



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

HIDROLOGIA DE RIESGO

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A:

JOSE UBALDO VARGAS CORTES



FES Aragón

ASESOR: ING. LUIS POMPOSO VIGUERAS MUÑOZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS Hidrología de Riesgo
Ubaldo Vargas Cortés

José

A Dios

Por darme la vida y haberme concedido concluir esta etapa en mi vida, y por darme a las personas tan especiales que forman parte de mi familia. Por darme la fuerza para vencer los obstáculos que he encontrado en mi camino.

A mis padres

Les estoy muy agradecido por ser un puntal en mi vida aunque sería poco decir que son un puntal, más bien serían los grandes ingenieros que hicieron mis cimientos, y gracias a ellos logro concluir esta etapa de mi vida. Gracias por ayudarme a ser quien soy ya que sin sus regaños y consejos no hubiera terminado mis estudios.

A mi esposa Beatriz Alejandra

Por su comprensión, apoyo incondicional y ánimos que necesite para la terminación de mi trabajo de titulación. Porque gracias a su entusiasmo de lucha, logra hacer de mi una persona cada día mejor, logrando tener una amiga y una esposa excepcional. Con todo mi amor gracias Ale.

A mis hermanos

Por formar un gran equipo que me enseñó que tengo que luchar día con día para ser mejor y en los cuales me he apoyado cuando necesito de un consejo. Espero estén orgullosos de mí como yo lo estoy de ellos. Gracias por todo su apoyo.

A mis amigotes

Porque ellos me acompañaron en el transcurso de esta carrera. Junto con ellos logrando salir adelante en esta etapa, con tropezones y empujones, pero lo logramos. A pesar de las diferencias gracias por ser mis amigotes.

A mis sobrinos

Para que este trabajo sea un aliento para seguir adelante en sus estudios.

A mis abuelos y tíos

Por sus sabios consejos ya que me han ayudado a formarme como una persona de bien.

Al Ing. Luis Pomposo Viguera Muñoz

Por el tiempo, trabajo, sus consejos y su infinita paciencia en el transcurso de la realización de este trabajo.

Gracias.

JOSE UBALDO VARGAS CORTES

INDICE

INTRODUCCION

CAPITULO I ANTECEDENTES

- 1.1.- Importancia de los riesgos naturales
- 1.2.- Antecedentes en México
- 1.3.- Efecto Invernadero
- 1.4.- Cambio Climático en México

CAPITULO II CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- 2.1.- Definición de Hidrología
- 2.2.- ¿Que es un riesgo?
- 2.3.- Descripción de los riesgos (Tipología)
- 2.4.- Gestión de los riesgos naturales
- 2.5.- Cadena de actuaciones
- 2.6.- Cuenca Hidrológica

CAPITULO III INUNDACIONES

- 3.1.- Definición de Inundaciones
- 3.2.- Tipos de Inundaciones
- 3.3.- Inundaciones en México
- 3.4.- Avenidas Máximas
- 3.5.- Métodos Empíricos
- 3.6.- Métodos Semi-empíricos
- 3.7.- Métodos Estadísticos

CAPITULO IV SEQUIAS

- 4.1.- Definición de Sequías
- 4.2.- Clasificación de Sequías
- 4.3.- Sequía Hidrológica
- 4.4.- Cálculo de la Probabilidad mensual de una lluvia
- 4.5.- Sequía en un Río

CAPITULO V MODELACION EJEMPLOS DE APLICACION

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

El agua es uno de los recursos naturales mas valiosos debido a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su consiente explotación; sin embargo junto con las ventajas existen también situaciones extremas tales como las inundaciones y las sequías.

En México se han observado durante la década pasada y la actual Fenómenos Meteorológicos de tal magnitud que los estados declarados en zona de desastre, han rebasado las estadísticas. Son muchos los problemas que enfrenta en la actualidad un hidrólogo para prevenir este tipo de desastres debido a la falta de información.

A nivel mundial las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre. De acuerdo con la cruz roja internacional, durante el periodo de 1919 a 2006 han colaborado con ayuda en eventos de inundaciones que en cualquier otro tipo; por su parte las sequías también se han producido aun que no en gran escala como las inundaciones, pero estas también son muy perjudiciales para los seres vivos, ya que la falta de agua en algún ecosistema puede llegar a provocar hasta la desaparición del mismo.

En el pasado, las poblaciones entendían los fenómenos de la naturaleza, no en términos estadísticos, si no como un elemento del medio ambiente con el que se mantenían en un estrecho contacto.

Aunque la gente vivía cerca de los ríos para aprovecharlos como medio de transporte y fuente de abastecimiento de agua para su consumo y el cultivo, sus hogares eran construidos en terrenos altos, para evitar las afectaciones debidas a fenómenos naturales. Debido a la mala distribución de tierras que existe en México como en muchos países observamos que los fenómenos meteorológicos aumentan los daños a los ecosistemas.

Por otra parte hoy en día se han explotado tanto los recursos naturales que se ha causado un gran daño al medio ambiente, ocasionando con esto que los fenómenos naturales sean cada día un problema mas agudo.

Conforme las inundaciones causan un daño severo al medio ambiente, las sequías toman gran auge en países como México debido a la falta de infraestructura hidráulica y a la falta de conciencia en los pobladores.

Es importante reflexionar sobre este tipo de eventos, particularmente respecto a la situación de nuestro país ya que México no es la excepción y en los últimos años también se ha tenido que lidiar con estos fenómenos que han afectado de manera muy severa por a la sobre explotación de los recursos.

En el primer capítulo de este trabajo se describe la importancia de los riesgos naturales, así como sus antecedentes en México. También se estudian las consecuencias causadas por el cambio climático global y la manera en que este tiene un impacto en México.

El segundo capítulo se mencionan algunos de los conceptos fundamentales de la hidrología así mismo se explica que es un riesgo, sus consecuencias y los tipos de riesgo que existen a causa de los fenómenos naturales.

También se define una cuenca hidrológica, tomando en cuenta sus características principales.

El capítulo tercero denominado inundaciones define lo que es una inundación, los tipos de inundaciones existentes, los efectos, causas y consecuencias en nuestro país. En este capítulo definiremos también la inestabilidad de taludes, tratándose de manera general, los tipos de desprendimientos de laderas, las fuerzas actuantes y la influencia humana en estos sucesos.

Además de describir algunos métodos para el análisis de avenidas máximas como son: Método de Creager, Método de Lowry, Método de Vente Chow, Método de la distribución Normal o de Gauss, Método Log Normal, Método de Nash, Método de Gumbel y Método de Pearson III, entre otros.

En el cuarto capítulo de este trabajo hace referencia al fenómeno hidrológico de la sequía, definiendo sus características, sus componentes, su impacto, indicadores y consecuencias. Se describen algunos métodos para el estudio de este fenómeno como son: El índice de Palmer, Log normal con 3 parámetros y Gumbel. Además de ejemplificar sequía en un río y sequía hidrológica con el cálculo mensual de una lluvia.

En los capítulos anteriores se trataron de explicar los fenómenos hidrológicos y sus riesgos. En este capítulo quinto se explica el programa de modelación y como se compone de datos raster y vectoriales para lograr una perspectiva de un modelo de inundación y sequía. Además de incluir ejemplos de aplicación para los métodos antes vistos para el análisis de los diferentes fenómenos.

Objetivo.- elaborar un documento en el que se presente la teoría relacionada con el estudio de avenidas máximas las cuales presentan un riesgo para muchas localidades en la República Mexicana. Así como el caso del fenómeno de las sequías. De tal forma que permita con esta información tener una mejor visión acerca de la urbanización de nuevas localidades, que eviten el asentamiento en zonas de riesgo.

CAPITULO I ANTECEDENTES.

Importancia De Los Riesgos Naturales

El período comprendida entre 1990 y 1999 fue conocida a nivel mundial como la “Década Internacional por la Prevención de las Catástrofes Naturales (DIPCN)”. En este marco se organizaron a lo largo de todo el periodo diversas conferencias y congresos alrededor del mundo, los frutos de los cuales todavía se están recogiendo.

La comunidad internacional reconoce la necesidad de mejorar:

- la comprensión de los procesos físicos vinculados con los diversos riesgos naturales.
- el análisis de su impacto sobre las construcciones y su vulnerabilidad.
- la definición de medidas de protección óptimas que incluyen los sistemas rápidos de alerta.
- la armonización de la cartografía de riesgos.
- la estima de la intensidad de los fenómenos, de los umbrales de alerta y de los periodos de retorno.
- la insuficiencia de las herramientas necesarias para poder evaluar íntegramente el riesgo y establecer los procedimientos para su reducción.
- la necesaria implicación de todos los actores sociales en la mitigación del riesgo.

Crecimiento de los daños producidos por los riesgos naturales

En México como en muchos países ha resentido el crecimiento significativo de los daños producidos por los fenómenos naturales en las últimas décadas, atribuido aun sin comprobar una justificación al cambio climático. Hay otras razones que se debe tener en cuenta: como el aumento del nivel de vida

- la concentración de la población.
- infraestructuras y bienes en lugares privilegiados desde un punto de vista económico, pero con existencia de riesgo de inundación.
- crecimiento de la movilidad por carretera o tren.
- destrucción por parte de la población de las características naturales de los lugares donde habitan o se instalan y de sus riesgos.
- falta de concienciación y educación ante el riesgo de inundaciones con las consecuentes actuaciones incorrectas o imprudentes.

Así pues, un desarrollo eficaz de la prevención y de las estrategias de atenuación exige conocer las verdaderas razones de este aumento del riesgo.

ANTECEDENTES EN MEXICO

La presencia de enormes cadenas montañosas en las cercanías de las costas ocasiona que los ríos de México sean en general corto, innavegable y con un caudal relativamente modesto. Esto es especialmente cierto en el Pacífico, en cuya vertiente, sin embargo, desembocan algunos de los ríos más largos de México.

México tiene cuarenta y dos ríos principales, que pueden agruparse en tres vertientes. La vertiente occidental corresponde al Pacífico, la oriental al golfo de México y al mar Caribe, y existe además una vertiente interior, conformada por todos los ríos que no tienen salida a ninguno de los mares ni desembocan en una cuenca con desagüe marino. Las cuencas hidrológicas de México se dividen en treintaitrés regiones hidrológicas, definidas como aquellas regiones que presentan niveles de escurrimiento similares. Las más húmedas son la del Usumacinta-Grijalva, la del Papaloapan, la de Coahuila, y la llamada Costa de Chiapas. Las tres primeras corresponden a la vertiente del golfo de México, y la última al Pacífico. Las cuatro se localizan en los estados del sureste de México. En el punto contrario, las más secas son las de El Vizcaíno, Magdalena y Laguna Salada, en la península de Baja California; y la de Sonora, en el estado del mismo nombre.

Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), los ríos más caudalosos son el Usumacinta, que desaloja 900 mil L/s en el golfo de México, y el Grijalva, con 700 mil L/s también en el golfo. Ambos forman parte de la región hidrológica 30, de Usumacinta-Grijalva, la más húmeda del país. No obstante, se trata de ríos relativamente cortos. El río Bravo, el más largo de los que riegan el país, apenas desaloja 120 mil L/s en la vertiente oriental. El sistema Lerma- Chapala-Santiago, que riega una de las zonas más densamente pobladas del país, apenas tiene una capacidad de 8.500 m³ anuales de escurrimiento, contra los más de 50 mil del río Usumacinta.

La vertiente interior está formada por regiones cerradas que impiden la salida de sus aguas al mar. Las más importantes son las de los ríos Nasas y Aguanaval, que se localizan en los estados de Zacatecas, Durango y Coahuila. Sus aguas son canalizadas para dotar de agua ciudades tan importantes como la zona metropolitana de Torreón, que alberga a más de un millón de personas, así como los extensos cultivos de la Comarca Lagunera. Sin embargo, se trata de ríos con escaso caudal, que no son suficientes para abastecer la demanda de la región.

Existen además numerosas y pequeñas cuencas lacustres, entre las que hay que destacar las de los lagos Pátzcuaro y Cuitzeo, en Michoacán de Ocampo. Formaba parte de este grupo la cuenca del lago de Texcoco, que sin embargo, fue abierta artificialmente hacia el río Tula, con el propósito de desecar los más de mil kilómetros cuadrados de superficie lacustre, en los que hoy se asienta la Ciudad de México.

Ubicación Y Extensión Territorial

México se encuentra situado en el norte del Continente Americano, junto con Canadá y Estados Unidos de América; se localiza en el hemisferio occidental hacia el oeste del meridiano de Greenwich.

Coordenadas Geográficas

El territorio nacional se encuentra situado entre los meridianos 118° 27' 24" W, frente a las costas de Baja California en el Océano Pacífico y 86° 42' 36 W" en el extremo este,

tocando Isla Mujeres en el Mar Caribe; así como entre los paralelos 32° 43' 06 N al norte, límite con Estados Unidos de América y 14° 32' 27 N al sur, en la desembocadura del río Suchiate, frontera con Guatemala.

Extensión territorial del país es de 1 964 375 km², esta extensión lo ubica en el decimocuarto lugar entre los países del mundo con mayor territorio.

México Colinda: Al norte con los Estados Unidos de América, a lo largo de una frontera de 3 152 km y al sureste con Guatemala y Belice con una frontera conjunta de 1 149 km de extensión; la longitud de sus costas continentales es de 11 122 km, por lo cual ocupa el segundo lugar en América, después de Canadá (Fig. 1.1).

Relieve

El terreno del país es muy accidentado, con una gran cantidad de montañas, planicies, valles y altiplanos. La altura máxima se presenta en las cimas de los principales volcanes llegando a ser de 5 610 m. sobre el nivel del mar el Pico de Orizaba.



FIGURA 1.1.- Mapa de la República Mexicana.

Clima

Debido a su latitud y a su topografía, México cuenta con una gran diversidad de climas: desde los cálidos, con temperaturas medias anuales mayores a 26 °C, hasta los fríos, con temperaturas menores a 10 °C; sin embargo, el 93 % del territorio nacional oscila entre temperaturas de 10 °C y 26 °C; este porcentaje comprende climas cálidos-subhúmedos con 23 % del territorio nacional; secos con 28 %, muy secos 21 % y templados-subhúmedos con 21 por ciento.

Recursos Naturales En México

La República Mexicana, por su situación geográfica, forma, clima, orografía y geología presenta una gran diversidad de condiciones ecológicas, únicas en el mundo; estas condiciones han dado como resultado una riqueza de suelos, diversidad florística y de comunidades vegetales donde prácticamente existen todas las formas descritas a nivel mundial.

En México se tienen extensiones de terreno en donde casi no existe vegetación alguna, como sucede en las partes más áridas de los desiertos o cerca de las nieves perpetuas. En contraste con esto, se encuentran selvas exuberantes de más de 40 m de altura en áreas con precipitaciones superiores a los 4 000 mm anuales.

Entre estos extremos existe una gran variedad de comunidades arbustivas que forman extensos y diversos matorrales, pastizales, bosques de coníferas y de encinos en casi todos los sistemas montañosos, palmares y selvas con diferente grado de caducidad de follaje, manglares muy desarrollados en el sur de ambos litorales y comunidades vegetales pioneras en las dunas costeras, entre muchas otras.

El Cambio Climático es un fenómeno que se manifiesta en un aumento de la temperatura promedio del planeta. Este aumento de la temperatura tiene consecuencias en la intensidad de los fenómenos del clima en todo el mundo.

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: "Por cambio climático se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables" (Artículo 1 de la CMNUCC, 1992).

El cambio climático ocurre por una exacerbada acción del efecto invernadero; esto ocurre por una mayor concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

De acuerdo la comunidad científica que ha analizado este fenómeno, cada vez tendremos climas más extremos y fenómenos climáticos más intensos. En general, los veranos serán más cálidos y los patrones de las lluvias se modificarán lo que dará lugar a una variación en la frecuencia de sequías e inundaciones.

También se teme que las capas de hielo que actualmente permanecen en las partes más frías del planeta (en los polos y en las cimas de las montañas) se vayan derritiendo lo que ocasionará un aumento en el nivel del mar y la posible inundación permanentemente de amplias zonas costeras.

En el caso de México, se prevé una variación en la disponibilidad de agua en el país, variaciones en los patrones de lluvia y sequía, y posibles afectaciones a la actividad agrícola.

Existen diversas evidencias del cambio climático, aunque la principal es el aumento de la temperatura promedio de la atmósfera:

La temperatura superficial media aumentó unos 0.6°C (\pm 0.2°C) durante el Siglo XX. El incremento de la temperatura se manifestó principalmente entre 1910 y 1945; y entre 1976 y 2000. Las temperaturas nocturnas y en tierra firme son las que más acusaron dicho aumento.

Otra evidencia es la disminución en la extensión del hielo y la capa de nieve sobre la superficie terrestre:

Datos de satélites muestran que es muy probable que haya habido disminuciones de un 10 % en la extensión de la capa de nieve desde finales de los años 60.

Otra prueba más es que el nivel medio del mar en todo el mundo ha subido y el contenido de calor de los océanos ha aumentado:

Los datos de los mareógrafos muestran que el nivel medio del mar en el mundo subió entre 0.1 y 0.2 metros durante el siglo XX.

También hay algunas evidencias de cambio en el comportamiento de algunas especies animales y vegetales.

En latitudes altas del hemisferio norte se incrementaron los eventos de precipitación intensa y tormentas fuertes son cada vez más frecuentes.

El cambio climático puede exacerbar muchas de las amenazas que enfrentan las poblaciones humanas, particularmente en los países de pocos recursos. Estas amenazas incluyen: escasez de agua y de alimentos debido a eventos climáticos extremos, ondas de calor, propagación de enfermedades transmitidas por vectores y por el agua.

Actualmente pocos científicos dudan de la existencia de un cambio climático global. A pesar de que el aumento registrado en la temperatura en las últimas décadas y la frecuencia e intensidad de los eventos extremos no rebasa aún los límites de una "variabilidad climática", todo apunta hacia la existencia de un "cambio climático" de origen antropogénico.

Las actividades humanas han contaminado la atmósfera alterando la concentración de gases como el bióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el vapor de agua. Estos gases se denominan comúnmente Gases de efecto invernadero" (GEI) y son indispensables para la vida terrestre ya que sin su presencia la mayor parte de la superficie del globo terráqueo estaría congelada. Sin embargo, las actividades humanas de la era industrial han causado un aumento, especialmente en la concentración de CO₂, provocando que más calor quede atrapado en la atmósfera, lo que produce un calentamiento global de la superficie de nuestro planeta.

Las consecuencias proyectadas por los modelos computacionales de cambio climático son las siguientes: calentamiento de los océanos, desaparición de glaciares, elevación del nivel del mar, aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climatológicos

extremos debido a una mayor evaporación de agua y superficies oceánicas más calientes, entre otros.

Sin embargo, existe otro tipo de predicciones que no son tan frecuentemente mencionados pero que resultan igualmente preocupantes: el calentamiento global y otras alteraciones climatológicas pueden provocar cambios en la distribución e incidencia de enfermedades. La relación entre clima y salud humana puede ser compleja y difícil de establecer. Hoy en día, un clima cada vez más inestable, la pérdida acelerada de biodiversidad y la desigualdad socio-económica afectan la resistencia de los sistemas naturales. Los cambios en el uso del suelo afectan la distribución de los agentes portadores de enfermedades como los roedores y los insectos, mientras que el clima incide directamente en la duración e intensidad de los brotes de enfermedades. De esta manera, padecimientos como la malaria, la peste, el dengue o el síndrome pulmonar hantavirus, entre otros, han reaparecido o se han intensificado en diversas partes del mundo (Zwick 1997). Los impactos negativos a la salud humana pueden darse por vía directa, como en el caso de olas de calor y aumento de la contaminación exacerbada por el aumento en la temperatura o los daños físicos causados por eventos extremos, o por vía indirecta, como resultado de sequías, inundaciones y cambios climáticos que causan condiciones favorables para los agentes infecciosos, virus, bacterias o parásitos y sus agentes transmisores llamados “vectores”.

En años recientes, el estudio de los factores que regulan el clima del planeta ha registrado un considerable avance. Hoy es común que se hable del fenómeno El Niño o del cambio del clima, asociándoseles (a veces equivocadamente) con desastres naturales, impactos en actividades socioeconómicas, y desafortunadamente, con daños a la población. Estadísticas de la Cruz Roja y otros organismos de ayuda internacional, indican que en el mundo el número de gente afectada por desastres naturales varía principalmente con relación a las condiciones extremas en el clima. Recursos esenciales como el agua dulce, comienzan a escasear de manera significativa a nivel mundial resultado de alteraciones en el clima, poniendo en riesgo la seguridad alimentaría, la salud humana y ambiental y la estabilidad política, tanto nacional como internacional.

La evidencia observacional indica que muchos de los cambios climáticos a escala regional, principalmente aquellos relacionados con la temperatura ya han afectado a un gran número de sistemas físicos y biológicos. Aunque se sospecha que los cambios en la precipitación también tendrán un gran impacto en los mismos, no existen datos para un período suficientemente largo que permitan definir con precisión cómo serán esos cambios a escala regional. Existen indicaciones preliminares de que algunos de los sistemas humanos están siendo afectados por el aumento en la frecuencia de inundaciones y sequías. Quizá para México, los cambios climáticos de mayor relevancia serán aquellos asociados a la precipitación, pues viviendo en un país con extensas regiones semiáridas, la disponibilidad de agua se vuelve un elemento de seguridad nacional (Fig. 1.2).

Uno de los mayores retos de las ciencias atmosféricas ha sido entender los cambios que anualmente se producen en el clima. Condiciones extremas son, por ejemplo, las causantes de los periodos de sequías, que en múltiples ocasiones han producido

cosechas pobres, hambrunas, problemas de salud y migraciones masivas de la población. Hoy en día, no sólo la agricultura se ve afectada por la variabilidad en el clima, sino también otras actividades económicas, como la generación y consumo de energía eléctrica, la pesca, la acuicultura, los asentamientos humanos, el turismo, la ganadería, el uso de recursos hídricos (presas), las aseguradoras, los bancos, el transporte, e incluso la salud, debido a la gran cantidad de enfermedades relacionadas con la condiciones extremas del clima (sequías vs. inundaciones).



FIGURA 1.2.- Rutas mas comunes de los huracanes en México.

En nuestro país, la variabilidad climática en escalas estacionales e interanuales (fenómenos "El Niño -La Niña") tiene grandes impactos en los patrones de variabilidad de la precipitación. De manera general, podemos decir que las lluvias de invierno en años "El Niño" se intensifican (por ejemplo los inviernos de 82-83, 86-87, 91-92, y 97-98) y se debilitan durante los correspondientes veranos. Lo opuesto ocurre aproximadamente durante años de "La Niña". En inviernos "El Niño", la corriente de chorro de latitudes medias se desplaza hacia el sur, provocando una mayor incidencia de frentes fríos y lluvias en las zonas norte y centro de México. Durante veranos de "El Niño", las lluvias en la mayor parte de México disminuyen, apareciendo incluso

condiciones de sequía. Por el contrario, en años de "La Niña" las lluvias parecen estar por encima de lo normal en la mayor parte del país.

En verano, nuestra región se ve afectada por huracanes. En años "El Niño" disminuye la actividad de huracanes en el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México. Tal relación tiende a revertirse en años "La Niña". Sin embargo, aún no es claro en que parte del océano se formaran más huracanes y tormentas tropicales y si tenderán a seguir trayectorias cercanas o alejadas de nuestras costas. De acuerdo a una nota recién publicada por la NOAA, actualmente el Océano Atlántico ha entrado en un periodo de mayor actividad energética, lo cuál propiciará una mayor cantidad de eventos (tormentas, huracanes, etc.), los cuales aumentarán el riesgo de impactos a nuestras costas (Fig. 1.2).

EFEECTO INVERNADERO

Para lograr una mayor comprensión del tema, daremos un breve panorama de lo que se entiende por efecto invernadero. El Efecto Invernadero se basa específicamente en que la Tierra debe liberar al espacio la misma cantidad de energía que absorbe del sol, la energía solar llega en forma de radiación de onda corta, (radiación de longitudes de onda inferior a 4 micras. Una micra es la unidad de longitud igual a la millonésima del metro o a la milésima de milímetro) parte de la cual, es reflejada por la superficie terrestre y la atmósfera. La mayor parte pasa directamente a través de la atmósfera para calentar la superficie de la Tierra. Ésta desprende dicha energía enviándola nuevamente al espacio en forma de radiación infrarroja, sin embargo, el vapor de agua, el dióxido de carbono entre otros "gases que han provocado el efecto invernadero", que es un efecto natural del planeta, absorben gran parte de la radiación (infrarroja) ascendente que emite la Tierra, impidiendo que la energía pase directamente de la superficie terrestre al espacio, con lo cual se experimenta un calentamiento y es el que ha mantenido una temperatura media del planeta apta para la vida.

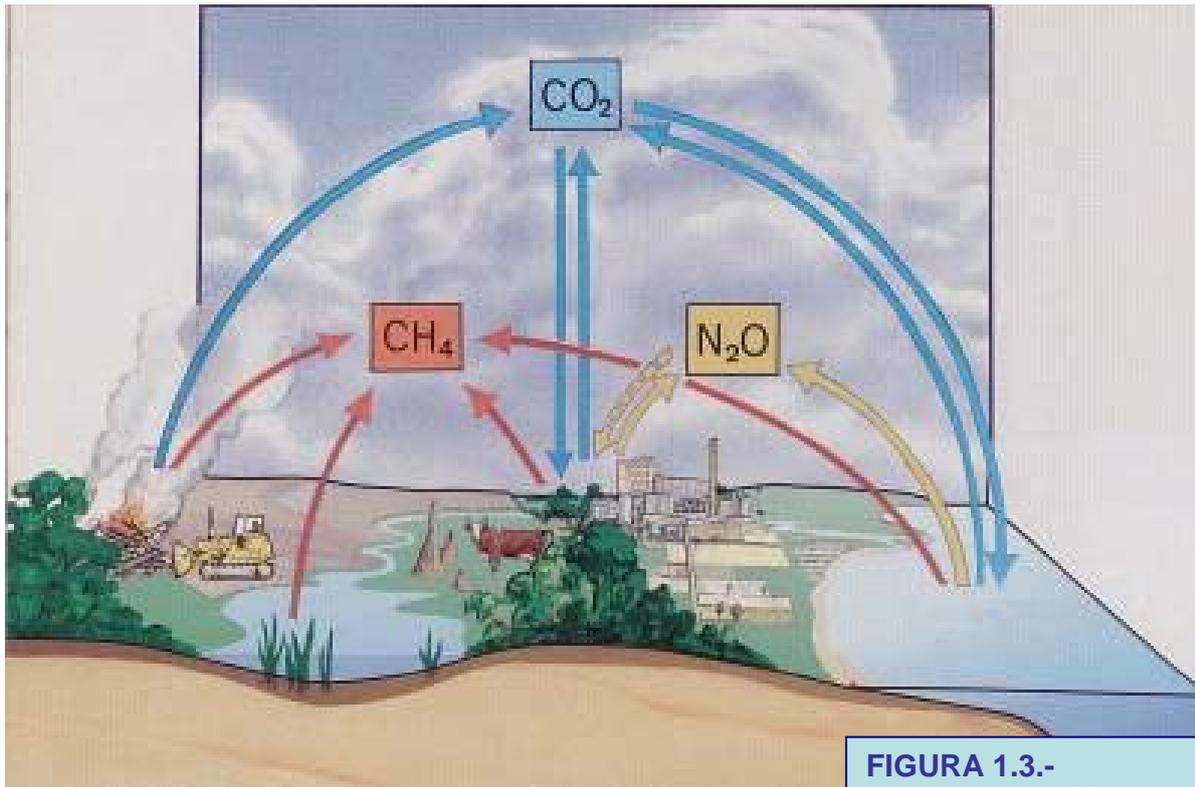


FIGURA 1.3.-
Esquematización del
efecto invernadero

Presentación de algunos gases del Efecto Invernadero

A su vez, otros procesos como: las corrientes de aire, la evaporación, la formación de nubes y las lluvias transportan dicha energía a altas esferas de la atmósfera y contribuyen a la liberación de energía hacia el espacio. Sin embargo, son considerados también un gas del Efecto Invernadero, aunque de distinta manera a los anteriormente citados, ya que debido a la evaporación (evaporación: cambio del estado líquido a vapor) de los mares, lagos y vegetación, se condensa (condensación: proceso en el cual el vapor pasa a líquido) para formar las nubes reflejando y devolviendo parte de la energía entrante del sol (Fig. 1.3).

Relación entre el Efecto Invernadero y el Calentamiento Global

De acuerdo con la composición de la atmósfera se la cual se habló con anterioridad, se dará una breve reseña de la relación que existe entre el efecto invernadero y el calentamiento global, como un ejemplo de repercusión de cambio climático en el planeta.

La envoltura gaseosa de la Tierra funciona como techo protector de las radiaciones procedentes del Sol, cuerpos celestes y como base de la vida terrestre (como fuente de oxígeno para el reino animal y de anhídrido carbónico para el reino vegetal). La atmósfera regula la temperatura terrestre, evita que existan contrastes grandes entre dos períodos (por ejemplo: entre el día y la noche), como suele suceder con los astros

que carecen de cobertura atmosférica (por ejemplo: la luna). Como se mencionó anteriormente, la variedad en las actividades humanas son causantes de la emisión de gases del efecto invernadero en la atmósfera, especialmente el CO₂, N₂ y CFC's.

Nombre	Símbolo químico y porcentaje presente en la atmósfera
Nitrógeno	N ₂ 78.08 %
Oxígeno	O ₂ 20.95 %
Argón	Ar 0.95 %
Dióxido de carbono	CO ₂ 0.03 %
Neón	Ne 0.0018 %
Helio	He 0.0005 %
Criptón	Kr 0.0001 %
Hidrógeno	H ₂ 0.00006%
Ozono	O ₃ 0.00008%

Composición química atmosférica

Las emisiones de estos gases pueden clasificarse como originados por la producción y la utilización de energía, las actividades industriales no productoras de energía, los sistemas de agricultura y los cambios en la utilización de la tierra, entre ellas la deforestación. Sin embargo, los estudios realizados han demostrado que hasta 1990 los gases se han incrementado.

Símbolo	Incremento
CO ₂	56%
CH ₄	15%
CFC	24%
N ₂ O	5%

Por esta razón, es muy importante comprender que el Efecto Invernadero se caracteriza por el calentamiento de las capas inferiores de la atmósfera, debido a que la radiación solar que penetra en la atmósfera sufre absorción y reflexión (49%), mientras la superficie terrestre absorbe un 51%. Por otra parte, la radiación terrestre es absorbida por la atmósfera en una proporción también importante.

Distribución de la Radiación Solar en la Tierra.

Mientras tanto, el Calentamiento Global está altamente relacionado con los principales gases del Efecto Invernadero. Por lo tanto, un paulatino aumento térmico debido al calentamiento induciría a un mayor calentamiento.

Con base a los estudios realizados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), se ha determinado que de continuar con el incremento tan significativo de los gases relacionados al Efecto Invernadero en los próximos 50-100 años, la concentración del CO₂ en la atmósfera podría duplicarse. Producto al desarrollo que ha tenido el hombre en el campo de energía, industria, agricultura, manejo de desechos, cambio en el uso de la tierra, etc.

Otro aspecto importante relacionado con el Cambio Climático se refiere a la disminución de la capa de Ozono (capa que protege la superficie de la tierra de la radiación ultravioleta, es decir, radiación de longitud de onda inferior a unas 0.3 micras; este fenómeno produce cáncer de piel, daños en los ojos y disminuye el rendimiento del sistema que protege al ser humano de otro tipo de enfermedades).

El Ozono, es uno de los gases atmosféricos que impide que la radiación ultravioleta del Sol llegue a la superficie de la tierra. Ésta se presenta en la estratosfera a una altitud comprendida entre los 10 y 45 km, hallándose su concentración máxima, aproximadamente, entre los 18 y 30 km. En algunos lugares ya se ha observado el ozono troposférico como parte del smog (mezcla de niebla y humo).

Los estudios realizados han determinado, la alta probabilidad del Calentamiento Global en las próximas décadas de continuarse con el incremento de estos gases en la atmósfera. Sin embargo, existe la incertidumbre en cuanto a su magnitud, cronología y distribución de los impactos en los patrones del clima regional.

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), auspiciado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), emitió en 1990 la primera evaluación sobre la magnitud de los cambios climáticos y sus impactos, coincidiendo en que la temperatura promedio de la tierra se incrementaría aproximadamente en 2°C entre el año 2050 y 2100 si la concentración de gases se duplicara.

Consecuencias A Causa Del Cambio Climático Global

Se han considerado como las principales consecuencias del cambio climático en los últimos años a los siguientes factores:

- a. El descongelamiento de las nieves eternas en las regiones sub.-polares afectan la estabilidad de los suelos causando severos daños en las infraestructuras: carreteras, autopistas, edificios y aeropuertos.
- b. Al calentarse las regiones templadas favorecerá al aumento de enfermedades y parásitos que no son comunes en ciertas regiones, afectando a millones de personas

que carecen de inmunidad. Así mismo aumentará la incidencia de plagas y enfermedades en la agricultura y reduciendo de esta forma las cosechas.

c. Los cambios en los patrones de lluvias obligará a variar las temporadas de siembra y cosechas, alterando la oferta en los mercados y la disponibilidad de alimentos. También se incrementará la erosión y la incidencia de inundaciones, la disposición de agua potable tanto para las necesidades básicas como para la irrigación de la producción de energía eléctrica. Además, reducirá la proporción de humedad, aumentará la posibilidad de producirse incendios forestales.

d. Considerando que los ecosistemas dependen de un balance de suelo, lluvia y temperatura para su existencia, estos cambios alterarán a los ecosistemas con los consecuentes resultados.

e. La vida silvestre costera tenderá a desaparecer y aumentará la salinidad de los suelos al producirse las variaciones en el nivel del mar. Algunas especies emigrarán, pero la gran mayoría no podrá adaptarse a los cambios y posiblemente muchas de ellas desaparecerán.

f. El incremento en el nivel del mar y por lo tanto la inundación en zonas costeras, obligará a millones de personas que habitan esas regiones a emigrar, por lo que requerirán alimentación, vivienda, servicios de salud, mantenimiento, etc. en las nuevas regiones donde se trasladen.

g. Se estima que debido al calentamiento, serán más frecuentes los disturbios meteorológicos, tales como: tormentas y huracanes tropicales.

CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

En México, los estudios más recientes identifican vulnerabilidades importantes en diversas regiones del país; debido tanto a condiciones biofísicas de las regiones, como a las características demográficas. Estas vulnerabilidades significan riesgos económicos, sociales y ambientales.

De hecho, condiciones extremas recientes en fenómenos de sequías: incendios, inundaciones, temperaturas inusualmente elevadas, tormentas, presencia de enfermedades exóticas, han sido asociados por algunos sectores de la sociedad como parte de los síntomas que evidencian el cambio del clima en el planeta.

La percepción que la sociedad tiene sobre el deterioro ambiental y la necesidad de impulsar acciones que lo detengan ha aumentado considerablemente en los últimos años. Esta circunstancia se ha convertido en un motor novedoso para el desarrollo de instituciones, políticas, programas y normas que inducen convergencia entre las preocupaciones ambientales y los imperativos económicos y sociales del país. Por esto, las medidas de mitigación del cambio climático, no son ajenas a las políticas gubernamentales y a las iniciativas del empresario mexicano y de los organismos ambientalistas, particularmente en lo que se refiere a eficiencia energética, industria limpia, manejos sustentables de bosques, y conservación de la biodiversidad.

Bajo esta perspectiva, el propósito central del Programa Nacional de Acción Climática, es la continuación y el mayor desarrollo de medidas y tecnologías de mitigación que nos permitan controlar y reducir las tasas de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero del país para ello, diversas políticas, en curso y planeadas, más aquellas que surjan como resultado de las investigaciones que se realizan, buscan constituir las mejores alternativas donde se concreten intereses y necesidades de la sociedad. Este esfuerzo nacional, se suma a los de otros países, con miras a posponer en el tiempo y disminuir la necesidad de los efectos del cambio climático.

México está consciente de que los procesos de producción y consumo de energía tienen implicaciones sobre el medio ambiente en el que se desarrollan todas las actividades humanas. En particular, la quema de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural, es responsable de la emisión de gases hacia la atmósfera.

Ante ello, la política energética en México reconoce la necesidad de satisfacer los requerimientos de energía de las diferentes actividades productivas, a fin de promover el crecimiento económico y el mejoramiento en la calidad de vida de la población, pero en un entorno de competitividad, sustentabilidad y armonía con el medio ambiente.

México ha venido impulsando distintas políticas que tienen como propósito principal solucionar diversos problemas sociales, económicos y ambientales del país. En muchos casos, estas acciones permiten litigar simultáneamente los efectos del cambio climático, dado que son complementarios, al impulsar una mayor eficiencia del aparato productivo.

Se reconoce que el propósito de México de controlar y reducir los ritmos de crecimiento de nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, significa mayores retos que requieren de crecientes esfuerzos y de una participación amplia y coordinada entre el gobierno y la sociedad. Por ello este programa se concibe como un instrumento de convocatoria y orientación, dirigido a los distintos componentes de la sociedad que requieren trabajar en la planificación, previsión y realización de acciones en mitigación del cambio climático.

Nuestro país ocupa el 14° lugar en emisiones totales de gases de efecto invernadero. Aunque esto pueda sonar alarmante sólo producimos la 5ª parte del emisor más grande. Tomando en cuenta el tamaño de nuestra población y la grandeza de nuestro territorio, las emisiones de gases de efecto invernadero per-capita son relativamente bajas con respecto a la de los países industrializados. Si dividimos el CO₂ entre cada habitante México ocuparía el lugar número 72 en emisiones de dióxido de carbono por persona.

Cumpliendo con lo estipulado en las Conferencias de las Partes, México llevo a cabo el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero tomando en cuenta a los principales gases: bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de nitroso (N₂O). Cabe recordar que existen decenas de gases de efecto invernadero, pero hasta la fecha estos son los mayores estudiados y los de mayor volumen.

GASES/FUENTES	CO2	CH4	N2O
Total de energía (combustibles + fugas)	311800.0	1081.3	11.8
Procesos industriales	11621.0		
Agricultura y ganadería		1793.3	5.8
Cambio de uso de suelo y silvicultura	135857.3	241.0	2.00
Desechos		526.00	

Según los datos oficiales de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca de 1990, las emisiones del principal gas de efecto invernadero se produce en los siguientes sectores señalados en la gráfica. La generación de energía y la transportación constituyen el 45% del total de emisiones, mientras que la deforestación o cambio de uso de suelo contribuye en un 31% a las emisiones de CO2.

México es altamente vulnerable al cambio climático debido a su situación geográfica. Aunque el nivel de inundaciones sería grave, las mayores preocupaciones se gestarían en torno a la desertificación del país, producto del uso de suelo, tala inmoderada de bosques y selvas y los incendios forestales.

Nuestro país esta llevando acabo un Plan de Acción Climática, mediante este programa las diferentes secretarías se podrán coordinar para llevar acabo acciones más eficientes entorno a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque nuestro país esta llevando una serie de pasos y acuerdos voluntarios para cumplir con los convenios internacionales existen posiciones internacionales que exigen a México y a otros países como Corea o China vincularse jurídicamente al Protocolo de Kyoto, ya que en un mediano plazo estas naciones emergentes contribuirán en su mayor parte a la emisión de estos gases.

Analizando datos de 1995 concernientes al total de emisiones de CO2 en el mundo observamos claramente como Estados Unidos emite el 22% de este gas, mientras México produce alrededor del 2% del gas. Según Estados Unidos, el 90% del incremento demográfico se les atribuirá a los países en vías de desarrollo, por lo cual se estima que para el año 2035 los países en vías de desarrollo contribuirán con el mismo nivel de emisiones para el año 2015.

Impactos En México

El cambio climático global puede afectar de manera drástica todos los ámbitos de la vida tal como los conocemos. Las previsiones de los científicos sobre los efectos que tendrá el incremento de los gases invernadero en la atmósfera del planeta muestran un escenario tan catastrófico, que difícilmente se puede concebir una sociedad humana que sobreviva en condiciones dignas. "La amenaza del cambio climático no pertenece a un futuro posible sino que ya forma parte de nuestro presente, como lo demuestran

las primera manifestaciones evidentes de este fenómeno, como los deshielos en el Ártico y la Antártida.”

Para enfrentar el cambio climático, la humanidad debe demostrar que tiene la capacidad de lograr una respuesta global, acordada por todos los gobiernos, para salvaguardar la precaria estabilidad climática del planeta, por encima de los grandes intereses de las transnacionales petroleras, automotrices, petroquímicas y demás industrias conformadas alrededor del petróleo, el carbón y el gas. Este sector está luchando por evitar cualquier acuerdo internacional que ponga en peligro sus intereses, es decir, cualquier acuerdo que establezca reducciones obligatorias en la emisión de bióxido de carbono (CO₂), el principal gas invernadero, y que pudiera significar una reducción significativa en el consumo de combustibles fósiles en las naciones desarrolladas.

Vulnerabilidad de México ante el cambio climático

Los escenarios del cambio climático para México son muy graves, debido al propio impacto de las alteraciones climáticas pero también a la gran vulnerabilidad social, económica y política del país. En países como México, que carecen de los recursos para enfrentar y mitigar, en lo posible, los impactos del cambio climático, este fenómeno tendrá mayores consecuencias.

La gente que vive en zonas vulnerables, en viviendas precarias, en áreas con escasez de agua, con graves problemas de contaminación, o que cultiva tierras de temporal, no cuenta con seguros, carece de alimento, asistencia en salud y servicios, es decir, gran parte de la población mexicana, sufrirá en mayor grado los efectos de las alteraciones climáticas.

El Estudio de País que el gobierno de México realiza para conocer sus emisiones de gases invernadero, el posible impacto del cambio climático en territorio nacional, las medidas de mitigación y las alternativas para la reducción de emisiones, nos da una idea de lo que puede significar este fenómeno. En el estudio participan, entre otras instituciones, el Instituto Mexicano del Petróleo, el Instituto de Investigaciones Eléctricas, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y, por parte de la UNAM., el Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Programa Universitario de Energía, el Instituto de Ingeniería, el Instituto de Geografía y el Centro de Ecología.

Sin poder entrar en detalle, señalaremos algunas de las primeras estimaciones sobre los posibles impactos del cambio climático en México, de acuerdo con los investigadores que participan en el Estudio-País. Las proyecciones se basan en diversos modelos, cada uno de los cuales puede dar resultados diferentes. No obstante, a pesar de la falta de certidumbre, son los mejores indicadores de los posibles efectos del cambio climático en el país.

Las principales incógnitas que persisten sobre el fenómeno del cambio climático mundial, se refieren a la magnitud de los impactos previstos, los plazos en que tendrán lugar, y su localización geográfica exacta. Sin embargo existen estudios que estiman la

magnitud de estos cambios en los diferentes sectores. A continuación se da una explicación de la vulnerabilidad al cambio climático que observan diferentes sectores en México:

Un escenario del cambio climático sobre la distribución actual de la vegetación en el país, indica que "los bosques de coníferas y encinos se verían afectados negativamente y los bosques tropicales lluviosos se verían favorecidos", bajo un escenario de más 2 grados centígrados de temperatura y menos 10% de precipitación.

El informe Vegetación actual de México y escenario, aplicando un incremento de 2 grados (en temperatura y disminución del 10% en la precipitación señala que "Los climas templados y semi-cálidos donde se distribuyen básicamente los bosques de coníferas y algunos de encinos se verían disminuidos por lo que estos se mostrarían más sensibles al cambio". Esto significa que el clima se volvería más extremo, en general, disminuyendo los climas templados y semi-cálidos y aumentando los cálidos-húmedos y secos-cálidos.

Los efectos esperados en la agricultura son inciertos. Las elevadas temperaturas podrían acelerar el ciclo de crecimiento de algunas plantas, dejando poco tiempo para su desarrollo antes de la madurez. El cambio en los ciclos hidrológicos podría crear una mayor cantidad de suelos deslavados donde existan intensas lluvias, mientras que en otras regiones se verán afectadas por los largos periodos de sequía.

En contraste, los principales impactos positivos se verían reflejados en mayores temporadas de crecimiento para cultivos en algunas regiones y una mayor concentración de CO₂ en la atmósfera ayudará al proceso de fotosíntesis de las plantas. Todos estos efectos serán diferentes dependiendo de las latitudes del planeta. La superficie no apta para el cultivo del maíz en México pasaría del 60% a aproximadamente el 75% del territorio del país. La superficie medianamente apta para este cultivo se reduciría del 33% hasta un mínimo de 8% del territorio nacional. Por otra parte, la proporción del territorio nacional apta para el cultivo del maíz de temporal podría aumentar del actual 8% a 16%, o disminuir a tan sólo 2.5%, dependiendo del modelo que se utilice. El incremento en las áreas no aptas se debería en gran medida a la pérdida de superficie de aptitud media, mientras que la ganancia en superficies aptas en el centro del país se daría por el aumento de la temperatura mínima en tierras altas del Estado de México.

Las alteraciones que provoca el cambio del clima sobre la flora se convierten en afectaciones graves sobre la producción de alimentos, principalmente cuando la agricultura es de temporal. En el informe Comportamiento en la superficie potencialmente apta para el cultivo de maíz de temporal ante un cambio climático global, se aborda el impacto sobre el principal cultivo del país y se concluye que: "En el escenario actual se obtuvo que el 10.69% de toda la superficie del país puede considerarse como apta para el cultivo del maíz... Mientras tanto, el escenario de cambio mostró que sólo el 4.34% del territorio sería apto". Ante un escenario semejante, una caída mayor al 50% de la tierra apta para el cultivo del maíz, habría que añadir el incremento de la población para mediados del próximo siglo, para dibujar así un cuadro más completo, es decir, menor abasto y mayor demanda de alimentos.

Se estima que los bosques experimentarían cambios en su vegetación, así como la posibilidad de que aumente la frecuencia o intensidad de incendios forestales que pueden ser consecuencia de grandes tormentas eléctricas o condiciones de sequía extrema. La vulnerabilidad de los ecosistemas forestales mexicanos se determinó con base en las posibles modificaciones en los tipos de vegetación debidas al cambio climático. El estudio permitió constatar que cerca del 50% de la cobertura vegetal del país sufriría modificaciones, siendo los bosques pertenecientes a los climas templados los más afectados.

La vulnerabilidad a la desertificación en algunas zonas del planeta se refleja en la degradación de los suelos debido principalmente a:

Deterioro por salinización y alcalinización.

Deterioro químico por lixiviación de bases.

Deterioro biológico por pérdida de materia orgánica.

La alteración de la precipitación es posiblemente uno de los fenómenos más visibles y dramáticos del cambio climático. Una disminución del volumen de agua disponible en cuencas extremadamente explotadas puede convertirse en una catástrofe, principalmente en áreas densamente pobladas. El informe Aplicación de un criterio climatológico para conocer la disponibilidad de agua en cuencas de clima húmedo en la República Mexicana, desarrolla una metodología para evaluar los volúmenes de aguas disponibles en las tres regiones hidrológicas más importantes del país, en cuanto a cantidad de población: Lerma-Chapala-Santiago y las cuencas de los ríos Balsas y Pánuco. Lo más destacable respecto a la vulnerabilidad frente al cambio climático, es la situación de la cuenca del sistema Lerma-Chapala-Santiago: "Se concluye que la cuenca ha sufrido una disminución aproximada del 61% de su escurrimiento y del 99.7% en la reserva de agua, en cambio, el volumen de agua aprovechable se incrementó en 142 por ciento. Estas variaciones muestran la gran explotación que se ha hecho de la reserva de agua de la cuenca del Lerma para abastecer a los centros de población asentados en ella, y a la Ciudad de México que pertenece a la cuenca del Pánuco". La situación de la cuenca del Lerma habla de la alta vulnerabilidad de una enorme población a lo que puede ser un aumento de la temperatura, la reducción de la precipitación y/o el incremento de la evaporación.

El impacto del aumento del nivel del mar en el Golfo de México, debido al calentamiento global, se puede estimar a partir del documento Vulnerabilidad del litoral a los efectos por ascenso del nivel del mar en las costas Bajas del Golfo de México. Según los autores, el 46.2% de la costa del Golfo de México "es susceptible al ascenso del nivel del mar". La mayor parte de esta área se encuentra del centro hacia el sur de la costa. Algunas de las zonas más vulnerables son las lagunas costeras y los pantanos. "Otras áreas importantes son los pastizales y tierras agrícolas, las cuales también se contaminan con la intrusión salina y son remplazadas por ambientes costeros. Estas unidades también se distribuyen en la porción centro y sur de la costa del Golfo de México."

El nivel del mar podría elevarse por el descongelamiento de los glaciares. Las principales áreas amenazadas por este impacto serían las zonas costeras y las islas

pequeñas. En las playas se observaría un proceso de erosión y las aguas superficiales y subterráneas aumentarían su salinización. Estas zonas podrían verse gravemente afectadas por inundaciones y marejadas bajo condiciones meteorológicas extremas.

Las instalaciones industriales y la infraestructura de conexión serán las más vulnerables por el ascenso del nivel del mar. El ascenso de la temperatura aumentaría la vulnerabilidad de las empresas que requieren de procesos de congelación, enfriamiento o las que dependan de materias primas derivadas de actividades que resultaran afectadas por las variaciones en la temperatura y distribución del agua como pueden ser la industria maderera, la textil, la de celulosa y papel, la alimenticia, etc. Este efecto sería notorio en el centro y norte de México principalmente.

El ascenso de la temperatura tendría como consecuencia la redistribución del recurso hídrico. Al haber escasez de agua, su costo aumentaría, afectando directamente al costo de la energía eléctrica y de los combustibles fósiles.

Algunos resultados muestran a la región centro del país con una vulnerabilidad del sector energético alta y muy alta. También sobresale la vulnerabilidad de las plataformas petroleras en las costas del Golfo de México, como resultado de un posible aumento en el nivel del mar.

La vulnerabilidad se determina por cada estado del país en términos de la distribución, densidad, crecimiento, población urbana, morbilidad y consumo de agua por habitante.

La zona del centro del país, siendo esta la más densamente poblada en la actualidad, existiría una alta morbilidad, aunque la mayor morbilidad se presentaría en algunos estados de la porción sur de las vertientes del Golfo de México y del Océano Pacífico, coincidiendo con zonas tropicales húmedas semi-secas.

Tomando en cuenta que la mayor parte de la población mundial se concentra en las ciudades, también se han evaluado las consecuencias del cambio climático en la vida urbana. En el Primer Taller de Estudio-País se presentó el informe Cambios climáticos y sus posibles consecuencias en las ciudades de México, que muestra la vulnerabilidad de las ciudades ante el desabasto de agua por la reducción de las precipitaciones y por la disminución en la recarga de los mantos acuíferos y, por otro lado, las inundaciones que se pueden presentar por precipitaciones extremas.

CAPITULO II CONCEPTOS FUNDAMENTALES

En el capítulo anterior se describieron las características fisiográficas de la república mexicana y lo vulnerable que es ante el cambio climático. A continuación, en este capítulo se mencionaran algunos conceptos fundamentales sobre la hidrología, además de la descripción de la cuenca hidrográfica.

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

Aceptando esta definición, debemos limitar la parte de la ingeniería a una rama que determine la ocurrencia de eventos como avenidas máximas y sequías.

El objetivo de la Hidrología aplicada es la determinación de esos eventos, que son análogos a las cargas de diseño en el análisis estructural, por poner un ejemplo de ingeniería civil. Los resultados son normalmente solo estimaciones, con aproximaciones limitadas en muchos casos y burda en algunos otros. Sin embargo, estas estimaciones rara vez son menos aproximadas que las cargas usadas en el análisis estructural.

La hidrología es una parte interesante de la ingeniería, pero en algunos aspectos resulta notablemente diferente de la mayoría de las disciplinas integrantes de esta. Los fenómenos naturales con los cuales se relaciona no se prestan, al menos hasta ahora, a los análisis rigurosos de la mecánica; por esta razón existe una mayor variedad de métodos, mayor latitud para el criterio y una aparente falta de precisión en la solución de los problemas. A pesar de esto último, la precisión de las soluciones hidrológicas se compara favorablemente con otros tipos de cálculo en ingeniería; donde las incertidumbres se ocultan a menudo con el uso de los factores de seguridad, o bien con los procedimientos referentes a la determinación de las propiedades de los materiales.

Las herramientas con que hoy cuenta el hidrólogo son múltiples y muy variadas, pero con frecuencias le son útiles solo para situarse dentro del orden de magnitud de los parámetros que maneja. Generalmente, cada problema hidrológico es único en cuanto se trata con un conjunto diferente de condiciones físicas dentro de una cuenca hidrológica específica, lo que implica que el que trabaja con este tipo de problemas no puede tener una filosofía conformista. Cada evento es un problema de investigación: este es uno de los grandes encantos de la hidrológica. No es un campo dogmático de la profesión de la ingeniería, sino un reto intelectual sistemático, es un ejercicio de la imaginación y de la inteligencia, de la prudencia y el sentido de la observación.

QUÉ ES UN RIESGO

Riesgo = Peligrosidad x Vulnerabilidad

La peligrosidad es conocida en inglés como “hazard” y en francés como “aléa”, hace referencia a la probabilidad de que un determinado fenómeno natural, de una cierta extensión, intensidad y duración, con consecuencias negativas, se produzca.

El análisis de períodos de retorno o la representación de mapas de frecuencia es objeto de esta primera parte.

La vulnerabilidad hace referencia al impacto del fenómeno sobre la sociedad, y es precisamente el incremento de la vulnerabilidad el que ha llevado a un mayor aumento de los riesgos naturales.

La vulnerabilidad abarca desde el uso del territorio hasta la estructura de los edificios y construcciones, y depende fuertemente de la respuesta de la población frente al riesgo.

Consecuencias

Los daños producidos por los riesgos naturales pueden ser:

- Directos (personas, bienes, agricultura y ganadería, infraestructuras, patrimonio cultural,...).
- Indirectos (interrupción de obras y de sistemas de producción, disminución del turismo,...).

Los mapas de riesgo se elaboran estableciendo unos criterios numéricos para estimar objetivamente la vulnerabilidad y la peligrosidad.

El riesgo en un punto o en una zona se determina a partir de los valores anteriores, aunque no necesariamente se calcula como producto de ambos.

Recientemente se ha planteado para el cálculo del riesgo la introducción de la respuesta de la población frente al riesgo; considerándose que cuanto mejor sea esta respuesta, menor será el riesgo. Es por ello, que en algunas regiones esta respuesta se evalúa mediante un criterio numérico y posteriormente se resta su valor al producto de peligrosidad por vulnerabilidad:

Riesgo = [Peligrosidad x Vulnerabilidad] – Capacidad de respuesta

DESCRIPCIÓN DE LOS RIESGOS, TIPOLOGIA

Clasificación de los Riesgos

Los riesgos naturales se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Meteorológicos/climáticos
- Geofísicos
- Biológicos
- Antropogénicos
- Mixtos

Una gran parte de los riesgos naturales están fuertemente vinculados a las condiciones atmosféricas.

- Riesgos en que la peligrosidad está exclusivamente vinculada a las condiciones meteorológicas o climáticas:
 - Temporales de viento
 - Olas de aire frío o de calor
 - Tornados y huracanes
 - Granizo
 - Nevadas extraordinarias
 - Tempestades eléctricas.
- En un segundo lugar se hallarían aquellos en que intervienen otros factores, ya sean naturales o antrópicos:
 - Aludes (geología-meteorología)
 - Inundaciones (meteorología-hidrología)
 - Deslizamientos de ladera vinculados, en algunos casos, a la lluvia (meteorología-geología).
 - Grandes incendios forestales
 - Sequías.
- Finalmente cabe hablar de aquellos riesgos naturales de origen no atmosférico pero que producen un impacto importante en la atmósfera:
 - Erupciones volcánicas
 - Las situaciones de fuerte contaminación atmosférica (no natural),..., éstas se hallarían en la frontera entre riesgos tecnológicos y naturales.

Entre los riesgos de origen geofísico cabe destacar:

- Terremotos
- Volcanes
- Subsidiencias
- Deslizamientos de terreno
- Caída de piedras
- Aludes
- Los relacionados con problemas costeros, esencialmente hundimiento de la costa y erosión

Algunos de éstos se hallan relacionados con desencadenantes de origen meteorológico o antropogénico.

- Finalmente, entre los riesgos de origen biológico merece destacarse:
 - Plagas
 - Pestes
 - Epidemias

GESTIÓN DE LOS RIESGOS NATURALES - Metodología Y Procedimientos De Análisis De Los Riesgos

Dentro de la cadena de actuaciones frente a los riesgos naturales deben conocerse, de forma genérica, las medidas de prevención, tanto estructurales como no estructurales, el papel de la predicción a corto, medio y largo plazo; los agentes implicados en los sistemas de alerta; la necesaria educación del comportamiento frente al riesgo así como algunos aspectos relativos a la legislación y sistemas de seguros en relación con los riesgos naturales. Todo ello puede enmarcarse dentro de las conclusiones de la Década Internacional para la mitigación de las catástrofes naturales (DIPCN, 1990-1999), entre las cuales cabe hacer especial incidencia en la necesaria evaluación de la peligrosidad, vulnerabilidad y cartografía del riesgo.

CADENA DE ACTUACIONES

Prevención y Predicción

La prevención contempla todas las medidas realizadas con anticipación a fin de disminuir o evitar los daños producidos como consecuencia del desencadenamiento del riesgo en cuestión. Se trata de medidas realizadas a largo plazo en función de los riesgos dominantes y que en general contemplan la adecuada gestión del territorio en función del mapa de riesgos así como actuaciones de carácter estructural (obras de ingeniería, mejoras arquitectónicas, etc.), o no-estructural (legislación y normativas sobre los usos del suelo en zonas de riesgo, etc.).

Usualmente, ante el peligro de inundaciones, la sociedad ha respondido de tres maneras. Las sociedades primitivas y pre-industriales, optaban por vivir, en general, en armonía con el territorio, respetando las zonas más inundables y huyendo rápidamente hacia puntos más altos cuando las campanas, por ejemplo, daban el toque de inundación. A esto se añadían medidas de carácter mágico o espiritual como el rezo a los dioses, o, ya más adelante, oraciones y rogativas. Las medidas estructurales eran mínimas y muy locales. Con el crecimiento de la población y la revolución pre-industrial, que en nuestro caso llevó las fábricas al lado de los ríos, se comenzaron a tomar medidas estructurales, en las cuales influyó mucho el ejemplo de actuación sobre el Missisipi iniciado por los norteamericanos.

La solución mediante medidas estructurales ha dominado hasta nuestros días, empujada en gran parte por una sociedad que pide, para este tema, el riesgo cero, aunque sin modificar sus hábitos y consciente de la gran especulación sobre el terreno.

En los últimos años y tal como ya manifiestan las conclusiones de la Década Internacional para la Mitigación de los Desastres Naturales se ha iniciado una línea que apunta a la aceptación de la convivencia con el riesgo a través de un equilibrio entre las medidas estructurales y las no estructurales, más respetuosas con el medio.

A modo de ejemplo, a parte de las soluciones legislativas o la creación de determinados organismos, dentro de las soluciones buscadas para intentar disminuir las inundaciones han habido dos tipos básicos de proyectos: los que hacían referencia a la modificación y/o intento de mejora global de la red hidrográfica y los que se basaban en la realización de estudios de soluciones individuales para cada río. Entre estas actuaciones cabe destacar, además de la construcción de embalses, la idea de desviar los principales ríos que atraviesan las ciudades llevándolos fuera del núcleo urbano, solución practicada, o los proyectos de rectificación mediante la construcción de muros de contención o la canalización de tramos de los ríos. En los últimos 100 años se han hecho numerosas actuaciones de este tipo, principalmente motivadas por la respuesta inmediata a una inundación previa, más que a un plan director de carácter preventivo.

La predicción se refiere a la anticipación del fenómeno con una mayor o menor anticipación, la cual dependerá del tipo de fenómeno, ya que en algunos casos ésta tan solo se puede realizar con pocas horas de anticipación y difícilmente se puede determinar el lugar de afectación. Hay fenómenos para los que ni tan sólo es posible realizar una predicción (terremotos). Para otros, lo único que se puede anticipar es si las condiciones ambientales van a ser favorables para su potencial desencadenamiento en aquellos lugares en que exista un cierto riesgo (aludes, deslizamientos).

La predicción se encuentra limitada, no solamente por el conocimiento de los factores que intervienen en la manifestación del propio riesgo sino también por las limitaciones que afectan a las propias técnicas de predicción, siendo necesaria en todos los casos una mejora continuada dónde se integren las últimas tecnologías.

En conclusión: La prevención se refiere a una planificación para un futuro no necesariamente inmediato, dentro de los términos de sostenibilidad, generando medidas que han de tener una duración prolongada, es decir, con un cierto carácter estático en contraposición a la predicción, más dinámica y que genera información y resultados en permanente actualización.

Intervención inmediata: La actuación inmediata se refiere a la gestión del riesgo una vez desencadenado (tareas de seguimiento del fenómeno, de salvamento, evacuación, coordinación de los cuerpos implicados como pueden ser bomberos o servicios de Protección Civil, etc.).

Esta tarea está desarrollada normalmente por un único organismo rector o bien por los organismos regionales o municipales más vinculados a las zonas afectadas, o bien por la combinación de las dos posibilidades.

Prevención, predicción y gestión inmediata no son aspectos desvinculados entre sí. Una buena gestión requiere una buena predicción, poniendo en juego medidas

desarrolladas en la parte de prevención, como puede ser el caso de algunas medidas estructurales o de la ocupación racional del territorio en relación con el riesgo, factor que influirá sobre las tareas de salvamento. Como consecuencia de esta vinculación, en algunas circunstancias se considera la prevención, predicción y los sistemas de actuación y alerta, tal como se han definido previamente, formando parte de una única denominación. En tal caso toda la cadena de actuaciones queda agrupada bajo el nombre de “prevención” porque al fin y al cabo de lo que se trata es de disminuir los posibles daños provocados por la materialización del riesgo natural en cuestión.

Educación del comportamiento ante el riesgo

Todos estos pasos, implican diferentes actores, pero hoy en día se considera que es la sociedad en conjunto y los individuos que la componen, los principales interlocutores ante el riesgo. Esto implica una necesaria concienciación y educación de la población, cada vez más alejada del conocimiento del territorio dónde se establece y, por el contrario, más exigente con la minimización de estos riesgos. Ya visto que es la hidrología y cuales son las prevenciones que se pueden tomar en cuenta, en lo que llamamos hidrología de riesgo seguiremos con las partes de la cuenca hidrológica y algunas características de esta.

Este último paso juega un papel muy importante en la prevención de un desastre

Una cuenca homogénea es la que tiene cuatro características típicas: Un cauce principal definido, pendiente uniforme del cauce y de las laderas, tipo y uso del suelo uniforme, y lluvias uniformemente repartidas sobre el área.

- El parteaguas es una línea imaginaria formada por los puntos mayores que un nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas.

- El área de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parte aguas (Fig. 2.2).

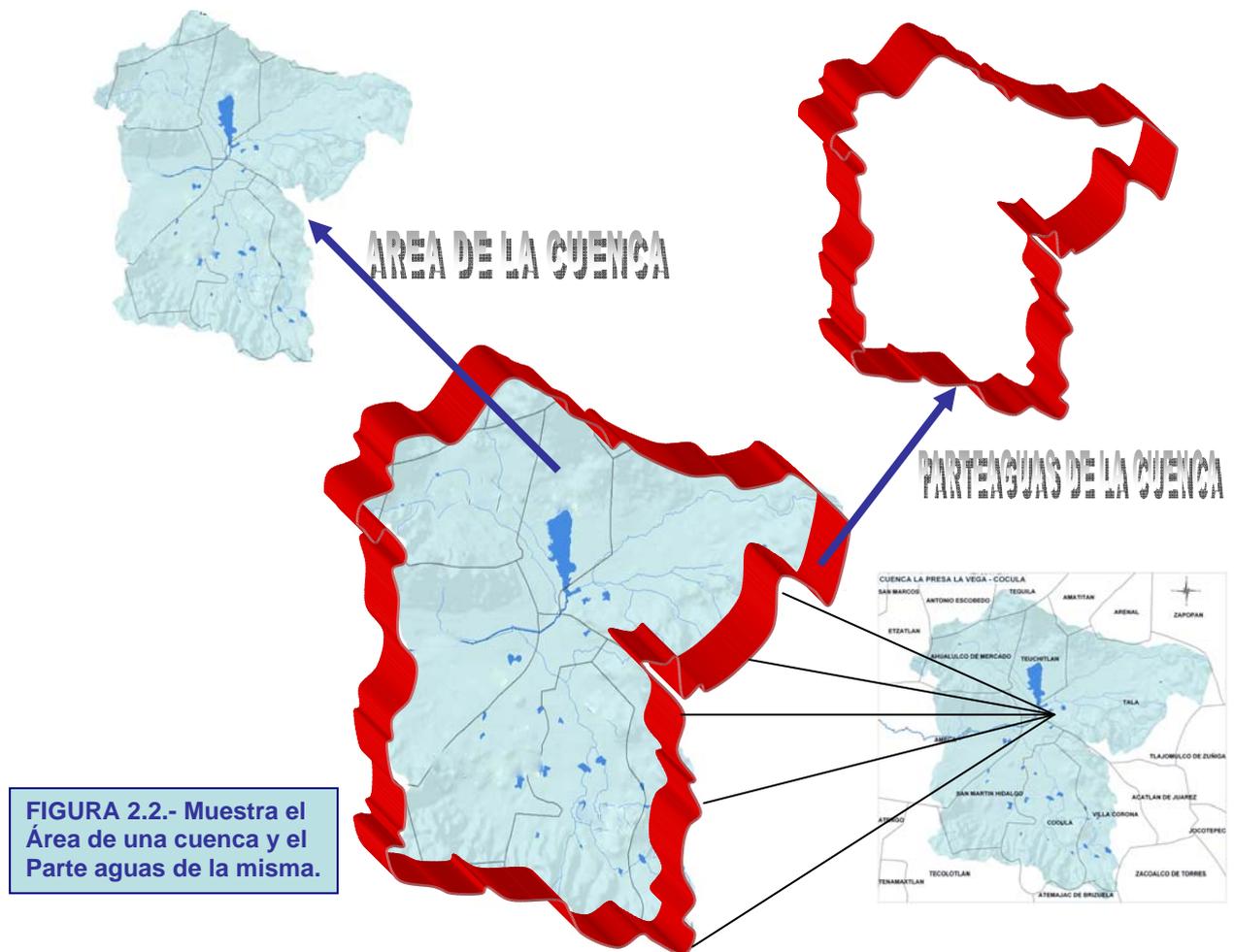


FIGURA 2.2.- Muestra el Área de una cuenca y el Parte aguas de la misma.

- La corriente principal de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de la misma. Nótese que esta definición se aplica únicamente para las cuencas exorreicas. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y solo una corriente principal. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida se les llaman cuencas tributarias o subcuencas (Fig.2.3).

Entre más corrientes tributarias tenga una cuenca, mayor será su respuesta ante una precipitación. Por ello, se han propuesto un cierto número de indicadores de dicho grado de bifurcación, algunos de los cuales son los siguientes:



FIGURA 2.3.- Tipos de corrientes en una cuenca.

- El orden de corrientes se determina como se muestra en la figura siguiente. Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una de orden 2 solo tiene tributarios de orden de primer orden, etc. Dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc., pero, por ejemplo, una corriente de orden 2 y una de orden 3 forman otra de orden 3. El orden de una cuenca es el mismo que el de la corriente principal en su salida; así por ejemplo, el orden de la cuenca de la figura 2.4 es 4.



FIGURA 2.4.- Tipos de corrientes en una cuenca según el orden que les corresponden.

Otros indicadores del grado de bifurcación o eficiencia de una cuenca son la densidad de corrientes D_s , definida como el número de corrientes perennes e intermitentes por

unidad de área y la densidad de drenaje Dd , definida como la longitud de corrientes por unidad de área:

$$Ds = \frac{Ns}{A}$$

$$Dd = \frac{Ls}{A}$$

Donde Ns = número de corrientes perennes e intermitentes

Ls = longitud total de las corrientes

y A = área de la cuenca

Un orden de corrientes alto o una densidad elevada refleja una cuenca altamente disectada, que responde rápidamente a una tormenta. Las densidades u órdenes de corrientes pequeñas se observa donde los suelos son muy resistentes a la erosión o muy permeables; donde estos indicadores son elevados, los suelos se erosionan fácilmente, las pendientes son altas y la cobertura vegetal es escasa.

Uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. Dado que está pendiente varía a lo largo del cauce es necesario definir una pendiente media; para ello existen varios métodos, de los cuales aquí se mencionan tres:

- a) La pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividido entre su longitud medida en planta (Fig. 2.5).

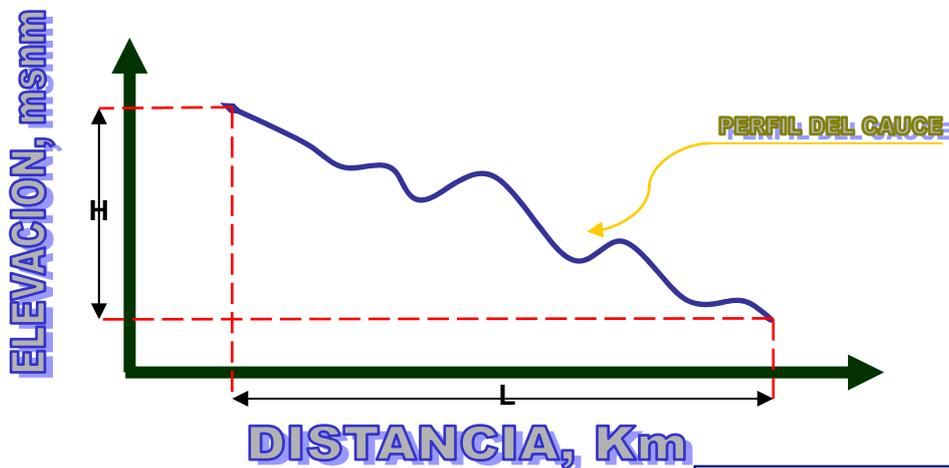


FIGURA 2.5.- Grafica de la pendiente

- b) La pendiente media es la línea recta que, apoyándose en el extremo de aguas debajo de la corriente, hace que se tengan áreas iguales entre el perfil del cauce y arriba y debajo de dicha línea (Fig. 2.6).



FIGURA 2.6.- Grafica de la pendiente

c) Taylor y Schwarz proponen calcular la pendiente media como la de una canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión (Fig.2.7).

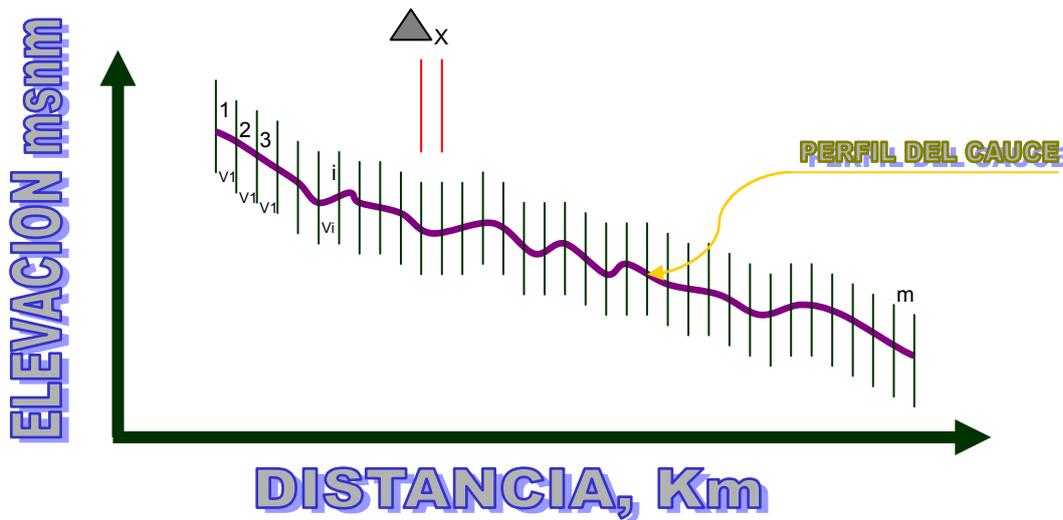


FIGURA 2.7.- Grafica de la pendiente media por el método de Taylor y Schwarz.

La velocidad del recorrido del agua del tramo i puede calcularse como:

$$V_i = k\sqrt{S_i}$$

donde k es un factor que depende de la rugosidad y la forma de la sección transversal y S_i es la pendiente del tramo i . Además por definición:

$$V_i = \frac{\Delta x}{t_i}$$

donde Δx es la longitud del tramo i y t_i es el tiempo de recorrido de ese tramo. de las ecuaciones pasadas se obtiene:

$$t_i = \frac{\Delta x}{k\sqrt{S_i}}$$

por otra parte, la velocidad media de recorrido en todo el cauce dividido en m tramos es:

$$V = \frac{L}{T} = k\sqrt{S}$$

donde L es la longitud total del cauce, T es el tiempo total de recorrido y S es la pendiente media buscada. El tiempo T será naturalmente:

$$T = \sum_{i=1}^m t_i = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta x}{k\sqrt{S_i}}$$

y la longitud L:

$$L = \sum_{i=1}^m \Delta x = m\Delta x$$

Finalmente, usando las ecuaciones anteriores y despejando S se obtiene:

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

Mediante un razonamiento semejante se puede obtener la siguiente fórmula para el caso en que las longitudes de los tramos no sean iguales:

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

donde l_i es la longitud del tramo i.

Las corrientes se clasifican de varias maneras, pero las más interesantes en la ingeniería hidrológica son tal vez las siguientes:

- a) Por el tiempo en que transportan agua. Según esta clasificación las corrientes pueden ser perennes, intermitentes o efímeras (Fig. 2.8).

En una corriente perenne el punto más bajo del cauce se encuentra siempre abajo del nivel de aguas freáticas. Estas corrientes transportan agua durante todo el año y siempre están alimentadas, totalmente o en parte, por el agua subterránea, es decir, son efluentes. Una corriente intermitente transporta agua durante la época de lluvias de cada año, cuando el nivel freático asciende hasta quedar por encima del punto A ver figura. En época de secas el nivel freático queda por debajo de dicho punto y la corriente no transporta agua, salvo cuando se presenta alguna tormenta. En el caso de las corrientes efímeras o influentes el nivel freático está siempre por debajo del punto A y transportan agua inmediatamente después, y, en este caso, alimentan a los almacenamientos de agua subterránea.

- b) Por su posición o edad geológica. De acuerdo con esta clasificación los ríos pueden ser montañosos o juveniles, de transición o maduros, o bien planicie o viejos (Fig. 2.9).

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

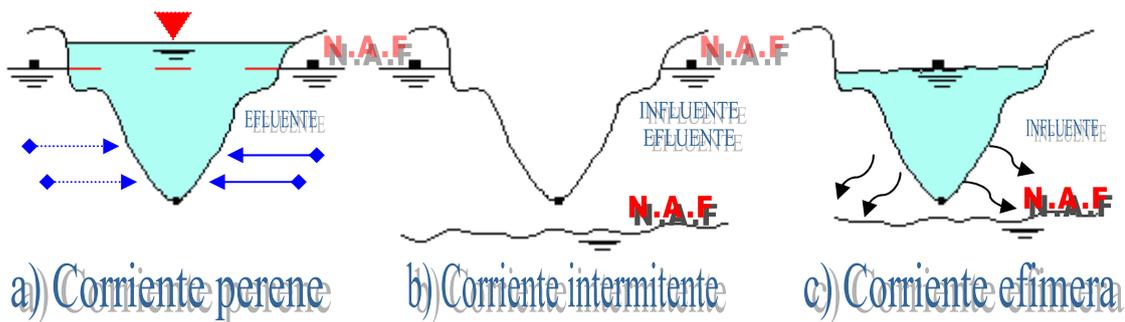


FIGURA 2.8.- Clasificación de corrientes por el tiempo en que transportan agua.

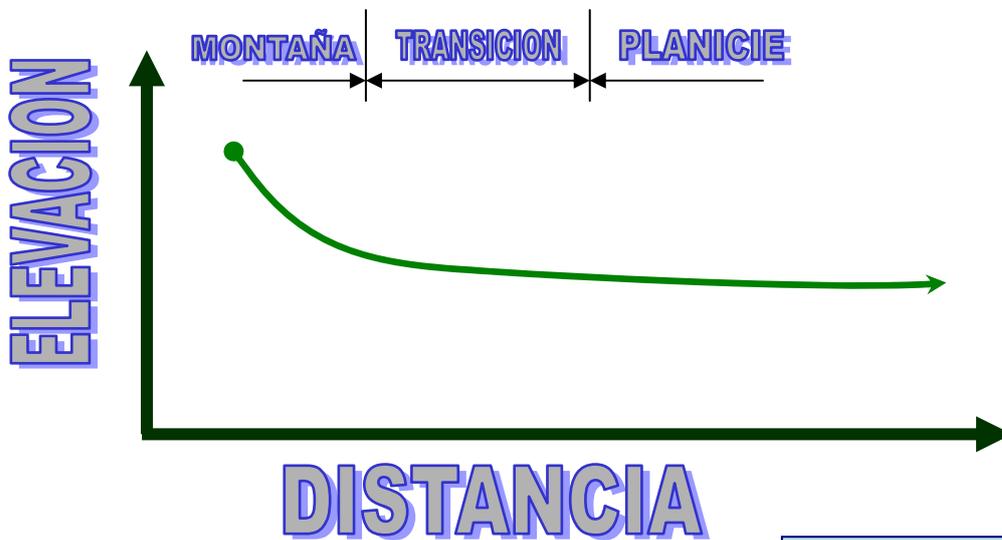


FIGURA 2.9.- Clasificación de corrientes por edad geológica.

CAPITULO III INUNDACIONES

DEFINICIÓN DE INUNDACIÓN

De acuerdo con el glosario internacional de hidrología, la definición de oficial de inundación es: "aumento del agua por arriba del nivel normal de un cauce". En este caso "nivel normal" se debe entender como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, inundación es una elevación mayor a la habitual en un cauce.

Con lo anterior, se entiende por inundación: "aquel evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla en alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura".

Las inundaciones no sólo dañan la propiedad y amenazan la vida de seres humanos y animales, también tienen otros efectos como la erosión del suelo y la sedimentación excesiva. A menudo quedan destruidas las zonas de desove de los peces y otros hábitats de la vida silvestre. Numerosos embalses ven reducida su vida útil al verse colmatados en un tiempo rápido por la gran cantidad de sedimentos que aportan las crecidas de los ríos que vierten a éstos. Las corrientes muy rápidas ocasionan daños mayores, mientras que las crecidas prolongadas de las aguas obstaculizan el flujo, dificultan el drenaje e impiden el empleo productivo de los terrenos. Se ven afectados con frecuencia los estribos de los puentes, los peraltes de las vías, las canalizaciones y otras estructuras, así como la navegación y el abastecimiento de energía hidroeléctrica.

Las inundaciones son eventos que se presentan por desbordamiento en los tramos bajos de las corrientes naturales donde la pendiente del cauce es pequeña y la capacidad de transporte de sedimentos es reducida ver Fig. 3.1.

La definición de las zonas inundables está relacionada con el concepto de "ronda". Esta es una franja en la cual quedan incluidos el cauce mayor y una zona de seguridad. Por fuera de la "ronda" quedan las planicies que son potencialmente inundables durante las crecientes extraordinarias.

En la mayoría de los casos las inundaciones que son producidas por crecientes extraordinarias no pueden evitarse y entonces se procede a mitigar sus efectos mediante los métodos de Control de Inundaciones.

Se conocen como Zonas Inundables las que son anegadas durante eventos extraordinarios, por ejemplo aguaceros intensos, crecientes poco frecuentes o avalanchas. No se incluyen entre las zonas inundables los cauces mayores o rondas de los ríos, los cuales son ocupados con frecuencia del orden de una vez en 10 años ver Fig. 3.2.



FIGURA 3.1.- .zonas urbanas inundadas en la Cd. de México en 2006.



Las Zonas inundables se clasifican de acuerdo con las causas que generan las inundaciones.

Estas causas son las siguientes:

Encharcamiento por lluvias intensas sobre áreas planas,

Encharcamiento por deficiencias de drenaje superficial.

Desbordamiento de corrientes naturales.

Desbordamiento de ciénagas.

Avalanchas producidas por erupción volcánica, sismos, deslizamientos y formación de presas naturales.

Obstáculos al flujo por la construcción de obras civiles: Puentes, espolones y obras de encauzamiento, viviendas en los cauces y represamientos para explotación de material aluvial.

Estas causas pueden presentarse en forma individual o colectiva.

Las inundaciones de que trata en este capítulo son eventos que se presentan en zonas aledañas a los cauces de las corrientes naturales por causa de desbordamiento de las mismas. Las áreas que están sujetas a las inundaciones se denominan Llanuras de Inundación.

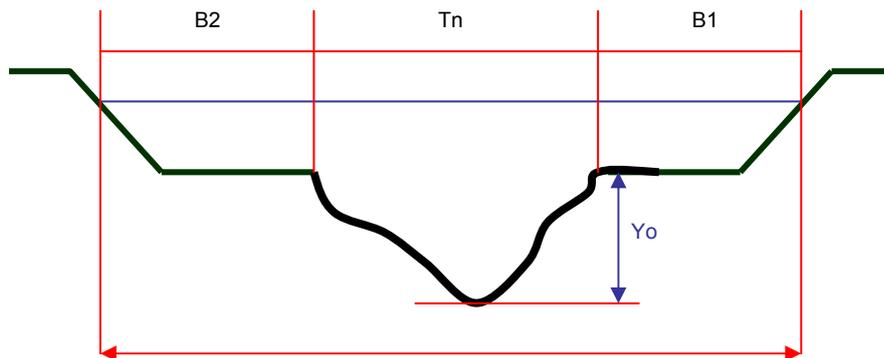


FIGURA 3.2.- En la sección típica simplificada se observan el canal principal y las llanuras de inundación. Cuando se presenta la inundación, por desbordamiento del canal principal, el espejo del agua queda conformado por la boca del canal principal y por las dos franjas inundables; Este ancho total se determina la Zona Inundable y es igual a T donde :

$$T = T_n + B_1 + B_2$$

La boca del canal principal tiene un ancho T_n ; las Franjas inundables o llanuras de Inundación, B_1 y B_2 , están limitadas por condiciones topográficas o por diques de encauzamiento.

El nivel del agua en la sección depende del caudal de las condiciones hidráulicas del canal y del ancho de la zona inundable

Y_o es la profundidad máxima del agua en la sección del flujo.

Las magnitudes y los efectos de las inundaciones dependen de las características de las crecientes que son generadas por lluvias intensas, y de otros eventos relacionados con ellas, como son los deslizamientos de taludes, la formación y el rompimiento de presas naturales, y las obstrucciones al flujo por destrucción de obras civiles.

En lechos aluviales el transporte de sedimentos juega un papel importante en las variaciones que sufre el canal principal a lo largo del tiempo y en su capacidad para transportar las crecientes. Los procesos de depósito y de socavación se activan de acuerdo con las magnitudes de las velocidades del agua; así, durante los estiajes y los períodos de aguas medias predominan los fenómenos de depósito porque las velocidades son relativamente bajas y la capacidad de transporte de sedimentos es reducida. Cuando llegan las crecientes se aumentan las velocidades de flujo y por tanto se incrementan los procesos erosivos y los ataques contra las márgenes.

Los problemas de inundaciones son particulares y pueden ocurrir tanto en cauces de montaña como en cauces de llanura, aun cuando son más frecuentes en estos últimos.

Algunos de los problemas que se presentan con las inundaciones son los siguientes:

Anegamiento de las llanuras de inundación y daños en viviendas, vías de comunicación, y producción agropecuaria, con pérdida de vidas humanas en algunos casos.

Drenaje lento de las áreas inundadas las cuales se convierten en depósito de aguas prácticamente estancadas. Esta situación genera problemas sanitarios sobre la población.

Ataques del flujo sobre las márgenes del cauce principal lo cual produce cambios de curso permanentes y pérdida de áreas productivas.

Las crecientes son eventos extraordinarios que se presentan en los cauces de las corrientes naturales durante las cuales las magnitudes de los caudales superan con creces los valores medios que son normales en dichas corrientes.

Son muy pocos los casos en los cuales es posible solucionar los problemas de inundaciones de forma permanente. Algunas de las razones más importantes que no permiten la solución son el costo de las obras, los conflictos socioeconómicos de las regiones que conllevan intereses en el uso de la tierra, y la escasa factibilidad económica de este tipo de proyectos. Por esta razón se utilizan los términos Control de Inundaciones o Mitigación de los efectos de las Inundaciones para indicar que estos proyectos tratan de prevenir daños mayores y ofrecen protección hasta un cierto nivel de riesgo.

El costo de las obras está en función de la frecuencia del evento de inundación. En la protección de campos agrícolas, por ejemplo, la frecuencia de diseño contra inundaciones puede estar entre 5 a 25 años porque eventos mayores pueden requerir de obras que valen más que los cultivos que se van a proteger.

En otros casos, en los cuales las inundaciones pueden ocasionar pérdidas de vidas humanas puede ser preferible instalar sistemas de alerta o reubicar la población que se encuentra en peligro, antes que proyectar obras para frecuencias de 10.000 años o más.

Los Incas hablaban del tinpu llatu (tiempo caliente) para aludir al proceso que ocurría, sin intervalo fijo de aparición y cuya intensidad dependía de la cantidad de desequilibrio que hubiese sembrado el hombre en la Pachamama (la madre tierra).

Las siglas ENSO hacen referencia al fenómeno que tiene lugar por conjunción algunos años del episodio marítimo de El Niño y una fase positiva de la oscilación Sur (Southern Oscillation) en el Pacífico Meridional. Es necesario precisar que El Niño, como suceso marítimo es un hecho que ocurre cada el año frente a las costas pacíficas del Ecuador y Perú, conocido desde hace siglos por los pescadores que lo identifican con la aparición en fechas navideñas (de ahí el nombre de El Niño, en honor al Niño Dios), de aguas cálidas mar adentro en un sector recorrido por la corriente fría de Humboldt o del Perú, rica en nutrientes que alimentan el fitoplancton y favorecen la presencia de ricas pesquerías de anchoveta. La llegada de aguas cálidas en Navidad empobrece el contenido de nutrientes causando la caída de la actividad pesquera (Fig. 3.3).

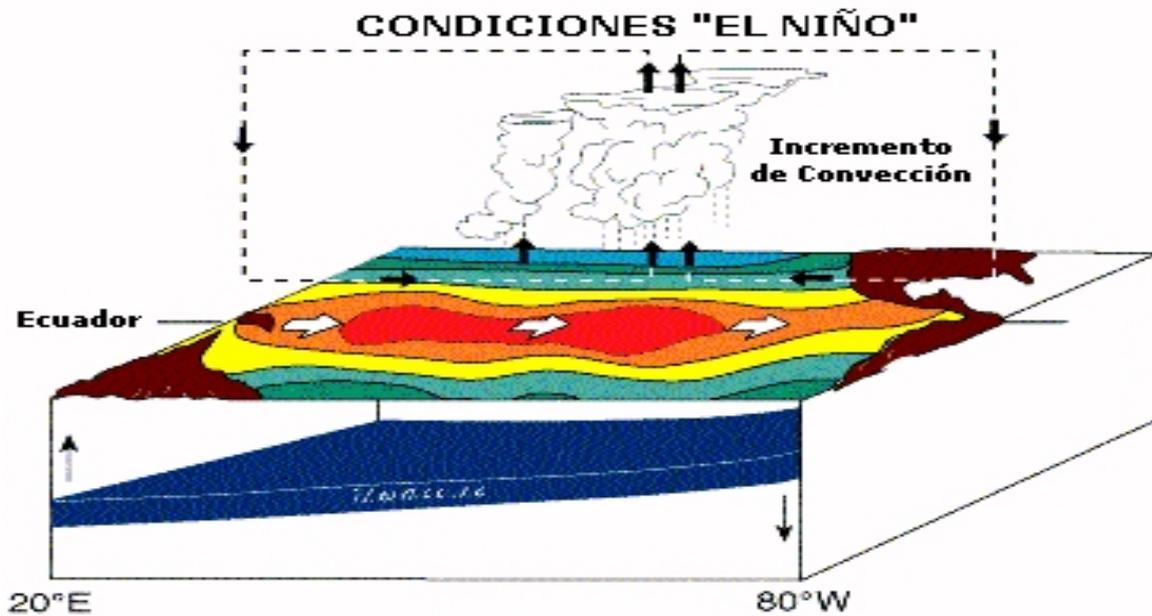


FIGURA 3.3.- El diagrama muestra las condiciones en que se presenta el fenómeno denominado "El Niño"

No obstante, algunos años El Niño viene con intensidad redoblada, rebasando los límites espacio- temporales señalados; de manera que las aguas cálidas ocupan un amplio sector del Pacífico Ecuatorial y permanecen en ese estado un año y más. Entonces se registran temperaturas superiores a las habituales, lluvias intensas e inundaciones, es decir, un acusado cambio ambiental con repercusiones muy negativas para la cadena trópica generada a espesas de la corriente de Humboldt, al originar ingente mortandad de plancton, graves perjuicios a las pesquerías y gran mortandad de aves acuáticas, efectos característicos de un episodio de ENSO en las costas de Ecuador y Perú.

En los estudios de drenaje de aguas proveniente de las lluvias, protección de márgenes contra la acción de ríos, proyectos de puentes, cruces subfluviales, y control de inundaciones es necesario conocer los caudales de creciete que se van a utilizar en los diseños de las obras civiles correspondientes. Estos caudales quedan definidos por los siguientes valores:

- Período de retorno (Tr)
- Caudal pico (Qp)
- Hidrograma de creciete

En algunos casos particulares, como en los estudios de puentes, es suficiente conocer Tr y Qp; en otros, por ejemplo en los diseños de embalses, es fundamental determinar además el hidrograma de creciete. Los métodos que se aplican al cálculo de las crecietes dependen de la calidad de la información disponible.

Cuando existen registros confiables de limnógrafo en una estación hidrométrica localizada cerca al sitio determinado para el estudio entonces pueden hacerse análisis de hidrogramas para calcular picos de creciente de diferentes períodos de retorno y estimar sus correspondientes hidrogramas típicos. Si además se tienen registros adecuados de pluviógrafo en la cuenca vertiente se pueden relacionar hidrogramas con pluviogramas para determinar el Hidrograma Unitario y el Índice de Infiltración de la cuenca en estudio, y estimar por métodos probabilísticos los picos de creciente y sus correspondientes hidrogramas para diferentes períodos de retorno. Desafortunadamente la mayoría de las corrientes naturales no cuentan con información suficiente para aplicar esta metodología y por esa circunstancia está generalizado el uso de métodos empíricos que utilizan relaciones lluvia-cuenca-caudal.

El primero de los métodos empíricos es la Fórmula Racional que tiene aplicación en microcuencas homogéneas pequeñas en cálculo de obras de drenaje poco importantes. Su fórmula es sencilla y por eso se explica la vigencia que ha tenido, aunque últimamente está siendo reemplazada por otros métodos y su utilización está entrando en desuso:

$$Q_p = CiA \quad (1)$$

donde “i” es el factor de lluvia; “C, A” son factores de la microcuenca y “Qp” es el caudal pico.

El segundo método es el de los Hidrogramas Unitarios Sintéticos. En este caso la cuenca está representada por un Hidrograma Unitario (HU) que depende de la morfometría de la cuenca, por un Índice de Infiltración (F) y por un Caudal Base (Qb); la lluvia queda definida por cuatro factores: Intensidad (i), Duración (t), Hietograma y Tiempo de Retorno (Tr), y el Hidrograma de creciente es función de todos los factores:

$$\text{Hidrograma} = f (\text{HU}, F, Q_b, i, t, \text{Hietograma}, \text{Tr})$$

El método del Hidrograma Unitario es aplicable a microcuencas homogéneas que tengan áreas menores de 100 km². Este límite de área, sin embargo, no es absoluto y aunque algunas veces el método se podría utilizar en áreas mayores no es aconsejable hacerlo: La condición de que la microcuenca debe ser homogénea es mucho más restrictiva que la de la magnitud del área.

TIPOS DE INUNDACIONES.

Las inundaciones pueden clasificarse de acuerdo con:

Por el tiempo de duración.

Estas pueden ser:

- a. Inundaciones muy rápidas producidas por lluvias de intensidad muy fuerte (superior a 180 mm/h) pero muy cortas (menos de 1 hora).

La cantidad de lluvia totalizada no supera los 80 mm. Usualmente producen inundaciones locales en las ciudades y pueblos (inundaciones de plazas, garajes, sótanos, etc., debido a problemas de drenaje) o en pequeñas cuencas con mucha pendiente, produciéndose las llamadas “flash-floods” o inundaciones súbitas. Éstas últimas son peligrosas para los practicantes de deportes de riesgo (barranquismo, rafting,...) así como en los pueblos costeros y zonas turísticas próximos a las montañas del litoral. Los principales daños son debidos a coches arrastrados, cortes de electricidad y, en algunas ocasiones, uno o dos muertos, usualmente por imprudencia. La predicción meteorológica a corto término de la cantidad, intensidad y lugar afectado por las lluvias es prácticamente imposible. El radar meteorológico y los modelos de mesoescala podrán ser buenas herramientas para su previsión a muy corto plazo. Pese a esa posibilidad la mejor previsión frente a estos episodios es la educación de la población.

- b. Las inundaciones producidas por lluvia de intensidad fuerte o moderada (superior a 60 mm/h) y duración inferior a 72 horas.

Cuando estas lluvias afectan a ríos con mucha pendiente o con mucho transporte sólido, las inundaciones pueden ser catastróficas.

Es posible distinguir entre dos categorías:

1. Inundaciones catastróficas producidas por lluvias de fuerte intensidad durante dos o tres horas, y una duración total del episodio inferior a 24 horas.

Pese a que la zona más afectada pueda no ser muy grande (cuencas comprendidas entre 100 km² y 2000 km²), las lluvias o el mal tiempo afectan áreas superiores a 2000 km². En este caso el tiempo de respuesta es muy corto y pueden producirse muchos muertos. Pese a que la predicción meteorológica a corto término permite alertar del riesgo de lluvias fuertes, la incertidumbre sobre la cantidad, intensidad, duración y la zona más afectada por las lluvias es todavía grande. Además de mejorar las predicciones y modelos de transformación lluvia-caudal, la mejor previsión es la gestión correcta del territorio. La cartografía de la peligrosidad utilizando información histórica es también muy importante. Esta información puede ser instrumental (lluvia, caudal, altura del agua, etc.) u obtenida de los archivos y de la descripción de los eventos que han ocurrido.

2. Las inundaciones catastróficas producidas por lluvias de intensidad fuerte y moderada durante dos o tres días.

La zona afectada puede ser muy grande (más de 2000 km²). En este caso el tiempo de respuesta puede ser muy corto para la parte alta de los ríos, pero el valor máximo de la crecida del río puede llegar un día después de que se hallan producido las máximas intensidades pluviométricas. La gestión de estos episodios por parte de los organismos encargados de riesgos no es fácil, dada la gran extensión del evento, pero, habitualmente, hay el tiempo suficiente para activar los planes de emergencia. En este caso el número de víctimas es inferior al caso anterior y una gran parte de los muertos se produce por imprudencia. Por el contrario, los daños materiales son muy grandes.

Como en el caso anterior, la predicción meteorológica a corto plazo puede alertar del riesgo de lluvias fuertes sobre áreas extensas, pero la incertidumbre sobre la cantidad, la intensidad, la duración y la futura evolución meteorológica es todavía grande.

Además de mejorar las previsiones hidrometeorológicas, la mejor previsión es también la gestión correcta del territorio, la educación de la población y la eficacia de la cadena de alerta. Finalmente, en estos casos es posible a veces laminar la crecida a través de los embalses.

3. Las inundaciones extraordinarias producidas por lluvias de intensidad débil con valores fuertes pero muy cortos y locales, y de una duración superior a 3 días.

Se dispone de un tiempo de respuesta suficiente para laminar la crecida utilizando los embalses, y para desplegar los sistemas de socorro necesarios por los organismos encargados en cada país. En general no hay muertos y los daños materiales son inferiores a los del caso 2. Estas inundaciones no son frecuentes, siendo la estación más típica la de invierno.

Según el origen que las genere.

Pluviales (Por Exceso de lluvia).

Ocurren cuando el agua de lluvia satura la capacidad del terreno y no puede ser drenada, acumulándose por horas o días sobre el terreno (Fig. 3.4).

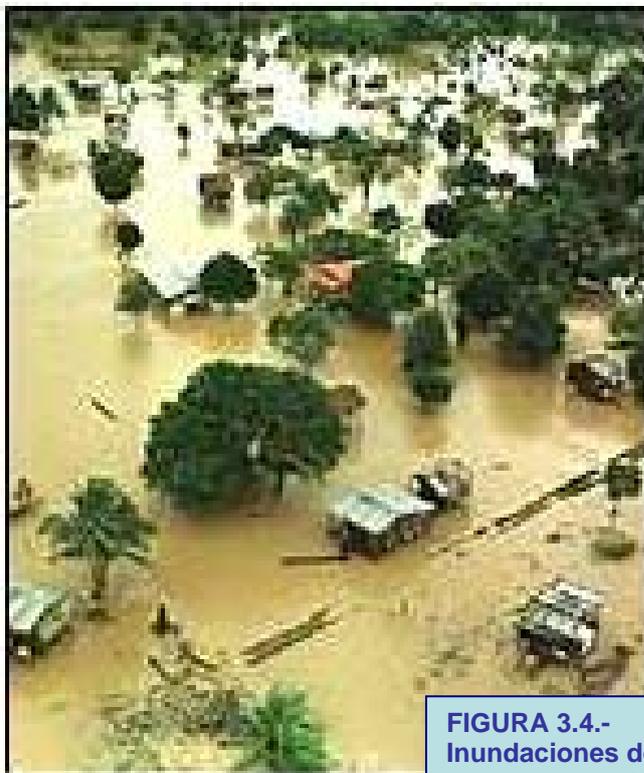


FIGURA 3.4.-
Inundaciones debido a
exceso de lluvia

Fluviales (Por Desbordamiento de Ríos).

La causa de los desbordamientos de los ríos (Fig. 3.5) y los arroyos hay que atribuirlos en primera instancia a un excedente de agua, igual que la sequía se atribuye al efecto contrario, la carencia de recursos hídricos. El aumento brusco del volumen de agua que un lecho o cauce es capaz de transportar sin desbordarse produce lo que se denomina como avenida o riada. Una avenida es el paso por tramos de un río, de caudales superiores a los normales, que dan lugar a elevaciones de los niveles de agua. Sus efectos pueden ser tan perniciosos que pueden causar:

- Peligro para la vida de las personas.
- Peligro para la vida animal.
- Daños en las explotaciones agrícolas y ganaderas.
- Inundación de Riberas.
- Daños en las vías de comunicación.
- Daños en edificaciones.
- Daños en las presas y otras obras hidráulicas.
- Cambios en el curso de los ríos.



FIGURA 3.5.- Inundaciones por desbordamiento de ríos

La aportación de agua al suelo se produce como consecuencia de la climatología, es decir, las precipitaciones; sin embargo, esta causa general no debe conducirnos a un error. Los cauces de los ríos y arroyos no permanecen siempre inalterados, no son rectos ni uniformemente anchos, no tienen la misma permeabilidad, no son ajenos a las

construcciones antrópicas, sino que en general están afectados por los deslizamientos del terreno, los arrastres de sólidos, la acumulación de sedimentos, los meandros, los estrechamientos, los puentes que se construyen para vadearlos, las represas, las obstrucciones del ramaje, la deforestación...

Pero la razón más importante del desbordamiento de los ríos es sin duda la provocada por las avenidas, fenómeno que sólo o en combinación con las causas anteriormente citadas provocan el rebosamiento de los cauces y la consiguiente inundación de sus márgenes. Son por ello especialmente conflictivas las zonas muy llanas, los meandros y los puntos en los que los ríos se estrechan o pierden profundidad por falta de dragado, especialmente en las desembocaduras donde se acumula el limo y la tierra arrastrada por la corriente que considerar de manera muy especial la creciente desaparición de la cubierta vegetal. El agua de lluvia es por naturaleza viajera y desde que se precipita sobre la tierra sufre los procesos de filtración, drenaje, retención, evaporación y consumo. La cubierta vegetal cumple entonces una función muy destacada al evitar el impacto directo de las gotas de agua sobre el terreno, impidiendo su erosión, al mismo tiempo que con sus raíces absorbe una parte de ella o dificulta su avance hacia los ríos, prolongando en éstos su tiempo de concentración. Además colabora en la disminución del transporte de residuos sólidos que posteriormente afectan a los cauces.

INUNDACIONES EN MEXICO

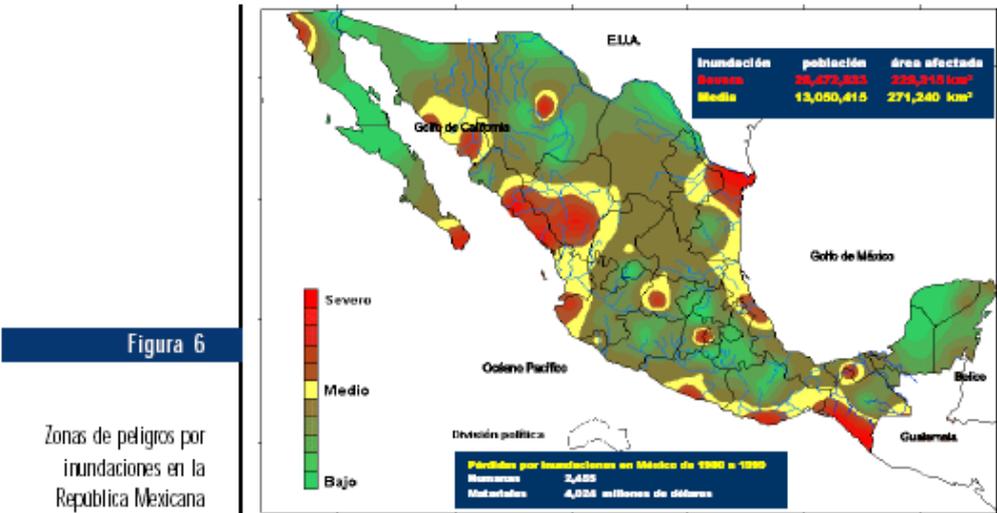


FIGURA 3.6.- Mapa de inundaciones en México.

DESPRENDIMIENTO DE LADERAS (Inestabilidad de taludes).

Los problemas de inestabilidad de laderas se cuentan entre los peligros naturales más destructivos de nuestro planeta, lo cual representa una de las mayores amenazas para la vida y bienes materiales de la población. Derrumbes, deslizamientos, flujos y movimientos complejos ocurren día con día alrededor del mundo. Cada año estos desastres ocasionan numerosas víctimas, heridos y damnificados, así como cuantiosas pérdidas económicas. El impacto que este tipo de peligros provoca es de mayor magnitud en países de escasos recursos debido a su alto grado de vulnerabilidad. Para prevenir futuros desastres asociados a inestabilidad de laderas, es de suma importancia que todos los miembros de la población conozcan este fenómeno y se mantengan atentos a las manifestaciones que lo preceden y los factores que lo generan.



FIGURA 3.7.- Fotografía de un derrumbe sobre una carretera.

En varios países se han tenido diferentes experiencias catastróficas en este respecto. En el Salvador, por ejemplo, en la Colonia Las Colinas un gran flujo de suelos y rocas con un volumen de aproximadamente 90,000-100,000 m³ sepultó por completo gran porcentaje de una zona habitada, ocasionando la pérdida de más de 500 vidas. Dicho movimiento se produjo a consecuencia de un sismo de 7.6 grados de magnitud que ocurrió el 13 de enero de 2001.

Durante el mes de diciembre de 1999, en la franja costera de Venezuela, se registraron precipitaciones extraordinarias durante casi 20 días como resultado de la presencia de una vaguada*. Días antes de la ocurrencia de estas lluvias, el huracán Lenny había afectado la costa oriental. Debido al exceso de agua infiltrada, hubo una saturación del suelo, lo que no sólo causó inundaciones devastadoras, sino también el reblandecimiento y la inestabilidad de las laderas. En la región central de la costa norte del país ocurrieron grandes deslizamientos en la parte más alta de la cordillera generando avalanchas violentas, y una destrucción excepcional en la angosta franja costera. De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, el desastre causado por las inundaciones y los movimientos de ladera, cobró la vida de 30,000 personas y afectó

vaguada*=Es una ondulación del viento en altura con movimientos del Oeste al Este, generando nubosidad y precipitaciones pluviales. Las vaguadas se pueden presentar en cualquier momento del año, pero con mayor frecuencia al inicio y al final de la temporada de lluvias.

81,000 viviendas. Las pérdidas materiales ascendieron a 3,211 millones de dólares y se reportó un alto nivel de deforestación.

En nuestro país, las lluvias torrenciales de octubre de 1999 ocasionaron cientos de deslizamientos y flujos en los estados de Puebla, Veracruz e Hidalgo. En la Sierra Norte de Puebla, las consecuencias fueron particularmente catastróficas en varias poblaciones de la región. En Teziutlán, Puebla un solo deslizamiento en la colonia La Aurora ocasionó la pérdida de 120 vidas, además de otras víctimas en colonias aledañas.

El estudio de estos peligros relacionados con la inestabilidad de laderas involucra la participación de grupos interdisciplinarios de especialistas, quienes analizan no sólo el proceso como tal, sino también los efectos socioeconómicos derivados. El primer paso para **reducir los efectos dañinos** causados por estos **fenómenos naturales** consiste en **difundir el conocimiento** y fomentar la **cultura** entre los habitantes de una nación acerca de ellos.

Muchas de las laderas se encuentran en una condición potencialmente inestable, de manera que los movimientos se pueden iniciar con facilidad. Esto es debido a diferentes factores. Por un lado, los materiales térreos formadores pueden ser poco resistentes o estar caracterizados por la presencia de sistemas de debilidad como diaclasas, fracturas, fallas, etc., lo cual implica una inestabilidad latente. O bien, las laderas pueden estar expuestas a factores externos, tales como la erosión, que juegan un papel muy importante en su desequilibrio. La presencia de lluvias excesivas y los temblores intensos son los principales mecanismos detonadores de inestabilidad en el contexto de los desastres naturales.

Existen diferentes términos con los cuales se hace referencia a la inestabilidad de laderas. Dichas expresiones se utilizan en las distintas disciplinas involucradas en su estudio.

De tal manera que conceptos tales como procesos de remoción en masa, movimientos de ladera, procesos gravitacionales, movimientos del terreno, proceso de ladera, son empleados ampliamente para indicar que una ladera no es estable. La inestabilidad de laderas está determinada, tanto en su origen como en su desarrollo, por diferentes mecanismos. Estos mecanismos sirven a su vez para clasificar los tipos de procesos de ladera existentes. De tal modo que se agrupan en cuatro categorías principales y una derivada de la combinación de éstas. Los mecanismos básicos de inestabilidad son los **caídos o derrumbes**, **flujos**, **deslizamientos** y las **expansiones o desplazamientos laterales**. Cuando el mecanismo inicial de un movimiento se transforma en otro(s), se dice que es un **movimiento complejo**.

Caídos o derrumbes

Los caídos o derrumbes son movimientos repentinos de suelos y fragmentos aislados de rocas que se originan en **pendientes abruptas** y **acantilados**, por lo que el movimiento es prácticamente de **caída libre**, **rodando y rebotando**.

Flujos

Movimientos de suelos y / o fragmentos de rocas ladera abajo, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla.

Los flujos pueden ser de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos. Entre los más importantes se pueden distinguir los siguientes:

Flujos de lodo

Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de arena y limo, y partículas arcillosas.

Mecanismos básicos de inestabilidad de laderas

Flujos o avalancha de suelos y rocas

Movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan partículas sueltas, fragmentos de rocas, y vegetación con aire y agua atrapados, formando una masa viscosa o francamente fluida que se mueve pendiente abajo. Estos movimientos también son conocidos como flujos de escombros.

Deslizamientos

Movimientos de una masa de materiales terrestres pendiente abajo, delimitada por una o varias superficies, planas o cóncavas, sobre las que se desliza el material inestable.

Por la forma de la superficie de deslizamiento, se distinguen:

Rotacionales

Deslizamientos en los que su superficie principal de falla resulta cóncava, es decir, hacia arriba en forma de cuchara o concha, definiendo un movimiento rotacional de la masa inestable de suelos y/o fragmentos de rocas.

A menudo estos deslizamientos rotacionales ocurren en suelos arcillosos blandos, aunque también se presentan en formaciones de rocas blandas.

Traslacionales

Deslizamientos en los que la masa de suelos y/o fragmentos de rocas se desplaza hacia fuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie principal más o menos plana, con muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Usualmente determinan deslizamientos someros en suelos granulares, o bien, están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de cambio de estado de meteorización en las rocas.

Expansiones o desplazamientos laterales

Movimientos de masas térreas que ocurren en pendientes muy suaves, que dan como resultado desplazamientos casi horizontales. Con frecuencia son causados por licuación, fenómeno en el que los materiales sueltos y saturados, predominantemente arenosos y limosos, adquieren el comportamiento de un fluido como consecuencia de las vibraciones causadas por un sismo.

Movimientos complejos

Los movimientos complejos son resultado de la transformación del movimiento inicial en otro tipo de movimiento al ir desplazándose ladera abajo. Las avalanchas de rocas y los flujos deslizantes son de los más comunes y pueden ocasionar cuantiosas pérdidas.

CONCENTRACIÓN DE FUERZAS ACTUANTES CONCENTRACIÓN DE FUERZAS RESISTENTES

Los procesos que ocasionan la inestabilidad de las laderas están determinados por dos tipos de factores; externos e internos. Los factores externos ocasionan un incremento en los esfuerzos o acciones que se dan en una ladera, es decir, producen una mayor concentración de las fuerzas motoras o actuantes, mientras que los factores internos reducen la resistencia de los materiales, en otras palabras, disminuyen la concentración de fuerzas resistentes.

Las fuerzas motoras se originan por el peso propio del material térreo que conforma el cuerpo de una ladera y por el peso de cualquier construcción que se coloque en la parte alta de la misma, como por ejemplo: casas, terraplenes usados para construir carreteras, etc. Las fuerzas resistentes son resultado de la fortaleza o resistencia característica de los materiales térreos que conforman las laderas.

Algunos de estos factores pueden ser propiciados por el ser humano, ya que éste ha transformado el equilibrio natural del entorno, de tal modo que la actividad humana es uno de los elementos más importantes en la modificación de la estabilidad de las laderas. Por ejemplo, la actividad minera mal planeada y la excavación en zonas no adecuadas para construcción, modifica sustancialmente la geometría de las laderas ocasionando inestabilidad. Por otro lado, los procesos de deforestación modifican la estructura e hidrología del suelo. Un ambiente altamente modificado por el hombre es en gran medida susceptible a la ocurrencia de procesos de remoción.

Los mecanismos de los distintos movimientos de ladera se reflejan a través de sus características morfológicas, es decir, mediante la disposición de las formas que se originan y permanecen en la superficie del terreno durante y después del movimiento. Los rasgos principales son la corona o zona superior, donde el material no ha sido desplazado; el escarpe que es la superficie abrupta localizada en la parte superior que resulta del movimiento; la superficie de falla o deslizamiento, que es la zona que delimita la masa en movimiento; y la zona de acumulación o depósito del material desplazado.

El esquema antes mencionado corresponde a un movimiento idealizado. La naturaleza es mucho más complicada y no siempre será posible la identificación de todos estos elementos. De hecho los movimientos de ladera tienden a ser complejos. Su mismo desarrollo, en ocasiones, inhibe la formación y por ende la identificación de sus rasgos morfológicos.

Los deslizamientos de laderas naturales pueden causar daños que se manifiestan de varias maneras. Este hecho permite establecer algunas estrategias para percibir a simple vista cuándo se está iniciando o se encuentra en proceso franco de desarrollo algún movimiento de terreno. Por esta razón, es importante estar alerta y advertir las modificaciones que ocurren a nuestro alrededor. De esta manera es posible protegernos desde el primer momento en que se presente este tipo de peligros naturales.

Zona de hundimiento

Estas observaciones son útiles para delimitar las zonas en movimiento, diagnosticar los mecanismos involucrados y el nivel de peligro. Estas observaciones son útiles para delimitar las zonas en movimiento, diagnosticar los mecanismos involucrados y el nivel de peligro. De este modo, es posible definir la urgencia de evacuación. Cuando una estructura ha sido afectada por la inestabilidad no existe técnica constructiva que la pueda rescatar.

Rasgos superficiales y síntomas característicos de inestabilidad

Cuando las ladera se encuentran pobladas por el hombre, es frecuente que los daños a casas habitación proporcionen una percepción nítida de la magnitud de los movimientos del terreno y de las áreas donde el problema es crítico. Son evidentes los desplazamientos del terreno, el patrón de grietas y el rompimiento generalizado de los muros y pisos de las casas habitación.

La presencia de una mayor infiltración, de suelos saturados y el desarrollo de manantiales en zonas que generalmente no son húmedas es indicativo de que puede haber un exceso de humedad, lo cual puede ocasionar inestabilidad en una ladera.

Durante lluvias intensas se origina una recarga que influye en la inestabilidad

El desarrollo de nuevas fisuras o grietas o bien de abultamientos o deformaciones en las distintas superficies naturales y artificiales del terreno, tales como el asfalto, pavimento, adoquinado, empedrado, banquetas, etc. Indica la posibilidad de que esa superficie esté perdiendo su estabilidad.

En las laderas naturales estables, los árboles, cercas, muros y postes están en posición vertical. Por el contrario, cuando a simple vista se observa algún grado de inclinación de árboles y postes, es posible suponer inestabilidad en la ladera. En el caso concreto de los árboles, su edad y grado de inclinación pueden aportar una idea clara de la antigüedad del problema, además de la magnitud del mismo.

Otro indicio muy importante es la formación de escarpes o escalonamientos. Cuando son incipientes, es decir apenas perceptibles, indican que la ladera está en una fase inicial de inestabilidad; cuando ya están más desarrollados, forman parte de los escarpes principales de la masa térrea en movimiento.

Estos factores permiten determinar con bastante precisión el área afectada y facilitan el cálculo del volumen de material inestable. Además, con esta información y la clasificación geotécnica del material que forma la ladera inestable es factible evaluar la magnitud del riesgo y estimar el tiempo en el que el problema se puede tornar definitivamente crítico.

La dinámica de los procesos de ladera se ve reflejada en su grado de estabilidad o inestabilidad, de tal forma que las laderas presentarán distintas características dependiendo no sólo de las condiciones actuales, sino de los procesos que han actuado en ellas a través del tiempo.

Características indicativas del estado de actividad de un movimiento

Procesos de ladera activos

Los procesos de ladera activos se manifiestan en la superficie del terreno natural mediante escalones, grietas y discontinuidad en la vegetación de las áreas afectadas. Esta actividad está determinada por la velocidad del movimiento presente y puede afectar de manera variable a las comunidades que se encuentran en esa zona.

Reactivación de procesos de ladera

Una ladera inactiva no puede ser descartada como una zona potencialmente peligrosa. Lo anterior, debido a que siempre existirá la posibilidad de que tanto los factores internos como externos que generaron originalmente el problema de inestabilidad, vuelva a presentarse.

De hecho, gran cantidad de los movimientos de ladera que ocurren día con día, son resultado de la reactivación de antiguas zonas inestables. Como parte natural de la dinámica de la superficie terrestre, las laderas tienden a caerse y a formar grandes depósitos. A medida que pasa el tiempo, éstos últimos se van consolidando y aparentan ser nueva mente una superficie estable. Muy frecuentemente, comunidades enteras se asientan en este tipo de depósitos, y debido a algún factor sobre todo externo, se da la reactivación de los movimientos, la cual en muchos casos, una vez involucrados los asentamientos humanos, puede tener consecuencias desastrosas.

Procesos de ladera inactivos

La inestabilidad de las laderas no es permanente. Los movimientos del terreno pueden evolucionar hasta un punto en el que se restablecen las condiciones naturales de equilibrio. El intervalo de tiempo entre la inestabilidad y la estabilidad varía dependiendo de los materiales involucrados y de los factores condicionantes de la misma. En algunos casos es posible detectar los movimientos que han ocurrido en la

superficie del terreno natural, si los rasgos morfológicos de la ladera no han sido erosionados. Sin embargo, en ocasiones es muy difícil detectar zonas que han sido inestables con anterioridad. Cuando ha existido un movimiento de ladera en un lugar determinado, siempre existirá la posibilidad de que éste se reactive.

Esta situación peligrosa se podría presentar en el momento en que ocurriera una lluvia intensa y prolongada o bien porque, ignorando la peligrosidad del área, se alteren las condiciones de equilibrio aparente mediante la construcción de casas o instalación de alguna obra de infraestructura en sitios no aptos.

La velocidad con que se mueven las laderas varía mucho dependiendo del tipo de movimiento (caído, deslizamiento o flujo), de la inclinación del terreno y de la cantidad de agua. Los caídos y los flujos pueden alcanzar grandes velocidades.

Sin embargo, los flujos son más importantes ya que generalmente involucran una gran cantidad de material el cual cubre áreas extensas. Los flujos están formados por grandes volúmenes de agua, así como también de distintos materiales térreos. Mientras más agua tiene, mayor es su velocidad. De la misma manera, mientras más inclinada es la ladera, mayor será la movilidad de los materiales inestables.

Es necesario conocer la velocidad de los movimientos porque esto nos permite saber cuál es el posible impacto en las zonas habitadas o donde exista alguna obra de infraestructura. Para identificar el grado de peligro de un problema de inestabilidad de laderas, debemos partir del hecho que mientras mayor sea la velocidad del movimiento, mayor será su potencial destructivo.

Movimientos de ladera lentos

Entre las zonas que por lo general son susceptibles a este tipo de movimientos se encuentran las siguientes:

- a) En antiguos movimientos con posibilidad de reactivación
- b) A lo largo o en la base de taludes
- c) A lo largo o en la base de cuencas de drenaje menores u otras depresiones
- d) En el tope o en la base de antiguos taludes de relleno
- e) En el tope o en la base de cortes en taludes empinados
- f) En laderas desarrolladas donde se usen pozos sépticos u otras estructuras de donde las aguas usadas se pueden filtrar.

Los movimientos lentos pueden incluir mecanismos de deslizamiento y flujo, dependiendo de la inclinación del terreno, el tipo de material involucrado y su consistencia en función del contenido de agua.

Movimientos de ladera rápidos

Los flujos pueden alcanzar velocidades considerables, éstos se originan en taludes con pendientes inclinadas. Una vez que un flujo inicia, es capaz de moverse por áreas relativamente planas o de poca inclinación. Las áreas más peligrosas son aquellas

localizadas en el fondo de un cañón y en taludes que han sido excavados para construir carreteras y edificios.

Los flujos generalmente ocurren durante lluvias intensas en suelos con un grado de humedad antecedente, es decir, con cierta saturación. Generalmente inician como pequeños deslizamientos de suelo que se licuan y aceleran a altas velocidades que pueden inclusive llegar a alcanzar 60 km por hora. Cuando múltiples flujos se originan en las partes altas, se van desplazando a lo largo de los barrancos, lo que incrementa considerablemente su volumen. Su gran movilidad origina que éstos se desplacen a grandes distancias de su punto original.

Típicamente los flujos se originan en depresiones en las partes altas de un talud. Esto hace que las áreas localizadas cuesta abajo de depresiones en un talud sean particularmente peligrosas.

Los cortes de carreteras y todas las áreas de un talud que han sido excavadas o alteradas son particularmente peligrosas, ya que es común que se originen flujos o deslizamientos durante las lluvias intensas. Usualmente la intensidad de las lluvias necesarias para que se formen flujos en estas áreas es menor que la que se necesita en taludes naturales.

Otras áreas donde comúnmente se producen flujos y deslizamientos son aquellas donde las corrientes de agua son canalizadas, como a lo largo de las carreteras o debajo de las cunetas.

Lahares

Los lahares son flujos de lodo, compuestos principalmente por material volcánico. Estos flujos de lodo, roca y agua se pueden mover a través de los valles y ríos a velocidades variables hasta de 100 kilómetros por hora y se pueden extender a más de 80 kilómetros de distancia. Algunos lahares contienen tantos fragmentos de materiales (de 60% a 90% por peso) que parecen ríos de concreto fresco.

Estos flujos son tan poderosos que en las áreas cercanas a donde se originan, que son capaces de arrancar y cargar árboles, casas y peñascos enormes, a lo largo de kilómetros de distancia río abajo. En áreas río abajo éstos terminan sepultando en lodo cualquier cosa que se encuentren en su camino. Históricamente, de todos los peligros relacionados con volcanes, los más letales han sido los lahares. Estos pueden ocurrir durante una erupción. El agua que crea los lahares puede provenir de hielo o nieve (en especial agua proveniente de glaciares derretidos por flujos piroclásticos), lluvias intensas o desborde de algún lago localizado en el cráter de la cima de un volcán. Los lahares de gran tamaño son un peligro potencial para cualquier comunidad que se encuentre ubicada en las zonas aledañas a volcanes cuya cima esté cubierta de nieve o tenga un glaciar.

Entre las actividades humanas que pueden desencadenar problemas de inestabilidad de laderas se pueden contar:

Si estas actividades e instalaciones no se diseñan y construyen apropiadamente, pueden incrementar el ángulo de inclinación original de las laderas, reducir el apoyo lateral o al pie de las mismas, o sobrecargar la parte alta de un talud potencialmente inestable. Cambios en las actividades de riego para agricultura, o variaciones en los volúmenes de escurrimientos, producto de lluvias extraordinarias pueden causar cambios en las condiciones naturales de drenaje del terreno, incrementando la erosión, elevando el nivel original del agua subterránea.

Influencia de la actividad humana en la inestabilidad de laderas

También, la presencia de una población instalada en forma irregular sobre una ladera puede alterar las condiciones de escurrimiento e infiltración de agua, al no contar con obras de abastecimiento de agua potable y drenaje apropiadas.

Casos de caídos en el cerro El Tortuguero, Municipio Macuspana, Tabasco

En la madrugada del día tres de junio del año 2000, se presentó un derrumbe súbito de roca en la cantera del cerro El Tortuguero, ubicado en el Municipio de Macuspana Tabasco. Aunque la porción de la ladera colapsada fue relativamente reducida, este accidente afectó una superficie de siete hectáreas, donde se localiza el patio de maniobras de una empresa que se dedica a la explotación de roca caliza, para usarla en la fabricación de pavimentos.

El cerro El Tortuguero está formado por capas de roca caliza inclinadas en el mismo sentido de la pendiente natural del mismo. Este hecho requería una explotación de la roca por medio de plataformas escalonadas, también conocidas como terrazas, excavadas desde la parte más alta del cerro hacia abajo de la ladera. El hecho de que la extracción de roca se iniciara en la parte inferior del cuerpo del cerro, dejó sin apoyo a las capas de la parte superior, causando la inestabilidad de la ladera natural. Adicionalmente, las intensas lluvias de los días anteriores al accidente, causaron el reblandecimiento de las capas delgadas de arcilla presentes entre las capas de roca, facilitando con ello el desprendimiento de grandes volúmenes de material. Este accidente representa un ejemplo claro de inestabilidad de laderas naturales provocada por la acción del hombre. Aquí resalta la falta de información y conocimiento suficiente del personal responsable de los trabajos de exploración de un banco de roca, mismos que dentro de las actividades formales de la ingeniería son consideradas como de alta responsabilidad, por el alto nivel de peligro que existe al modificar las condiciones naturales de estabilidad de una formación geológica.

Deslizamiento en el poblado de Miguel Hidalgo, Zapotitlán de Salinas, Puebla

El poblado de Miguel Hidalgo, Zapotitlán de Salinas, en Puebla, se encontraba localizado en los depósitos de un antiguo deslizamiento. Como consecuencia de un sismo de magnitud 7.0, con epicentro al suroeste de la ciudad de Tehuacan, Puebla en junio de 1999, y de las lluvias extraordinarias de octubre de 1999, una masa con una extensión de aproximadamente 1 km² empezó a desestabilizarse. Una grieta de 450 m apareció el 25 de octubre y 24 horas más tarde el ancho de la misma había crecido 4 cm. Tres días después, el ancho de ésta alcanzó 32 cm y una profundidad de 6 metros.

De esta manera se originó un deslizamiento que en una etapa inicial tenía un escarpe de 30 cm y posteriormente alcanzó 100 m. El movimiento se inició como un deslizamiento rotacional y posteriormente se produjo un componente trasnacional. La velocidad de desplazamiento fue en promedio de 5 cm por día durante el primer mes, misma que disminuyó gradualmente en los siguientes tres meses que duró el movimiento. El área involucrada fue totalmente destruida, pero afortunadamente no hubo víctimas que lamentar, ya que la Dirección de Protección Civil del Estado evacuó a los habitantes de manera oportuna.

Flujo de lodo en la Colonia Aurora, Teziutlán, Puebla *Características generales de Teziutlán*

Las lluvias de octubre de 1999 ocasionaron varios cientos de movimientos de ladera en la Sierra Norte de Puebla. De manera particular, la ciudad de Teziutlán fue noblemente afectada ya que más de cien personas perdieron la vida, muchas quedaron sin hogar y se registraron cuantiosos daños económicos. Teziutlán se encuentra localizado en un área de lomeríos con pendientes variables.

La geología del área comprende distintos flujos piroclásticos provenientes de la caldera de los Húmeros, de edad cuaternaria que pertenecen a la Faja Volcánica Transmexicana. Estos materiales, son principalmente tobas y brechas con cementación intermedia. Son rocas blandas de grano fino a medio, aunque también se encuentran estratos con una cantidad considerable de fragmentos rocosos y gravas, empacadas en una matriz fina (Mendoza *et al.*, 2000). Las propiedades mecánicas de los suelos derivados de estos materiales tienen la peculiaridad de tener una alta sensibilidad al secado y variaciones sensibles en su resistencia (Marshal y Mendoza, 1985), lo cual explica la inestabilidad de las laderas que presentaron durante este período de lluvias extremo.

El flujo de lodo en la Colonia Aurora

El 5 de octubre de 1999 en la ladera posterior del cementerio municipal, ubicado en la Colonia La Aurora ocurrió un movimiento de ladera que tuvo consecuencias catastróficas. De acuerdo con observaciones de campo hechas inmediatamente después del evento, la masa fallada tuvo un movimiento con componente rotacional en la parte cercana a la corona, y un componente traslacional a lo largo del cuerpo principal (Mendoza *et al.*, 2000), lo cual explica sin lugar a dudas que el movimiento inicial tuvo un mecanismo de deslizamiento y posteriormente se convirtió en flujo.

Los muestreos realizados para conocer las propiedades índices de los materiales fallados mostraron que el suelo de esta ladera tenía un contenido natural de agua ligeramente superior al límite líquido, es decir, con una resistencia muy baja. El movimiento de la colonia La Aurora, así como otros procesos de ladera que ocurrieron en Teziutlán y en otras comunidades de la Sierra Norte de Puebla fueron resultado de la saturación del suelo provocado por las lluvias extraordinarias. Con base en análisis de campo y de laboratorio, Mendoza *et al.*, 2000, sugieren que al saturarse la ladera disminuyó la cohesión, lo cual para cierta presión en el agua podría causar

Arcillas sensitivas en problemas de inestabilidad de laderas en Noruega

Es posible encontrar laderas naturales constituidas por arcillas conocidas como sensitivas. En estos casos, existe el peligro de que ocurra una expansión o desplazamiento lateral, ya que estos movimientos se pueden presentar en forma súbita e inesperada.

Estas arcillas se caracterizan por haberse formado en un ambiente marino, donde originalmente el agua salada de mar impregnaba los poros del material térreo. Con el paso del tiempo, el agua marina es substituida por agua dulce, como parte de un proceso natural, por lo que se genera un problema de inestabilidad en la estructura interna de la arcilla.

Dicho problema de inestabilidad se manifiesta mediante la posible pérdida de resistencia de la arcilla, lo cual se puede originar debido a cualquier alteración externa en la ladera, tal como una excavación, la presencia de lluvias extraordinarias o la acción de las fuerzas sísmicas. En realidad, el término sensitivo se refiere a la facilidad con que estas arcillas pueden perder su resistencia.

Esto puede incluir la capacidad natural para auto sustentarse en el cuerpo de un talud natural. Existen arcillas extremadamente sensitivas (*quick clays*) que están relacionadas con ambientes glacio-marinos, ya que fueron depositadas en cuerpos de agua adyacentes a las márgenes glaciales. Esta es la razón por la cual su distribución está restringida a Escandinavia, Canadá, Groenlandia y Nueva Zelanda. Existen arcillas extremadamente sensitivas (*quick clays*) que están relacionadas con ambientes glacio-marinos, ya que fueron depositadas en cuerpos de agua adyacentes a las márgenes glaciales. Esta es la razón por la cual su distribución está restringida a Escandinavia, Canadá, Groenlandia y Nueva Zelanda.

En 1893, en Verdalen, una localidad Noruega, ocurrió un desplazamiento lateral que involucró el movimiento de cincuenta y cinco millones de metros cúbicos de arcillas. Nueve kilómetros de tierras fueron sepultados completamente y 116 personas murieron. En la actualidad este sitio tiene muchos problemas de inestabilidad, zonas con arcillas sensibles causan grandes pérdidas en áreas costeras.

Movimiento complejo en Acapulco, Guerrero

Durante la madrugada del día 9 de octubre de 1997, el huracán *Pauline* causó en Acapulco la peor tragedia registrada en su historia. La lluvia alcanzó 400 mm en tan solo cinco horas. Esto ocasionó que el desastre se iniciara con la saturación de los materiales térreos de la parte alta de los cerros, donde la inclinación natural del terreno es más pronunciada y que afortunadamente se encuentra deshabitada. En esos sitios se presentaron derrumbes locales de las laderas, iniciando un movimiento complejo consistente en caídos deslizamientos y flujos.

Debido a la pendiente pronunciada de esta parte alta de la ciudad, el material producto de dichos colapsos se desplazó pendiente abajo, con gran velocidad, a manera de avalancha. En el primer sitio en donde la pendiente se vuelve más suave, justo antes de entrar a la zona poblada, la avalancha se detuvo. De esta forma, gran parte del

material de la avalancha se acumuló, quedando al frente los fragmentos de roca de mayor tamaño y los de menor tamaño represados por los anteriores. Esta forma de depósito de los materiales pétreos es una de las características que permiten identificar en campo a una avalancha. En este sitio, el caudal y su carga de material sólido, consistente en fragmentos de roca de diversos tamaños, sedimentos y agua alcanzó una gran altura. Muestra de ello son los fragmentos de roca que a su paso quedaron atrapados entre las ramas de los árboles, tal como se aprecia en la siguiente fotografía.

A pesar de la gran cantidad de rocas acumuladas en este sitio, el resto de la masa térrea (fragmentos de roca y sedimentos) junto con la gran cantidad de agua de lluvia, continuó su movimiento pendiente abajo con un gran potencial erosivo que arrastró sedimentos y rocas del lecho de los cauces de los ríos, devastando todo lo que había a su paso.

Estos flujos incrementaron notablemente el área hidráulica de dichos cauces, mediante su acción erosiva, medida desde el punto de vista de la masa de material térreo y agua. Además de la gran velocidad con la que se desplazó el flujo, desde la parte alta de la ciudad, prácticamente hasta descargar su caudal en la bahía.

Medidas preventivas ante la inestabilidad de laderas

Acciones previas a un proceso de inestabilidad

1. Trate de conocer los antecedentes de los terrenos alrededor de su hogar. Averigüe si han ocurrido deslizamientos o flujos en el área, contactando a las autoridades locales.
2. Fomentar y apoyar las iniciativas de las autoridades locales para que se implanten y respeten las normas y reglamentos que regulan la planificación y construcción de estructuras en áreas susceptibles a movimientos de ladera. Toda estructura de vivienda debe de ser construida en áreas lejos de taludes empinados, arroyos y ríos, canales que estén secos durante ciertos periodos del año y en las desembocaduras de canales provenientes de las montañas.
3. Vigilar el drenaje en los taludes alrededor de su hogar. En especial observe aquellos lugares donde las corrientes de agua convergen causando que el flujo de agua sobre esos suelos aumente. Manténgase atento a cualquier rasgo que pueda indicar algún movimiento de suelo en las colinas que estén cerca de su hogar, tales como pequeños deslizamientos, flujos de escombros y / o múltiples árboles inclinados cuesta abajo.
4. Contacte a las autoridades locales para enterarse de los planes de evacuación en su área, en caso de emergencia. También desarrolle sus propios planes de emergencia para usted y su familia en caso de que tengan que evacuar el área.

Acciones durante una tormenta

1. ¡Manténgase despierto y alerta!. Muchas de las muertes causadas por flujos o deslizamientos ocurren de noche cuando la gente está durmiendo. Manténgase atento a los avisos de tormenta por la radio. Tenga presente que lluvias intensas de corta duración son particularmente peligrosas, especialmente si ocurren después de periodos largos de lluvia.
2. Considere evacuar su hogar si vive en un área que es susceptible a movimientos de ladera, teniendo en cuenta que puede hacerlo sin peligro.
3. Esté atento a cualquier sonido producido por escombros en movimiento, tales como árboles derrumbándose o peñascos que chocan uno con otro. Usualmente los flujos y deslizamientos mayores son precedidos por movimientos pequeños. Si vive cerca de un canal o arroyo, debe de estar alerta a cualquier cambio súbito en los niveles y turbulencia del agua. Estos cambios pueden indicar que han ocurrido movimientos. Desaloje el área inmediatamente y no trate de salvar sus pertenencias. Usted y su familia son más importantes.
4. Cuando esté conduciendo un vehículo bajo condiciones de tormenta preste atención a los taludes de las carreteras ya que éstos son muy susceptibles a caídos, flujos y deslizamientos. Manténgase alerta por si ve lodo y rocas sobre la carretera, grietas o deformaciones del pavimento, ya que éstos pueden indicar la presencia de un movimiento de ladera.

Procedimientos recomendables después de un movimiento de ladera

1. No asustarse, trate de mantener la calma y coordinarse con sus familiares, amigos y vecinos para tratar de salir de la zona de peligro e ir a un sitio seguro.
2. No precipitarse a “hincar pilotes”, porque esto podría debilitar aún más al material térreo de la ladera, al incrementar la presión del agua que se encuentra dentro de dicho material.
3. Analizar el agua expuesta en el lugar y remover el agua libre.
4. Revisar la configuración de la superficie del terreno antes y después de ocurrido el deslizamiento, para lo cual resulta sumamente útil la recomendación siguiente.
5. Observar el sitio desde el aire, si es posible, y estudiar fotografías aéreas de la zona.
6. Estudiar los movimientos previos que se puedan localizar.
7. Antes de buscar una solución, preguntarse “Por qué ocurrió el movimiento”.
8. Estudiar los registros existentes, antiguos y recientes, referentes al clima local y la sismicidad de la región.

9. Efectuar los estudios geotécnicos de exploración, muestreo, pruebas de laboratorio (para determinar las características de resistencia, deformabilidad y permeabilidad de los materiales térreos), efectuar los análisis de estabilidad necesarios.

10. Diseñar la solución de estabilización, basada en los cálculos de estabilidad correspondientes.

11. Instalar los sistemas de drenaje y / o estabilización necesarios.

12. Afinar y determinar los taludes y plantar una cubierta vegetal apropiada.

13. Preparar un expediente y registros que permitan documentar el problema. Asegurarse de que dichos documentos se depositen y mantengan en un sitio adecuado para ser usados regularmente en la inspección y el mantenimiento a lo largo de los trabajos enfocados a la estabilización, a mediano y largo plazo.

Los sistemas de monitoreo y alertamiento se utilizan para proteger las vidas y las propiedades, no para evitar los problemas generados por la inestabilidad de laderas naturales. Sin embargo, esos sistemas proporcionan frecuentemente el alertamiento de movimiento de laderas, con el tiempo suficiente para la construcción física de medidas que podrían reducir el peligro inmediato o a mediano o largo plazo.

Las técnicas de monitoreo incluyen la observación de campo y el uso de varios instrumentos apropiados para medir los movimientos del terreno natural. En forma genérica, entre otros instrumentos se pueden incluir medidores de alambre, radares, rayos láser y medidores de vibración. La información proporcionada por estos instrumentos puede manejarse en tiempo real mediante un sistema de telemetría.

En las zonas identificadas como potencialmente peligrosas, en lo que se refiere a problemas de inestabilidad de laderas es importante implementar medidas de monitoreo permanente, tales como:

a) Medición de la cantidad de agua de lluvia, asociada a las características de saturación del material térreo que pueden desencadenar la inestabilidad de una ladera. Para cuantificarla es posible disponer de una serie de pluviómetros simples y económicos

b) Detección y medición directa de deformaciones y agrietamientos de la superficie de las laderas y sus tendencias de crecimiento

c) Medición directa de la presión del agua subterránea, mediante la instalación de piezómetros

d) Cuando algún problema de inestabilidad de laderas se presenta en forma lenta y paulatina, involucrando directamente a una zona habitada, los mismos moradores suelen detectar oportunamente la aparición de grietas en muros y pisos de las construcciones. Esto puede considerarse como una de las técnicas de monitoreo más confiables

Estimación sencilla de la lluvia que pudiera desencadenar un movimiento de ladera

El movimiento de una ladera puede ser ocasionado por un exceso de humedad, el cual generalmente se debe a fuertes precipitaciones. La lluvia continua durante varios días, o bien, la lluvia muy intensa en periodos cortos pueden propiciar la inestabilidad de una ladera. Por esta razón es importante medir regularmente la precipitación pluvial del sitio donde usted habita.

La cantidad de lluvia que ocurre en un día o durante un determinado periodo se puede medir fácilmente al captar en un recipiente graduado el agua que cae. Existen distintos recipientes que son utilizados comúnmente por los jardineros y que pueden ayudar a cuantificar las lluvias de un área en particular. Por ejemplo, hay receptores en forma de probeta que tiene una graduación en milímetros ó pulgadas, unidades con las cuales se mide la lluvia. Es preferible adquirir un recipiente graduado en milímetros, ya que eso permitirá comparar los valores medios de precipitación con la cantidad de agua que cae en los días con lluvias que no son muy comunes.

Medidas generales de monitoreo y alertamiento

El instrumento de medición debe ser colocado al aire libre en un sitio donde no haya obstáculos para la acumulación de agua, tales como árboles, techos, etc., y que no esté expuesto a perturbaciones por actividad humana.

Todos los miembros de la comunidad deben de ser informados de la importancia de este aparato, con la finalidad de que lo protejan y verifiquen que esté funcionando correctamente. Debe haber una persona encargada de llevar el control de la cantidad de agua que se capta.

Para contar con una estadística confiable, la lluvia se tiene que medir diariamente de preferencia a la misma hora. Es recomendable hacer dos mediciones, una a las 8 de la mañana y otra a las 6 de la tarde. Estos datos deberán ser organizados semanal, mensual y anualmente para contar con un registro completo de lluvias de la localidad. En caso de no contar con un dispositivo de medición apropiado, es factible usar una cubeta o recipiente que tenga marcas en milímetros y centímetros para poder tener una buena idea de la cantidad de precipitación.

Monitoreos sistemáticos

Específicamente, para monitorear en forma sistemática y con la aplicación de las tecnologías apropiadas la evolución de la inestabilidad de una ladera, es importante tener presente la medición a lo largo del tiempo de ciertos parámetros, tales como:

- a) Niveles de agua subterránea en la pendiente de la ladera
- b) El desplazamiento o movimiento, incluyendo: la profundidad de la superficie de falla o deslizamiento, la dirección, magnitud y velocidad del movimiento

c) Medición directa y continua de la evolución de la presión del agua subterránea, mediante la instalación de piezómetros de medición continua y señal telemétrica. Para esto, la tecnología actual nos permite disponer de las técnicas siguientes, entre otras:

- 1) Inclínómetros, que permiten detectar dirección de la superficie de falla o deslizamiento
- 2) Extensómetros, que permiten indicar la magnitud del desplazamiento
- 3) Piezómetros, que permiten determinar los niveles de agua subterránea infiltrada en el cuerpo de una ladera.

En resumen, se puede decir que en la actualidad son variadas las técnicas y que es posible contar con equipos de medición de las condiciones de estabilidad de una ladera, lo suficientemente precisos y con respuesta inmediata. Para hacer uso de algunas de las tecnologías mencionadas, será indispensable diseñar el sistema de instrumentación y monitoreo, en función de las características geotécnicas, geohidrológicas y morfológicas particulares de cada problema en particular.

La acción más recomendable es consultar y, en el mejor de los casos, contratar los servicios de especialistas en geotecnia. Todos los métodos correctivos siguen una o más de las siguientes líneas de acción:

1. Evitar la zona de movimiento o desplazamiento
2. Reducir las fuerzas motoras
3. Aumentar las fuerzas resistentes

El evitar la zona de falla suele estar ligado a acciones de reubicación de las zonas habitacionales, a la remoción total de los materiales inestables o a la construcción de estructuras que se apoyan en zonas firmes. La reducción de las fuerzas motoras se puede lograr, en general, por dos métodos: remoción de material en la parte apropiada de la falla y subdrenaje, para disminuir el efecto de empujes hidrostáticos y el peso de las masas de tierra, que es menor cuando pierden agua.

Por lo común la línea de acción que ofrece más variantes es la que persigue aumentar las fuerzas resistentes; algunas de éstas son: el subdrenaje, que aumenta la resistencia del material térreo; la eliminación de estratos débiles u otras zonas de falla potencial; la construcción de estructuras de retención u otras restricciones y el uso de tratamientos, generalmente químicos, para elevar la resistencia de los materiales térreos al movimiento.

AVENIDAS MAXIMAS

A continuación se presentan algunos métodos utilizados para determinar las avenidas máximas. Estos métodos son utilizados con los datos existentes de las cuencas en estudio.

METODOS EMPIRICOS

Algunos investigadores comentan que existe una gran variedad de ellos, aunque en general se puede decir que solo se requiere el conocimiento del área de la cuenca y de su coeficiente de escurrimiento, puede conducir a errores muy grandes y solo proporciona el gasto máximo instantáneo. Se recomienda usarlo solo cuando no sea posible utilizar algunos métodos mas desarrollados. En general todos los métodos empíricos se derivan de la fórmula racional. Uno de los más conocidos es el desarrollado por Creager que conduce a la ecuación:

Método de Creager

$$Q = 1.303C(0.386)^\alpha$$

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

A= área de la cuenca en km^2

C= coeficiente de escurrimiento

Q= gasto máximo, en $\frac{m^3}{seg}$

La secretaría de Recursos Hidráulicos, desarrollo un estudio para valuar el coeficiente "C" en toda la república Mexicana.

Debido a su sencillez, los métodos empíricos tienen gran difusión, pero como se hizo la salvedad, pueden cometerse muchos errores, ya que el proceso de escurrimiento es mucho más complejo como para resumirlo en una fórmula de tipo directo, en la que sólo intervienen el área de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento.

Método De Lowry

La fórmula de Lowry es:

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

Donde:

C_L = coeficiente empírico (otro).

Los valores de C y C_L , se determinan por regiones, llevando a una gramática logarítmica los gastos unitarios máximos y registrados con sus respectivas áreas de cuencas y seleccionando el valor de C y C_L que envuelvan a todos los puntos medidos.

El valor de $C=200$ en la envolvente para todos los puntos que analizo Creager aunque $C=100$ da valores mucho mas razonables y se usa como envolvente mundial. Para la fórmula de Lowry se puede tomar un valor de $C_L=3500$ como mundial.

METODOS SEMIEMPIRICOS

Método Vente Chow. El ingeniero Vente Chow elaboró un método para determinar el gasto de pico de hidrogramas de diseño de alcantarillados y otras estructuras de drenajes pequeñas. Este método solo proporciona el gasto de pico en cuencas no urbanas con un área menor de 25 km^2 .

El gasto de pico Q_p de un hidrograma de escurrimiento directo se puede expresar como el producto de la altura de precipitación efectiva (q_p) por el gasto de pico de un hidrograma unitario (q_p).

$$Q_p = q_p P_E$$

El gasto pico de un hidrograma unitario, q_p se puede expresar como una función del gasto del equilibrio para una lluvia con intensidad, $i = 1\text{mm/de}$.

de = duración en exceso

$$q_p = \frac{1\text{mm}}{\text{de}} AcZ$$

donde Z es la fracción descrita, que se denomina “factor de reducción de pico” si “ Ac ” se expresa en km^2 la ecuación para el gasto pico se puede escribir como

$$q_p = \frac{0.278Ac}{\text{de}} Z$$

donde q_p está en $\text{m}^3/\text{seg}/\text{mm}$.

sustituyendo

$$q_p = \frac{0.278PeAcZ}{\text{de}}$$

Este método se usa en cuencas no instrumentadas, el procedimiento conveniente para valuar “ Pe ” a partir de la lluvia total “ P ” es el de los números de escurrimientos. El factor de reducción de pico “ Z ” se puede calcular según Chow, como una función del tiempo de retraso (tiempo que transcurre del centro de masa de la precipitación al pico del hidrograma).

El tiempo de retraso se puede calcular, según Chow, como:

$$tr = 0.005 \left(\frac{L}{S^{1/2}} \right)^{0.64}$$

Donde "L", es la longitud del cauce principal, en mts. "S" su pendiente en por ciento y "tr" el tiempo de retraso en hr.

Período de retorno.- Este se define como el lapso promedio entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada.

$$P(X \geq X) = 1/Tr$$

$$Tr = \frac{1}{1 - P(X \geq X)}$$

Riesgo de falla

$$R = 1 - (1 - P)^N = 1 - (1 - 1/Tr)^N; N = \text{vida útil.}$$

La probabilidad R se conoce como riesgo de falla, de uno o más eventos de período (Tr) ocurran durante la vida útil.

METODOS ESTADISTICOS

Para aplicarlos se requiere conocer los gastos máximos anuales. Cuanto más datos de tengan, mayor será la aproximación. Permiten conocer el gasto máximo para un período de retorno considerado.

Método de Distribución Normal o de Gauss

$$P(X \leq X_i) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_i} e^{-(x-\bar{X})^2/2S^2} dx$$

Moda, media y mediana son iguales. $C_s=0$

Con media \bar{X} , desviación estándar S , y variable aleatoria X_i , representada por $N(\bar{X}, S)$.

Si se hace

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S}$$

Con la nueva variable aleatoria, denominada variable reducida, se tendrá una distribución normal o de Gauss con media igual a cero y desviación estándar igual a uno $N(0,1)$.

$$P(z \leq z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_i} e^{-z^2/2} dz$$

La cual será tabulada según marque el área debajo de la curva desde 0 hasta z_i ; esta

probabilidad $P(z \leq z_i)$ es idéntica a la probabilidad $P(x \leq x_i)$, dado $z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S}$

De la ecuación anterior y de la tabla de Gauss se tiene:

- Para $x_i = \bar{X} \Rightarrow z_i = 0; P(z \leq 0) = 0.5000$
- Para $x_i = \bar{X} \Rightarrow z_i = -1; P(z \leq -1) = 0.1587$
- Para $x_i = \bar{X} + S \Rightarrow z_i = 1; P(z \leq 1) = 0.8413$

Se puede construir, así sucesivamente, el denominado papel probabilístico normal.

En las abcisas se presenta el valor de la variable reducida z o el de $P(x \leq x_i)$.

En las ordenadas la variable aleatoria x_i .

Áreas debajo de la curva normal estándar desde 0 hasta z.										
Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0,0398	0,0438	0,0478	0,0517	0,0557	0,0596	0,0636	0,0675	0,0714	0,0754
0,2	0,0793	0,0832	0,0871	0,0910	0,0948	0,0987	0,1026	0,1064	0,1103	0,1141
0,3	0,1179	0,1217	0,1255	0,1293	0,1331	0,1368	0,1406	0,1443	0,1480	0,1517
0,4	0,1554	0,1591	0,1628	0,1664	0,1700	0,1736	0,1772	0,1808	0,1844	0,1879
0,5	0,1915	0,1950	0,1985	0,2019	0,2054	0,2088	0,2123	0,2157	0,2190	0,2224
0,6	0,2258	0,2291	0,2324	0,2357	0,2389	0,2422	0,2454	0,2486	0,2518	0,2549
0,7	0,2580	0,2612	0,2642	0,2673	0,2704	0,2734	0,2764	0,2794	0,2823	0,2852
0,8	0,2881	0,2910	0,2939	0,2967	0,2996	0,3023	0,3051	0,3078	0,3106	0,3133
0,9	0,3159	0,3186	0,3212	0,3238	0,3264	0,3289	0,3315	0,3340	0,3365	0,3389
1	0,3413	0,3438	0,3461	0,3485	0,3508	0,3531	0,3554	0,3577	0,3599	0,3621
1,1	0,3643	0,3665	0,3686	0,3708	0,3729	0,3749	0,3770	0,3790	0,3810	0,3830
1,2	0,3849	0,3869	0,3888	0,3907	0,3925	0,3944	0,3962	0,3980	0,3997	0,4015
1,3	0,4032	0,4049	0,4066	0,4082	0,4099	0,4115	0,4131	0,4147	0,4162	0,4177
1,4	0,4192	0,4207	0,4222	0,4236	0,4251	0,4265	0,4279	0,4292	0,4306	0,4319
1,5	0,4332	0,4345	0,4347	0,4370	0,4382	0,4394	0,4406	0,4418	0,4429	0,4441
1,6	0,4452	0,4463	0,4474	0,4484	0,4495	0,4505	0,4515	0,4525	0,4535	0,4545
1,7	0,4554	0,4564	0,4573	0,4582	0,4591	0,4599	0,4608	0,4616	0,4625	0,4633
1,8	0,4641	0,4649	0,4656	0,4664	0,4671	0,4678	0,4686	0,4693	0,4699	0,4706
1,9	0,4713	0,4719	0,4726	0,4732	0,4738	0,4744	0,4750	0,4756	0,4761	0,4767
2	0,4772	0,4778	0,4783	0,4788	0,4793	0,4798	0,4803	0,4808	0,4812	0,4817
2,1	0,4821	0,4826	0,4830	0,4834	0,4838	0,4842	0,4846	0,4850	0,4854	0,4857
2,2	0,4861	0,4864	0,4868	0,4871	0,4875	0,4878	0,4881	0,4884	0,4887	0,4890
2,3	0,4893	0,4896	0,4898	0,4901	0,4904	0,4906	0,4909	0,4911	0,4913	0,4916
2,4	0,4918	0,4920	0,4922	0,4925	0,4927	0,4929	0,4931	0,4932	0,4934	0,4936
2,5	0,4938	0,4940	0,4941	0,4943	0,4945	0,4946	0,4948	0,4949	0,4951	0,4952
2,6	0,4973	0,4955	0,4956	0,4957	0,4959	0,4960	0,4961	0,4962	0,4963	0,4954
2,7	0,4965	0,4966	0,4967	0,4968	0,4969	0,4970	0,4971	0,4972	0,4973	0,4964
2,8	0,4974	0,4975	0,4976	0,4977	0,4977	0,4978	0,4979	0,4979	0,4980	0,4974
2,9	0,4981	0,4982	0,4982	0,4983	0,4984	0,4984	0,4985	0,4985	0,4986	0,4981
3	0,4987	0,4987	0,4987	0,4988	0,4988	0,4989	0,4989	0,4989	0,4990	0,4986
3,1	0,4990	0,4991	0,4991	0,4991	0,4992	0,4992	0,4992	0,4992	0,4993	0,4990
3,2	0,4993	0,4993	0,4994	0,4994	0,4994	0,4994	0,4994	0,4995	0,4995	0,4993
3,3	0,4995	0,4995	0,4995	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4995
3,4	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997
3,5	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998
3,6	0,4998	0,4998	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,7	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,8	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,9	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000

FIGURA 3.8- Áreas debajo de la curva normal estándar desde 0 hasta Z

Para el ajuste de una serie de datos observados a una ley teórica, como la distribución normal, se tienen los siguientes métodos:

a) Método De Los Momentos

Este método utiliza las características de la muestra para ajustar la función de frecuencia acumulada a una ley probabilística o distribución teórica.

Los pasos del método son los siguientes:

- 1) Calcular las características estadísticas de la muestra \bar{X} , S y Cs.
- 2) Ordenar los eventos de la muestra, de mayor a menor, determinando, además, el número de orden i de cada evento.
- 3) Determinar, para cada evento, la frecuencia $F(x \geq x_i)$ con que es superado o igualado.

$$F(x \geq x_i) = 1 - F(x \leq x_i) = (i/(n+1))$$

$$F(x \leq x_i) = F(x_i) = (1 - \frac{i}{n+1})$$

donde:

i=1 hasta n, siendo n el número total de eventos considerado. El valor de i=1 corresponde al evento mayor, i=2 al evento siguiente, y así sucesivamente hasta i=n, correspondiente al evento menor. Aunque existen varias fórmulas para determinar la frecuencia con que un evento es igualado o superado, la fórmula anterior, denominada fórmula de Kimbal, es comúnmente utilizada en literatura norteamericana.

- 4) Considerando $F(x_i) = F(x \leq x_i)$ como una buena estimación de la probabilidad teórica $P(x_i) = P(x \leq x_i)$, identificar $P(x_i)$ con $F(x_i)$.
- 5) En papel probabilístico normal (algunas veces denominado papel normal aritmético) graficar los valores $[F(x \leq x_i), x_i]$.
- 6) Determinar los puntos:
 (0.5000, \bar{X})
 (0.1587, $\bar{X} - S$)
 (0.8413, $\bar{X} + S$)
- 7) Trazar una línea recta a través de dichos puntos. Esta línea representa el ajuste de una serie de datos observados, o función de frecuencia acumulada, a la ley probabilística normal.
- 8) Para cualquier valor e z_i se puede calcular su correspondiente valor $P(z \leq z_i)$ en una distribución N (0,1), según la tabla normal. Adicionalmente,

$$x_i = \bar{X} + Sz_i$$

Determinándose de esta manera el valor de x_i en una distribución N (\bar{X} , S).

NOTA: A pesar de que estadísticamente hablando ($F(x \geq x_i)$) no es exactamente igual a $(1 - F(x \leq x_i))$ sino a $1 - F(x < x_i)$, el valor de $F(x = x_i)$ es tan pequeño para variables aleatorias continuas que $F(x \geq x_i)$ se pueden tomar igual a $(1 - F(x \leq x_i))$.

b) Método De Mínimos Cuadrados

Este método utiliza cada uno de los datos actuales de la muestra para efectuar el ajuste de la distribución teórica.

Los pasos del método son los siguientes:

- 1) Ejecutar los pasos 2) y 3) del método anterior.
- 2) Determinar, para cada evento, el valor de la variable reducida z_i correspondiente a cada valor de $F(x \leq x_i)$, suponiéndolo como una buena estimación teórica de $P(x \leq x_i)$. Para este paso utilizar la tabla de Gauss.
- 3) Graficar en papel probabilístico normal los valores (z_i, x_i) .
- 4) Efectuar un análisis de mínimos cuadrados entre las variables x_i y z_i , hallando los valores de las constantes a y b en la recta de regresión $x_i = a + bz_i$.
- 5) Graficar dicha recta, la cual representa el ajuste de la serie de datos observados x_i a la ley probabilística normal.
- 6) Para cualquier valor de z_i se puede averiguar su correspondiente valor $P(z \leq z_i) \equiv P(x \leq x_i)$ o viceversa. Por otro lado, por medio de la recta de regresión del paso 4, se puede determinar x_i , conocido z_i .

Método De Gumbel O De Valores Extremos

Es una función de probabilidades usualmente utilizada para valores máximos aleatorios sacados de poblaciones suficientemente grandes.

$$P(x \leq x_i) = e^{-e^{-y_i}}$$

e es la base de los logaritmos neperianos

y_i es la variable reducida, tal que

$$y_i = a(x_i - x_f)$$

$$a = \frac{S_n}{S}$$

$$x_f = \bar{X} - S \frac{Y_n}{S_n}$$

\bar{X} es el promedio de los datos de la muestra

S es la desviación estándar de los datos de la muestra

x_i datos de la muestra, desde i igual a 1 hasta i igual a n.

Y_n y S_n dependen del número de años de registro de la muestra n, y son respectivamente la media y la desviación estándar de la variable reducida y. Sus valores se representan en la tabla de Gumbel.

La función de probabilidades teórica de Gumbel posee un coeficiente de oblicuidad C_s igual 1.139. Esto significa que si los datos de una muestra se ajustan a esta distribución, su coeficiente de oblicuidad debe estar cercano a este valor.

La construcción del papel Gumbel (denominado algunas veces papel Gumbel aritmético) en el eje de las abcisas se lleva a cabo por medio de la ecuación $P(x \leq x_i) = e^{-e^{-y_i}}$. El eje de las ordenadas, en el papel aritmético, sirve para graficar la variable aleatoria original x_i .

Para calcular el gasto máximo para un período de retorno determinado se usa la ecuación:

$$Q_{\max} = Q_m - \frac{\sigma_Q}{\sigma_N} (\bar{Y}_n - \ln Tr)$$

Siendo

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Qi^2 - NQ^2m}{N-1}}$$

donde

N = número de años de registro

Qi = gastos máximos anuales registrados en m^3/seg

$$Q_m = \sum_{i=1}^N Q_i / N \text{ gasto medio en } m^3/\text{seg}$$

Q_{max} =gasto máximo para un período de retorno determinado en m^3/seg

T_r =Período de retorno

σ_N, \bar{Y}_N =constantes función de N de la tabla 1 de Gumbel.

σ_Q =desviación estándar de los gastos

Para calcular el intervalo de confianza, o sea, aquel dentro del cual puede variar Q_{max} dependiendo del registro disponible, se hace lo siguiente:

Si $\emptyset = 1 - T_r$ varía entre 0.20 y 0.80 el intervalo de confianza con la formula.

$$\Delta_Q = \pm \sqrt{N\alpha\sigma m} \frac{\sigma_Q}{\sigma_N \sqrt{N}} \text{-----3 a}$$

donde

N =número de años de registro

$\sqrt{N\alpha\sigma m}$ =constante función de \emptyset , tabla 2 de Gumbel

σ_N =constante función de N, tabla 1 de Gumbel

σ_Q =desviación estándar de los gastos

Si \emptyset es mayor que 0.90 el intervalo se calcula de la siguiente manera

$$\Delta_Q = \frac{114\sigma}{\sigma_N} \text{-----3 b}$$

Método de Gumbel. Valores de Yn y Sn.								
n	Yn	Sn	n	Yn	Sn	n	Yn	Sn
2	0,4043	0,4984	37	0,5418	1,1339	84	0,5576	1,1967
3	0,4286	0,6435	38	0,5424	1,1363	86	0,5580	1,1980
4	0,4458	0,7315	39	0,5430	1,1388	88	0,5583	1,1994
5	0,4588	0,7928	40	0,5436	1,1413	90	0,5586	1,2007
6	0,4690	0,8388	41	0,5442	1,1436	92	0,5589	1,2020
7	0,4774	0,8749	42	0,5448	1,1458	94	0,5592	1,2032
8	0,4843	0,9043	43	0,5453	1,1480	96	0,5595	1,2044
9	0,4902	0,9288	44	0,5458	1,1499	98	0,5598	1,2055
10	0,4952	0,9497	45	0,5463	1,1519	100	0,5600	1,2065
11	0,4996	0,9676	46	0,5468	1,1538	150	0,5646	1,2253
12	0,5035	0,9833	47	0,5473	1,1557	200	0,5672	1,2360
13	0,5070	0,9972	48	0,5477	1,1574	250	0,5688	1,2429
14	0,5100	1,0095	49	0,5481	1,1590	300	0,5699	1,2479
15	0,5128	1,0206	50	0,5485	1,1607	400	0,5714	1,2545
16	0,5157	1,0316	51	0,5489	1,1623	500	0,5724	1,2588
17	0,5181	1,0411	52	0,5493	1,1638	750	0,5738	1,2651
18	0,5202	1,0493	53	0,5497	1,1653	1000	0,5745	1,2685
19	0,5220	1,0566	54	0,5501	1,1667			
20	0,5236	1,0628	55	0,5504	1,1681			
21	0,5252	1,0696	56	0,5508	1,1696			
22	0,5268	1,0754	57	0,5511	1,1708			
23	0,5283	1,0811	58	0,5515	1,1721			
24	0,5296	1,0864	59	0,5518	1,1734			
25	0,5309	1,0915	60	0,5521	1,1747			
26	0,5320	1,0961	62	0,5527	1,1770			
27	0,5332	1,1004	64	0,5533	1,1793			
28	0,5343	1,1047	66	0,5538	1,1814			
29	0,5353	1,1086	68	0,5543	1,1834			
30	0,5362	1,1124	70	0,5548	1,1854			
31	0,5371	1,1159	72	0,5552	1,1873			
32	0,5380	1,1193	74	0,5557	1,1890			
33	0,5388	1,1226	76	0,5561	1,1906			
34	0,5396	1,1255	78	0,5565	1,1923			
35	0,5403	1,1285	80	0,5569	1,1938			
36	0,5410	1,1313	82	0,5572	1,1953		0,5772	1,2826

FIGURA 3.9- Tabla de Gumbel para los valores Yn y Sn.

Método De Log Normal

Si la variable x de la ecuación $P(X \leq X_i) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_i} e^{-(x-\bar{X})^2/2S^2} dx$, se reemplaza por una función $y=f(x)$, tal que $y=\log x$, la función puede denominarse (lo mismo podría decirse de $y=x^{1/2}$, $y=x^{1/3}$, etc), transformándose en una ley de probabilidades denominada log-normal, $N(\bar{Y}, S_y)$.

Los valores originales de la variable aleatoria x_i deben de ser transformados a $y_i=\log x_i$, de tal manera que:

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n \log x_i / n;$$

es la media de los datos de la muestra transformada.

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}$$

Es la desviación estándar de los datos de la muestra transformada.

$$C_s = a / S_y^3$$
$$a = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^3$$

Es el coeficiente de oblicuidad de los datos de la muestra transformada. Para el ajuste de una serie de datos observados a una ley teórica, como la distribución log-normal, se tienen los siguientes métodos:

a. Método de momentos

Para el coeficiente de oblicuidad o asimetría C_s de los valores originales, cercanos a cero.

- 1) Transformar los valores originales de la variable aleatoria x_i a $y_i = \log x_i$. Calcular las características estadísticas \bar{Y} , S_y y C_s .
- 2) Ejecutar los pasos siguientes:

Ordenar los eventos de la muestra, de mayor a menor, determinando, además, el número de orden i de cada evento.

Determinar, para cada evento, la frecuencia $F(x \geq x_i)$ con que es superado o igualado.

$$F(x \geq x_i) = 1 - F(x \leq x_i) = (i/(n+1))$$

$$F(x \leq x_i) = F(x_i) = \left(1 - \frac{i}{n+1}\right)$$

Para los valores originales de la variable aleatoria x_i .

- 3) en papel logarítmico probabilístico normal algunas veces denominado papel normal-logarítmico, graficar los valores $(F(x \leq x_i), x_i)$. Téngase en cuenta que si los valores x_i son graficados en papel logarítmico, igualmente lo que se grafica es el $\log x_i = y_i$ en papel aritmético.
- 4) Dibujar los puntos siguientes en papel logarítmico probabilístico normal
 (0.5000, Antilog \bar{Y})
 (0.1587, Antilog $(\bar{Y} - S_y)$)
 (0.8413, Antilog $(\bar{Y} + S_y)$)
- 5) Trazar una línea recta a través de dichos puntos. Dicha línea representa el ajuste de una serie de datos observados, o función de frecuencia acumulada, a una ley probabilística logarítmico-normal.

b. Método de mínimos cuadrados

Para el coeficiente de oblicuidad o asimetría C_s de los valores originales, cercano a cero.

- 1) Transformar los valores originales de la variable aleatoria $y_i = \log x_i$.
- 2) Ejecutar los pasos siguientes

Ordenar los eventos de la muestra, de mayor a menor, determinando, además, el número de orden i de cada evento.

Determinar, para cada evento, la frecuencia $F(x \geq x_i)$ con que es superado o igualado.

$$F(x \geq x_i) = 1 - F(x \leq x_i) = (i/(n+1))$$

$$F(x \leq x_i) = F(x_i) = \left(1 - \frac{i}{n+1}\right)$$

Para los valores de la variable transformada $y_i = \log x_i$.

- 3) Determinar, para cada evento, el valor de la variable reducida z_i correspondiente a cada valor $F(y \leq y_i)$, suponiéndolo como una buena estimación teórica de $P(y \leq y_i)$. Para este paso, utilizar la tabla de Gauss.
- 4) Graficar en papel normal-logarítmico los valores $(z_i, x_i = \log y_i)$.
- 5) Efectuar un análisis de mínimos cuadrados entre las variables y_i y z_i , hallando los valores de las constantes a y b en la recta de regresión $y_i = a + bz_i$. De aquí $x_i = \text{antlog } y_i$, es decir $x_i = \text{antlog}(a + bz_i)$.

- 6) Graficar esta última ecuación, en papel normal logarítmico, la cual representa el ajuste de la serie de datos observados a la ley probabilística logarítmico-normal.
- 7) Para cualquier valor de z_i se puede calcular su correspondiente valor $P(z \leq z_i) = P(y \leq y_i)$ o viceversa. Por otro lado, por medio de la recta de regresión del paso 5 se puede determinar y_i . Finalmente, $x_i = \text{antilog } y_i$.

Distribución Logarítmico-Normal (log-normal)

Los factores de frecuencia K_T para la distribución log-normal están dados en la tabla siguiente en función del coeficiente de asimetría u oblicuidad C_s de los datos originales y del período de retorno (o probabilidad de excedencia).

El método se aplica de la siguiente manera:

1. Calcule la media \bar{X} de los n valores de la serie.
2. Calcule la desviación estándar S de los n valores de la serie.
3. Calcule el coeficiente de oblicuidad o asimetría C_s de los n valores de la serie.

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)S^3}$$

4. Calcule

$$X_T = \bar{X} + SK_T$$

En donde K_T se obtiene del cuadro siguiente.

Factores de Frecuencia Kt para la Distribución Log Normal.								
Coeficiente de oblicuidad Cs	PERIODO DE RETORNO (años)							
	1,0101	1,0526	1,2500	2,00	5,00	20,00	100,00	1.000,00
	0,0101	2	5	10	25	50	100	200
	0,99	0,95	0,80	0,50	0,20	0,05	0,01	0,001
0,00	-2,33	-1,65	-0,84	0,00	0,84	1,64	2,33	3,09
0,10	-2,25	-1,62	-0,85	-0,02	0,84	1,67	2,40	3,22
0,20	-2,18	-1,59	-0,85	-0,04	0,83	1,70	2,47	3,39
0,30	-2,11	-1,56	-0,85	-0,06	0,82	1,72	2,55	3,56
0,40	-2,04	-1,53	-0,85	-0,07	0,81	1,75	2,62	3,72
0,50	-1,98	-1,49	-0,86	-0,09	0,80	1,77	2,70	3,88
0,60	-1,91	-1,46	-0,86	-0,10	0,79	1,79	2,77	4,05
0,70	-1,85	-1,43	-0,85	-0,11	0,78	1,81	2,84	4,21
0,80	-1,79	-1,40	-0,84	-0,13	0,77	1,82	2,90	4,37
0,90	-1,74	-1,37	-0,84	-0,14	0,76	1,84	2,97	4,55
1,00	-1,68	-1,34	-0,84	-0,15	0,75	1,85	3,03	4,72
1,10	-1,63	-1,31	-0,83	-0,16	0,73	1,86	3,09	4,87
1,20	-1,58	-1,29	-0,82	-0,17	0,72	1,87	3,15	5,04
1,30	-1,54	-1,26	-0,82	-0,18	0,71	1,88	3,21	5,19
1,40	-1,49	-1,23	-0,81	-0,19	0,69	1,88	3,26	5,35
1,50	-1,45	-1,21	-0,81	-0,20	0,68	1,89	3,31	5,51
1,60	-1,41	-1,18	-0,80	-0,21	0,68	1,89	3,36	5,66
1,70	-1,38	-1,16	-0,79	-0,22	0,65	1,89	3,40	5,80
1,80	-1,34	-1,14	-0,78	-0,22	0,64	1,89	3,44	5,96
1,90	-1,31	-1,12	-0,78	-0,23	0,63	1,89	3,48	6,10
2,00	-1,28	-1,10	-0,77	-0,24	0,61	1,89	3,52	6,25
2,10	-1,25	-1,08	-0,76	-0,24	0,60	1,89	3,55	6,39
2,20	-1,22	-1,06	-0,76	-0,25	0,59	1,89	3,59	6,51
2,30	-1,20	-1,04	-0,75	-0,25	0,58	1,88	3,62	6,65
2,40	-1,17	-1,02	-0,74	-0,26	0,57	1,88	3,65	6,77
2,50	-1,15	-1,00	-0,74	-0,26	0,56	1,88	3,67	6,90
2,60	-1,12	-0,99	-0,73	-0,26	0,55	1,87	3,70	7,02
2,70	-1,10	-0,97	-0,72	-0,27	0,54	1,87	3,72	7,13
2,80	-1,08	-0,96	-0,72	-0,27	0,53	1,86	3,74	7,25
2,90	-1,06	-0,95	-0,71	-0,27	0,52	1,86	3,76	7,36
3,00	-1,04	-0,93	-0,71	-0,28	0,51	1,85	3,78	7,47
3,20	-1,01	-0,90	-0,69	-0,28	0,49	1,84	3,81	7,65
3,40	-0,98	-0,88	-0,68	-0,29	0,47	1,83	3,84	7,84
3,60	-0,95	-0,86	-0,67	-0,29	0,46	1,81	3,87	8,00
3,80	-0,92	-0,84	-0,66	-0,29	0,44	1,80	3,89	8,16
4,00	-0,90	-0,82	-0,65	-0,29	0,42	1,78	3,91	8,30
4,50	-0,84	-0,78	-0,63	-0,30	0,39	1,75	3,93	8,60
5,00	-0,80	-0,74	-0,62	-0,30	0,37	1,71	3,95	8,86

FIGURA 3.10.- Tabla de factores Kt para la distribución log-normal.

Factores de Frecuencia Kt para Distribución de valores extremos tipo I.									
Tamaño de la muestra	PERIODO DE RETORNO (años)								
	5	10	15	20	25	50	75	100	1000
15,00	0,967	1,703	2,117	2,410	2,632	3,321	3,721	4,005	6,265
20,00	0,919	1,625	2,023	2,302	2,517	3,179	3,563	3,836	6,006
25,00	0,888	1,575	1,963	2,235	2,444	3,088	3,463	3,729	5,842
30,00	0,866	1,541	1,922	2,188	2,393	3,026	3,393	3,653	5,727
35,00	0,851	1,516	1,891	2,152	2,354	2,979	3,341	3,598	
40,00	0,838	1,495	1,866	2,126	2,326	2,943	3,301	3,554	5,576
45,00	0,829	1,478	1,847	2,104	2,303	2,913	3,268	3,520	
50,00	0,820	1,466	1,831	2,086	2,283	2,889	3,241	3,491	5,478
55,00	0,813	1,455	1,818	2,071	2,267	2,869	3,219	3,467	
60,00	0,807	1,446	1,806	2,059	2,253	2,852	3,200	3,446	
65,00	0,801	1,437	1,796	2,048	2,241	2,837	3,183	3,429	
70,00	0,797	1,430	1,788	2,038	2,230	2,824	3,169	3,413	5,359
75,00	0,792	1,423	1,780	2,029	2,220	2,812	3,155	3,400	
80,00	0,788	1,417	1,773	2,020	2,212	2,802	3,145	3,387	
85,00	0,785	1,413	1,767	2,013	2,205	2,793	3,135	3,376	
90,00	0,782	1,409	1,762	2,007	2,198	2,785	3,125	3,367	
95,00	0,780	1,405	1,757	2,002	2,193	2,777	3,116	3,357	
100,00	0,779	1,401	1,752	1,998	2,187	2,770	3,109	3,349	5,261
∞	0,719	1,305	1,635	1,866	2,044	2,592	2,911	3,137	4,936

FIGURA 3.11.- Tabla de factores Kt para la distribución de valores extremos tipo I.

Método De Nash

Considera que el valor del gasto para un determinado período de retorno se puede calcular de la ecuación:

$$Q_{\max} = a + c \ln \ln \frac{Tr}{Tr - 1}$$

donde:

a, c = constantes función del registro de gastos máximos anuales

Q_{\max} =gasto máximo para un período de retorno determinado en m^3/seg

Tr =período de retorno

Las constantes a y c se valúan de los registros en la forma siguiente:

$$a = Q_m - CX_m$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N XiQi - NX_m Q_m}{\sum_{i=1}^N Xi^2 - Nx^2 m}$$

Siendo

$$Xi = \ln \ln \frac{Tr}{Tr - 1} \text{ ----- } 1$$

donde

N =número de años de registro

Qi =gastos máximos anuales registrados en m^3/seg

$Q_m = \sum_{i=1}^N Qi / N$, gasto medio en m^3/seg

Xi =constante para cada gasto Q registrado, en función de su período de retorno correspondiente

$X_m = \sum_{i=1}^N Xi / N$, valor medio de las X.

Para calcular los valores de Xi correspondientes a los de Qi se ordenan estos en forma decreciente, asignándoles a cada uno un número de orden mi; al Qi máximo le corresponderá el valor uno, el inmediato dos, etc. Entonces el valor del período de retorno para cada Qi se calculara como:

$$Tr = \frac{N+1}{mi} \text{-----} 2$$

Finalmente el valor de cada X_i se obtiene substituyendo el valor de la ecuación 2 en la ecuación 1.

El intervalo dentro del caudal puede variar el Q_{max} , calculando se obtiene como:

$$\Delta Q = \pm 2 \sqrt{\frac{S_{qq}}{N^2(N-1)} + (X - X_m)^2 \frac{1}{N-2} \frac{1}{S_{xx}} \left(S_{qq} - \frac{S^2_{xq}}{S_{xx}} \right)}$$

siendo

$$S_{xx} = N \sum X_i^2 - \left(\sum X_i \right)^2$$

$$S_{qq} = N \sum Q_i^2 - \left(\sum Q_i \right)^2$$

$$S_{xq} = N \sum Q_i X_i - \left(\sum Q_i \right) \left(\sum X_i \right)$$

Método De Pearson Tipo III

El método se aplica de la siguiente manera:

1. Calcule la media \bar{X} de los n valores máximos anuales hidrológicos x_i .
2. Calcule la desviación estándar S de los n valores máximos anuales hidrológicos x_i .
3. Calcule el coeficiente de oblicuidad C_s de los n valores máximos anuales hidrológicos x_i .

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)S^3}$$

4. Calcule

$$X_T = \bar{X} + SK_T$$

En donde K_T se obtiene de la tabla de log-normal, con C_s y el período de retorno(o la probabilidad de excedencia) conocidos.

Valores KT para coeficientes de oblicuidad negativos distribución Pearson tipo III								
Coeficiente de oblicuidad Cs	PERIODO DE RETORNO (años)							
	Probabilidad de excedencia $P(x \geq x_i) \text{ } \delta \text{ } P(y \geq y_i)$							
	0,0101	2	5	10	25	50	100	200
	0,99	0,5	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,005
0,00	-2,326	-	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326	2,576
-0,10	-2,400	0,017	0,846	1,270	1,716	2,000	2,252	2,482
-0,20	-2,472	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178	2,388
-0,30	-2,544	0,050	0,853	1,245	1,643	1,890	2,104	2,294
-0,40	-2,615	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029	2,201
-0,50	-2,686	0,083	0,856	1,216	1,567	1,777	1,955	2,108
-0,60	-2,755	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880	2,016
-0,70	-2,824	0,116	0,857	1,183	1,488	1,663	1,806	1,926
-0,80	-2,891	0,132	0,856	1,166	1,448	1,606	1,733	1,837
-0,90	-2,957	0,148	0,854	1,147	1,407	1,549	1,660	1,749
-1,00	-3,022	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588	1,664
-1,10	-3,087	0,180	0,842	1,107	1,324	1,435	1,518	1,581
-1,20	-3,149	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449	1,501
-1,30	-3,211	0,210	0,838	1,064	1,240	1,324	1,383	1,424
-1,40	-3,271	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318	1,351
-1,50	-3,330	0,240	0,825	1,018	1,157	1,217	1,256	1,282
-1,60	-3,388	0,254	0,817	0,994	1,116	1,166	1,197	1,216
-1,70	-3,444	0,268	0,808	0,970	1,075	1,116	1,140	1,155
-1,80	-3,499	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,087	1,097
-1,90	-3,553	0,294	0,788	0,920	0,996	1,023	1,037	1,044
-2,00	-3,605	0,307	0,777	0,895	0,959	0,980	0,990	0,995
-2,10	-3,656	0,319	0,765	0,869	0,923	0,939	0,095	0,949
-2,20	-3,705	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905	0,907
-2,30	-3,753	0,341	0,739	0,819	0,855	0,864	0,867	0,869
-2,40	-3,800	0,351	0,725	0,795	0,823	0,830	0,832	0,833
-2,50	-3,845	0,360	0,711	0,771	0,793	0,798	0,799	0,800
-2,60	-3,889	0,368	0,696	0,747	0,764	0,768	0,769	0,769
-2,70	-3,932	0,376	0,681	0,724	0,738	0,740	0,740	0,741
-2,80	-3,973	0,384	0,666	0,702	0,712	0,714	0,714	0,714
-2,90	-4,013	0,390	0,651	0,681	0,683	0,689	0,690	0,690
-3,00	-4,051	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667	0,667

FIGURA 3.12.- Tabla para valores de oblicuidad negativos en método Pearson III.

Valores KT para coeficientes de oblicuidad positivos distribución Pearson tipo III								
Coeficiente de oblicuidad Cs	PERIODO DE RETORNO (años)							
	Probabilidad de excedencia $P(x \geq x_i) \text{ } \delta \text{ } P(y \geq y_i)$							
	0,0101	2	5	10	25	50	100	200
	0,99	0,5	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,005
3,00	-0,667	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051	4,970
2,90	-0,690	-0,390	0,440	1,195	2,277	3,134	4,013	4,904
2,80	-0,714	-0,384	0,460	1,210	2,275	3,114	3,973	4,847
2,70	-0,740	-0,376	0,479	1,224	2,272	3,093	3,932	4,783
2,60	-0,769	-0,368	0,499	1,238	2,267	3,071	3,889	4,718
2,50	-0,799	-0,360	0,518	1,250	2,262	3,048	3,845	4,652
2,40	-0,832	-0,351	0,537	1,262	2,256	3,023	3,800	4,584
2,30	-0,867	-0,341	0,555	1,274	2,248	2,997	3,753	4,515
2,20	-0,905	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705	4,444
2,10	-0,946	-0,319	0,592	1,294	2,230	2,942	3,656	4,372
2,00	-0,990	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,912	3,605	4,298
1,90	-1,037	-0,294	0,627	1,310	2,207	2,881	3,553	4,223
1,80	-1,087	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499	4,147
1,70	-1,140	-0,268	0,660	1,324	2,179	2,815	3,444	4,069
1,60	-1,197	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388	3,990
1,50	-1,256	-0,240	0,690	1,333	2,146	2,743	3,330	3,910
1,40	-1,318	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,703	3,271	3,828
1,30	-1,383	-0,210	0,719	1,339	2,108	2,666	3,211	3,745
1,20	-1,449	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149	3,661
1,10	-1,518	-0,180	0,745	1,341	2,066	2,585	3,087	3,575
1,00	-1,588	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022	3,489
0,90	-1,660	-0,148	0,769	1,339	2,018	2,498	2,957	3,401
0,80	-1,733	-0,132	0,780	1,336	1,993	2,453	2,891	3,312
0,70	-1,806	-0,116	0,790	1,333	1,967	2,407	2,824	3,223
0,60	-1,880	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755	3,132
0,50	-1,955	-0,083	0,808	1,323	1,910	2,311	2,686	3,041
0,40	-2,029	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615	2,949
0,30	-2,104	-0,050	0,824	1,309	1,849	2,211	2,544	2,856
0,20	-2,178	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472	2,763
0,10	-2,252	-0,017	0,836	1,292	1,785	2,107	2,400	2,670
0,00	-2,326	0,000	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326	2,576

FIGURA 3.13.- Tabla de valores de oblicuidad positivos en Método Pearson III.

Valores de K para la Distribución Log - Pearson tipo III								
Coeficiente de asimetría g	PERIODO DE RETORNO (años)							
	0,0101	1,25	2	5	10	25	50	100
	Nivel de probabilidad , porcentaje							
	99	80	50	20	10	4	2	1
3,00	-0,667	-0,636	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051
2,80	-0,714	-0,666	-0,384	0,460	1,210	2,275	3,114	3,973
2,60	-0,769	-0,696	-0,368	0,499	1,238	2,267	3,071	3,889
2,40	-0,832	-0,725	-0,351	0,537	1,262	2,256	3,023	3,800
2,20	-0,905	-0,752	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705
2,00	-0,990	-0,777	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,912	3,605
1,80	-1,087	-0,799	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499
1,60	-1,197	-0,817	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388
1,40	-1,318	-0,832	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271
1,20	-1,449	-0,844	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149
1,00	-1,588	-0,852	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022
0,80	-1,733	-0,856	-0,132	0,780	1,336	1,998	2,453	2,891
0,60	-1,880	-0,857	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755
0,40	-2,029	-0,855	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615
0,20	-2,178	-0,850	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472
0,00	-2,326	-0,842	0	0,842	1,282	1,751	2,051	2,326
-0,20	-2,472	-0,830	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178
-0,40	-2,615	-0,816	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029
-0,60	-2,755	-0,800	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880
-0,80	-2,891	-0,780	0,132	0,856	1,166	1,448	1,606	1,733
-1,00	-3,022	-0,758	0,164	0,852	1,280	1,366	1,492	1,588
-1,20	-3,149	-0,732	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449
-1,40	-3,271	-0,705	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318
-1,60	-3,388	-0,675	0,254	0,817	0,994	1,116	1,166	1,197
-1,80	-3,499	-0,643	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,087
-2,00	-3,605	-0,609	0,307	0,777	0,895	0,959	0,980	0,990
-2,20	-3,705	-0,574	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905
-2,40	-3,800	-0,537	0,351	0,725	0,795	0,823	0,830	0,832
-2,60	-3,889	-0,499	0,368	0,796	0,747	0,764	0,768	0,769
-2,80	-3,973	-0,460	0,384	0,666	0,702	0,712	0,714	0,714
-3,00	-4,051	-0,420	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667

FIGURA 3.14.- Tabla de valores de K para la distribución Log - Pearson III.

MÉTODOS HIDROLOGICOS

Método Del Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario, se define como el hidrograma de escurrimiento directo que se produce por una lluvia efectiva o en exceso de lámina unitaria, que cae uniformemente en la cuenca, durante un intervalo de tiempo llamado duración en exceso d_e .

Tiempo Base Constante

Para una cuenca dada, la duración total de escurrimiento directo o tiempo base, t_b , es la misma todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva, independiente del volumen escurrido. El tiempo base se define como el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el final del escurrimiento directo. Todo hidrograma unitario ligado a una duración de la lluvia en exceso (figura 3.12).

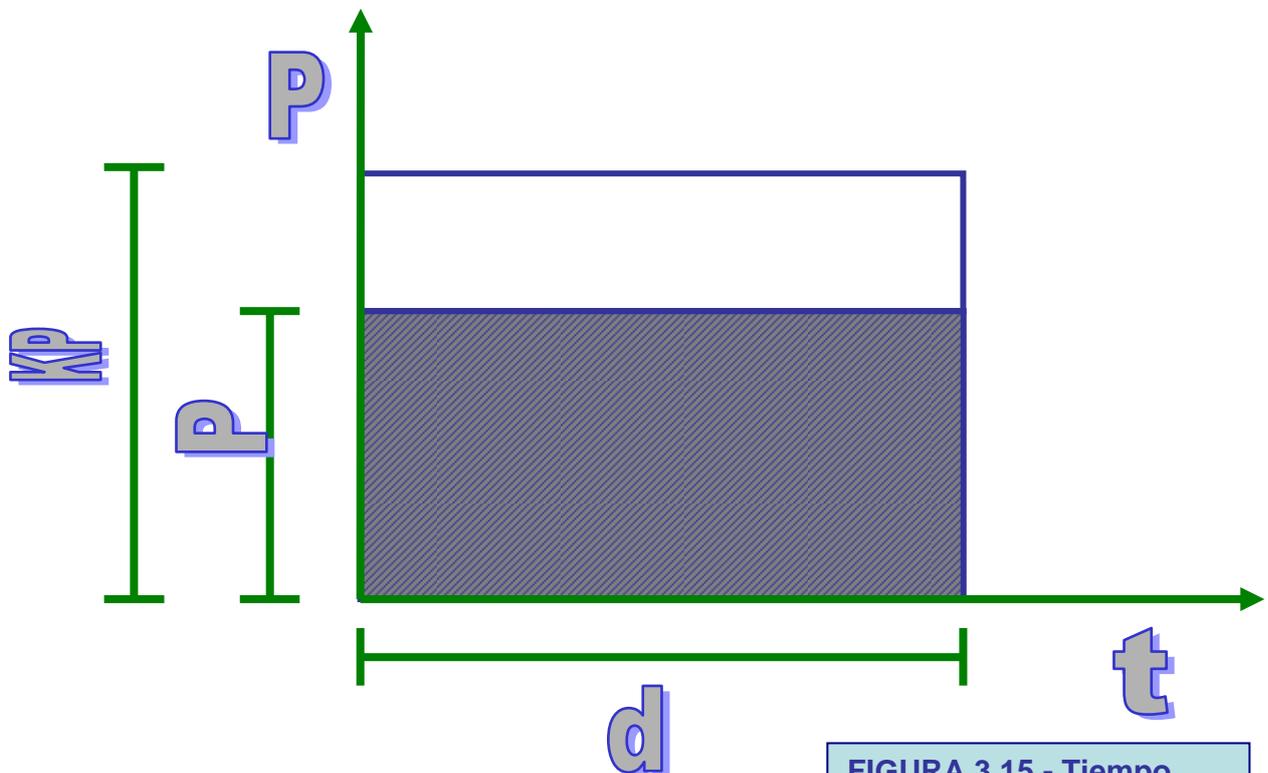


FIGURA 3.15.- Tiempo base de un hidrograma.

Linealidad O Proporcionalidad

Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base, son directamente proporcionales al volumen de escurrimiento directo; *m* decir, al volumen total de lluvia efectiva. Como consecuencia, las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí (figura 3.15).

Superposición de causas y efectos.

El hidrograma que resulta de un período de lluvia puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos de lluvia precedentes (figura 3.16).

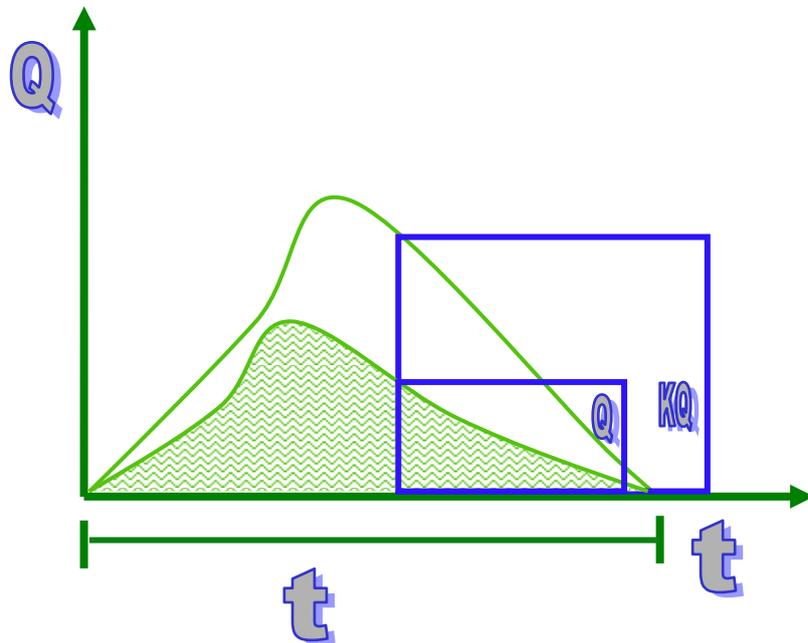


FIGURA 3.16.- Ordenadas proporcionales del hidrograma.

Un ejemplo para aplicar el concepto del hidrograma unitario es el siguiente:

Supóngase que en una cuenca con área de $1,080 \text{ Km}^2$, se conoce un hidrograma de escurrimiento total y el Hietograma que lo produjo (Fig. 3.17)

Un método simple para separar el escurrimiento base directo es trazar una línea recta horizontal a partir donde se empieza la primera rama ascendente hasta donde corte la última rama (línea punteada de la Fig. 3.17b), definiéndose con esto, el tiempo base; así mismo, se pueden ver los nuevos valores de los gastos, es decir, restando el gasto base a cada gasto registrado en el hidrograma; al hidrograma resultante se le denomina hidrograma de calibración.

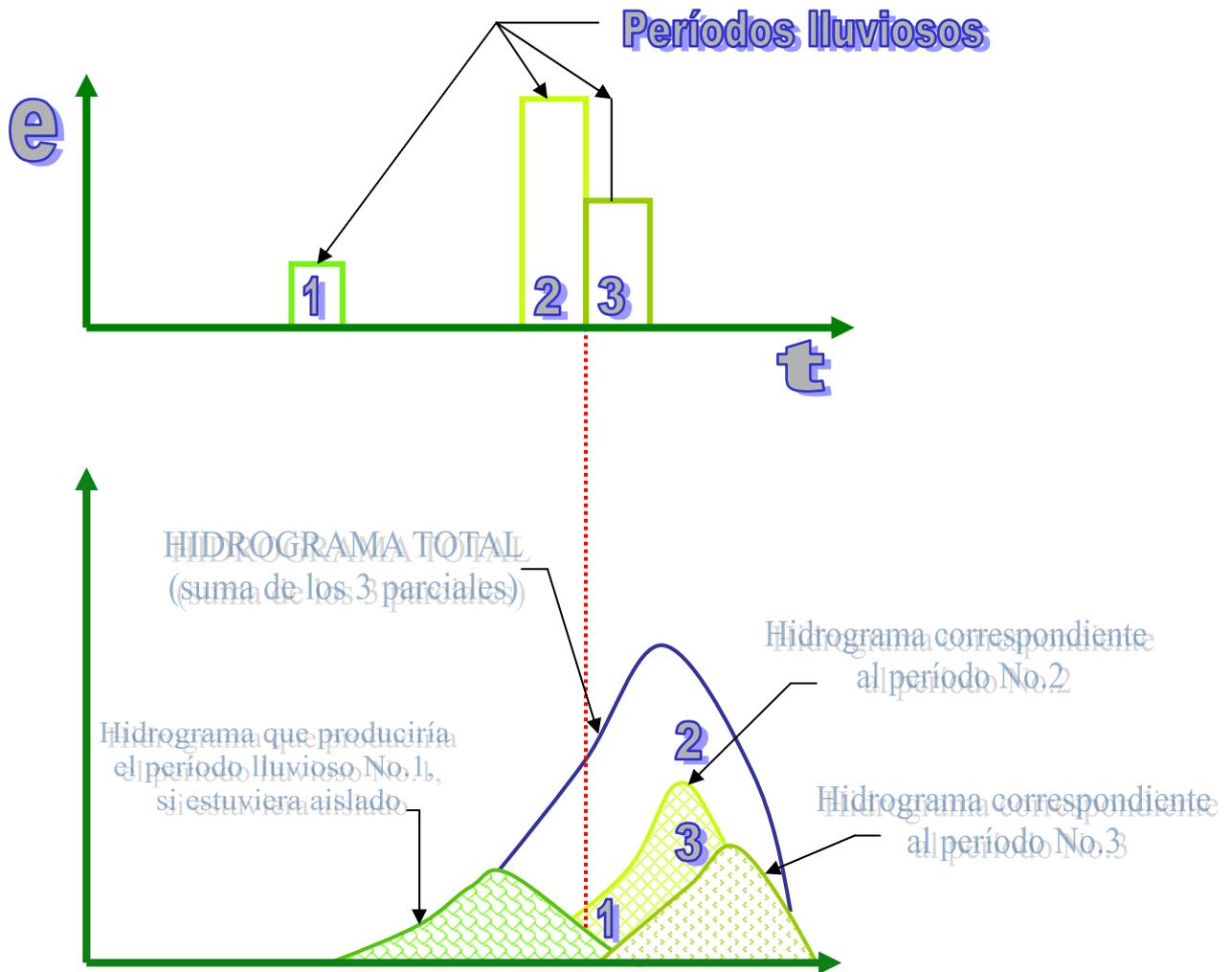


FIGURA 3.17.- Superposición de hidrogramas

Con lo anterior se puede conocer, en primer lugar, el volumen de escurrimiento directo, y, en segundo, el tiempo base t_b . por lo que en este ejemplo el volumen de escurrimiento directo resulta ser de:

$$\Delta t \sum_1^8 Q_i =$$

$$V_e = 5.4 \times 10^6 \text{ m}^3$$

y el tiempo base es de 18 h, como se observa en la figura 3.18b

Una vez calculado el volumen de escurrimiento directo, se determina la altura de lluvia efectiva, que para este ejemplo es de:

$$P_e = \frac{V_t}{A_t} = \frac{5.4 \times 10^6 \text{ m}^3}{1,080 \times 10^6 \text{ m}^2} = 0.005 \text{ m} = 5 \text{ mm}$$

y la duración en exceso, como se puede apreciar en la figura 3.18a, es de 2 h.

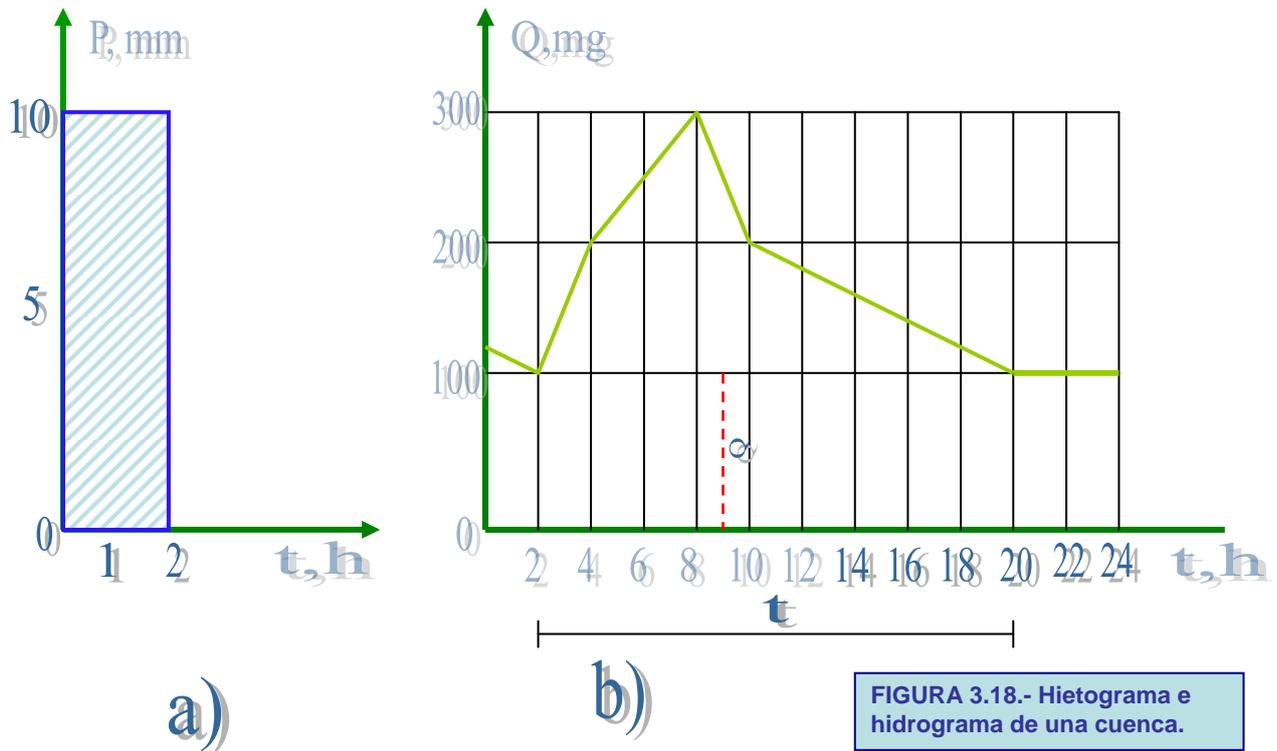


FIGURA 3.18.- Hietograma e hidrograma de una cuenca.

Aceptando las hipótesis de tiempo constante y linealidad, un hidrograma unitario, es decir, un hidrograma directo producido por una lluvia de 1 mm de lámina y duración en exceso de 2 h, debe tener para caso un tiempo de 18 h y la misma forma que el hidrograma de la figura 3.18a, pero con sus ordenadas reducidas a una quinta parte, ya que la altura de la lluvia efectiva fue de 5mm. Entonces, dividiendo las ordenadas del hidrograma de escurrimiento directo de la figura 3.18a entre 5 se obtiene el hidrograma unitario de la figura 3.19.

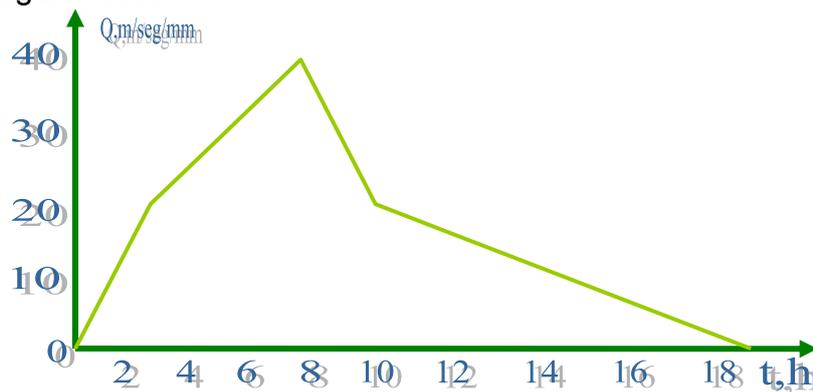
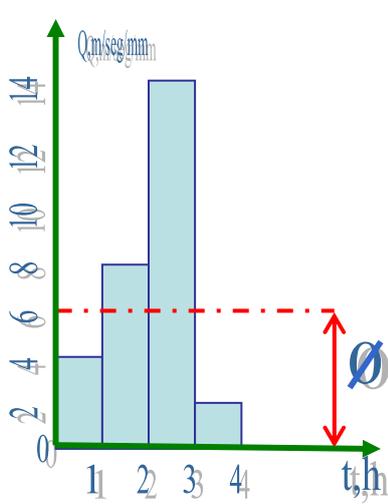


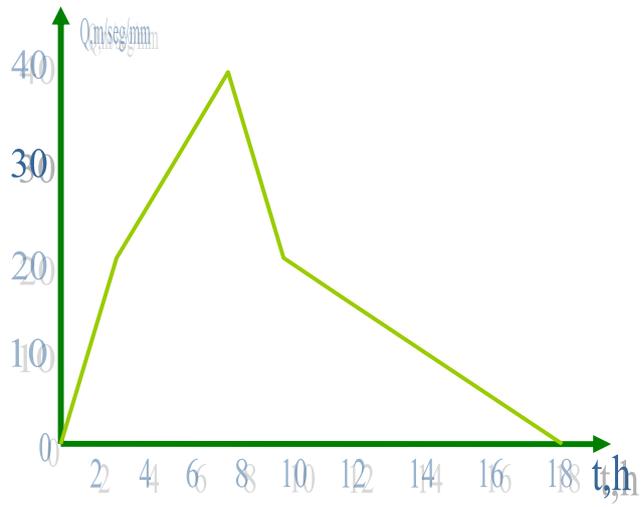
FIGURA 3.19.- Hidrograma unitario para de=2h.

Con este hidrograma unitario es posible determinar hidrogramas de escurrimiento directo para cualquier tormenta cuya duración de lluvia en exceso sea de 2h. Supongamos que la tormenta representada por el Hietograma de la figura 3.20a, tiene una duración en exceso de 2 h y una altura de precipitación efectiva de 10 mm: el

hidrograma de escurrimiento directo que se producirá con tormenta se obtiene multiplicando las ordenadas del hidrograma unitario de la figura 3.19 por 10 mm.



a)

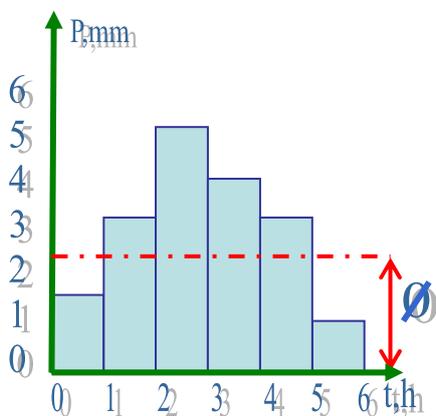


b)

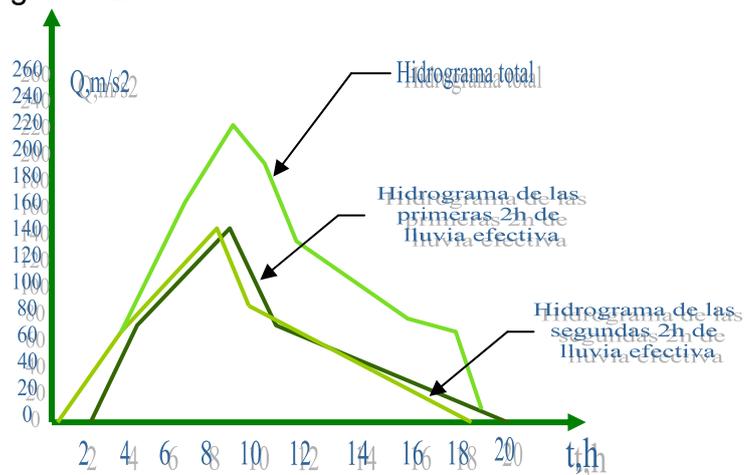
FIGURA 3.20.- Hietograma e Hidrograma.

Como es aceptado el principio de superposición de causas y efectos, el hidrograma unitario de la figura 3.16 sirve para tormentas cuya duración en exceso sea múltiplo de 2 h. Supóngase que la tormenta de la figura 3.21a, que tiene una duración en exceso de 4h, puede considerarse compuesta por dos láminas de lluvia consecutivas, cada una con una duración en exceso de 2 h.

Aplicando el hidrograma unitario de la figura 3.19a cada una de estas dos tormentas, sumando las ordenadas y, obviamente desfasando el segundo hidrograma 2 h del primero, se obtiene el hidrograma de escurrimiento directo producido por la tormenta completa, el cual se presenta en la figura 3.21b.



a)



b)

FIGURA 3.21.- Hietograma e Hidrograma.

Es necesario enfatizar que todo hidrograma unitario necesariamente ligado a una duración en exceso y que si no se conoce la última, entonces el hidrograma unitario pierde completamente su significado.

Hidrograma Unitario Triangular

Mockus desarrolló un hidrograma unitario sintético de forma triangular, como se muestra en la figura 3.22.

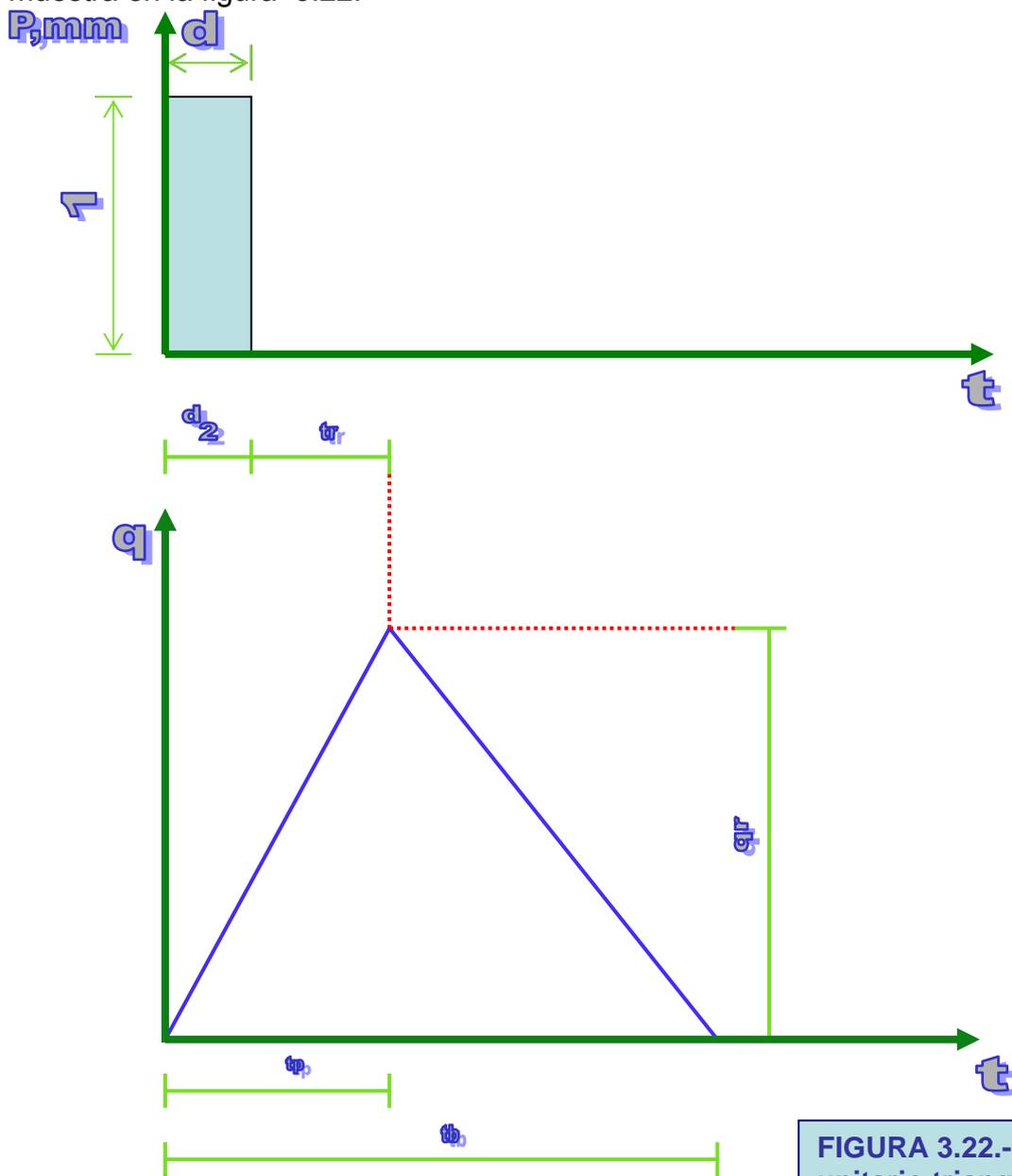


FIGURA 3.22.- Hidrograma unitario triangular

De la geometría del hidrograma unitario, el gasto de pico se obtiene como:

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

donde:

q_p gasto de pico, ($m^3/s/mm$).
 A área de la cuenca, (km^2).
 t_p tiempo de pico, (h).

del análisis de varios hidrogramas, Mockus concluye que el tiempo base t_b y el tiempo de pico t_p se relaciona mediante la expresión:

$$t_b = 2.67t_p$$

El tiempo de pico se expresa como:

$$t_2 = \frac{d_e}{2} + t_r$$

donde:

t_p tiempo de pico (h).
 d_e duración en exceso (h).
 t_r tiempo de retraso (h).

El tiempo de retraso se estima mediante el tiempo de concentración t_c como:

$$t_r = 0.6t_c$$

O bien de la ecuación:

$$t_r = 0.005 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.64}$$

Además, la duración en exceso con la que se tiene mayor gasto de pico, se puede calcular aproximadamente como:

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

Para cuencas grandes; o bien, $d_e = t_c$ para las pequeñas. De las ecuaciones anteriores, finalmente se obtiene que:

$$q_p = \frac{0.208A}{t_p}$$

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6t_c$$

De las ecuaciones anteriores se calculan las características del hidrograma unitario triangular.

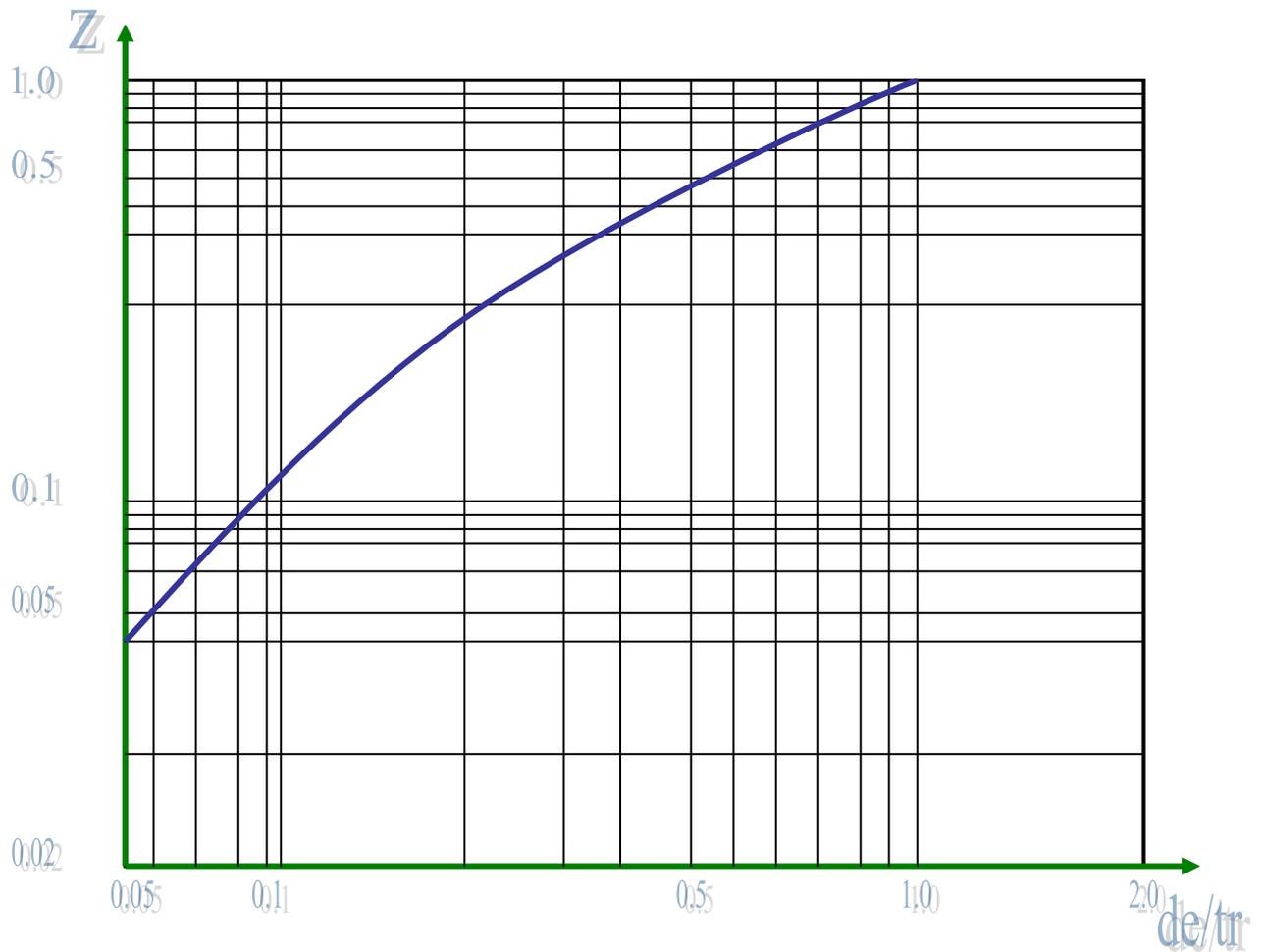


FIGURA 3.23.- Factor de reducción de

Para propósitos prácticos es suficiente con las características principales de un hidrograma unitario triangular; sin embargo si la extensión de la curva de recesión del hidrograma afecta el diseño, puede usarse un hidrograma curvilíneo.

Recomendaciones Para La Selección De Los Métodos

La simulación de las partes principales de un sistema de drenaje pluvial, debe realizarse con métodos con los que se considere que proporcionen los mejores resultados, simulando de la manera mas apegada, el carácter dinámico de la evolución de la onda de la avenida en el sistema de drenaje.

CAPITULO IV SEQUIAS

A lo largo de la historia, la sequía ha sido vista como un fenómeno errático e imprevisible, que constituye una desviación respecto a los valores medios a largo plazo y que se dan de un año a otro. Por consiguiente, una de las grandes preocupaciones de los climatólogos ha sido conocer las causas que determinan este evento, con la finalidad de poder predecir su periodicidad. Sin embargo, antes de profundizar en los mecanismos que se relacionan con la sequía, es necesario conocer en primer lugar, la forma en que se ha conceptualizado a dicho fenómeno.



Definición de sequía. Las sequías son manifestaciones de las fluctuaciones climáticas asociadas con las anomalías de gran escala de los patrones de circulación atmosférica, la deforestación, el cambio de uso de suelo, la desertificación y de las actividades humanas. Esencialmente, las sequías provocan la disminución o ausencia de precipitación sobre una región por largos periodos de tiempo.

Se considera que una sequía meteorológica se presenta cuando la precipitación durante un cierto período de tiempo es significativamente más pequeña que el promedio a largo plazo o que un valor crítico. Se caracterizan por la presencia de altas temperaturas, baja humedad en el ambiente y vientos fuertes.

Una sequía hidrológica ocurre cuando existe un déficit de agua, tanto de precipitación como de escurrimiento superficial y subterráneo. Esta sequía puede causar severos daños a la población, ya que sus efectos y su recuperación son a largo plazo.

Una sequía agrícola ocurre cuando no existe en cierto tiempo la suficiente humedad en el suelo que satisfaga las necesidades para el desarrollo óptimo de un cultivo. Las sequías agrícolas suceden después que las meteorológicas pero antes de las hidrológicas. Las áreas de temporal son las que resienten más este tipo de eventos, aún en los casos en que las sequías sean relativamente moderadas, ya que si ocurre en periodos tempranos afecta el periodo de siembra, en tanto que si ocurre en etapas avanzadas puede disminuir drásticamente la calidad y volumen de la producción. Este fenómeno generalmente afecta a la población más marginada, lo que provoca serios problemas de índole económico y social.

Desde el punto de vista económico y social, la definición de sequía considera no solo el suministro de agua, sino también la demanda. Esto significa que la sequía depende del tipo de uso del agua y de la densidad y distribución de los usuarios.

Cuadro 1. Sequías por estados. Años 1817-1910

Estado	Años con sequía
Distrito Federal	1830, 1831, 1836, 1877-78, 1885, 1907
México	1830, 1831, 1836, 1868, 1885, 1904, 1905, 1909
Morelos	1884
Nuevo León	1868, 1886, 1887, 1889, 1894, 1905, 1906, 1907, 1909, 1910
Tamaulipas	1889, 1895, 1898
Chihuahua	1877, 1886, 1893, 1896, 1908, 1909
Coahuila	1868, 1877, 1883, 1884, 1887, 1909, 1910
Sinaloa	1880, 1886
Sonora	1886, 1887, 1893, 1896, 1897
Yucatán	1817, 1822, 1823, 1834, 1835
Colima	1882
Jalisco	1842, 1898
Michoacán	1877, 1883, 1896, 1904, 1905
Veracruz	1836, 1843, 1868, 1877, 1894, 1895
Guanajuato	1877, 1880, 1894, 1895, 1896, 1902, 1905
Puebla	1875, 1885, 1894, 1895, 1901, 1902, 1906
Tlaxcala	1896, 1905, 1909, 1910
Querétaro	1854, 1882, 1885, 1887, 1889, 1894, 1900, 1902, 1904, 1905, 1907, 1908, 1909
Hidalgo	1843, 1880, 1885, 1889, 1895, 1900, 1905, 1908
Aguascalientes	1868, 1895, 1905
Durango	1850, 1877, 1894,
San Luis Potosí	1875, 1887, 1889, 1894, 1896, 1898, 1899, 1900, 1904, 1905, 1906, 1907, 1908
Zacatecas	1875, 1885, 1889, 1895, 1907
Chiapas	1868, 1887, 1899
Guerrero	1868
Oaxaca	1868, 1885

Fuente: Carrillo Arronte, citado por Padilla *et al.*, 1980:4.

FIGURA 4.1.- Sequías por estados

Clasificación de las sequías

Para definir los tipos de sequía hay que atender a aspectos meteorológicos, hidrológicos y agrícolas.

La sequía desde el punto de vista de la meteorología, es la disminución de precipitaciones en una región en relación con el valor normal en un plazo de tiempo determinado. Se trata de un fenómeno que se implanta de manera paulatina y puede llegar a durar años en los casos más extremos.

La sequía hidrológica se produce cuando hay, a escala regional, un total de precipitación menor a la media estacional que se traduce en un nivel de aprovisionamiento anormal de los cursos de agua y de los reservorios de agua superficial o subterránea.

A pesar de que el clima es el principal factor que contribuye a la sequía hidrológica, otros factores como el cambio en los usos del suelo (por ejemplo deforestación), degradación de las tierras, o la construcción de presas pueden afectar a las características hidrológicas de las cuencas de los ríos.

La sequía agrícola se define como un déficit marcado y permanente de lluvia que reduce significativamente la disponibilidad de agua en el suelo para satisfacer las necesidades de crecimiento de un cultivo determinado en un momento dado. Cuando se produce un período de sequía, la agricultura normalmente es el sector que se ve en primer lugar afectado debido a la gran dependencia de este sector del agua almacenada en el suelo.

La sequía socioeconómica es la afección de la escasez de agua a las personas y a la actividad económica como consecuencia de la sequía.

Las sequías también pueden clasificarse de acuerdo a el clima o por su magnitud.

Por clima

- Permanentes: se producen en zonas de climas áridos
- Estacionales: se observan en sitios con temporadas lluviosas y secas bien definidas.
- Contingentes: se presentan en cualquier época del año debido a periodos prolongados de calor, a falta de lluvias o a la coincidencia de ambos.
- Invisibles: ocurren cuando las lluvias del verano no cubren las pérdidas de humedad por evaporación.

Por magnitud

- Leves: son aquellas que tienen como causa la escasez parcial de lluvias y no repercuten de manera importante en la producción ni en la economía.
- Moderadas: son las originadas por una disminución significativa en la precipitación pluvial que afecta a la producción agrícola.
- Severas: son las que se producen por la disminución general o total de lluvias, con daños cuantiosos a la producción.
- Extremadamente severas: son producto del proceso permanente de escasez de agua que provoca crisis en la agricultura y en la ganadería, con los consiguientes efectos al conjunto de la economía y la sociedad.

La sequía y sus impactos

Comparado con otros fenómenos naturales los impactos de la sequía son no estructurales generalmente, y están en función de los diversos factores ambientales, económicos y sociales que esta afecta directamente.

Cuando se ha declarado una sequía, los daños que causa dependen de sus duración e intensidad y de la necesidad de agua que tengan en ese lapso de tiempo los seres vivos y de las actividades económicas en desarrollo, al presentarse una sequía sus efectos se manifiestan en:

Impactos ambientales:

- Degradación y pérdida de nutrientes de los suelos debido a la erosión eólica e hídrica
- Desertización de los suelos
- Degradación y/o destrucción de los bosques
- Deshidratación y muerte de la flora
- Migración y/o muerte de la fauna
- Disminución de la recarga de acuíferos
- Sobreexplotación de acuíferos
- Nivel de agua en embalses menor a la prevista
- Afectación en la calidad del agua, por la alta concentración de sales y contaminantes
- Afectación en la contaminación del aire
- Alteración del paisaje

Impactos económicos:

- Disminución o pérdida total del hato ganadero debido al alto costo y baja disponibilidad de agua y alimentos
- Daño perenne a los cultivos y reducción de la producción agrícola, lo que genera el fenómeno de escasez, especulación y encarecimiento de alimentos
- Pérdidas económicas de la industria que es directamente dependiente de la producción agrícola y ganadera
- Reducción en la producción pesquera debido a la insuficiencia de agua para el desarrollo de vida acuática
- Distracción de los fondos públicos para mitigar los efectos de las sequías, entre otros

Impactos sociales:

- Conflictos entre los diferentes usuarios de el agua
- Deterioro en la salud publica debido a epidemias, hambre y mortalidad
- Decremento de la calidad de vida de los sectores y las especies mas desprotegidos

La sequía y la circulación general de la atmósfera

La sequía, ha sido explicada, en primer lugar, a partir del modelo de circulación atmosférica, la cual estructura las zonas climáticas de nuestro planeta y aporta el ritmo cíclico de las estaciones. Dentro de este modelo, se dice que la energía solar es la clave para la comprensión del tiempo y el clima. La Tierra recibe calor del Sol y lo radia hacia el espacio. Ambos procesos se mantienen en el justo equilibrio a largo plazo, ya que de otro modo la Tierra se calentaría continuamente.

La energía solar calienta la superficie de la Tierra, y el calor pasa de la superficie calentada a las capas bajas de la atmósfera, en parte por conducción, pero principalmente por medio de la radiación infrarroja, que es absorbida por moléculas tales como el vapor de agua y el dióxido de carbono en la atmósfera. Una vez que se han calentado las capas más bajas de la atmósfera, la energía se propaga por convección originando con ello la circulación general de la atmósfera.

En si, la circulación general de la atmósfera, es el resultado de que el aire caliente ascienda en los trópicos y sea obligado a moverse hacia el norte y el sur, a medida que más aire caliente sube desde abajo. El aire desalojado se enfría, porque emite calor en forma de energía infrarroja hacia el espacio, y desciende en latitudes más altas, donde cede una mayor cantidad de calor a la superficie de la Tierra, en regiones que no gozan del beneficio del sol tropical. Sin embargo, esta sencilla explicación se complica debido a la distinta forma en que los océanos y los continentes responden al calor solar que les llega, y a la rotación de la Tierra, que desvía de forma complicada el conjunto de la circulación convectiva a gran escala. También, es importante señalar que parte del calor solar –en realidad, gran parte de él- no se invierte en el calentamiento de la superficie terrestre en los trópicos, sino en la evaporación de agua. Así pues, el aire cálido que asciende en los trópicos no sólo es cálido sino también húmedo, y como consecuencia del enfriamiento del aire en ascenso es que el vapor de agua pasa de nuevo a la forma de gotitas de agua, cediendo calor al condensarse y dando lugar a las nubes que producen las lluvias tropicales. En términos generales, el aire ascendente está asociado a lluvia, y por este motivo los trópicos son húmedos y están cubiertos de exuberante vegetación. Por el contrario, donde el movimiento es principalmente descendente, el vapor de agua es absorbido por la corriente de aire a medida que ésta se calienta y comprime. El movimiento hacia abajo causa una acumulación de aire en la superficie, y aumenta la presión atmosférica; de este modo, el resultado final es que las regiones de aire descendente son secas y además están dominadas por altas presiones (Gribbin, John 1989, p. 49-55)

Por otra parte, este aire que rodea a la Tierra, se mueve formando tres celdas en cada hemisferio y de ellas la primera cercana al Ecuador y la segunda de latitudes medias son las que afectan a México. El flujo cercano a la superficie de la primera transporta vapor de agua procedente del Golfo de México hacia las tierras en declive del este, mientras que el aire carente de humedad y en progresivo caldeoamiento proviene de las capas altas, formado de la segunda, es la responsable de la sequía en territorio nacional.

La sequía en México

Por su ubicación geográfica, México está expuesto cíclicamente a fenómenos meteorológicos extremos, como ciclones tropicales y sequías, que aunados a otros factores, ocasionan anualmente pérdidas económicas importantes en todos los sectores productivos. Además, dos terceras partes de la superficie del país son áridas o semiáridas, y la disponibilidad de agua se concentra principalmente en el sureste.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA), históricamente las sequías han impactado en forma severa no sólo la producción agrícola y ganadera, sino también la

generación de energía eléctrica y el abasto de agua a ciudades y comunidades rurales. Estos eventos, explica, provocan desplomes en la producción nacional de alimentos.

Particularmente, en estados como Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, donde los climas son extremos, muchos pobladores, especialmente hombres, han tenido que abandonar sus antes fértiles tierras y con ellas a su familia, para buscar en otras regiones el sustento diario. Tal realidad conlleva a dificultades aún mayores, que se relacionan con el desplazamiento demográfico a las ciudades y el desempleo, entre otras.



FIGURA 4.2.- Sequías en México de 1948 a 1954.

Sequedad, una relación de aridez

Si en regiones con climas secos y calurosos la oferta de energía solar sobre la superficie de la tierra es excesiva y la precipitación de lluvia es deficiente (sequía), se dice que sufren de sequedad. De hecho, el índice de sequedad se mide en función de la cantidad de calor requerido para evaporar la precipitación anual promedio. Con esa base la ONU llegó a la conclusión de que las zonas con mayor riesgo se sitúan entre una sequedad de 2 y 7, y es a lo que se denomina aridez. Ello significa que si no se

toman medidas preventivas, eventualmente se inclinarán a la desertificación, donde la productividad biológica es demasiado baja como para sostener grandes poblaciones humanas. Tal es el caso del desierto, donde la vegetación se limita a los oasis.

En México, por ejemplo, las regiones en las que se han presentado mayor número de sequías son las áridas y semiáridas, en las cuales la precipitación promedio es de 400 milímetros al año. "Los mayores impactos de este fenómeno se resienten en la agricultura, debido a que ocupa 83 por ciento del agua extraída. Asimismo, son considerables las afectaciones en ciudades y comunidades rurales, pues la disponibilidad de agua se relaciona con la cantidad de habitantes", indica la CNA.

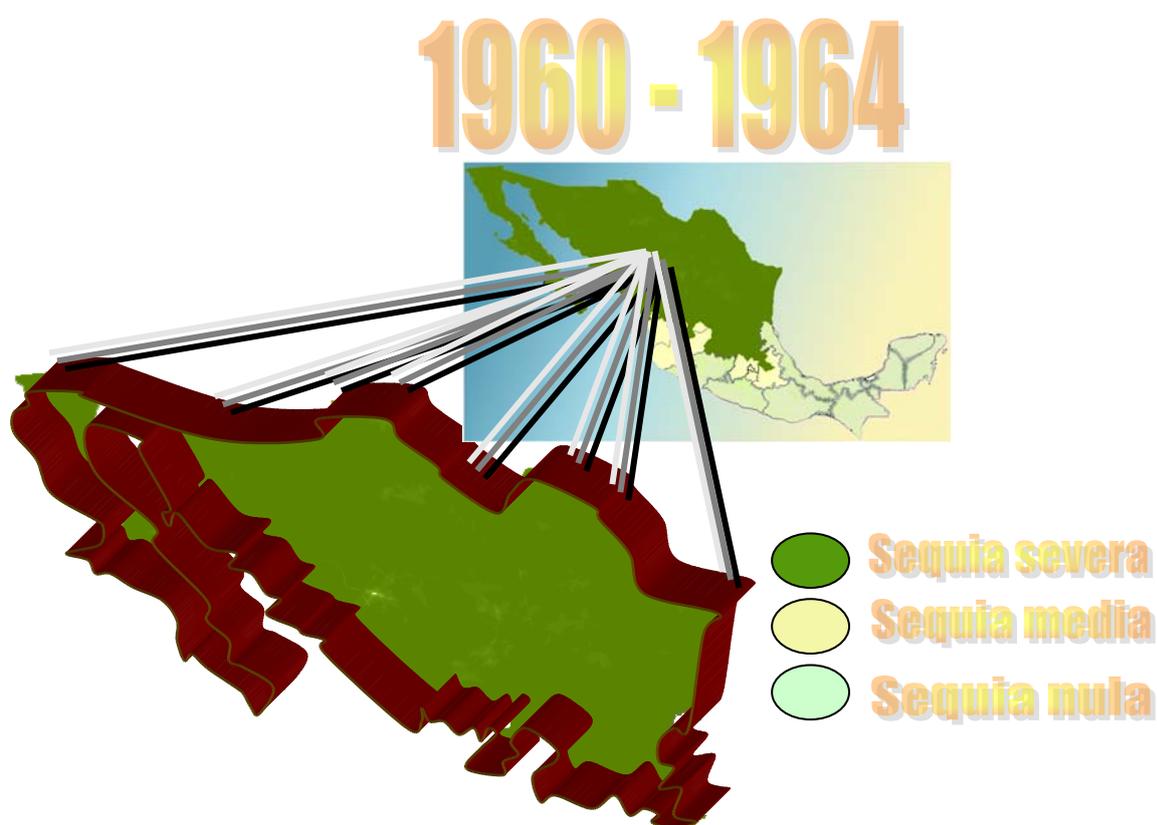


FIGURA 4.3.- Sequías en México de 1960 a 1964.

Cabe destacar que en el sureste del país la disponibilidad promedio es ocho veces mayor a la de las zonas centro, norte y noreste. Así, el promedio nacional de disponibilidad anual per cápita es de 4 mil 960 metros cúbicos: en el norte es de mil 930 y en el sur de 15 mil 270.

Las sequías son manifestaciones de las fluctuaciones climáticas asociadas con las anomalías de gran escala de los patrones de circulación atmosférica, la deforestación, el cambio de uso de suelo, la desertificación y de las actividades humanas. Esencialmente, las sequías provocan la disminución o ausencia de precipitación sobre una región por largos periodos de tiempo.

La vulnerabilidad a la sequía está en relación inversa al grado de desarrollo económico y social de las regiones afectadas. En países desarrollados raramente representan una amenaza real, ya que disponen de los medios económicos suficientes para afrontar sus efectos, en tanto que en un país en desarrollo, la sequía es generadora de conflictos entre grupos sociales y es sinónimo de hambruna, enfermedad y migración o muerte de personas y animales. La escasez de agua también reduce la generación de energía y la recarga de los mantos acuíferos.

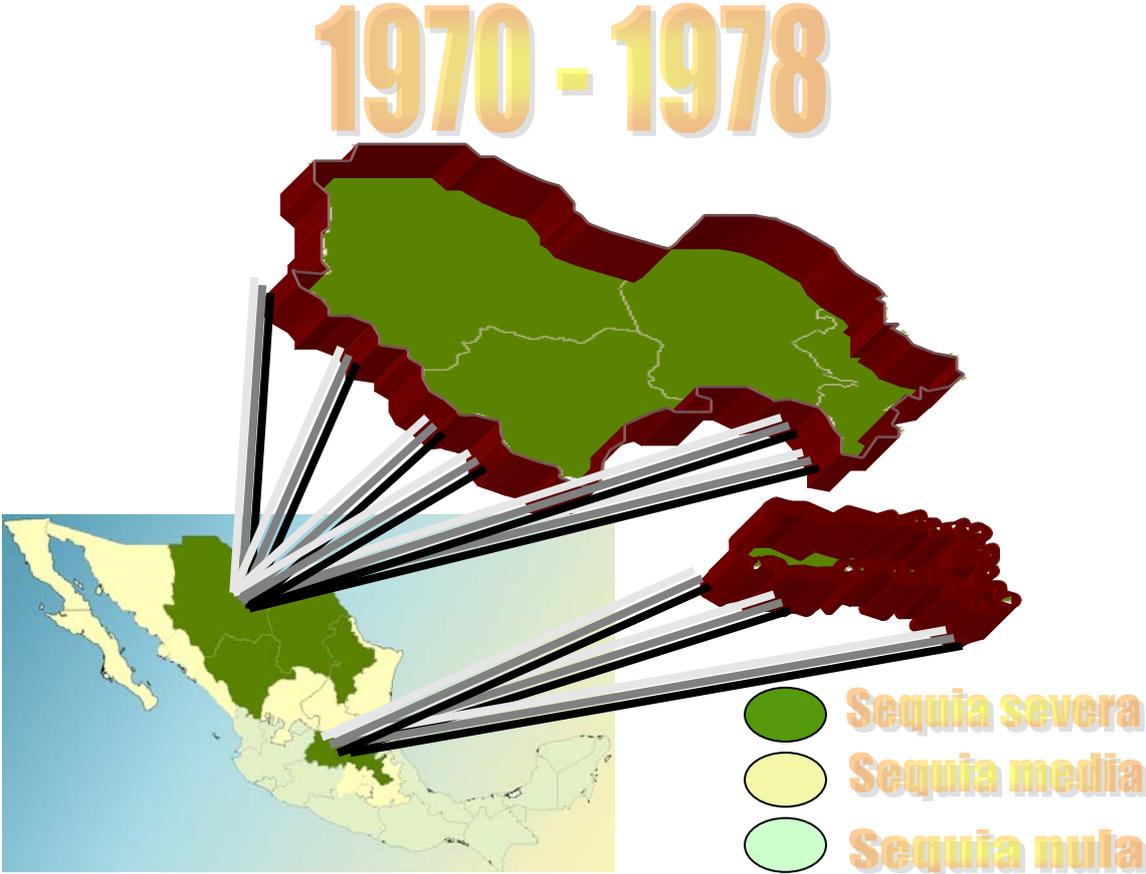


FIGURA 4.4.- Sequías en México de 1970 a 1978.

Se tienen serias dificultades para encontrar una definición única para el término sequía. Las definiciones dependen del enfoque con que se traten, ya sea desde el punto de vista profesional (meteorología, hidrología, geografía, desarrollo de los aprovechamientos hidráulicos, etc.) o de la actividad económica que afectan (agricultura, industria, producción de energía eléctrica, suministro de agua para consumo doméstico, la navegación y la recreación).

Se considera que una sequía meteorológica se presenta cuando la precipitación durante un cierto período de tiempo es significativamente más pequeña que el promedio a largo plazo o que un valor crítico.

Se caracterizan por la presencia de altas temperaturas, baja humedad en el ambiente y vientos fuertes.

Una sequía hidrológica ocurre cuando existe un déficit de agua, tanto de precipitación como de escurrimiento superficial y subterráneo. Esta sequía puede causar severos daños a la población, y que sus efectos y su recuperación son a largo plazo.

Una sequía agrícola ocurre cuando no existe en cierto tiempo la suficiente humedad en el suelo que satisfaga las necesidades para el desarrollo óptimo de un cultivo. Las sequías agrícolas suceden después que las meteorológicas pero antes de las hidrológicas. Las áreas de temporal son las que resienten más este tipo de eventos, aún en los casos en que las sequías sean relativamente moderadas, ya que si ocurre en periodos tempranos afecta el periodo de siembra, en tanto que si ocurre en etapas avanzadas puede disminuir drásticamente la calidad y volumen de producción. Este fenómeno generalmente afecta a la población más marginada, lo que provoca serios problemas de índole económico y social.

Desde el punto de vista económico y social, la definición de sequía considera no solo el suministro de agua, sino también la demanda. Esto significa que la sequía depende del tipo de uso del agua y de la densidad y distribución de los usuarios. La consideración de déficit de agua afecta la definición de sequía para períodos durante el cual la demanda exceda el suministro.

Se puede establecer que una sequía ocurre cuando se presenta un déficit significativo de agua (valor crítico) tanto en el tiempo como en el espacio. El término significativo, quiere decir que los impactos ambientales, económicos y sociales son muy importantes para el ser humano. En este punto es conveniente mencionar que si no hay actividad humana no hay afectación a la misma, y por lo tanto existe un déficit de agua con respecto a su valor medio pero no una sequía. Un ejemplo de esto se ve representado por el estado de Baja California, en donde se tienen la lámina de precipitación acumulada anual más baja dentro del territorio nacional, sin embargo, debido a la baja densidad poblacional sus efectos en algunas zonas no son importantes.

1990 - 1996

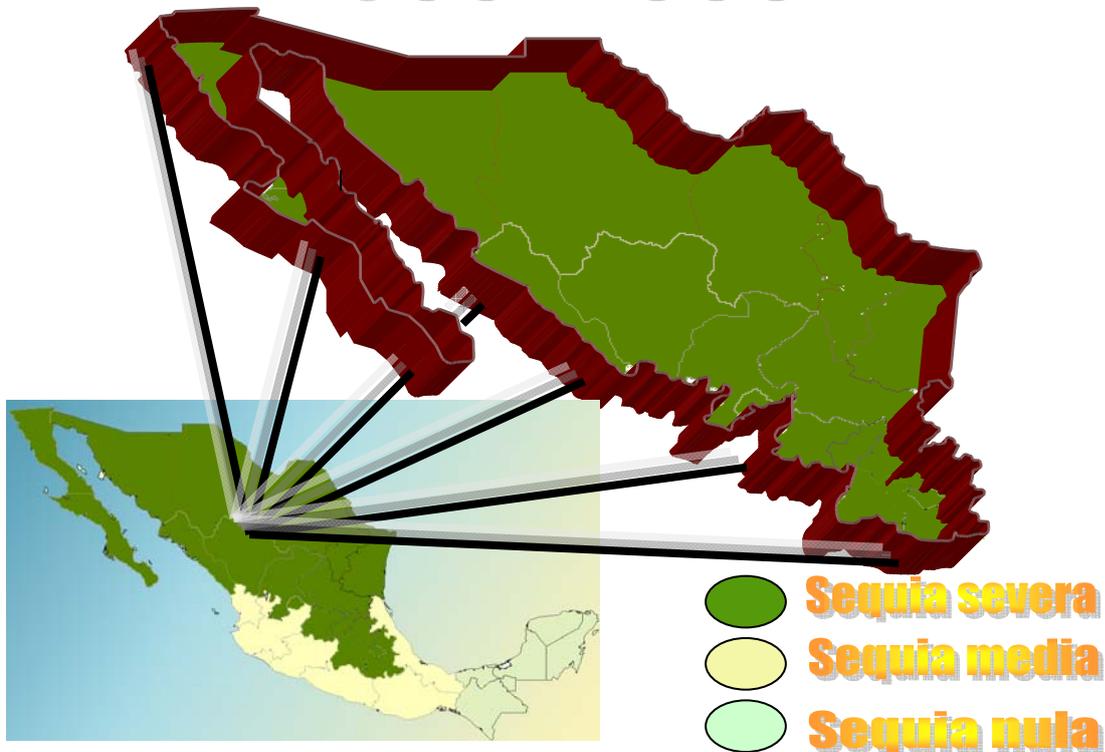


FIGURA 4.5.- Sequías en México de 1990 a 1996.

El criterio para establecer el valor crítico de la sequía depende generalmente de factores económicos y de los estándares de vida en la región en consideración, Por ejemplo, para uso agrícola se relacionan con los efectos de la reducción de agua en los cultivos, en tanto que para los usos doméstico e industrial dependen de los requerimientos de agua para la supervivencia, hábitos higiénicos o la producción industrial.

Debido a que los mayores impactos son del tipo económico, se deberán usar sus principios generales para definir a las sequías, Estos principios ayudan a encontrar una única definición de sequía al ' aplicar los conceptos de suministro y demanda de agua, ya sea para un usuario individual o conjunto de usuarios:

En este contexto una sequía se definirá por el déficit en el suministro de agua y se obtendrá mediante las diferencias entre las series de tiempo" (diaria, semanal, mensual, estacional o anual) de suministro de agua y las de demanda. Esto es válido para cualquier usuario, sitio o periodo de tiempo.

Definición de Aridez

La definición de aridez, en términos de planeación y manejo de recursos hídricos según Wiener (1972), está relacionada con las condiciones y el acceso del recurso agua que limitan seriamente la supervivencia o el crecimiento de una economía. En términos operativos, una región se considera aridez semiárida cuando la cantidad y/o calidad del agua representan una variable crítica que controla su planeación y desarrollo,

Para definir el término de aridez se debe partir de las características de la superficie terrestre, tales como geomorfología y vegetación, las cuales afectan el clima hasta presentar las condiciones comunes de desertización. Sin embargo, la definición más formal está en función de las causas que la originan y a menudo se basan en comparaciones entre la precipitación y algunas, medidas de potencial de evaporación, un buen ejemplo de lo anterior es la publicación de la UNESCO (1979). Esta definición se fundamenta en el valor del cociente de la altura de precipitación media anual con respecto a la evapotranspiración potencial media anual H_p / ETP . Los valores de esta relación definen tres grados de aridez: < 0.03 para la zona hiper-árida, $0.03 - 0.20$ para la zona árida y $0.20 - 0.50$ para la zona semiárida.

Además, se pueden definir algunas subclasificaciones basadas en temperatura, longitud del periodo anual seco y régimen estacional de precipitación.

De acuerdo con el valor de la precipitación media anual se puede considerar las regiones áridas, semi-áridas, semi-húmedas y húmedas.

REGION	PRECIPITACION ANUAL MEDIA
Árida	$H_p \leq 400 \text{ mm}$
Semi-árida	$400 \text{ mm} < H_p \leq 600 \text{ mm}$
Semi-húmeda	$600 \text{ mm} < H_p \leq 1500 \text{ mm}$
Húmeda	$H_p > 400 \text{ mm}$

Definición de regiones de acuerdo con el valor de la precipitación media anual.

La sequía y la aridez se asocian frecuentemente, debido a que las regiones más secas son usualmente aquellas donde la variabilidad de la precipitación es más alta.

La terminología y definiciones asociadas con la aridez y la sequía generan confusión semántica, toda vez que ambas condiciones se caracterizan por la ausencia de agua, sin embargo, se pueden establecer algunas condiciones que las hacen diferentes.

La sequía es un proceso extremo que se presenta tanto en tiempo como espacio. Cuando la sequía se debe solo a condiciones naturales se caracteriza por persistencia

en precipitaciones menores a la media, variabilidad en frecuencia, duración y severidad, ocurrencia impredecible, reducción en la disponibilidad de agua en cierta zona y disminución en la capacidad de conducción de la red hidrográfica.

En tanto, cuando la sequía o déficit es inducido por el hombre se caracteriza por que los sistemas hidrológicos se afectan localmente, además de que se produce un deterioro de la, calidad del agua por intrusión salina y se generan conflictos entre los usuarios del agua.

La aridez es un estado climático permanente. La mayor parte de las características hidrológicas para las zonas definidas como áridas y semiáridas son similares ya que todas ellas presentan bajo nivel de humedad en la región, valores altos de insolación, variación extrema de temperatura, alta variabilidad en la precipitación en tiempo y espacio. Por otro lado, un escenario común en las zonas clasificadas como semiáridas es que el 90% de la precipitación total anual ocurre tan sólo en el 10% del período de lluvias de la región.

De acuerdo con la secretaria de Gobernación (SEGOB, 2000), las sequías pueden clasificarse por el clima o por su magnitud.

Por Clima

- a) Permanentes: se producen en zonas de climas áridos.
- b) Estacionales: se observan en sitios con temporadas lluviosas y secas bien definidas.
- e) Contingentes: se presentan en cualquier época del año debido a períodos prolongados de calor, a falta de lluvias o a la coincidencia de ambos.
- d) Invisibles: ocurren cuando las lluvias del verano no cubren las pérdidas de humedad por evaporación.

Por Magnitud

- a) Leves: son aquellas que tienen como causa la escasez parcial de lluvias y no repercuten de manera importante en la producción ni en la economía.
- b) Moderadas: son las originadas por una disminución significativa en la precipitación pluvial que afecta a la producción agrícola.
- e) Severas: son las que se producen por la disminución general o total de lluvias, con daños cuantiosos a la producción.
- d) Extremadamente severas: son producto del proceso permanente de escasez de agua que provoca crisis en la agricultura y en la ganadería, con los consiguientes efectos al conjunto de la economía y la sociedad.

Adicionalmente, se pueden clasificar de acuerdo con el área que afectan como se muestra en la tabla siguiente.

Área (%)	Categoría
Menor al 10	Local
De 11 a 20	Vasta
De 21 a 30	Muy vasta
De 31 a 50	Extraordinaria
Mayor de 50	catastrófica

Clasificación de las sequías de acuerdo con la superficie afectada (Medina y Espinosa, 1998).

Impactos de la sequía

Comparando con otros fenómenos naturales los impactos que provocan las sequías son generalmente no estructurales, y están en función de la afectación a los diversos sectores económicos y productivos asociados con la oferta y demanda de bienes y servicios que aquellos que ofrecen, y el desequilibrio debido a las condiciones naturales y de baja humedad que se produce cuando la demanda supera a la oferta.

Índices propuestos para caracterizar una sequía

Con el fin de definir y comparar las características de las sequías se han propuesto un conjunto de índices, los cuales son descritos por un simple número. Los más simples hacen uso únicamente de la precipitación media anual. Otros, en adicción a la precipitación media anual o mensual utilizan algunas características como temperatura, evaporación, evapotranspiración, pérdida de de humedad del suelo y humedad antecedente del suelo.

Indicadores de sequía

Los indicadores de sequía están relacionados con cientos de datos de precipitación, nieve, caudales de los ríos e indicadores de suministro de agua. En general, no se utiliza un único indicador para caracterizar la sequía en una zona.

A continuación se relacionan algunos indicadores de sequía:

Índice de la severidad de la sequía de Palmer (PDSI)

Es un algoritmo que permite medir la pérdida de humedad del suelo. Es adecuado para su aplicación a zonas con topografía uniforme.

Este índice fue desarrollado en 1965 por Palmer y se basa en el concepto de suministro de agua.

El objetivo del Índice de Severidad de Sequía de Palmer es proporcionar medidas estandarizadas de condiciones de humedad, de tal forma que permita hacer comparaciones entre condiciones locales y entre duraciones. Palmer desarrolló criterios para determinar cuando una sequía o un período húmedo se inicia y termina.

Porcentaje de la Normal

El porcentaje de la precipitación Normal es una de las más simples medidas de lluvia para un sitio en estudio.

Este índice se obtiene al dividir primero la precipitación de diferentes tiempos de escala entre la precipitación Normal, la cual se establece como la precipitación media obtenida para un registro de al menos 30 años, y posteriormente multiplicarse por 100%. Usualmente los tiempos de escala que se utilizan son anual, estacional (formada por un grupo de meses) o para un mes en particular.

Una desventaja de este índice es que la precipitación media es frecuentemente diferente a la mediana de la precipitación, la cual es el valor excedido por el 50% de las precipitaciones en el registro climático de largo plazo. La razón para esto es que las series de precipitación mensual o estacional no tienen una distribución Normal, por lo que su uso en este tipo de series puede generar serias confusiones.

Índice de precipitación estandarizada (ESPI)

Fue desarrollado por McKee y otros investigadores en 1993. Este índice normalizado permite estudiar diferentes escalas de tiempo y se recomienda para registros de largo plazo.

ESPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Bajo este contexto, puede deducirse que registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes correspondiente, darán valores del SPI positivos, esto representa condiciones de humedad; mientras que, registros de precipitación inferiores al promedio histórico del mes correspondiente, arrojarán valores del SPI negativos, lo cual indica una intensidad en el déficit de humedad.

Índice de suministro de agua superficial (ISAS/SWSI)

Este índice complementa al índice de Palmer que no está diseñado para grandes variaciones topográficas y no considera el almacenamiento de nieve y su escorrentía.

El ISAS fue diseñado para conocer las condiciones de humedad superficial, incluyendo la nieve acumulada.

Índice de Riesgo de Sequía (IRS)

El IRS está formado por cuatro componentes: precipitación media anual corregida en función de la temperatura media anual, estacionalidad pluviométrica, variabilidad y persistencia de la sequía.

Este índice se definió para poder determinar la severidad, y duración de la sequía y para predecir el inicio y el final de este período.

Indicador de la Humedad del Cultivo (CMI)

El indicador CMI utiliza un planteamiento meteorológico para hacer un seguimiento semanal de las condiciones de los cultivos. Fue desarrollado por Palmer, en 1968, a partir del método de cálculo del PDSI. Mientras el PDSI hace un seguimiento meteorológico de los periodos húmedos y secos a largo plazo, el CMI fue diseñado para evaluar las condiciones de humedad a corto plazo en las principales regiones dedicadas a la producción agrícola.

Potencial Agro-Hidrológico (AHP)

Este indicador marca la demanda de agua como la capacidad de una zona determinada de satisfacer las necesidades de un cultivo concreto, que exista en ella, mediante el cociente entre el agua consumida y la requerida. Es decir, el Potencial Agro-Hidrológico es la relación entre la evapotranspiración real de un cultivo, y la evapotranspiración óptima del mismo

Variabilidad de la precipitación anual

El coeficiente de variación de la precipitación anual, definido como la relación de la desviación estándar a la media se utiliza frecuentemente como un índice de sequía, donde las sequías son más frecuentes el coeficiente es mayor de 0.35; para el caso contrario el coeficiente varía entre 0.15 y 0.25.

En algunos países como México, se ha encontrado cierta relación entre un valor alto del coeficiente de variación y las regiones áridas y semiáridas, que son las más afectadas por la frecuencia y crudeza de las sequías, ya que su navegación es ecológicamente frágil y la desertización constituyen un peligro permanente. Sin embargo, esto no es una generalidad.

Variabilidad de la precipitación

El coeficiente de variación de la precipitación anual, definido como la relación de la desviación estándar a la media se utiliza frecuentemente como un índice de sequía. Donde las sequías son más frecuentes el coeficiente es mayor de 0.35; para el caso contrario el coeficiente varía entre 0.15 y 0.25. .

Deciles de la precipitación

Otro índice que permite encontrar las características de una sequía lo constituye el k-ésimo decil de la precipitación anual o mensual. Gibbs y Maher emplearon esta técnica para obtener la distribución espacial de las sequías en Australia, estableciendo áreas donde la lluvia está comprendida dentro del rango del primer decil, el cual es la cantidad de lluvia que no es excedida por el 10% más bajo de la precipitación que ocurre en un sitio particular. El segundo decil es la cantidad de precipitación que no es

excedida por el 20% más bajo de las ocurrencias. Estos deciles continúan hasta que la cantidad de lluvia identificada por el décimo decil es la precipitación más grande registrada. Por definición, el quinto decil es la mediana, y es la cantidad de precipitación que no es excedida por el 50% de las ocurrencias en el periodo de registro. los límites de cada decil se calculan ordenando la muestra de tamaño n de menor a mayor magnitud, así el valor más grande registrado se le asigna la variable $H_p(n)$ y al más pequeño $H_p(1)$. Posteriormente, el valor de cada decil se obtiene de la forma:

$$\text{decil (1)} = H_p(1) + \text{constante}$$

$$\text{decil (i)} = \text{decil(i - 1)} + \text{constante} \quad \text{para } i = 2 \text{ hasta } 10$$

$$\text{Constante} = \frac{h_p(n) - h_p(1)}{10}$$

De acuerdo con este criterio, la precipitación anual puede clasificarse como se muestra en la tabla

Clasificación	Limites de frecuencia (%)	Decil
Mucho muy arriba del promedio	90-100	10
Muy arriba del promedio	80-90	9
Arriba del promedio	70-80	8
Ligeramente arriba del promedio	60-70	7
Normal	50-60	6
Normal	40-50	5
Ligeramente abajo del promedio	30-40	4
Abajo del promedio	20-30	3
Muy abajo del promedio	10-20	2
Mucho muy abajo del promedio	0-10	1

Clasificación de la variabilidad de la precipitación mediante la técnica de los deciles.

Una desventaja de este índice radica en que se requiere de una cantidad importante de información para establecer adecuadamente los deciles.

Índice de sequía de Palmer

El índice Palmer, PDSI, (Palmer Drought Severity Index), se utiliza en el campo de la meteorología como un indicador que señala el déficit de humedad.

El PDSI mensual es un índice meteorológico que refleja la estimación de la humedad normal, cuyas condiciones se derivan a partir de periodos conocidos que incluyen promedios mensuales de evapotranspiración, recarga subterránea, escurrimiento y pérdidas de agua en el suelo. El índice es estandarizado así que se tiene un significado consistente en diferentes áreas climáticas. Un sistema de clasificación traslada el valor numérico del índice a una medida descriptiva de la sequía.-

De la condición de humedad normal, la diferencia d entre la precipitación real P para un mes y la precipitación calculada a partir de un balance de agua de un elemento de suelo \hat{P} es:

$$d = P - \hat{P}$$

Y

$$\hat{P} = ET + RO + (\hat{R} - \hat{L})$$

Donde:

\hat{P} Precipitación climatológicamente normal para el mes,

ET Evapotranspiración

RO Escurrimiento

\hat{R} Recarga de agua en el suelo

\hat{L} Pérdida de agua en el suelo

\hat{P} y \hat{L} Forman el suministro de humedad, en tanto que ET, RO y \hat{R} representan la demanda.

El parámetro $(\hat{R} - \hat{L})$ representa el cambio de la humedad almacenada en el suelo, cada parámetro se calcula con datos del clima en el área y con promedios mensuales del periodo de registro.

Las diferencias de humedad mensual con respecto a la normal se ponderan para crear un índice estandarizado que se puede aplicar a diferentes áreas climáticas. Las diferencias d para cada mes se ponderan por un parámetro K , generando el índice de humedad anormal Z ,

$$Z = dK$$

El factor de peso K se deriva empíricamente de los registros mensuales de clima para el área en estudio, utilizando la relación de demanda a suministro de humedad y la media mensual de los valores absolutos de d para todos los años de registro. El factor K ajusta las diferencias de humedad para crear una medida estandarizada mensual para diferentes climas.

El PDSI para cierto mes i se calcula utilizando el índice de humedad anormal de ese mes Z_i y el valor previo mensual del índice PDSI.

$$PDSI_i = 0.897 PDSI_{i-1} + \frac{Z_i}{3}$$

Durante el mes inicial, el primer término es cero y el índice es igual a $Z/3$. Cuando Z es cero (condición de humedad normal, $d = 0$) el PDSI es 0.897 veces del mes previo.

Palmer utilizó información de sequías del centro de Iowa y el este de Kansas para graficar el índice de humedad anormal Z contra la longitud del periodo seco. Los

períodos secos se definieron como: sequía extrema (PDSI = -4.0), sequía severa (PDSI = -3.0), sequía moderada (PDSI = -2.0), Y sequía suave o ligera (PDSI = -1.0).

Índice Palmer de sequía hidrológica (PHDI)

El PHDI (Palmer Hydrological Drought Index) describe la deficiencia anormal de humedad en el suelo, utilizando el mismo principio, ecuaciones de suministro de humedad, demanda y la consideración de la máxima severidad en la sequía como el PDSI. La principal diferencia es que en el inicio y término de los periodos secos y húmedos, el PHDI responde más lentamente a los cambios en el clima. Esto ocurre a través del uso de una relación en el PHDI que expresa la humedad recibida como un porcentaje de aquella requerida para que termine la sequía, La ventaja de ese retraso en la respuesta es que mientras el clima puede retomar a la normalidad puede existir aún un déficit en la humedad del suelo, escurrimiento y nivel de los lagos. Una respuesta de tiempo más lenta permite la recuperación de esas características hidrológicas y así el índice describe mejor a La sequía hidrológica.

De acuerdo con Johnson, al comparar PHDI y el PDSI en varias regiones el PHDI fue uno o dos meses mas largo.

Karl y Knight proponen tres categorías para PHDI. Suave hasta moderada (PHDI = 1.5 hasta -3.9), severa (PHDI = -3.0 hasta -4.9) y extrema (PHDI < -4.0). La categoría severa y extrema (PHDI < -3.0) se caracteriza por un decremento en los escurrimientos y un bajo nivel de almacenamiento, lo que genera un gran impacto sobre las políticas de operación de los aprovechamientos hidráulicos.

Es importante señalar que el valor PHDI no es lineal y no debe promediarse, esto es, un mes con PHDI = -4.0, no es el doble de deficiente que un mes con un PHDI = -2.0. Similarmente, tres meses consecutivos con valores PHDI de -2.0, -3.0 Y -4.0 no se debe entender que tienen un promedio de PHDI = -3.0. Además, dos PHDI del mismo valor pero en diferentes regiones de un país no representan la misma escasez de humedad. En la tabla siguiente se presenta la clasificación más completa.

PHDI	Clase
4.00 o mayor	Extremadamente húmedo
3.00 a 3.99	Muy húmedo
2.00 a 2.99	Moderadamente húmedo
1.00 a 1.99	Ligeramente húmedo
0.50 a 0.99	Humedad incipiente
0.40 a 0.49	Humedad cercana a la normal
-0.50 a -0.99	Sequía incipiente
-1.00 a -1.99	Sequía suave o ligera
-2.00 a -2.99	Sequía moderada
-3.00 a -3.99	Sequía severa
-4.00 o menor	Sequía extrema

Clasificación del PHDI en periodos húmedos y secos.

Índice de humedad en los cultivos (CMI)

El CMI (Crop Moisture Index) fue desarrollado por Palmer dentro del contexto del PDSI. Este índice emplea una aproximación meteorológica para monitorear semana a semana las condiciones de los cultivos. Así como el PSDI se desarrolló para monitorear las condiciones de humedad o sequía de largo plazo, el CMI fue diseñado para evaluar las condiciones de humedad de corto plazo a lo largo de grandes extensiones agrícolas.

El índice se basa en la precipitación total y temperatura media de cada semana dentro de una división climática, así como del valor del CMI de la semana previa. El CMI responde rápidamente a las condiciones climatológicas de corto plazo y se puede construir planos que reflejen las variaciones de humedad en diferentes sitios de una región, sin embargo, una fuerte lluvia durante una sequía puede dar como resultado un valor del CMI que indique condiciones adecuadas de humedad, aún y cuando persista la sequía de largo plazo.

Índice de Precipitación estandarizada (SPI)

El SPI (Standardize Precipitación Index) fue diseñado para cuantificar el déficit de precipitación para múltiples escalas de tiempo. Estas escalas reflejan el impacto de la sequía sobre la disponibilidad de los diferentes aprovechamientos hidráulicos. Las condiciones de humedad del suelo responden a las anomalías de la lluvia a corto plazo. El agua subterránea, el escurrimiento y el almacenamiento en presas reflejan las anomalías de la precipitación a largo plazo. Por estas razones McKee et al. calcularon originalmente el SPI para periodos de 3, 6, 12, 24 Y 48 meses.

El cálculo del SPI se basa en el registro a largo plazo de la precipitación para un periodo de tiempo específico. Este registro de largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidad, la cual es inmediatamente transformada a una distribución Normal, tal que el valor medio del SPI para un sitio y periodo deseado es cero. Los valores positivos del SPI indican precipitaciones más grandes que la mediana. Debido a que el SPI esta normalizado, los climas más secos y más húmedos se pueden representar de la misma forma, y los periodos húmedos se pueden monitorear a través del SPI.

McKee et al. utilizaron el sistema de clasificación que se muestra en la tabla siguiente para definir la intensidad de la sequía. También definieron el criterio para la ocurrencia de una sequía para cualquier escala de tiempo, Así, una sequía tiene lugar si en cualquier tiempo el SPI tiene un valor igualo menor a -1.0. El evento concluye cuando el valor de SPI es positivo, Por lo tanto, cada periodo de sequía se puede caracterizar mediante su inicio, término y la intensidad para cada mes que el evento continúa. La suma de los valores negativos del SPI para todos los meses se considera como la magnitud de la sequía.

SPI	Clase
2.00 o Mas	Extremadamente húmedo
1.00 a 1.99	Muy húmedo
0.50 a 0.99	Moderadamente húmedo
0.40 a 0.49	Humedad cercana a la normal
-0.50 a -0.99	Moderadamente seco
-1.00 a -1.99	Muy seco

-2.00 o menos	Extremadamente seco
---------------	---------------------

Clasificación del SPI en periodos húmedos y secos (McKee et al. 1993).

De entre las funciones de densidad de probabilidad, la Gamma de dos parámetros es la que representa un buen ajuste a las series mensuales de precipitación.

La función de densidad Gamma esta definida por

$$f(x) = \frac{x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} \quad \begin{matrix} 0 \leq x < \infty \\ \text{si } \alpha > 0 \rightarrow \gamma > 0 \\ \gamma > 0 \end{matrix}$$

Donde

α Parámetros de escala

β Parámetros de forma

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} y^{\beta-1} e^{-y} dy$$

Función Gamma completa

Los parámetros de distribución se estiman con los datos de cada estación, para cada escala temporal de interés (2, 3, 6, 12, 24 y 48 meses).

Estimación de parámetros por momentos

$$\hat{\alpha} = \frac{S^2}{\bar{x}}$$

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\bar{X}}{S} \right)^2$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$S = \left[-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}$$

Donde

Estimación de parámetros por máxima verosimilitud

$$\hat{\alpha} = \frac{\bar{x}}{\hat{\beta}}$$

El estimador $\hat{\beta}$ se obtiene al resolver

$$F(\hat{\beta}) = \ln(\hat{\beta}) - \psi(\hat{\beta}) - C = 0$$

Empleando como valor inicial del parámetro $\hat{\beta}$

$$\hat{\beta} = \frac{1\sqrt{1+\frac{4}{3}C}}{4C}$$

$$C = \ln(\bar{x}) - \bar{y}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$$

La aproximación de la función digamma de $\hat{\beta}$ es

$$\psi(\hat{\beta}) = \ln(\hat{\beta} + 2) - \frac{1}{2(\hat{\beta} + 2)} - \frac{1}{12(\hat{\beta} + 2)^2} - \frac{1}{120(\hat{\beta} + 2)^4} - \frac{1}{252(\hat{\beta} + 2)^6} - \frac{1}{(\hat{\beta} + 1)} - \frac{1}{\hat{\beta}}$$

Estimación de parámetros por momentos-L

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

$$\lambda_1 = \beta_0$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0$$

$$\beta_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\beta_1 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n x_i(n-i)$$

Para $0 \leq \tau_2 < 0.5$

$$Z = \pi\tau_2^2 = 3.1416\tau_2^2$$

$$\hat{\beta} = (1 - 0.308z) / (z - 0.05812z^2 + 0.01765z^3)$$

Para $0.5 \leq \tau_2 < 1$

$$Z = 1 - \tau^2$$

$$\hat{\beta} = \frac{(0.7213z - 0.5947z^2)}{(1 - 2.1817z + 1.2113z^2)}$$

En ambos casos

$$\hat{\alpha} = \frac{\bar{x}}{\hat{\beta}}$$

Con los parámetros estimados por cualquiera de los métodos propuestos, se procede a obtener la distribución acumulada de un evento observado de precipitación para un mes dado y para una escala de tiempo en determinada estación climatológica. La distribución de probabilidad acumulada es

$$F(x) = \int_0^x \frac{t^{\beta-1} e^{-t/\alpha}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} dt$$

Con el cambio de variable $t = \frac{x}{\alpha}$ la expresión anterior se transforma en la función Gamma incompleta

$$F(x) = \frac{1}{n\Gamma(\beta)} \int_0^x t^{\beta-1} e^{-t} dt$$

La función anterior no está definida para $x=0$, pero debido a que un registro real de precipitación si cuenta con ceros, entonces se debe determinar la probabilidad acumulada de la forma

$$H(x) = q + (1-q)G(x)$$

Donde q es la probabilidad de ceros, $q = \frac{m}{n}$, si m es el número de ceros en la serie y n es el total de valores del registro. La expresión anterior se puede resolver mediante el uso de tablas de la función gamma incompleta o bien, mediante el empleo de un esquema numérico.

Una vez que se obtienen las probabilidades acumuladas de la expresión anterior, se deberán transformar mediante la aproximación a variables normales estandarizadas, las cuales son de hecho los indicadores SPI.

Para una probabilidad acumulada $0 < H(x) \leq 0.5$

$$SPI \approx v - \frac{b_0 + b_1v + b_2v^2}{1 + b_3v + b_4v^2 + b_5v^3}$$

Donde

$$b_0 = 2.515517$$

$$b_3 = 1.432788$$

$$b_1 = 0.802853$$

$$b_4 = 0.189269$$

$$b_2 = 0.010328$$

$$b_5 = 0.0001308$$

$$v = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[H(x)]^2} \right\}}$$

Para una probabilidad acumulada $0.5 < H(x) \leq 1$ se cambia $H(x)$ por $[1 - H(x)]$ en la expresión anterior y se le cambia el signo al valor SPI calculado con la ecuación para una probabilidad acumulada $0 < H(x) \leq 0.5$.

Análisis de series anuales

Una vez que se presupone o se sabe que existe una sequía, es importante cuantificarla para tomar un curso de acción. Los primeros pasos en esa incierta catalogación es la determinación de las características intrínsecas de la sequía. Éstas son la duración, la magnitud o intensidad (valor promedio del déficit) y la severidad (valor acumulado del déficit). Existen técnicas que permiten caracterizar a una sequía a través del análisis de las series de tiempo.

Secuencias de una serie de tiempo.

Una componente necesaria para una completa definición de sequía es la especificación del llamado nivel de truncamiento o umbral, el cual permite distinguir las sequías de otros eventos en los datos históricos.

Los estadísticos como la media y la mediana de las series de tiempo registradas se utilizan generalmente para definir el nivel de truncamiento. Puede decirse que el uso de la mediana es útil para el análisis de las duraciones, mientras que la media lo es para las severidades. Sin embargo, un análisis completo de sequías relaciona simultáneamente la duración y la severidad. Lo anterior no resulta práctico ya que involucra el uso de dos niveles diferentes de umbral. Un procedimiento sugerido para evitar la controversia en la selección de este nivel es el de la normalización de la muestra analizada, que remueve el sesgo y se espera con esto que la media y la mediana de la muestra coincidan, sin embargo las dos medidas de tendencia central usualmente no son idénticas, aun después de la transformación normal, por lo tanto es recomendable utilizar la media como umbral ya que es mas sensitiva al considerar los valores extremos de la serie de datos.

El concepto y efecto del nivel de truncamiento es más claro cuando la teoría estadística de las secuencias se adopta para el análisis de una serie de tiempo, formada por eventos hidrológicos o meteorológicos. Los parámetros fundamentales de las secuencias de una serie meteorológica anual se presentan en la figura siguiente

El valor de truncamiento X_0 puede establecerse arbitrariamente para cortar la serie en diferentes sitios y su relación con los otros valores X de la serie definen los parámetros de las secuencias. Estos parámetros son la suma total de la secuencia (desviación acumulada desde X_0), la Intensidad de la secuencia (desviación promedio desde X_0), y la longitud de la secuencia (distancia o tiempo entre cruces sucesivos de X_0). En la

terminología de las sequías estos tres términos son conocidos como Severidad (S), Intensidad (I) y Duración (D).

En la práctica la selección de X_0 no es tan arbitraria, sino que es función del déficit de agua estudiado. Para el análisis de las sequías hidrológicas o meteorológicas multi-
anuales, X_0 puede seleccionarse como el escurrimiento o la lluvia media anual; para el estudio de una sequía agrícola, X_0 puede elegirse como la humedad media del suelo presente durante la primera etapa del crecimiento del cultivo Teóricamente, X_0 puede ser una constante, una variable estocástica, una función determinística, o cualquier combinación de estas.

Figura Parámetros fundamentales de las secuencias .de una serie

Teoría de los promedios móviles

Esta técnica permite suavizar algunas de las variaciones aleatorias de una serie de tiempo. Si la secuencia de valores de la serie es $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$, el promedio móvil será.

$$\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N}, \frac{X_2 + X_3 + \dots + X_{N+1}}{N}, \frac{X_3 + X_4 + \dots + X_{N+2}}{N}, \dots$$

Las sumas de los numeradores se llaman Sumas Móviles de orden N y el resultado de cada cociente es el promedio móvil de orden N. El orden N, puede ser cualquier valor, pero si es muy pequeño puede volver poco efectiva la técnica para reducir la variabilidad aleatoria, en contraste, si es muy grande se puede ocultar la componente cíclica de la serie.

Los registros de precipitación anual son analizados con promedios móviles de orden 5, ya que permite suavizar la componente irregular de las series, prevaleciendo en el registro los efectos de los ciclos húmedos y secos, Los períodos húmedos o lluviosos son detectados comparando la línea de promedios móviles con la línea recta que representa la lluvia media anual de todo el registro; durante los periodos de sequías, la línea de promedios móviles esta por debajo del valor medio. Una vez determinado los periodos húmedos y secos es posible obtener las características de severidad, intensidad y duración de cada secuencia.

Análisis de series mensuales

La técnica de identificación desarrollada por Herbst et al, se puede aplicar para analizar series de tiempo periódicas, ya sea de escurrimientos o precipitaciones mensuales.

Esta técnica fue desarrollada con el propósito de identificar con fines agrícolas las características de inicio, terminación y severidad de una sequía.

El análisis considera que los cultivos en cualquier región se adaptan al patrón climático del sitio tal que se torna cierta ventaja en los meses con un alto promedio de lluvia, pero debido a las variaciones de la lluvia media mensual se puede tener como un hecho normal una sequía estacional de cierta duración e intensidad, por lo que no se debería incluir dentro de la evaluación de daños. Por esta razón, los autores consideran

que solo se deben tener en cuenta los efectos que provocan el déficit mensual que exceden al valor promedio de éstos,

Se considera que el beneficio que recibe la vegetación, con las lluvias que caen por arriba del promedio, persiste por algún tiempo debido al almacenamiento del agua en el suelo. Por el contrario, después de un periodo con lluvias por debajo del promedio, la recuperación del cultivo no es inmediata y los efectos nocivos persisten aún y cuando mejore el patrón de lluvias.

La secuencia de análisis es la siguiente.

Paso 1. Para la serie periódica de lluvia $Q_{v\tau}$ para $v=1,2,\dots,n$ años y $\tau=1,2,\dots,12$ meses, se calcula mes a mes sus características estadísticas (media, varianza, desviación estándar, coeficiente de asimetría, coeficiente del curtosis y coeficiente de variación).

Paso 2. Con la lluvia media mensual se establece el umbral $T(\tau)$ que separa los eventos potenciales de sequía y excedencias.

Paso 3. Para cada mes se obtiene un factor de peso $W(\tau)$, el cual varía entre 0.1 y 0.4, de la forma

$$W(\tau) = 0.1 \left\{ 1 + T(\tau) / \left[\sum_{\tau=1}^{12} T(\tau) / 12 \right] \right\}$$

Paso 4. Se obtiene una nueva serie periódica, llamada efectiva la cual considera el efecto del transporte del déficit o superávit de lluvia en el mes precedente.

$$E_{v,\tau} = Q_{v,\tau} + S_{v,\tau-1} \cdot W(\tau)$$

donde

$$S_{v,\tau} = E_{v,\tau} - T(\tau)$$

Para el primer año analizado, por ejemplo 1950, y considerando el mes de Enero ($\zeta=1$), el valor de la lluvia efectiva es $E_{1950,1} = Q_{1950,1}$.

Para ese año y los siguientes meses ($\zeta=2,3,\dots,12$) la lluvia efectiva se obtendrá como

$$\begin{aligned} E_{1950,2} &= Q_{1950,2} + [E_{1950,1} - T(1)]W(2) \\ E_{1950,3} &= Q_{1950,3} + [E_{1950,2} - T(2)]W(3) \\ E_{1950,4} &= Q_{1950,4} + [E_{1950,3} - T(3)]W(4) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ E_{1950,12} &= Q_{1950,12} + [E_{1950,11} - T(11)]W(12) \end{aligned}$$

Similarmente,

$$E_{1951,1} = Q_{1951,1} + [E_{1950,12} - T(12)]W(1)$$

Paso 5. Se obtiene la serie periódica de diferencias negativas (déficit) o positivas (superávit)

$$D_{v,\tau} = E_{v,\tau} - T(\tau)$$

Paso 6. Se calcula el déficit medio mensual $DM(\zeta)$, considerando solo para este propósito que las diferencias positivas son cero. Para obtener el valor medio se considera el tamaño total de la muestra. El valor del déficit medio anual se obtiene como

$$DMA = \sum_{\tau=1}^{12} DM(\tau)$$

Paso 7. Con el propósito de determinar el inicio de un periodo de sequía se obtendrá una escala de doce valores de la forma

$$X = \frac{DMA - PMMM}{11}$$

Donde PMMM es el valor máximo de las lluvias medias anuales $T(\tau)$

El primer valor de la escala es PMMM, el cual se considera como el máximo déficit que puede ocurrir en un mes, cuando no llueve en el mes donde normalmente se recibe la mayor precipitación. Los siguientes valores se obtienen como $PMMM + 1X$, $PMMM + 2X, \dots$, $PMMM + 11X$.

Para iniciar la prueba se compara el valor absoluto de la primera diferencia negativa $D_{c,t}$, obtenida del paso 5, con el primer valor de la escala. Si este último valor es igualado o excedido (situación muy rara), se dice que la sequía inicia en ese mes. Si la diferencia del mes siguiente también es negativa, se debe comparar la suma de los valores absolutos de las dos diferencias, con el segundo valor de la escala, si este valor es igualado o excedido se dice que la sequía comienza desde el primer mes de prueba. Si no se cumple con esta condición y si la tercera diferencia también es negativa, entonces, se debe comparar la suma de los valores absolutos de las tres diferencias con el tercer valor de la escala, si este valor es igualado o excedido se dice que la sequía comienza desde el primer mes de prueba, Este procedimiento se realiza hasta comparar los doce valores de la escala. Si después de que se compararon los doce valores no se satisface la prueba, entonces no se trata de un periodo de déficit significativo y se deberá reiniciar el procedimiento para el siguiente mes con una diferencia negativa.

Paso 8. Con el objetivo de determinar el final del periodo de sequía se obtendrá una segunda escala de doce valores, la cual se forma al ordenar de mayor a menor los

valores $T(\zeta)$. El primer elemento es el máximo valor de $T(\tau)$, el segundo es la suma de los dos valores más grandes de $T(\tau)$, el tercero lo conforman la suma de los tres valores más grandes, y así sucesivamente.

La prueba considera como condiciones del término potencial de una sequía si se cumple:

- 1) Al menos uno de los dos meses siguientes al mes inicial con una diferencia positiva debe tener también una diferencia positiva.
- 2) Se compara la suma de los valores registrados de los tres primeros meses $Q_{v,t}$ a partir del primer mes de prueba, con el tercer valor de la segunda escala, Si este valor es igualado o excedido, se dice que la sequía ha concluido desde el primer mes de prueba. Si esto no es así, se compara la suma de los cuatro valores registrados $Q_{v,t}$ con el cuarto valor de la escala, y así sucesivamente,

Si estas condiciones no se satisfacen, entonces solo se trata de una interrupción temporal de la sequía y se deberá proceder al análisis de la siguiente diferencia positiva.

Una vez que la sequía ha terminado, la prueba para el comienzo de la siguiente será cuando se presente una nueva diferencia negativa.

Paso 9. Una vez concluido el procedimiento de identificación se puede determinar las siguientes características:

- 1) El número total de sequías en el periodo analizado N_s
- 2) El mes en que inicia cada sequía M_i
- 3) El mes en que finaliza cada sequía M_f
- 4) La duración en meses de cada sequía D_s
- 5) La suma de todas las diferencias negativas que ocurren durante cada sequía
- 6) La suma de los déficit medios mensuales en un periodo idéntico al de la sequía considerada
- 7) La suma de los déficit que exceden a los medios mensuales para la duración de cada sequía
- 8) El número total de meses en que ocurre un déficit en exceso de cada sequía
- 9) La intensidad de la sequía, medida a través del índice

$$Y = \frac{\sum_{M_i}^{M_f} \text{Déficit en exceso}}{\sum_{M_i}^{M_f} DM(\tau)}$$

- 10) La severidad de la sequía medida con el índice

$$YD = \frac{\sum_{Mi}^{Mf} \text{Déficit en exceso}}{\sum_{Mi}^{Mf} DM(\tau)} Ds$$

11) La lluvia que cae durante el período de cada sequía expresada como un porcentaje de la suma de la lluvia media anual sobre el mismo período.

12) El porcentaje del déficit mensual para cada período de sequía, estimado a partir del punto anterior

13) La lluvia que cae durante el período húmedo previo a cada sequía expresada como un porcentaje de la suma de la lluvia media anual sobre el mismo período.

14) El porcentaje del superávit mensual para cada período de húmedo, estimado a partir del punto anterior.

Mohan y Rangacharya (1991) propusieron modificar el valor del umbral $T(\tau)$ cuando las series de analizadas presentan gran variabilidad, esto es, cuando el coeficiente de variación es mayor a 0.25. La expresión tomada en valor absoluto es:

$$T(\tau) = \bar{Q}(\tau) - \frac{\sigma_{\tau}^2}{\bar{Q}(\tau)}$$

donde

$Q(\tau)$ lluvia media mensual para el mes τ

σ_{τ}^2 varianza de la lluvia mensual para el mes τ

Distribución Log normal con tres parámetros

Chow (Kite, 1988) suministró una justificación teórica para el uso de la distribución Log Normal para el análisis de eventos hidrológicos extremos, ya que los factores que los causan actúan en forma multiplicativa en lugar de aditiva.

Por el teorema del límite central se puede demostrar que sujeto a condiciones generales, la distribución logarítmica del producto de r variables independientes se aproxima a la distribución Normal conforme r se incrementa. Entonces, se puede considerar que la ocurrencia de las sequías anuales de cierta magnitud x es el resultado de la acción conjunta de muchos factores causales independientes, ya sean hidrometeorológicos o geográficos.

La función de densidad de probabilidad tiene la forma

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x-x_0)}{\sigma_y} \right]^2} \quad x > x_0$$

Donde

x_0 parámetro de ubicación

μ_y parámetro de forma

σ_y parámetro de escala

Estimadores por momentos

$$\bar{x}_0 = x \left(1 - \frac{\eta_x}{\eta_z} \right)$$

donde

$$\eta_x = \frac{S}{x}$$

$$\eta_z = \frac{1 - w^{2/3}}{w^{1/3}}$$

$$w = \frac{(g^2 + 4)^{1/2} - g}{2}$$

$$\mu_y = \ln \left(\frac{S}{\eta_z} \right) - \frac{1}{2} \ln(\eta_z^2 + 1)$$

$$\sigma_y = [\ln(\eta_z^2 + 1)]^{1/2}$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$\mu_y = \sum_{l=1}^n \frac{\ln(x_l - \bar{x}_0)}{n}$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{l=1}^n [\ln(x_l - x_0) - \mu_y]^2 / n$$

Y el estimador x_0 se obtiene al resolver

$$F(x_0) = \sum_{l=1}^n \frac{1}{(x_l - x_0)} (\mu_y - \sigma_y^2) - \sum_{l=1}^n \left\{ \left[\frac{1}{(x_l - x_0)} \right] \ln(x_l - x_0) \right\} = 0$$

Puesto que una distribución de frecuencias es únicamente un estimado de la muestra de cierta población, es probable que otra muestra de igual longitud de esa misma población, pero tomada en diferente tiempo produzca otra curva de frecuencias. Los límites o intervalos de confianza definen el rango dentro del cual se espera que se ubiquen estas curvas con cierto nivel de confianza.

$$X_l = X_t \pm U_\alpha S_t$$

Donde

X_l Límites de confianza superior e inferior

X_t Evento obtenido a partir de la función de distribución para cierto periodo de retorno

T

U_t Desviación Normal estándar para un nivel de confianza α

Con límites al 90 %

$$\alpha = 0.10 \quad \mu_\alpha = 1.645212$$

Con límites al 95 %

$$\alpha = 0.05 \quad \mu_\alpha = 1.960395$$

Con límites al 99 %

$$\alpha = 0.01 \quad \mu_\alpha = 2.576236$$

ST Desviación estándar de los eventos estimados para un periodo de retomo T

Estimación de eventos para la distribución Log Normal con tres parámetros

$$X_t = x_0 + \exp(\mu_y + U_t \sigma_y)$$

Para una probabilidad acumulada $0 < F(x) \leq 0.5$ se tiene que

$$U_t \approx v - \frac{b_0 + b_1 + b_2 v^2}{1 + b_3 v + b_4 v^2 + b_5 v^3}$$

Donde

$$b_0 = 2.515517$$

$$b_1 = 0.802853$$

$$b_2 = 0.010328'$$

$$b_3 = 1.432788$$

$$b_4 = 0.189269$$

$$b_5 = 0.001308$$

Además,

$$v = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{F(x)^2}\right)}$$

Para una probabilidad acumulada $0.5 < F(x) \leq 1$ se cambia $F(x)$ por $[1-F(x)]$ en la expresión y se le cambia el signo al valor U_t calculado con la ecuación.

Desviación estándar de los eventos X_t por momentos

$$S_t = \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}} \left(1 + \frac{U_t^2}{2}\right)^{1/2}$$

Desviación estándar de los eventos X_t por máxima verosimilitud

$$S_t \left[\begin{array}{l} \text{Var}(x_0) + Z_t^2 \text{Var}(\mu_y) + \left(\frac{U_t Z_t}{2\sigma_y}\right)^2 \text{Var}(\sigma_y^2) + \frac{U_t Z_t}{\sigma_y} \text{Cov}(x_0, \sigma_y^2) \\ + 2Z_t \text{Cov}(x_0, \mu_y) + \frac{U_t Z_t}{\sigma_y} \text{Cov}(\sigma_y^2, \mu_y) \end{array} \right]^2$$

Donde

$$Z_t = \exp(\mu_y + U_t \sigma_y)$$

$$\text{Var}(x_0) = 1/2nc$$

$$\text{Var}(\mu_y) = \frac{\sigma_y^2 \left[0.5 \left(1 + \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \left(\frac{a}{b} \right)^2 - \frac{a}{b^2} \right]}{nc}$$

$$\text{Var}(\sigma_y^2) = \frac{\sigma_y^2 \left[\left(1 + \sigma_y^2 \right) \left(\frac{a}{b} \right)^2 - \frac{a}{b^2} \right]}{nc}$$

$$\text{Cov}(x_0, \sigma_y^2) = \frac{\sigma_y^2 \sqrt{a}}{nbc}$$

$$\text{Cov}(x_0, \mu_y) = \frac{\sqrt{a}}{2nbc}$$

$$\text{Cov}(\sigma_y^2, \mu_y) = \frac{\sigma_y^2 a}{nb^2 c}$$

$$a = \exp\{\sigma_y^2\}$$

$$b = \exp\{\mu_y\}$$

$$c = 0.5 \left(1 + \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \left(\frac{a}{b} \right)^2 - \left(1 + \frac{1}{2\sigma_y^2} \right) \left(\frac{a}{b^2} \right)$$

Distribución Gamma con tres parámetros

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \tau(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left(-\frac{x - x_0}{\alpha} \right)$$

$$\alpha > 0$$

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$\gamma > 0$$

donde

X_0 parámetro de ubicación

α parámetro de escala

β parámetro de forma

$\zeta(\beta)$ función Gamma completa

Además,

$$\mu = x_0 + \alpha\beta$$

$$\sigma^2 = \alpha^2 \beta$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$$

$$\kappa = 3 \left(1 + \frac{\gamma^2}{2} \right)$$

Para valores extremos de β

$$\tau(\beta) = (\beta - 1)!$$

$$\tau(1) = 1$$

Para valores no enteros de β y $\beta > 1$

$$\tau(\beta) = (\beta - 1)\tau(\beta - 1)$$

Para valores de $0 < \lambda < 1$

$$\tau(\lambda) = \exp\left\{\left(\lambda - \frac{1}{2}\right)\ln(\lambda) - \lambda + \frac{1}{2}\ln(2\pi) + \frac{1}{12\lambda} + \frac{1}{360\lambda^3} + \frac{1}{1260\lambda^5} + \frac{1}{1680\lambda^7}\right\}$$

$$\tau(0.5) = \sqrt{\pi} = 1.77245$$

Por ejemplo, si $\beta=2.3$, entonces utilizando en forma recursiva la expresión (a) se tiene

$$\tau(2.3) = (2.3 - 1)\tau(2.3 - 1) = 1.3\tau(1.3) = 1.3[(1.3 - 1)\tau(1.3 - 1)] = 1.3(0.3)\tau(0.3)$$

y $\tau(0.3)$ se obtiene con la aproximación (b).

Estimadores por momentos

$$\beta = \frac{4}{g^2}$$

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}}$$

$$x_0 = x - S\sqrt{\beta}$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0) \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(x_i - x_0)} \right]}}$$

El estimador x_0 se obtiene al resolver

$$F(x_0) = \sum_{i=1}^n \ln(x_i - x_0) - n \ln(\alpha) - n\psi(\beta) = 0$$

La aproximación de la función digamma de β es

$$\psi(\beta) = \ln(\beta + 2) - \frac{1}{2(\beta + 2)} - \frac{1}{12(\beta + 2)^2} - \frac{1}{120(\beta + 2)^4} - \frac{1}{252(\beta + 2)^6} - \frac{1}{(\beta + 1)} - \frac{1}{\beta}$$

Estimación de eventos

$$\bar{X}_t \approx x_0 + \alpha\beta \left\{ 1 - \frac{1}{9\beta} + U_t \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right\}^3$$

Desviación estándar de los eventos X_i por momentos

$$S_i = \left\{ \frac{\mu_2}{n} \left[1 + k_i \gamma + \frac{k_i^2}{2} \left(\frac{3\gamma^2}{4} + 1 \right) + 3k_i \frac{\partial \kappa_i}{\partial \gamma} \left(\gamma + \frac{\gamma^3}{4} \right) + 3 \left(\frac{\partial \kappa_i}{\partial \gamma} \right)^2 \left(2 + 3\gamma^2 + \frac{5\gamma^4}{8} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

$$\kappa_i = U_i + (U_i^2 - 1) \left(\frac{\gamma}{6} \right) + \frac{1}{3} (U_i^3 - 6U_i) \left(\frac{\gamma}{6} \right)^2 - (U_i^2 - 1) \left(\frac{\gamma}{6} \right)^3 + U_i \left(\frac{\gamma}{6} \right)^4 + \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{\gamma}{6} \right)^5$$

$$\frac{\partial \kappa_i}{\partial \gamma} = \left(\frac{1}{6} \right) \left\{ (U_i^2 - 1) \left[1 - 3 \left(\frac{\gamma}{6} \right)^2 \right] + 4U_i \left(\frac{\gamma}{6} \right)^3 \right\} + \left(\frac{\gamma}{6} \right) \left(\frac{1}{6} \right)^2 \left\{ 4(U_i^3 - 6U_i) - 10 \left(\frac{\gamma}{6} \right)^3 \right\}$$

Donde

μ^2 y γ son la varianza y coeficiente de asimetría estimados de la muestra analizada

Desviación estándar de los eventos X_i por máxima verosimilitud

$$S_i = \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \right)^2 \text{Var} \alpha + \left(\frac{\partial x}{\partial \beta} \right)^2 \text{Var} \beta + \left(\frac{\partial x}{\partial x_0} \right)^2 \text{Var} x_0 + 2 \frac{\partial x \partial x}{\partial \alpha \partial \beta} \text{Cov}(\alpha, \beta) \\ & + 2 \frac{\partial x \partial x}{\partial \alpha \partial x_0} \text{Cov}(\alpha, x_0) + 2 \frac{\partial x \partial x}{\partial \beta \partial x_0} \text{Cov}(\beta, x_0) \end{aligned} \right\}^{1/2}$$

Donde

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha} = \left[\beta^{1/3} - \frac{1}{9\beta^{2/3}} + \frac{U_i}{3\beta^{1/6}} \right]^3$$

$$\frac{\partial x}{\partial \beta} = 3\alpha \left[\beta^{1/3} - \frac{1}{9\beta^{2/3}} + \frac{U_i}{3\beta^{1/6}} \right]^2 \left[\frac{1}{3\beta^{2/3}} + \frac{2}{27\beta^{5/3}} - \frac{U_i}{18\beta^{7/6}} \right]$$

$$\frac{\partial x}{\partial x_0} = 1$$

$$\text{Var} \alpha = \frac{1}{n\alpha^2 D} \left[\frac{\psi(\beta)}{(\beta - 2)} - \frac{1}{(\beta - 1)^2} \right]$$

$$\text{Var} \beta = \frac{2}{nD\alpha^4 (\hat{\beta} - 2)}$$

$$\text{Var} X_0 = \frac{\beta\psi(\beta) - 1}{n\alpha^2 D}$$

$$\text{Cov}(\alpha, \beta) = -\frac{1}{n\alpha^3 D} \left[\frac{1}{(\beta - 2)} - \frac{1}{(\beta - 1)} \right]$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}(\alpha, x_0) &= -\frac{1}{n\alpha^2 D} \left[\frac{1}{(\beta-2)} - \psi\beta \right] \\ \text{Cov}(\beta, x_0) &= -\frac{1}{n\alpha^3 D} \left[\frac{\beta}{(\beta-2)} - 1 \right] \\ D &= \frac{1}{(\beta-2)\alpha^4} \left[2\psi \left(\beta - \frac{2\beta-3}{(\beta-1)^2} \right) \right] \end{aligned}$$

La aproximación de la función trigamma de β es

$$\psi(\beta) = \frac{1}{(\beta+2)} + \frac{1}{2(\beta+2)^2} + \frac{1}{6(\beta+2)^3} - \frac{1}{30(\beta+2)^5} + \frac{1}{42(\beta+2)^7} - \frac{1}{30(\beta+2)^9} + \frac{1}{(\beta+1)^2} + \frac{1}{\beta^2}$$

Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel) para mínimos

La distribución de valores extremos tipo I (Gumbel) también se emplea en el análisis de frecuencias para mínimos.

Para obtener la función de distribución Gumbel para mínimos se utiliza el principio de simetría

$$F(x)_{\min} = 1 - F(-x)_{\max}$$

Es decir,

$$F(x)_{\min} = 1 - \exp^{-\exp\left(-\frac{x-v}{\alpha}\right)} = 1 - \exp^{-\exp\left(-\frac{w-x}{\alpha}\right)} \text{ para } -\infty < x < \infty, \alpha > 0$$

La función de densidad se define por

$$f(x)_{\min} = \frac{1}{\alpha} \exp^{-\exp\left(-\frac{w-x}{\alpha}\right)} \exp\left(-\frac{w-x}{\alpha}\right)$$

donde

w parámetro de ubicación

α parámetro de escala

$$E(x) = w + 0.5772\alpha$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6}$$

$$\gamma = 1.1396$$

$$\kappa = 5.4002$$

La variable reducida Gumbel para mínimos es

$$y_l = \frac{w - x_l}{\alpha}$$

Esta distribución no está limitada en los extremos. Los valores más pequeños de la distribución VEI tienen una alta probabilidad de ser negativos. Además, la distribución VEI para mínimos es asimétrica a la izquierda con coeficiente constante de sesgo. Sin embargo, los eventos mínimos siempre tienen un límite inferior más grande o igual a cero y con diferentes coeficientes de sesgo.

Estimadores por momentos

$$w = x - 0.577\alpha = x - 0.45S$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78S$$

Estimadores por máxima verosimilitud

La función de máxima verosimilitud queda definida por

$$L(x_l, w, \alpha) = L(x_l, \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_l, \theta)$$

$$L(x_l, w, \alpha) = \frac{1}{\alpha^n} \exp \left[- \sum_{l=1}^n \left(\frac{w - x_l}{\alpha} \right) - \sum_{l=1}^n \exp \left(- \frac{w - x_l}{\alpha} \right) \right]$$

$$\ln L(x_l, \theta) = \ln \prod_{l=1}^n f(x_l, \theta) = n \ln \alpha - \sum_{l=1}^n \left(\frac{w - x_l}{\alpha} \right) - \sum_{l=1}^n \exp \left(- \frac{w - x_l}{\alpha} \right)$$

Si se usa la variable reducida se tiene

$$\ln L(x_l, \theta) = -n \ln \alpha - \sum_{l=1}^n y_l - \sum_{l=1}^n \exp^{-y_l}$$

$$-\frac{\partial nL}{\partial w} = \frac{-n \sum_{l=1}^n \exp^{-y_l}}{\alpha} = -\frac{P}{\alpha}$$

$$-\frac{\partial nL}{\partial \alpha} = \frac{n - \sum_{l=1}^n y_l + \sum_{l=1}^n y_l \exp^{-y_l}}{\alpha} = \frac{R}{\alpha}$$

$$\frac{\partial nL}{\partial w} = 0; \frac{\partial nL}{\partial \alpha} = 0$$

Estas ecuaciones no tienen solución explícita por lo que requieren resolverse en forma iterativa

$$w_{j+1} = w_j + \delta w_j$$

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \delta \alpha_j$$

Incrementos

$$\delta_{\omega_j} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_l}{n}$$

$$\delta_{\alpha_j} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_l}{n}$$

$$P = n - \sum_{l=1}^n \exp^{-y_l}$$

$$R = n - \sum_{l=1}^n y_l + \sum_{l=1}^n y_l \exp^{-y_l}$$

El criterio de convergencia es

$$\left(\frac{\partial nL}{\partial \omega} \right)_j = \frac{P}{\alpha} \approx 0$$

$$\left(\frac{\partial nL}{\partial \alpha} \right)_j = -\frac{R}{\alpha} \approx 0$$

Estimación de eventos

$$X_t = \omega + \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{t} \right) \right]$$

Desviación estándar de los eventos X_t por momentos

$$S_t = \left[\frac{\sigma^2}{n} (1 + 1.1396\kappa_t + 1.10\kappa_t^2) \right]^{1/2}$$

donde

$$\kappa_t = \frac{Z_m - \mu_z}{\sigma_z}$$

$$Z_m = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{t} \right) \right] \quad \text{donde} \quad t = \frac{n+1}{m}$$

$$\mu_z = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n Z_m$$

$$\sigma_z = \left[\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n (Z_m - \mu_z)^2 \right]^{1/2}$$

donde σ^2 se estima con la expresión siguiente

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6}$$

Desviación estándar de los eventos X_t por máxima verosimilitud

$$S_t = \left[\frac{\alpha^2}{n} (1.1086 + 0.514y_t + 0.6079y_t^2) \right]^{1/2}$$

$$y_t = -\ln \left[-\ln \left(\frac{t-1}{t} \right) \right]$$

Distribuciones mezcladas.

Cuando se modelan series de avenidas anuales se pueden considerar dos secuencias de variables generadas por dos diferentes tormentas. Se concibe que cierta proporción, p , de la población tenga valores que vienen de la primera distribución $F_1(x)$, mientras los restantes valores vienen de una diferente distribución $F_2(x)$. Si las unidades se consideran apropiadamente mezcladas, entonces la probabilidad de que una simple unidad provenga de manera aleatoria de la primera distribución es p , y que sea de la segunda $(1 - p)$. La probabilidad no condicional de que la variable aleatoria sea menor que x es

$$P(X \leq x) = F(x) = p F_1(x) + (1 - p)F_2(x) \quad x \geq 0$$

Donde p es la proporción de x en la mezcla y $F(x)$ es una mezcla de distribuciones.

Distribución Gumbel mixta o de dos poblaciones para mínimos (Gumixmin)

Si las distribuciones marginales $F_1(x)$ y $F_2(x)$ son del tipo de valores extremos tipo I (Gumbel)

$$F_1(x) = \exp\left(-\exp^{-(x-v_1)/\alpha_1}\right) \quad x \geq 0$$

$$F_2(x) = \exp\left(-\exp^{-(x-v_2)/\alpha_2}\right) \quad x \geq 0$$

Entonces la expresión anterior conduce al modelo mezclado para máximos (Gumbel mixta)

$$F(x) = p \exp\left(-\exp^{-(x-v_1)/\alpha_1}\right) + (1 - p) \exp\left(-\exp^{-(x-v_2)/\alpha_2}\right) \quad x \geq 0$$

Donde

v_1 y x_1 parámetros ubicación y escala para la primera y segunda población
 p parámetro de asociación ($0 < p < 1$).

Los flujos mínimos anuales se atribuyen a un continuo abatimiento del almacenamiento de agua de una cuenca hasta que se alcanza el mínimo nivel en la descarga. Los flujos mínimos anuales de algunos ríos son relacionados a un proceso que conduce al abatimiento de agua, por ejemplo debido a la evaporación. En otras cuencas este abatimiento puede ser causado por evaporación combinado sin reemplazo de flujo debido a la lluvia. Los eventos de cada uno de los procesos de dos sub-poblaciones separadas pueden combinarse para seguir una distribución que refleje ambas sub-muestras.

Empleando $F(x)_{\min} = 1 - \exp^{-\exp^{-\left(\frac{-x-v}{\alpha}\right)}} = 1 - \exp^{-\exp^{-\left(\frac{w-x}{\alpha}\right)}}$ para $-\infty < x < \infty, \alpha > 0$
 se tienen las siguientes distribuciones para mínimos

$$F_1(x)_{\min} = 1 - \exp\left[-\exp^{-(\omega_1-x)/\alpha_1}\right] \quad x \geq 0$$

$$F_2(x)_{\min} = 1 - \exp\left[-\exp^{-(\omega_2-x)/\alpha_2}\right] \quad x \geq 0$$

La distribución mezclada para mínimos se puede expresar como (Reyes y Escalante, 1998)

$$F(x)_{\min} = p\left[1 - \exp^{\exp^{-(w_1-x)/\alpha_1}}\right] + (1-p)\left[1 - \exp^{-\exp^{-(w_2-x)/\alpha_2}}\right] \quad x \geq 0; 0 < p < 1$$

Con función de densidad

$$f(x) = \frac{p}{\alpha_1} \exp^{-\exp^{-(w_1-x)/\alpha_1}} \exp^{-(w_1-x)/\alpha_1} + \frac{1-p}{\alpha_2} \exp^{-\exp^{-(w_2-x)/\alpha_2}} \exp^{-(w_2-x)/\alpha_2}$$

Estimadores por máxima verosimilitud

Los parámetros se calculan maximizando la siguiente expresión

$$\ln L = \ln \prod_{l=1}^n f(x_l, \omega_l, \alpha_l, \omega_2, \alpha_2, p), \alpha_l > 0$$

Dada la complejidad de la expresión anterior y de las derivadas parciales con respecto a los parámetros, se emplea el método de optimación multivariable restringido de Rosenbrock (Kuester y Mize, 1973) para su directa maximización.

Distribución de valores extremos de dos componentes (TCEV)

La distribución de valores extremos de dos componentes, conocida como CEV se origina de un modelo que considera que las avenidas son las máximas variables de un número K de variables Z's, independientes e idénticamente distribuidas de un proceso de Poisson e independientes de K. La distribución de la variable Z se consideró como una mezcla de dos distribuciones exponenciales. Su función de distribución es (Rossi et al, 1984)

$$F(x) = \exp\left(-\lambda_1 \exp^{-x/\alpha_1} - \lambda_2 \exp^{-x/\alpha_2}\right)$$

Los parámetros λ_1 y λ_2 son, respectivamente, el número medio anual de avenidas independientes que vienen de la primera y segunda componentes.

Las funciones de distribución y densidad TCEV para mínimos se obtienen empleando el principio de simetría (Gumbel, 1958) como (Reyes y Escalante, 1998):

$$F(x)_{\min} = \exp\left(-\lambda_1 \exp^{x/\alpha_1} - \lambda_2 \exp^{x/\alpha_2}\right), x \geq 0$$

$$f(x) = \exp\left(-\lambda_1 \exp^{x/\alpha_1} - \lambda_2 \exp^{x/\alpha_2}\right) \left(\frac{\lambda_1}{\alpha_1} \exp^{x/\alpha_1} + \frac{\lambda_2}{\alpha_2} \exp^{x/\alpha_2}\right), x \geq 0$$

Los cuatro parámetros de la distribución TCEV para mínimos pueden estimarse el conjunto de datos del sitio analizado, por la directa maximización de la siguiente expresión empleando nuevamente el algoritmo de optimación de Rosenbrock (Kuester and Mize, 1973).

$$\ln L = \ln \prod_{i=1}^n f(x_i; \lambda_1, \alpha_1, \lambda_2, \alpha_2)$$

Confiabilidad de los estimados con distribuciones mezcladas

Cualquier nueva aproximación para el análisis de eventos extremos mínimos debe mostrar que los eventos estimados con estas distribuciones son más confiables estadísticamente que aquellos obtenidos con aproximaciones ya existentes.

Esta confiabilidad se puede cuantificar por muchas medidas tales como el sesgo, varianza y la raíz del error medio cuadrático (*RMSE*) y las eficiencias de los *RMSE*'s.

El procedimiento consiste en generar 99,000 números con diferentes distribuciones poblacionales (Weibull, Gumbel mixta, TCEV, GVE y VEI). Posteriormente se agrupan en forma aleatoria en conjuntos de tamaño 9, 19, 49 y 99. Por lo tanto, el número de muestras, para cada tamaño es igual a 11,000, 5210, 2020 y 1000. Tal número de muestras asegura una desviación máxima absoluta entre la distribución empírica y la verdadera distribución de menos de 0.016 para el mayor número de muestras y 0.051 para el más pequeño, con una probabilidad del 99%.

Para cada muestra se calculan los eventos estimados por máxima verosimilitud de las distribuciones Weibull, Gumbel mixta, TCEV, GVE y VEI. La comparación se lleva a cabo con los eventos estimados para probabilidades de 0.25, 0.50, 0.75, 0.90, 0.95 y 0.99.

Si θ es el evento a estimarse y $\theta_i, i = 1, \dots, n$ los estimadores obtenidos de cada muestra para un número n de muestras, las cuales varían de 11,000 a 1000. Entonces, el sesgo y la raíz del error medio cuadrático (*RMSE*) del estimador se obtienen como $\text{sesgo} = m(\theta) - \theta$

$$\text{RMSE} = \sqrt{S^2(\theta) + [m(\theta) - \theta]^2}$$

Donde $m(\theta)$ y $S^2(\theta)$ son la media y varianza de la muestra generada

$$m(\theta) = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n \theta_i$$

$$S^2(\theta) = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n [m(\theta) - \theta_i]^2$$

Cuando se estiman los parámetros y eventos de una función de distribución, es conveniente tener estimadores no sesgados y con un mínimo valor del *RMSE*. Comparando entre estimadores, aquel con varianza más pequeña es mejor.

Si se lleva a cabo una comparación relativa de los *RMSE*'s, considerando la relación de eficiencia = *RMSE*(s) / *RMSE*(f), en la cual *RMSE*(s) - raíz del error medio cuadrático para la misma distribución de la muestra simulada y *RMSE*(f) = otro estimador de *RMSE*. Por ejemplo, si la muestra generada tiene una distribución Weibull, la eficiencia es igual a uno cuando la distribución Weibull sirve como valor comparativo, es decir, en este caso se considera que la distribución Weibull es la más eficiente. Una relación más grande que uno indica que el estimador alternativo (Gumbel Mixta, VEI, GVE o TCEV), es más eficiente en términos del *RMSE*, que el de la Weibull. Por el contrario, una relación más pequeña indica lo opuesto.

Los sesgos promedio de la distribución Gumbel mixta para mínimos son cercanos o mejores que los de las distribuciones Weibull y GVE cuando las poblaciones son Weibull y Gumbel Mixta. La distribución VEI produce los más altos valores de los sesgos promedio para todos los casos simulados.

Los sesgos TCEV son buenos únicamente en el caso cuando las muestras generadas son TCEV. Las distribuciones Weibull y GVE son la mejor alternativa en términos del sesgo cuando las muestras generadas provienen de las distribuciones Weibull, GVE y TCEV.

Ejemplo de sequía hidrológica:

La identificación de la sequía hidrológica se logra definiendo los siguientes pasos:

- a) Determinando el umbral
- b) Identificando las precipitaciones que se ubican abajo del umbral
- c) Los eventos situados abajo del umbral son sequías

METODO DE LAS RACHAS

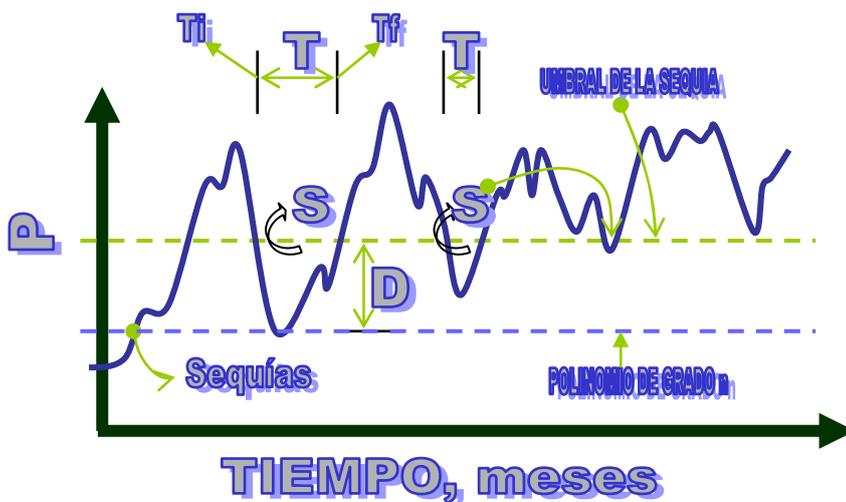


FIGURA 4.6- Gráfica de precipitación anual en la Ciudad de México

Las sequías pueden determinarse mediante sus características que son las siguientes:

- 1) Déficit, D, en mm.
- 2) Duración T, en meses o años (2,5,20 años).
- 3) Tiempo de inicio (Ti).
- 4) Tiempo de terminación (Tf).
- 5) Tiempo de ocurrencia $t = \frac{1}{2}(Ti + Tf)$
- 6) Número de orden de la sequía, que le corresponde a un evento en la tabla ordenada de mayor a menor.
- 7) Extensión de la sequía

La determinación de la extensión de una sequía se logra analizando e identificando las sequías en cada una de ellas (estaciones).

Las sequías que estén dentro de un registro común son las que definen la extensión.

- 8) Severidad de la sequía

$S=D*T$, mm*año

D= Déficit

T= Duración

El período mínimo de análisis para una sequía es de 30 años.

Ejemplo: Para la cuenca en la Ciudad de Aguascalientes la precipitación promedio anual es la que se muestra en la tabla siguiente:

Antes de analizarlo se tiene que tomar en cuenta ciertos criterios de evaluación como se muestra a continuación.

Para los eventos extremos se tienen dos métodos de análisis probabilístico rápido.

	Gumbel
Eventos extremos	Distribución Normal

Los datos que se necesitan para este estudio son los siguientes:

- Datos de 30 años de una estación climatológica.
- Identificar las sequías para trazar las rachas
- Probabilidad de ocurrencia
- Sequía agrícola

Análisis Puntual para e identificar las sequías en la Estación de la presa Jocaqui, Estado de Aguascalientes								
Año	P (mm).	Déficit D (mm).	D acumulado	Año	P (mm).	Diferencias P-Pm	Déficit D (mm).	D acumulado
1942	315.3	161.1	161.1	1970	396.1	-80.3	80.3	80.3
1943	554.6			1971	609.0			
1944	478.4			1972	504.8			
1945	290.8	185.82	185.82	1973	550.7			
1946	1080.6			1974	412.0	-64.40	64.40	
1947	497.3			1975	449.9	-26.26	26.26	90.9
1948	545.6			1976	638.9			
1949	370.9	105.52		1977	353.6	-122.5	122.5	122.5
1950	392.3	84.12	189.6	1978	489.6			
1951	567.0			1979	382.6	-93.80	93.80	
1952	406.7	69.7	69.7	1980	360.1	-116.02	116.02	
1953	491.3			1981	345.5	-130.9	130.9	
1954	360.9			1982	297.8	-178.6	178.6	519.32
1955	477.4			1983	591.3			
1956	430.8	45.62		1984	489.3			
1957	231.4	245.0	290.62	1985	452.0	-24.42	24.42	
1958	802.9			1986	449.3	-27.12	27.12	51.54
1959	542.1			1987	480.5			
1960	322.5	153.9		1988	295.5	-180.9	180.9	
1961	344.6	131.8		1989	429.1	-47.32	47.32	228.22
1962	365.2	111.2	369.90	1990	510.1			
1963	572.9			1991	773.8			
1964	455.1	21.3	21.3	1992	588.4			
1965	657.5			1993	392.2	-84.22	84.22	
1966	744.1			1994	374.4	-102.02	102.02	186.24
1967	602.9			1995	514.5			
1968	635.2			1996	487.1			
1969	232.9	243.5	243.5	1997	292.0	-184.42	184.42	184.42

FIGURA 4.7.- Análisis Puntual para e identificar las sequías en la Estación de la presa Jocaqui

Con los datos de la precipitación anual de la estación, Jocaqui, determinar el número de sequías y sus características, teniendo el umbral o nivel de truncamiento igual a la media.

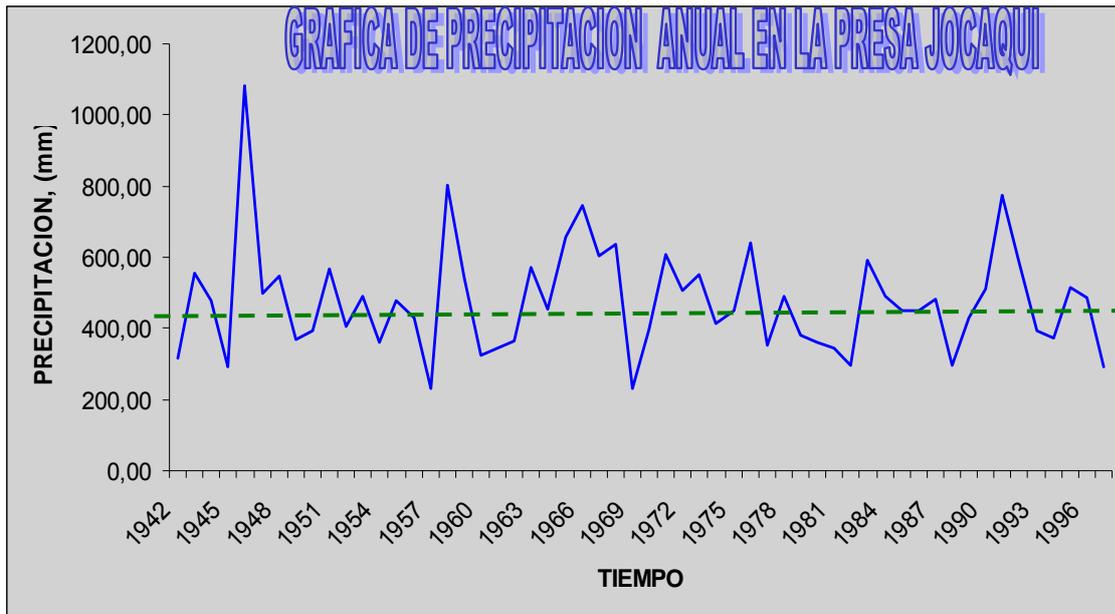


FIGURA 4.8.- Grafica de la precipitación anual de la presa Jocaqui

CARACTERISTICAS DE LAS SEQUIAS

Nº SEQUIA	DURACION AÑOS	PERIODO	PERIODICIDAD	DEFICIT	INTENSIDAD (MEDIA), (mm)	
1	1	1942-1942		161,1	80,55	
2	1	1945-1945	3	185,6	185,6	
3	2	1949-1950	4	189,6	94,8	
4	1	1952-1952	2	69,7	34,85	69,7
5	1	1954-1954	2	115,2	57,6	115,2
6	2	1956-1957	2	290,6	145,3	
7	3	1960-1962	3	369,6	184,8	123,2
8	1	1964-1964	2	21,3	21,3	
9	1	1970-1970	6	80,3	40,15	40,15
10	2	1974-1975	4	90,9	45,45	45,1
11	1	1977-1977	2	122,5	61,25	122,5
12	4	1979-1982	2	519,3	129,82	
13	2	1985-1986	3	51,5	25,75	
14	2	1988-1989	2	228,5	114,1	
15	2	1993-1994	4	186,2	93,1	
16	1	1997-1997	3	184,4	92,2	184,4

Media = 1.80 }
 S = 0.90 } Período

Media = 2.80 }
 S = } Periodicidad

De acuerdo con los datos anteriores las conclusiones para el análisis estadístico son las siguientes:

1. Una sequía se presenta cada 2.8 años y tiene una duración esperada de 1.8 años
2. El déficit máximo registrado se obtuvo en el período 1979-1982, con un valor acumulado de 519.6 mm y una severidad de ≈ 130 mm / año. Lo que representa un 27.28% con respecto a la media.
3. con la sequía mas severa la lamina disponible es de

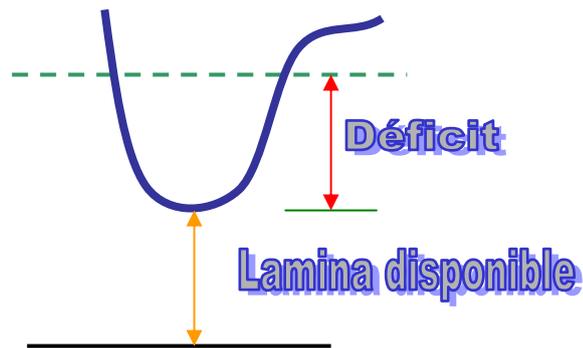


FIGURA 4.9.- Lamina disponible.

4. Calculo probabilístico

¿Cual es la probabilidad de que se presente una sequía de 1 año?

$$7/16 = 0.44$$

¿Cual es la probabilidad de que se presente una sequía de 2 años?

$$7/16 = 0.44$$

¿Cual es la probabilidad de que se presente una sequía de 4 años?

$$7/16 = 0.44$$

¿Cuál es la probabilidad de que al haberse presentado un año de sequías, los 3 siguientes sean de sequías?

$$7/16 \times 7/16 \times 7/16 = 343/4096 = 0.0837403$$

Para la estación presa Jocaqui se desea calcular:

- a) La ocurrencia de una sequía tal que la precipitación es de 300 mm.
- b) Determinar el periodo de retorno de esa sequía

Solución: se sugiere emplear la distribución normal

Datos:

Media muestral = 476.42 mm = \bar{X}

Desviación estándar 152.31 mm = σ_x

X = Precipitación = 300 mm

$$\text{a) } Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma_x} = \frac{300 - 476.42}{152.3} = -1.15$$

De tablas P = (Z = -1.15) = 0.8749

La probabilidad de ocurrencia de que se presente la sequía de 176.42 mm es de 87.49 %

$$\text{b) } T_r = \frac{1}{P} = \frac{1}{0.1251} = 7.99 \Rightarrow 8.0 \text{ años}$$

CALCULO DE LA PROBABILIDAD MENSUAL DE UNA LLUVIA

- Para calcular la probabilidad de ocurrencia de un mes cualquiera se necesitan los datos mensuales de la estación climatológica
- Para cada mes se pueden calcular los parámetros estadísticos de los meses como; la media, la desviación estándar, el coeficiente T de variación, etc.
- Los parámetros estadísticos calculados, serán los que requiera la distribución probabilística que se va a emplear, por ejemplo, para la distribución Normal y los de Gumbel solo se requieren la media y la desviación estándar.

Metodología

- De acuerdo con el periodo de vegetativo de la planta se deben considerar los valores mensuales acumulados de lluvia, a partir del mes de siembra.
- Como en el caso del cálculo de probabilidad de lluvia mensual, se puede calcular la probabilidad de lluvia acumulada, comparándose la lluvia acumulada contra el uso conjunto de la planta.
- Finalmente el cálculo probabilístico se puede iniciar en cualquier mes del año, y sumar y acumular los valores de los meses subsecuentes.

Análisis de frecuencias

La magnitud de un evento hidrológico extremo puede obtenerse como:

$$X_T = \mu \Delta x T$$

μ = Media poblacional

$\Delta x T$ = Desviación de la variable $x T$

Con respecto a la variable μ

También

$$\Delta x T = K_T \sigma$$

Donde:

K_T = Factor de frecuencia

σ = Desviación estándar poblacional

O sea

$$X_T = \mu + K_T \sigma$$

Suponiendo que la muestra y la población tienen parámetros estadísticos similares, entonces

$$X_T = \bar{X} + K_T S$$

El evento X_T puede calcularse conociendo los parámetros estadísticos de la muestra \bar{X} y S

\bar{X} = Media

S = Desviación estándar

El factor de frecuencia cambia para distribución.

Factor de frecuencia

Para la distribución normal

$$K_T = Z = \frac{X_T - \bar{X}}{S} \dots\dots\dots(\text{tabla})$$

O bien para computadora

$$W = \left[\ln \left(\frac{1}{P^2} \right) \right]^{1/2} \quad 0 \leq P \leq 0.5 \dots\dots\dots(\text{A})$$

$$K_T = Z = \frac{W - 2.51551770802853W + 0.010328W^2}{1 + 1.432788W + 0.189269W^2 + 0.001308W^3} \dots\dots\dots(\text{B})$$

Cuando

$$P > 0.5$$

(1-P) se sustituye por "P" en la ecuación (A) y el valor Z calculado con (B), se le asigna signo negativo.

LOG – Normal

Igual procedimiento al anterior solo que se calculan los logaritmos vulgares de la muestra.

$$Y_T = \bar{Y} + K_T S_y$$

$$Y = \text{Log } x$$

Distribución de valor extremo tipo I (Chow)

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5792 + \text{Ln} \left[\text{Ln} \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\}$$

SEQUIA EN UN RIO

Análisis regional de Gastos mínimos (sequías Hidráulicas)

Para el análisis regional hidrométrico se puede emplear la técnica

“Estaciones-Año”

Este método considera el tratamiento de una sola muestra de datos conformada por un registro estandarizado de eventos.

A ese registro estandarizado se le puede aplicar el conjunto de distribuciones de probabilidad.

Está técnica a diferencia de otras, no requiere que las muestras tengan la misma longitud de registros. Como se trata de un estudio de sequías debemos de considerar los gastos mínimos.

SECUENCIA

- 1.- Probar entro de la región analizada la homogeneidad de la serie de datos. Con pruebas estadísticas.
- 2.- Se obtienen los parámetros estadísticos muestrales de las series Q_i^j , en donde

i = número de datos

j = estación hidrométrica

se obtienen los parámetros

$$\bar{X}_j = S_j, S_i, g_j, k_j, CV_j; \quad (*\text{gastos mínimos})$$

Para J=1,....., serie de muestras

- 3.- Para cada serie J se verifica la independendencia de eventos
- 4.- PRUEBA

PRUEBA ESTADISTICA DE CRAMER PARA VERIFICAR LA HOMOGENEIDAD DE LOS REGISTROS

Para sequías los registros son:

- a) El gasto mínimo en "d" días
- b) La precipitación mínima en meses

Esta prueba se utiliza con el propósito de verificar la homogeneidad de el registro Q_i^j de la serie J (longitud cuantos días por ejemplo) para $i=1,2,\dots,n_j$.

También se emplea para determinar si el valor medio no varia significativamente de un período de tiempo a otro (puede variar si se construye una presa sobre la corriente).

Para aplicar la prueba se separan 3 bloques de datos:

Primer bloque $n_j \longrightarrow \bar{Q}$ (todos los datos) = 100% muestra
 Segundo bloque $n_{60} \longrightarrow \bar{Q}$ (60 % de la muestra)
 Tercer bloque $n_{50} \longrightarrow \bar{Q}$ (30 % de la muestra)

- 1.- La prueba compara el valor de \bar{Q}^j del registro.
- 2.- Total con cada una de las medias de los bloques elegidos.

CRITERIO: Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre la media de los bloques.

Consideramos que esa diferencia no supera el 10% para que no sea significativa.

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} Q_i^j / n_j, \text{ para una muestra analizada } J = 1$$

$$S_Q^j = \left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}_j)^2 \right]^{1/2}$$

$$\bar{Q}_{60}^j = \frac{\sum_{K=1}^{n=60} Q_K^j}{K=1 n_{60}}$$

$$\bar{Q}_{60}^J = \frac{\sum_{K=1}^{n=30} Q_K^J}{n_{30}}$$

$$\tau_{60}^5 = \frac{\bar{Q}_{60}^J - \bar{Q}^J}{S_Q^J}$$

$$\tau_{30}^5 = \frac{\bar{Q}_{30}^J - \bar{Q}^J}{S_Q^J}$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w[1 + (\tau_w^J)^2]} \right\}^{\frac{1}{2}} |\tau_w^J|$$

Para $w = 30$ y $w = 60$

El estadístico t_w tiene distribución "t" de Student de dos colas con

$U = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad para un nivel $\alpha = 0.05$

Criterio:

Si y solo si el valor absoluto de " t_w ", para $w=60$ y $w=30$ es mayor que el de la distribución de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea.

PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE EVENTOS O PRUEBA DE ANDERSON

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencias, la prueba aplica el coeficiente de auto correlación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso K. Si se analiza un solo registro entonces, $J=1$

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2}$$

para $r_0^j = 1$ y $k = 1, 2, 3, \dots, n_j$.

donde

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}$$

Además los límites de confianza para r_k^j se pueden obtener como

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{(n_j K - 1)}}{n_j K}$$

Criterio: si solo el 10 % de los valores r_k^j superan los límites de confianza se dice que la serie Q_i^j es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de probabilidad

CAPITULO V MODELACION Y EJEMPLOS DE APLICACION.

Sistemas De Información Geográficos

Es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para soportar la captura, administración, manipulación, análisis, modelamiento y graficación de datos u objetos referenciados espacialmente, para resolver problemas complejos de planeación y administración. Una definición más sencilla es: Un sistema de computador capaz de mantener y usar datos con localizaciones exactas en una superficie terrestre.

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

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

La mayor utilidad de un sistema de información geográfico esta íntimamente relacionada con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis. La construcción de modelos de simulación, se convierte en una valiosa herramienta para analizar fenómenos que tengan relación con tendencias y así poder lograr establecer los diferentes factores influyentes.

Recientemente la fotografía aérea y particularmente las imágenes de satélite han permitido la observación periódica de los fenómenos sobre la superficie de la corteza terrestre. La información producida por este tipo de sensores ha exigido el desarrollo de herramientas para lograr una representación cartográfica de este tipo de información. El medio en el cual se desarrollaron estas herramientas tecnológicas correspondió a las ciencias de teledetección, análisis de imágenes, reconocimiento de patrones y procesamiento digital de información, en general estudiadas por físicos, matemáticos y científicos expertos en procesamiento espacial. Obviamente, éstos tenían un concepto diferente al de los cartógrafos, con respecto a la representación visual de la información.

Con el transcurso del tiempo se ha logrado desarrollar un trabajo multidisciplinario y es por ésta razón que ha sido posible pensar en utilizar la herramienta conocida como "Sistemas de Información Geográfica, SIG. En general un SIG debe tener la capacidad de dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ◆ ¿Dónde está el objeto A?

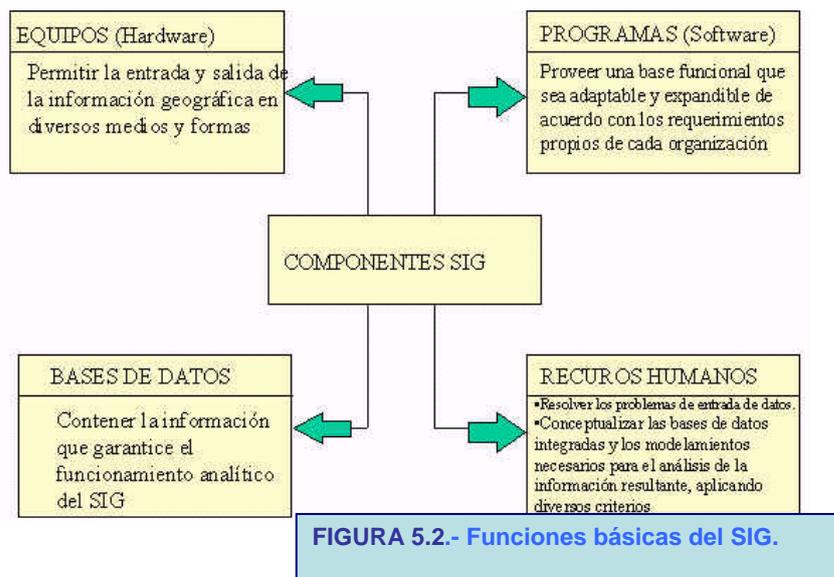
- ◆ ¿Dónde está A con relación a B?
- ◆ ¿Cuántas ocurrencias del tipo A hay en una distancia D de B?
- ◆ ¿Cuál es el valor que toma la función Z en la posición X?
- ◆ ¿Cuál es la dimensión de B (Frecuencia, perímetro, área, volumen)?
- ◆ ¿Cuál es el resultado de la intersección de diferentes tipos de información?
- ◆ ¿Cuál es el camino mas corto (menor resistencia o menor costo) sobre el terreno desde un punto (X_1, Y_1) a lo largo de un corredor P hasta un punto (X_2, Y_2) ?
- ◆ ¿Qué hay en el punto (X, Y) ?
- ◆ ¿Qué objetos están próximos a aquellos objetos que tienen una combinación de características?
- ◆ ¿Cuál es el resultado de clasificar los siguientes conjuntos de información espacial?
- ◆ Utilizando el modelo definido del mundo real, simule el efecto del proceso P en un tiempo T dado un escenario S.



FIGURA 5.1.- Componentes de un sistema de Información Geográfica.

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

La tecnología de los SIG está limitada si no se cuenta con el personal que opera, desarrolla y administra el sistema; Y que establece planes para aplicarlo en problemas del mundo real. Un SIG operará acorde con un plan bien diseñado y con unas reglas claras del negocio, que son los modelos y las prácticas operativas características de cada organización.



Dentro de las funciones básicas de un sistema de información podemos describir la captura de la información, esta se logra mediante procesos de digitalización, procesamiento de imágenes de satélite, fotografías, videos, procesos aerofotogramétricos, entre otros.

Otra función básica de procesamiento de un SIG hace referencia a la parte del análisis que se puede realizar con los datos gráficos y no gráficos, se puede especificar la función de contigüidad de objetos sobre una área determinada, del mismo modo, se puede especificar la función de coincidencia que se refiere a la superposición de objetos dispuestos sobre un mapa. La manera como se agrupan los diversos elementos constitutivos de un SIG quedan determinados por una serie de características comunes a varios tipos de objetos en el modelo, estas agrupaciones son dinámicas y generalmente obedecen a condiciones y necesidades bien específicas de los usuarios.

La definición formal del concepto categoría o cobertura, queda determinado como una unidad básica de agrupación de varios mapas que comparten algunas características comunes en forma de temas relacionados con los objetos contenidos en los mapas. Sobre un mapa se definen objetos (tienen una dimensión y localización respecto a la superficie de la tierra), estos poseen atributos, y éstos últimos pueden ser de tipo gráfico o de tipo alfanumérico.

A un conjunto de mapas relacionados se le denomina entonces categoría, a un conjunto de categorías se les denomina un tema y al conjunto de temas dispuesto sobre un área específica de estudio se agrupa en forma de índices temáticos o geoíndice del proyecto SIG. De tal suerte que la arquitectura jerárquica de un proyecto queda expuesta por el concepto de índice, categoría, objetos y atributos.

Para ilustrar lo anterior con un ejemplo, puede decirse que el índice para el Valle de Aburra lo representa la rejilla de escala 1:2000, esto da como resultado 270 planchas desde el Municipio de Caldas hasta el Municipio de Barbosa.

Las categorías definidas pueden ser los puntos de control, el modelo de formación y conservación catastral, la categoría transporte, las coberturas vegetales, la hidrología, el relieve y áreas en general.

Los objetos para la categoría puntos de control son: el punto geodésico, el punto de nivelación, el punto estereoscópico, entre otros. Para ilustrar con otro ejemplo, los objetos para la categoría catastro son: Zona urbana, Sector Urbano, Manzana, Edificación, Parque, Sitio de interés, entre otros.

Los atributos para el objeto zona urbana son: El código de identificación del departamento, código del municipio, código de la zona urbana, entre otros. Ahora bien, la representación gráfica del objeto zona urbana son tramos de línea continua separados por triángulos para delimitar la zona propiamente dicha.

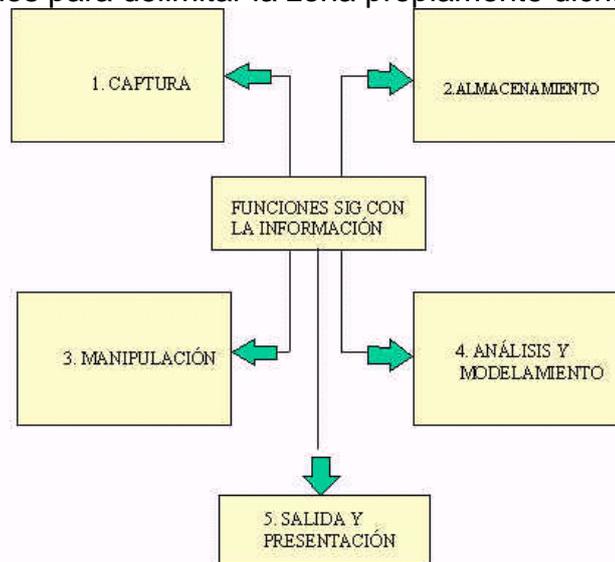


FIGURA 5.3.- Funciones SIG con la información.

La representación primaria de los datos en un SIG está basada en algunos tipos de objetos universales que se refieren al punto, línea y área. Los elementos puntuales son todos aquellos objetos relativamente pequeños respecto a su entorno más inmediatamente próximo, se representan mediante líneas de longitud cero. Por ejemplo, elementos puntuales pueden ser un poste de la red de energía o un sumidero de la red de alcantarillado.

Aquí vale la pena hacer la siguiente aclaración respecto a la determinación de los elementos puntuales; en un mapa que incluya los detalles más relevante del de un objeto particular, éste puede figurar como un elemento de tipo área, en cambio en otro mapa que no incluya detalles asociados del objeto, puede aparecer como un objeto puntual.

Los objetos lineales se representan por una sucesión de puntos donde el ancho del elemento lineal es despreciable respecto a la magnitud de su longitud, con este tipo de objetos se modelan y definen las carreteras, las líneas de transmisión de energía, los ríos, las tuberías del acueducto entre otros.

Los objetos de tipo área se representan en un SIG de acuerdo con un conjunto de líneas y puntos cerrados para formar una zona perfectamente definida a la que se le puede aplicar el concepto de perímetro y longitud. Con este tipo se modelan las superficies tales como: mapas de bosques, sectores socioeconómicos de una población, un embalse de generación, entre otros.

La manera como se agrupan los diversos elementos constitutivos de un SIG quedan determinados por una serie de características comunes a varios tipos de objetos en el modelo, estas agrupaciones son dinámicas y generalmente obedecen a las condiciones y necesidades bien específicas de los usuarios. Se parte de la idea que un SIG es un conjunto de procedimientos usados para almacenar y manipular datos geográficamente referenciados, es decir objetos con una ubicación definida sobre la superficie terrestre bajo un sistema convencional de coordenadas.

Se dice que un objeto en un SIG es cualquier elemento relativo a la superficie terrestre que tiene tamaño es decir, que presenta una dimensión física (alto - ancho - largo) y una localización espacial o una posición medible en el espacio relativo a la superficie terrestre. Son las representaciones de los objetos geográficos asociados con ubicaciones específicas en el mundo real. La representación de los objetos se hace por medio de puntos, líneas o áreas.

Ejemplos de una red de servicios:

- ◆ Punto: un poste de energía
- ◆ Línea: una tubería
- ◆ Área: un umbral

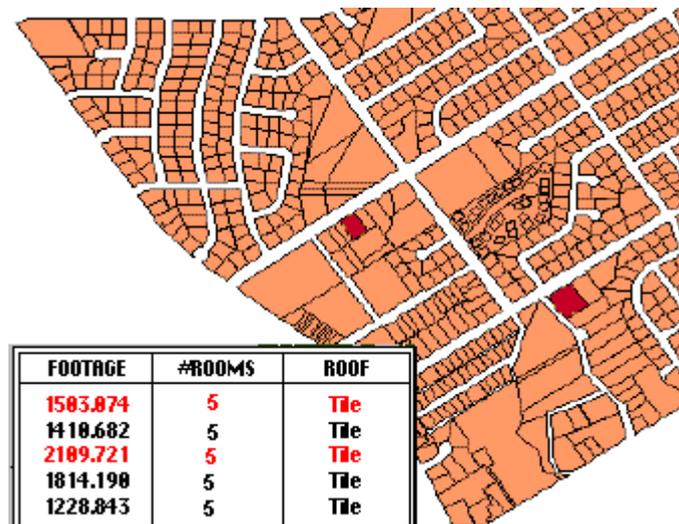


FIGURA 5.4.- representaciones de los objetos geográficos asociados con ubicaciones específicas en el mundo real.

También llamados atributos alfanuméricos. Corresponden a las descripciones, cualificaciones o características que nombran y determinan los objetos o elementos

geográficos. En el siguiente gráfico se observan los atributos gráficos y no gráficos que se encuentran asociados a los objetos representados.

Los objetos se agrupan de acuerdo con características comunes y forman categorías o coberturas. Las agrupaciones son dinámicas y se establecen para responder a las necesidades específicas del usuario. La categoría o cobertura se define como una unidad básica de almacenamiento.

Se sabe que un objeto al interior de una categoría posee por lo menos dos componentes, uno gráfico y otro no gráfico. A un objeto gráfico se le define a través del software un número clave de identificación, del mismo modo, a la componente alfanumérica, también se le define el mismo identificador, de tal forma que al interior del sistema se establece una relación entre los dos componentes. Además de la integridad de entidad definida anteriormente, se definen otros tipos de relaciones, por ejemplo, la relación posicional dice donde está el elemento respecto al sistema de coordenadas establecido. La relación topológica dice sencillamente la relación del elemento con otros elementos de su entorno geográfico próximo.

A cada objeto contenido en una categoría se le asigna un único número identificador. Cada objeto está caracterizado por una localización única (atributos gráficos con relación a unas coordenadas geográficas) y por un conjunto de descripciones (atributos no gráficos) El modelo de datos permite relacionar y ligar atributos gráficos y no gráficos. Las relaciones se establecen tanto desde el punto de vista posicional como topológico.

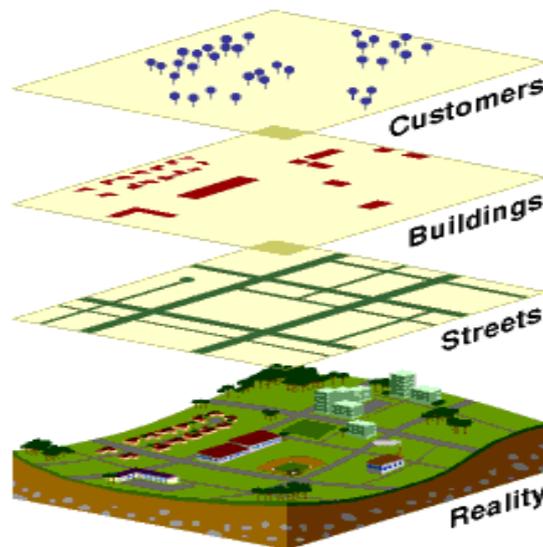


FIGURA 5.5.- Atributos gráficos en un SIG.

Los datos posicionales dicen donde está el elemento y los datos topológicos informan sobre la ubicación del elemento con relación a los otros elementos. Los atributos no gráficos dicen qué es, y cómo es el objeto. El número identificador que es único para cada objeto de la categoría es almacenado tanto en el archivo o mapa de objetos como en la tabla de atributos, lo cual garantiza una correspondencia estricta entre los atributos gráficos y no gráficos.

Un sistema de coordenadas geográficas es un sistema de referencia usado para localizar y medir elementos geográficos. Para representar el mundo real, se utiliza un sistema de coordenadas en el cual la localización de un elemento está dado por las magnitudes de latitud y longitud en unidades de grados, minutos y segundos.

La longitud varía de 0 a 180 grados en el hemisferio Este y de 0 a -180 grados en el hemisferio Oeste de acuerdo con las líneas imaginarias denominadas meridianos.

La latitud varía de 0 a 90 grados en el hemisferio norte y de 0 a -90 grados en el hemisferio sur de acuerdo con las líneas imaginarias denominadas paralelos o líneas ecuatoriales. El origen de este sistema de coordenadas queda determinado en el punto donde se encuentran la línea ecuatorial y el meridiano de Greenwich.

Las coordenadas cartesianas son generalmente usadas para representar una superficie plana. Los puntos se representan en términos de las distancias que separan a dicho punto de los ejes de coordenadas.

En un SIG a través del índice es posible ver las categorías, por estas categorías se accede a los objetos y por los objetos se tiene acceso a los atributos gráficos y no gráficos que se almacenan en la base de datos geográfica. Los archivos o mapas que conforman una categoría se pueden cargar por cada usuario para atender sus necesidades. De igual manera puede hacer operaciones con objetos que pertenezcan a la misma categoría o a categorías diferentes. Estas operaciones pueden ser de tipo espacial (unión, intersección) o racionales (Continuidad, vecindad, proximidad)

La superficie de referencia más comúnmente usada para la descripción de localizaciones geográficas es una superficie esférica. Esto es válido aún sabiendo que la figura de la tierra se puede modelar más como un elipsoide que como una esfera. Se sabe sin embargo que para la generación de una base de datos que permita la representación de elementos correctamente georeferenciados, y en unidades de medida común como metros o kilómetros, debe ser construida una representación plana.

Toda proyección lleva consigo la distorsión de una o varias de las propiedades espaciales ya mencionadas. El método usado para la proyección será el que en definitiva nos permita decidir cuáles propiedades espaciales sean conservadas y cuáles distorsionadas. Proyecciones específicas eliminan o minimizan la distorsión de propiedades espaciales particulares. Las superficies de proyección más comunes son los planos, los cilindros y los conos, según el caso se exige la proyección azimutal, cilíndrica y cónica respectivamente.

Las propiedades especiales de forma, área, distancia y dirección son conservadas o distorsionadas dependiendo no solo de la superficie de proyección, sino también de otros parámetros. Puesto que cada tipo de proyección requiere de una forma diferente de transformación matemática para la conversión geométrica, cada método debe producir distintas coordenadas para un punto dado. Por ejemplo: Transformación de Mercator, transformación estereográfica.

La esencia de un SIG está constituida por una base de datos geográfica. Esta es, una colección de datos acerca de objetos localizados en una determinada área de interés en la superficie de la tierra, organizados en una forma tal que puede servir eficientemente a una o varias aplicaciones. Una base de datos geográfica requiere de un conjunto de procedimientos que permitan hacer un mantenimiento de ella tanto desde el punto de vista de su documentación como de su administración. La eficiencia está determinada por los diferentes tipos de datos almacenados en diferentes estructuras. El vínculo entre las diferentes estructuras se obtiene mediante el campo clave que contiene el número identificador de los elementos. Tal número identificador aparece tanto en los atributos gráficos como en los no gráficos. Los atributos no gráficos son guardados en tablas y manipulados por medio de un sistema manejador de bases de datos.

Los atributos gráficos son guardados en archivos y manejados por el software de un sistema SIG. Los objetos geográficos son organizados por temas de información, o capas de información, llamadas también niveles. Aunque los puntos, líneas y polígonos pueden ser almacenados en niveles separados, lo que permite la agrupación de la información en temas son los atributos no gráficos. Los elementos simplemente son agrupados por lo que ellos representan. Así por ejemplo, en una categoría dada, ríos y carreteras aun siendo ambos objetos línea están almacenados en distintos niveles por cuanto sus atributos son diferentes.

Los formatos estándar para un archivo de diseño son el formato celular o RASTER y el formato tipo VECTOR, en el primero de ellos se define una grilla o una malla de rectángulos o cuadrados a los que se les denomina células o retículas, cada retícula posee información alfanumérica asociada que representa las características de la zona o superficie geográfica que cubre, como ejemplos de este formato se pueden citar la salida de un proceso de fotografía satelital, la fotografía aérea es otro buen ejemplo.

De otro lado, el formato vectorial representa la información por medio de pares ordenados de coordenadas, este ordenamiento da lugar a las entidades universales con las que se representan los objetos gráficos, así: un punto se representa mediante un par de coordenadas, una línea con dos pares de coordenadas, un polígono como una serie de líneas y una área como un polígono cerrado. A las diversas entidades universales, se les puede asignar atributos y almacenar éstos en una base de datos descriptiva o alfanumérica para tales propósitos.

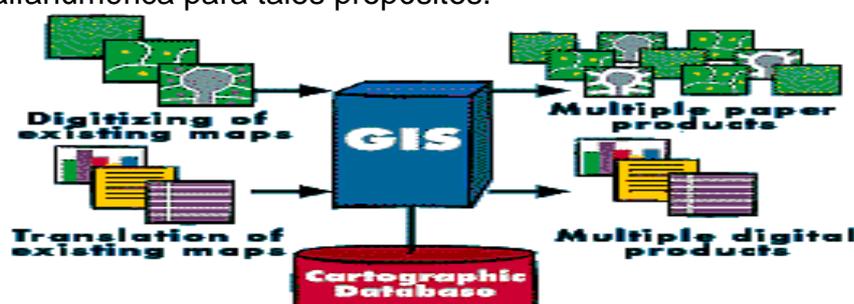


FIGURA 5.6.- Base de datos geográfica.

Un SIG permite resolver una variedad de problemas del mundo real. El SIG puede manipularse para resolver los problemas usando varias técnicas de entrada de datos, análisis y resultados.

- ◆ Digitalizar o escanear.
- ◆ Convertir datos digitales de otros formatos.
- ◆ Adquirir otros datos disponibles.
- ◆ Respuestas a preguntas particulares.
- ◆ Soluciones a problemas particulares.
- ◆ Despliegue en pantalla de los datos.
- ◆ Copias duras (planos y mapas) usando una impresora.
- ◆ Listados.
- ◆ Reportes.

Se pueden nombrar otras aplicaciones de tipo general dentro de las muchas posibilidades que suministra un SIG.

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

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

- ◆ Producción y actualización de la cartografía básica.
- ◆ Administración de servicios públicos (acueducto, alcantarillado, energía, teléfonos, entre otros)
- ◆ Inventario y avalúo de predios.
- ◆ Atención de emergencias (incendios, terremotos, accidentes de tránsito, entre otros.
- ◆ Estratificación socioeconómica.
- ◆ Regulación del uso de la tierra.
- ◆ Control ambiental (saneamiento básico ambiental y mejoramiento de las condiciones ambientales, educación ambiental)
- ◆ Evaluación de áreas de riesgos (prevención y atención de desastres)

- ◆ Localización óptima de la infraestructura de equipamiento social (educación, salud, deporte y recreación)
- ◆ Diseño y mantenimiento de la red vial.
- ◆ Formulación y evaluación de planes de desarrollo social y económico.

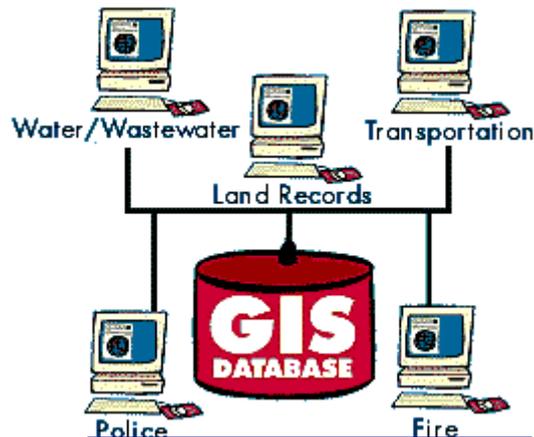


FIGURA 5.7.- Base de datos del GIS.

La información geográfica con la cual se trabaja en los SIG. Puede encontrarse en dos tipos de presentaciones o formatos: Celular o raster y Vectorial.

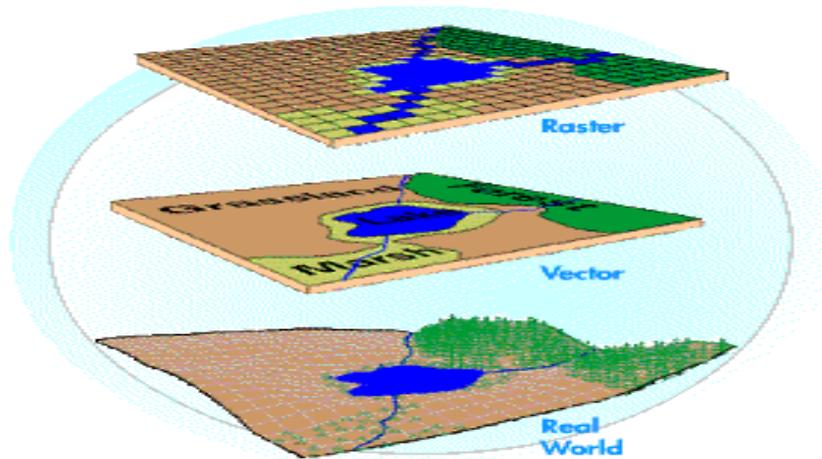
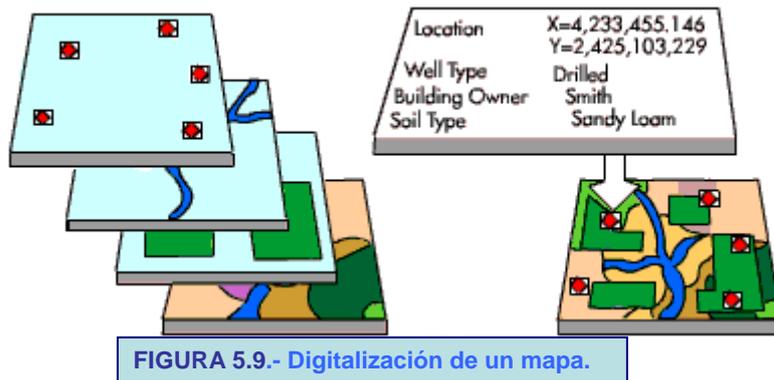


FIGURA 5.8- Formato Raster y Vectorial.

El formato raster se obtiene cuando se "digitaliza" un mapa o una fotografía o cuando se obtienen imágenes digitales capturadas por satélites. En ambos casos se obtiene un archivo digital de esa información. La información gráfica en este tipo de formatos se representa internamente por medio de segmentos orientados de rectas o vectores. De este modo un mapa queda reducido a una serie de pares ordenados de coordenadas, utilizados para representar puntos, líneas y superficies.

La captura de la información en el formato vectorial se hace por medio de: mesas digitalizadora, convertidores de formato raster a formato vectorial, sistemas de geoposicionamiento global (GPS), entrada de datos alfanumérica, entre otros.



Los diferentes tipos de análisis que un SIG debe realizar son:

- ◆ **Contigüidad:** Encontrar áreas en una región determinada.
- ◆ **Coincidencia:** Análisis de superposición de puntos, líneas, polígonos y áreas.
- ◆ **Conectividad.** Análisis sobre entidades gráficas que representen redes de conducción, tales como:
 - ❖ **Enrutamiento:** Como se mueve el elemento conducido a lo largo de la red.
 - ❖ **Radio de acción:** Alcance del movimiento del elemento dentro de la red.
 - ❖ **Apareamiento de direcciones:** Acople de información de direcciones a las entidades gráficas.
- ◆ **Análisis digital del terreno:** Análisis de la información de superficie para el modelamiento de fenómenos geográficos continuos. Con los modelos digitales de terreno (DTM: la representación de una superficie por medio de coordenadas X, Y, Z) que son la información básica para el análisis de superficies.
- ◆ **Operación sobre mapas:** **Uso** de expresiones lógicas y matemáticas para el análisis y modelamiento de atributos geográficos. Estas operaciones son soportadas de acuerdo con el formato de los datos (raster o vectorial)
- ◆ **Geometría de coordenadas:** Operaciones geométricas para el manejo de coordenadas terrestres por medio de operadores lógicos y aritméticos. Algunas de esas operaciones son: proyecciones terrestres de los mapas, transformaciones geométricas (rotación, traslación, cambios de escala), precisión de coordenadas, corrección de errores.

Limitaciones De Los Sistemas De Información Geográfica En Las Modelizaciones Hidrológicas

Los trabajos realizados con SIG para la elaboración de modelos hidrológicos están incrementándose rápidamente, y muchas cuestiones como la gestión de series temporales de datos y la generalización han sido ampliamente discutidas. A pesar de que esta herramienta ofrece interesantes ventajas operativas a los investigadores en hidrología, aún hay algunas inquietudes que están limitando su uso:

1) Los modelos de distribución de parámetros hidrológicos son creados con el propósito de representar el comportamiento espacial de los elementos que mejor se ajustan a la gestión integrada de cuencas. Los algoritmos utilizados en estos modelos con frecuencia se basan en experimentos a escala de laboratorio y pequeñas parcelas en donde las características del suelo están bien definidas. Cuando estos parámetros se aplican a grandes cuencas o subcuencas la tendencia es a conservar un valor constante. Las diferencias entre escalas requieren procesos de generalización de datos que socavan la validez del modelo.

2) Las operaciones estadísticas disponibles en los programas SIG aún están bastante limitadas (Fotheringham y Rogerson, 1994). Recientemente se han realizado algunos intentos para añadirles nuevas funcionalidades creando vínculos con los paquetes geoestadísticos (McCord y Oslon, 1989; Bailey, 1994). Un ejemplo destacado es el SIG diseñado por Schlagel y Newton (1996) con el objetivo de analizar las transformaciones espaciales de los usos del suelo. Estos intentos no han sido suficientes y todavía es necesario incrementar sus funcionalidades estadísticas y matemáticas, lo que permitiría mejorar la representación de las superficies y de los procesos que en ellas acontecen.

3) La construcción de modelos hidrológicos en un SIG a menudo trae consigo la asunción de determinadas limitaciones. Así, por ejemplo, la simple combinación de capas no considera la co-varianza ni la interacción entre variables. Por otra parte, el modo en que se agregan los datos también repercute en los modelos resultantes. Estas cuestiones solamente pueden ser superadas cuando el usuario tiene una buena comprensión de la estructura de los modelos hidrológicos y de las técnicas utilizadas, además de un elevado conocimiento de las funciones y los modelos de datos de los SIG.

4) La mayor parte de las mediciones hidrológicas en los SIG asumen algún grado de error. Variables como la topografía y los suelos son comunes en todos los modelos hidrológicos, aunque cada vez son más necesarias informaciones espaciales específicas. En este sentido los sistemas remotos están siendo muy utilizados como fuente de datos (Giles *et al.*, 1994; Hogg *et al.*, 1993; Sorman *et al.*, 1993; Sharma y Singh, 1992). La interpolación y generalización de información con diversos orígenes inducen múltiples errores que deben ser controlados.

5) La integración en los SIG de los procesos hidrológicos de aguas superficiales y subterráneas aún no está muy lograda. El principal problema reside en la combinación de estos procesos con la escala, el espacio y el tiempo. Un mapa puede ser dibujado a cualquier escala, pero no está claro hasta que punto los modelos pueden ser aplicados a diferentes escalas.

EJEMPLOS DE APLICACION

Para ilustrar como se desarrollan los métodos mencionados en el capítulo de inundaciones a continuación se ejemplifican estos métodos.

Para métodos empíricos se tiene:

Ejemplo de método de Lowry

Ejemplo: Se desea estimar el gasto máximo en una cuenca con área de 100 km^2 localizada dentro de la cuenca del río Grijalva, de la cual no se dispone de información hidrológica.

Solución: Ante la carencia de datos puede recurrirse a los envolventes de Creager se conoce que para los datos mundiales $C=100$ y que para los gastos dentro de la región $C=56.8$, tomando del boletín hidrológico número 30 de la CARH

Sustituyendo la ecuación de Creager

$$Q = 1.303C(0.386A)^{0.936} A^{-0.048}$$

Sustituyendo $C=100$

$$Q = 1.303(100)[0.386(100)]^{0.936} (100)^{-0.048} = 2026 \frac{m^3}{seg}$$

Para $C=56.8$

$$Q = 1.303(56.8)[0.386(100)]^{0.936} (100)^{-0.048} = 1147.7 \frac{m^3}{seg}$$

Para métodos semi empíricos se tiene:

Ejemplo de método de Vente Chow

Ejemplo: Si una avenida de período de retorno igual a 100 años es seleccionada para diseñar un puente cuya vida útil será de 25 años, se pide determinar el riesgo de falla del diseño. ¿Cuál es el período de retorno si el ingeniero hidrólogo quiere tener un 90 % de confiabilidad en el diseño?

$$Tr = \frac{1}{1 - (1 - R)^{1/N}}$$

Solución.-

$$R = 1 - (1 - \frac{1}{100})^{25} = 0.22$$

La confiabilidad de este diseño es la probabilidad de que tal avenida ocurra durante la vida útil o sea: $1 - 0.22 = 0.778 = 78\%$.

Para una confiabilidad del 90% el riesgo de falla será:

$$R = 1 - 0.9 = 0.10$$

Sustituyendo en Tr

$$Tr = \frac{1}{1 - (1 - 0.10)^{1/25}} = 239.78 = 238 \text{ años}$$

Para métodos estadísticos se tiene:

Ejemplos de aplicación de los métodos Distribución Normal, Log Normal, Gumbel y Log Pearson III con los siguientes flujos anuales en una presa.

A continuación se muestra una tabla con los registros pluviales obtenidos en una cuenca, los cuales nos sirven para ilustrar como desarrollar los métodos mencionados a continuación.

Serie de datos en una cuenca de la República Mexicana.

Año	Flujo Anual	Probabilidad	Período de Retorno
1972	2520,00	5,88	17,00
1973	1850,00	11,76	8,50
1974	750,00	17,65	5,67
1975	1100,00	23,53	4,25
1976	1380,00	29,41	3,40
1977	1910,00	35,29	2,83
1978	3170,00	41,18	2,43
1979	1200,00	47,06	2,13
1980	820,00	52,94	1,89
1981	690,00	58,82	1,70
1982	1240,00	64,71	1,55
1983	1730,00	70,59	1,42
1984	1950,00	76,47	1,31
1985	2160,00	82,35	1,21
1986	3320,00	88,24	1,13
1987	1480,00	94,12	1,06

$$\bar{X} = \frac{\sum \text{flujoanual}}{\text{añosregistrados}} = 1704.375 \quad \bar{y} = 0.5157$$

De tablas: $\sigma_n = 1.0316$

S= 794.500

Estos valores se obtienen de la tabla de Gumbel. (ver fig. 3.9)

1.- El período de retorno T es el recíproco de la probabilidad de excedencia, donde

$$\frac{1}{T} = 1 - e^{-e^{-y}}$$

Despejando, tenemos

$$y = \ln \ln \frac{T}{T - 1}$$

Período de retorno (T)	Probabilidad P (%)	Gumbel variable y	Flujo de descarga Q(m ³ /s)
1.05	95	-1.130	449.00
1.11	90	-0.838	661.00
1.25	80	-0.476	940.00
2.00	50	0.367	1590.00
5.00	20	1.500	2462.00
10.00	10	2.250	3040.00
25.00	4	3.199	3772.00
50.00	2	3.902	4314.00
100.00	1	4.600	4851.00
200.00	0.5	5.296	5388.00

Para un período de retorno de T=1.05

$$y = -\ln \ln \frac{T}{T-1}$$

$$= -\ln \ln \left[\frac{1.05}{1.05-1} \right] = -\ln \ln \left[\frac{1.05}{0.5} \right]$$

$$= -1.1133$$

Sustituyendo en la ecuación, se tiene

$$X = \bar{X} + \frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} S$$

$$X = 1704.375 + \left[\frac{-1.113 - 0.5157}{1.0316} \right] 794.50$$

$$X = 449.78 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Y, para un período de T=50 se tiene

$$y = -\ln \ln \frac{3.902}{3.902-1}$$

$$y = 1.2170$$

sustituyendo en la ecuación se tiene que

$$X = 1704.375 + \left[\frac{1.2170 - 0.5157}{1.0316} \right] 794.50$$

$$X=2244.49 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Ejemplo para Distribución Normal

$$\begin{aligned}\bar{X} &= 1704.375 \\ \sigma &= 794.500\end{aligned}$$

Aplicando a la ecuación

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

Para un período de retorno de 50 años. Determinar el gasto que se espera que ocurra

$$F_{(50 \text{ años})} = 1 - \frac{1}{T} = 1 - \frac{1}{50} = 1 - 0.2 = 0.98$$

Ya obtenido este valor de $F_{(50 \text{ años})}$ se busca en la tabla de Distribución Normal con el valor de 0.98 y se obtiene $K= 2.06$ este valor se encuentra en la tabla de Distribución Normal (ver Fig. 3.8)

Sustituyendo valores se tiene,

$$X=1704.375+(2.06)(794.500)$$

$$X= 3341.045 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Ejemplo para la Distribución Log Normal

Serie de datos en una cuenca de la República Mexicana.

Año	Flujo Anual	Log Q = log X	$(\log X_i - \log X)^2$	$(\log X_i - \log X)^3$
1972	2520,00	3.4014	0.0464	0.0099
1973	1850,00	3.2671	0.0640	0.0005
1974	750,00	2.8750	0.0970	-0.0302
1975	1100,00	3.0414	0.0210	-0.0030
1976	1380,00	3.1398	0.0021	-0.0001
1977	1910,00	3.2810	0.0089	0.0008
1978	3170,00	3.5010	0.0988	0.0310
1979	1200,00	3.0791	0.0115	-0.0012
1980	820,00	2.9138	0.0744	-0.0202
1981	690,00	2.8388	0.1209	-0.0420
1982	1240,00	3.0934	0.0086	-0.0008
1983	1730,00	3.2380	0.0026	0.0001
1984	1950,00	3.2900	0.0106	0.0011
1985	2160,00	3.3344	0.0218	0.0032
1986	3320,00	3.5211	0.1118	0.0374
1987	1480,00	3.1702	0.0002	-0.0000

Log x = 3.18659
Calculo de I_v

0.7006

-0.0135

$$I_v = \sqrt{\frac{1}{16-1}(0.7006)} = 0.2161$$

Para encontrar el coeficiente de oblicuidad Cs y se obtiene de la tabla de Distribución Log Normal (ver Fig. 3.10).

$$\text{Log } X = 3.18659 + 2.07(0.2161)$$

$$\text{Log } X = 3.6339$$

$$X = \text{Ant log } 3.6339$$

$$X = 10^{3.6339} = 4304.27 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Ejemplo para método Log Pearson tipo III.

El procedimiento para el uso de esta distribución consiste en convertir la serie de datos a sus logaritmos y luego calcular los siguientes parámetros.

$$\text{Media} = \frac{\sum \log x}{n} = \frac{50.9854}{16} = 3.18659$$

Desviación estándar

$$\sigma_{\log x} = \sqrt{\frac{\sum (\log x - \overline{\log x})^2}{n-1}}$$

$$\sigma_{\log x} = \sqrt{\frac{0.7006}{16-1}} = 0.216117$$

Coficiente de asimetría

$$g = \frac{n \sum (\log x - \overline{\log x})^3}{(n-1)(n-2)(\sigma_{\log x})^3}$$

$$g = \frac{16(-0.0135)}{(16-1)(16-2)(0.216117)^3} = \frac{-0.2160}{210(0.10094)} = \frac{-0.2160}{2.119757037}$$

$$g = -0.101898$$

El valor de X para cualquier nivel de probabilidad se puede calcular a partir de la ecuación.

$$\log x = \log \bar{x} + K\sigma \log x$$

$$\log x = 3.18659 + 0.033(0.216117)$$

$$\log x = 3.193721861$$

$$X = 10^{3.193721861} = 1562.14 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Para un período de retorno de 50 años se calcula

$$\log x = \log \bar{x} + K\sigma \log x$$

$$\log x = 3.18659 + 1.945(0.216117)$$

$$\log x = 3.606937565$$

$$X = 10^{3.606937565} = 4045.17 \text{ m}^3/\text{s}.$$

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusión a este trabajo de tesis, se puede comentar acerca, de la carencia de herramientas para obtener una solución específica a cada problema meteorológico que se presenta en nuestro país, algunas de estas herramientas son las mencionadas en el capítulo de inundaciones como los métodos utilizados para el cálculo de gastos en cierto tiempo además de los programas utilizados para la modelación de eventos de gran magnitud, en especial las inundaciones y las sequías.

De acuerdo con los datos existentes de lluvias y sequías en el territorio mexicano, por su situación geográfica en México al año penetran en promedio 4 ciclones que dejan destrucción en su camino, como ya vimos no hay registros exactos, solo se cuenta con lo que algunos escritores han descrito de los fenómenos en sus obras. Cuanta más información se busca menos respuestas se encuentran.

Con los registros existentes descritos en el transcurso de este trabajo de investigación, observamos que los métodos de estudio para las avenidas máximas y para las sequías no son suficientes para todo el territorio mexicano. Debemos tener en cuenta que los registros que necesitamos para el cálculo de ciertos métodos deben de ser como mínimo de 30 años de antigüedad para poder estudiar los fenómenos actuales con estos métodos y los resultados sean más exactos.

Estamos en tiempos extremos donde si se logra tener un equilibrio ecológico y demográfico, en nuestro planeta y en especial en nuestro territorio en un futuro estaremos en una situación grave ya que necesitamos tener conciencia moral y cívica para no destruir nuestro país, y por lo tanto nuestro planeta.

Es alarmante como se hace caso omiso de lo que está sucediendo no solo en nuestro país sino en todo el mundo. El cambio climático que sufre el mundo, se debe a la sobre-explotación de los recursos naturales, esto se debe a la mala educación que tenemos los seres humanos. Aun es tiempo de parar esta destrucción, en tanto se logre estabilizar los cambios climáticos o manteniendo un equilibrio sustentable, entendiendo por esto que si derribamos un árbol se tendrá que plantar otro u otros. Es fácil destruir lo que está a nuestro alrededor, pero muy difícil recuperar lo que ya hemos destruido.

Soluciones hay demasiadas pero de nada sirve si se sigue ignorando lo que sucede a nuestro alrededor.

Estos problemas que han afectado a México en el pasado con menos severidad, hoy en día han incrementado su fuerza dañando a las poblaciones mas vulnerables las cuales se encuentran asentadas en las orillas de ríos, costas y lagunas; debido a la mala planeación y a la falta de estructuras hidráulicas, o bien, que estas mismas están mal diseñadas.

Los métodos utilizados en el caso de las avenidas máximas son para cuencas hidrográficas que su caudal se toma como agua. En caso de una avenida máxima

observamos que el caudal en su mayoría puede ser agua pero también es conformado por sedimentos arrastrados por el exceso de agua, además en algunas ocasiones se han visto que estas lluvias arrastran casas, carros, árboles, animales, gente, etc.. Lo que hace darnos cuenta que aún no tenemos valores exactos para estimar los daños que ocasionan estos fenómenos meteorológicos.

Sabiendo de la falta de exactitud de los registros existentes, se han dado caso de derrumbes a lo largo del territorio nacional, lo cual nos indica que se planearon y construyeron de forma errónea las edificaciones y carreteras afectadas por estos sucesos.

La saturación de los suelos y la falta de drenaje en las áreas afectadas logran que existan los caídos, derrumbes, lahares, etc. Como ejemplo los casos descritos en el capítulo IV en Puebla.

Existen otras catástrofes que han terminado con cientos de vidas por construir asentamientos urbanos donde no debían. Tal es el caso de la Ciudad de México, la cual se hunde por los asentamientos irregulares debido al mal uso de las aguas subterráneas.

Además, de tener una concientización del daño al medio ambiente, debemos recordar que el mal uso de la tierra hace que está pierda propiedades físicas y químicas, produciendo terrenos áridos, lo cual nos lleva a una desertificación. Esta desertificación según varios investigadores se presentara en el territorio Nacional y parte de Estados Unidos de Norte America en los años 2070 o principios de 2080.

Actualmente surgen herramientas que pueden ayudar al ingeniero para disminuir las zonas de riesgo, se han logrado avances en la tecnología, también se han construido estaciones de monitoreo las cuales ayudan al hidrólogo a tener mayor conocimiento de los registros actuales y así poder utilizar los métodos descritos en esta investigación, para poder hacer frente a los futuros fenómenos y así tratar de mitigar los daños a la población y al medio en que se desenvuelve.

En algunos países lograron concientizar a sus pobladores a cuidar su medio ambiente y así han auxiliado para preveer siniestros que causarían daños irreversibles, por ejemplo en Suecia lograron disminuir sus índices de contaminación y contrarrestar la inmersión térmica.

RECOMENDACIONES

Para la situación en México que es un país en vías de desarrollo y que carecemos de tecnología al alcance de nuestras manos, se tiene que comenzar con lo primordial que sería educar a los pobladores. Teniendo una conciencia de lo que es “cuidar el medio ambiente”, y sobre todo crear el hábito en las personas, que existen zonas de riesgo donde no deben de establecerse asentamientos poblacionales.

También es recomendable formar mas ingenieros con los conocimientos suficientes para ser capaces de hacer frente al desarrollo sustentable de nuestro país, así mismo

hacer que los ingenieros ya existentes se sigan capacitando para que en un futuro no muy lejano en conjunto con la sociedad y el gobierno puedan enfrentar los fenómenos meteorológicos de manera mas responsable y eficiente, logrando que las obras que se construyan sean eficientes, duraderas, económicas y funcionales.

Conociendo las causas y consecuencias que un fenómeno meteorológico ocasiona, en una población asentada en zona de riesgo, se pueden mitigar los daños causados.

En la actualidad son varios los programas y proyectos que ayudan a quien estudia los fenómenos meteorológicos, por mencionar algunos:

Arc View
Arc Map
Auto Cad

Por decir Arc View nos ayuda construyendo mapas de riesgos por medio de la modelación matemática, los cuales indican cuales son las zonas que son y pueden ser las más afectadas durante una tormenta tropical que son las que mayormente actúan sobre el territorio de México debido a su geografía y topografía.

BIBLIOGRAFIA

- Hidrología en ingeniería
2da. Edición
German Monsalve Sáenz
Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería
1999.

- Fundamentos de Hidrología de superficie
Francisco Javier Aparicio Mijares
Ed. Limusa
México D.F.
1era. Ed. 1989

- Hidrología 1era parte
Rolando Springall G.
Profesor Investigador Facultad UNAM.

- *“Fascículo Inestabilidad de Laderas”*
Diciembre de 2001, en los Talleres Gráficos de México,
Av. Canal del Norte N° 80, Col. Felipe Pescador,
México, D.F.

- Aplicación de los sistemas de información Geográfica
Para la prevención de riesgos y formulación de planos de contingencia
Ing. Graciela Pusineri
FICH-UNL, Argentina

- Fascículo Inundaciones
CENAPRED, 2007

- Las Sequías Historia de México
Virginia García Acosta
CIESAS, México.

- El Cambio Climático Global y el Fenómeno del Niño
Centro de Ciencias de la Atmósfera
UNAM, México
2007.

- Importancia de las Sequías en México
Carlos Contreras Servin
Tesis
México, 2006

-Simulación de Inundaciones con Arcgis
Conferencia de usuarios
SIGSA-ESRI
2008

-Sistemas de Alerta Temprana de Fenómenos Meteorológicos
Pagina CENAPRED
www.cenapred.unam.mx

-Cuaderno de inventario No. 46
Julio 1999
Análisis de Sequías en México
Fermín García Jiménez
Oscar Arturo Fuentes M.

-Atlas Geográfico de México de Recursos Naturales y Medio Ambiente
SEMARNAP, 2006.

-Análisis de Estabilidad de Taludes Rocosos
Evast Graciev
Instituto de Ingeniería. UNAM.

-Evaluación de la amenaza por Inundaciones
Manette Kingina
Cees Van Westen
International Institute for Geoinformation
UNESCO RAPCA

-Riesgos Hidrometeorológicos
Cartilla CENAPRED

-Notas de Ingeniería Hidráulica
Gustavo H. Silva Medina
Bogota Colombia