibe fue sellado con una plancha de acero y luego una capa de cemento. La primera parte del ciclón sorprendió a mucha gente en todas partes, y también a los que se divertían en bares y cafetines de la zona del Timbeque al final de la calle Barahona. La catástrofe producida en unas pocas horas de azote por el huracán, dejó un balance según autoridades sanitarias de 8,000 muertos, 20,000 heridos y pérdidas económicas de 50mdp. Los muertos fueron enterrados en la Plaza de la Colombina. La ciudad se quedó sin luz, sin agua, sin periódicos y sin alimentos (Cocco, 1993).



Figura III.3.-El ciclón San Zenón en 1930; fue el peor en la historia de la nación caribeña, de la República Dominicana.

III.2.1.3. - Huracanes recientes

El huracán del día del trabajo que azotó los Cayos de Florida en Agosto 29 a Septiembre 10 de 1935, fue el huracán más fuerte que alguna vez azotara los Estados Unidos (Fig. III.4). Junto con Camille en 1969, Andrew en 1992 (Fig. III.5), Katrina y Rita en 2005, han sido los cuatro huracanes más violentos que hayan afectado a Estados Unidos, desde que se conservan informaciones sobre las tormentas. Se informó de vientos de hasta 322 km/hr. El número de muertos fue de 423, de los cuales 259 eran veteranos de la Primera Guerra Mundial que vivían en tres campos de rehabilitación. Muchos de los habitantes se ahogaron al ser arrastrados hacia el Atlántico, después de que pasara una ola de 4.5 metros.



Figura III.4.-Uno de los huracanes más fuertes en la historia, es "el huracán del día del trabajo" que azotó en 1935 a las costas de Florida.



El segundo huracán más intenso con categoría V fue "Gilberto", que en 1988 devastó la costa sur del estado de Florida causando daños de aproximadamente 26.5mmdd, según el Centro Nacional de Huracanes (CNH).



Figura III.5.- Devastación de la costa sur del Estado de Florida, USA provocada por el Huracán "Andrew" 1992.

Dentro de los huracanes que afectaron en el 2004, el primer huracán de la temporada fue el huracán "Charley", que asoló Jamaica y Cuba, atravesándola de sur a norte por las provincias habaneras y golpeó severamente la Florida en la costa este de Estados Unidos. En Cuba dejó cuatro muertos, 40 mil viviendas dañadas, más de 200 mil damnificados y graves afectaciones a las redes de electricidad, agua y comunicaciones telefónicas. En Estados Unidos ocasionó 31 muertos y se calcula que los daños materiales oscilan entre cinco mil y once mil millones de dólares. El huracán "Frances" que asoló Las Bahamas y Florida, dejando algunas secuelas en Georgia al igual que "Charley" dejó pérdidas millonarias a su paso, así como cientos de damnificados, que en Estados Unidos causó la muerte de 33 personas, principalmente en Florida, y en las Bahamas dejó dos muertos.

Huracán "Iván" 2004, este terrible huracán cobró la vida de decenas de personas a su paso por Barbados, Colombia, Granada Nicaragua, Haití, Jamaica, República Dominicana, Trinidad y Tobago, las Antillas Holandesas, Venezuela, Islas Caimán, Cuba, la península de Yucatán, en el noreste de México. También sembró la muerte y la destrucción en el sureste de Estados Unidos, donde tocó tierra, y días después de disiparse generó el deceso de seis personas en el Estado de Pensilvania. En total "Iván" dejó un saldo de 115 muertes, 49 de ellos en Estados Unidos y 39 en Granada.

Huracán "Jeanne", sin duda alguna, el huracán más devastador de la temporada del 2004. En Haití dejó un panorama desolador con más de mil 500 muertos y cientos de damnificados. Florida USA, de nuevo fue severamente castigada por este huracán, que si bien sólo cobró seis



víctimas, causó severísimos destrozos, lo que llevó al presidente de Estados Unidos, George W. Bush a declarar a la entidad como zona de máximo desastre. “Jeanne” dejó también 24 muertos en República Dominicana y siete en Puerto Rico (CNH; FIA y Televisa, 2005).

El Huracán Stan que afectó Centroamérica, sin duda alguna el huracán más devastador del 2005, presentándose el 4 de octubre. El huracán Stan golpeó a varios países de Centroamérica, causando inundaciones y PRM generalizados en Guatemala, Honduras, Costa Rica, El Salvador, Nicaragua, México, Belice y Haití. El número de muertos en Guatemala es de 652 y 557 desaparecidos; 15 en México y 3 en Nicaragua. El número de afectados en Guatemala fue 163,609; en México 1,9 millones y en Nicaragua 1,407 (OCHA 2005).

Huracán Wilma. Para el 20 de octubre un ciclón de máxima categoría con vientos de 260 km/h embiste el extremo oriental de la península de Yucatán, el extremo occidental de Cuba y, eventualmente, el suroeste de Florida. En donde los expertos lo describieron a Wilma como el huracán más potente jamás registrado, y con la mayor categoría después de Katrina y Rita en 2005. Causando estragos en Jamaica, con graves inundaciones y PRM. Durante de 15 días de torrenciales lluvias en Haití, provocaron inundaciones y aludes de lodo con la pérdida de 11 vidas y 2,300 personas resultaron afectadas en ese país. Las fuertes lluvias causadas por el huracán azotaron el litoral Atlántico de Honduras, obligando a evacuar varios poblados y a cerrar terminales marítimas. Al Norte de Belice fueron desalojadas 5 mil personas, mientras que en Costa Rica decretaron en alerta las regiones norte, sur y este del país, ya que las fuertes lluvias anegaron la mayor parte del territorio. Aunque el huracán no tocó a Cuba le dejó pérdidas por 704.2 mdd a la isla, por gastos en medidas preventivas y recuperativas, donde el sector más afectado fue la vivienda, con 7.589 casas dañadas, de ellas 446 derrumbes totales, 1.837 derrumbes parciales.

III.2.2.-Reseña de grandes inundaciones históricas

Gran número de países cada año sufren de grandes desastres naturales, los cuales llegan sin advertencia sembrando consternación y desgracias; año tras año mueren por estas causas alrededor de 30 mil personas, y existen años en que la cifras aumentan, donde a las vidas se añaden las pérdidas materiales y en ocasiones hasta de ciudades enteras. En la Tabla III.2 se presentan algunas de las más grandes e impactantes inundaciones que han ocurrido a lo largo de la historia alrededor del mundo

Año	Lugar	Descripción
1099	Países Bajos e Inglaterra	Una gran inundación que provocó la muerte de 100,000 personas, causadas por una combinación de mareas altas y borrascas del Mar del Norte, donde se han registrado las peores tormentas en la historia, tanto en 1099, 1287 como en 1421.
19 Nov 1824	San Petersburgo, Rusia	El río Neva estancado por el hielo, se desbordó ahogando a 10,000 personas en las cercanías de Kronstadt.



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán*



Estado del arte

Año	Lugar	Descripción
25-26 Mar 1913	Dayton, EUA	Las intensas lluvias y el súbito deshielo ocasionaron que se desbordara el río Ohio como sus afluentes; murieron alrededor de 700 personas y casi desapareció la ciudad de Dayton, Ohio.
Verano de 1939	China Septentrional	Cerca de 500,000 personas murieron debido al desbordamiento simultáneo de todos los ríos de esta región; la hambruna consiguiente costó muchas otras vidas.
Verano de 1948	Provincia de Fukien, China	La acumulación de dos meses de lluvia incesante ocasionó el desbordamiento del río Min, en el sureste del país, y la evacuación de millones de damnificados. Hubo 3,500 muertes, así como la pérdida de arrozales que agravó la miseria de los habitantes.
Jul 1951	Kansas y Missouri, EUA	Tras dos meses de intensa lluvia, una tormenta que duró cuatro días anegó la cuenca del río Kansas. Hubo 41 muertos, quedando anegadas 350,000 hectáreas cultivadas y los daños materiales ascendieron a más de 1mdd, pérdida sin precedente para aquella época y en ese país.
15-16 Ago 1952	Lynmouth, Inglaterra	Tras una precipitación pluvial de 23cm en menos de 24 horas, los ríos Lyn Oriental y Lyn Occidental arrojaron contra la población de Lynmouth un muro de agua de 12m de altura, provocando la muerte a 84 personas.
17 Ago 1954	Teherán, Irán	Una súbita riada descendió por una barranca normalmente seca y mató a más de 1,000 peregrinos musulmanes reunidos en un santuario cercano a la capital iraní.
7-12 Oct 1955	Orissa, India	Los mortíferos vientos monzones de ese año, inundaron el estado de Orissa, 325Km al suroeste de Calcuta; murieron unas 1,700 personas.
9 Oct 1963	Presa Vaiont, Italia	Un derrumbe arrojó 150 millones de toneladas de roca a esta presa de los Alpes Italianos. El agua se derramó en una ola de 70m de altura e inundó el angosto valle del río Piave; se ahogaron por lo menos 2,500 personas.
Sep-oct 1968	Túnez	Tras 38 días de lluvia incesante, 80% de este árido país africano quedó anegado; hubo 542 muertos y se perdieron más de un millón de cabezas de ganado.
9 Jul 1972	Rapad City, EUA	Un mes de torrenciales lluvias, ocasionaron la ruptura de una presa y la inundación de la ciudad de Dakota del Sur. El agua destruyó 80 manzanas de casas y ahogó a 200 personas.



Año	Lugar	Descripción
31 Jul 1976	Gran Cañón de Thompson, EUA	Una avenida descendió por el Cañón de Thompson y aumentó en 6m el nivel del río. El agua arrastró a 85 o más vacacionistas.
Sep 1988	India Septentrional	Los peores monzones de varias décadas causaron terribles inundaciones en el Norte de la India. Cinco millones de hectáreas cultivadas fueron destruidas, y solo en Calcuta murieron alrededor de 15,000 personas.
Ago 1988	Sudán	Después de una prolongada sequía y de una plaga de langostas, las torrenciales lluvias del 4 y 5 de agosto provocaron uno de los peores desbordamientos del río Nilo. A mediados de ese mes se informó de 39 muertos, pero alrededor de 1.5 millones de personas quedaron sin casa.
Sep 1988	Bangladesh	Debido al resultado de las lluvias provocadas por los vientos monzonicos, casi todo el país quedó anegado. Por lo menos mil personas, quizá 2,000 murieron ahogadas o por enfermedades; 25 millones quedaron sin techo.

Tabla III.2.- Desastrosas inundaciones naturales. Tomadas de Selecciones Reader's Digest 1990.

III.2.2.1.- Sicilia, Italia

El trece de marzo de 1995, se presentó una lluvia excepcional en las costas orientales de la Isla de Sicilia provocando la muerte de seis personas, así como daños económicos. Dicha lluvia se presentó de la siguiente forma, en una hora llovió 144mm, en tres horas 253mm y en seis horas 351mm. El evento ha sido determinado como una perturbación que se formó en el mar Iónico, en las últimas horas del 15 de marzo de 1995, el siguiente día la parte NE de la Sicilia y así mismo dos partes de la costa Iónica de la Calabria, (en Niccoli y Filice, 1995). Los horarios en que se presentaron los estruendos más intensos en las estaciones pluviográficas sicilianas y calabreses, se dice que el frente nubloso provenía del mar Iónico que llegó a las costas orientales del volcán Etna en la mañana de 13 de marzo y sucesivamente en la primeras horas de la mañana la costa Iónica del municipio de Regio Calabria y más tarde durante la noche entre el 13 y 14 de marzo en la costa Iónica de los municipios de Crotone y Catanzaro, dejando grandes daños a la infraestructura y provocando algunas inestabilidades de taludes. La lluvia inició el 13 de marzo de 1995 entre las 6:30 y las 7:00 de la mañana y llegando a su intensidad máxima entre las 11:00 y las 13:00, en algunas localidades costeras terminó de llover entre las 16 y 17 horas del mismo día (Rossi et al., 1996).

III.2.2.2.- Las catástrofes de Taranto, Italia

En la provincia de Taranto se verificaron durante el año 1995, después de varios años de sequía, sucesivos y notables eventos de lluvia. Esta tendencia siguió en los primeros tres meses



de 1996, favoreciendo la presencia de eventos catastróficos. Entre enero y febrero de 1996 varias comunidades fueron dañadas por eventos excepcionales en diferente modo, por lluvias no comunes que se presentaron en otros periodos. Las afectaciones que se mostraron fueron inundaciones, PRM, intensas erosiones, daños graves a la infraestructura del transporte e hidráulica, etc.

Dicho evento tuvo una duración de trece horas donde se registraron 478mm de lluvia en el poblado de Pomezzana, cuya precipitación media anual en la cuenca del río Versiglia es de 1430mm, mientras una cantidad inferior de 420mm se registró en el poblado de Fornovolasco (Fig. III.6). Los municipios más afectados son Crispiono, Faggiano, Fragnano, Ginosa, Lizzano, Manduria, Massafra, Montemesola, Mottola, Palagiano, Roccaforzata, San Marzano, Statte y Taranto (Polemio, 1996).



Figura: III.6.- Efectos del aluvión en el poblado de Fornovolasco, Italia.

III.2.2.3.- Cardoso, Italia

Un evento meteorológico de una excepcional violencia llegó a la Alta Versiglia y parte de la Garfagnana (Provincia de Lucca), el día 19 de junio de 1996 causando la muerte de 14 personas y grandes daños económicos. La cuenca del río Versilla fue la zona más dañada: en la montaña los escurrimientos superficiales del agua y las coladas de detritos destruyeron casi en su totalidad el paisaje del poblado de Cardoso; en la parte plana, la fuerte inundación interrumpió la vía del tren que circula de Roma a Genova.

Los principales efectos que se presentaron fueron de dos tipos, entre ellos colegados y representados por movimientos de inestabilidad de taludes, por el transporte en masa hacia la parte plana del valle. Muchos de estos desequilibrios iniciaron como deslizamientos traslativos de suelo impermeables en laderas; después de la movilización se presentó una rápida disgregación de la masa en movimiento y su licuefacción en una mezcla caótica de materiales finos y gruesos conteniendo una cantidad variable de agua y materiales orgánicos (Fig. III.7); el



movimiento siguió a lo largo de la ladera en forma de una colada más o menos viscosa generalmente veloz (in Pierson y Costa, 1987).



Figura III.7.- El poblado de Cardoso después del evento del 19 de junio de 1996 donde se muestran los materiales arrastrados y depositados al centro del habitado.

III.2.2.4.- Lluvia excepcional en Piemonte, Italia

Entre la una y las tres del lunes 8 de julio de 1996, lluvias intensas y localizadas dañaron el monte Mottarone en la Provincia de Verbania y de Novara. Los municipios más afectados fueron Omegna, Gravellona, Toce, Baveno, Pettenasco y Verbania, con una superficie aproximadamente 70 km².

Las precipitaciones que se registraron el 7 de julio en el valle de Toce y el Valle Sesia superaron los 50mm entre las 12:00 y las 24:00. Entre las 0:00 y las 6:00 del día 8 de julio de 1996 las lluvias se reanularon con una fuerte intensidad en el área comprendida entre el monte Mottarone y el monte Zeda, los valores acumulados superaron los 150mm, llegando hasta los 200mm en la parte más Septentrional de la zona. (Arcuri et al., 1996).

III.2.2.5.- Río Tanaro en Italia

Características de gran excepcionalidad están atribuidas a eventos que en noviembre de 1994 se presentaron en la cuenca del río Tanaro, en Piemonte. También en esta ocasión por efecto del centro de una depresión que se desarrolló entre las Islas Británicas y el Mediterráneo Occidental, bloqueado en su traslación hacia el Oriente por un área anticiclónica sobre Europa, Ruso-Balcánica. Los primeros días de noviembre se observaron las condiciones más desfavorables por precipitaciones intensas y persistentes entre Francia y Piemonte (Ciarmatori, ined; Mercalli et al., 1995; Pangallo, 1995; Regione Piemonte, 1994). En territorio Piemontese la lluvia inicia en las primeras horas del medio día del 2 de noviembre. En base a los numerosos



pluviogramas disponibles, distribuidos en el área comprendida en Alessandria y la Provincia de Cuneo, resulta que las precipitaciones en las cuencas de los ríos Orba, Erro y Bormida, se anticiparon de 12 horas en comparación con aquellas registradas en las cuencas de los ríos Belbo y Tanaro.

El periodo lluvioso inicia al medio día del 4 de noviembre en la cuenca del Orba y del Erro, en la tarde del 4 de noviembre en la parte Alta del Tanaro entre la mañana y la tarde del 5 de noviembre en el área entre los ríos Dormida de Millesimo y Tanaro, hasta el Monferrato Astigiano.

El evento pluviométrico finaliza el día 6 de noviembre con progresiva extensión hacia el norte a lo largo de las colinas Prealpinas Pinerolo-Lanzo-Ivrea- Borgosesia. La primera fase duró entre 50 y 60 horas entre los días 2 y 4 de noviembre. Esta lluvia fue caracterizada como una lluvia modesta, muy uniformemente distribuida, y a veces discontinua que variaron de sitio a sitio resultando comprendidas entre un mínimo de 30mm y un máximo de 60mm.

La segunda fase desarrollada localmente en momentos diferentes entre el 4 y el 6 de noviembre, fue diverso por un periodo de lluvia constante, con duración de 24 horas, con una altura total de precipitaciones variables de un lugar a otro y comprendidas entre 350 y 260mm. Esta fue la fase crítica del evento que por cualquier desfase temporal, fue afectada toda el área entre la parte Alta del Tanaro y el Albese Astigiano.

Al frente de este segundo periodo de lluvia, la primera respuesta de los taludes se manifestó en la parte alta de la cuenca del río Bormida di Spigno, a las 5:00 am del 5 de noviembre, bajo PRM superficiales y muy rápidos, por efecto de 136mm de lluvia que cayeron en 10 horas, con intensidad máxima de 109mm registrados entre las dos y cinco de la mañana. Fenómenos análogos de inestabilidad de taludes se manifestaron dos horas después, poco al norte de Ceva, bajo la acción de 98mm de lluvia intensa caídas en 19 horas con intensidad de 69mm concentradas entre las tres y siete de la mañana (Govi et al., 1996) (Fig. III.8, III.9 y III.10).



Figura III.8.- *Puente de Ceva obstruido por troncos y basura flotante (parte Alta del Valle Tanaro).*



Figura III.9- Inundación de la ciudad de Asti (parte baja del Valle Tanaro).



Figura III.10.- El río Tanaro cerca del puente principal de Garessio, Italia, a las 12 horas y 15 horas respectivamente del día del 5 de Noviembre de 1994 (CNR-IRPI, Torino).

III.2.2.6.- Valtellina, Italia

A partir del 15 de julio se presenta una situación meteorológica crítica, determinada por una gran depresión sobre las Islas Británicas, con presencia de vientos calientes meridionales provenientes del sur, que llegaron hasta Italia (Brunetti y Moretti, 1987).

El 15 de julio da inicio la primera fase con lluvias breves entre las 5:00 y las 9:00 am, con alturas totales variables de sitio a sitio, comprendidas entre 4 y 9mm. Después de dicha hora, las lluvias cesaron por muchas horas. En esta fase no se reportan problemas causados por PRM o de alguna actividad torrencial. El 16 de julio a partir de las primeras horas de la mañana y entre las 18 y 22 horas, se presenta la segunda fase del evento excepcional que se tiene con mucha similitud sobre la cuenca del Adda. En esta fase la lluvia se caracteriza de episodios



breves con mayor intensidad (10mm/h), lluvias con modestas y repetidos periodos interrumpidos con periodos de 5 a 8 horas. Tal condición se mantiene por 44 horas durante el día 16 y buena parte del día 17 de julio, registrándose cantidades de lluvia mayores sobre la ladera meridional del Valle de Valtellina (40 a 55mm) respecto al Valle de Bormio (16 a 25mm).

Al medio día del 17 de julio, así como todo el día del 18, se desarrolla la tercera fase del evento con características de absoluta persistencia y de mayor intensidad. Terminada la fase anterior, las precipitaciones se reinician ininterrumpidamente por 49 horas aproximadamente con en diferentes eventos, es decir, inician el día 17 a las 15 horas en Val Brembana, entre las 16:00 y 17:30 sobre el talud meridional del Valle de Valtellina y sobre la parte baja del Valle del Adda, entre las 18 y 21 horas en el Valle Malero, y en el área alrededor del Bormio. La altura total de las precipitaciones también en este caso resulta máxima en el sector central de los Alpes Orobie (entre 360 y 380mm), ésta esta contenida entre los valores más modestos (140 a 200mm), en Val Brembana en el fondo del Valle del Adda, en el Valle de Malero y en la Alta Valtellina. Toda la serie de grandes problemas que han afectado la Val Brembana y la Valtellina resultan asociados a esta tercera fase.

El 18 de julio entre las 16:00 y 17:00 se tienen en la parte alta del Val Brembana las primeras avenidas a lo largo de la red hidrográfica de orden inferior, en respuesta a 24 horas de lluvia persistente (140mm) con máxima intensidad (51mm) registradas entre las 15 y 16 horas. Poco después de las 17:00 el arroyo Brembo cerca de la población del Lenna (cuenca de 307 km²) presenta una gran avenida, provocando grandes procesos de erosión y violentos fenómenos aluvionales por los desbordamientos.



Figura III.11.- *Rompimiento de la margen derecha del río Adda cerca del poblado Case Rossi (Municipio de Berbenno en Media Valtellina).*

Entre las 17:00 y 18:00 del día 18 de julio, en Val Tartano sobre la ladera Orobie Valtellinese, la tipología prevalente de los procesos corresponden a fracturamientos por saturación de la cobertura del terreno superficial; entre los numerosos PRM que se generaron, se presenta uno



grande a las 17:00 invistiendo algunos edificios turísticos. Los fenómenos que se presentaron después de 25 horas de lluvia, con un total de 180mm con un episodio de mayor intensidad (41mm) fueron entre las 15:00 y 18:00. A partir de las 19:00 del mismo día se verifica un imponente flujo de detritos sobre el abanico del Torrente Madrasco (cuenca de 28.7 km²) al interno del habitado la violenta avenida de este tributario izquierdo del río Adda se manifiesta después de 26 horas de lluvias incesantes (total de 223mm), con una intensidad máxima de 74mm registrados entre las 16:00 y las 18:30 horas. Con el prolongarse de las lluvias hasta un total de 253mm, poco después de las 22:00 se generaron importantes PRM en el valle del arroyo Modrasco y en la cercanía del valle del arroyo Cervio (Fig. III.11) (Govi et al., 1996).

III.2.2.7.- Cuenca del Río Parana, Argentina

En el evento hídrico de 1982-1983 las aguas ocuparon casi la totalidad de la planicie aluvial así como la zona deltaica, entrerriana fue inundada totalmente en una sección de 50 km de ancho. Comparando los eventos 1982-1983 y 1992, el total de las áreas inundadas de Buenos Aires, fue superior en el periodo 1982-1983 en él, se totalizaron 3´373,000 hectáreas inundadas, en tanto que en 1992 se consignaron 3´126,000 ha inundadas (Bergman, 1994). Dentro del análisis del evento se tiene que anualmente se produce un pico de creciente en otoño (marzo-abril), debido a las lluvias de la alta cuenca y un descenso a fines de invierno y principio de primavera (agosto- octubre). Sobre el ciclo de crecientes normales de intervalos irregulares y crecientes extraordinarios, alcanzan niveles máximos o son de mayor duración.

Según un estudio realizado por la empresa Sir William Halcrow (1994), a partir de un estudio del análisis de diez eventos extremos en tres localidades durante ese periodo, indican que la frecuencia de las crecientes en la Cuenca del Plata aumentó en las últimas dos a tres décadas. Esto debido a los cambios importantes que se produjeron en las ultimas décadas como son el cambio de uso del suelo, en especial la deforestación, que provocó el aumento de los niveles de escurrimiento; los desarrollos hidroeléctricos, principalmente en el alto Paraná, que provocaron una mayor regulación y un régimen de caudales bajos más alto; las precipitaciones durante la estación húmeda ha sido más alta a partir de 1960, provocando mayor número de inundaciones, siendo los caudales bajos extremos menos frecuentes y menos agudos.

III.2.2.8.- Río San Carlos, Colombia

El evento torrencial de 1990 comenzó a las 20:00 horas del 21 de septiembre y en un intervalo de tres horas llovieron 208mm; 23mm equivalen a 5% de la precipitación anual de la cuenca alta del río San Carlos. El área sobre la cual cayó la parte más intensa del aguacero fue estimada en 11 km², con base en la localización de los PRM que se produjeron; esta área comprende varias subcuencas (quebradas Betulia, Arenosa, Alejandría, tupiada y El Sapo).

El área ha estado habitada durante dos siglos y no existen datos históricos de precipitaciones similares. Un evento torrencial de magnitud considerable ocurrió hace cerca de 40 años; resultaron destruidos dos puentes de madera en el propio casco urbano de San Carlos. La instrumentación meteorológica, instalada en la zona desde hacia cerca de dos décadas, no había



registrado eventos de tal magnitud. El volumen de lluvia caída durante el aguacero en la cuenca alta del San Carlos se ha calculado en 2.23 hm^3 , con una tasa de precipitación en el área de $0.75 \text{ hm}^3/\text{h}$. Para la sola subcuenca de la quebrada Betulia, el volumen de la precipitación se estimó en 1.22 hm^3 . Estas cifras dan una idea de la magnitud del evento (Velásquez, 2002).

III.2.3.- Lluvias Excepcionales

En el 2004, los países como India, Nepal y Bangladesh sufrieron estragos debido a las fuertes lluvias del mes de agosto. En la India, dejó un saldo de 1,300 muertes y ocasionan que unos 35 millones de personas pierdan sus hogares. En Nepal, las inundaciones dejan cerca de 200 víctimas. En septiembre las autoridades de Bangladesh informan que debido a las inundaciones y avenidas provocadas por las lluvias excepcionales de los últimos dos meses, al menos 700 personas mueren, diez millones quedaron sin casas, mientras el número de afectados se acerca a los 35 millones, una cuarta parte de la población del país (CNH; FIA y Televisa, 2005).

En septiembre de 2000 las inundaciones y desplazamientos de terreno que tuvieron lugar en Japón forzaron la evacuación de 45,000 personas; durante 24 horas se produjo la mayor precipitación de lluvia jamás registrada desde el inicio de los registros en 1891.

En septiembre de 2000, fuertes lluvias en el Sudeste Asiático ocasionaron inundaciones sin precedentes a lo largo del Río Mekong y de sus afluentes. El daño se había extendido. Las aguas desbordadas inundaron partes del norte de Tailandia, lo que ocasionó daños a más de medio millón de hectáreas de cultivo casi medio millón de personas en el Delta del Mekong (en Camboya y Vietnam) tuvieron que abandonar sus casas. En Camboya, las crecidas originadas por las inundaciones cubrieron cerca de 400,000 hectáreas de cultivo; se distribuyeron provisiones de emergencia a 1,4 millones de personas. En Laos, más de 18,000 familias tuvieron que ser evacuadas de las llanuras inundables y las aguas desbordadas dañaron gravemente 50,000 hectáreas de cultivo (UNESCAP, 2003).

Las inundaciones que tuvieron lugar en Bangladesh, China, India y Vietnam en 1998, causaron 7,000 muertos, dañaron más de 6 millones de casas y destruyeron 25 millones de hectáreas de cultivo.

El 18 de julio de 2003 la presidenta de la República de Panamá, declaró en estado de emergencia al distrito de Arraiján, debido a que 7,500 personas resultaron afectadas por las graves inundaciones, las cuales se consideran que son las peores en 30 años. Las lluvias torrenciales provocaron la crecida de algunos ríos, y causaron inundaciones en 12 comunidades. Otras regiones del país también se vieron afectadas por el temporal, que además de inundaciones, ocasionó deslizamientos de tierra, voladuras de techos y caída de árboles. Las lluvias provocaron el cierre de la carretera interamericana por más de cinco horas (Cruz Roja Panameña, 2003).

EL 26 de diciembre del 2004, se presentó un enorme Tsunami que golpeó la costa de Indonesia, Sri Lanka y la India, matando, hiriendo y causando el desplazamiento de cientos de miles de personas, y arrasando con pueblos y ciudades. El número de muertos es de 224,495 (IMD



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán*

Estado del arte



2005), el número de afectados fue de 2,4 millones de personas. Los fondos recibidos de la convocatoria humanitaria de la ONU de 2005 fue de 83 % de los 1.3 mmd solicitados por la ONU fueron consignados (OCHA, 2005). El total de la cantidad prometida por los donantes, incluyendo aquella fuera de la petición, se elevaba a aproximadamente 3.8 mmd en mayo de 2005, el equivalente a la mitad de los fondos para todas las emergencias, para todo el mundo para el año de 2003 (DIGHAU, 2004-5).

El día 9 de febrero de 2005, luego de una lluvia continua de más de 12 horas se presentó una creciente y desbordamientos de los Ríos de Oro y Frío en los municipios de Girón y Bucaramanga, Colombia, donde los asentamientos humanos ubicados en las riberas de estos ríos fueron afectados. Causando 54 muertes, 105 heridos, 87,645 personas afectadas y 6,118 viviendas destruidas. Cuando se estaba iniciando la respuesta al primer evento ocurrió un segundo evento catastrófico con fuertes lluvias y continuas por 17 horas entre el 11 y 12 de febrero que ocasionaron una creciente tipo avalancha de mayor magnitud que la anterior con múltiples PRM que destruyeron y sepultaron casas (Cruz Roja Colombiana).

Las torrenciales lluvias que se presentaron en países como Alemania, Suiza, Austria, Rumania y República Checa en agosto de 2005 dejaron al menos 50 personas fallecidas. Alemania se rodeó de aguas por el río Danubio, las casas quedaron inundadas en la localidad de Straussacker. Mientras que el río Olse se desbordó en Cesky Tesin, República Checa. Presentándose también desbordamientos del río Frutz en Austria. Así como anegamiento de una villa en la región de Berner Oberland, Suiza (La Nación, 2005).

Gran número de inundaciones se registraron en el 2005 alrededor del mundo ocasionadas por diferentes eventos que provocaron grandes daños a las poblaciones, como se describen en la Tabla III.3.

INUNDACIONES EN EL MUNDO EN EL AÑO 2005			
FECHA	LUGAR	CAUSA DE LA INUNDACIÓN	DAÑOS
28-Jul	Bombay-India	94.4mm de lluvia en menos de 4 horas	853 muertes y viviendas destruidas
09-Jul	Haití y Cuba	Huracán Dennis	20 muertes
09-Jul	Jamaica	Huracán Dennis	3 muertes y pérdidas de 2,500 mdp
18-Jul	India	Inundaciones	150,000 viviendas afectadas y 221 muertes
18-Jul	China	Inundaciones	764 muertes y 191 desaparecidos
18-Jul	Kingston, Jamaica	Huracán Emily, fuertes lluvias y crecidas de ríos	5 muertes, 7 viviendas destruidas y daños a la infraestructura
21-Jul	China	Tifón Itaitany	4 muertes
26-Ago	India, Nepal y Bangladesh	Fuertes lluvias	1,300 muertes y 35 millones de personas se quedaron sin hogar
27-Ago	Florida, USA	Olas de hasta 4.5m	7 muertes, corte de suministro de energía eléctrica y pérdidas de 600mdd



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán*



Estado del arte

FECHA	LUGAR	CAUSA DE LA INUNDACIÓN	DAÑOS
30-Ago	Luisiana, Nuevo Orleans, Mississippi, Alabama y Florida, USA	Huracán Katrina, rompimiento de dos diques	Alrededor de 1,200 muertes; 640,000 damnificados. Pérdidas de más de 35,000 mdd. Destruyó 41 plataformas petroleras. Deja al 80% de la ciudad de Nuevo Orleans bajo el agua, y contaminadas por una bacteria "E coli". 180,000 viviendas destruidas
02-Sep	Sur de China	Tifón Talim	14 muertes, 100 heridos, 15 desaparecidos y cientos de viviendas destruidas
08-Sep	Luisiana USA	Huracán Rita	Derribó árboles, autos apilados, 80% edificios destruidos. Bastante ganado muerto. 20,000 personas sin hogar. 10 muertes por infección bacterial.
20-Sep	Cuba y Florida USA	Huracán Rita	Desbordamiento de uno de los diques de nueva Orleans, inundando con 2m de agua. Ocasiónó el cierre de 14 refineras
25-Sep	Beaumont, Texas	Huracán Rita	Intensas lluvias, incendios y cortes de energía en las comunidades costeras de Texas y el suroeste de Louisiana. Cerca de 500,000 hogares texanos quedaron sin suministro eléctrico
27-Sep	Estados Unidos	Huracán Rita	Dejó huella en la industria energética al provocar el cierre de cuatro refineras por un mes, separó una plataforma de su anclaje, daños en otras dos plataformas de perforación dejando a la deriva 38 unidades de perforación móviles
27-Sep	Hanoi, Vietman	Tifón Damrey	12 muertes y aldeas costeras inundadas
04-Oct	Beijing, China	Tifón Longwang, provocando PRM, con inundaciones a lo largo del río Hanjiang	36 desaparecidos, al menos 75 muertes, pérdidas de 120 mdd
04-Oct	El Salvador	Tormenta tropical provoca intensas lluvias	31 muertes y más de 8,500 desalojados. Las precipitaciones han provocado al menos 300 PRM e inundaciones, y desbordamientos del río Paz
04-Oct	De Filipinas a China	Tifón Damrey	46 muertes



FECHA	LUGAR	CAUSA DE LA INUNDACIÓN	DAÑOS
07-Oct	Guatemala, el Salvador, México, Nicaragua y Honduras	Huracán Stan	2,000 muertes, 577 personas desaparecidas, 99 heridos y 205,769 damnificados; 5,501 viviendas afectadas y 1,711 destruidas; un alud que cubrió una aldea. Varias comunidades inundadas
20-Oct	El mayor ciclón visto en el océano Atlántico al alcanzar la categoría máxima (5).	Huracán Wilma	Provocó la pérdida de 11 vidas en Haití, y anegamientos en otros países, así como PRM

Tabla III.3.- Inundaciones y daños provocados por los huracanes en el 2005 (CNH; FIA y Televisa, 2005).

III.3.- ANTECEDENTES NACIONALES

La presencia del fenómeno oceánico y atmosférico identificado como "El niño" en nuestro país, durante el periodo de julio de 1997 a junio de 1998, tuvo efectos devastadores y pérdidas económicas cuantiosas en miles de familias mexicanas, así como en los intereses de múltiples empresas privadas como cadenas de hoteles, compañías de transporte, entre otras, en la infraestructura económica pública y en los recursos naturales de casi todo el territorio nacional (LA RED, 1999).

Año	Daños por fenómenos hidrometeorológicos	Daños totales por desastres
1980-1999	4,547	10,390.00
2000	132.85	230.91
2001	188.13	265.38
2002	1,091.51	1,162.11
2003	337.11	646.11
2004	63.35	74.22
Σ 2000-2004	1,812.95	2,378.78
Total 1980-2004	6,359.95	12,768.73

Tabla III.4.- Impacto económico de los desastres en México. Valores en mdd (Cenapred 2005).



Cenapred ha calculado en 12 mil 768 millones de dólares el monto de los daños ocasionados entre 1980 y 2004 por desastres relacionados tanto con fenómenos naturales como por accidentes químicos, sanitarios y sociorganizativos; casi el 50% es destinado para daños directos e indirectos ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos, como lluvias torrenciales y huracanes (Tab. III.4). De acuerdo con el gobierno federal, los huracanes Stan y Wilma causaron daños por cerca de 3 mil millones de dólares (La Jornada, 2005).

En México el CMN tiene un registro de huracanes que se han presentado en el país a partir de 1962 a la fecha, entre los que se encuentran por ser los más devastadores los que se presentan en la Tabla III.5.

FECHA	HURACÁN	POBLACIÓN AFECTADA	DAÑOS
1926 Septiembre	Veracruz, Quintana Roo, Yucatán y Campeche		Barcos hundidos y trenes suspendidos.
1933 Junio	Tamaulipas		Azotó en la Marina, destruyendo la totalidad de las casas en el poblado de Padilla fueron arrasadas por el huracán, además de dejar miles de muertos.
1935 Agosto	Veracruz		27 barcos hundidos.
1949 Septiembre	Sinaloa		Dejó como saldo la muerte de cien personas y decenas de barcos destruidos.
1953 Septiembre	Guerrero		100 muertos.
1955 Septiembre	Veracruz, Tamaulipas, San Luís Potosí, Yucatán y Quintana Roo		Pérdidas por más de 100 millones de pesos, y la muerte de mil personas.
1957 Octubre	Sinaloa		Pérdidas por más de cien millones de pesos en Mazatlán.
1959 Octubre	Colima		Pérdidas económicas cuantiosas, y alrededor de 500 personas entre desaparecidas y muertas.
1961 Noviembre	Guerrero		Más de 300 muertos y 8 mil damnificados.
1966 Octubre	Tamaulipas		Más de 20 mil damnificados.
1967 Septiembre	Guerrero, Nayarit y Sonora		Más de 15 muertos y 30 mil damnificados.
1968	Colima y Jalisco		Más de 10 muertos y 50 mil damnificados.
1976, Octubre	Liza	Baja California Sur y Sonora.	Como saldo la muerte de 600 personas y entre 10 mil y 12 mil damnificados.
1980 Agosto	Allen	Tamaulipas	25 mil personas desalojadas en la ciudad de Matamoros.
1982	Paul	Tamaulipas	257 mil damnificados



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán*

Estado del arte



FECHA	HURACÁN	POBLACIÓN AFECTADA	DAÑOS
1988 Septiembre	Gilberto	Yucatán, Campeche, Quintana Roo, Nuevo León, Tamaulipas y Coahuila	250 muertes y 150 mil personas desalojadas, dejando más de mil millones de pesos en pérdidas y 316 muertos.
1990 Agosto	Diana	Veracruz, Hidalgo	Pérdidas económicas en Veracruz, en Hidalgo deja 50 mil damnificados y 66 personas muertas.
1993 Septiembre	Lidia	Sinaloa y Sonora	Alrededor de 200 pescadores perdieron la vida en Sinaloa y en Sonora dañó a 10 mil personas.
1993 Septiembre	Gert	Veracruz, Tamaulipas, Hidalgo y San Luis Potosí	40 muertos y 72 mil damnificados.
1995 Septiembre	Ismael	Sonora y Sinaloa	Más de 24 mil damnificados.
1995 Octubre	Roxana	Veracruz, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo	Más de 13 mil damnificados.
1995 Octubre	Opal	Campeche y Tabasco	32 muertes y 15 mil damnificados.
1997 Octubre	Paulina	Oaxaca y Guerrero	200 muertos y 4 mil damnificados.
1998 Septiembre	Isis	Sonora, Sinaloa y Baja California Sur	Pérdidas por más de 50 millones de pesos.
1998 Octubre	Mitch	Quintana Roo, Tabasco, Yucatán y Campeche	13 mil damnificados.
1999 Septiembre	Greg	Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit, Sinaloa y Baja California Sur	Coincidió con el evento de la Niña y afectó fuertemente a estos Estados
2000 Junio	Carlota	Oaxaca, Chiapas, Guerrero y Michoacán	Se cerraron seis puertos ala navegación y se tuvo que evacuar a muchos pobladores
2000 Octubre	Keith	Campeche, Tabasco, Quintana Roo y Chiapas	Alrededor de 30 mil damnificados; desbordamiento de 4 ríos; un PRM, afectando a más de 53 municipios.



FECHA	HURACÁN	POBLACIÓN AFECTADA	DAÑOS
2002 Septiembre	Isidore	Yucatán, Quintana Roo y Campeche	Causó graves daños en estos estados. Más de 500,000 personas fueron afectadas.
2002 Octubre	Kenna	Nayarit, Jalisco y Sinaloa	Con vientos de 260kph. Este evento fue uno de los más fuertes que han llegado a México en los últimos 25 años.
2003 Agosto	Tres tormentas tropicales afectaron el país sin convertirse en huracanes	Oaxaca, la Península de Yucatán y la costa sureste de México. la costa norte de Tamaulipas,	En junio, la tormenta tropical Carlos, se debilitó cuando tocó Tierra en Oaxaca, en julio la tormenta tropical Claudette pegó en la Península de Yucatán y en la costa sureste de México. A principios de agosto la tormenta tropical Erika, entró a la costa norte de Tamaulipas, afectando principalmente las ciudades de Matamoros y Reynosa.
2003 Agosto	Ignacio	Baja California Sur, principalmente La Paz	Los daños ascendieron a 180 millones de pesos.
2003 Septiembre	Marty	Tocó tierra en la zona de Baja California Sur, Norte, Sinaloa y Durango	Dejó al menos 5 muertos en BCS y al menos 6 mil damnificados, una más en Sinaloa.
2005 Julio	Emily	Yucatán, Tamaulipas, Nuevo León, Veracruz	Categoría IV, el gobierno mexicano cuantificó en más de 26 millones de dólares los daños provocados por la tormenta, en donde al menos 4 personas murieron.
2005 Octubre	Stan	Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Tabasco	Desbordamientos de ríos.
2005 Octubre	Wilma	Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Veracruz, Chiapas, Oaxaca	Dejó una pérdida económica de 15,202 millones de pesos.

Tabla III.5.- Huracanes históricos que han afectado la República Mexicana.

Desde que comenzaron a llevarse registros en 1851, el año 2005 se ha considerado como la temporada de huracanes más devastadora. En el transcurso del 2005 se han presentado grandes tormentas, de las cuales, 12 de ellas se convirtieron en huracanes.



Las inundaciones no sólo dañan las propiedades y amenazan la vida de los seres humanos y animales, sino también causan otros efectos, como la erosión del suelo y la sedimentación excesiva, etc. De las 65,260 muertes por desastres naturales en México, durante el decenio de los noventa, 54 por ciento fue resultado de inundaciones (CRED-OFDA, 2002).

III.3.1.- Inundaciones de Chiapas

Las inundaciones que se suscitaron en la costa Chiapaneca en el año 1998, fueron debidas a las intensas lluvias que se presentaron ese año (fenómeno de El Niño), además que es una planicie costera muy angosta, de acuerdo a su orografía. La falta de cobertura vegetal provocada por los incendios (donde se quemó una gran superficie, incluyendo parte de la reserva de la biosfera El Triunfo, hogar del Quetzal), causó un terrible arrastre de suelo hacia las comunidades ubicadas en las márgenes de los ríos, lo que provocó una catastrófica pérdida de vidas humanas, infraestructura y ecosistemas (Baumann, 1999; Franco G. 2005)

III.3.2.- Inundaciones de Veracruz

El fenómeno hidrometeorológico que se presentó en el Estado de Veracruz el jueves 5 de junio de 2003, afectó a los municipios de Acultzingo, Camerino Z. Mendoza, Huiloapan de Cuauhtémoc, Maltrata, Nogales y Río Blanco. Según CNA señaló que: el 4 de junio de 2003, se registró una lluvia de 23mm en la estación Orizaba, la cual presentó una estadística histórica de lluvia máxima de 28mm, media 4.6mm y desviación estándar de 8mm. De acuerdo a la topografía abrupta de la zona y a la lluvia acumulada, se desbordó el Río Chiquito el cual registró un caudal máximo de 350 m³/s, lo que a su vez causó la ruptura de dos ductos de PEMEX, que generaron una explosión que causó daños materiales y pérdidas de vidas humanas. Finalmente se evaluó y se declaró como zona de desastre por el FODEN (DOF, 2003).

Las intensas lluvias del 2005 también afectaron las ciudades de Monterrey, Guadalajara y el Distrito Federal, así como los Estados de Campeche y Estado de México, donde muchas familias lo perdieron todo debido a las inundaciones provocadas por esos eventos, donde dejaron graves pérdidas materiales, como se muestra en la Tabla III.6.

INUNDACIONES EN LA REPUBLICA MEXICANA EN EL AÑO 2005			
FECHA	LUGAR	INUNDACIÓN/CAUSA	DAÑOS
05-May	Naucalpan, México	Tormenta; Desbordamiento del canal de aguas negras Las Granjas	Provocando que propietarios de 60 casas perdieran la totalidad de sus pertenencias. 226 personas damnificadas por perder su patrimonio
01-Jul	Veracruz	Tormenta tropical. Provocando desbordamientos de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos	5,000 damnificados y una pérdida de \$100mdp



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán

Estado del arte



FECHA	LUGAR	INUNDACIÓN/CAUSA	DAÑOS
06-Jul	Coalcoán, Arteaga, Coahuayana, Aquila, Chinicuila, Lázaro Cárdenas, Mich.	Tormenta tropical	Encharcamientos y cortes en el suministro de la energía eléctrica
06-Jul	Colima	Tormenta tropical. Con 80mm de precipitación	Cierre del puerto a la navegación por varios días. Encharcamientos
09-Jul	Chilpancingo, Guerrero	Fuertes tormentas	Anegamiento de calles y algunas viviendas. Deslizamiento de un cerro
09-Jul	Mineral del Chico, Edo. Hidalgo	Lluvias intensas provocando desbordamiento del cauce Jaguey, y derrumbes	Una muerte y 230 viviendas afectadas
12-Jul	Guanajuato	Lluvias torrenciales y fuertes corrientes de agua	Una muerte
12-Jul	Querétaro	Fuertes lluvias	Cuatro muertes
18-Jul	Chilpancingo, Guerrero	Intensas lluvias	6 autos bajo el lodo, varias colonias afectadas y alrededor de 400 familias damnificadas
18-Jul	Yucatán	Huracán Emily	Severos daños en la agricultura y a los servicios de electricidad, agua potable y teléfonos, así como el derrumbe de un centenar de viviendas y cortes en las carreteras.
19-Jul	Chetumal, Quintana Roo	Huracán Emily	Pérdidas de 20,000 ha de cultivo de maíz, 200 ha frutales y 18,300 colmenas, en los municipios de Benito Juárez, Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Lázaro Cárdenas y Solidaridad, dañándose 3,000 viviendas.
20-Jul	Mérida, Yucatán	Huracán Emily	163,000 ha de agricultura. 9,000 viviendas afectadas el 90% en techos. 70 mdp en pérdidas para CFE. 500 caminos rurales y 25m de playa perdidas por el alto oleaje. Se estimó una pérdida de 178 mdp.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán

Estado del arte



FECHA	LUGAR	INUNDACIÓN/CAUSA	DAÑOS
20-Jul	Cancún y el Municipio de Benito Juárez, Quintana Roo	Huracán Emily	Pérdidas de 58 mdp. Varias casas afectadas, así como algunos pozos de absorción
22-Jul	Nuevo León, Quintana Roo, Tamaulipas y Yucatán	Huracán Emily	243mdp en pérdidas y más de 50 mdp en apoyo para damnificados
24-Jul	Veracruz	Tormenta Gert	Daños materiales e inundaciones y deslaves
24-Jul	Monterrey, Nuevo León	Lluvia torrencial, llovió más de 1/3 de toda la lluvia que llueve en el año	190mm de agua en promedio, en algunas zonas hasta 300mm. 725.5 mdp en pérdidas
26-Jul	Apatzingán, Mich.	48 horas de lluvia	20 viviendas afectadas
26-Jul	La Piedad, Mich.	lluvia torrencial, en 45 minutos alcanzó una altura de 1.20 m	Encharcamientos
30-Jul	El Barrancón del Tío, Tamaulipas	Huracán Emily	Sin suministro de energía, sin ingresos y viviendas destrozadas; 340mdp.
10-Ago	Autopista México-Puebla	Fallas en el funcionamiento del cárcamo de bombeo	Inundación de la autopista y 70 viviendas de san Isidro y Providencia, provocando infecciones estomacales.
15-Ago	Ixtapaluca, Edomex	Intensas lluvias	Decenas de familias perdieron todas sus pertenencias por la inundación, mientras que en las calles eran arrastrados animales muertos, ropa, zapatos y toneladas de lodo, hubo contaminación de medicamento por las aguas negras.
18-Ago	Costa de Guerrero	Tormenta Hillary	Una muerte. Caída de árboles
19-Ago	Veracruz	Intensas lluvias y crecidas de ríos	2 muertes y 20 viviendas
22-Ago	Salinas Cruz, Oaxaca	Tormenta no. 29	40 viviendas en Guelaguichi, 9 colonias en Morro Mazatlán y 20 viviendas en Santa Gertrudis Miramar.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán

Estado del arte



FECHA	LUGAR	INUNDACIÓN/CAUSA	DAÑOS
22-Ago	Veracruz	Onda tropical José	Dejó graves problemas a la infraestructura y a las viviendas, así como inundaciones y deslaves
25-Ago	Aguililla, Mich.	2 horas de lluvia, más de 7m de altura, desbordamiento del río Águila con varios PRM	11 muertes; 1,344 familias damnificadas; 16,000 viviendas anegadas, 50 viviendas totalmente destruidas y 50,000 ha de cultivo perdidos y 1 mdp.
25-Ago	Veracruz	Onda tropical no. 30. Tormenta tropical José. Provocando crecidas de ríos, inestabilidad de taludes	Catástrofe agrícola con 34,900 ha arrasadas, con pérdidas que ascienden a 420 mdp. 62,828 damnificados, 5,725 viviendas dañadas en 28 mpios.
01-Sep	Pachuca, Hidalgo	Lluvias y una granizada. 40cm de agua y lodo que transportaban basura y piedras.	Por lo menos 44 viviendas afectadas; 4 con daños estructurales y 20 viviendas en pérdida total. Daños en carreteras y alcantarillado
01-Sep	Querétaro	9 horas de lluvia. El SE de la ciudad alcanzó los 35mm de lluvias intensas	30 autos; deslaves en la carretera estatal Querétaro-el Marqués
01-Sep	Cuernavaca, Morelos	Lluvia intensa	Suspensión de 9 horas de energía eléctrica
02-Sep	Huacana, Mich.	Lluvias torrenciales	Derrumbe de paredones y árboles en las orillas de carreteras
03-Sep	Zacatecas	Lluvias y ciclones tropicales	26 Muertes y una pérdida de 271 mdp en apoyos a damnificados.
24 y 25 Sep	Chiapas	Depresión tropical Norma	11 municipios afectados
27-Sep	Guerrero	Depresión tropical Norma	3 muertes, decenas de viviendas inundadas, desbordamientos de un río. 2,000 familias damnificadas. Alto oleaje.
27-Sep	Oaxaca	Depresión tropical Norma	3,000 viviendas anegadas. Afectaciones en cerros, puentes, carreteras y cultivos.
06-Oct	Quintana Roo	Huracán Stan	Inundación en Cancún con dos metros de altura.



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán*



Estado del arte

FECHA	LUGAR	INUNDACIÓN/CAUSA	DAÑOS
06-Oct	Hidalgo	Huracán Stan	Tras el desbordamiento de la Presa Santa Rufina, 700 estudiantes fueron evacuados. La corriente inundó tramos en la carretera de Mineral del Monte, afectando caminos.
06-Oct	Guerrero	Remanentes del huracán Stan y la onda tropical 40, desbordamiento del arroyo "El Pipe"	En Copala colapsamiento de un puente en la carretera Federal Cruz Grande- Copala. Carreteras inundadas; diversos deslaves y cortes en la carretera Acapulco-Pinoteca Nacional.
06-Oct	Puebla	Huracán Stan	41 municipios declarados en emergencia; 2,500 damnificados. Desbordamientos en los ríos Tepantepec y Zapotitlán de Méndez; múltiples deslaves y cortes de la energía eléctrica; bloqueo de la carretera interserrana.
06-Oct	Tabasco	Huracán Stan	14 municipios con severos daños; desbordamiento del río Usumacinta provocando inundaciones en los municipios de Tenosique, Balaneán, Emiliano Zapata y Jonuta.
06-Oct	Veracruz	Huracán Stan	120 municipios afectados; 40,000 viviendas dañadas; 120,000 damnificados; 5 muertes; 12,000 ha de cultivo afectados; 80,000 evacuados y una pérdida alrededor de 800 mdp.
06-Oct	Oaxaca	Huracán Stan	30 municipios afectados; 3 muertes; desbordamiento del río Ostuta; inestabilidad de un cerro que sepultó una vivienda. Las comunidades de la Costa, Istma, Cuenca y Sierra Norte, sufrieron inundaciones por el evento; 65 municipios fueron declarados en estado de emergencia



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán*

Estado del arte



FECHA	LUGAR	INUNDACIÓN/CAUSA	DAÑOS
06-Oct	Chiapas	Huracán Stan	32 municipios afectados; 3 muertes; 8,200 viviendas dañadas; 33 ríos desbordados; 35 puentes colapsados; 206 caminos interrumpidos con 945 km dañados. 40,000 damnificados, 251 escuelas dañadas; 35 colonias de la cabecera municipal inundadas.
14-Oct	Municipios de Guadalupe, Apodaca, Pesquería, Cadereyta y Santiago, aledaños a Monterrey, Nuevo León.	Lluvias intensas	Incomunicados por vía terrestre, hay más de 15 colonias inundadas, siete personas desaparecidas. Inundaciones y desbordamiento de arroyos, llevándose decenas de automóviles a su paso, derribando postes y destruyendo viviendas.

Tabla III.6.- Inundaciones presentadas en el 2005 en la República Mexicana.



IV.- RESULTADOS

La finalidad de esta investigación fue analizar las zonas susceptibles a inundaciones provocadas por los ríos Grande y Chiquito en la Ciudad de Morelia, con base en la información hidrológica e hidráulica "históricas" disponible.

Domínguez et al., (1999) define una inundación como el proceso que se produce cuando el gasto de una avenida generada en una cuenca supera la capacidad del cauce por lo que el exceso de agua escurre fuera del mismo, hacia las partes más bajas. Las inundaciones son eventos naturales que se convierten en peligro cuando los espacios ocupados por las poblaciones abarcan las llanuras de inundación naturales de un río y, por consiguiente, son afectadas por la acumulación de agua. Es por ello que las avenidas han recibido mayor atención en el mundo debido a su repercusión sobre la población. De acuerdo a CRED (OFDA-CRED), en todo el mundo, 7'477,552 personas fueron víctimas de inundación durante el periodo 1900-2001, en tanto que la población más afectada alcanzó la cifra de 2379'092,236 habitantes.

IV.1.- LOCALIZACIÓN

La zona en estudio comprende la subcuenca del Río Grande, la subcuenca del Río Chiquito, la subcuenca de los Itzícueros, así como el valle de la ciudad de Morelia. Esta se encuentra ubicada en la porción Norte del Estado de Michoacán, colindando con 13 municipios (Fig. IV.1).

La cuenca se ubica entre los 19°20'13.49" y 19°42'42.01" de latitud Norte y 101°34'04.5" y 101°05'42.5" de longitud Oeste. Tiene una superficie de 1200 km². Para la delimitación de la región de Morelia se adoptó el enfoque conocido como "Manejo Integral de las Cuencas Hidrográficas", que permite la adopción de la perspectiva de sistemas para el manejo en cuencas hidrográficas, la cual puede determinar las iteraciones principales y los factores más importantes que deben ser considerados en la planificación del uso de los recursos, concentrándose no sólo en valoraciones econométricas, sino en consideraciones de todo el medio ambiente (López, 1998). Respecto a las características hidrológicas la cuenca del río Grande, se localiza en un 95% en la región hidrológica 22 del Lerma Santiago y un 5% en la región hidrológica 18 del Balsas. De acuerdo a la región hidrológica administrativa de la CNA, pertenece a la subregión Bajo Lerma dentro de la Región Administrativa III Lerma-Santiago-Pacífico.



Figura IV.1.- Localización de la cuenca en estudio.

IV.2.- METODOLOGÍA

Durante la investigación, se realizaron diferentes actividades y técnicas de trabajo de campo como en gabinete, esto de acuerdo a la actividad realizada.

La metodología que aquí se presenta es la que se propuso para la elaboración de esta investigación, la cual esta fortalecida con el organigrama. Es importante señalar que las metodologías no siempre siguen un mismo esquema, ya que depende de los datos y la tecnología con que se cuente.

Como primer paso se hizo el reconocimiento preeliminar de la zona en estudio, para ello se realizaron salidas a campo, recorriendo la zona para observar el parteaguas de la cuenca considerada en gabinete. Así mismo se hicieron recorridos por los cauces de los ríos de interés. Se emprendió una revisión bibliográfica hasta el final de la investigación, para conocer la problemática.

Además se efectuó una recopilación de información cartográfica del área en estudio, con apoyos de las cartas de INEGI E14A12, E14A13, E14A14, E14A22, E14A23, E14A24, E14A32, E14A33, E14A34, de las cuales se obtuvieron los datos vectoriales, a escala 1:50,000. Así mismo, se utilizaron fotografías aéreas de toda el área en estudio. Con lo anterior se hizo una fotointerpretación para determinar los antiguos cauces dentro de la ciudad de Morelia, observando los primeros asentamientos y la vegetación en las zonas aledañas a la ciudad abordando la geomorfología que se presenta de la cuenca.



Resultados

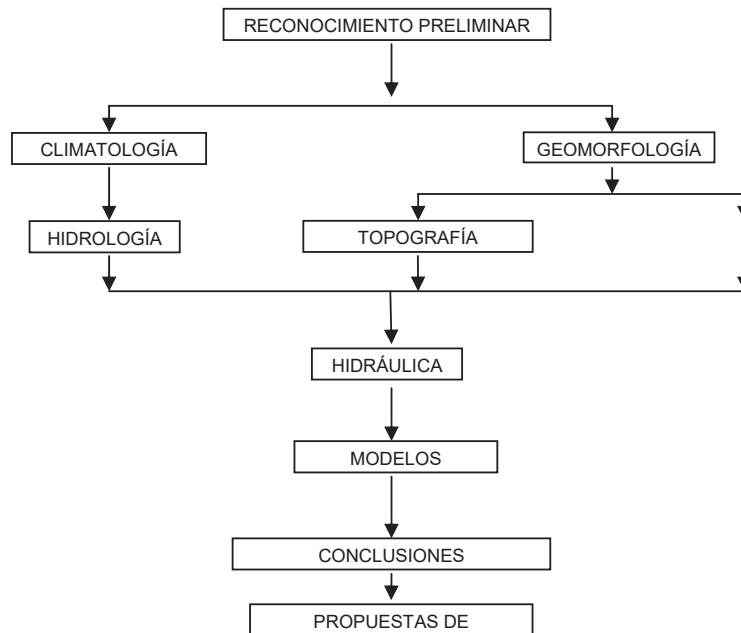


Figura IV.2.- Organigrama correspondiente a la investigación de la cuenca sur del Río Grande.

De acuerdo a la Figura IV.2, se optó por estudiar la parte climatológica y la parte geomorfológica, ya que son dos aspectos que tienen que ver mucho con este tipo de fenómenos, teniendo en cuenta que el clima está cambiando día con día y que las lluvias intensas se están presentando cada día más violentas. La geomorfología juega un papel muy importante en este estudio, ya que la erosión, el transporte y la sedimentación son de los factores que afectan a los ríos en estudio.

Tanto la hidráulica como la hidrología son dos áreas que se tienen que considerar para poder realizar un buen estudio, ya que la hidrología dará a conocer las lluvias históricas y la hidráulica los escurrimientos en el pasado. Las dos áreas conjuntas nos permitirán llegar a conocer los periodos de retorno, tanto para lluvias como para las avenidas que se presenten en los ríos.

Teniendo la información disponible se podrán realizar las cartas de peligros de inundaciones, así como modelos de inundaciones y desbordamientos de los ríos, esto último con la ayuda del software Hec-Ras.

Conociendo las capacidades que tiene cada río para permitir una buena esorrentía, los claros de las estructuras de los puentes, el comportamiento de las márgenes, etc., se podrán realizar modelos de escenarios, esto para conocer los niveles máximos a los cuales puede llegar el flujo. Conociendo la problemática se podrán proponer obras de mitigación donde sea necesario, ya sea para disminuir el problema o para mejorar la situación.



IV.3.- HISTORIA DE LA CIUDAD DE MORELIA

El siglo XVI es el punto de partida en la historia de la ciudad de Morelia, así mismo el arranque de las bases de infraestructura y diseño de la misma. La nueva ciudad de Michoacán (Valladolid), se establece en un territorio tanto alejado del corazón del Señorío Tarasco, en un sitio que si bien estaba habitado por Pirindas y Tarascos, no representaba ni con mucho un lugar que pudiera soportar a numerosos pobladores hispanos, ya que todo estaba por construirse. Se tenía poca población indígena, había dos ríos cercanos pero no infraestructura para su aprovechamiento, se tenían terrenos cercanos pantanosos e inundables de difícil acceso y desde luego la ciudad que se quería construir habría que hacerla desde su inicio.

La "Loma Larga y Chata" significativa de la voz Guayangareo, el asentamiento prehispánico de nuestra ciudad, así como el original centro del mismo, refieren a una planicie con suaves pendientes, a un valle y a terreno plano propio de los asentamientos españoles en América. Es conveniente destacar que el hombre se ha establecido, tanto en épocas prehispánicas como en la fundación de las nuevas ciudades en torno a cauces, como es el caso en la fundación de Morelia en 1541, que en las partes bajas se formaban ciénegas y tierras húmedas, en un radio no mayor de 30km.

El primer asentamiento data del siglo XVI del casco de la ciudad ciertamente se ubicó en lo más alto de la loma y a partir de ahí se asentaron los fundadores de la ciudad estableciéndose en las cercanías de los dos ríos, Guayangareo (río Chiquito) y Valladolid (río Grande), que circulaban el asentamiento y algunos más siguiendo el curso del río Valladolid hasta su desagüe (Paredes, 2001).

Contaban con sus sistemas en el cultivo, es decir las parcelas de cultivo en terrenos cercanos al río, arroyos, ciénegas o lagunas y que aprovechando la humedad del suelo y previniendo las inundaciones, avenidas de agua y evitando las aguas estancadas e insalubres, cultivaban en época de secas. Sobre la base ganadera y agrícola circulaba la economía local y de esta giró la infraestructura hidráulica, las técnicas y manejo del agua durante el siglo XVI, tanto en el aspecto productivo como en la condición para el consumo humano y los servicios correspondientes.

Las incipientes industrias establecidas en el siglo XVI, muestran algunas de las actividades económicas principales y los requerimientos de agua según su materia de trabajo. Entre estas se encuentran varios molinos harineros, batanes, tenerías e inclusive una fragua para fundir metales. Uno de los molinos más productivos, es aquel que se encontraba en la Hacienda del "Rincón", el cual se mandó construir a partir de un herido o saca de agua del río Guayangareo, en su entrada al valle y quizá aprovechando la caída y desnivel de la corriente de agua, donde posiblemente este lugar haya sido un "complejo industrial" (Tavera, 1995).

Después de haberse fundado la nueva ciudad de Michoacán en 1541, se abordó de manera práctica el problema de suministro de agua en cantidad suficiente para las necesidades de su población, visualizando principalmente los manantiales de la cuenca del río Guayangareo (Chiquito). El segundo sitio, es una posible captación (donde se construiría una represa en el



cauce de dicha corriente). El tercer lugar es la ruta alternativa de una adecuada conducción del líquido, es decir, de un acueducto que permitiera el traslado del agua por gravedad.

Así mismo al fundar Valladolid como Ciudad, también se inició la construcción del “caño de agua” en 1549, de la misma manera se comenzaron a construir puentes, caminos, etc., hacia 1551. Entre 1580 y 1705, las reparaciones del “caño de agua” fueron frecuentes y no satisfacían de todo la sed de los ciudadanos. Según referencia del Fraile Alonso Ponce, el “caño de agua” comenzó a funcionar en 1585, y fue hasta principios del siglo XVIII lo que sería el magnífico acueducto que hoy en día admiramos. Se dice que dicho caño se construyó de césped y barro, pero precisamente por los continuos derrumbes que sufría, decidieron usar canoas, es decir troncos de árboles ahuecados y dispuestos para la conducción de agua, más tarde se adoptó y se empezó a construir de calicanto o mampostería (Juárez, 1982).

Para 1876 fue época de cambios, entre ellos del paisaje regional y urbano de la ciudad. Para 1910 la población ya había duplicado la cifra de población del año 1877 (Uribe, 1993; 2001).

Hacia 1930 la ciudad contaba con 39,916 habitantes y a partir de entonces se dio un crecimiento hacia todas direcciones sin una planeación (Fig. IV.3) (Arreygue et al., 2004), lo que demandó pocos años después que, entre 1936 y 1939 se construyera sobre el río Grande de Morelia, próxima a la localidad de Cointzio, una gran presa de almacenamiento que tenía el beneficio de un sistema hidroeléctrico, (a mediados del siglo XX) su función es de control de avenidas y el abastecimiento de agua potable para la Ciudad de Morelia e irrigación de los valles de Morelia y Queréndaro.

Por otra parte, la calidad del agua suministrada a la ciudad si fue problemática desde el principio, en particular la turbiedad del líquido, especialmente en la temporada de lluvias (pluvial), originalmente por el transporte de partículas sólidas en suspensión en la masa del fluido (Bravo y Ojeda 2001).

En los años de 1955 a 1965, se asientan 12 colonias más (Fig. IV.3): Bocanegra, Burócrata, Chapultepec, Felicitas del Río, Félix Ireta, Guadalupe, Isaac Arriaga, Lomas de Hidalgo, Matamoros, Molino de Parras, Porvenir, Valladolid y Viñedos, alrededor de las ya establecidas; urbanizándose las tenencias como son Santa María, Santiaguito y la colonia Agrícola Vista Bella (INEGI 2000, en Arreygue et al., 2004).

En 1974 Carlos Sáenz de la Calzada, destacó que la región de Morelia esta considerada como “una de las regiones más ricas del mundo” en cuanto a variedad de tipos de manantiales. Hoy en día Morelia sufre la más severa crisis de sus recursos hidráulicos, propiciada por la deforestación de las partes medias y altas de la cuenca, con el consecuente asolvamiento de los principales embalses naturales y artificiales, así por la contaminación industrial y doméstica de los principales elementos del sistema hidrológico regional como son el río Grande de Morelia y el lago de Cuitzeo.



Figura IV.3.- Desarrollo urbano de la ciudad de Morelia, del periodo de 1619 a 1990(INEGI, 2000).

Dentro de las características de la Loma de Guayangareo, se encuentra que en la “Loma Chata” muy por arriba de los cauces de los Ríos Chiquito y Grande de Morelia y por ello la ciudad histórica (1541-1921) es inmune a las inundaciones. Cumpliéndose esta situación hasta la mitad del siglo XX cuando la ciudad empezó a rebasar los límites de la loma Chata y se crearon colonias y fraccionamientos en las tierras bajas del valle, las cuales sí están sujetas a inundaciones periódicas.

Uno de los efectos más importantes en la dinámica y crecimiento poblacional en Michoacán y principalmente en la ciudad de Morelia, se dio a partir del sismo de 1985, a consecuencia de la afluencia de miles de personas que provenían del Estado de México (Fig. IV.3), provocando una demanda de espacios y servicios, aunque a falta de una planeación territorial, trajo como consecuencia un gran número de asentamientos irregulares, provocando un riesgo para las familias que habitan estos lugares. Gran parte de los asentamientos que se generaron en ese tiempo, se establecieron sobre antiguos cauces (Fig. IV.4), lo que conformaban los meandros de los antiguos ríos y/o arroyos, así como en las márgenes de los acules ríos, impidiendo un adecuado flujo de las aguas pluviales. Estos asentamientos se ubican principalmente en las zonas aledañas a los ríos así como en su confluencia.

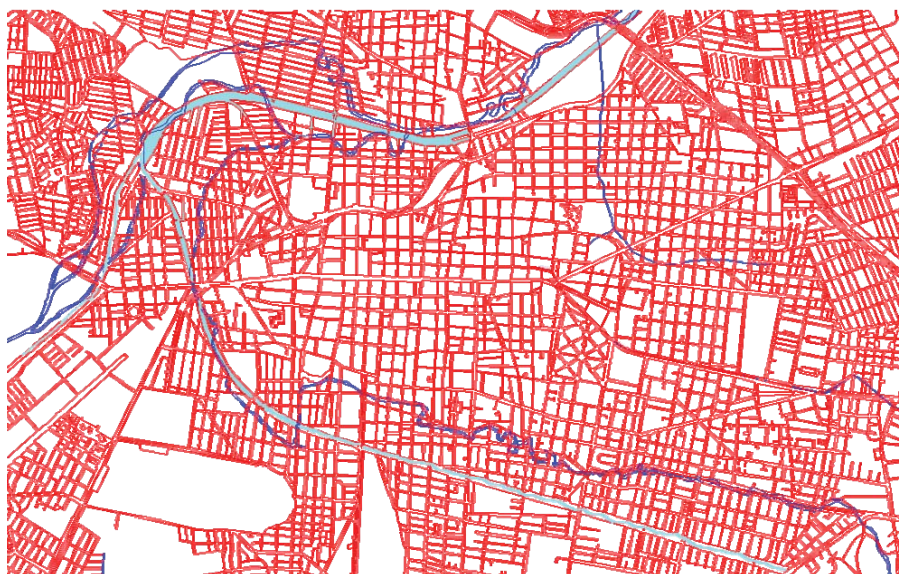


Figura IV.4. - Asentamientos sobre los antiguos cauces (INEGI 2000).

También con la deforestación acelerada que ha venido afectando a las partes altas de la cuenca, es posible encontrar desbordamientos periódicos en ambos ríos que afectan amplias zonas urbanas, sobre todo de los pobladores de ingresos medios y bajos. Lo anterior está acompañado de lodos, troncos, piedras y todo tipo de material que puede ser arrastrado o acarreado por las corrientes desbordadas, sin dejar pasar las consecuencias que conlleva a las personas afectadas en el ámbito de la salud, ya que no hay que olvidar que los ríos Chiquito y Grande aún son drenajes de descarga de aguas negras.

El deterioro del sistema y el crecimiento poblacional agudizaron al finalizar la centuria decimonónica los problemas de suministro de agua a la ciudad. Además hizo la cuestión del saneamiento urbano, concretamente se hizo imperativo contar con un adecuado sistema de evacuación de aguas residuales, así como el saneamiento del entorno extra-urbano inmediato, ya que la descarga de aguas negras a los dos ríos que circundan la ciudad, convirtieron a las áreas de inundación en de ambas corrientes en cuerpos de agua contaminada y estancada por largos periodos, donde proliferan los vectores transmisores de peligrosas enfermedades (Bravo y Ojeda 2001).

Para nuestra desgracia los modernos habitantes de Morelia, hemos olvidado las funciones ecológicas y estéticas que juegan los ríos en las antiguas y medievales ciudades, convirtiéndolos indolentemente tanto el río Grande como el río Chiquito en cloacas y basureros (Basanleque, en Vargas U. 1993) sustituyendo también las zonas de cultivo (tanto de riego como de temporal) por planchas de concreto, para asentamientos de clase media y popular.

Por otra parte el sistema de alcantarillado, hasta hace pocos años, solamente colectaba las aguas residuales que eran enviadas a los cauces de los ríos Chiquito y Grande, junto con las aguas pluviales, lo cual impactaba negativamente al cuerpo receptor que es el lago de Cuitzeo;



por ello se han construido una red de colectores para captar y conducir esas aguas negras hasta el sitio donde habrá una planta de tratamiento de aguas residuales que comenzará su funcionamiento a finales del 2006.

IV.3.1.-Antecedentes Locales

Para conocer más a fondo la problemática que se presenta en la ciudad de Morelia respecto a las inundaciones, se realizó una pesquisa hemerográfica (La Voz-UMSNH), del periódico de mayor antigüedad de la ciudad, el periódico "La Voz de Michoacán". Esto para conocer los antecedentes locales y poder tener un registro de las colonias que han sido afectadas por las inundaciones en el pasado. La búsqueda se actualizó, ya que se tenía información hasta 1995, es decir debido a que se contaba con registros de 1955 a 1995. El inicio de esta edición fue en el año de 1955 y hasta la fecha es uno de los periódicos que cuenta con un mayor registro, tanto local como del Estado.

Hasta el momento solamente se han dado soluciones inmediatas alas constantes inundaciones de los ríos pero no son suficientes, debido a la ocurrencia e intensidad de eventos. Las lluvias excepcionales del año 1983, provocaron inundaciones en varias colonias que están cerca de los cauces de los ríos y nunca se realizó alguna obra.

En la Tabla IV.1 se muestran los problemas que vivió la ciudadanía en el pasado y que se registraron en el Periódico La Voz, la mayor parte de estos eventos fueron inundaciones, esto está documentado ha partir de 1955.

Fecha	Suceso: INUNDACIÓN
30-Abr-1955	Fuertes vientos y granizada provocaron el desbordamiento del Río Chiquito. El agua entró en algunas casas.
3-Ago-1955	Fuertes lluvias provocan inundaciones en la colonia Ventura Puente.
3-Jul-1958	Fuerte tromba inunda Morelia, principalmente en zona sur por el desbordamiento del Río Chiquito, afecta las col. Juárez, Félix Ireta y Felicitas del Río, donde alcanzó hasta 0.5 m., sobre la banquetta.
16-Ago-1958	Se desborda el Río Chiquito y provoca inundaciones en varias colonias. Las aguas que bajaron del Punhuato alcanzaron hasta 2 m., de altura en la col. V. Puente. En la zona norte se inunda la col. Vasco de Quiroga.
26-Ago-1959	Inundaciones en las colonias Los Arcos y Fracc. del Rincón.
19-Ago-1960	Inundaciones en colonias bajas de Morelia. Una es la Melchor Ocampo.
20-Jun-1961	El desbordamiento del Río Chiquito provoca pequeñas inundaciones, principalmente en la col. Ventura Puente.
3-Ago-1963	Inundación en la calle Nicolás Bravo. El agua subió 50 cm.
30-Jun-1964	Inundaciones en las colonias Las Flores e Industrial.
9-Ago-1965	El agua que baja de Vista Bella inundó completamente la col. Felicitas del Río y el parque Juárez. El agua bajó hasta el Río Grande.
26-May-1966	La col. Las Flores se inundó con aguas que subieron hasta 1 m. sobre



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

	el nivel de banquetta. La col. Felicitas del Río quedó incomunicada por la inundación de que fue objeto.
28-May-1966	Fuerte tromba con granizo azotó la ciudad de Morelia, rompiendo cables de la luz y árboles viejos. Principales cols. Afectadas por inundaciones severas fueron: Las flores, Industrial, 5 de Mayo, Fco. Villa, Félix Ireta, Carrillo Puerto, Vasco de Quiroga y la Av. Lázaro Cárdenas.
30-Jun-1966	Tromba en zona oriente de Morelia, afecta las cols. Isaac Arriaga, Independencia, 5 de Mayo y la Vasco de Quiroga.
23-Sep-1967	Fuerte desbordamiento del Río Grande afectó a gran parte de Morelia, se reventaron tuberías por la cantidad de agua, el Río Chiquito tuvo desbordamientos mas leves. Las cols. afectadas son: Felicitas del Río, V. Puente, 5 de Mayo (quedó totalmente incomunicada) y varias granjas del norte de la ciudad.
8-Jul-1968	Inundaciones por canales desbordados, daños no graves en cols. 5 de Mayo V. de Quiroga, Marcos B. Méndez, Norma, Del Empleado, U. Habitacional Militar, El Porvenir y parte baja de la Industrial. Los daños mayores se registraron en la calle Motolinia cerca del Pte. Virreyes.
30-Jul-1969	Fuerte granizada destruye casas en Santiaguito, La Soledad y col. Independencia. Quedan levemente inundadas.
25-Jul-1970	En Santiaguito se registra inundación con agua a más de 1m.
13-Jun-1971	Las lluvias causan inundaciones en Michelena, calle Pza Carrillo, mercado Independencia, Calzada Madero y Av. Tata Vasco al Ote de la ciudad.
4-Sep-1976	El Río Chiquito llegó a los 5m sobre su nivel provocando inundaciones en las cols. Jardines del Rincón, Campestre, Virreyes, Juárez, Felicitas del Río, V. Puente, Félix Ireta, Molino de Parras, Morelos y Jacarandas. El agua bajó de nivel rápidamente.
2-Sep-1977	Inundaciones en la zona baja de Morelia, el agua alcanzó 50cm de altura sobre las banquetas. Principalmente afecto sector Carrillo. El agua de nivel bajo rápidamente.
25-Jun-1978	Se inunda la col. La huerta y la Av. Madero Poniente.
14-Ago-1978	Inundaciones en las calles Acacia y Álamo de la col. Melchor Ocampo y en la col. Molino de Parras.
21-Ago-1980	Se desborda el Río Chiquito y provoca inundaciones en las cols. del sur hasta la Molino de Parras. En la calle Cuautla (Pte) el agua alcanzó 40 cm. Sobre la banquetta.
26-Ago-1980	Fuerte tormenta provoca inundaciones en las cols. Chapultepec Sur, Nueva Chapultepec, Camelinas, Blvd. García de León y Plaza Las Américas donde el agua entró hasta las casas. También se vieron afectadas las cols. del sur de la ciudad.
7-Sep-1980	Fuerte tormenta inunda el parque Juárez.
30-Abr-1981	Las lluvias inundan la calle de Corregidora.
15-Jun-1981	Las lluvias provocan encharcamientos en las calles principales como la Av. Camelinas.
27-Ago-1981	Fuerte aguacero desbordó el Río Grande. Se inunda la col. Felicitas del



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

	Río.
29-Ago-1981	Fuerte tormenta provoca inundaciones en 15 cols. del sur. Se desbordaron los dos Ríos (Chiquito y Grande) por las repetidas lluvias. El agua alcanzó 70cm en varias zonas. Las cols. Arriaga Rivera, Prados Verdes quedan muy afectadas.
13-Jul-1982	Fuerte tormenta arrastra lodo de Sta. María y Real del Monte provocando inundaciones en varias colonias. En Av. Camelinas y Antonio Vivaldi el agua alcanzó 1m. de altura. Camelinas y V. Puente también se vieron muy afectadas.
24-Jul-1982	Las lluvias provocan inundaciones en las colonias del sur.
14-Ago-1982	De nuevo inundadas Camelinas y V. Puente y la zona sur de Morelia.
23-May-1983	Fuerte aguacero provoca leves inundaciones en varios puntos de la ciudad.
19-Jul-1983	Inundaciones en Camelinas por las repetidas lluvias.
9-Ago-1983	Se desborda el Río Chiquito y afecta tres colonias.
10-Ago-1983	Se inundan las cols. Inf. Camelinas, Felicitas del Río y Juárez, donde se inundaron varias casas.
27-Ago-1983	Se desbordó el Río Chiquito el agua subió mas de 1.5 m. en las cols. Chapultepec Sur, Inf. Camelinas y en la calle prolongación de Cuautla.
22-Jun-1984	Fuerte tormenta con granizo arrastró piedras, palos, etc, por la bajada de Sta. María y provoco inundaciones fuertes en Virrey de Mendoza y la Paloma donde el agua subió 1m., en la col. Ocolusen se reventó la tubería de drenaje y el agua subió hasta 1.5m.
23-Jun-1984	Gran parte de Morelia inundada por las fuertes lluvias.
24-Jun-1984	Por las continuas lluvias esta inundada Av. Camelinas y V. Puente.
17-Ago-1984	Fuertes lluvias provocan inundaciones graves en Prados Verdes donde el agua alcanzó 1.5 m. Las aguas negras salieron por el alcantarillado.
21-Jul-1985	Fuertes lluvias provocan escurrimientos del Punhuato que inundan varias cols.: Las Americas, Chapultepec Ote., Chapultepec Sur, La Industrial, V. Puente, 5 de Mayo, Dell Valle, Camelinas, Arriaga Rivera, Juárez, Felicitas del Río, etc. viéndose seriamente afectadas las calles Av. Periodismo, Blvd. García de León, Camelinas y frente a Pza. Las Americas.
1-Ago-1985	Se desbordó el Río Chiquito debido a las lluvias, inundó Av. Camelinas.
17-Jun-1986	Fuerte aguacero provoco inundaciones en las cols. Felicitas del Río, Juárez, Prados Verdes y en las calles Oviedo Mota, Periodismo y Av. Camelinas el agua alcanzó 60cm.
7-Jul-1986	Fuertes lluvias provocan inundaciones en las cols. del sur, el centro, Av. V. Puente, Lázaro Cárdenas, Libramiento Sur, Universidad y otras, donde alcanzó el agua un nivel de 50cm.
8-Ago-1986	Fuerte aguacero inunda Las Flores. El agua entró a las casas.
31-Ago-1986	Fuerte aguacero provoca inundaciones en Infonavit La Colina donde el agua entró a las casas.
8-Jul-1988	Las lluvias provocan leves inundaciones en la V. Puente y cerca del Planetario.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

4-Ago-1988	Las lluvias provocan inundaciones en el Blvd. García de León y en el Fracc. Prados Verdes.
9-Ago-1988	Fuertes lluvias provocan que se desborde el Río Grande. Se inunda la zona Pte. de la ciudad. En Policía y Tránsito y en la delegación de Educación, el agua llegó a mas de 1 m. los carros quedaron casi cubiertos en el patio de la procuraduría.
5-Sept-1988	Fuertes aguaceros inundan las cols. Tierra y Libertad, V. Puente, Prados Verdes, El Porvenir, Valladolid, Del Empleado, Ocolusen, A. Rivera y en las calles Av. Madero, Tata Vasco, L. Cárdenas y Pte., entrada a la col Industrial, Policía y Tránsito, CBTIS y la normal de educación.
8-Jul-1989	Las lluvias provocan leves inundaciones en Pza. Las Americas.
8-Ago-1989	Las lluvias provocan encharcamientos graves en Michelena.
10-Ago-1989	Las lluvias provocan estancamiento de agua en varios puntos de la ciudad.
1-Sep-1989	Torrencial aguacero con lluvia de 14.5 m/s y vientos de 55km/h provocaron inundación en Prados Verdes donde el agua pasó los 60cm., La Paloma, Lomas de Santiaguito, V. Puente, Molino de Parras y zona baja de la ciudad. Es la tormenta más fuerte registrada a la fecha.
21-May-1990	Fuertes lluvias inundan Prados Verdes y la col. Industrial.
8-Jul-1990	Fuerte aguacero inunda Av. Camelinas. El agua subió 40cm.
13-Jul-1990	Tormenta que provoca desbordamiento en el arroyo de Sta. María y la inundación de Balcones de Morelia donde el agua entró a 12 casas hasta una altura de 2m. también afectó las calles Tata Vasco, La Calzada Madero, V. Puente, Camelinas y la col. Prados Verdes.
27-Jul-1990	Fuerte tormenta vuelve a desbordar el arroyo de Sta. María y de nuevo se inunda Balcones de Morelia, calles de V. Puente y algunas otras de la Chapultepec Sur.
17-Jul-1991	Las lluvias provocan inundaciones en el sector sur de la ciudad. En Av. Camelinas y Blvd. García de León el agua subió 70cm. Quedó inundada Camelinas desde la V. Puente hasta Pza. Las Americas.
25-Jul-1991	Fuerte tormenta causa inundación de varias zonas de la ciudad.
29-Jul-1991	Las lluvias causan inundaciones en Av. Periodismo, frente a Indeco.
21 Sept -1991	Fuerte tormenta desborda el Río Chiquito, causa inundaciones en la mayor parte de la ciudad. La col. Primo Tapia fue la mas afectada.
31-May-1992	Las lluvias provocan inundaciones leves y rápidas en varias zonas de la ciudad.
19-Jul-1992	Se registra inundaciones leves en varias zonas de la ciudad.
20-Jul-1992	Fuerte tormenta que provoca inundación en la zona Ote. De la ciudad. La parte mas afectada fue la calzada Madero Ote. Y Plan de Ayala.
31-Jul-1992	Tormenta que derriba árboles y provoca inundaciones en varias zonas de la ciudad.
26-Sept-1992	Las lluvias constantes provocaron la inundación de las canchas que están frente a Policía y Tránsito.
22-Jun-1993	Inundaciones en Pza. Las Americas y Av. del Campestre.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

Junio -23	Las lluvias mantienen inundada Pza. Las Americas y Av. del Campestre.
11-Jul-1993	Las lluvias inundan Av. Periodismo, Fracc. Nueva Estación, y el Pte. de la ciudad. El agua entró a las casas hasta 30 cm.
3-Ago-1993	Fuerte tromba provocó que el agua del Punhuato bajara muy rápido y caudalosa, arrastrando 14 carros, camiones y camionetas. El agua bajaba por los cenadores y quedó inundada. Av. Camelinas.
5- Jun-1994	Las lluvias provocan inundaciones en la col. Felicitas del Río.
31-Jun-1994	Fuerte aguacero inundó el parque Juárez y las cols. del sur de la ciudad, en algunos lugares el agua alcanzó 1 m.
2- Jul -1994	Las lluvias mantienen las inundaciones de la col. Primo Tapia que no cuenta con pavimentación ni alcantarillado.
20 Jul -1994	Las lluvias no cesan y las canchas de P. y T. se mantienen inundadas.
21- Jun -1995	Las lluvias formaron ríos que derribaron 2 casas en la col. Ricardo Flores Magón (salida a Guadalajara), que además quedó completamente inundada.
16- Jul -1995	Las aguas que bajan de Ocolusen provocaron que se tapara el alcantarillado e inundaron Plaza Las Américas.
Agosto-1995	Fuerte tormenta desborda el Río Chiquito provocando inundaciones en Lomas del Valle, V. Puente, Chapultepec, Electricistas, Inf. Camelinas, 5 de Diciembre, La Paloma, Las Flores, Prados Verdes, Granjas del Maestro, Norma y Torremolinos. El agua subió más de 1 m. en varios lugares causando daños severos en propiedades y líneas telefónicas. El agua derrumbó un muro de una casa de La Paloma y varios carros quedaron atrapados entre el lodo y escombros.
20- Sept - 1995	Fuerte aguacero inunda la Av. Ventura Puente.
5- Jul-1996	Las lluvias provocan inundaciones en la col. Independencia.
16-ago-1995	El desbordamiento del Río Chiquito, provocado por una lluvia de 2 horas, provocó que la zona Sur de la ciudad quedara anegada. Quince colonias inundadas, hasta con 1m del agua circundante a la Paloma. 300 viviendas y 70 autos afectados
30-sep-1996	Por la noche anterior y la madrugada del 30, fuertes lluvias se presentaron al Poniente de la ciudad
8-may-1997	Una fuerte lluvia con granizo afectó principalmente la av. Solidaridad, Santiaguito y el Realito
11-may-1997	Una segunda granizada vuelve a hacer estragos en la ciudad ahora también la zona centro.
29-jul-1997	Torrenciales aguaceros afectan a media ciudad, principalmente al poniente.
8-ago-1997	Una lluvia torrencial con vientos de hasta 80km/hr afectó principalmente a la av. Camelinas y Ventura Puente, destruyendo el follaje y ramas de los árboles, así como anuncios, además de anegar la avenida.
2-ago-1998	Debido a las lluvias que se presentaron, la avenida Camelinas y la Ventura Puente han sido afectadas.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

8-ago-1998	Después de 20 años, una lluvia prolongada que duró 18 horas, incitó que el río Grande se desbordó, afectando a la zona poniente d la ciudad como Tres Puentes, P y T, Industrial, Granjas del Maestro, Primo Tapia, la Colina, Torremolinos y Carlos Salazar.
10-ago-1998	Nuevamente debido las persistentes lluvias, se presentan inundaciones en las colonias Carlos Salazar, Primo Tapia, Jaime Nunó, y Ampliación de PyT.
23-ago-1998	Vuelve a desbordarse el río Grande. Zona Poniente fue la más afectada.
9-sep-1998	Se presentaron desbordamiento en los ríos grande y Chiquito, afectando a la zona Poniente y Oriente de la ciudad.
24-sep-1998	Una lluvia de una hora y 30 minutos, inundó la zona Poniente de la ciudad, y afectó con 30cm de altura del agua en la av. Camelinas y Ventura Puente. Desbordándose el dren de los Itzícueros
12-may-1999	Las intensas lluvias de y una granizada se presentaron por la tarde, afectando principalmente a la zona Oriente de la Ciudad.
8-ago-1997	Una lluvia torrencial con vientos de hasta 80km/hr afectó principalmente a la av. Camelinas y Ventura Puente, destruyendo el follaje y ramas de los árboles, así como anuncios, además de anegar la avenida.
2-ago-1998	Debido a las lluvias que se presentaron, la avenida Camelinas y la Ventura Puente han sido afectadas.
8-ago-1998	Después de 20 años, una lluvia prolongada que duró 18 horas, incitó que el río Grande se desbordó, afectando a la zona poniente d la ciudad como Tres Puentes, P y T, Industrial, Granjas del Maestro, Primo Tapia, la Colina, Torremolinos y Carlos Salazar.
10-ago-1998	Nuevamente debido las persistentes lluvias, se presentan inundaciones en las colonias Carlos Salazar, Primo Tapia, Jaime Nunó, y Ampliación de P y T.
23-ago-1998	Vuelve a desbordarse el río Grande. Zona Poniente fue la más afectada.
9-sep-1998	Se presentaron desbordamiento en los ríos grande y Chiquito, afectando a la zona Poniente y Oriente de la ciudad.
24-sep-1998	Una lluvia de 1 hora y 30 minutos, inundó la zona Poniente de la ciudad, y afectó con 30cm de altura del agua en la av. Camelinas y Ventura Puente. Desbordándose el dren de los Itzícueros
12-may-1999	Las intensas lluvias de y una granizada se presentaron por la tarde, afectando principalmente a la zona Oriente de la Ciudad.
27-jun-2002	Una precipitación de 66.8mm de lluvia con granizo fue se manifestaron como la primer tromba del año, causando anegamientos principalmente en la zona norte así como en las zonas bajas de la ciudad.
26-may-2003	Primer tromba del año, ocasionó encharcamientos
2-ago-2003	Una tromba al norte de la ciudad, y el desbordamiento de un arroyo, la causa fue un puente que no permitió el paso del gran volumen de agua, lo que damnificó a 11 familias
28-Ago-2003	Una tormenta que inundó con 60cm a 8 colonias como Primo Tapia, Carlos Salazar, Inf. Cepamisa y Mariano Escobedo. Se reportó un colapsamiento en el sistema de drenaje, así como la caída de bardas,



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.*



Resultados

	mientras que a la salida a Charo el agua llegó hasta un metro de altura.
18-sep-2003	Debido al desbordamiento de los ríos Chiquito y Grande de Morelia por las intensas lluvias, 5,000 viviendas registraron daños de diferentes magnitudes y 10,000 personas de las 21 colonias inundadas sufren los embates de la naturaleza. Una de las preocupaciones en ese momento era que había desfogue en la presa de Cointzio, la cual estaba a su capacidad.

Tabla IV.1.- Daños que han dejado diferentes lluvias intensas en la Ciudad de Morelia.

- ❖ En el año 1987, las lluvias provocaron el desbordamiento del río Chiquito, afectando colonias con un nivel que alcanzó más de 1.00m, como Ventura Puente, Nueva Chapultepec, Club Campestre, Molino de Parras y la del Empleado.
- ❖ En el año de 1993 tres lluvias excepcionales afectaron gran parte de la ciudad, ocasionando grandes daños a las viviendas, como pérdidas materiales de las mismas, donde en los cuatro meses más lluviosos (junio, julio, agosto y septiembre) se acumularon 730mm.
- ❖ En el año 1997 al 1998, las lluvias excepcionales provocaron el desbordamiento del río conocido como arroyo de Tierras, el cual provocó inundaciones con un nivel de hasta dos metros, afectando principalmente a la colonia Balcones de Morelia.
- ❖ En junio de 2003, 150 viviendas de 9 colonias de la ciudad resultaron gravemente afectadas por una lluvia excepcional, donde las colonias más afectadas, fueron: Tres Puentes, Carlos Salazar y Prados Verdes por cuestiones de inundación.
- ❖ El 18 de agosto de 2003, primera gran tromba de ese año, ocasionó inundaciones, tan solo una hora y media provocó una precipitación de 20mm, generando anegamientos en las zonas bajas de la ciudad.
- ❖ El 13 de septiembre de 2003, se desbordó el canal que circula cerca de la PGJE y la SEE, afectando a 14 colonias aguas abajo; además afectó a la Tenencia Morelos, donde hubo derrumbes de barda de algunas viviendas.
- ❖ Nunca antes en 27 años se había alcanzado en la ciudad de Morelia, el nivel de emergencia como se declaró en septiembre de 2003, debido a los daños provocados por las lluvias debido a la onda tropical 45 que afectó principalmente al Suroeste de Michoacán, aunque en las mismas fechas CNA reportó que la presa Cointzio que se localiza aguas arriba de la ciudad, estaba al 98.7% de su capacidad y que de continuar las lluvias no se podría controlar más el desfogue y podría desbordarse la presa; y por ello el Gobernador pedía a la Secretaría de Gobernación que se declarara Zona de desastre, aunque la declaración oficial fue en "estado de emergencia", la cual generó recursos adicionales.



Resultados

- ❖ Los días 16, 17 y 18 de septiembre de 2003, se tiene registrada la primer gran inundación histórica hasta el 2003, debido a la onda tropical 45, dejando precipitaciones de 43mm, afectando 4,000 viviendas, donde 400km de los 1000km de drenaje se bloquearon. El primer día las partes afectadas fueron la zona sur y suroeste de la ciudad. El segundo día, el río Grande se desborda cerca de la colonia Tres Puentes, donde se registraron las mayores inundaciones. En cuanto al río Chiquito sobrepasó su nivel a su paso por las colonias Morelos y Juárez, provocando anegamientos de hasta 0.50m. En el Dren de los Itzicuaros el agua rebasó su capacidad inundando la zona colindante al mismo. Todo esto provocó que el tercer día, el dren Barajas se saliera de su cauce e inundara parte de la colonia Arriaga Rivera, donde el agua rebasó los 25cm, afectando la zona poniente de la ciudad, y provocando la evacuación de 70 familias. El saldo de los tres días fue de 22 colonias anegadas de acuerdo al H. Ayuntamiento y Protección Civil, 2003. El 28% de la ciudadanía quedó sin el suministro de agua potable debido a que la planta de la Mintzita se cerró, para evitar que el líquido se contaminara. SEDESOL señala que 28 millones de pesos son destinados para apoyar a las viviendas que tuvieron daños totales; aunque 2 mil viviendas son las afectadas, para estas hubo un apoyo de 2 mdp. El Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEM), evaluó los daños principalmente de las viviendas, aunque su apoyo fue solo para las viviendas que se encuentran en asentamientos regulares.
- ❖ El día 15 de octubre de 2003, una lluvia excepcional de 63mm, en las colonias cercanas a la confluencia del Río Chiquito, anegó 5 colonias con un nivel de agua de 30cm, en 15 colonias más el nivel fue de hasta 50cm.
- ❖ Los escurrimientos que se registraron en septiembre del 2004, sobre todo en colonias como Carlos Salazar, Jaime Nunó, Jardines de Santiaguito, Primo Tapia y Las Higuierillas, fueron afectadas por las intensas lluvias.

Protección Civil Estatal y el H. Ayuntamiento, han preparado un plan de contingencia, donde enuncia los insumos de reserva como cobijas, colchones, y los posibles albergues en caso de ser necesarios. A partir de octubre de 2004, se aplican 200mdp en obras de prevención de inundaciones, en la rehabilitación y reparación de la infraestructura hidráulica dañada por las lluvias, entre las obras esta la limpieza y desazolve de cauces como el río Grande y Chiquito, reparación y rehabilitación de maquinaria e infraestructura hidráulica dañada por las lluvia, un estudio de fotogrametría así como infraestructura para prevenir inundaciones.

En los últimos diez años se han hecho más frecuentes los eventos, debido a los cambios tan drásticos que se presentan en el clima de la región como en todo el mundo. El 2002 se registró una precipitación de 900mm, provocando pérdidas por 50mdp, debido a las inundaciones. Sin olvidar los beneficios que trajo a la agricultura, a los pecuarios y abastecimientos de los vasos que es lo que garantiza el abastecimiento en la temporada de secas.

En septiembre de 2003 se registraron 75mm de lluvia más que el promedio histórico registrado hasta esa fecha, lo que resultó evidente, si se recuerda el evento extremo que provocó severas inundaciones en la ciudad durante los días 15,16 y 17 de septiembre en el citado año. Cabe señalar que el mayor valor registrado de la precipitación para el mes de julio en estos últimos



cinco años, corresponde al valor histórico promedio registrado hasta la fecha. Esto quiere decir que la magnitud de la precipitación en la estación Cointzio, aumentó en los últimos cinco años y que su variación temporal se refleja más en los meses de mayo, agosto y septiembre.

De acuerdo a la información que se pudo obtener relacionado a las inundaciones históricas de la ciudad de Morelia, nos damos cuenta que las inundaciones fuertes son más persistentes a partir de los 70's (Fig. IV.5). Esto debido al acelerado y a la mala planeación y crecimiento de la ciudad. Observando que la frecuencia de los anegamientos en los últimos años se presentan con mayor amenaza.

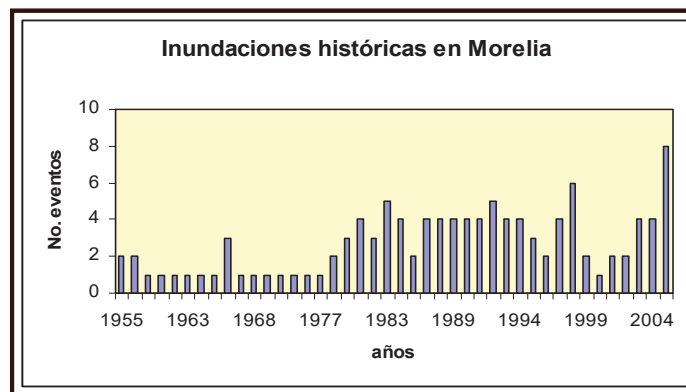


Figura IV.5.- eventos que se han presentado a través de la historia de la ciudad de Morelia.

Con el apoyo de la misma información se realizó la Figura IV.6, donde se presentan los meses más críticos con los registros de las intensidades de las lluvias, llamando la atención que en el mes de septiembre es cuando se han presentado el mayor numero de precipitaciones extraordinarias. Además el mes de marzo es el segundo mes con un mayor numero de eventos, y el mes de abril también llama la atención, ya que son periodos del año que no estamos acostumbrados a tener lluvias. El periodo de lluvias para esta región coincide con los eventos extremos, que son los meses de Julio a Octubre, aunque también nos damos cuenta con el registro de que se han presentado eventos extraordinarios en los meses de mayo y abril, esto posiblemente debido a factores como los frentes fríos, o ENSO.

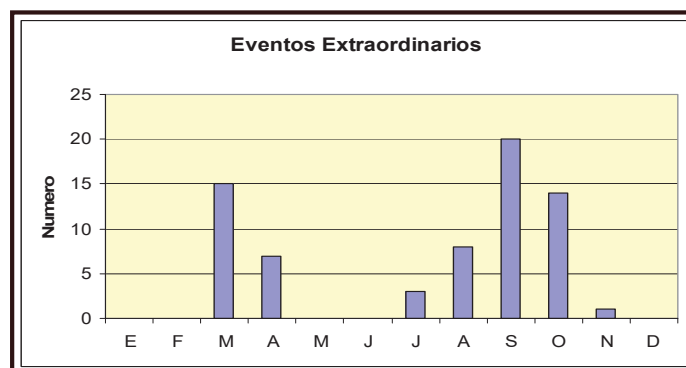




Figura IV.6.- Distribución de las lluvias excepcionales en la ciudad de Morelia, durante el año.

Hasta este momento el 2005 ha sido el año con la temporada de lluvias atípicas más fuertes, provocando daños en las viviendas, infraestructura y en la vialidad, así como en los autos que transitan por las zonas de anegamiento (Tab. IV.2). Perjudicando a la ciudadanía en general, debido a la suspensión de servicios provocados por las fuertes lluvias.

Año 2005	Colonias afectadas	Causa de la Inundación
19-Jul	3 de Agosto y Álamo II	Lluvia torrencial, encharcamientos, en 30 minutos de lluvia, y el nivel del agua en la calle subió 1.50m, perjudicando a las viviendas y a la vialidad.
20-Jul	Prados verdes, Primo Tapia, Carlos Salazar, Gertrudis Sánchez, Bvrd. García de León, Av. Camelinas, Valle Real	Lluvia atípica con 84.3mm/hr en menos de 30min
21-Jul	Prados Verdes, Primo Tapia, Carlos Salazar, Gertrudis Sánchez, Valle Real	Una lluvia precipitó lo de tres días en 1hr y 15min. En el río Grande subió el nivel a 2m creando solamente remansos, tres horas después bajo a 1.25m.
22-Jul	Torremolinos, Villas More, Rinconada I y López Rayón	En las primeras colonias hubo encharcamientos de hasta 60cm que duró dos horas, afectando a 25 hogares; en la colonia López Rayón, el agua llegó a una altura de 1m.
08-Ago	Benito Juárez	El nivel del agua subió 20cm, continuas lluvias y acumulación de basura, afectaron principalmente la vialidad.
19-Ago	Arriaga Rivera, Tres Puentes, Av. Camelina, Bvrd. García de León, Ventura Puente, Primo Tapia Pnte., Carlos Salazar.	Los desbordamientos del Dren Barajas y Arroyo de Tierras, provocados por el escurrimiento del Sur de Santa María, duró poco más de 1hora, provocando contaminación del manantial "La Mintzita", el río Grande estuvo al 98% de su capacidad. El anegamiento de las canchas de la UDC ayudaron a disminuir el caudal aguas abajo. Daños en la pavimentación que cubre el colector pluvial.
29-Ago	Puertas del Sol, Las Adelitas, Torreón Nuevo, Loma Colorada, Ignacio Zaragoza, Obrera, Eduardo Delgado, Poliducto, Santa cruz, Jesús Romero Flores, Benemérito Yucatán,	Una lluvia atípica, provocó un flujo de agua y lodo, provocaron que en las colonias Carlos Salazar, Av. Michoacán, Las Margaritas se presentara un anegamiento con altura de 40cm del nivel del agua. En Prados Verdes se presentó caídas de árboles. En la col. Galaxia, Tarímbaro hasta 2m de altura; Mercado de Abastos y Tres Marías algunas bardas derribadas. Arrastre de escombros, apilación de autos, todo ello con



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

	Jardines del Quinceo, Circuito Educadoras, La Goleta, Galaxia Tarimbaro, Valle del Real, Metrópoli, Carlos Salazar.	grandes pérdidas materiales y económicas
03-Sep	Primo Tapia, Agustín Arriaga Rivera, Tres Puentes, Carlos Salazar y Prados Verdes.	Lluvia atípica provocó los desbordamientos de los ríos Chiquito, Grande, Dren Barajas. 1,500 familias seriamente afectadas; 30 horas sin suministro de agua a 120,000 morelianos. Pérdidas materiales entre 40mdp. Anegamientos de canchas de la UDC. Pérdidas en negocios pequeños de 2mdp. Escuelas encharcadas.
18-Sep	Parte del poniente de la ciudad: Barandillas, UDC, Av. Siervo de la Nación.	Una lluvia provocó que 10 viviendas anegadas con 10cm de altura.

Tabla IV.2.- Registro de daños ocasionados por las lluvias extraordinarias, que provocaron inundaciones en el 2005.

Uno de los eventos más severos que ocasionó más daños en Michoacán, se presentó en la capital del Estado, en la madrugada del 3 de septiembre de 2005. Una precipitación extraordinaria de 39mm, ocasionaron inundaciones que afectaron la ciudad, principalmente las zonas aledañas a los ríos que atraviesan la zona urbana, la principal afectación se dio por el desbordamiento del río Chiquito, mientras que las zonas inmediatas al río Grande también se vieron afectados por la gran capacidad que tenía en esos momentos el río principal, además que los 9 cárcamos de bombeo fueron insuficientes, el plan DN III aplicado por la 21ª Zona Militar se salió de control. Esta ciudad sufrió el peor desastre natural, con el evento presentado el día 3 de septiembre, el cual superó incluso el que se había registrado el 17 de septiembre del 2003, dañando por lo menos 38 colonias, desbordándose los ríos Grande, Chiquito y los principales drenes de la ciudad.

Las principales colonias afectadas fueron Tres Puentes, Carlos Salazar y Primo Tapia Poniente, mientras que en la parte oriente, colonias como la Felix Ireta y la avenida Solidaridad, captaron toda el agua del río Chiquito (H. Ayuntamiento Morelia, 2005). Diversos huracanes y depresiones tropicales han afectado a lo largo de la historia el Estado de Michoacán, aumentando las precipitaciones. Debido al impacto económico asociado a la ocurrencia de inundaciones, se ha realizado este estudio dentro del área de las Ciencias de la Tierra, implementando metodologías que nos permitan analizar la dinámica fluvial, establecer periodos de retorno, y delimitar las zonas posibles de impacto. Las cuales son definidas con base a los análisis de información hidrométrica y de precipitación, indispensables en la obtención de periodos de retorno de precipitaciones de distinta intensidad, e intervalos de recurrencia de los gastos correspondientes.



IV.4.- GEOMORFOLOGÍA

Dentro de la parte geológica y de acuerdo a Garduño et al, (2004), se describen tres grandes unidades: las andesitas de la Sierra de Mil Cumbres, las ignimbritas de Morelia y los depósitos Cuaternarios. Las andesitas pertenecientes a la serie Superior de la Sierra de Mil Cumbres, que se constituyen por una alternancia de lavas andesíticas de color verde, brechas volcánicas y flujos de lava de andesitas basálticas de color gris oscuro. La secuencia de la cantera de Morelia, se caracteriza por una serie de depósitos piroclásticos distribuidos en la porción septentrional de la cuenca. Por último los depósitos Cuaternarios, son representados por depósitos aluviales recientes, depósitos detríticos coluviales de laderas, intercalados con depósitos del mismo tipo pero más antiguos. La cuenca se delimita por fallas NE-SO presentando semigrabens basculados hacia el sur (Ferrari et al., 1994; Israde et al., 2002).

IV.4.1.- Caracterización de la cuenca

El río Grande se origina en línea recta, desde el cerro de agua fría al sureste de Acuitzio hasta su desembocadura en el lago de Cuitzeo, y sigue un rumbo SW-NE; se subdivide en tres porciones, de acuerdo a la pendiente y a la velocidad de la corriente, la porción alta, donde se puede considerar como río joven, entre los 2800 y los 2200msnm, en los principios de Acuitzio y Huiramba; la porción media entre los 2200 y 1950 msnm, donde se unen los ríos Tiripetío, Acuitzio y Tirio para dar origen al llamado Río Grande de Morelia, en la parte sureste del municipio de Morelia. En la porción baja, donde se le puede considerar como un río maduro, que corre lentamente ello a partir de la presa de Cointzio y sobre todo, a su paso por la ciudad de Morelia, donde definitivamente envejece por el grado tan elevado de contaminación y desechos sólidos que en él se depositan.

IV.4.2.- Red hidrográfica

La cuenca en estudio, es una subcuenca de la cuenca de Cointzion, donde la considero como una cuenca tipo endorreica, debido a que su punto de salida sigue la misma corriente que es el cauce del río Grande y desemboca al Lago de Cuitzeo. El patrón de drenaje de esta área no presenta una integración definida debido a que algunas veces los escurrimientos son canalizados o bien el agua se infiltra en el terreno (de acuerdo a lo explicado en el párrafo II.1.3). Aunque se considera que tiene un drenaje dendrítico a subdentrítico y alta densidad de drenaje, la mayoría de las corrientes convergen hacia una corriente principal, integrando el escurrimiento del río Grande de Morelia, el cual tiene una longitud aproximada de 88km (Fig. IV.7). La cuenca tiene un escurrimiento directo, considerado así por la respuesta rápida a la lluvia, y que se considera como el resultado de la lluvia efectiva o en exceso. El río es permanente o perenne debido a que numerosos manantiales y escurrimientos del lugar lo alimentan, además es regulado por una presa, la cual permite dividir su suministro en abastecimiento para la ciudad de Morelia, para el distrito de riego y para regular las crecidas. Una gran ventaja es que esta presa permite el depósito de material que es erosionado de sus alrededores y que transportan los escurrimientos superficiales hacia ella.



Resultados

El área de la cuenca es de 1,200km² con orden de corriente de 6, que lo considero que es un cauce de gran jerarquía, la pendiente del cauce principal es de 0.006, con una densidad de corriente entre el 10-20% este valor se considera alto. El coeficiente de escurrimiento promedio es de 0.45 (parte Sur C=0.8; parte Norte C=0.2), esto de acuerdo al tipo de suelo y/o vegetación (según SCS de EU). Se tomó en consideración el tipo de suelo que se tiene en la zona sur-oriente, el cual es del de tipo C principalmente, caracterizados por suelos que tienen bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos que tienen un estrato que impide el flujo del agua en suelos con texturas muy finas.

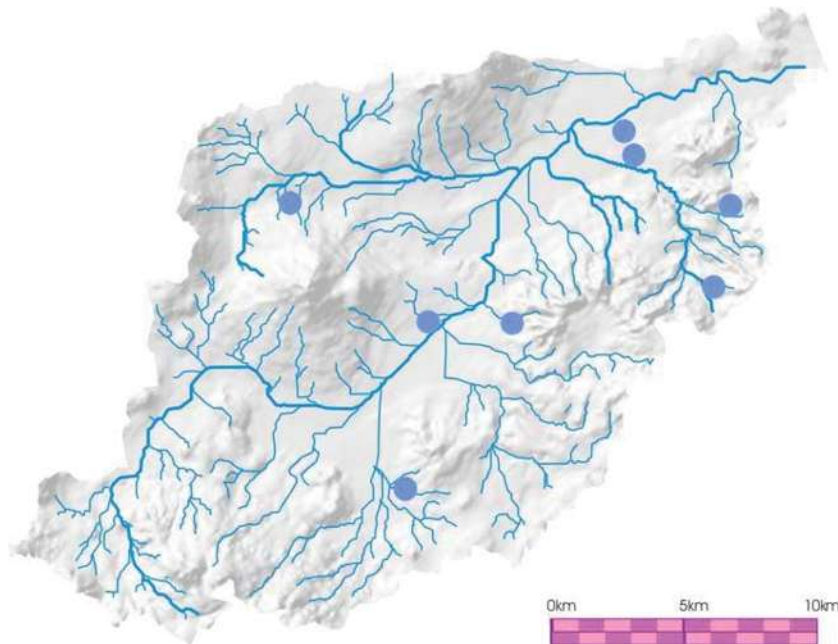


Figura IV.7.- Imagen de la cuenca en estudio, donde se observa la red hidrográfica con la localización de las estaciones pluviométricas.

IV.4.3.- Pendientes

Se tienen planicies con altitudes que llegan a los 1900msnm, con pendientes de hasta 3°, presentándose en la zona Norte de la cuenca en estudio; los piedemonte figuran con pendientes entre 3° y 10°. La presencia de lomeríos altos con altitudes que van hasta los 2500m con pendientes que van hasta los 20°

IV.4.4.- Vegetación

En cuanto al área verde que existe en la ciudad de Morelia, es insuficiente, tanto para mejorar y regular el clima, el crecimiento urbano, así como la calidad de vida y menor área de recarga para el acuífero, evitando el incremento de la escorrentía. De la vegetación que se observa en la



cuenca se tiene: el bosque de pino, es el de mayor importancia, tanto por la superficie cubierta como por los usos a los que es sometido, siguiendo en importancia el bosque de encino y el bosque de galería (Guevara, 1995). La vegetación se encuentra claramente diferenciada, de acuerdo a la altitud y a los tipos de clima y de suelo: en la parte montañosa del sur, por ejemplo, hay coníferas (pinos, encinos y madroños); en la región norte, arbustos y matorrales (mezquites, cazahuates, "uña de gato" y huisaches). El principal factor en la región es el cambio de uso del suelo y la extracción clandestina de madera (Duran, 2005).

IV.4.5.- Suelos

La ciudad de Morelia se desplanta sobre suelos de tipo Feozem, que tienen una textura media con una capa de tepetate duro, cementado a menos de 50cm de profundidad. A medida de que la ciudad crecía fueron invadiendo otras unidades de suelo de tal manera que para 1990 la ciudad se presenta sobre Feozem en un 33% de su superficie, Luvisol en un 35%, Vertisol en 30%. El 66% de la ciudad se asienta sobre textura fina (feozem, Ranker y litosol) (Guevara, 1995). Mientras que en la zona sur de la cuenca predominan es el Luvisol, debido a que la región, es de montaña y a su clima, el grupo de suelo predominante es el podzólico, propio de bosques subhúmedos, templados y fríos, rico en materia orgánica y de color café "forestal". En cambio en la zona norte es el Vertisol, debido a la fuerte práctica agrícola donde se encuentra un suelo negro "agrícola", del grupo Chernozem.

IV.5.- HIDROLOGÍA

IV.5.1.- Precipitaciones

Para poder hacer un análisis de distribución espacial de las precipitaciones, es necesario contar con información de las precipitaciones históricas, así mismo se realizó en base a lo explicado en el párrafo II.1.3.1. Para ello se efectuó una recopilación de datos hidrometeorológicos de siete estaciones, usando la base de datos del ERIC II y CLICOM, acudiendo después al Sistema Meteorológico Nacional dependiente de Comisión Nacional del Agua (SMN-CNA), donde nos proporcionaron los registros para actualizar y reforzar la información. Así como la 21ª Zona Militar que nos permitieron los informes de la estación que ellos mismos operan. Todas las estaciones se ubica dentro o próximas de la zona de interés. Tomando en cuenta la ubicación y el tiempo de registro que debe ser por lo menos de 30 años.

Michoacán es uno de los Estados con una red hidrológica más deficiente, con menos de un 25% de la red mínima y de acuerdo a las normas OMM (1970) no es aceptable. Un gran número de estaciones no cuentan con un registro confiable y otras no funcionan. Esto no es lo suficientemente extenso para efectuar un análisis de lluvias confiable.

Las siete estaciones utilizadas en el análisis del régimen de precipitaciones, quedan dentro de la cuenca en estudio, con dos estaciones cercanas que se emplearon para hacer una interpolación como puntos de ayuda. Se manejaron los datos de precipitaciones y temperaturas máximas,



mínimas y medias; en particular de las estaciones que se localizan dentro de la zona urbana, con registro de insolación humedad entre otras. Tomando en cuenta que todas tienen un registro de más de 40 años, lo cual es adecuado para llevar a cabo un análisis de frecuencia. En la Tabla IV.3 se ven los años de registros disponibles en cada una de las estaciones que se consideraron para el estudio.

Estación	Longitud	Latitud	Registro	Área de Influencia (km²)
Acuitzio	19°54´	100°41´	1923-2005	
Cointzio	19°36´	101°15´	1940-2005	141.95
Cuitzillo Grande	19°46´	101°07´	1969-2005	173.64
Jesús del Monte	19°40´	101°07´	1940-2005	67.68
Morelia	19°42´	101°11´	1947-2005	176.45
San Miguel del Monte	19°37´	101°08´	1963-2005	66.94
Santiago Undameo	19°36´	101°18´	1953-2005	273.92
21 Zona Militar	19°42´	101°11´	1972-2005	176.45

Tabla IV.3. - Relación de las estaciones meteorológicas que se utilizaron en el análisis de la cuenca.

Para la apreciación de la precipitación sobre la cuenca en estudio, es una gran ventaja el tener un registro histórico tan amplio de las estaciones, pero cabe mencionar que no todas las estaciones tienen el mismo tiempo de registros, ya que en algunas un tiempo dejaban de trabajar y hasta que son arregladas se continuaba con sus registros. Lo anterior sirve para estimar el rango de la variación temporal y espacial, para ello se emplearon los datos mensuales y anuales.

Teniendo que la mayor precipitación dentro de la cuenca se concentra en la parte sur, así como los escurrimientos. La precipitación media en toda la cuenca varía de 398mm a la máxima de 1208mm.

En la Figura IV.8 se observa que el mayor porcentaje de las precipitaciones se presentan en los meses de junio a septiembre con precipitaciones entre 700 y 900mm, causadas por la invasión de masas de aire cálido y húmedo procedentes de los mares adyacentes; mientras que los meses de invierno presentan un periodo de secas, con algunas lluvias invernales por algún fenómeno extraordinario o son debidas a los frentes fríos que llegan del norte del país. En general el régimen de lluvias que se presenta en esta cuenca, es de tipo continental.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

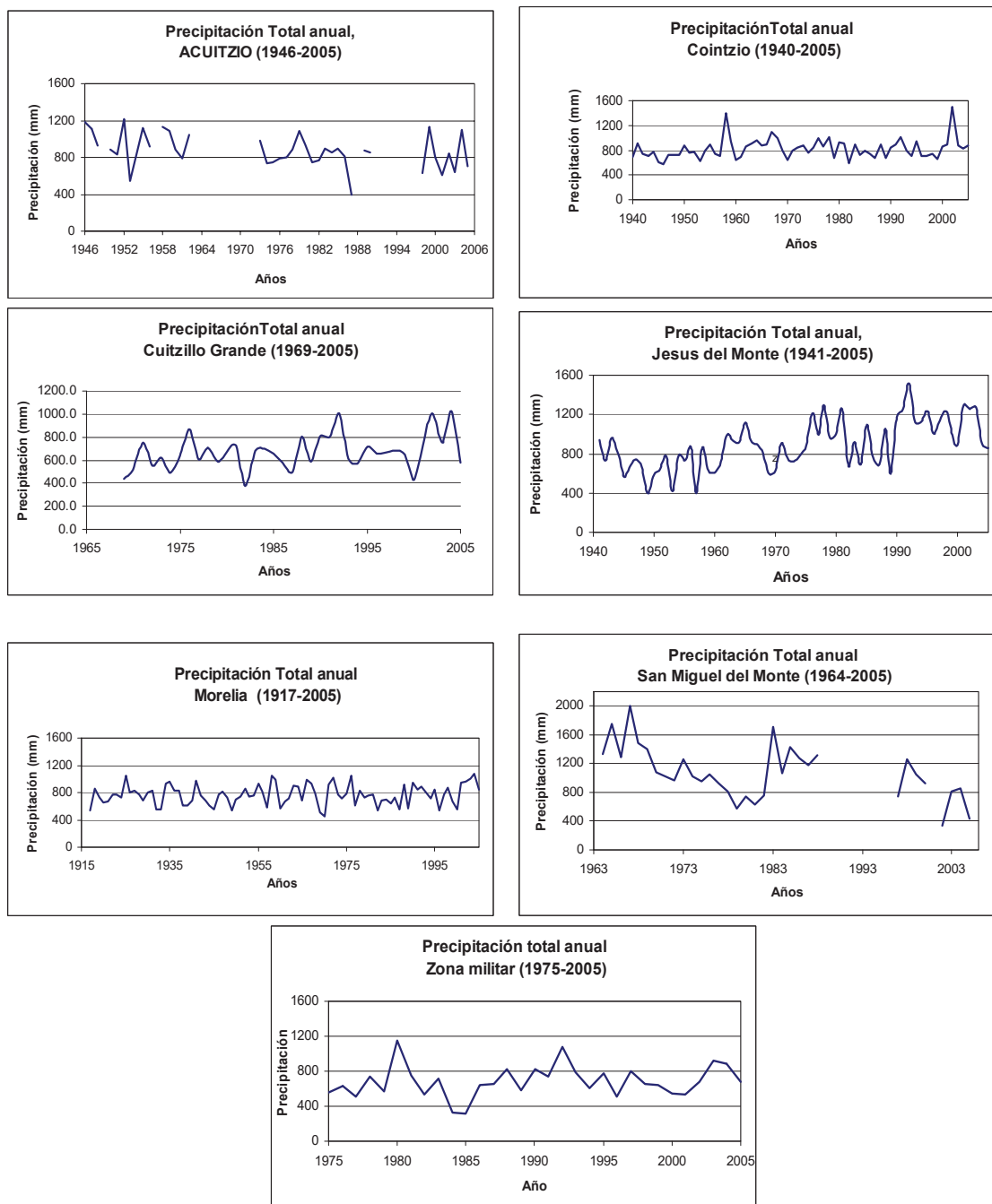


Figura IV.8.- Gráficas de las lluvias registradas en cada una de las estaciones pluviométricas.



Resultados

En la Figura IV.8 se muestra que en los últimos cuarenta años las lluvias han tenido un comportamiento similar, haciendo hincapié que cada 10 años se tiene un valor de precipitación media que supera los 1000mm. Resaltando que en la estación Cointzio se presentó una precipitación de 1392mm en 1958, que fue superada hasta el año 2000 con un registro de 1494.8mm. Dentro de la ciudad en la estación de la Zona Militar se registró una lluvia anual máxima de 1151mm en 1980.

El análisis detallado de estos últimos años, permite observar que existe un aumento global de la precipitación en la cuenca de la ciudad de Morelia. Para dicha estimación de la precipitación promedio sobre la cuenca en estudio se utilizaron tres métodos, y en la Tabla IV.4 se presentan los resultados.

Método	h_p (mm)
Aritmético	853.78
Polígonos de Thiessen	848.72
Curvas Isoyetas	842.66

Tabla IV.4.- Precipitación media de la cuenca en estudio.

De los tres métodos aplicados de acuerdo al parrafo II.1.3.1, el método aritmético no toma en cuenta la distribución de las estaciones pluviométricas, así que desechamos ese resultado. El método de Thiessen toma en cuenta la distribución de las estaciones climatológicas aunque no considera los factores topográficos, así como las normas de la OMM indican que en una zona montañosa y con límites mínimos necesarios, una estación pluviométrica tienen que cubrir un área máxima de 250km². En el límite óptimo cada estación deberá cubrir al menos 100km²(Jáuregui, 1973). De acuerdo a los resultados obtenidos de las áreas A1, A4 y A7 (Fig. IV.9), se observa que no están cumpliendo con lo indicado anteriormente, ya que existen zonas que superan el área establecida (principalmente el sur de la cuenca).

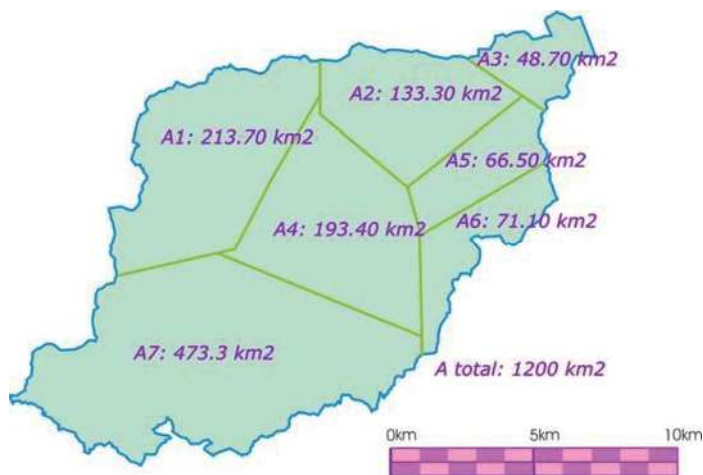


Figura IV.9.- En la imagen se presenta la cuenca con el método de Thiessen.



Como resultado de la precipitación media de la cuenca, se toma el valor promedio de precipitación utilizando el método de las isoyetas (Fig. IV.10), ya que toman en cuenta la distribución de las estaciones y la topografía del lugar. Para este estudio se consideraron siete estaciones y con la ayuda de tres estaciones cercanas (Capúla, La Golta),se pudo lograr hacer una interpolación más adecuada.

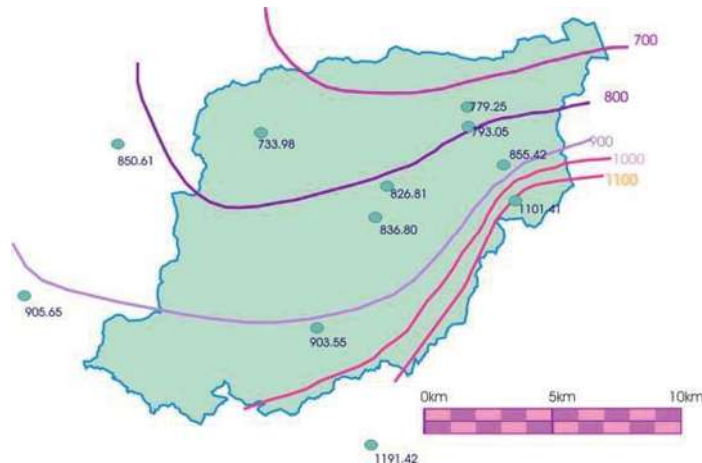


Figura IV.10.- Método de las isoyetas aplicado a la cuenca en estudio.

IV.5.2. - Temperatura

En el presente trabajo se enfocó a tener el conocimiento climatológico del área de Morelia, por lo que se consideró de importancia el determinar la temperatura media de la cuenca en estudio.

Hasta los años 70's, los vientos dominantes tenían una dirección SWNE; donde el efecto atmosférico más importante provocado por la urbanización es la llamada "isla de calor", en donde particularmente modificó la temperatura y con ello se ven afectados indirectamente algunos otros elementos meteorológicos como la humedad. Debido a la circulación general de la atmósfera, el Estado de Michoacán se encuentra en la zona de vientos alisios que soplan con una dirección ENE y recogen humedad del Golfo de México. Actualmente los vientos presentan esa dirección con altas presiones de 800 hasta 820mb (Fig. IV.11).

La **temperatura** del aire en el centro de la ciudad de Morelia es con frecuencia mayor que en los suburbios, esto se debe a que la piedra y el concreto absorben y almacenan el calor solar mejor que otras superficies, lo que trae como consecuencia una reducción general del albedo (Landsberg, citado por Antaramián 2001).



Resultados

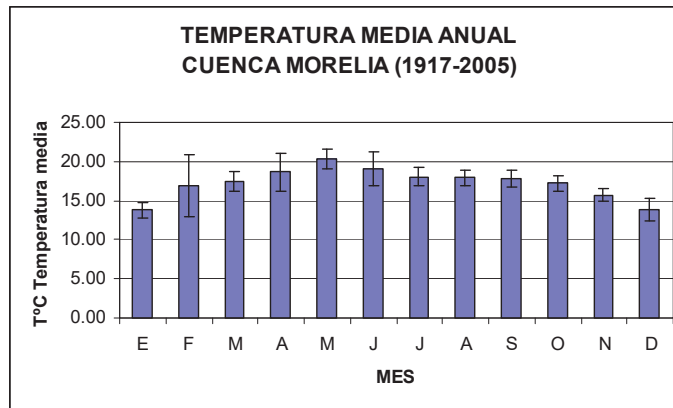
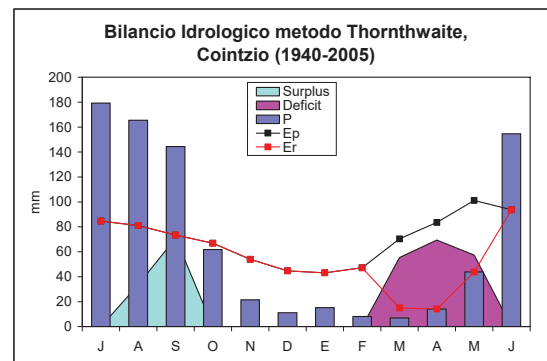
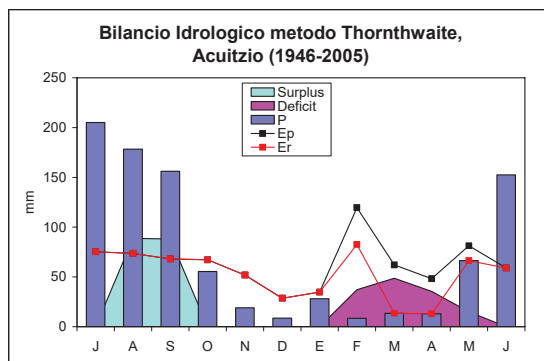


Figura IV.11.- Temperatura media anual de la cuenca en estudio.

El **clima** que predomina de la zona urbana es templado sub-húmedo Cwb, con verano fresco y largo. La zona sur de la cuenca se clasifica como Cw, acuerdo a la clasificación de Köppen, es decir, tomando en cuenta el grado de humedad. De acuerdo con las cartas de INEGI y a la información meteorológica proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la temperatura promedio anual es de 17.3°C, tomando en cuenta las 7 estaciones que se encuentran dentro de la cuenca en estudio. Donde los meses más secos son los de noviembre a marzo, con insolaciones por arriba de 150hrs y hasta las 200hrs.

IV.5.3.- Evapotranspiración

Para el cálculo que corresponde a las pérdidas de agua en la atmósfera, y en referencia al párrafo II.1.3.2 se tomó en cuenta la evapotranspiración real ETR de cada una de las estaciones, que depende de las características de la cuenca, las horas de sol, así como de su temperatura, precipitación y por supuesto de la latitud a la que corresponde la cuenca en estudio (Fig. IV.12).





Resultados

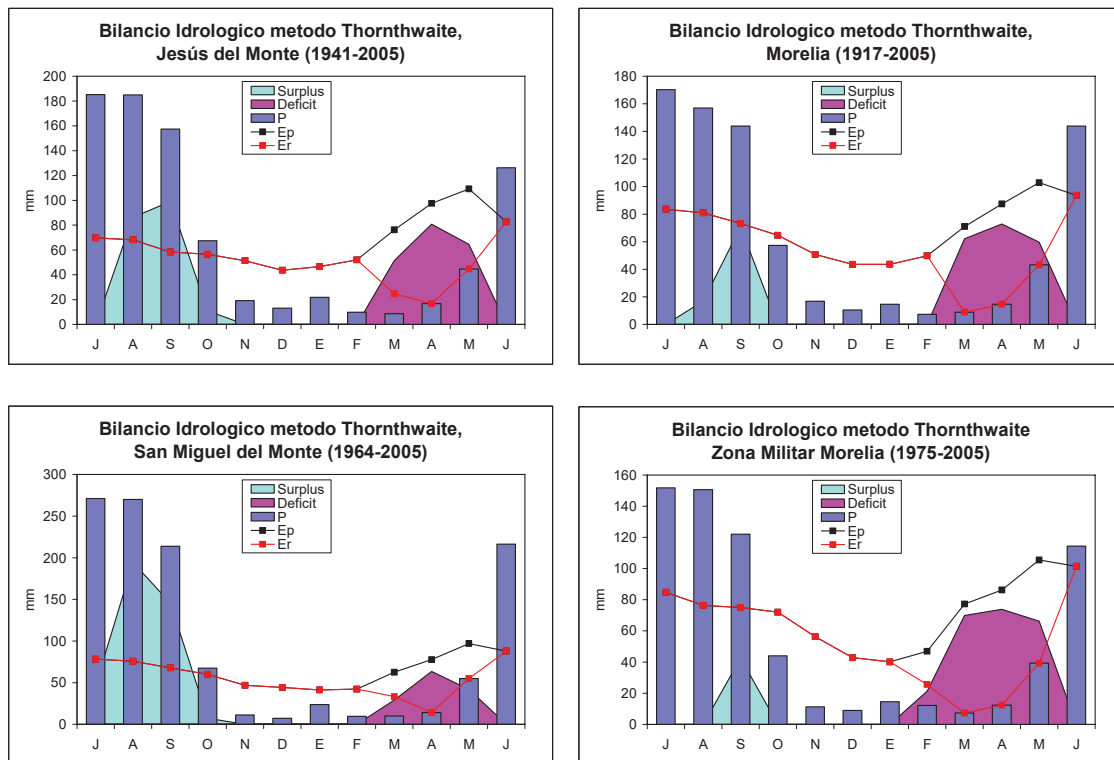


Figura IV.12.- Evapotranspiración para cada una de las estaciones que se localizan dentro de la cuenca.

En la Figura IV.12 se muestran las lluvias representadas por las barras, en triángulo (el primero) representa la recarga del subsuelo y el segundo triángulo representaría el déficit del subsuelo, mientras que la línea oscura representa la Evapotranspiración potencial y la otra línea sería la Evapotranspiración real.

Para este cálculo se aplicaron tres métodos, el de Turk, Coutagne y el de Thornthwait, de estos, el resultado que tomaremos en cuenta es el del tercer método debido a que es un método sencillo y es el más aplicado por muchos investigadores en el área. Obteniendo un promedio de las estaciones meteorológicas es de 517.5mm de evapotranspiración.

IV.5.4.- Esguimientos

De acuerdo a los datos obtenidos de la estación hidrométrica Atapaneo, y haciendo referencia al párrafo II.1.3.3, el esguimiento total medio anual se divide entre el área de la cuenca, dándonos como resultado:

$$R = 132.73 \text{ mm /año}$$



Resultados

De la Figura IV.13 se puede decir que los registros en la estación Atapaneo tiene un comportamiento irregular, esto debido a periodos de lluvias excepcionales como a periodos de sequías. Además se tiene falta de información, que esto corresponde a los huecos que se tiene en las gráficas.

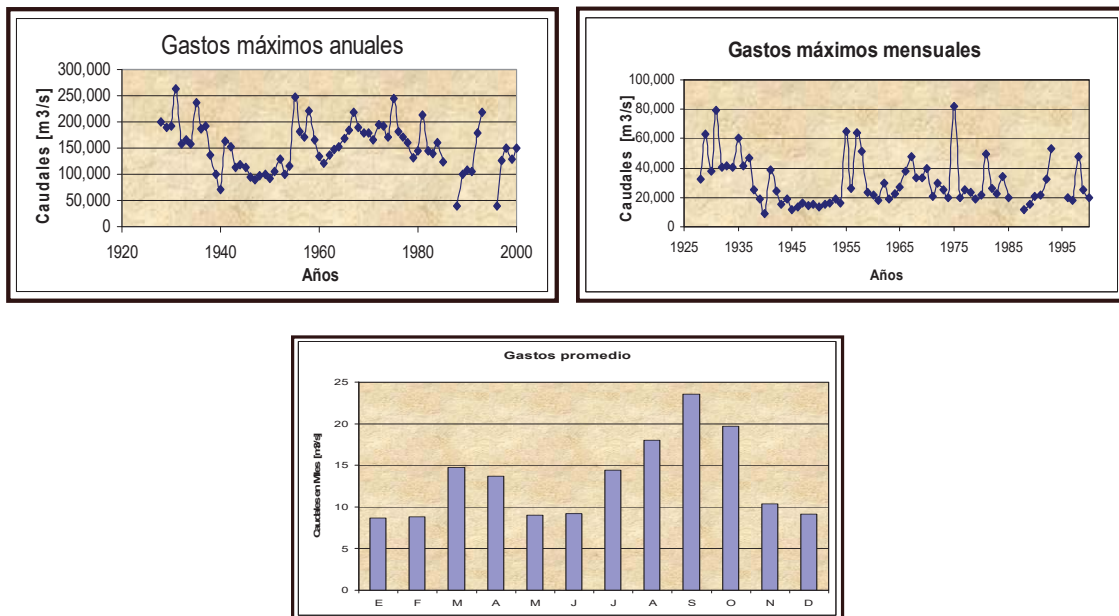


Figura IV.13.- Escurrimientos del río Grande, registrados en la estación de Atapaneo.

IV.5.5.- Balance hidrológico

Con toda la información calculada anteriormente se procedió a realizar el balance hidrológico, lo que permite conocer aspectos de entrada como de salida de agua de la cuenca en estudio. Con los datos obtenidos anteriormente, se concluye que el valor de la precipitación es superior a las salidas por evapotranspiración como por escorrentía superficial como se muestra en la Tabla IV.5.

Área total	$A = 1200 \text{ km}^2$
Temperatura media	$T = 17.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Precipitación media	$P = 842.66 \text{ mm/año}$
Evapotranspiración	$ETR = 517.50 \text{ mm/año}$
Escurrimiento	$R = 133.73 \text{ mm/año}$
Pérdidas	$I = 192.43 \text{ mm/año}$

Tabla IV.5.- Resultados del Balance hidrológico, aplicado a la cuenca en estudio.

Por tanto la hipótesis del balance, es que las pérdidas que tenemos, son el resultado de la precipitación que llega a percolar en su recorrido dentro del espacio de estudio, debido a que las



precipitaciones superan la suma de la evapotranspiración real más el escurrimiento, y como las infiltraciones no se sumaron al escurrimiento superficial, inferimos que es un escurrimiento que alimenta por vía subterránea el acuífero u otras cuencas.

IV.6.- DINÁMICA FLUVIAL

A partir de Junio-2005 a Agosto-2006, se realizaron diferentes y repetidas salidas a campo, para obtener las muestras tanto de sólidos como de líquidos provenientes de los cauces en estudio. Con un total de 55 muestras se realizó el estudio, tomando en cuenta la temperatura del agua en el momento del muestreo, cabe destacar que los muestreos de los sólidos en suspensión se realizaron cuando se presentaban lluvias intensa que permitieran la erosión del suelo y con ello el transporte de los mismos a la zona urbana.

IV.6.1.- Aporte de sedimentos

Se realizó una estipulación del aporte de sedimentos que entra a la cuenca de Morelia, para ello se subdividió la cuenca en cuatro subcuencas que son Cointzio, Chiquito, Itzicuaros y la Urbana. Esto debido a que representan diferencias en los factores que la componen tanto de suelo como de vegetación. Se estimó el aporte de sedimentos tomando en cuenta el porcentaje de las áreas de suelo desnudas

Apoyándonos en el párrafo II.2.1 y aplicando las fórmulas del párrafo II.2.2, obtenemos para cada una de las subcuencas los resultados del aporte de sedimentos que se observan en la Tabla IV.6. Se tomó en consideración la porción del material de las cárcavas que existen dentro de cada subcuenca, dándonos un aporte de sedimentos en un año y con cada método aplicado se tienen los resultados.

Método	Sub-cuenca de Cointzio Área=665 km ²	Sub-cuenca del río Chiquito Área=72 km ²	Sub-cuenca Itzicuaros Área=185 km ²
De tabla Gottsxchalk	481.00	762.00	762
USBR	320.75	533.96	430.18
NAMBA	445.68	315.13	264.78
FUPS	245.10	234.61	134.61

Tabla IV.6.- AS.- Aporte de Sedimentos (m³/km²-año).



Si tomamos en cuenta el primer método empírico que relaciona solamente el tamaño de la subcuenca, obteniendo el mayor valor de AS, en comparación con los otros métodos que toman en cuenta la pendiente de la subcuenca, la precipitación media, desnivel máximo de cotas y una relación de suelo desnudo de la misma así como el tipo de vegetación dentro de la subcuenca. Los valores de los tres primeros métodos indican, que la capacidad de aporte de azolve es excesiva. Mientras que la FUPS (más utilizada para este tipo de análisis), aunque obtenemos el valor más bajo de aportación, debido a que se toma un gran número de variables entre ellas el factor que toma en cuenta el potencial erosivo de la lluvia, es decir, de acuerdo a la intensidad de la lluvia (mm/hr), Intensidad máxima de una tormenta en 30 minutos y un periodo del incremento de la tormenta seleccionada. Para ello se consideró la tormenta del 3 de septiembre de 2005.

Así mismo, se realizó un cálculo del coeficiente de entrega de sedimentos (CES) (Tab. IV.7) (en García S. 1997), que se refiere al tránsito del material que es susceptible a ser depositado dentro de la cuenca. Utilizando el método ASCE (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles) y una gráfica (García, 1997), para obtener el CES. El método de Maner toma en cuenta el logaritmo del área de la subcuenca, y un porcentaje anual en su ecuación. Roehl interpola valores de una tabla que se refiere a el área de cuenca para obtener su valor de CES y así aplicar su ecuación. Se realizó un promedio de cada una de las subcuencas con la finalidad de obtener un solo valor representativo para cada una de ellas.

Método	Sub-cuenca de Cointzio Área=665 km ²	Sub-cuenca del río Chiquito Área=72 km ²	Sub-cuenca Itzicuaros Área=185 km ²
ASCE	24 %	32 %	28 %
Maner	24.7 %	33.8 %	29.6 %
Roehl	44.09	21.7 %	22.79 %
Promedio	30.93	29.17	26.8

Tabla IV.7.- Resultados de los valores de los coeficientes de entrega de sedimentos.

IV.6.2.- Transporte de sedimentos

De acuerdo a que son dos ríos los que se estudiaron, y que el río Grande tiene una presa reguladora donde todos los sedimentos se depositan en ella. Para este estudio solamente tome en cuenta la dinámica que se presenta el cauce del río Chiquito. En el se llevaron a cabo varias salidas de toma de muestras de suelos, aguas arriba del Campestre como aguas abajo, sobre el lecho del río, así como muestreo del flujo de las corrientes tomando en cuenta para los sólidos, las propiedades de algunas partículas (boleos y cantos rodados) in situ, con el objeto de determinar su forma, peso, geometría, factor de forma y esfericidad.



Resultados

Para el análisis del transporte de material, solamente se tomó en consideración la dinámica del cauce del río Chiquito, debido a que el Río Grande es regulado por una presa que permite que todos los materiales erosionados y transportados por la escorrentía se depositan en ella, dejando libres solo los coloides, mientras que en el río Chiquito no se tiene ninguna obra que permita la retención de las partículas. Para este análisis se tomaron en cuenta los diámetros de las partículas obtenidos de las granulometrías en una distribución logarítmica. El material para analizar tiene un porcentaje de no cohesivo y de material cohesivo, de acuerdo a la clasificación de la ASTM (Sociedad americana para el ensayo de muestras) y la SUCS (sistema unificado de clasificación de suelos) el material se clasifica como una arena bien graduada. Los materiales no cohesivos que se encuentran en las márgenes a lo largo del cauce, parte de ellos son transportados en arrastre, desde aguas arriba y otras son desprendidas de las márgenes que componen el cauce debido a la energía con que llega el flujo. Depositando este material aguas debajo de su origen. Existen procedimientos para medir los sedimentos, en este caso se utilizó el método de Einstein, con la finalidad de conocer los valores del transporte de fondo, en suspensión y transporte total. Para poder aplicar este método, necesitamos datos de la temperatura del agua, la cual se tomó en las salidas realizadas a campo, tomando la más desfavorable que fue de 10°C, y con esto obtuvimos una viscosidad cinemática de 1.308×10^{-6} , la concentración de sedimentos se obtuvo de los muestreos del flujo que se determinaron mediante tres métodos, que fue decantación (precipitación de las partículas), por medio una bomba de vacío que consta de un matraz kitazato, así como por medio de la centrifuga, permitiendo conocer el valor de la concentración en cada muestreo. Los valores de la geometría del cauce son los de la sección del campestre que es donde llegan todos los sedimentos de aguas arriba. Se consideró un coeficiente de Manning de 0.025 debido a la rugosidad que se presenta en este sitio.

Aplicando el método de Einstein, nos arroja como resultado que tenemos mucho sedimento:

Tipo	Einstein (Kgf/s-m)
T. de fondo G_B	282.91
T. de fondo en suspensión G_{Bs}	1274.74
T. en suspensión G_s	193297.30
Transporte de fondo total G_{BT}	1557.75

Tabla IV.8. - Resultados del transporte de sedimentos

En la Figura IV. 14 se ubican los sitios sobre el río Chiquito de donde se tomaron las muestras de suelos que se analizaron en el transporte de sedimentos, este sitio corresponde aguas arriba del Campestre (cañada del Chiquito), las otras fueron tomadas en la zona urbana.

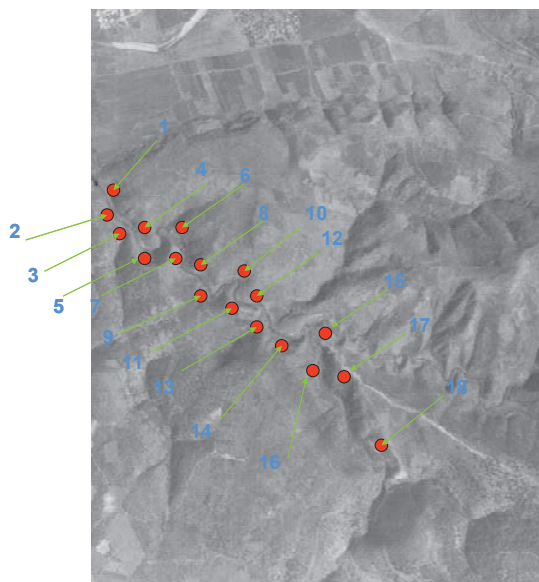


Figura IV.14.- *Sitios donde se tomaron las muestras de sedimentos.*

De las muestras que se obtuvieron del lecho del río (Fig. IV.15 y IV.16), se llevaron a laboratorio (geotecnia ambiental) para realizar las granulometrías correspondientes y así determinar los diámetros de las muestras, identificando el tipo de material y su graduación.



Figura IV. 15.- *Imágenes de la toma de muestras sobre el lecho del río Chiquito.*



Figura IV.16.- Momento en que se toma la muestra del lecho del río.

El material fino que pasó la malla 200, se analizó en el laboratorio de química analítica, donde se utilizó el equipo de Determinador de Tamaño de Partícula LS100Q (Fig. IV.17), mediante una cámara de dispersión que funciona por medio de vacío, esto para estipular la concentración de sedimentos (arena muy fina, limo y arcilla) que se encontraban en las muestras analizadas.

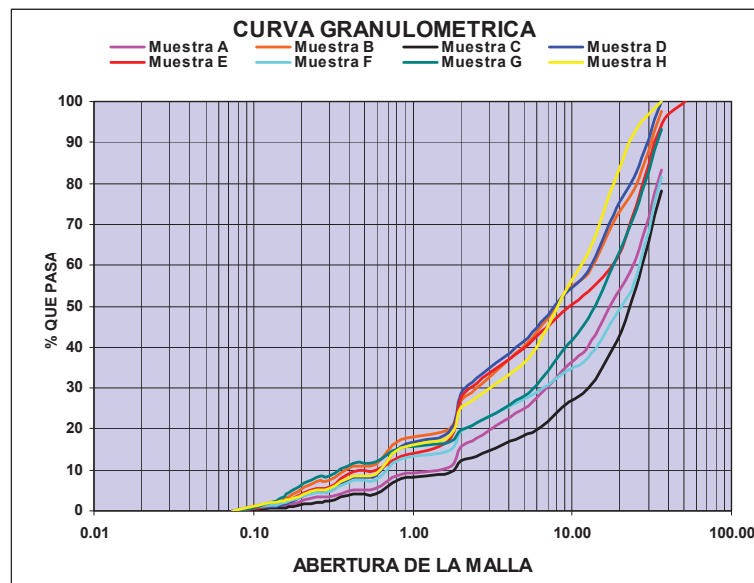


Figura V.17.- Según la norma ASTM y la clasificación de suelos en base a la SUCS, es un material: GP Grava mal graduada, para aguas arriba del campestre.



En cuanto al material líquido se aplicaron tres métodos para determinar la concentración de partículas, como son: la decantación (precipitación) del material, por medio de una bomba de vacío que consiste en un matraz Kitazato, y el tercero por medio de la centrifuga. Lo que permitió separar los sólidos y conocer su peso, así como su densidad (Fig. IV.18).



Figura IV.18.- Se observa el proceso de la prueba de vacío para los sedimentos líquidos.

IV.6.3.- Secciones transversales

Dentro de las salidas a campo se realizó un recorrido por los cauces para observar los tipos de puentes existentes dentro de la zona urbana tomando en cuenta sus características estructurales para poderlas utilizar en software.

Otro recorrido dentro de la misma ciudad fue la localización de los 9 cárcamos de bombeo que el H. Ayuntamiento con el OOAPAS construyeron para el desfogue de agua anegada en las colonias bajas de la ciudad (Fig. IV.19).



Figura IV.19.- Cárcamos de bombeo que se localizan sobre el río Grande.



Se realizó un levantamiento topográfico a detalle de las secciones transversales de los ríos Grande y Chiquito, con distancia de 40m en la zona urbana y de más de 100m en las partes distales de la ciudad. Además se obtuvieron las curvas de nivel a detalle, es decir a cada metro en la ciudad de Morelia, lo que permitió detectar las zonas bajas y susceptibles a inundarse.

IV.7.- MODELO DE VERIFICACIÓN

Los cursos de agua son sistemas complejos y dinámicos. Es por esto que seguido se afirma que cambian su coeficiente medio de rugosidad, velocidad, pendiente, forma en respuesta a la actividad antrópica y que vienen a interferir con el curso de agua, a los cambios climáticos a los regímenes ideológicos. Estos ajustamientos pueden ser repentinos o lentos, en dependencia de las causas y de las acciones que las provocan. Cuando un río viene modificado localmente, las variaciones de los parámetros anteriormente citados pueden sufrirse ya sea a monte que a valle, que en el mismo sistema tributario. Estos cambios pueden resentirse por grandes distancias y persistir por mucho tiempo.

El análisis del comportamiento del curso de agua requiere del reconocimiento y el estudio de los procesos que prevalecen en el sistema fluvial. Existen dos componentes que normalmente se deben analizar, las características hidráulicas del flujo hídrico y la dinámica de la geomorfología del curso de agua.

Estos dos parámetros son habitualmente estudiados por separado; es decir, en los ríos aluviales las características del escurrimiento y la dinámica morfológica del curso de agua son estrechamente correlacionadas.

El problema hidráulico que se debe enfrentar una vez establecido la zona en estudio, se debe considerar un determinado tiempo de recurrencia de las avenidas en una cierta sección o en un cierto punto del cauce en estudio, ya que se debe determinar el perfil longitudinal con la finalidad de evaluar los sistemas involucrados, los problemas morfológicos y la situación hidráulica caracterizada por los parámetros de las secciones transversales.

IV.7.1.- Aplicación del Hec Ras

El programa Hec-Ras (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System), fue creado por Hydrologic Engineering Center para la evaluación de los fenómenos hidráulicos caracterizados por flujo gradualmente variado, así como rápidamente variado.

La finalidad de este software es evaluar el modelo de cálculo adoptando y analizando las características hidráulicas deducibles en base a sus fenómenos que están ligados



al escurrimiento de las avenidas hídricas, al interno de canales artificiales y/o cursos de agua naturales.

El modelo puede ser aplicado sea para la evaluación de las áreas inundables, como para las avenidas que se presenten en la zona en estudio. Además para el análisis complejo del curso de agua, teniendo en cuenta las situaciones de interferencia de la escorrentía donde se reduce el cauce debidas a puentes, represas, presencia de islas, y cualquier otro tipo de obras hidráulicas que se localicen en el cauce, además considera el análisis de las confluencias, márgenes, y cualquier otro tipo de obras, como se explicó en el párrafo II.4.

Para la aplicación de este software se consideró la problemática de los Ríos Grande y Chiquito que han generado en la ciudad de Morelia durante muchos años. El primer río tiene una longitud de 18.5 km (analizados hasta ciudad industrial) y el segundo con una longitud de 7.0 km que corresponde solo a la parte urbana. Para lo que se realizaron levantamientos topográficos de las secciones transversales a una distancia de 40m de cada tramo en estudio.

IV.7.1.1.- Río Grande

Para el modelo del Río Grande se consideraron 183 secciones transversales dándoseles el valor del coeficiente de Manning de 0.023, ya que las márgenes y el lecho del río son iguales. Tiene una pendiente del 5% en el tramo en estudio y la velocidad de proyecto fue de 3 a 5 m/s. en este tramo se localizan siete puentes, los cuales se incluyeron dentro del modelo. El tramo analizado se extiende desde Cepamisa hasta el ingreso del río a Ciudad Industrial.

En seguida se mostrarán las Figuras IV.20, IV.21, IV.22, IV.23, IV.24 y IV.25 que corresponden a las secciones de algunos de los puentes del Río Grande utilizados en el software Hec-Ras, con un gasto de proyecto de 75 m³/s. Se muestran estas figuras con la finalidad de tener una idea clara de cual sería el comportamiento de cada uno de los puentes y con el caudal anteriormente indicado, en este caso es un gasto moderado, es decir ni alto ni bajo y que no crea conflictos en el escurrimiento del río.

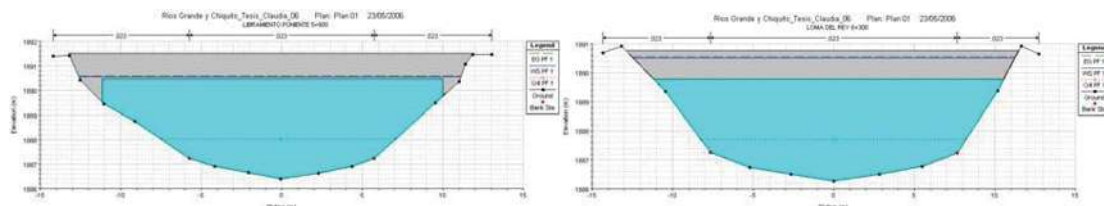


Figura IV.20.- Secciones transversales de los puentes del libramiento poniente y Loma del Rey, sobre el Río Grande.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

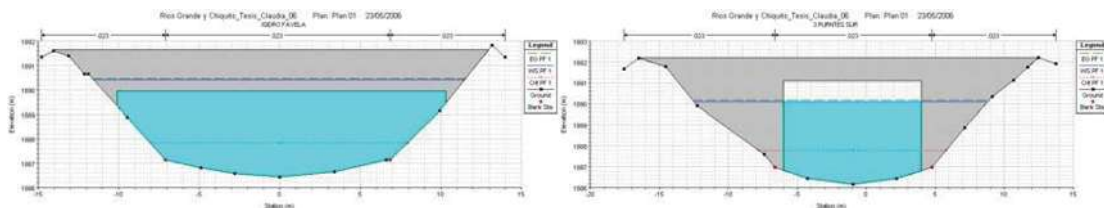


Figura IV.21.- Secciones transversales de los puentes de Isidro Favela y Tres puentes, sobre el Río Grande.

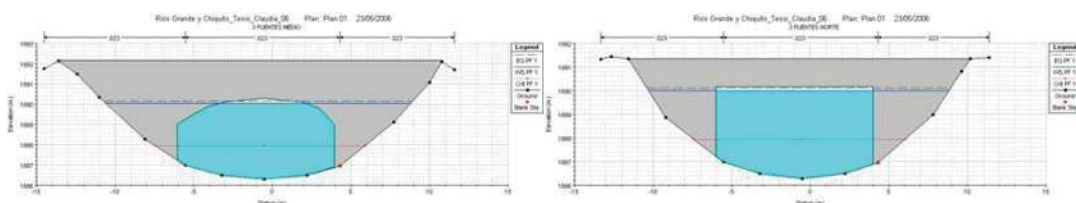


Figura IV.22.- Secciones transversales de los puentes de tres puentes, Río Grande con un gasto.

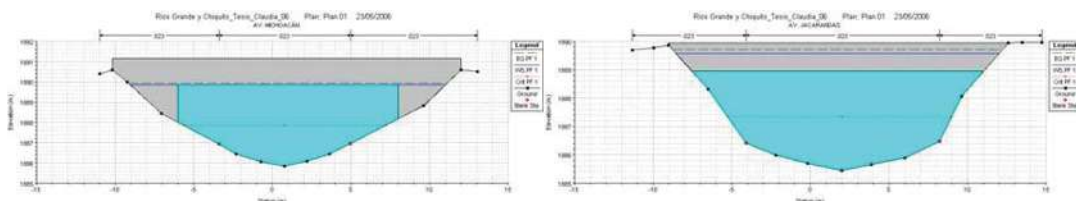


Figura IV.23.- Secciones transversales de los puentes de Avenida Michoacán y Jacarandas, Río Grande.

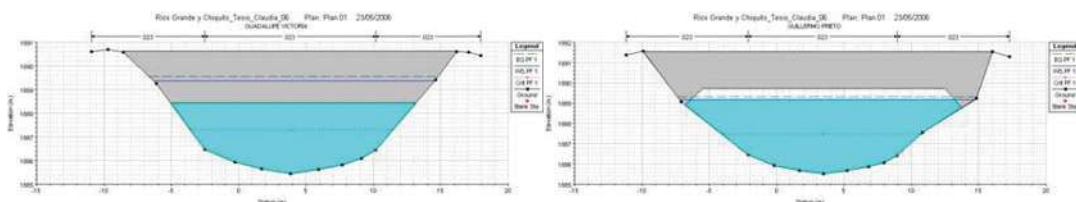


Figura IV.24.- Secciones transversales de los puentes Guadalupe Victoria y Guillermo Prieto, Río Grande.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

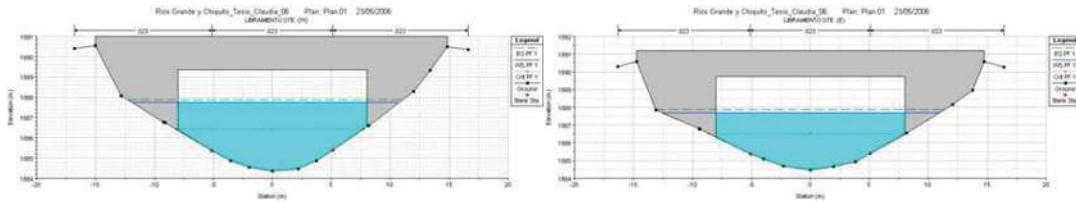


Figura IV.25.- Secciones transversales de los puentes del libramiento Oriente del Río Grande con un gasto.

La primera observación que se hizo con todo el tramo en estudio sobre el Río Grande, fue con un gasto de proyecto de 50m³/s, para verificar la capacidad que de los puentes, ya que por lo general el claro que tienen no es el suficiente para dejar pasar el flujo. En la Figura IV.26, se ve que para este caudal el río no tiene problemas para desalojar el flujo, a pesar de los desniveles que se tienen en algunas zonas.

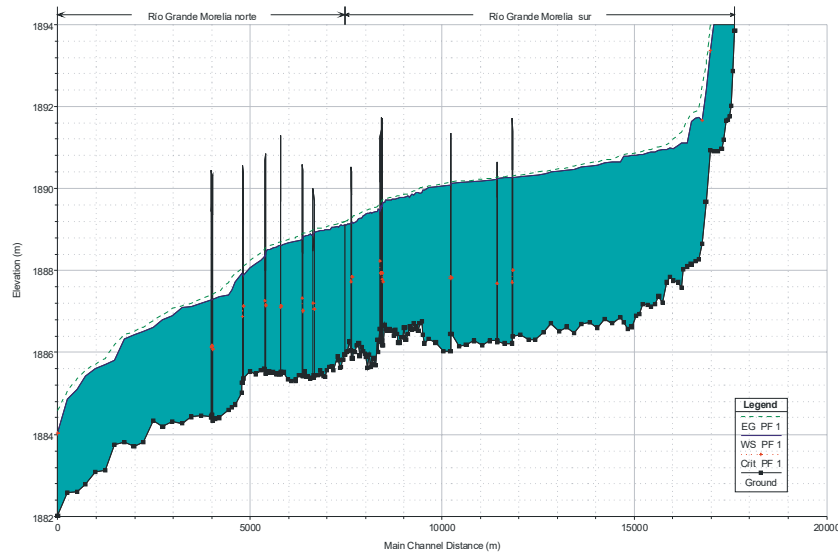


Figura IV.26.- Perfil longitudinal del Río Grande para un gasto de 50 m³/s, realizado con el software Hec-Ras.

En el perfil de la Figura IV.27, se observa que los dos primeros puentes que se localizan antes de ingresar a la ciudad (puente libramiento poniente y puente Loma del Rey), no tienen el claro suficiente para dejar pasar la escorrentía de 75 m³/s que lleva el río, en cambio el puente de Isidro Favela, esta en su límite. Un tramo que se ha visto afectado y que no tiene puentes pero se desborda el río, es toda la zona donde se encuentra el patio de maniobras del ferrocarril, es decir entre el puente Isidro Favela y Tres Puentes. También la zona que tiene problemas con los puentes



Resultados

es la de Prados Verdes, ya que dichos puentes (Jacarandas y Guadalupe Victoria), son muy bajos lo que provoca remanso en sus escurrimientos y en ocasiones el desbordamiento del río.

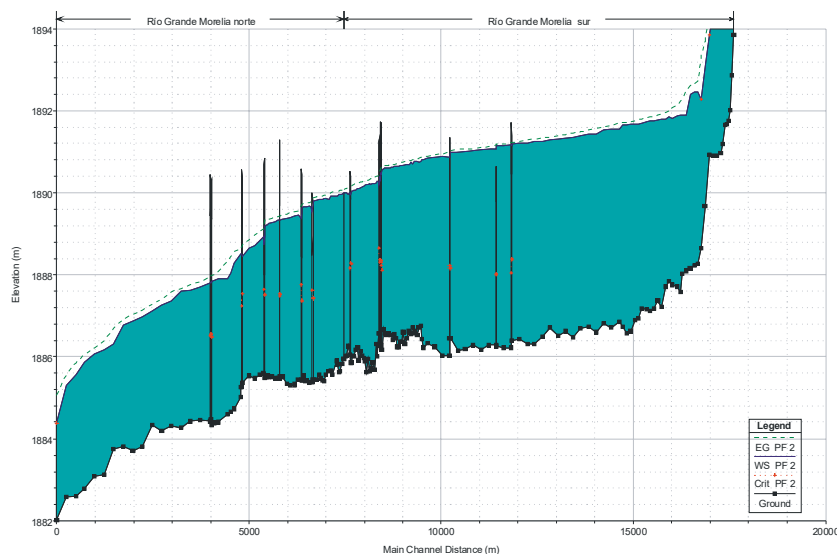


Figura IV.27.- Perfil longitudinal del Río Grande para un gasto de 75 m³/s, realizado con Hec-Ras.

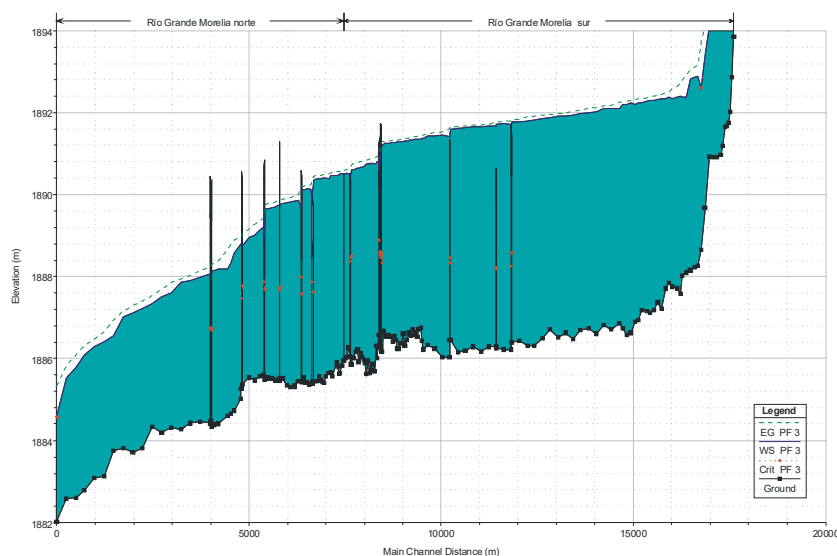


Figura IV.28.- Perfil longitudinal del Río Grande para un gasto de 90 m³/s, realizado con software en estudio.

La tercera corrida fue con un gasto de 90 m³/s, donde deja de manifiesto que la mayoría de los puentes no cumplen con el claro necesario para dejar escurrir el



agua, y esto pone en peligro las colonias que se localizan a ambos lados del río en su tramo urbano, ya que en algunas zonas las márgenes del río son muy bajas o al llegar a los puentes se disminuyen y es donde sale el agua (Fig. IV.28).

La unión del Río Chiquito con el Río Grande hace la diferencia para este análisis, ya que cuando el Chiquito viene a su máxima capacidad, al llegar a la confluencia con el Grande, la escorrentía del Chiquito tiene preferencia, lo que provoca que la escorrentía del Río Grande se vea frenada, provocando un remanso y haciendo que su nivel se eleve poco a poco lo que puede llegar a crear el desbordamiento en algunos puntos aguas arriba. En cambio, aguas abajo de la confluencia, el flujo escurre libremente sin tener ningún contratiempo, solo que algunos puentes se verán superados de acuerdo al gasto que lleve el río.

Otra situación desfavorable que se observó, es el caso de todos los escurrimientos que llegan de las faldas del Quinceo, los cuales tienen que ser bombeados o dirigidos a los nueve cárcamos de bombeo que construyó el OOAPAS, con la finalidad de disminuir las inundaciones en las colonias del norte de la ciudad. Además, se ha visto que otro de los grandes problemas que se tienen en esas colonias es que las márgenes del río se encuentran muy por arriba del nivel de calle (en algunos casos superan los dos metros), no permitiendo que el agua acumulada en la zona pueda entrar al río. Asimismo los drenajes y alcantarillas no pueden realizar su trabajo cuando los ríos van a su máxima capacidad, ya que se frena el flujo y en muchos casos se regresa saliendo por las calles. Esta problemática también se llega a observar con los cárcamos de bombeo.

Las colonias más afectadas cada periodo de lluvias son: Tres Puentes, Primo Tapia, Prados Verdes, Lomas de Santiaguito, Carlos Salazar, Granjas del Maestro, Ejidal Tres Puentes, etc. Según Arreygue et al., (2004) algunas de estas colonias tienen un desnivel de más de cuatro metros con respecto a sus márgenes.

Una de las observaciones que se pueden realizar a los caudales registrados en el Río Grande, es que toda la escorrentía de monte no llega directamente a la ciudad, el caudal es retenido en la Presa Cointzio, por lo que el caudal que llega a la ciudad es aquel que CNA permite que escurra, ya sea para la agricultura o para otros efectos. Sabemos que en el periodo de lluvias el flujo principalmente es controlado de acuerdo a lo que llueve, ya que si está a punto de su totalidad, entonces abren mucho más las compuertas dejando un flujo más elevado, lo que puede provocar un desbordamiento, ya que si se llega a juntar con aquel flujo que escurre de la ciudad o del Río Chiquito, este se eleva poniendo en peligro a la ciudadanía.

Modelo del Río en 3D

Para poder darnos una idea mucho más clara del funcionamiento del Río Grande se realizó una imagen que se muestra en la Figura IV.29, donde el programa permitir observar un perfil en 3D de las secciones transversales, así como de los puentes,



Resultados

además del nivel del flujo, que para este caso se consideró de un gasto de $75 \text{ m}^3/\text{s}$. este tramo del río se refiere a los puentes localizados en Tres Puentes, indicando que dichos puentes no tienen problema para dejar escurrir el caudal anteriormente señalado. En cambio aguas arriba de estos, si existe el desbordamiento, principalmente de la margen izquierda. Pasando los puentes también se tienen márgenes bajas del lado izquierdo.

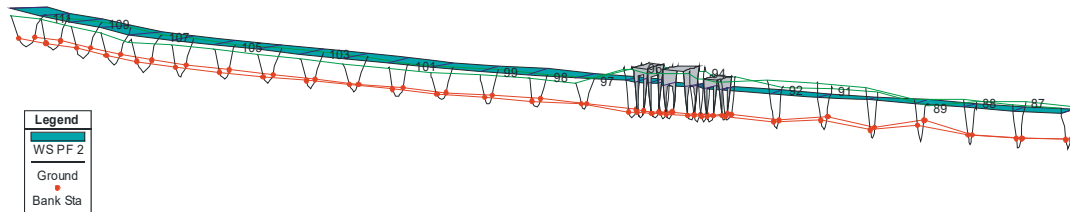


Figura IV.29.-Perfil en 3D del Río Grande con un caudal de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ de la parte sur

Este otro tramo corresponde a los puentes Jacarandas y Guadalupe Victoria, donde la Figura IV.30, indica que el flujo de $75 \text{ m}^3/\text{s}$, choca con las estructuras de los puentes, creando remanso aguas arriba del puente. Del lado izquierdo, las márgenes son más bajas, lo que ocasiona en caso de crecida un posible desbordamiento, es decir hacia la zona de Prados Verdes. Pasando estos puentes, el flujo vuelve a su normalidad, ya que los siguientes puentes tienen un claro grande y no crean conflictos a la escorrentía.

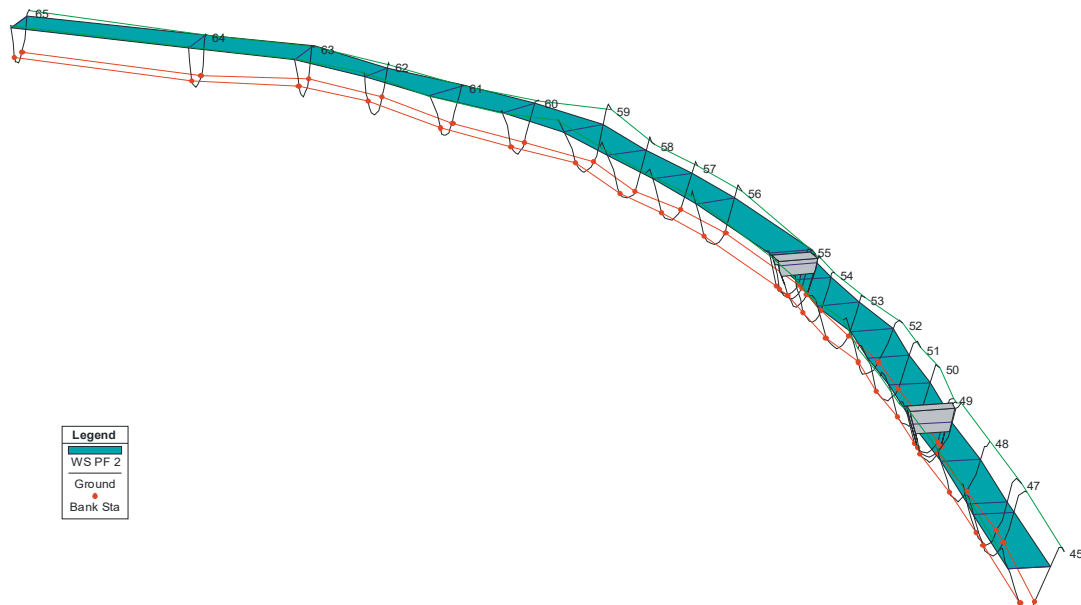


Figura IV.30.- Perfil en 3D del río Grande con caudal de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ de la parte Norte.



Resultados

Para un gasto de $90 \text{ m}^3/\text{s}$, también se realizó la Figura IV.31, donde se observa la zona donde se localiza Tres Puentes, indicándonos que en realidad toda el área tiene problemas, ya sea por desbordamiento que por remansos de los puentes, además se observa que las márgenes en algunos casos quedan por debajo del nivel del agua. Más adelante se ve el puente Michoacán, el cual también es superado por la escorrentía, así como las márgenes del lado izquierdo.

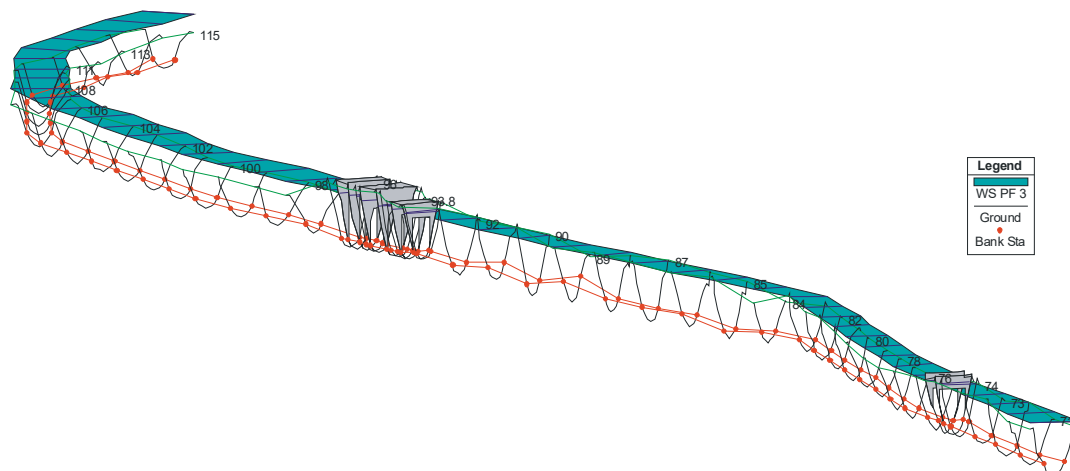


Figura IV.31.- Perfil en 3D del río Grande con caudal de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ de la parte sur.

La Figura IV.31 muestra el tramo del Río Grande donde se localizan los puentes. El caudal utilizado para conocer las estructuras de los puentes es de $90 \text{ m}^3/\text{s}$, indicando que en todos los casos el agua choca en las estructuras de los puentes creando remansos, afortunadamente las secciones son amplias y las márgenes están altas lo que evita que se tenga un desbordamiento en este sitio. Pero no sucede lo mismo entre las secciones 40 y la 34, ya que en este sitio las márgenes son más bajas y ahí si se tiene un posible desbordamiento.

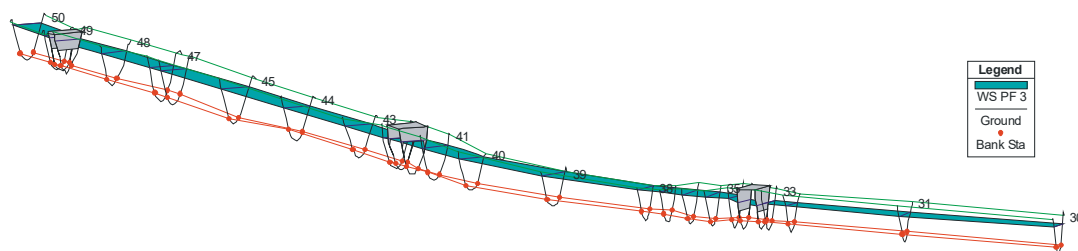


Figura IV.31.- Perfil en 3D del río Grande con caudal de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ de la parte Norte.



IV.7.1.2.- Río Chiquito

La información que se anexo al software Hec-Ras del Río Chiquito es la siguiente: para el coeficiente de Manning, se tomaron dos valores, para el fondo de 0.033 (por la rugosidad del cauce) y para las márgenes de 0.045 (por la vegetación que tienen las márgenes). Existe un tramo en el Campestre donde el cauce del río está recubierto con piedra acomodada con mortero (márgenes y lecho), por lo que se le dio un coeficiente de Manning de 0.017 (con longitud de 300m). La pendiente del río en la zona urbana es de 4%, con una velocidad de proyecto de 3.5 a 8.9 m/s. Para el modelo se incluyeron 159 secciones transversales y 19 puentes que se observan en la Figura IV.32.

Cabe mencionar que del total de puentes, seis fueron construidos recientemente (2002), y desafortunadamente no respetaron su claro de proyecto, es decir quedaron bajos provocando el desbordamiento del flujo de agua cuando se tiene una avenida máxima. La longitud de estos puentes es muy variada, ya que se tiene puentes con más de 40m (Camelinas) y otros de 10m (por ejemplo, Morelos Sur). Otro inconveniente que tienen algunos de estos puentes (6), son las pilas que tienen, las cuales en una avenida solo sirven para obstruir el flujo, ya que es donde se retiene todo tipo de material que es transportado por la avenida.

Puente	Sección	Área	Puente	Sección	Área
Campestre		28.00 m ²	Morelos Sur		53.30 m ²
Camelinas		9.54 m ²	García Obeso		43.60 m ²
Antonio del Moral		38.00 m ²	Juarez		28.90 m ²
Sansón Flores		38.00 m ²	Cuautla		31.32 m ²
Jose Renteria		28.00 m ²	Chiapas		31.85 m ²
Ventura Puente		71.10 m ²	Oaxaca		38.00 m ²
Isidro Huarte		38.00 m ²	Manuel Muñiz		28.00 m ²
Peatonal Gigante		26.50 m ²	Madero		39.25 m ²
Vicente Sta. Maria		30.00 m ²	Michoacan		25.10 m ²
V. de Mendoza		36.60 m ²	Ferrocarril		22.10 m ²

Figura IV.32.- Puentes que se localizan en el cauce del Río Chiquito y que se utilizaron para el modelo.



Resultados

En las Figuras IV.33, IV.34, IV.35, IV.36 y IV.37 se ilustran algunos de los puentes que se localizan sobre el cauce del Río Chiquito, mostrando hasta donde llega el nivel de agua para un gasto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$. en algunos casos el agua pasa por arriba del puente, en otros casos se crean remansos porque el claro es muy chico, o porque el flujo choca en la estructura del puente.

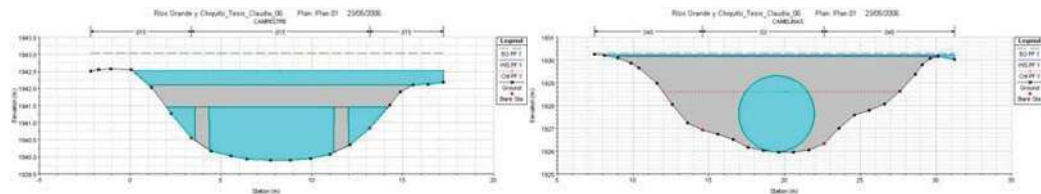


Figura IV.33.- Secciones transversales de los puentes del Campestre y Camelinas para un gasto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ del Río Chiquito.

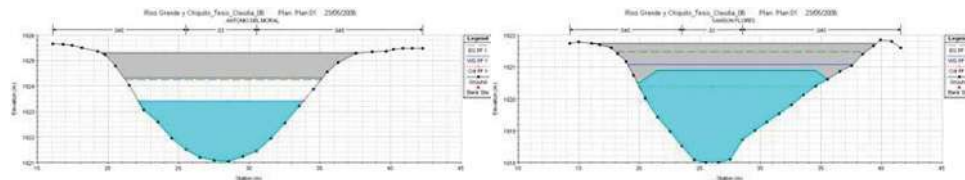


Figura IV.34.- Secciones transversales de los puentes Antonio del Moral y Sansón Flores, con un gasto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

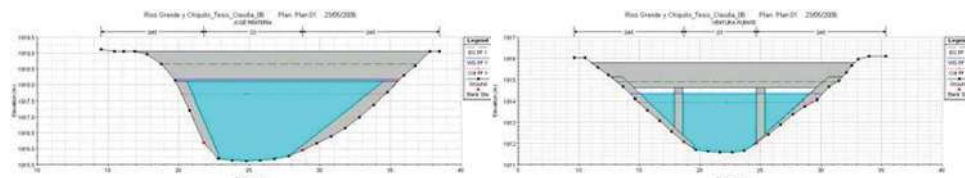


Figura IV.35.- Secciones transversales de los puentes José Rentarí y Ventura Puente, con un caudal de proyecto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

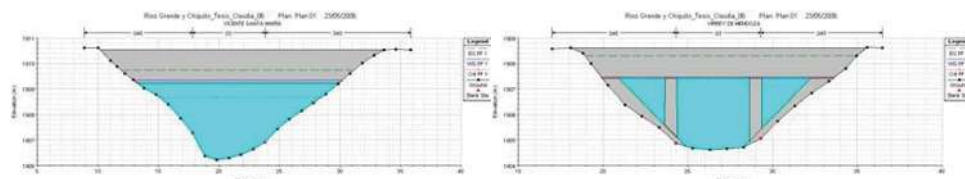


Figura IV.36.- Secciones transversales de los puentes Vicente Santa María y Virrey de Mendoza, con un gasto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

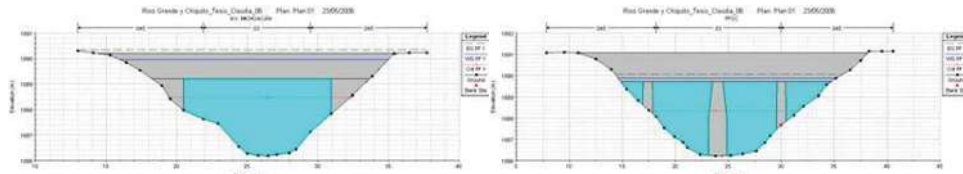


Figura 37.- Secciones transversales de los puentes Avenida Michoacán y Ferrocarril, con un caudal de proyecto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Las secciones de los puentes se consideraron como están construidos, algunos con pilas, otros solo con sus traveses, etc. Lo anterior para tener una mejor referencia del comportamiento de cada uno de ellos y de esta forma poder dar posibles soluciones o recomendaciones en caso necesario.

Para la primera corrida que se realizó fue con un gasto propuesto de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, dando como resultado que existen algunos puentes que no cumplen con el claro necesario, para dejar escurrir el flujo, provocando que se forme un remanso, como es el caso del Puente Camelinas, Virrey de Mendoza, entre otros (Fig. IV.38).

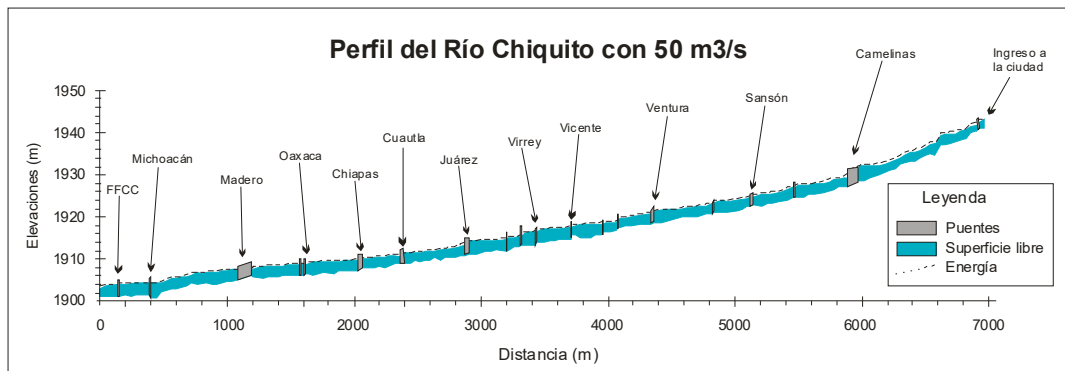


Figura IV.38.- Perfil longitudinal del Río Chiquito para un gasto de $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

El segundo análisis que se realizó fue con un gasto de $70 \text{ m}^3/\text{s}$, observándose que la mayoría de los puentes entran en conflicto, porque su capacidad es menor a lo proyectado. En la zona del Campestre se ven afectados con el desbordamiento del río, esto provocado por los puentes del Campestre y Camelinas, que son los puentes que se localizan al ingreso del río a la ciudad y que son mucho más chicos para soportar dicha escorrentía, como se observa en la Figura IV.39. Además aguas abajo se tienen márgenes bajas que es por donde sale el flujo o los remansos provocados por algunos puentes. Por ejemplo en el puente Virrey de Mendoza, el agua pasa por arriba del puente.

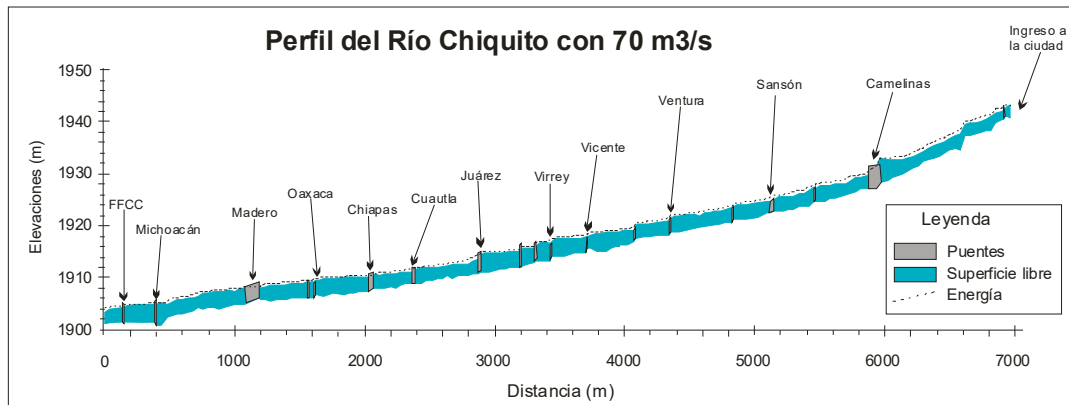


Figura IV.39.- Perfil longitudinal del Río Chiquito para un gasto de 70 m³/s.

El tercer modelo fue con un gasto de 80 m³/s, observándose en la Figura IV.40 que el flujo escurre sin problemas, pero sin ninguna estructura sobre el río, es decir que con la gran cantidad de puentes, algunos chicos y otros grandes en sus claros, el río se desborda, ya sea por los remansos que se forman o porque en muchos sitios sus márgenes son bajas. Se tienen cambios en la capacidad del río, así como en los niveles de las márgenes, esto por el constante dragado que se realiza al mismo y que en ocasiones el material retirado del lecho es depositado en las mismas márgenes dándole una mayor altura, pero esto no es proporcional en todo su tramo, es por lo que se observan diferentes alturas.

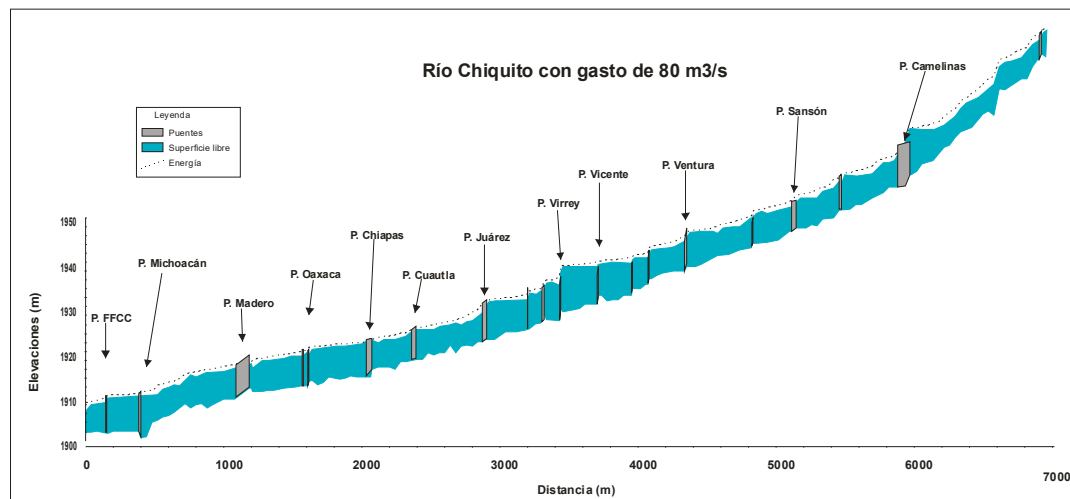


Figura IV.40.- Perfil longitudinal del Río Chiquito para un gasto de 80 m³/s.

Uno de los principales problemas que se han visto sobre el Río Chiquito, es el aspecto de la inestabilidad de sus márgenes, ya que el pavimento de la avenida



Solidaridad, está completamente fracturado y hundido en muchos sitios. Esto ha provocado que dichos asentamientos estén ocasionando que el cauce del río disminuya su capacidad y que las márgenes se bajen. Por estos sitios es donde se desborda más fácil el río, como ejemplo clarísimo se tiene el área donde se localiza Gigante del Río, la margen izquierda fue erosionada por algunas avenidas dejando al descubierto la guarnición y el pavimento de la calle, lo que provocó el hundimiento de ese tramo. Ahora ya arreglaron poniéndole un muro de contención, pero cuanto aguantará o cuando llegará otra avenida y se lo llevará.

Modelo del Río en 3D

La ventaja que tiene el poder observar y analizar una imagen como la Figura IV.41, es darse una idea de la situación que prevalece en el río, ya que se puede jugar con los caudales necesarios y de esta manera poder conocer la capacidad del mismo, además de saber cuales son las zonas más bajas y que tipo de problemas se presentarían, así mismo de cómo sería el comportamiento de los puentes. Esto último ya se pudo observar con las figuras de las secciones de los puentes, pero no es lo mismo poder verlos en 3D y hacer una comparación.

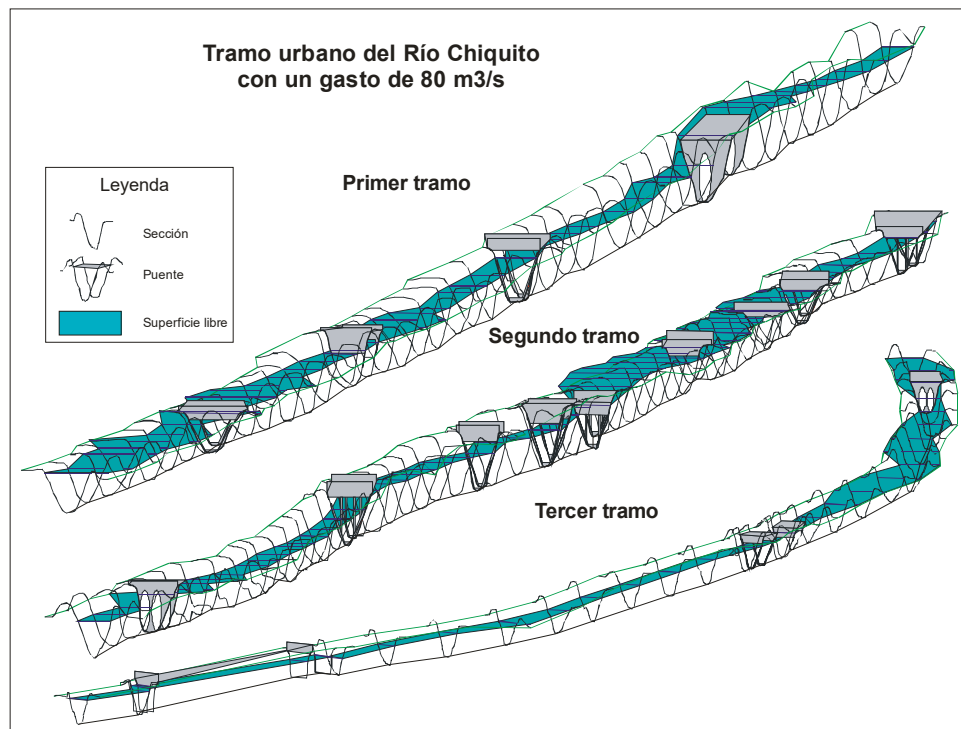


Figura IV.41.- Perfil en 3D del río Chiquito con caudal de 80 m³/s.



La Figura IV.41, indica principalmente la problemática del Río Chiquito en algunos sitios y en algunos puentes, ya que este gasto de 80 m³/s, es elevado para la capacidad de mismo río. Este caudal se considera óptimo solamente para la escorrentía sin ninguna obra civil sobre el cauce del río, ya que el problema que tiene el río son los puentes que se construyeron en éste.

IV.8.- ANÁLISIS DE LAS FRECUENCIAS

Los sistemas hidrológicos son afectados algunas veces por eventos extremos, tales como tormentas severas, crecientes y sequías. La magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con mayor frecuencia que eventos más moderados. El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad.

El periodo de retorno de un evento es el valor esperado de su valor promedio medido sobre un número de ocurrencias suficiente grande. Por consiguiente, el periodo de retorno de un evento con una magnitud dada puede definirse como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada. Otra definición puede darse como, el periodo de retorno de un evento con una magnitud dada puede definirse como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada, como ya se explicó en el párrafo II.3.

Los valores extremos son valores máximos o mínimos de gastos seleccionados de conjuntos de datos. Fisher y Tippett (1928), han demostrado que las distribuciones de valor extremo, llamadas tipo I, II y III respectivamente, cuando el número de valores extremos seleccionados es grande. Las propiedades de las tres formas limitantes fueron desarrolladas en mayor detalle por Gumbel (1941) para la distribución de Valores Extremos tipo I (EVI), por Frechet (1972) para la distribución de Valor Extremo tipo II (EVII) y por Weibull (1939) para la distribución de Valor Extremo tipo III (EVIII). Jenkinson (1955) demostró que estas tres formas limitantes eran casos especiales de una distribución única llamada la distribución de Valor Extremo General (GEV).

Las distribuciones de valor extremo han sido ampliamente utilizadas en hidrología. Las tormentas de lluvia son comúnmente modeladas utilizando la distribución de Valor Extremo Tipo I (Chow, 1953; Tomlinson, 1980; in Chow, 2000), y los flujos de estiraje mediante la distribución de Weinbull, es decir la distribución EVIII aplicada (Gumbel, 1954 y 1963).



IV.8.1.- Precipitaciones

Para realizar el presente análisis se seleccionaron tres métodos, el primero es la Distribución de Valores Extremos, el segundo es el Factor de Frecuencias y el tercero es el de Gumbel. Los registros que se estudiaron son de la estación Meteorológica de Morelia para el periodo de información de 1976 a 2005.

El primer método que se aplicó al presente estudio es la Distribución de Valores Extremos Tipo I. La información que se analizó son las lluvias máximas horarias y posteriormente se trabajó con las lluvias máximas en veinticuatro horas.

Los resultados del análisis se presentan en la Figura IV.42, donde se observan las dos curvas, una corresponde a las lluvias de una hora y la otra a las lluvias de 24 horas. En la Tabla IV.8 se presentan los valores obtenidos del cálculo, donde se puede decir que este tipo de registros de lluvias ya se habían presentado en la Ciudad de Morelia.

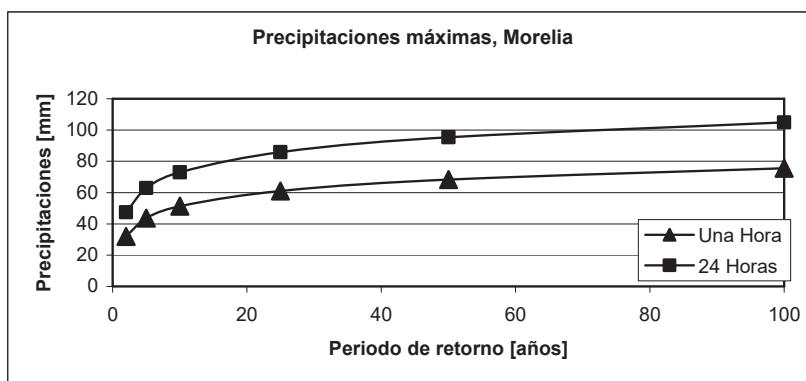


Figura IV.42.- Periodo de retorno para lluvias de una y veinticuatro horas de la estación Morelia.

Explicaremos las lluvias de una hora confrontando con el periodo de retorno, por ejemplo el valor obtenido para el periodo de 100 años de 75.5 mm, ya se había presentado una lluvia muy aproximada a este numero en julio de 2005 con una lámina registrada de 70.0 mm, y de esta forma se puede observar que para todos los periodos de retorno descritos en la Tabla IV.9, ya se han tenido eventos significativos.

Años	Una Hora	Otros eventos
2	31.90	32.0 Jul/1988
5	43.58	43.5 Jun/1994
10	51.30	55.6 Jun/1997
25	61.07	No hay



Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán.



Resultados

50	68.31	68.0 Oct/2003
100	75.50	70.0 Jul/2005

Tabla IV.9.- Valores de los periodos de retorno para lluvias de una hora de la estación meteorológica Morelia.

La Figura IV.43, ilustra las lluvias máximas en una hora y 24 horas que se registraron en el pasado, llama la atención en el aspecto de que las lluvias de una hora, la mayoría se han presentado en el mes de junio (12), julio (8) y agosto (5); el resto de los meses ya no figuran tanto. Para las lluvias en 24 horas, también se tienen registros de una lluvia intensa en enero, pero nuevamente el mes de junio es el que tiene más eventos (10) y el segundo es septiembre (6). Lo anterior se deduce que la gran mayoría de este tipo de eventos por lo general se presenta en el mes de junio, pero esto no quiere decir que, en el resto del año no se presenten lluvias excepcionales.

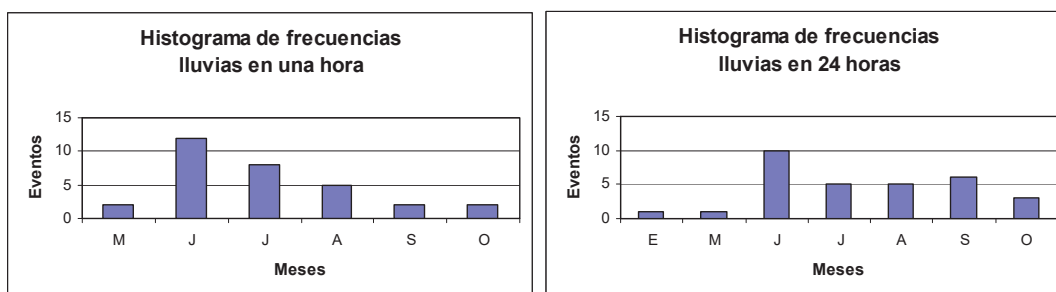


Figura IV.43.- Histograma de frecuencia de las lluvias máximas y de los eventos registrados en la Estación de Morelia.

El segundo método aplicado fue el del Factor de Frecuencias utilizándose los registros (precipitaciones diarias), de la estación Meteorológica de Morelia, en este caso nos permite conocer el periodo de retorno a corto, mediano y largo plazo, como se observa en la Tabla IV.10, donde también llama la atención que estas intensidades de lluvia ya se han presentado en el pasado.

Para las lluvias de veinticuatro horas se observa que para cinco años se tiene una lámina de 62.80mm y que para septiembre de 1988 se tiene un registro de 65.9mm. Para 10 años es de 73mm y en julio de 2006 se registró una lluvia de 73.2mm en una hora, pero quiero hacer resaltar que para el periodo de retorno de 25 años con una lámina calculada de 85.88 mm, se tienen tres registros, es decir en el pasado ya ha llovido algo parecido. Por ejemplo en octubre de 1976 se registro una lluvia en 24 horas de 88.70mm, en septiembre de 1982 fue de 88.40 mm y en julio de 2005 de 83.55. Cabe resaltar que la relación del periodo de retorno a 25 años, no cumple con la realidad (ya que la diferencia de años entre 1976 y 1982,



solamente es de seis años, en cambio la diferencia de años de 1982 y 2005 es de 23 años), atribuyéndolo al cambio climático (ENSO). Además, se observa que para las lluvias de los periodos de retorno de 50 y 100 años, no ha habido registros en el pasado. Esto se deduce porque los registros que tenemos no llegan a este tiempo.

Años	24 Horas	Otros eventos
2	47.40	47.9 Oct/2004
5	62.80	65.9 Sept/1988
10	73.00	73.2 Jul/2006
25	85.88	83.6 Jul/2005
50	95.44	No hay
100	104.93	No hay

Tabla IV.10.- Periodo de retorno para lluvias registradas en Morelia.

El tercer método que se utilizó es el de Gumbel, aplicado a precipitaciones, para la estación meteorológica que se localiza en la 21ª Zona Militar de la ciudad. La información utilizada de precipitaciones diarias fue a partir de 1980, donde se observa que las lluvias de un día se encuentran en el rango de 20mm a 47mm y este último valor tiene una recurrencia de 10 años. En cambio la lluvia de cinco días esta entre 58mm y 100mm con periodo de retorno de 11 años, como se aprecia en la Figura IV.44. Los días intermedios tienen periodo de recurrencia entre uno y diez años y láminas de lluvia entre 30 y 100mm.

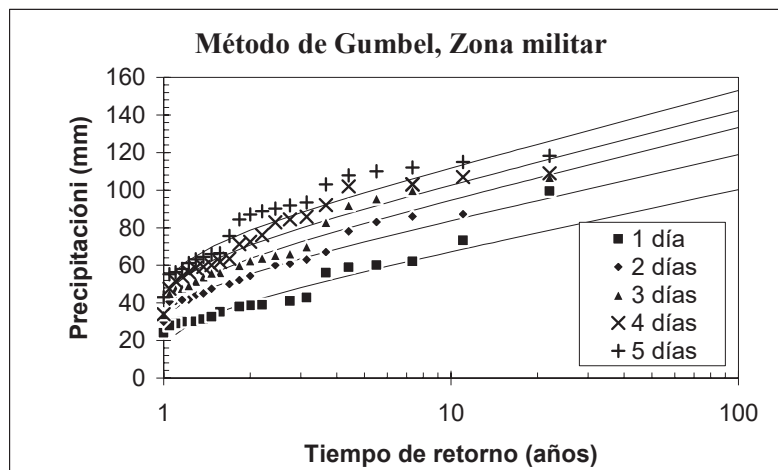


Figura IV.44.- Periodo de retorno de Gumbel, aplicado las lluvias intensas de la Estación de la 21ª Zona Militar.

La finalidad de utilizar varios métodos que fuesen aplicados a las precipitaciones, es para tener una mayor seguridad de los resultados y poderlos comparar para ver si



existiera diferencia, pero al parecer los resultados obtenidos son muy semejantes entre si.

Del análisis de estos métodos aplicados a las precipitaciones horarias que diarias, se puede deducir que existe una gran aproximación en sus resultados. La frecuencia con que estos eventos se presentan nos permite conocer los periodos de recurrencia de las lluvias intensas y poder alertar a las autoridades municipales y estatales, así como a los habitantes que están asentados en zonas potencialmente en peligro de inundaciones.

IV.8.2.- Caudales

IV.8.2.1.- Río Grande

Para el presente estudio se decidió considerar cuatro métodos, los cuales fueron los siguientes: a).- Valores Extremos de Gumbel (Río Grande y Chiquito), b).- Weibull (Río Grande y Chiquito), c).- Distribución Log-Normal (Río Grande) y d).- Distribución Log-Pearson Tipo III (Río Grande). Dichos métodos fueron aplicados a los gastos máximos registrados en la estación hidrométrica de Atapaneo en el cauce del Río Grande y los registros del Río Chiquito.

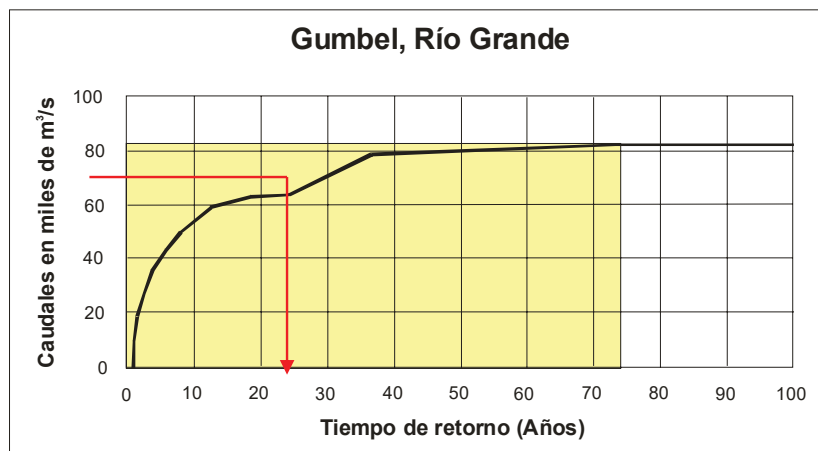


Figura IV.45.- Distribución de Gumbel, aplicado a los gastos históricos del Río Grande.

El primer Método que se aplica es el de Valores Extremos de Gumbel, para los gastos máximos históricos del Río Grande con registro de 1928 hasta 2000. Se realizó un análisis para conocer los posibles periodos de retorno para los caudales, dando como resultado la Figura IV.45. De acuerdo al cálculo realizado por el método de Gumbel, se tendría una avenida de 83m³/s, con una periodicidad de 75 años. Ahora de acuerdo al modelo realizado con el software Hec-Ras, donde indica que para un gasto de 70 m³/s, se presenta cada 30 años. Este último flujo es aquel que



no compromete la escurrentía del río, por lo que se considera el más apropiado y al que se hace referencia (Fig. IV.45), ya que superando este gasto, el río entraría en complicaciones.

Se aplicó como segunda alternativa el Método de Weibull, considerando la misma información de los gastos máximos históricos, dando como resultado de la evaluación, que el gasto máximo registrado en la estación de Atapaneo y que tiene una recurrencia de 75 años con un caudal de 82m³/s y para un gasto de 70 m³/s el tiempo de retorno es de 30 años (Fig. IV.46). Estos resultados son muy similares a los obtenidos por la Distribución de Valores Extremos de Gumbel, lo que indica la confiabilidad de los dos métodos aplicados.

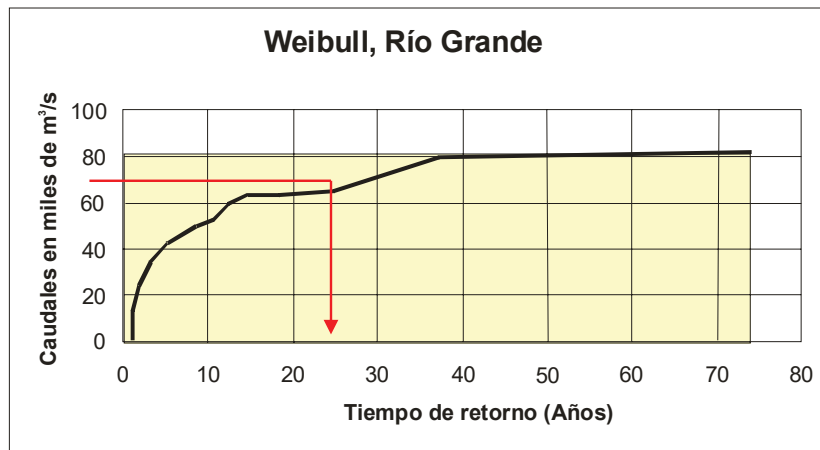


Figura IV.46.- Periodo de retorno para los gastos máximos históricos del Río Grande por medio del Método de Weibull.

Con el propósito de poder tener una idea más amplia sobre los periodos de retorno de los gastos máximos históricos del Río Grande, se decidió realizar dos aplicaciones más, por lo que se optó utilizar la Distribución Log-Normal y Log-Pearson. Para el primero sus resultados se describe en la Tabla IV.11. Se tiene un caudal propuesto por el método para cinco años de 67,946 m³/s, donde cabe indicar que este gasto solo ha sido muy cercano en octubre de 1955 fue de 64, 531 m³/s, pero se tiene otro superior de 79,255 m³/s en agosto de 1931. Ahora, los caudales estimados para los siguientes periodos son muy elevados, por ejemplo para 50 años es de 220,112 y para 100 años de 286,674 m³/s, la verdad son muy altos que en este caso no es ni la suma de todos los escurrimientos de un año.

Periodo de retorno	Log-normal (m ³ /s)
5	67,946.98
25	164,080.20



Resultados

50	220,112.67
100	286,674.54

Tabla IV.11. Periodo de retorno por Log-Normal de los caudales máximos del Río Grande, registrados por CNA en la estación de Atapaneo.

En la Tabla IV.12, se muestran los resultados obtenidos por la Distribución Log-Pearson Tipo III calculados para los caudales máximos históricos del Río Grande, donde se aprecian los caudales calculados para los cada periodo de ocurrencia. Como en el método anterior, se tiene que el gasto estimado para cinco años es el más próximo a los caudales que se han presentado en el pasado en el Río Grande. Los caudales estimados para los otros periodos, considero que son elevados y que posiblemente el Río Grande no tenga la capacidad para soportar tal flujo, además que sería un gran caos en las colonias cercanas al río.

Periodo de retorno	Log-Pearson (m ³ /s)
5	66,512.62
25	183,305.33
50	262,843.43
100	367,080.54

Tabla IV.12.- Periodo de retorno para Log-Pearson de los caudales máximos del Río Grande, registrados por CNA en la estación de Atapaneo.

Después de haber realizado estos cálculos sobre los diferentes métodos aplicados a los periodos de retorno para caudales, se puede decir que el valor estimado para los cinco años es el que ya se ha presentado (una sola ocasión y otro superior), pero los siguientes son tan elevados que no se sabe si lleguen a presentarse en el futuro.

IV.8.2.2. - Río Chiquito

De acuerdo a los gastos máximos históricos del Río Chiquito que se registraban en la estación que se localizaba cerca de la avenida Juárez, la cual se quito para realizar la avenida Solidaridad y nunca más se volvió a instalar.

De acuerdo a los gastos de proyecto que se tuvo del software, indica que el gasto de 50 m³/s, que sería el optimo para no tener desbordamientos ni remansos en ninguno de los puentes, y de acuerdo a la Figura IV.47, de la Distribución de los Valores de los caudales máximos del Río Chiquito, se observa que el tiempo de recurrencia sería de 5 años aproximadamente. Ahora si se presenta una avenida de 70 m³/s, el periodo sería de aproximadamente 10 años.



Resultados

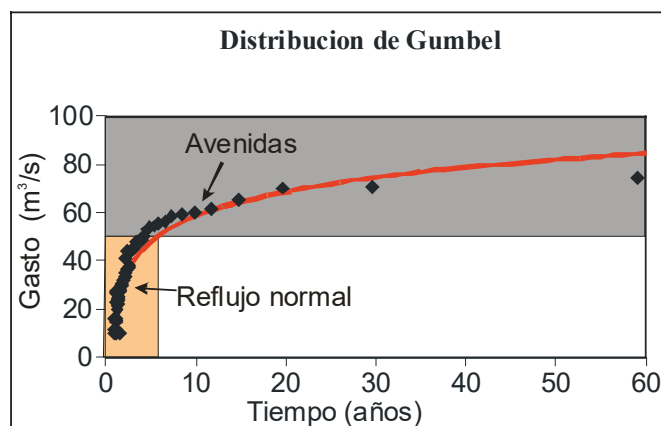


Figura IV.47.- Distribución de Gumbel, aplicado a los gastos históricos del Río Chiquito.

Para poder tener una comparación con el método anterior, se decidió realizar otro cálculo, el cual fue utilizar el método de Weinbull, también aplicado a los valores máximos de los escurrimientos del Río Chiquito. En la Figura IV.48, se aprecia que considerando el mismo gasto de $50 m^3/s$, el tiempo de recurrencia sería menor a los 10 años, y de $60 m^3/s$, sería aproximadamente de 12 años, y todo lo que sea arriba de este caudal se considera mayor a este periodo de tiempo.

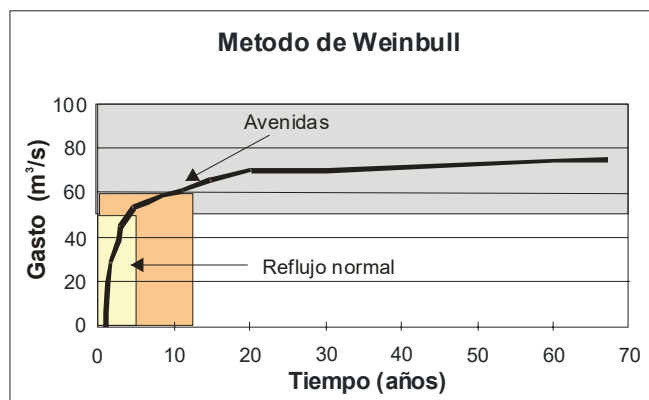


Figura IV.48.- Periodo de retorno para los gastos máximos históricos del Río Chiquito por medio del Método de Weinbull.

También se consideró realizar el cálculo de los periodos de retorno para los gastos máximos históricos del Río Chiquito por el método de Distribución Log-normal, dando como resultado los valores de la Tabla IV.13. Según el análisis indica que cada cinco años se tendrá un caudal de $46.42 m^3/s$, y que cada 50 años será de $69.63 m^3/s$, Para terminar con la recurrencia de 100 años que corresponde a 76.27 ,



Resultados

recordando que la avenida histórica corresponde a 74.62 m³/s, ocurrido el día 8 de septiembre de 1969. De acuerdo a esta estadística el siguiente evento que supere este gasto sería hasta el 20069.

Periodo de retorno	Log-Normal (m ³ /s)
5	46.42
25	62.92
50	69.63
100	76.27

Tabla IV.13. Periodo de retorno por Log-Normal de los caudales máximos históricos del Río Chiquito, registrados en la estación que se localizaba sobre avenida Solidaridad.

La aplicación de los tres métodos para calcular la recurrencia de los caudales máximos del Río Chiquito, nos dio una idea clara que si son aceptables cuando se tiene información real o confiable, ya que en el caso de los tres métodos corresponden las recurrencias. Esta información fue apoyada con la aplicación del modelo realizado con Hec-Ras, ya que primeramente se hizo el modelo y se conoció la capacidad del río, luego se estimó la capacidad máxima sin obras estructurales, para posteriormente verificar la información con los periodos de retorno.

De acuerdo a la información obtenida de los métodos, se dice que efectivamente un gasto de 50 m³/s, se presenta cada cinco años, el de 62.90 m³/s se presentará cada 25 años, lo cual ya ha sucedido en varias ocasiones, que es cuando se desborda el río. Este evento sucedió precisamente el día 3 de septiembre de 2005, donde prácticamente toda la ciudad se inundó. En esa ocasión todas las colonias cercanas al río Chiquito se vieron inundadas, que al día siguiente quedo sobre el pavimento una capa de aproximadamente 20 cm de lodo, claro esta en algunos sitios de mayor.



V.- CONCLUSIONES

La prevención y mitigación de los desastres no es, un desafío fácil de enfrentar, esto requiere de una estrategia integral que debe incluir la participación del Estado, de las autoridades municipales, de las Organizaciones de la sociedad civil, de la comunidad, etc. Estas, desde un conocimiento de su realidad y del entorno económico, social y político que la determina, deberán establecer un proceso de organización que incorpore decididamente la prevención y mitigación de riesgos ambientales como parte de su propia estrategia y acción. Sólo de esta forma las comunidades sujetas a dichos riesgos crearán y se apropiarán de los mecanismos adecuados para contribuir de manera significativa a dar respuesta a las situaciones del peligro de inundaciones que se presenten.

La interacción hombre - naturaleza ha propiciado cambios en el progreso y calidad de vida del ser humano pero en ocasiones, el ser humano no ha respetado la función natural de los cauces de los ríos. Es evidente por la forma tanto longitudinal como transversal que los ríos se han rectificado para el desarrollo urbano. Esto ha ocasionado que los cauces tengan limitaciones de flujo y al haber un incremento en la escorrentía estos mismos tengan problemas como elevaciones puntuales y así ocasionar fallas hidráulicas en sus afluentes al río y en el peor de los casos el desbordamiento de los mismos por la poca capacidad hidráulica.

Las inundaciones son amenazas que ocurren naturalmente y se convierten en desastres cuando hay asentamientos humanos en zonas aluviales, además las amenazas de inundaciones están aumentando porque la gente se esta mudando a zonas aluviales, ya que los ingenieros no pueden diseñar mejores obras de mitigación y prevención contra inundaciones.

Desde décadas pasadas la ciudadanía de Morelia ha sido testigo de los continuos desbordamientos que han tenido los ríos que atraviesan la ciudad, debido a las lluvias intensas y/o extraordinarias. En esta última década nos hemos dado cuenta de que año con año se presentan inundaciones provocadas en algunos casos por los desbordamientos de los ríos. En algunos casos es debido a:

- Mal funcionamiento del desarrollo urbano.
- Mal funcionamiento hidráulico.
- Falta de obras civiles para planeación de avenidas máximas.
- Cambio del uso de suelo.



Las inundaciones que ocurren periódicamente en la Ciudad de Morelia, se pueden considerar como inundaciones repentinas, porque son inundaciones que ocurren dentro de las primeras seis horas de lluvia intensa, y comúnmente están asociadas a ciclones tropicales, o el paso de frentes de clima frío. Esto se puede atribuir también a la falta de presas o el desalojo repentino de bloqueo en el río Chiquito principalmente.

Al conocer el comportamiento hidrodinámico de los cauces de los ríos en estudio se pueden dar soluciones, tanto aguas arriba como aguas abajo principalmente en los puntos de conflicto ya detectados y en aquellos que probablemente no se han detectado, por la realización de nuevas obras civiles.

En seguida se enlistan las principales conclusiones del presente trabajo:

- La cuenca estudiada tiene un área de 1,200 km² dividiéndose en cuatro subcuencas, la del Río Chiquito, la de Cointzio, la de los Itzicuaros y la zona urbana de la ciudad. Esta subdivisión se consideró para conocer el aporte de sedimentos que se depositan en la zona urbana. Donde las subcuencas del río Chiquito y Cointzio, se encuentran en una zona montañosa y boscosa, en cambio la subcuenca de los Itzicuaros es una zona de matorrales. Por último la zona urbana, la cual está constituida principalmente por asfalto y concreto.
- Los cauces de los Ríos Grande y Chiquito fueron modificados en el pasado, es decir que el trazo actual no es el original, por lo que esto ha traído como consecuencia los constantes desbordamientos e inundaciones en la mayor parte de la ciudad. La escorrentía siempre buscará sus cauces naturales, por lo que este problema continuará mientras no se hagan obras de prevención.
- Se realizaron varias corridas de los dos cauces, tanto unidos como por separado, con y sin infraestructura, esto para conocer el comportamiento y las diferencias de capacidad de todos los puentes.
- Las colonias de Manantiales, Tres Puentes, Primo Tapia, Prados Verdes, etc., se encuentran asentadas sobre antiguos sedimentos del Río Grande, es por lo que constantemente se ven afectadas. Además las márgenes del río en esta zona están muy altas, por lo que se inundan principalmente por la escorrentía que llega del cerro Quinceo, ya que estas no pueden ingresar al río.
- Cuando el caudal del río Chiquito es mayor al caudal del río Grande, entonces el flujo del río Chiquito tiene preferencia para la escorrentía, creando un remanso aguas arriba del río. Por lo tanto se descarta que después de la confluencia de los dos ríos, se acumulen los gastos, ya que del Río Grande pasa un caudal pequeño.
- Se realizaron corridas en el software Hec, para conocer el funcionamiento del río, donde la capacidad de los cauces unidos y sin infraestructura, es mucho mayor su capacidad, dando a conocer la problemática de los puentes (que son bajos y disminuyen el área geométrica).



Conclusiones

- En el tramo Sur del río Grande, el puente Loma del Rey tiene una capacidad máxima de $50\text{m}^3/\text{s}$, mientras que el resto de los puentes comienzan a crearse problemas de remanso después de $60\text{m}^3/\text{s}$, sobre el río Grande.
- En el tramo Norte del río Grande, los puentes Guadalupe Victoria, Jacarandas y Pípila, tienen una capacidad máxima de $55\text{m}^3/\text{s}$, en cambio los puentes Guillermo Prieto, Central Oriente y Libramiento Oriente, tienen una capacidad de $70\text{m}^3/\text{s}$, no creando remansos.
- Para el Río Grande, la capacidad sin afluentes es de $55\text{ m}^3/\text{s}$, debido a que con un gasto superior, ya comienza a crear remansos, y en algunos puntos desbordamientos. En otra corrida sin tomar en cuenta el afluente del Río Chiquito ni su infraestructura, la capacidad máxima fue de $70\text{ m}^3/\text{s}$, y superando los $85\text{ m}^3/\text{s}$, ya crea problemas de desbordamientos principalmente en las zonas bajas.
- La capacidad máxima que tiene el río Grande es de $70\text{ m}^3/\text{s}$, esto considerando su infraestructura y aun no se presentan problemas de desbordamiento. Ahora si se considera un flujo de $30\text{ m}^3/\text{s}$ del río Chiquito, el flujo no causa problemas aguas arriba al cauce del río Grande, es decir en la zona sur del tramo.
- Otro tramo donde se manifiestan problemas, es en el tramo donde esta la confluencia del Arroyo de Tierras con el río Grande, aguas arriba de Tres Puentes, donde se observan que las márgenes están más bajas (en todo el tramo del Río Grande), con una capacidad de $50\text{ m}^3/\text{s}$. Las márgenes del río Grande que también se consideran bajas, es de Tres Puentes hasta la confluencia del Río Chiquito, y de ahí hasta llegar al puente Guadalupe Victoria, donde tiene una capacidad de $70\text{ m}^3/\text{s}$.
- En las corridas que se hicieron con el software para conocer el comportamiento del río Chiquito incluyendo sus estructuras de los puentes, el flujo escurre bien con un gasto de $50\text{ m}^3/\text{s}$, observando principalmente que se forma un cuello de botella en el puente Camelinas (su capacidad es de $47\text{ m}^3/\text{s}$), posterior a este puente el agua fluye bien hasta con un gasto de $60\text{ m}^3/\text{s}$.
- En el río Chiquito los puentes que tienen problemas de remanso con un gasto de $50\text{ m}^3/\text{s}$, son: Camelinas, Virrey de Mendoza, y el del Ferrocarril. Con $60\text{ m}^3/\text{s}$ le siguen los puentes: Sansón Flores, José Rentaría, Peatonal Gigante y Vicente Santa María. No obstante, que el puente de la av. Michoacán haya sido sobre-elevado, presenta algunos problemas.
- El cauce del Río Chiquito fue rectificado en 1935, y su antiguo cauce pasaba por el Boulevard García de León para ingresar a la colonia Ventura Puente y seguir en la calle Zamora de la colonia Molino de Parras, posteriormente conectarse antes del Obelisco.
- En el tramo del río Chiquito considerado entre los puentes de Sansón Flores hasta José Rentaría, las márgenes son bajas, creando conflictos a la escorrentía cuando supera sus márgenes. Otro tramo de conflicto es a partir del puente Isidro Huarte hasta Virrey de Mendoza. Por último el otro sitio es pasando la av. Michoacán hasta la confluencia con el río Grande.



Conclusiones

- El Río Chiquito sin puentes, tiene una capacidad de 75 m³/s, este caudal no crea problemas de desbordamiento, pero llegando a los 80 m³/s, se empiezan a manifestarse los problemas de desbordamiento.
- Las colonias más afectadas por los desbordamientos e inundaciones provocadas por el río Chiquito son: Prados del Campestre, el Campestre, Ocolusen, Nueva Chapultepec, Del Empleado, Ventura Puente, Felicitas del Río, Molino de Parras, Felix Ireta, etc.
- Una de las mejoras que realizó el OOAPAS, fue el dragado de los ríos en algunos puntos de la ciudad con lo que aumentó el área geométrica de estos. Además, de quitar varios arbustos y algunos árboles que se encontraban en las márgenes y lecho del río Chiquito, lo que ha permitido que la escorrentía tenga un mejor funcionamiento.
- Se considera que el 70% del agua residual del sur de la ciudad descarga al cauce del Río Chiquito (con tirante de 1.8m), provocando con esto, que cuando el río va a su máxima capacidad (2.8m de tirante), las alcantarillas se encuentran cubiertas provocando que el flujo del alcantarillado se invierta, esto es, en lugar de que descargue al río, desfoga por las alcantarillas de las calles y las coladeras de las casas-habitación ocasionando inundaciones internas. Además cuando se tiene una avenida en el río Chiquito, este apenas es capaz de transportar el flujo, pero cuando se tienen que unir los escurrimientos del río con toda el agua llovida en la ciudad, entonces no alcanza a escurrir y es cuando la ciudad quedará inundada.
- La cuenca del Río Chiquito morfológicamente esta dividida en dos fases, es decir al sur se caracteriza por montaña con fuertes pendientes y bosque, la otra parte se caracteriza por la planicie que es donde se localiza la ciudad de Morelia. Esta morfología es la que provoca que cada lluvia excepcional que se tenga en la sierra, llegue con mucha fuerza a la ciudad provocando los desastres que ya conocemos.
- Para conocer los posibles periodos de retorno en las lluvias se aplicó dos métodos (Factor de Frecuencias y de Gumbel), para el primero se realizó con lluvia horaria y diaria, para el segundo fue solamente horaria. Los resultados obtenidos indican que para lluvias de una con valor de 70mm, corresponde a una recurrencia de 100 años, lo que indica que en julio de 2005 se registro una precipitación de esta lámina. Los valores menores que corresponden a los periodos de retorno para 5, 25 y 50 años, también ya se han registrado. En cambio, para las precipitaciones de 24 horas, los registros solamente llegan hasta el periodo de recurrencia de 25 años (83.6mm), ya que para 50 y 100 años (95.44 y 104.93mm), no se han presentado.
- Para los periodos de retorno en caudales se aplicaron los métodos de Valores Extremos de Gumbel (Río Grande y Chiquito), Weibull (Río Grande y Chiquito), Distribución Log-Normal (Río Grande) y Distribución Log-Pearson Tipo III. Los resultados obtenidos para el río Grande es que para un gasto de 70 m³/s, la recurrencia sería entre 25 y 30 años, para un gasto de 80 m³/s la recurrencia sería entre 70 y 75 años. De acuerdo a los métodos Log-normal y Log-Pearson, se analizó que los caudales inferiores son los únicos que se han presentado, ya que los que corresponden a 25, 50 y 100 años, no se han registrado.



*Evaluación de los Peligros Hidrológicos e Hidráulicos de los Ríos
Grande y Chiquito de la Ciudad de Morelia, Michoacán*



Conclusiones

- En el caso del río Chiquito para un gasto de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, la recurrencia será entre 5 y 7 años, para un gasto de $60 \text{ m}^3/\text{s}$, se presentaría cada 12 años y para un gasto de $75 \text{ m}^3/\text{s}$, este se presentará cada 30 años aproximadamente. Cabe notar el puente Camelinas no tiene esta capacidad, por lo que la capacidad del río sin estructura de puentes es de $70 \text{ m}^3/\text{s}$.



RECOMENDACIONES

La evaluación de los desastres debe ser planeada, puesta en práctica y realizada durante el proceso de recuperación, como componente crítico de la secuencia de los preparativos y manejo de los desastres. Es mediante la evaluación que aquellos que toman decisiones puedan identificar las necesidades que conducen a identificar los tipos apropiados de asistencia, además es más eficiente cuando se ha diseñado previamente como parte de un plan de preparación que ha sido comprobado y refinado. El proceso de evaluación variará según los diferentes tipos de amenazas y debe considerar la gran variedad de situaciones posible que el país pueda enfrentar.

Durante muchos años la práctica habitual de drenaje urbano ha sido conducir el agua rápidamente fuera de la ciudad. Los cauces urbanos han sido canalizados y las alcantarillas diseñadas para recibir toda el agua de escorrentía superficial. Los ríos han perdido su riqueza natural y su capacidad de respuesta ante avenidas, mientras que los sistemas de alcantarillado se ven incapaces de absorber la cantidad de agua adicional procedente de las zonas de nuevos desarrollos urbanos.

Los países desarrollados invierten mucho en la parte de la planeación de nuevos desarrollos urbanos, zonas industriales, etc., esto con la finalidad de evitar desastres en el futuro. La política que han adoptado estas grandes potencias, es la de invertir antes de los proyectos para economizar en el futuro, es decir prefieren realizar obras preventivas (para reducir los riesgos, en caso de existir), para no llegar a lo que sería la mitigación.

- Reducir la escorrentía superficial minimizando las superficies impermeables de la ciudad, esto se logra dividiendo las cuencas vertientes para evitar grandes concentraciones de volúmenes de agua en algún punto. La finalidad de lo anterior es poder aprovechar esta escorrentía en zonas verdes, parques y espacios abiertos.
- Captar la mayor cantidad de aguas pluviales para posteriormente reutilizarlas, ya sea en la agricultura, en el lavado de calles, regado de zonas verdes, etc., y de esta forma se disminuye la escorrentía superficial.
- Hacer conciencia en la ciudadanía en el tema de la limpieza de la ciudad, esto es de suma importancia a la hora de reducir la carga contaminante y la basura en la escorrentía. Todo desperdicio llega a las alcantarillas ocasionando que las tapan.
- Realizar pozos y zanjas de infiltración, la finalidad es recoger y almacenar el agua de escorrentía para que en algún momento se infiltre en el terreno natural.



Conclusiones

- Realizar drenes filtrantes principalmente en los estacionamientos públicos, en las calles de los fraccionamientos, en cunetas, etc., esto con la finalidad de ayudar a la escorrentía y que el agua llegue al terreno natural.
- Se propone que se construyan represas en la parte superior de la cuenca del Río Chiquito, esto con la finalidad de frenar y retener un poco las avenidas, después de pasado el evento y que el nivel del río esté bajo, se podrá dejar libre el flujo retenido para que escurra. De esta forma ya no causaría tantos conflictos en la ciudad. Así mismo se propone para el río Grande, esta obra estaría ubicada aguas debajo de la presa.
- Otra posible solución a las avenidas del río Chiquito, sería tratar de construir un canal que llegara directamente al río Grande. Este canal podría ser desde el Campestre pasando por el Venustiano Carranza y llegar a la gasolinera Poza Rica y de ahí hasta el río Grande.
- Que se realicen tanques de almacenamiento para captar las avenidas provocadas por los ríos y de esta forma se retendría el flujo hasta que haya pasado lo más crítico del evento. Este tiempo puede ser de horas o días.
- Que se modifiquen y amplíen algunas de las estructuras de los puentes, ya que son muy bajos para poder soportar el caudal de una avenida. Por ejemplo, el puente Camelinas tiene una longitud de más de 40m y una sección muy chica.
- Se deben elevar algunas márgenes de los ríos, además se deben reforzar y construir algunos muros de contención, ya que muchas márgenes se observan erosionadas por las avenidas que se han tenido. Estas medidas ayudarían a evitar los asentamientos que se tienen en muchos tramos de la avenida Solidaridad.
- Que se busque una mejor alternativa para la utilización y el manejo de los cárcamos de bombeo, ya que los colonos se quejan que no funcionan cuando los requieren.
- Que se vuelva a instalar la estación hidrométrica en el cauce del río Chiquito, ya que en 1989 la quitaron y nunca más la volvieron a colocar. Es importante tener registros de los caudales que escurren en este, por lo que es difícil conocer la escorrentía que ingresa a la ciudad.
- Que se instalen al menos tres estaciones pluviométricas al poniente de la cuenca, ya que en esa zona no se tiene forma de poder monitorear el clima.
- Que se coloque un sistema de alerta temprana en el cauce del río Chiquito (en el Campestre), esto con la finalidad de evitar una avenida que vaya afectar principalmente a las colonias que se localizan al ingreso de la ciudad.



REFERENCIAS

- Alcalá Ochoa S. 2004. Influencia de los materiales arcillosos volcánicos y antrópicos en los acuíferos del sur del lago de Pátzcuaro. Tesis de Maestría, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH.
- Antaramián Harutunián E. 2001. Morelia, Características geográficas y climáticas. In Morelia y su historia.
- Aparicio Mijares F. J. 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. Pp 303.
- Arcuri G., barbero S., bedoni L., Ben G., Drago., Lazzari A., Magosso P., Marchisio C., Negro N., Perrone R., Perscio R., Ponza M., Ruberto G., y Troisi C. 1996. Gestione si un evento alluvionale: il caso dell'8/7/1996 nel cusio-verbano, piemonte. (Torino, Italia): La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche; Il contributo della Ricerca Scientifica. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Alba Italia, novembre 1996. 75-88.
- Arreygue Rocha E. 2003. Apuntes del curso "Métodos Geológicos, Geofísicos y Técnicos, Aplicados en las Vías Terrestres". Pag. 30-48.
- Arreygue R., Garduño M., Canuti P., Casagli N. e Lotti A. 2004. Inundaciones Históricas y Potenciales en la Ciudad de Morelia, relacionadas con el río Chiquito. Contribuciones a la geología e impacto ambiental de la región de Morelia. UMSNH.
- Arreygue R., Alcalá O. y Garduño M. 2004. Informe técnico. Estudio geológico, hidrológico, hidráulico y topográfico de las zonas potenciales a inundaciones de las colonias Jardines de Santiaguito, Jaime Nuno y Carlos Salazar, en el municipio de Morelia, Michoacán.
- Bedient Philip B. y Huber Wayne C. 2002. Hydrology and Floodplain Analysis. Oregon State University. 3^{ra}. Edition, Pretice Hall.
- Caldíño Villagómez I. A. Aldama A. A. y Ramírez Orozco A. I. 2000. Protección y control de cauces. Comisión Nacional del Agua; IMTA. Pp 131-177.



Referencias

- Bravo Nieto C.E. y Ojeda Torres F. 2001. El museo de la Ciudad de Morelia y su posible sala de agua. Morelia y su historia. In primer foro sobre el centro histórico de Morelia.
- Boumann Jürgen 1999. Factores determinantes en el proceso hidrológico erosivo en las cuencas hidrográficas de la costa de Chiapas.
- Caivano A. M. 2003. Rischio idraulico ed idrogeologico. Edilizia quaderni per la progettazione. Pp. 238
- Campos Aranda D. F. 1998. Procesos del Ciclo hidrológico. Vol. I, Tercera impresión, UASLP, Facultad de Ingeniería. Pp. 493.
- Caredio F., D'Amato Avanzi G., Puccinelli A. Trivellini M., Venutelli M. y Verani M. 1996. La catastrofe hidrogeológica del 19/ 6/1996 in Versilia e Garfagnana (Toscana Italia): Aspetti geomorfologici e valutazioni idrauliche. La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche; Il contributo della Ricerca Scientifica. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Alba Italia, noviembre 1996. 75-88.
- Comisión Federal de Electricidad. 1981. Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia-Hidráulica, A.2.11. Hidráulica fluvial. Pp 200.
- Ciarmatori L. (ined.) Relazione a giornata sull'evento di piena del novembre 1994 in piemonte (7 de noviembre de 1995).
- Cocco Quezada Antonio. El huracán de San Zenón, Cindy y la Toma de decisiones. 1993.
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CRID. Centro Regional de Información sobre Desastres, América Latina y El Caribe. www.crid.or.cr. Malilay, Josephine. Inundaciones. Pp. 287-302. En: Noji, Eric K., ed. Impacto de los desastres en la salud pública. Organización Panamericana de la Salud. 2000. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Inundaciones. Fascículo 3. 1992
- Cruz Roja panameña. Datos oficiales de la Dirección General de Prevención y Atención de Desastres.
- Chow V. T., Maidment David, y Mays Larry W. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill. Pp. 584.
- De Francesco Fernando, Ubaldo Colado, Enrique schnack, Juan Schnack y Luis García-Lozano 2002. La inundación de 1982/1983 en la Porción argentina de la cuenca del río Paraná. En desastres naturales en América latina. Fondo de Cultura Económica. Pp 317-333.



Referencias

- DHA, Defence Housing Authority 1995. Introducción a las Amenazas. Programa de entrenamiento para el manejo de desastres.
- DIGHAU, Development Initiatives, Global Humanitarian Assistance Update, (2004-05).
- DNA 1995. Introducción a las amenazas. Programa de entrenamiento para el manejo de desastres. 2ª Edición, pag 83-98.
- Eagleson P.S. 1978. Dynamic Hydrology. Capter 11: Precipitation, pag. 159 a 209. McGraw-Hill Book Company. New Cork, N. Y. USA.
- Elkin Velásquez, Michel Hermelin y Oscar Mejía 2002. La inundación de 1982/1983 en la Porción argentina de la cuenca del río Paraná. En desastres naturales en América latina. Fondo de Cultura Económica. Pag. 335-348.
- Ferrari L., Garduño V.H., Pasquaré G. and Tibaldi A. 1994. Volcanic and tectonic evolution of central México: Oligocene to present. Geofisica Internacional 3.
- French Richard H. 1993. Hidráulica de canales abiertos. Cap 1. Mc Graw Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V.
- Fuster R. 2004. Apuntes de la materia de "Ingeniería en Recursos Naturales Renovables" de la Facultad de Ciencias Agronómicas, de la UNIVERSIDAD DE CHILE.
- García F.M. y A. J. A. Maza 1998. "Origen y propiedades de los sedimentos", capítulo 7 del Manual de Ingeniería de Ríos de la Comisión Nacional del Agua, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, 1998, pp. 97-199.
- García Sánchez J. 1997. Perdida de suelo en cuencas. Capitulo 17 del Manual de Ingeniería de Ríos, series del Instituto de Ingeniería, México.
- Gilluly J., Waters A. C. y Woodford A. O. 1964. Principios de Geología. Edit. AguilarPp 692
- Gottschalk. D. J. 1964. "Reservoir sedimentation", sección 17, parte I, Handbook of Applied Hydrology, edt. McGraw Hill Co., USA.
- Govi M., Luino F. Y Turitto O. 1996. Successione di processi evolutivi naturali in concomitanza ad eventi idrologici straordinari. La prevenzione delle catastrofi idrologeologiche; Il contributo della Ricerca Scientifica. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Alba Italia, novembre 1996. 261-278.
- Guerra F. y González J. 2002. Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, estado Táchira, venezuela. Universidad de



- los Andes. Dpto. Ciencias Sociales.
- Guevara Féfer F. 1995. Vegetación del valle de Morelia. Revista Biológicas No. 3. Facultad de Biología, UMSNH.
- Horton R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle, Trans. Am. Geophys. Union, Vol 14, pp. 446-460.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America, n° 56, pp. 275-370.
- Hjulstrom F. 1939. Transport of detritus by moving water. Pages 5-31 in P. B. Trask, editor. Recent marine sediment. Dover Publications.
- IMTA 2001. El agua según la ciencia/ Enzo Levi. Avances en hidráulica 8.
- Krumbein W. C. y Sloss L. L., 1969. Estratigrafía y sedimentación. Departamento de geología, Universidad northwestern. Cap. 6 pag. 222-273.
- IMD (2005). Informe Mundial sobre Desastres
- INEGI 2000. XII Censo General de Población y Vivienda, Morelia, Mich., México.
- INEGI 2000. Ciudades Capitales, Una visión histórica urbana Vol. 1. Aguascalientes, Ags., México.
- Israde A., Garduño V.H. y Ortega M. 2002. Paleoambiente lacustre del Cuaternario Tardío en el Centro del Lago de Cuitzeo. Hidrobiología. Pp 61-78.
- Jáuregui, O.E., 1973. Hacia una planeación de la red meteorológica nacional. Recursos Hidráulicos II(1). Pp 98-112.
- Juárez Nieto C. 1982. Morelia y su Acueducto. Sociedad y Arte, Morelia, UMSNH-Fondo para actividades sociales y culturales de Michoacán.
- Julien Pierre Y. 1998. Erosión y sedimentación. Editado por la Universidad de Cambridge.
- Knighton David 1998. Fluvial and Processes. An new perspective. Department of Geography, University of Sheffield, UK. Editorial ARNOLD.
- Krumbein W.C. y Sloss L.L. 1969. Estratigrafía y sedimentación. Departamento de Geología, Universidad northwestern. Edit. UTEHA. Pp 779
- La Jornada, "Huracán humano". Nov. 2005, No. 82



- La Nación (2005), empresa periodística europea.
- LA RED, Proyecto DesInventar: Sistema de inventarios de desastres para América Latina, Sección México: Dic. 1999.
- Linsley R.K., Kohler M.A. y Paulus J.L.H. 1977. Hidrología para Ingenieros. Capitulo 3. Precipitación pag. 45-88. McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. Bogotá Colombia.
- Linsley R. K., Kohler M. A. y Paulhus J. H. 1990. Hidrología para ingenieros. Segunda edición. Mc Graw Hill. Cap. 13 "sedimentación" pp. 386.
- López Blanco J. 1998. La cuenca hidrográfica como unidad espacial para el manejo integral de los recursos naturales. Geografía y Desarrollo, vol. 1
- Maderey Rascon L.E. 1977. El agua en la República Mexicana. Instituto de Geografía de la UNAM México, D.F.
- Maza A., García J. A. 1996. Transporte de sedimentos. Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de ríos, series del Instituto de Ingeniería, México, 531pp.
- Mercalli L., Paludis S. y Dutto F. (1995). Alluvione del 5-6 novembre 1994 in Italia NW: analisi pluviometrica. Nimbus, Torino, n. 6-7, 25-32.
- Monsalve Sáenz G. 1999. Hidrología en la Ingeniería. Segunda edición, Alfaomega. Pp. 383.
- Morales De La Garza J., 2001. Apuntes para el curso de geología II. Depto. De Ingeniería geológica, IPN. Pp. 40.a
- Mostaza M. Soliman., Philip E. LaMoreaux., Brashir A. Memon., Fakir A. Assaad., James w. LaMoreaux, 1998. Enviromental Hydrogeology. Lewis Publishers.
- Namba Senzi 1997 "Guía de técnicas naturales de control de Erosión" Japón.
- Niccoli R. e Filice E. (1995). Le alluvione in Calabria. Rapporto Sull'evento del 13 e 14 marzo 1995. Acquisizione dati ed analisi idrologica a scala regionale. Ufficio idrografico e Mareografico di Catanzaro (presidenta del Consiglio dei Ministri). Catanzaro, 35 pp.
- Norman Crawford, 2002. Métodos pasados, presentes y futuros del análisis hidrológico técnico.
- NOAA Administración Nacional Oceánica y Atmosférica e EU
- OAS. Organization of American Status 1991. Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños. www.oas.org



- OCHA, Sistema de Control Financiero, FTS, Llamamientos Consolidados, Summary of Requirements and Pledges/Contributions by affected country/region as of 11th October 2005.
- OFDA. Office of Foreign Disaster Assistance.
- Organización Meteorológica Mundial. 1977. "El clima y el Agua". Publicación No. 463 de la OMM 24 pag. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial. 1974. Glosario Hidrológico Internacional. First edition.
- Pangallo E. (1995). Alluvione del 5-6 novembre 1994 in Italia NW: analisi meteorologica. Nimbus, Torino, n. 6-7, 13-21.
- Paredes Martínez C. 2001. La difícil consolidación de la ciudad de Valladolid. CIESAS-IIH-UMSNH Morelia y su Historia, Primer foro sobre el centro histórico de Morelia. Pag. 17-19.
- Pérez Morales G. B. y Rodríguez Castro J. A., 2005. Apuntes de Ingeniería de Ríos y Costas. Facultad de ingeniería civil, UMSNH. Primera parte.
- Pereyra D. D., Pérez S. J.A. y Gómez R. L. 2004. Ecuaciones que estiman las curvas intensidad-duración-periodo de retorno de la lluvia. Union Geofísica Mexicana, A.C. Volumen 24 No. 1.
- Pierson T.C. y Costa J.E. (1987). A rheologic classification of subareal sediment-water flows. In: Costa J.E. y Wieczorek J.F. (eds.) Debris flows/avalanches: process, recominations and mitigations. Geol. Soc. Am., Rev. Eng. Geol., 7, 1-12.
- Polemio N. (1996). Le calamità idrogeologiche dell'inverno 1995-1996 nel territorio tarantino. La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche; Il Contributo Della Ricerca scientifica. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Alba Italia, novembre 1996. 63-73.
- Ramírez Orozco A. y Aldama Álvaro (2000). Análisis de frecuencias conjunto para la estimación de avenidas de diseño. Avances en Hidráulica 7 México. Editado por AMH-IMTA
- Regione Piemonte (1994). Primo rapporto sull'evento alluvionale verificatosi in Piemonte il 4-6 novembre 1994. A cura dei Settori Prevenzione Rischio geologico, meteorologico e Sismico e opere pubbliche a diffusa assetto Idrogeológico, CSI Piemonte, 326pp.
- Robert André (2003). River Processes. An introduction to fluvial dynamics. Department of Geography, Cork University, Toronto, Notario, Canada. Edit. ARNAOLD. Distributed in the United States of America by Oxford University Press Inc., New York.
- Rossi G., Cancellieri A. y Foti E. (1996). Eccezionalità Della pioggia e vulnerabilità delle aree



Referencias

- urbane: Il caso dell'alluvione dell 13-marzo 1995 sul versante orientale dell'Etna. La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche; Il contributo Della ricerca scientifica. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Alba Italia, novembre 1996. 51-61.
- Sánchez, F.J. 2001. "Apuntes de cátedra Hidrología e Hidrogeología". Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España. <http://web.usal.es/~javisan/hidro/hidro.htm>.
- Sánchez Ordoñez J., 1974. Modelos matemáticos en hidrología. Cap. 1. Conceptos generales. Publicación Aperiódica Número 33 del servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología. Bogotá Colombia.
- Schwab G. O. et al, 1981. "Soil an Water Conservation Engineering". J. Wiley And Sons, USA.
- Selecciones del Reader's Digest 1990. Grandes desastres "Historias verídicas protagonizadas por la naturaleza".
- SCS, EU. Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.
- Strahler, A. (1974). Geografía física. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 765 pp. STRAHLER, A.N. (1964): «Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks». In Chow, V.T. (Ed.): Handbook of applied hydrology. 4-39/4-76.
- Tavera Alfaro X. 1995. Morelia: la ciudad de tres nombres, en Morelia patrimonio de la humanidad. Silva Figueroa Zamudio Editado por Morelia, UMSNH-Gobierno del Estado de Michoacán-Ayuntamiento de Morelia. Pag 14
- U.S. Interagency Comité on Water Resources. A Study of Method Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams, Rep 14, Minneapolis, Minn., 1963.
- UNESCAP, 2003. United Nations Economic and Socila Comisión For Asia And the Pacific. Reporte del año internacional de agua dulce.
- UNESCO 2004 Organización de la Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Vargas Uribe G. 1995. Crecimiento demográfico y proceso de urbanización en Guayangareo-Valladolid-Morelia 1541-1993. Notas censales No. 12. INEGI. Aguascalientes, Ags., México.
- Yang Chih Ted 2003. Sediment Transport. Theory and practice. Krieger publishing company, Florida.