



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**ESTIMACIÓN DE LA LLUVIA POR MEDIO DEL RADAR
METEOROLÓGICO**

T E S I S

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

Presenta:
Aline Rosete Rosete

**DIRECTOR DE TESIS
M.I. VÍCTOR FRANCO**

MÉXICO, D.F.

Septiembre, 2002



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.

123



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**ESTIMACIÓN DE LA LLUVIA POR MEDIO DEL RADAR
METEOROLÓGICO**

T E S I S

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

Presenta:
Aline Rosete Rosete

DIRECTOR DE TESIS
M.I. VÍCTOR FRANCO

MÉXICO, D.F.

Septiembre, 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/067/00

Señorita
ALINE ROSETE ROSETE
Presente

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

"ESTIMACIÓN DE LA LLUVIA POR MEDIO DEL RADAR METEOROLÓGICO"

- INTRODUCCIÓN**
- I. CONCEPTOS BÁSICOS ACERCA DEL FUNCIONAMIENTO DEL RADAR METEOROLÓGICO.**
 - II. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED TELEMÉTRICA**
 - III. CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA DEL RADAR METEOROLÓGICO**
 - IV. SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DE LAS FECHAS DE ANÁLISIS**
 - V. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**
 - COMENTARIOS Y CONCLUSIONES**
 - REFERENCIAS**

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 17 de Junio de 2002.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

ÍNDICE

Introducción	1
I. Conceptos básicos sobre el funcionamiento del radar meteorológico	5
I.1 Introducción	5
I.1.1 Sistema de radar	8
I.2 Penetración	9
I.3 Alcance	12
I.4 Productos clásicos del radar meteorológico	13
I.4.1 Indicador de posición en planta, PPI	14
I.4.2 Indicador en altura y distancia, RHI	14
I.4.3 PPI altitud constante, CAPPI	16
I.4.4 PseudoCAPPI	18
I.4.5 Topes de eco (Echo Top)	18
II. Descripción del funcionamiento de la red telemétrica	19
II.1 Medición de precipitaciones pluviales	21
II.2 Descripción del funcionamiento de la red pluviográfica de radioenlace (DGCOH)	25
III. Calibración hidrológica del radar meteorológico	47
III.1 Tipode de lluvia	47
III.1.1 Características de las tormentas convectivas	48
III.1.1.1 Tormenta unicelular u ordinaria	49
III.1.1.2 Formación de tormentas unicelulares	50

III.1.1.3 Tormentas multicelulares	50
III.1.1.4 Formación de tormentas multicelulares	51
III.1.1.5 Tormentas supercelulares	52
III.1.1.6 Formación de tormentas supercelulares	53
III.2 Relación $Z - R$	53
III.2.1 Ecuación del radar para blancos puntuales	56
III.2.2 Ecuación del radar para blancos dispersos	61
III.3 Estimación del factor de reflectividad con el radar meteorológico	64
III.4 Ecuación de calibración	65
IV. Selección de la zona de estudio y de las fechas de análisis	69
IV.1 Selección de las tormentas para su análisis	69
IV.2 Obtención de las precipitaciones medias por medio de pluviógrafos	86
IV.3 Obtención de la ecuación de calibración	91
IV.4 Estimación de la lluvia a partir de la ecuación de calibración	98
V. Presentación y análisis de resultados	103
VI. Comentarios y conclusiones	141
Bibliografía	149
Anexo	151
Glosario	161

INTRODUCCIÓN

De los fenómenos que afectan a nuestro país, los de origen pluviométrico son los que provocan mayores daños, pues dan origen a inundaciones de diversas magnitudes y duraciones, sobre todo en poblaciones localizadas entre las costas y las laderas de las Sierras Madres Oriental y Occidental. Las cordilleras actúan como barrera que induce la elevación del aire húmedo proveniente del mar favoreciendo la formación de lluvias y esto se agrava en las temporadas ciclónicas debido a la cercanía que tienen estos poblados con las costas y a las altas pendientes de las laderas, ya que éstas disminuyen el tiempo de respuesta hidrológica de las cuencas. En grandes ciudades del interior como Monterrey y el Distrito Federal ocurren fenómenos semejantes debido a su alto grado de urbanización que reduce la capacidad de infiltración del terreno y a que estas ciudades se encuentran junto a cordilleras.

En la cuenca del Valle de México, se tiene una orografía escabrosa, lo que produce escurrimientos de gran importancia en lapsos cortos de tiempo provocando con esto graves desastres materiales como pérdidas humanas, esto se aprecia en la cuenca seleccionada

como ejemplo de aplicación que se desarrolla en el presente trabajo, y corresponde a la del Río Mixcoac.

Generalmente, se construyen obras hidráulicas para reducir la probabilidad de inundación y así proteger a la población de daños e intentar evitar de esta manera pérdida de vidas humanas. Esta medida se puede complementar con sistemas de prevención y alertamiento apoyados en modelos de predicción meteorológica sobre la base de información de satélites y radar y modelos lluvia-escurrimiento con información de estaciones pluviográficas e hidrométricas.

México se encuentra en cuanto a la observación hidrometeorológica se refiere, en el umbral de una nueva época que se sustenta, esencialmente en una red moderna de radares meteorológicos.

En este contexto, los radares meteorológicos que posee el Servicio Meteorológico Nacional representan una herramienta que puede ser de gran utilidad para la prevención de inundaciones debido a su capacidad de medir en forma más o menos detallada el campo espacial de la lluvia con diámetros de cobertura de 240, 480 y 960 km a intervalos de tiempo de 15 minutos. Esta herramienta puede ser utilizada tanto por los hidrólogos como los meteorólogos, previa calibración hidrológica, para poder lograr una estimación cuantitativa de la lluvia que permita utilizarse en modelos hidrológicos, a fin de hacer la predicción de escurrimiento o de lluvia en pronósticos meteorológicos.

Por lo anterior, se vio la necesidad de obtener la calibración para el Radar Meteorológico del Cerro de la Catedral, cuya cobertura abarca la cuenca del Río Mixcoac, a partir de la información proporcionada por los pluviógrafos localizados en dicha zona y efectuar una comparación entre los datos obtenidos con el radar y los datos proporcionados por los pluviógrafos instalados en esa zona.

El objetivo fundamental de este trabajo, consiste en la obtención de la calibración del radar meteorológico del Cerro de la Catedral y la comparación de los datos obtenidos,

comprobando la bondad de los resultados que se obtengan, para la posterior aplicación de ellos en modelos de lluvia-escurrimiento.

En el capítulo I, se presentan los conceptos básicos acerca del funcionamiento del radar meteorológico, como son la definición de la palabra **RADAR**, parte de su historia y su utilización, una descripción general de las partes que lo conforman, los tipos de bandas que existen en los diferentes tipos de radares a fin de conocer la penetración, esto es, la capacidad que poseen para identificar las gotas de lluvia, así como también el alcance que tienen.

Dentro de éste capítulo también se hace mención a los productos que se generan al utilizar la información que proporcionan dichos aparatos.

En el capítulo II, se describe la red de radares que se encuentran a lo largo de la República Mexicana, el tipo de tecnología que utiliza en su operación, así como de la red de mediciones de precipitaciones localizadas en el Distrito Federal y área conurbada con que cuenta la Dirección General de Obras Hidráulicas (**DGCOH**) integrada por 64 pluviógrafos que proporcionan la información necesaria para llevar a cabo la realización de la calibración del radar del Cerro de la Catedral.

El tema que se desarrolla en el capítulo III, se refiere a la calibración hidrológica del radar meteorológico, en donde se mencionan los tipos de lluvias que se presentan, y los elementos para efectuar la calibración de los radares, la obtención de la relación entre los valores de intensidad de lluvia (R) y de reflectividad (Z).

En el capítulo IV, se presenta el análisis de lo mencionado en el capítulo III. Para ello se seleccionó la zona de estudio, la cuenca del Río Mixcoac, y las fechas en las que se contara con información tanto de radares como de los pluviógrafos. Cabe mencionar, que de las fechas seleccionadas se estimaron los factores de reflectividad correspondientes al tipo de lluvia que se presentó, y con base en ese factor calculado, se procedió a la obtención de la ecuación de calibración correspondiente al radar del Cerro de la Catedral para poder cumplir con el propósito del presente capítulo.

En el capítulo V, se presentan los resultados obtenidos del estudio que se realizó con la información proporcionada por la **DGCOH**, así como la información del radar del Cerro de la Catedral; se obtuvieron las curvas masa correspondientes a cada una de las fechas seleccionadas y se desarrollaron las imágenes correspondientes a cada uno de los intervalos de comparación de la fecha seleccionada para la presentación y las acumuladas por cada una de las tormentas.

Finalmente en el capítulo VI, se presentan los comentarios y las conclusiones obtenidas del trabajo, que ayuden a mejorar la calibración obtenida y lograr mejores resultados en posteriores trabajos relacionados con el tema.

I. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL RADAR METEOROLÓGICO

I.1 Introducción

La palabra radar es una abreviatura del vocablo inglés “*radio detection and ranging*” y ha sido definido como “el arte de detectar la presencia de objetos, determinando su dirección y distancia, por medio de ecos de radio, reconociendo sus características y empleando los datos así obtenidos” (Battan, 1973) [Ref. 1]. El término “objeto” en meteorología de radar se traduce como cualquier cosa que exista en la atmósfera y que devuelva una cantidad de potencia detectable a un receptor de radar.

El radar, fue desarrollado justo antes de la segunda guerra mundial como un medio para detectar y rastrear aeronaves y barcos. A partir de 1945, el radar ha llegado a ser un instrumento meteorológico indispensable no sólo para los investigadores, sino también para los meteorólogos involucrados en la observación diaria del estado del tiempo. El radar, es particularmente valioso en la detección, rastreo y pronóstico de tormentas severas, las cuales causan grandes daños provocados por avenidas súbitas, tornados o huracanes.

Además, ya que el radar puede medir precipitaciones sobre grandes áreas, él se ha convertido en una herramienta muy útil tanto para los hidrometeorólogos como para los hidrólogos.

Las características básicas y los principios de operación del radar de aquel entonces no han cambiado hasta nuestros días. Las más importantes mejoras son el resultado de sustituir parte del procesamiento analógico y del control de la señal por su equivalente digital. El advenimiento de los microprocesadores ha incrementado la capacidad de los sistemas y los ha hecho viables económicamente.

Hoy en día, los países desarrollados intentan establecer densas redes de radares meteorológicos con distancias entre unidades de tan solo unos 100 a 200 km y su utilización se ha generado al punto que se ha convertido en uno de los productos usuales que el público espera en un reporte meteorológico a través de la televisión comercial.

Entre los datos más codiciados por un ingeniero hidráulico siempre ha estado la evolución en el tiempo y la distribución espacial de la precipitación pluvial dentro de una cuenca de interés. En México, este tipo de información ha permanecido fuera del alcance de los especialistas y por ello los métodos y herramientas usuales se fundamentan en datos mucho más elementales, como es, por ejemplo, la lluvia registrada a intervalos de 24 horas en unos cuantos puntos aislados de la cuenca. El radar meteorológico es un instrumento de observación atmosférica específicamente orientado a la vigilancia continua (en tiempo y espacio) de la precipitación pluvial.

Recientemente, México emprendió un programa de modernización del Servicio Meteorológico Nacional, SMN, y como resultado de ello se actualizaron los cinco radares meteorológicos con que contaba el SMN y se instalaron siete más, todos ellos con especificaciones similares.

Así como hoy es común la toma de decisiones con base en productos meteorológicos de satélite y existe un conocimiento intuitivo bien difundido sobre qué y cómo miden los sensores instalados en los satélites y cómo se interpretan las imágenes en las que estas

mediciones se plasman, se hace necesario obtener un conocimiento similar con respecto a los radares meteorológicos. Es de suma importancia que se conozcan tanto sus capacidades como sus limitaciones, de tal manera que se eviten interpretaciones erróneas.

La mayoría de los equipos de radar utilizados con fines meteorológicos son del tipo “pulsante”, los cuales transmiten pulsos de energía electromagnética de muy corta duración, del orden de 1 a 4 microsegundos. La antena del radar transmite esta energía concentrándola en un haz muy angosto. Los objetos que interceptan esta energía la dispersan en todas direcciones, regresando una pequeña porción hacia la antena (Fig. I.1). En el intervalo de tiempo entre pulso y pulso la señal “reflejada” por el objeto o “blanco” es detectada y amplificada en el receptor del radar y presentada para su observación en varias pantallas u otros dispositivos de registro. El tiempo (t) transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción de la señal reflejada se utiliza para determinar la distancia (d) del blanco ya que la velocidad a la que viaja la energía electromagnética en ambos sentidos es igual a la de la luz (c). La antena gira tanto en azimut como en elevación para poder determinar la posición y altura del blanco.

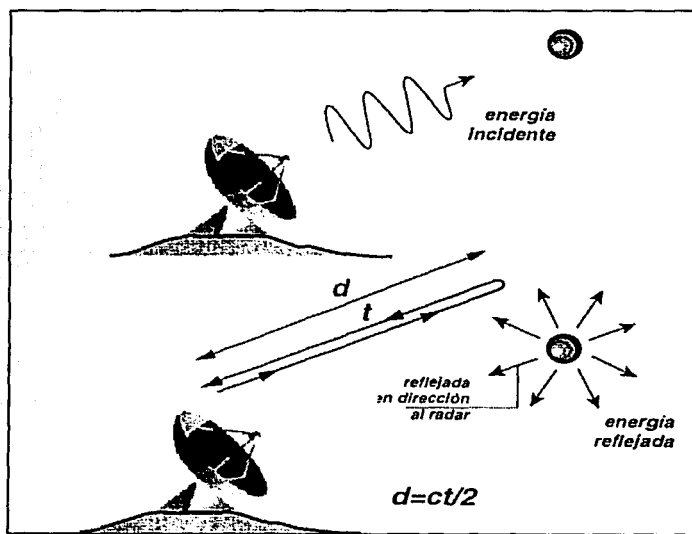


Figura I.1 Emisión y dispersión del pulso transmitido por el radar meteorológico

I.1.1 Sistema de radar

El radar no es un solo instrumento en sí, sino que es un conjunto de dispositivos que trabajan como un todo y recibe el nombre de sistema de radar o simplemente radar. Está compuesto por la antena, el transmisor, una guía de onda, un switch - transmisor/receptor, un receptor y una pantalla de despliegue (descritos en la sección I.4). El conjunto de dispositivos representa el hardware del radar (Fig. I.2).

Generalmente, una estación de radar tiene otros componentes, como es el uso de una torre sobre la que se fijan la antena y el radomo, una planta de baterías y un generador de electricidad, así como los alojamientos de estos equipos y del personal de operación.

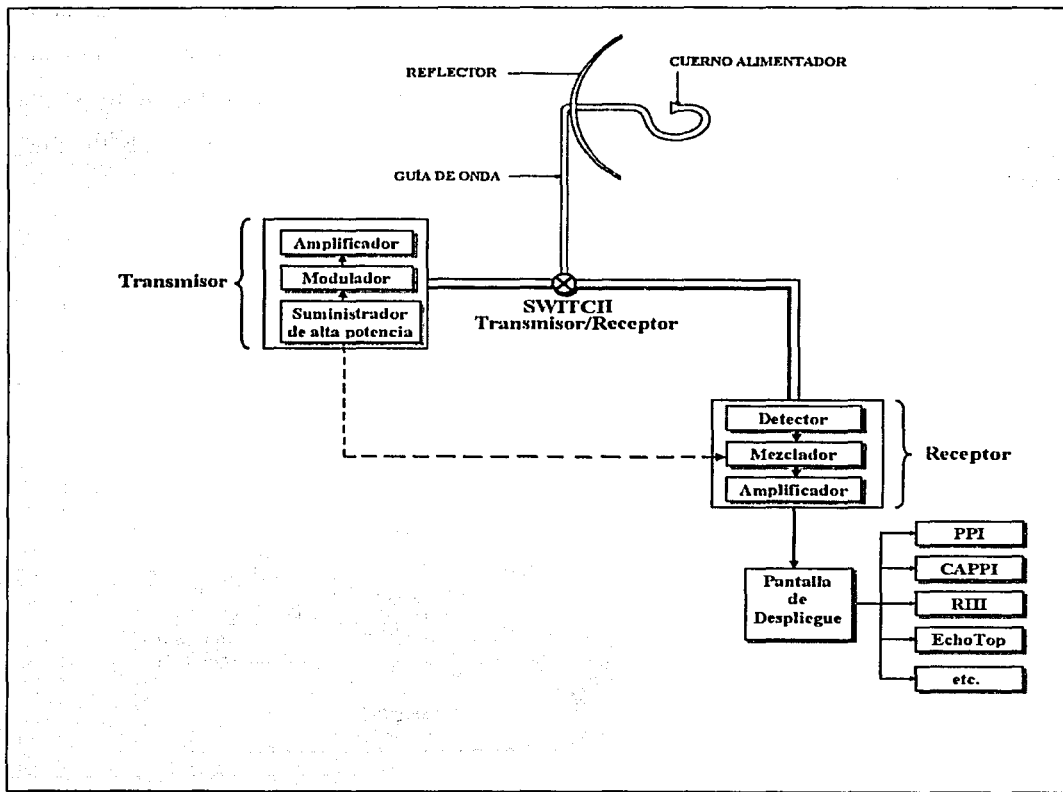


Fig. I.2 Componentes del sistema de radar

Dos de los requisitos más importantes de la mayoría de los radares es que sean capaces tanto de detectar objetos distantes como dar la dirección exacta de tales objetos; por tanto, el diseño de la antena tiene, una gran influencia en lograr estos requisitos. Una de las razones para el uso de antenas grandes tiene que ver con la resolución del radar ya que el ancho del haz varía inversamente con el diámetro del reflector de la antena; Ridenour [Ref. 2] da el ancho θ del haz (en grados) en forma matemática, relacionándolo con el diámetro D del reflector de la antena y la longitud de onda λ de la radiación, usando la fórmula siguiente

$$\theta \leq 70 \frac{\lambda}{D} \quad (I.1)$$

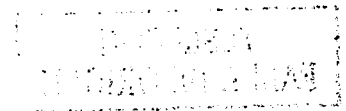
si D y λ son medidos en las mismas unidades (centímetros).

I.2 Penetración

La banda de un radar consiste en un pequeño rango de frecuencia (número de oscilaciones por segundo o de ondas electromagnéticas) dentro del cual opera. Los radares meteorológicos presentan tres variantes:

- Banda X $(\lambda = 3 \text{ cm})$
- Banda C $(\lambda = 5.6 \text{ cm})$
- Banda S $(\lambda = 10 \text{ cm})$

Cada radar es afinado para trabajar en una sola frecuencia dentro del rango, misma que minimiza la interferencia con otros instrumentos electromagnéticos a su alrededor. Dado que la celeridad de las ondas es constante (la celeridad de la luz) y que su propagación se da en una longitud de onda por cada periodo, cada frecuencia tiene asociada una cierta longitud de onda. Esto es, se puede hablar de la banda del radar en términos de la longitud de onda (λ) a la que opera. En este caso, la longitud de onda de la banda X se encuentra cerca de los 3 cm, la banda C cerca de los 5.6 cm y la de la banda S cerca de diez centímetros.



Las tres bandas tienen distinta sensibilidad a blancos (gotas de agua) de diferentes tamaños, de tal manera que un radar banda X es capaz de detectar ecos producidos por pequeñas gotas de agua, inclusive de un tamaño tal que no necesariamente están precipitando sino que se encuentran suspendidas en la atmósfera (y todas aquellas mayores).

En el otro extremo, los blancos de zonas con las pequeñas gotas suspendidas son prácticamente transparentes para un haz de banda S, que sólo detecta gotas de tamaño mayor, ciertamente todas ellas ya de precipitación. Los radares banda C responden en forma óptima a gotas de tamaño intermedio. Pero si los radares banda X responden a todo tipo de gotas, la respuesta óptima para radares meteorológicos depende de un balance adecuado entre la opacidad y la transparencia de los blancos para cada una de las bandas.

La selección de la banda del radar para fines hidrológicos depende mucho de la atenuación que sufra la señal ya que para una longitud de onda de 10 cm la atenuación es mucho menor que para una longitud de onda de 3 cm (Figs. I.3).

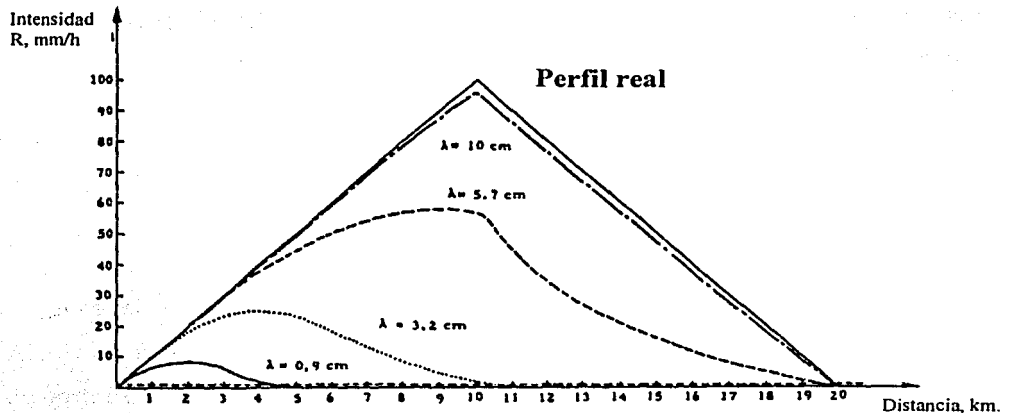


Fig I.3a Modificación por atenuación de los perfiles de una tormenta sintética con la distancia para diferentes longitudes de onda a diferentes intensidades de lluvia

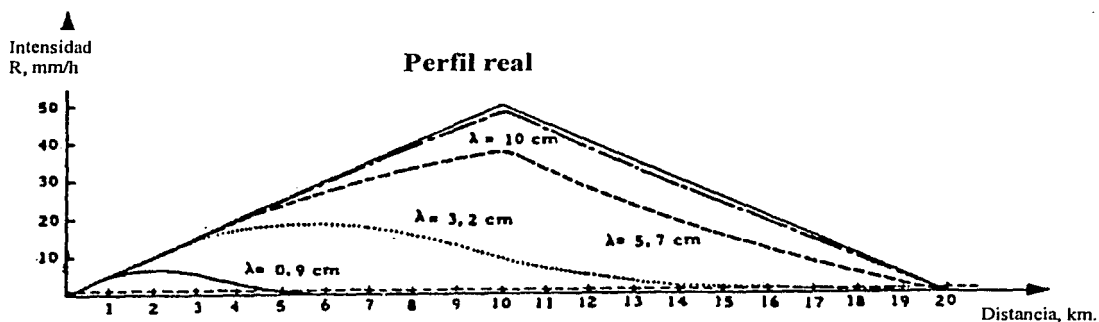


Fig I.3b Modificación por atenuación de los perfiles de una tormenta sintética con la distancia para diferentes longitudes de onda a diferentes intensidades de lluvia

Puesto que el mayor interés operativo es el de detectar la precipitación pluvial, no es recomendable utilizar radares de banda S, ya que en este caso aparecen consideraciones prácticas que pueden aumentar considerablemente el costo de este equipo. Específicamente, para lograr un haz angosto (Δ pequeño) con banda S se requiere una antena parabólica de grandes dimensiones, con el consiguiente incremento en el costo del radomo, el pedestal y sus mecanismos de movimiento y la estructura para soportar las fuerzas de viento [Ver Glosario]. En este contexto el radar banda X lleva la ventaja, por lo que es la banda preferida para radares de tipo móvil.

Todos los radares que actualmente operan en México, incluyendo el del cerro La Catedral, trabajan dentro de la banda C. Esto se debe tal vez a factores económicos, pues aunque los radares que trabajan en la banda S serían ideales para el propósito de detectar precipitaciones pluviales, son mucho más costosos, por lo que los de banda C son una solución práctica y balanceada con fines operativos.

I.3 Alcance

El radar está basado en el principio de que una onda electromagnética se propaga a través del espacio a la velocidad de la luz. La variación de esta velocidad en la atmósfera es pequeña y despreciable. Como se mencionó anteriormente, el sistema de radar puede considerarse que consiste básicamente de un transmisor, el cual produce una potencia a la frecuencia del radar; una antena, la cual irradia la potencia e intercepta la señal recibida; un receptor, el cual detecta, amplifica y transforma las señales recibidas en formato digital; un indicador sobre la cual la señal recibida puede ser desplegada. Se utiliza un switch para cambiar de modo recepción a modo intercepción y viceversa.

Las razones principales que limitan el radio de cobertura del radar o alcance son la Frecuencia de Repetición de Pulsos, por la cantidad de energía que retorna para ser capturada por el radar y la curvatura de la tierra. Esta frecuencia se define como el número de pulsos transmitidos por el radar en una unidad de tiempo. Este intervalo de tiempo entre pulso y pulso es considerablemente mayor que la duración del pulso y limita el alcance máximo del radar. La Frecuencia debe ser suficientemente alta como para no perder ningún detalle lejano por el movimiento del azimut del haz, pero a la vez suficientemente baja para que el pulso viaje hasta el blanco más lejano que se pretenda detectar y regrese hasta la antena antes de que se inicie el pulso siguiente.

La cantidad de energía que parte del radar se transmite a través de un haz cuyo ancho va aumentando conforme se aleja del radar, por lo que, la densidad de la energía disminuye con la distancia. La variación de la densidad de la energía es directamente proporcional a $\frac{1}{r^2}$ y la energía que retorna al radar varía con una ley de $\frac{1}{r^4}$, siendo r la distancia del radar al objetivo. Lo anterior provoca que, a pesar de las grandes cantidades de energía que emite el radar, la que retorna sea más débil en cuanto más alejado esté el objetivo del radar.

La curvatura de la tierra también afecta significativamente el radio de la curvatura del radar, puesto que entre más se aleje del haz del radar, el cual es recto, los blancos que

detecta están más alejados de la superficie terrestre, haciendo menos útil la información para propósitos de lluvias.

Todo esto hace suponer que las coberturas de los radares sean aproximadamente de 450 km de radio. El radar tipo **ERICSSON** tiene coberturas de 960, 480 y 240 km de diámetro, y almacena la información en una matriz de 240 x 240 celdas cuyo tamaño es de 4 x 4 km, 2 x 2 km y 1 x 1 km, respectivamente.

I.4 Productos clásicos del radar meteorológico

Se le llama producto de radar a un despliegue en pantalla o impresión que muestra las mediciones que él realiza. Los dos productos clásicos de un radar se encuentran íntimamente relacionados con la capacidad de movimiento de la antena, esto es, giro en azimut (θ) y en ángulo de elevación (ϕ).

Anteriormente, se empleaba una consola donde se desplegaban en una pantalla, a donde llegaba la imagen por medio de tubos de rayos catódicos de forma analógica, los productos de los radares meteorológicos obtenidos a partir de los barridos realizados, donde la imagen se podía ver sólo en el momento que se generaba la información sin poderse almacenar para su posterior análisis. Actualmente, los modernos radares emplean pantallas de computadoras incorporadas al sistema con niveles de reflectividad de hasta 256 (0-255) valores, los cuales pueden ser almacenados en formato digital como información generada por los barridos del radar. Estos barridos los realiza el radar girando sobre su propio eje para detectar los blancos meteorológicos que caen dentro de su radio de cobertura a un ángulo mínimo, cercano a los cero grados sobre la horizontal, y almacenar esta información, se eleva un grado para realizar el siguiente barrido y almacenar la información generada de éste y así sucesivamente, hasta generar un número de barridos suficiente para obtener un volumen de muestreo que permita el análisis de la estructura de aquellas tormentas que fueran detectadas dentro del radio de alcance del radar. Por ejemplo, el radar del cerro Catedral, realiza diez barridos con éste fin.

La posición del blanco es determinada por el azimut θ y el ángulo de elevación ϕ de la antena. Con el volumen de muestreo obtenido a partir de los barridos, el radar obtiene varios productos que pueden ser desplegados en pantalla, éstos productos son el **PPI**, **CAPPI**, **RHI**, **PseudoCAPPI**, etc. que posteriormente se definen. Para observar la mayoría de estos productos en una pantalla, para su despliegue e interpretación, usualmente se emplean niveles de intensidad de lluvia (mm/h), los cuales son medidos indirectamente, ya que el radar, lo que estima al realizar sus barridos sobre la atmósfera, es la reflectividad (z ; en decibelios ó dBZ) o energía retrodispersada por las gotas, contenidas en un volumen de muestreo, al ser interceptadas por el haz del radar.

I.4.1 Indicador de posición en planta, PPI

Uno de los indicadores o productos generados por el radar meteorológico es el indicador de posición en planta, **PPI** (por sus siglas en inglés), el cual presenta la información sobre los ecos detectados por el radar en coordenadas polares (r , θ).

Es importante enfatizar que, debido a la curvatura de la Tierra, el **PPI** no representa una medición a una altura constante sobre el terreno, ni siquiera para $\phi = 0$. Los ecos que aparecen en pantalla en un **PPI** no corresponden a cortes de las tormentas presentes a cierto nivel atmosférico; de hecho para $\phi \geq 0$ los ecos observados son más altos conforme mayor es la distancia al radar (r), (**Fig. I.4**).

I.4.2 Indicador en altura y distancia, RHI

El otro producto más común que proporciona el radar es el indicador en (el plano) altura distancia, **RHI** (por sus siglas en inglés), obtenido directamente al mantener fija la dirección en azimut de la antena y barrer verticalmente en el ángulo de elevación. El resultado es un corte vertical de la atmósfera en una dirección radial al radar (**Fig. I.5**).

Este producto es utilizado una vez que la posición en *PPI* de una tormenta de interés ha sido establecida con el propósito de explorar la estructura vertical de la misma una vez que ha sido identificada. Por ejemplo, este mecanismo puede utilizarse para establecer (y reportar) la altura máxima de la lluvia, que es un parámetro importante en la determinación de la intensidad de tormentas convectivas, es decir, aquellas producidas por el movimiento vertical ascendente de aire húmedo. Dentro del capítulo III de este trabajo se presenta una definición más amplia del tipo de lluvias convectivas.

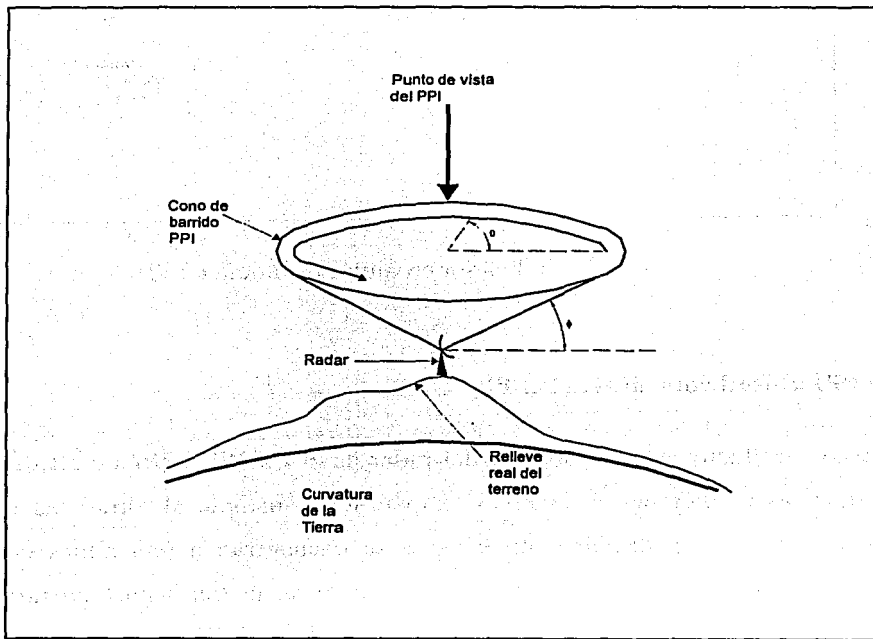


Fig. I.4 Indicador de posición en planta (*PPI*)

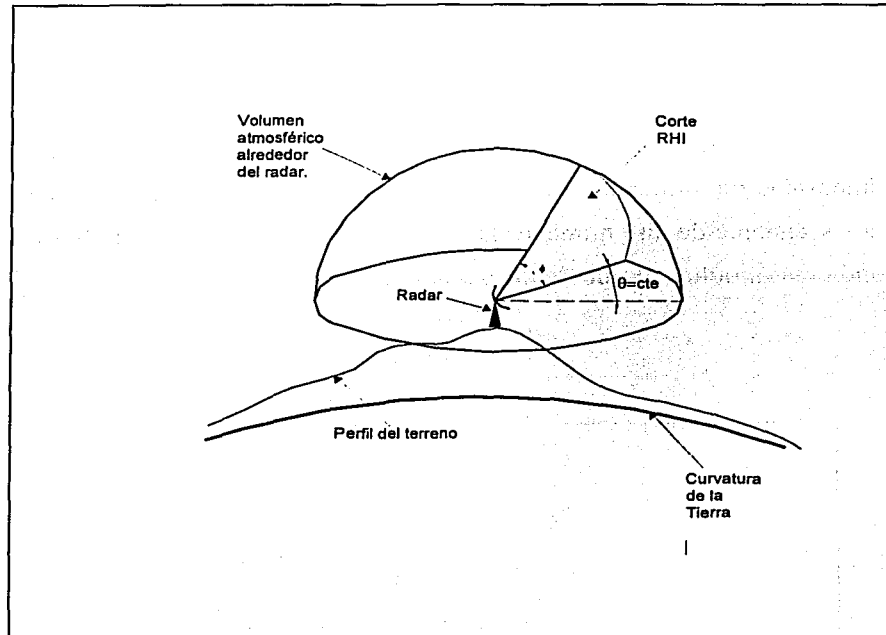


Fig. I.5 Indicador en altura distancia (*RHI*)

I.4.3 PPI altitud constante, CAPPI

Otro de los productos que se obtiene del radar es el *CAPPI* (*PPI* de altitud constante) y representan las mediciones a un nivel atmosférico constante al tomar las mediciones de todos los barridos, registrando sólo las que se encuentran a una altura constante de la superficie terrestre tomando en cuenta la curvatura de la tierra para su almacenamiento. Este producto se genera debido al inconveniente de la difícil interpretación del *PPI* puesto que éste representa mediciones a mayores niveles atmosféricos conforme la distancia radial aumenta (suponiendo el ángulo de elevación $\phi \geq 0$). La posibilidad de almacenar una representación digitalizada de las mediciones, realizadas de todo el volumen de muestreo, permite corregir este problema generando un producto que efectivamente representa

mediciones a un nivel atmosférico constante (sobre el nivel del mar) llamado **PPI** de altitud constante, **CAPPI** (por sus siglas en inglés *Constant Altitud PPI*).

Esto se logra realizando barridos **PPI** sucesivos con ángulos de elevación cada vez mayores y almacenando la porción de los datos que corresponden al nivel atmosférico de interés. Después de esto, la computadora de control y procesamiento reconstruye las mediciones que se hubieran obtenido si la antena hubiera barrido a una altitud constante, (**Fig. I.6**).

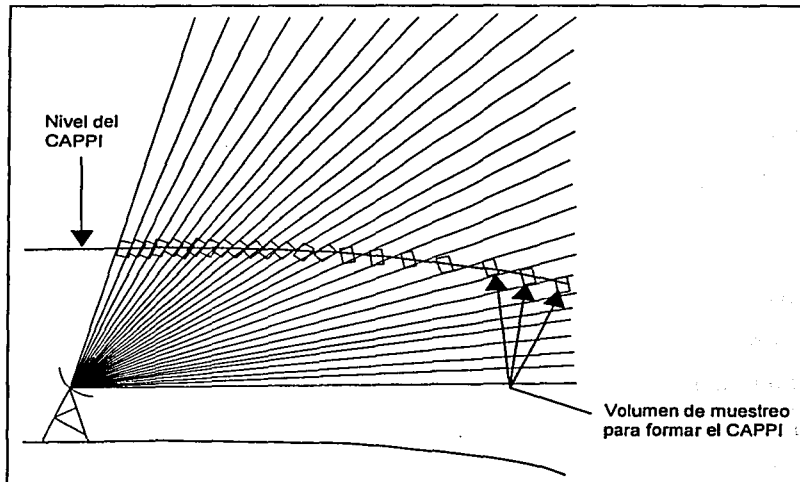


Fig. I.6 Barrido a una altitud constante en un producto **CAPPI**

El **CAPPI** más bajo, permitido por el relieve del terreno en una cierta zona, es el de mayor interés desde el punto de vista hidrológico, pues mide la precipitación más cerca de la superficie del terreno. Hoy en día el **CAPPI** es el producto de radar más común. Vale la pena recordar que el **CAPPI**, aunque representa mediciones de altitud constante, no mantiene la misma resolución para toda distancia radial, es decir, sigue sufriendo de la misma degradación en resolución que el resto de las mediciones de radar.

I.4.4 PseudoCAPPI

Un producto muy útil para propósitos hidrológicos es el *PseudoCAPPI* el cual representa los valores de reflectividad del eco más bajo disponible y se considera que es el producto que idealmente debería de representar mejor a la lluvia ocurrida sobre la cuenca.

En forma inversa al producto anterior, un producto muy socorrido para propósitos hidrológicos (entendiéndose como estimación de lluvia en tiempo real), es el llamado *PseudoCAPPI*, nomenclatura que aún no se encuentra totalmente estandarizada. Como su nombre lo indica es similar a un *CAPPI* pero para cada posición (r, θ) se almacena el valor de reflectividad (no la altitud) del eco más bajo disponible. Este es el producto que idealmente debería representar mejor a la lluvia efectivamente ocurrida sobre la tierra. Su forma de despliegue es similar a la del *PPI* o *CAPPI* (intensidad de ecos en el plano (r, θ)).

Para el ejemplo de aplicación que se presenta en este trabajo se usaron las imágenes de radar que corresponden a las de *PseudoCAPPI* y que tuvieron un alcance de 120 km de radio con un tamaño de pixeles de 1×1 km de radio, ya que esta era la mejor resolución que proporcionaba el radar y que mejor servían al propósito planteado.

I.4.5 Topes de ecos (Echo Top)

Este producto representa las mediciones de la reflectividad a la mayor altura donde fueron detectados y puede emplearse para determinar el tipo de tormenta que se presenta ya que las tormentas convectivas se originan a partir de nubes cúmulus con espesores de hasta 12 km. Las lluvias estratiformes, por el contrario, se originan de las nubes estratiformes y alcanzan espesores de sólo 4 km.

II. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED TELEMÉTRICA

El Radar Meteorológico se emplea para la medición y seguimiento de fenómenos atmosféricos constituidos por agua, principalmente en forma de lluvia, granizo y nieve. La ventaja de este tipo de radar, es equivalente al empleo de cientos de pluviómetros distribuidos a lo largo de la zona de cobertura del mismo, que transmiten la información en tiempo real. El radar tiene además la posibilidad de realizar estudios de volumen de la nube, a diferentes cortes o secciones, así como dar seguimiento y estudio de fenómenos severos como son los huracanes. Es sin duda el Radar meteorológico una valiosa herramienta con tecnología de punta con que cuentan los Meteorólogos para realizar los pronósticos del clima.

La Red Nacional de Radares Meteorológicos [Ref. 3], dependiente del SMN (Fig. II.1) esta formada por 12 radares; 7 de estos son nuevos con tecnología completamente digital marca **ERICSSON**, estos tienen la facilidad de controlarlos remotamente por medio de un software que los automatiza totalmente, en cambio los 5 restantes fueron cambiados de



tecnología analógica a digital marca **EEC**, todos ellos están provistos con el sistema *Doppler*, lo que permite conocer la velocidad y la dirección del movimiento del blanco.

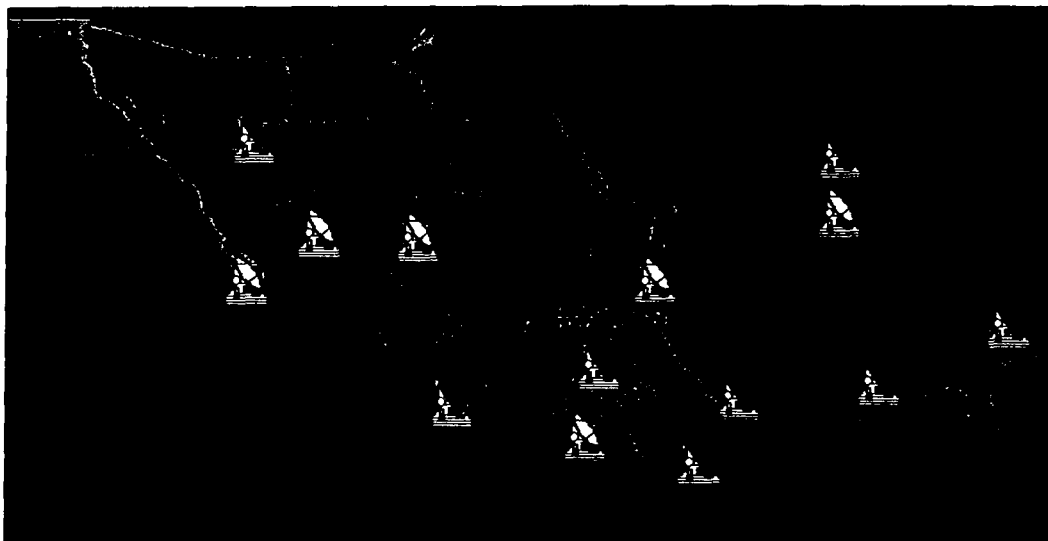


Fig. II.1 Red de radares meteorológicos de la Comisión Nacional del Agua

Todas las estaciones de Radar cuentan con sistemas ininterrumpibles de energía, sistema de protección contra incendios y de comunicaciones vía satélite con el centro colector de datos, que se encuentra ubicado en las instalaciones del Servicio Meteorológico Nacional en la ciudad de México, en donde se analiza, se procesa y se almacena toda la información.

Además la red proporciona una cobertura aproximada del 70% del Territorio Nacional en cuanto a datos de lluvia, y de los archivos que proporciona, en conjunto con los datos de lluvia, muestra las coordenadas geográficas y altitud sobre el nivel del mar de cada una de las Estaciones de Radar.

Para validar la estimación de las lluvias realizada por el radar es necesario emplear información de lluvias observada en la superficie del terreno mediante estaciones pluviográficas que permiten establecer una relación entre las mediciones del radar y la de

los pluviógrafos. En el Distrito Federal existe una red de 63 pluviógrafos (para las fechas consideradas en este estudio), operada por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, las cuales son suficientes para este fin.

II.1 Medición de precipitaciones pluviales

La importancia de las mediciones de las precipitaciones pluviales se encuentra en la información, ya que con la que se dispone es utilizada como el elemento de seguridad y control de la ciudad.

Este sistema lo forman estaciones pluviográficas con capacidad de transmisión de datos vía radio, distribuidas en el Distrito Federal y zona conurbada (**Fig. II.2; Fig. II.3; Tablas II.1**).



Fig. II.2 Ubicación de las estaciones pluviográficas

Tablas II.1 Estaciones pluviográficas pertenecientes a la DGCCH

	ESTACIÓN	LONGITUD	LATITUD
1	Tanque Chalmita	99°08'33.09"	19°33'22.39"
2	O.T. Río de los Remedios	99°09'16.11"	19°30'47.84"
3	P.B. Lindavista	99°07'10.29"	19°29'12.00"
4	Coyol	99°05'24.34"	19°29'03.89"
5	P. Generadora 101	99°05'50.74"	19°27'21.08"
6	P.T. Rosario	99°11'25.71"	19°30'33.41"
7	Campo Mecoaaya	99°11'00.00"	19°29'11.03"
8	p.m. Nva. Santamaría	99°09'50.91"	19°28'08.11"
9	Tanque San Joaquín	99°13'43.22"	19°26'11.68"
10	P.B. Tizoc	99°10'14.91"	19°26'08.76"
11	Depto. del D.F.	99°07'53.87"	19°25'52.25"
12	Santa Cruz Acatlán	99°08'00.00"	19°24'08.19"
13	P.B. López Mateos	99°04'06.34"	19°23'13.03"
14	P.B. Churubusco Lago	99°03'28.81"	19°26'00.00"
15	Triángulo	99°12'42.51"	19°23'57.73"

	ESTACIÓN	LONGITUD	LATITUD
16	Trifurcación Santa Lucía	99°15'52.46"	19°21'35.92"
17	Tanque El Lienzo	99°14'47.11"	19°20'02.92"
18	Centro Universidad	99°10'50.40"	19°20'48.46"
19	Radio Comunicación	99°10'02.74"	19°23'58.02"
20	P.B. Municipio Libre	99°07'35.66"	19°21'55.05"
21	Tanque El Cartero	99°16'20.51"	19°22'23.79"
22	La Venta	99°18'00.00"	19°20'26.08"
23	El Zarco	99°21'24.00"	19°19'30.00"
24	T. San Francisco	99°14'12.00"	19°18'00.00"
25	Planta Potabilizadora	99°17'00.00"	19°16'43.00"
26	Monte Alegre	99°16'30.00"	19°14'30.00"
27	P.B. Xotepingo	99°08'35.28"	19°19'55.57"
28	P.B. Aculco	99°06'01.54"	19°22'45.49"
29	P.B. Ejército de Oriente	99°02'16.16"	19°22'48.91"
30	P.T.C. de la Estrella	99°04'35.08"	19°20'13.51"

	ESTACIÓN	LONGITUD	LATITUD
31	S. Eléctrica Sta Catarina	98°57'38.28"	19°19'15.64"
32	P.P. Santa Catarina	99°01'23.39"	19°17'57.99"
33	San Pedro Tlahuac	99°00'35.23"	19°16'53.59"
34	Tlalpan CTL-5	99°11'39.77"	19°17'46.81"
35	P.B. Villa Coapa	99°07'34.19"	19°17'09.46"
36	T. San Pedro Mártir	99°10'16.08"	19°15'47.50"
37	Ajusco	99°12'37.86"	19°13'07.94"
38	Topilejo	99°08'09.56"	19°11'58.38"
39	Caseta Forestal	99°12'00.00"	19°07'00.00"
40	Pfic G.A.V.M. Sur	99°05'47.13"	19°18'59.51"
41	Planta Nativitas	99°05'27.66"	19°14'47.33"
42	Planta San Luis	99°01'17.76"	19°15'27.28"
43	Milpa Alta	99°01'37.90"	19°11'14.29"
44	P. Barrientos	99°10'30.00"	19°34'00.00"
45	Vaso del Cristo	99°12'42.86"	19°30'37.25"

	ESTACIÓN	LONGITUD	LATITUD
46	Planta Chiconautla 1	99°01'12.00"	19°37'24.00"
47	Planta Chiconautla 2	99°04'48.00"	19°31'48.00"
48	Palmas	99°14'56.57"	19°25'46.15"
49	El Venado	99°23'00.00"	19°23'12.00"
50	100 Metros	99°08'15.77"	19°28'11.54"
51	Tanque Peñón	99°05'05.12"	19°26'27.57"
52	Ciudad Deportiva	99°06'45.79"	19°24'28.86"
53	Santa Cruz Meyehualco	99°01'44.91"	19°20'48.79"
54	Caída del Borracho	99°15'56.35"	19°25'24.62"
55	Yaqui	99°17'11.10"	19°21'45.72"
56	Desierto de los Leones	99°18'33.51"	19°18'48.82"
57	San Bartolo Ameyalco	99°16'30.56"	19°19'43.89"
58	Cárcel de Mujeres	98°59'58.71"	19°21'26.83"
59	Tetelco	98°58'15.15"	19°12'36.57"
60	Huayatta	99°15'38.83"	19°18'29.07"

	ESTACIÓN	LONGITUD	LATITUD
61	San Salvador Cuautenco	99°05'24.76"	19°11'25.63"
62	Sistema de Guadalupe	99°06'20.00"	19°30'15.00"
63	Santa Ana Tlacotenco	99°00'00.00"	19°09'05.00"

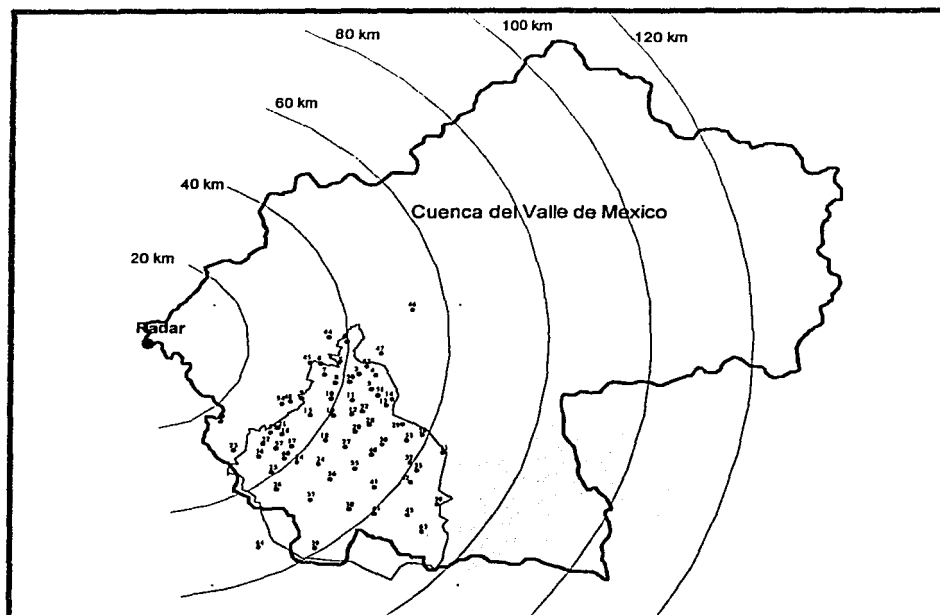


Fig. II.3 Red pluviográfica utilizada para el análisis y zona de influencia del radar hasta 120 km

De acuerdo con lo que se observa en la Fig. II.3, la densa red de pluviógrafos automáticos con que cuenta la *DGCOH* permitirá calibrar al radar meteorológico. Por su ubicación, los aparatos mencionados cubren la zona de estudio y ayudan a que la transmisión sea continua de los datos de lluvia, lo que constituye la herramienta fundamental de este trabajo.

Debido a que el radar realiza las mediciones girando azimutalmente no toda la superficie que cubre es útil para el propósito del estudio, por tal motivo se aisló el sector de cobertura donde está contenida la zona de interés (Tabla II.2), seleccionando un área de 49 km x 66 km, como se muestra en la Fig. II.4.

Tabla II.2 Sector de cobertura para la zona de interés.

PUNTO	Coordenadas Longitud W	Coordenadas Latitud N
P1	99°23'43.94"	19°38'1.60"
P2	98°55'47.60"	19°38'1.60"
P3	99°23'43.94"	19°02'12.88"
P4	98°55'47.60"	19°02'12.88"

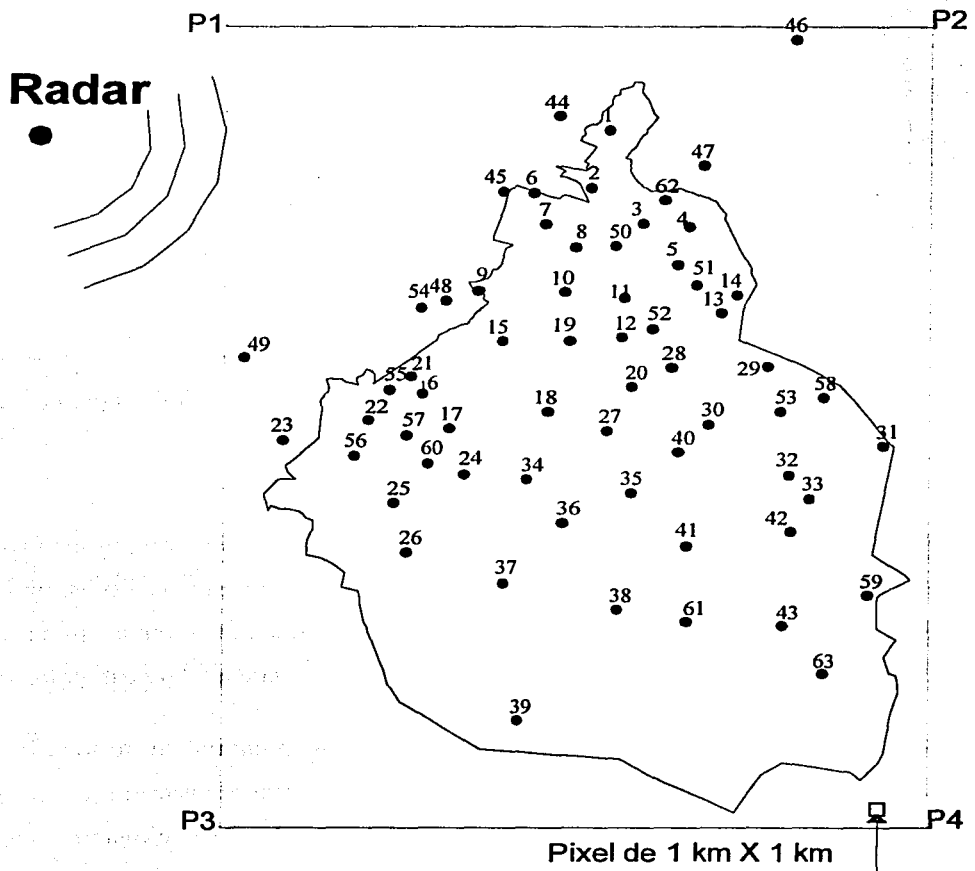


Fig. II.4 Sector de medición seleccionado para el estudio

II.2 Descripción del funcionamiento de la red pluviográfica de radioenlace (DGCOH)

PLUS es el nombre del Programa Maestro de Supervisión de la Red Pluviográfica de Radioenlace operada por la Dirección General y Operación Hidráulica del Gobierno del Distrito Federal, y genera los archivos con información de lluvias con extensión *.PLU, los cuales fueron los que se emplearon en este análisis y tienen el formato siguiente

**No. de Estación		
No. De pulsos	hora:minuto	Día-mes
**No. de Estación		
No. De pulsos	hora:minuto	Día-mes

PLUS es un sistema de información de lluvias en tiempo real del Distrito Federal, que al mismo tiempo permite supervisar el funcionamiento de la red de estaciones pluviográficas.

PLUS se divide funcionalmente en cinco subsistemas:

1. Recepción y almacenamiento de los mensajes transmitidos por las estaciones pluviográficas.
2. Visualización en tiempo real del comportamiento de las lluvias y del estado de las estaciones.
3. Análisis de los eventos recibidos y emisión de reportes de lluvias.
4. Manejo de terminales por línea conmutada y por línea directa.
5. Interfaz con el operador.

PLUS está programado en Turbo Pascal 5.0 y funciona en una computadora PC compatible con IBM, con monitor VGA, EGA, CGA, o Hércules. Para el manejo de terminales por línea conmutada se requiere de un MODEM de 2400 bauds compatible con Hayes, y para las terminales por línea directa se necesita un puerto serie por cada una de ellas.

Las características más sobresalientes de **PLUS** son:

- a) Despliegue gráfico que permite observar en tiempo real el comportamiento de las lluvias en toda la zona del Distrito Federal.
- b) Sistema automático de almacenamiento de lluvias que permite contar con un archivo histórico de lluvias.
- c) Adaptabilidad a los cambios en la topología de la red.
- d) Posibilidad de consultar el puesto central desde cinco terminales al mismo tiempo, una por línea conmutada y cuatro por línea directa.

1. Recepción y almacenamiento

El programa recibe los mensajes de las estaciones a través del punto serie COM1 a una velocidad de transmisión de 300 baudios en un modo asíncrono con el siguiente formato: 7 bits por carácter, 2 bits de parada y paridad non.

PLUS está continuamente a la espera de los mensajes que envían las estaciones pluviográficas. Estos mensajes están formados de caracteres ASCII con el formato siguiente

***1234A0**

donde

- * Es el distintivo de la red que permite distinguir el mensaje recibido de otros mensajes o ruido. Se transmite con paridad par.
- 12 Número de la estación que envía el mensaje debe ser un número entre 00 y 99.
- 34 Número de eventos reportados, también debe ser un número entre 00 y 99.
- A Se utiliza para indicar que la estación está funcionando con corriente alterna y cuando la estación está funcionando con batería envía una B.

- 0 Se utiliza como carácter de *checksum* y es igual al dígito menos significativo de la suma de los cuatro dígitos que componen al número de estación y a los eventos reportados.

El programa verifica que cada mensaje que se reciba cumpla estrictamente con este formato y en caso contrario lo desecha. Además se realiza la verificación de la paridad por lo que la posibilidad de recibir un mensaje erróneo es prácticamente nula.

Cada vez que se recibe un mensaje, el programa lo almacena en una estructura de datos en memoria, y cada hora se almacena automáticamente en un disco el contenido de esta estructura. En caso de que se agotara antes de este lapso la memoria disponible, también se realizaría el vaciado de la memoria al disco.

Este sistema maneja automáticamente la creación de los archivos en donde almacena los mensajes de las estaciones.

Con objeto de tener una clasificación de las lluvias por día se nombran los archivos de la manera siguiente:

REAAMMDD.PLU

donde

AA es el año

MM es el mes

DD es el día

En cada archivo se almacenan los mensajes recibidos de las 6 a.m. de ese día hasta las 6 a.m. del día siguiente.

El formato con el cual el programa almacena en disco los mensajes es el siguiente

50BHH:MM DD/MMP

donde

50	número de eventos
B	indicador de batería. Cuando está funcionado con corriente alterna se pone un espacio en blanco
HH:MM	hora en que se recibió el mensaje un espacio en blanco
DD/MM	día y mes en que se recibió el mensaje
P	indicación de que la estación está en modo prueba, en modo normal se pone un espacio en blanco

Estos mensajes se agrupan por cada estación de la forma siguiente

***16**

50 19:32 02/06

50 19:50 02/06

***17**

45 19:30 02/06

es decir en los archivos que se tienen los números de las estaciones del 00 al 99 precedidos por un asterisco y en seguida los eventos registrados en cada estación.

Estos archivos pueden ser visualizados e impresos desde el programa maestro.

2. Visualización de las lluvias en tiempo real

Se tienen tres modos de presentación de los eventos que reportan las estaciones: **MONITOR**, **PRECIP** y **MAPA**. En ellos se presenta la información recibida en tiempo real es decir al mismo tiempo en que se están recibiendo los eventos en la red.

MONITOR

El objetivo de este modo consiste en poder supervisar el funcionamiento de las estaciones.

En este modo se presentan los dos últimos mensajes recibidos de cada una de las estaciones en una pantalla con 60 ventanas. Cada ventana tiene dos renglones con el siguiente formato

1234AHHMM

donde

12	número de estación
34	número de eventos reportados
A	indicador de corriente alterna o de batería en cuyo caso sería B
HHMM	hora y minuto en que se recibió el mensaje

A cada estación le corresponde una ventana fija en la pantalla que es asignada en función de su número de estación. Cada ventana realiza el *scrolling* vertical automáticamente.

El color de fondo de las ventanas varía en función del estado de la estación:

BLANCO	cuando no se ha recibido ningún mensaje
AZUL	si está aconteciendo una lluvia
VERDE	si está funcionando con corriente alterna y no está lloviendo
CAFÉ	si está funcionando con batería y no está lloviendo
ROJO	si la estación no está funcionando correctamente es decir cuando no se ha recibido ningún mensaje en las últimas doce horas
GRIS	si la estación está en modo prueba

El color del texto es:

BLANCO cuando está funcionando con corriente alterna o si la estación no está funcionando correctamente

AMARILLO cuando está funcionando con batería

AZUL cuando no se ha recibido ningún evento

NEGRO cuando está en modo prueba

PRECIP

En este modo se presenta el análisis de las lluvias que se están registrando en cada una de las estaciones.

Se tienen dos pantallas de presentación en este modo y en cada una se pueden visualizar simultáneamente hasta 30 estaciones.

El usuario puede conmutar entre estas dos pantallas por medio de una tecla de funciones. Las estaciones se encuentran ordenadas por número de estación.

Para cada estación se presenta una ventana con el formato siguiente:

12 NOMBRE
A 123.45 mm
HI:MI HF:MF

donde

12 número de estación

NOMBRE nombre de la estación

A estado de la estación, que puede ser:

- **A** para funcionamiento normal con corriente alterna
- **B** para indicar funcionamiento con batería
- **F** para indicar que la estación no ha transmitido en más de doce horas
- blanco si no se ha recibido aún ningún mensaje

123.45 mm los milímetros de lluvia que se tienen registrados en esa estación. También puede optarse por una presentación de eventos en lugar de mm, los cuales se denotan con eve.
(Un evento equivale a 0.254 mm)

HI:MI hora de inicio de la lluvia si hubo o está ocurriendo una lluvia.
BLANCO si no se ha registrado ninguna lluvia

HF:MF hora en que terminó la última lluvia. BLANCO si no ha terminado o no ha habido lluvia.

El color de fondo del texto en las ventanas varía de manera similar que en **MONITOR** excepto en la ventana inicial, en la cual el color de fondo es negro y el texto amarillo.

MAPA

En este desplegado se maneja el modo gráfico de la computadora. Se tiene una pantalla principal en que se presenta un mapa del Distrito Federal con la ubicación de todas las estaciones que componen la red representadas por puntos. Estos puntos cambian de color en función de la lluvia que está registrando:

BLANCO para 0 mm

AZUL entre 0 y 10 mm

AMARILLO entre 10 y 20 mm

VERDE entre 20 y 30 mm

MAGENTA entre 30 y 40 mm

ROJO superior a 40 mm

A partir de esta pantalla principal se puede pasar a otras cuatro pantallas en donde se presentan las zonas Norte, Sur, Este y Oeste del DF, en forma amplificada y con la información siguiente para cada una de las estaciones:

*

12

34

donde

* ubicación de la estación con el mismo código de colores utilizado en el mapa completo

12 número de la estación

34 milímetros de lluvia

En cada pantalla se tiene la posibilidad de pasar a cualquiera de las otras cuatro posibilidades.

3. Análisis de lluvias

En este subsistema se analizan los mensajes almacenados en los archivos de reportes para emitir un reporte de lluvias.

El operador puede pedir el análisis de lluvias de cualquier día por medio de las opciones de **HOY**, **AYER** y **OTRO DÍA**. El programa automáticamente buscará el archivo en donde se encuentran los eventos correspondientes a esa fecha y emitirá en la pantalla el reporte de

las lluvias. En el despliegue del reporte en la pantalla, el programa maneja *scrolling* vertical.

El usuario puede mandar a imprimir dicho reporte. También se tiene la opción de imprimir un reporte gráfico en donde se aprecia la lluvia promedio en cada una de las estaciones sobre un mapa del Distrito Federal. A continuación se explica en forma simplificada como se realiza este análisis.

Una vez que se ha seleccionado el archivo en donde se encuentran los eventos correspondientes al día demandado, se procede a leer registro por registro, haciendo el análisis estación por estación.

Para calcular el valor en milímetros de una lluvia se resta del último evento el primer evento y se multiplica por 0.254, es por ello que se debe determinar cual es el primer evento y cual es el último. El primer evento es aquel en el que se detectó el primer cambio en el número de eventos excepto:

- si la diferencia de eventos con el mensaje siguiente es superior a 40 unidades
- si la diferencia de tiempo con el mensaje siguiente es mayor a 16 horas

Los criterios para determinar el fin de una lluvia son los siguientes:

- cuando el número de eventos no varió en más de una hora
- si la diferencia de eventos con el mensaje siguiente es superior a 40
- si la diferencia de tiempo con el mensaje siguiente es de más de 16 horas
- si hay cambio de día (en principio esto nunca sucede pues en el archivo sólo hay registros del mismo día, sin embargo es posible concatenar varios archivos para hacer el análisis sobre un período más amplio de tiempo)
- si ya no hay más mensajes de esa estación

Cada que se encuentra una lluvia se almacena en un archivo un registro que contiene el número de estación, la hora de inicio, la hora de terminación y el valor en milímetros de la lluvia.

Después este archivo se ordena por fecha para que en caso de que el archivo contuviera varias fechas el reporte apareciera ordenado por fechas.

Finalmente, se calcula el acumulado en todo el día es decir se suman los valores parciales de cada una de las lluvias que se registraron en cada estación.

Para las estaciones en que no se registró ninguna lluvia se genera un registro vacío que aparece al final del reporte.

Al momento de estar generándose el reporte de lluvias también se genera un reporte de errores detectados en cada estación, el cual puede ser consultado desde el programa. Estos errores son:

- **ALGÚN DATO NO ES VÁLIDO** se produce cuando el formato de algún registro no corresponde al esperado, en este caso no se toma en cuenta dicho registro
- **TIME OUT HH:MM A HH:MM DD/MM** no se transmitieron datos en más de 16 horas, se indica el periodo de tiempo en que no se recibieron datos
- **NO SE TRANSMITIERON DATOS** cuando no se recibió ningún mensaje de la estación
- **ESTACIÓN NO DADA DE ALTA** si se recibieron mensajes de una estación que no se tiene registrada

4. Interfaz con el operador

Uno de los aspectos que más se ha cuidado en el desarrollo de este sistema es la interfaz con el operador. Los objetivos perseguidos son presentar un sistema confiable y de fácil operación.

Existen varias tareas que puede realizar el operador:

- Cambiar la fecha y la hora
- Actualizar las estaciones del sistema
- Obtener los reportes de lluvias
- Programar el horario de funcionamiento de la terminal por línea conmutada
- Poner en modo de prueba (P) una estación

La hora y fecha del sistema son de importancia fundamental para el buen funcionamiento del sistema pues a partir de éstas se generan los archivos de los mensajes de la red. Si la fecha es incorrecta se tendrán resultados incorrectos. Por supuesto, que en principio la fecha no varía mucho en condiciones normales de operación.

Para actualizar las estaciones del sistema se utiliza un módulo que permite dar de alta, cambiar de nombre o de ubicación una estación y dar de baja. En la parte de altas se permite a través de una pantalla gráfica ubicar la estación dentro del mapa del Distrito Federal.

Para generar los reportes de lluvias basta con que el operador indique que día quiere y si desea que el reporte sea impreso o únicamente desplegado en pantalla.

El horario de funcionamiento de la terminal por línea conmutada significa durante que periodo el MODEM estará en modo *auto-answer*, es decir durante que horario **PLUS** responderá a las llamadas telefónicas. El usuario puede programar este horario o inclusive inhabilitar esta función.

Cuando se requieren hacer pruebas de comunicación con una estación se puede poner la estación en modo prueba para evitar que los eventos recibidos por la misma se consideren como parte de una lluvia.

5. Manejo de terminales

Esta función **PLUS** permite hacer consultas al puesto central desde una terminal conectada por línea conmutada o por línea directa.

De hecho la idea básica consiste en que desde la terminal se tenga acceso a la misma información que se tiene desde el puesto central.

El programa que se utiliza en las terminales (**PLUSTER**) es en cierta forma un subconjunto de **PLUS** con algunas rutinas adicionales para el manejo del protocolo de comunicación.

PLUS es quien tiene el control del proceso de comunicaciones, **PLUSTER** solo responde a los mensajes que le envía el **PLUS**.

La información que transfiere el puesto central a las terminales es únicamente la necesaria para construir las pantallas de despliegue. Esta información está contenida en dos estructuras de datos: **EDALTR** y **COLEST**. Esta información junto con la fecha y la hora del sistema es enviada periódicamente a las terminales conectadas.

Para la emisión de reportes y la consulta de los archivos desde la terminal, se hace la transferencia de los archivos correspondientes. Cuando el archivo demandado no existe en el puesto central, **PLUS** envía un mensaje indicando que no existe dicho archivo. Al conectarse la terminal al puesto central se obtiene automáticamente la configuración de la red es decir las terminales dadas de alta.

Desde **PLUS** se puede conocer que terminales están conectadas y si están respondiendo adecuadamente. El número máximo de terminales que pueden estar conectadas al mismo tiempo es cinco: cuatro por línea directa y una por conmutada.

La conexión por línea conmutada se hace por medio de un MODEM de 2400 baudios configurado en COM2 con 8 bits de información, 2 bits de parada y sin manejo de paridad. Del lado de la terminal se requiere un MODEM con las mismas características.

Las terminales por línea directa son conectadas a los puestos serie COM2, COM4, COM5 y COM6 (cuyas direcciones en hexadecimal son 3E8, 2E8, 258 Y 248, respectivamente) a una velocidad de 9600 bauds, un formato de 8 bits de información, 2 bits de parada y sin paridad. La terminal usa el puerto COM1 con la misma configuración.

El cable utilizado para la conexión por línea directa debe de estar configurado de acuerdo al diagrama de conexiones siguiente

PLUS	PLUSTER
SD	RD
RD	SD
DSR	DTR
DTR	DSR
GND	GND

en donde:

SD = transmit data

RD = receive data

DSR = data ser ready

DTR = data terminal ready

GND = signal ground

El funcionamiento por línea conmutada y privada es básicamente el mismo, únicamente varía la forma en que se establece y se mantiene la conexión. Para la conmutada, **PLUSTER** debe marcar el número telefónico del puesto central y esperar a que el **PLUS** responda para establecer la conexión y la conexión es mantenida mientras haya portadora en ambos extremos. En línea directa solo se verifica la existencia de la señal **DSR** en ambos extremos para iniciar y mantener la conexión.

Se puede programar a **PLUS** para que sólo responda al teléfono en un horario determinado. De esta forma la línea telefónica puede compartirse con otros usuarios.

6. Guía de utilización

En éste último apartado, se tratará de explicar brevemente como se utiliza el sistema.

No se requiere ninguna experiencia previa para emplear el sistema, únicamente se debe atender a los menús y elegir las opciones adecuadas a lo que se desea realizar.

La sintaxis del comando para ejecutar el programa **PLUS** es:

PLUS [EPSON] [HOT] [SIN]

El programa está configurado para utilizar la impresora **ENTEIA 180**. Si se tiene conectada una impresora compatible con **EPSON** se debe teclear el argumento opcional **EPSON**.

El argumento **HOT** permite arrancar el programa **PLUS** con la última información que tenía la red.

El argumento **SIN** permite hacer pruebas de la red inhibiendo la verificación del *checksum*.

Como se observa en el Diagrama General de Pantallas (Fig. II.5), el programa comienza con la pantalla **PRECIP** desde donde se puede pasar a las demás pantallas.

Las opciones que se tienen desde **PRECIP** son:

F1 RELOJ	sirve para cambiar la fecha y la hora del sistema
F2 ARCHIVO	permite acceder a la pantalla archivo, desde donde se puede consultar el archivo de los mensajes recibidos
F3 REPORTE	para pasar a la pantalla de generación de reportes y desde donde se puede pasar a la actualización de las estaciones
F4 PRECIP<=>	con esta tecla se conmuta entre las dos pantallas de PRECIP , en cada una de ellas se presentan hasta treinta estaciones a la vez
F5 MONITOR	para pasar a la pantalla de MONITOR desde donde se puede observar el contenido de los mensajes que están llegando
F6 MM<=>EVE	cambia la presentación de los milímetros de lluvia a número de eventos y viceversa

F7 MAPA

para pasar a la presentación gráfica de la red

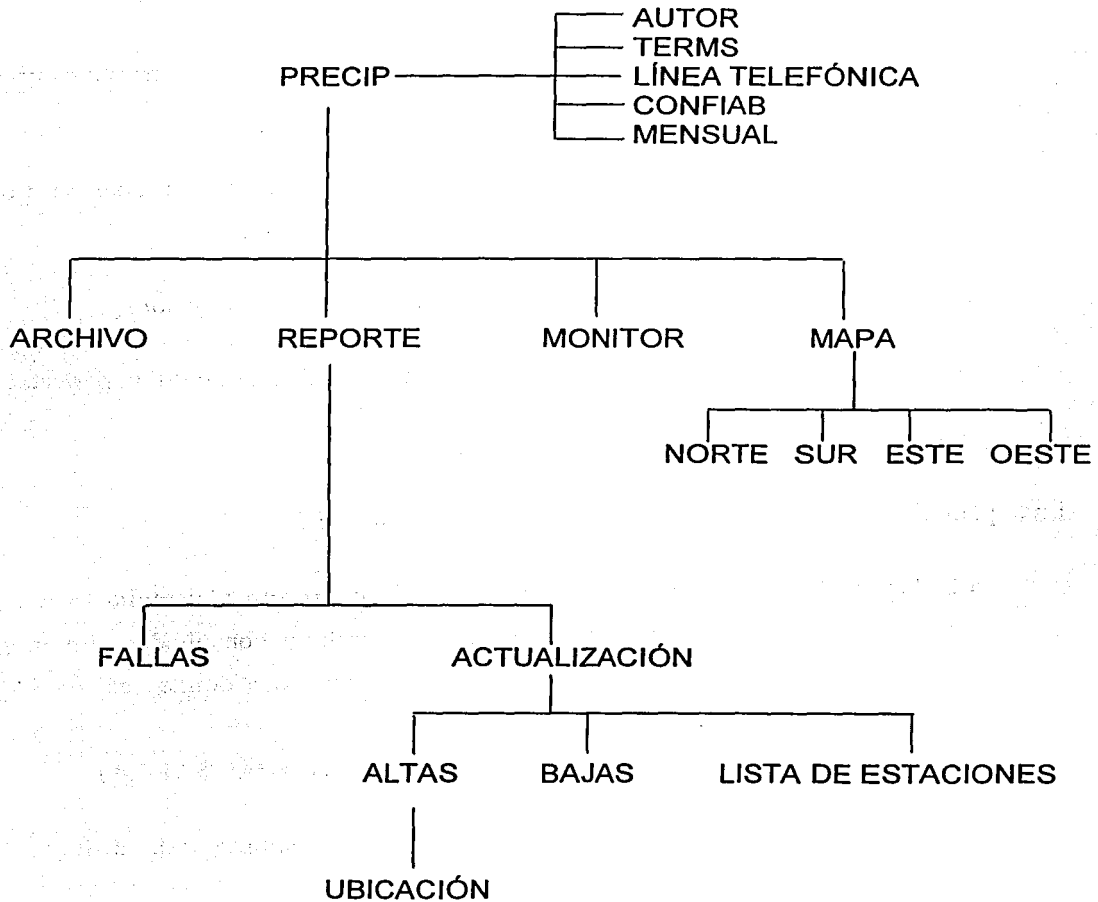


Fig. II.5 Diagrama general de pantalla

Al oprimir la tecla **Alt** aparecen además las opciones siguientes

- Alt-F1 AUTOR** despliega la información del autor del programa y al mismo tiempo reinicia el funcionamiento del MODEM
- Alt-F2 TERMS** presenta el estado de la conexión de las terminales
- Alt-F3 LÍNEA TEL** presenta el estado de la línea telefónica y permite cambiar su modo de funcionamiento
- Alt-F4 CURSOR** habilita un cursor en la pantalla con el cual se pueden configurar estaciones en modo prueba
- Alt-F5 CONFIAB** reporte de confiabilidad de la red por día y hora
- Alt-F6 MENSUAL** reporte mensual de acumulados diarios de lluvia por estación
- Alt-F10 FIN** para salir del programa

En la pantalla **ARCHIVO** se tienen las opciones siguientes:

- F1 IMP<=>PAN** permite conmutar entre la impresora y pantalla es decir en donde será desplegado el archivo consultado. En la parte inferior derecha aparece el destino a donde será enviada la impresión
(**DEST->IMPRESORA** o **DEST->PANTALLA**).
- F2 HOY** para consultar el archivo que corresponde al día de hoy
- F3 AYER** para consultar el archivo del día anterior
- F4 OTRO DÍA** para consultar el archivo de un día cualquiera. En este caso el programa preguntará la fecha que se desea consultar

En la pantalla de actualización de estaciones (**ACTUALIZACIÓN**) se tienen cuatro opciones:

F1 Alta de Estaciones: permite dar de alta una estación o cambiar el nombre y la ubicación de una ya existente. Para ello se presenta una pequeña ventana en donde se pregunta el número de la estación. Si la estación no existe se pregunta el nombre de la estación, si ya existe se presenta el nombre de la estación, el cual puede ser cambiado. Una vez realizado esto, se pasa a la pantalla de **UBICACIÓN** en donde se presenta por medio de un asterisco la estación que estamos actualizando. Este asterisco se puede desplazar por medio de las flechas a la posición deseada. Cuando el asterisco está en el lugar requerido, se oprime la tecla *enter* y con esto queda dada de alta. Después se pregunta si se desean dar más estaciones de alta. En caso afirmativo se repite el mismo proceso y en caso negativo se regresa al menú de actualización

F2 Baja de Estaciones: se presenta una ventana en donde se pregunta el número de estación que se desea borrar. Una vez que se ha dado el número de la estación, se despliega el nombre de ésta y se pregunta si se desea borrar. Si responde que si, la borra y pregunta si se desea borrar otra estación. Si ya no se desea seguir borrando se regresa al menú de actualización

F3 Lista de Estaciones: se despliegan en una pequeña ventana las estaciones actuales del sistema. Las estaciones se presentan por pantallas al oprimir cualquier tecla. Al terminar con la última pantalla se regresa al menú de actualización

F10 FIN se regresa a la pantalla **REPORTE**

En la pantalla **MONITOR** se presentan 60 ventanas en donde se observan los eventos recibidos en cada estación. En esta pantalla solamente se tiene la tecla **F10** que sirve para regresar a la pantalla **PRECIP**.

En la pantalla **MAPA** se presenta el mapa del Distrito Federal con las estaciones representadas por puntos que cambian de color conforme al valor de la lluvia registrada. Las opciones que se tienen son:

NORTE	para presentar en forma ampliada la zona norte del Distrito Federal
SUR	para la zona sur
ESTE	para la zona este
OESTE	para la zona oeste
F10 FIN	para regresar a la pantalla PRECIP

En cada una de las cuatro zonas en que se dividió el Distrito Federal se presentan las estaciones representadas por un punto, el número de estación y el acumulado en milímetros de lluvia.

De cada una de estas pantallas se puede pasar a las otras tres (por ejemplo de la pantalla **NORTE** se puede pasar a las pantallas **SUR**, **ESTE** y **OESTE** ¿ y con la tecla **F10 FIN** se regresa a la pantalla **MAPA**.

En la pantalla **LÍNEA TELEFÓNICA** se presenta una ventana que muestra el estado del modo de funcionamiento del **MODEM** que puede ser **AUTOANSWER** o **NO ANSWER** es decir si se responden o no las llamadas telefónicas. También se muestra el modo programado que puede ser **AUTOANSWER** o **NO ANSWER**. Si es **AUTOANSWER** se mostrará el horario en que serán contestadas las llamadas telefónicas.

En la parte baja de la ventana aparece un menú en que se pueden elegir las opciones desplazando la parte iluminada del menú con las flechas arriba y abajo. Para seleccionar la opción iluminada se oprime la tecla *enter*.

En el modo programado **AUTOANSWVER** se puede cambiar el horario o el modo. En el modo **NO ANSWER** sólo se puede cambiar el modo en cuyo caso será preguntada la hora de inicio y la hora de fin.

Para regresar a **PRECIP** se elige la opción **TERMINAR** o bien oprimiendo la tecla **Esc**.

En **CONFIAB** se genera un reporte de la confiabilidad de la red durante cada hora de un día. Se tiene opción de enviar el reporte a pantalla o impresora así como la elección del día del cual se obtendrá el reporte.

En **MENSUAL** se obtiene un reporte de los milímetros de lluvia registrados por cada estación en cada día del mes. Se tiene la opción de enviar el reporte a pantalla o a impresora y se pregunta también la fecha del mes que se quiere obtener. Así se emitirá un reporte desde el 1 de ese mes hasta la fecha proporcionada.

PLUSTER

La sintaxis del comando para ejecutar el programa **PLUSTER** es:

PLUSTER [<teléfono> [B1200]] [EPSON]

El argumento teléfono (6502336) Se usa para establecer la comunicación por línea conmutada. Si se omite el teléfono la conexión se hará por línea directa. El argumento B1200 permite establecer la conexión a 1200 bauds, por default la conexión se hace a 2400 bauds. El programa está configurado para utilizar la impresora **ENTEIA 180**. Si se tiene conectada una impresora compatible con **EPSON** se debe teclear el argumento opcional **EPSON**.

La utilización de **PLUSTER** es muy similar a la de **PLUS**. Sin embargo se tienen algunas diferencias. En lugar de la función **RELOJ** de la pantalla **PRECIP** se tiene **F1 CON<=>DES** que permite conectarse o desconectarse del puesto central.

Dentro de las opciones con la tecla **Alt** se tienen:

Alt-F1 AUTOR para desplegar la información del autor del programa

Alt-F2 CONFIGURACIÓN para pedir al puesto central la configuración de la red

Alt-F3 CURSOR habilita un cursor en la pantalla que permite señalar una estación, para que cuando se solicite un reporte al puesto central sólo envíe el reporte de esa estación

Alt-F10 FIN para salir del programa

En la pantalla **REPORTE** ya no se tiene la función para dar de alta terminales pues la configuración de la red se obtiene automáticamente del puesto central al momento de ejecutar el programa o por medio de la función **Alt-F2 CONFIGURACIÓN**.

Cuando el usuario pide un reporte de lluvia, la terminal lo solicita automáticamente al puesto central, en caso de estar desconectada ésta lo busca en su propio disco.

Durante la transferencia de archivos la terminal despliega una ventana en que se indica el total de bloques que serán transmitidos (cada bloque contiene 180 caracteres), los bloques que se han recibido, los bloques repetidos y los bloques en los que se detectaron errores.

Con los datos de lluvia de las estaciones pluviográficas se generaron los archivos que se utilizarán dentro del capítulo IV de este escrito.

III. CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA DEL RADAR METEOROLÓGICO

III.1 Tipos de lluvia

La extensión superficial, la intensidad y la duración de un sistema de precipitación dependen estrechamente de los movimientos verticales del aire. En consecuencia, es corriente clasificar las precipitaciones en uno de los dos tipos siguientes, según sea el mecanismo dominante en la producción del movimiento vertical:

1. Precipitación continua, estratiforme y de gran extensión, asociada a movimientos ascendentes en gran escala, producidos ya sea por elevación frontal o topográfica.
2. Precipitación en forma de chubascos, convectiva y localizada, asociada a convección.

Esta clasificación es útil, aunque no siempre es posible establecer una clara distinción entre la precipitación estratiforme y la convectiva. La precipitación cuando es de gran extensión o generalizada es de tipo estratiforme y se observa mediante el radar o una red

pluviográfica, muestra precipitación más intensa confinada en elementos cuyo tamaño es, tan sólo, de uno a dos kilómetros, por otra parte, la precipitación de origen convectivo se puede extender sobre una gran superficie. No obstante, en general, es siempre posible describir un proceso de precipitación convectivo, con zonas locales más intensas, de tamaños variables entre 1 y 10 km, separadas una de otra, por otras áreas libres de precipitación.

Cabe destacar, que la precipitación estratiforme evoluciona con relativa lentitud, en el tiempo, mientras que otra de carácter convectivo varía rápidamente.

La lluvia estratiforme se produce en nubes tipo nimbostratus, aunque las nubes cumuliformes en periodo de disipación y las orográficas pueden contener lluvia de estructura estratiforme. La mayor parte de la nieve se origina en nimbostratus, pero los chubascos de granizo blando o ráfagas de nieve, pueden originarse en convectivas [Ref. 4].

III.1.1 Características de las tormentas convectivas

Como descubrieron Byers y Braham en 1949 [Ref. 5], las tormentas convectivas tienen circulaciones internas que determinan su tipo, duración, evolución y severidad. Las tormentas convectivas tienen corrientes ascendentes y descendentes de aire con distinta intensidad y en diferentes lugares de las tormentas.

Célula: Es una nube precipitante, con una única corriente ascendente o una única corriente descendente (no necesariamente coexistiendo), que dura tal vez media hora.

Tormenta: Es el efecto combinado de un grupo de células, con una dinámica interrelacionada, que han crecido o decaído a lo largo de la duración total de la tormenta.

Hay tres tipos de tormentas:

Tormenta unicelular u ordinaria: Tiene una sola celda de tamaño normal, con corta duración.

Tormenta multicelular: Consiste de una serie de células que pueden o no superponerse en el tiempo y que producen una configuración de precipitación que es mayor de la que es producida por células individuales.

Tormenta supercelular: Una tormenta que consiste de una sola célula de gran tamaño.

A continuación se describen cada una de estas tormentas de manera más amplia.

III.1.1.1 Tormenta unicelular u Ordinaria

La tormenta unicelular se caracteriza por tener una única corriente ascendente (*updraft*) y una única corriente descendente (*downdraft*) que ocurren en la misma área de la tormenta. El ciclo de vida de una tormenta unicelular es el siguiente:

- a) **Etapa cumulus.-** Se caracteriza por la sola presencia de la corriente ascendente que produce gran cantidad de agua líquida y cristales de hielo en las partes altas de la tormenta. No hay lluvia sobre la superficie.
- b) **Etapa madura.-** Coexisten la corriente ascendente y descendente y comienza la lluvia en la superficie. Las gotas de lluvia o partículas de hielo cuando alcanzan un cierto peso no pueden seguir siendo sostenidas por la ascendente y empiezan a caer, formando la corriente descendente, que está muy húmeda en la parte alta de la tormenta y debido a la evaporación de las gotas de lluvia al encontrarse aire más seco en la capa del aire abajo de la nube seca y fría, al llegar a la superficie, donde la corriente descendente se desparrama horizontalmente y forma un domo de aire frío y un minifrente frío llamado frente rafagoso (*gust front*), que al avanzar horizontalmente, levanta aire húmedo y caliente que se incorpora a la tormenta a través de la corriente ascendente.
- c) **Etapa de disipación.-** Sólo existe la corriente descendente. Al irse alejando el frente rafagoso de la tormenta va impidiendo que el aire húmedo y caliente se incorpore a ella, por lo que la corriente ascendente se debilita lo que indica el

principio del fin de la tormenta ya que al debilitarse la ascendente a la larga se debilitará la descendente y por tanto la tormenta se disipará. Todo esto pasa debido a que la ascendente ocurre en la misma área de la tormenta que la descendente.

III.1.1.2 Formación de tormentas unicelulares

Las condiciones necesarias para la formación de las tormentas unicelulares son:

- 1) Humedad abundante en los niveles bajos de la atmósfera
- 2) Inestabilidad de la atmósfera
- 3) Muy poca variación en la vertical de los vientos horizontales (*shear, cizallamiento*) en los primeros kilómetros de la troposfera

Debido al débil cizallamiento que caracteriza a las tormentas unicelulares, estas se pueden apreciar en el radar con poca inclinación con respecto a la vertical, lo que permite tanto a la corriente descendente como a la precipitación caer en el mismo lugar donde está situada la corriente ascendente. (Fig. III.1)

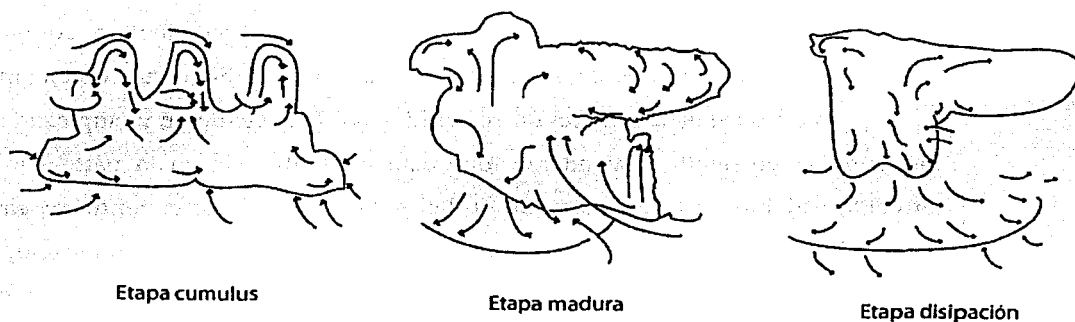


Fig. III.1 Ciclo de vida de una tormenta unicelular

III.1.1.3 Tormentas multicelulares

Este tipo de tormentas se caracteriza por tener dos o más células convectivas en distinta etapa de evolución. La combinación de las corrientes descendentes de las diferentes células

forma un enorme frente rafagoso, que en su avance provoca la formación de nuevas células convectivas. La generación de las nuevas células en la zona de convergencia a lo largo del frente rafagoso es el principal mecanismo físico que mantiene a la tormenta multicelular.

III.1.1.4 Formación de tormentas multicelulares

Las condiciones necesarias para la formación de tormentas multicelulares son:

- 1) Moderada variación vertical del viento (*cizallamiento o shear*) en los niveles bajos de la troposfera
- 2) Moderada o fuerte flotación (*bouyancy*) o inestabilidad

El cizallamiento moderado causa que la corriente ascendente se incline, minimizando la acumulación de precipitación que ocurre en las tormentas unicelulares, por lo que las corrientes ascendente y descendente pueden coexistir, una junto a la otra, lo que prolonga la duración de la tormenta (**Fig. III.2**). La flotación o inestabilidad moderada a fuerte permiten suponer la posible ocurrencia de intensas corrientes ascendentes.

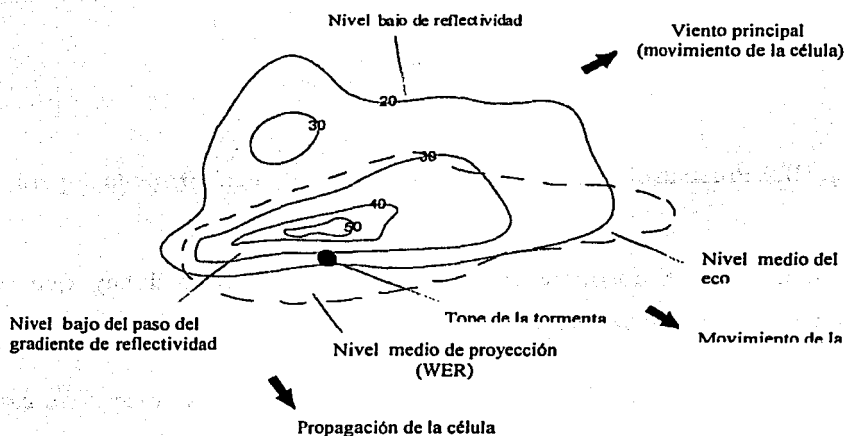


Fig. III.2 Principales características de una tormenta multicelular

III.1.1.5 Tormentas supercelulares

Esta es la más peligrosa de todos los tipos de tormentas convectivas, ya que se ha observado que es la que produce los tornados más violentos, los granizos más grandes y vientos más fuertes que los demás tipos de tormentas.

Es una tormenta que consiste de una corriente ascendente (*updraft*) giratoria que puede existir por varias horas y se mueve a la derecha (ocasionalmente a la izquierda) del viento medio. La observación de una tormenta supercelular por medio del radar muestra una célula que tiene una larga duración (Fig. III.3).

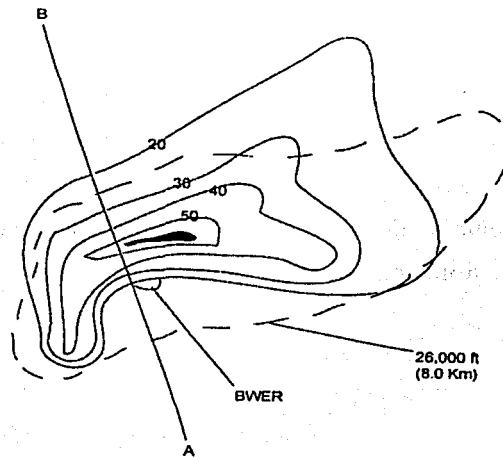


Fig. III.3 Presentación "PPI" de varios niveles de una tormenta supercelular

Entre más fuerte sea la corriente ascendente, más probabilidad hay que se produzcan fenómenos destructivos (tornados, granizo y vientos fuertes).

El ambiente donde se desarrollan las tormentas supercelulares severas se caracteriza por tener una gran flotación (*bouyancy* o una gran área positiva en el sondeo) y una gran variación vertical del viento (*shear*).

III.1.1.6 Formación de tormentas supercelulares

- 1) Regularmente se empieza a formar a partir de una tormenta multicelular. Usualmente se desarrolla en forma aislada o en una línea discontinua de tormentas donde la competencia por la humedad y el flujo de aire a niveles bajos sea mínima (se le conoce como la etapa temprana).
- 2) Una célula se empieza a formar en la parte derecha de la tormenta multicelular y se vuelve intensa.
- 3) Se desarrolla una región de eco débil (*RDED* o *BWER*, *bounded weak echo area*) y ocasionalmente en el campo de reflectividad a niveles bajos se observan ciertas formas como ganchos o espirales. El granizo incrementa su tamaño y empieza a caer inmediatamente después que la *RDED* alcanza su máxima extensión (se denomina la etapa madura o estado "*BWER*").
- 4) La *RDED* o *BWER* se empieza a llenar, la descendente a debilitar, desaparecen los ganchos o espirales en el campo de reflectividad y el tope de la tormenta empieza a descender (se le designa como la etapa de disipación o estado de "descenso *BWER*"). Es en esta etapa cuando hay mayor probabilidad de que se presenten tornados y vientos fuertes descendentes (*downbursts*).

III.2 Relación Z-R

El factor de reflectividad Z del radar es una variable que se define como la suma, sobre un volumen unitario, de la sexta potencia de los diámetros de todas las gotas que se encuentran dentro de este volumen ($Z = \sum_v D_i^6$, D_i son los diámetros de las gotas en mm). La intensidad de la lluvia en dicho volumen, suponiendo que las gotas se encuentran a la velocidad terminal de caída, también está relacionada con la intensidad de gotas de lluvia y su distribución de tamaños. Así pues, la reflectividad es una medida indirecta de la intensidad de lluvia, que se designa como R .

La ecuación que relaciona el factor de reflectividad Z con la densidad de precipitación R , es una ecuación empírica obtenida mediante correlaciones entre la potencia reflejada y la intensidad de la lluvia en relación con la distribución del tamaño de gotas. La relación $Z - R$ tiene la forma

$$Z = AR^b \quad (\text{III.1})$$

donde A y b son parámetros obtenidos a partir de la calibración hidrológica.

Existe una gran discrepancia entre los valores obtenidos para A y b por distintos autores, lo cual ha sido un obstáculo que ha impedido la estandarización del radar como un instrumento confiable y preciso para medir la intensidad de la lluvia. Sin embargo, se ha observado que disponiendo de un periodo de calibración adecuado (aproximadamente de un año, el cual abarca las cuatro temporadas de lluvia) y, a través de estudios estadísticos y comparativos entre los datos obtenidos del radar y una red de pluviógrafos se pueden calcular los valores de A y b , de manera que la relación $Z - R$ se ajuste adecuadamente a determinadas condiciones meteorológicas de la zona. Con la relación $Z - R$ así obtenida se calibra el radar de manera que la información obtenida en su área de influencia sea más oportuna que la de una red pluviográfica que sea económicamente factible de instalar para cubrir la misma zona.

De las múltiples relaciones obtenidas para $Z - R$, la más utilizada es la llamada relación de Marshall-Palmer [Ref. 2], que establece que:

$$Z = 200R^{1.6} \quad (\text{III.2})$$

donde Z está en mm^6/m^3 y R en mm/h .

Esta relación se aplica para una gran cantidad de tipos de lluvia y proporciona resultados aceptables cuando se usa en la cuantificación de lluvia producida por nubes estratiformes.

La relación más conocida en la literatura para diferentes tipos de lluvias estratiforme está dada por

$$Z = 31R^{1.71} \quad (\text{III.3})$$

donde Z está en mm^6/m^3 y R en mm/h .

Esta ecuación fue propuesta por Blanchard [Ref. 6], para lluvias orográficas, en el año de 1953.

Para lluvias producidas por nubes cumuliformes se recomienda usar

$$Z = 486R^{1.37} \quad (\text{III.4})$$

donde Z está en mm^6/m^3 y R en mm/h .

La cual fue propuesta por Jones en el año de 1956 [Ref. 6].

Las discrepancias entre la intensidad instantánea de la lluvia medida en instrumentos de tierra en un punto (pluviógrafo) y la obtenida por medio del radar haciendo uso de la relación $Z - R$, por lo general, resultan grandes debido a los factores siguientes:

- Los pluviógrafos registran la intensidad de la lluvia en la superficie terrestre, en cambio el radar obtiene la información de un volumen, que depende de las dimensiones del pulso transmitido y a una altura considerable sobre la superficie terrestre
- Retardo entre la observación del radar y la correspondiente al mismo volumen en el pluviógrafo
- Variación de la distribución del tamaño de las gotas
- Presencia de vientos verticales fuertes
- Frecuencia de las observaciones
- Cambio en los parámetros de funcionamiento del radar
- Propagación anómala del haz del radar
- Evaporación o incremento de la precipitación por debajo del haz del radar
- Atenuación

- Errores en la calibración del radar

Adicionalmente, las constantes A y b de la relación $Z - R$ dependen de las condiciones climáticas locales del sitio donde esté situado el radar y del tipo de precipitación que se pretende medir. Todo lo anteriormente mencionado ha impedido la adopción de una relación $Z - R$ universal y también la de una relación $Z - R$ fija para cada estación, esto es ocasionado por su dependencia de factores muy difíciles de cuantificar determinísticamente.

Todos los inconvenientes mencionados, junto con la disponibilidad de equipos de computación digital de costo reducido y capacidad adecuada, han propiciado el desarrollo de métodos de cuantificación de la lluvia en los cuales no existe una fuerte dependencia en una relación específica $Z - R$. Esto se ha conseguido programando una computadora para que controle el equipo de radar, reciba y almacene la información de los ecos, interroge a uno o varios pluviógrafos y calcule, con base en estos datos e información adicional acerca del estado de calibración del radar, las láminas de lluvia en intervalos de tiempo especificados o la intensidad de la lluvia en toda el área cubierta por el radar.

Para validar los datos estimados por el radar es necesario realizar una calibración hidrológica para lo cual se requiere comprender la ecuación del radar y con ello poder entender el proceso de análisis.

Para obtener esta ecuación se considerará primero un blanco aislado.

III.2.1 Ecuación del radar para blancos puntuales

El principio de funcionamiento del radar meteorológico consiste en emitir a través de una antena un pulso de energía electromagnética de duración τ del orden de unos cuantos microsegundos (μs), con ondas cuya longitud λ es del orden de centímetros ya que los blancos que se desean detectar son gotas de agua (Fig. III.4). La energía se concentra en un haz que toma una forma cónica por efecto de la difracción en cuyo interior la energía no se

distribuye de forma uniforme sino en forma de lóbulo con un patrón Gaussiano (Fig. III.5); debido a que no es posible confinar toda la energía en dicho cono, parte de ésta escapa fuera de él. Como resultado, la energía emitida se distribuye en forma de un lóbulo central, el cual contiene la mayor parte de la energía y una serie de lóbulos secundarios de menor energía llamados “lóbulos laterales” (Fig. III.5).

Cuando la energía radiada por el radar es interceptada por un blanco, la energía se dispersa en todas direcciones (Fig. I.1), de tal manera que una fracción es devuelta en dirección del radar y captada por el receptor. La distancia al blanco se obtiene registrando el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción de la señal de retorno sabiendo que la energía viaja a la velocidad de la luz (Fig. I.1). Es decir, si el tiempo de viaje entre la señal de salida y la de recepción es t , entonces el tiempo de viaje de la señal cuando sale hasta que choca con el blanco meteorológico es $t/2$ ya que le toma otro $t/2$ en regresar. Si la señal viaja a la velocidad de la luz c y si la distancia d entre el radar y el blanco está en función del tiempo y la velocidad c , entonces la distancia d es igual a

$$d = \frac{ct}{2} \quad (\text{III.5})$$

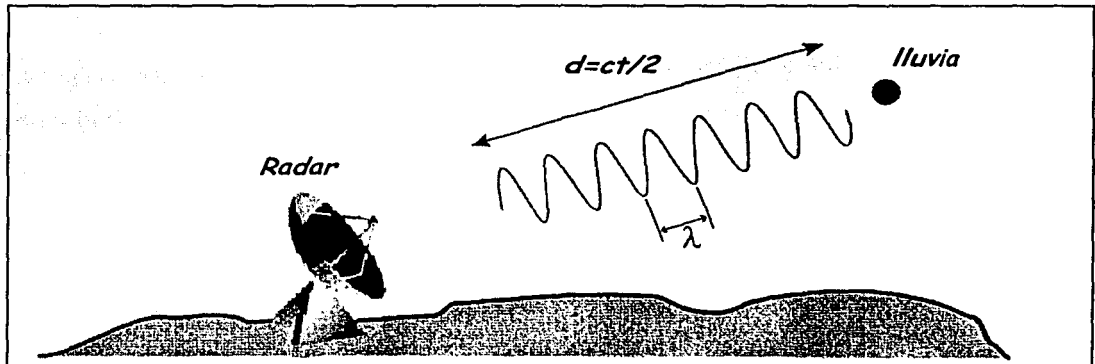


Fig. III.4 Emisión de energía del radar

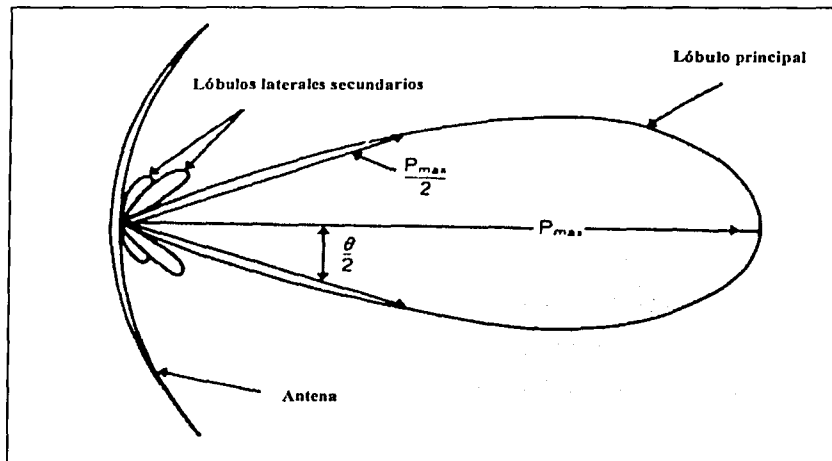


Fig. III.5 Forma de la distribución de energía del radar

Para desarrollar la ecuación del radar es conveniente considerar una antena isotrópica que irradia la energía uniformemente en todas direcciones con una potencia P_t . Esta potencia transmitida se distribuye, alejándose del radar a la velocidad de la luz, formando una esfera de energía. La superficie S de la esfera a una distancia r está dada por

$$A_{esfera} = 4\pi r^2 \quad (III.6)$$

donde r es el radio de la esfera con centro en el radar y está en centímetros. La densidad de potencia S (potencia por unidad de área) es la potencia transmitida P_t dividida entre el área de la superficie esférica

$$S = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (III.7)$$

Cuando se emplea una antena no isotrópica, la cantidad de potencia a lo largo del eje es mayor de la que sería, a la misma distancia, si se empleara un radiador isotrópico. A esto se le llama ganancia de la antena (g) cuyas unidades son los decibelios (dBz) y es una medida del grado de concentración de la potencia en una dirección y puede expresarse en forma matemática como

$$g = \frac{\text{potencia por unidad de área a lo largo del eje del haz}}{\text{potencia isotrópica en el mismo punto}} \quad (\text{III.8})$$

La ganancia g también puede definirse como

$$g = \frac{P_t}{P_i} \quad (\text{III.9})$$

donde P_i es la potencia de la antena isotrópica y P_t es la potencia transmitida.

La densidad de potencia transmitida por un radiador direccional (no isotrópico) es entonces igual a

$$S' = Sg = g \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (\text{III.10})$$

La potencia P_σ interceptada por el blanco esta dada por

$$P_\sigma = gSA_\sigma \quad (\text{III.11})$$

donde A_σ es el área de la sección transversal del blanco.

Al incidir la energía en el blanco, éste es excitado e irradia la energía interceptada en todas direcciones, por tanto, la densidad de potencia S'' que irradia el blanco es

$$S'' = \frac{P_\sigma}{4\pi r^2} \quad (\text{III.12})$$

donde r que era el radio de la esfera con centro en el radar, ahora es la distancia de la esfera con centro en el blanco y cuyas unidades son centímetros.

Entonces la energía de retorno P_r detectada por el radar es

$$P_r = S'' A_e \quad (\text{III.13})$$

donde A_e es el área efectiva de la antena receptora y r (ver ecs. III.7 y III.12) es la distancia al centro de la antena y el blanco.

Sustituyendo la ec. III.12 en la ec. III.13

$$P_r = \frac{P_\sigma}{4\pi r^2} A_e \quad (\text{III.14})$$

Sustituyendo la ec. III.11 en la ec. III.14

$$P_r = \frac{gSA_\sigma}{4\pi r^2} A_e \quad (\text{III.15})$$

Sustituyendo la ec. III.7 en la ec. III.15

$$P_r = \frac{P_t g A_\sigma A_e}{(4\pi)^2 r^4} \quad (\text{III.16})$$

En esta última ecuación, el área efectiva de la antena A_e y la del blanco A_σ no son de hecho las reales, por lo siguiente: A_e , se relaciona con el área física de apertura de la antena por medio del factor de eficiencia ρ , el cual cuantifica las pérdidas producidas por la resistencia a la señal de la antena, por la intercepción del dispositivo de alimentación y por las deficiencias en la iluminación de la antena de tal manera que $A_e = \rho A_\rho$ donde A_ρ es el área física de la sección transversal de la antena y ρ es la eficiencia de la antena cuyo valor ($\rho \leq 1.0$) depende de la eficiencia en la alimentación y en la iluminación de la antena.

La teoría de la antena define la ganancia de la antena en función de su área efectiva como

$$g = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (\text{III.17})$$

donde λ es la longitud de onda.

De esta ecuación despejando el área efectiva A_e se tiene

$$A_e = \frac{g\lambda^2}{4\pi} \quad (\text{III.18})$$

Sustituyendo la ec. III.18 en la ec. III.16

$$P_r = \frac{P_t g \lambda^2 A_\sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (\text{III.19})$$

$$P_r = \frac{P_\sigma}{4\pi r^2} A_e \quad (\text{III.14})$$

Sustituyendo la ec. III.11 en la ec. III.14

$$P_r = \frac{g S A_\sigma}{4\pi r^2} A_e \quad (\text{III.15})$$

Sustituyendo la ec. III.7 en la ec. III.15

$$P_r = \frac{P_t g A_\sigma A_e}{(4\pi)^2 r^4} \quad (\text{III.16})$$

En esta última ecuación, el área efectiva de la antena A_e y la del blanco A_σ no son de hecho las reales, por lo siguiente: A_e , se relaciona con el área física de apertura de la antena por medio del factor de eficiencia ρ , el cual cuantifica las pérdidas producidas por la resistencia a la señal de la antena, por la interceptación del dispositivo de alimentación y por las deficiencias en la iluminación de la antena de tal manera que $A_e = \rho A_p$ donde A_p es el área física de la sección transversal de la antena y ρ es la eficiencia de la antena cuyo valor ($\rho \leq 1.0$) depende de la eficiencia en la alimentación y en la iluminación de la antena.

La teoría de la antena define la ganancia de la antena en función de su área efectiva como

$$g = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (\text{III.17})$$

donde λ es la longitud de onda.

De esta ecuación despejando el área efectiva A_e se tiene

$$A_e = \frac{g \lambda^2}{4\pi} \quad (\text{III.18})$$

Sustituyendo la ec. III.18 en la ec. III.16

$$P_r = \frac{P_t g \lambda^2 A_\sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (\text{III.19})$$

En el caso de A_σ se acostumbra sustituirla con un nuevo parámetro σ , que es llamado el área de la sección transversal retrodispersada del blanco, por lo que la ec. III.19, finalmente queda expresada

$$P_r = \frac{P_t g \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (\text{III.20})$$

En esta ecuación el valor de σ es función del tamaño, forma y tipo de material y de la longitud de onda del radar y todas ellas se relacionan por medio de la ecuación obtenida por Rayleigh en 1870 [Ref. 7]

$$\sigma = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4} \quad (\text{III.21})$$

donde

- D diámetro de la gota, en centímetros
- $|K|^2$ parámetro relacionado con el índice de refracción de la atmósfera
(ver como referencia página 63 de este escrito)
- λ longitud de onda, en centímetros.

La ec. III.21 es válida sólo cuando los diámetros de gotas son menores al ancho de la longitud de onda λ del radar.

III.2.2 Ecuación del radar para blancos dispersos

Cuando un radar dirige su señal hacia un punto, dentro del volumen de muestreo tomado por él generalmente se encuentra más de una gota, por tanto, la energía que retorna al radar viene de todos los blancos individuales iluminados por el radar.

El área total de la sección transversal retrodispersada, puede expresarse matemáticamente como la suma de todas las áreas transversales retrodispersadas

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (\text{III.22})$$

donde la suma se lleva a cabo sobre todas las n partículas dentro del volumen de muestreo. Este volumen de muestreo tomado en el espacio por el radar esta dado por

$$V_m = \pi \frac{r\theta}{2} \frac{r\phi}{2} \frac{h}{2} = \frac{\pi h r^2 \theta \phi}{8} \quad (\text{III.23})$$

para antenas parabólicas circulares $\theta = \phi$, entonces la ec. III.23 queda como

$$V_m = \frac{\pi h r^2 \theta^2}{8} \quad (\text{III.24})$$

$$h = c\tau \quad (\text{III.25})$$

θ y ϕ son el ancho vertical y horizontal del haz, respectivamente; r es la distancia del volumen de muestreo desde la posición del radar; h es la longitud del pulso; c es igual a la velocidad de la luz; τ es la duración del pulso. Se emplea el término $\frac{h}{2}$ que sólo interesa la señal de regreso al radar [Ref. 8].

Para conocer entonces el área transversal retrodispersada total σ_t , dentro de un volumen de muestreo, se determina el área transversal retrodispersada de un volumen unitario σ_i , y se multiplica por el volumen de muestreo, lo cual se escribe como

$$\sigma_t = V_m \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (\text{III.26})$$

donde $\sum_{i=1}^n \sigma_i$ es la suma de las área transversales retrodispersadas de las gotas contenidas dentro de un volumen de muestreo.

Probert-Jones (1962) [Ref. 8], demostraron que la distribución de la energía del radar más que seguir una forma cónica tenía un patrón Gaussiano (Fig. I.5) aplicando una corrección a la ec. III.25

$$\nabla_m = \frac{1}{2 \ln 2} \frac{\pi h r^2 \theta^2}{8} = \frac{\pi r^2 \theta^2 h}{16 \ln 2} \quad (\text{III.27})$$

donde el factor de $2 \ln 2$ toma en cuenta la forma real del lóbulo principal del haz del radar.

Sustituyendo la ec. III.26 en la ec. III.25

$$\sigma_i = \frac{\pi r^2 \theta^2 h}{16 \ln 2} \sum \sigma_i \quad (\text{III.28})$$

Por otra parte, la ec. III.20 se obtuvo para un blanco aislado; si se toma en cuenta todos los blancos dentro de un volumen de muestreo, esta ec. se convierte entonces en

$$P_r = \frac{P_t g^2 \lambda^2 \sigma_i}{(4\pi)^3 r^4} \quad (\text{III.29})$$

Sustituyendo la ec. III.28 en la ec. III.29

$$P_r = \left(\frac{P_t g^2 \lambda^2}{64\pi^3 r^4} \right) \left(\frac{\pi r^2 \theta^2 h}{16 \ln 2} \sum \sigma_i \right) = \frac{P_t g^2 \lambda^2 \theta^2 h \sum \sigma_i}{1024 \ln(2) \pi^2 r^2} \quad (\text{III.30})$$

Esta última ecuación anterior tiene el inconveniente de que se desconoce el valor de $\sum \sigma_i$.

Como los radares meteorológicos emplean longitudes de onda de 3, 5.6 y 10 cm, y como las gotas de agua se consideran menores a ellas, por lo tanto, sustituyendo la ec. III.21 en la ec. III.30 se obtiene

$$P_r = \frac{P_t g^2 \lambda^2 \theta^2 h}{1024 \ln(2) \pi^2 r^2} \sum \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} = \frac{\pi^3 P_t g^2 \theta^2 h |K|^2 \sum D_i^6}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} \quad (\text{III.31})$$

En la práctica es muy raro conocer diámetro de las gotas que se encuentran dentro del volumen de muestreo, por lo que se ha definido el parámetro Z como

$$Z = \sum D_i^6 \quad (\text{III.32})$$

donde Z es el factor de reflectividad en un volumen unitario, en mm^6/m^3 . Para el volumen total de muestreo se sustituye en la ec. III.31 obteniendo

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t g^2 \theta^2 h |K|^2 Z}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} \quad (\text{III.33})$$

La anterior sería la ecuación del radar considerando que no hay pérdidas de energía al viajar el haz en la atmósfera. En la realidad la señal del radar sufre pérdidas de energía (atenuación) debido a los obstáculos (nubes, lluvia, nieve, granizo, radomo, etc.) que encuentra a lo largo de su trayecto. Para considerar esta pérdida se le agrega a la ecuación del radar (ec. III.33) un el término l llamado *atenuación* [Ref. 9], cuyo valor varía entre 0 y 1 (más cercano a 1 que a 0, ya que de otro modo el radar no sería capaz de detectar ninguna señal). De acuerdo con esto la ec. III.33 entonces se escribe como

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t g^2 \theta^2 h |K|^2 l Z}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} \quad (\text{III.34})$$

En esta ecuación son conocidos todos los valores, excepto para la reflectividad Z y para el índice de refracción $|K|^2$, éste último varía según sea el material muestreado; así, por ejemplo, $|K|^2$ es igual a 0.93 para el agua y 0.197 para el hielo. Tomando en cuenta lo mencionado, por tanto, se reduce a

$$P_r = \frac{C |K|^2 Z}{r^2} \quad (\text{III.35})$$

La ec. III.35 es la del radar para blancos meteorológicos que caen dentro del volumen de muestreo de su haz y la variable C es conocida como la constante del radar y equivale a

$$C = \frac{\pi^3 P_t g^2 \theta^2 h l}{1024 \ln(2) \lambda^2} \quad (\text{III.36})$$

III.3 Estimación del factor de reflectividad con el radar meteorológico

El radar meteorológico permite medir indirectamente la intensidad de la precipitación; para ello emite un haz de pulsos de radiación electromagnética que, en el caso de interceptar gotas de agua (lluvia, nieve, granizo) en la atmósfera, será radiodifundida parcialmente en

función del tamaño de las gotas. A partir de la potencia de las ondas recibidas P_r y de las características del radar (expresadas en términos de la llamada constante del radar C), se puede estimar la reflectividad, Z (en mm^6/m^3), que caracteriza la capacidad del blanco o blancos, para devolver una parte de la energía incidente. Esta estimación se realiza utilizando una expresión simplificada de la llamada ecuación del radar, que está dada por

$$P_r = \frac{CZl^2}{d^2} \quad (\text{III.37})$$

donde d es la distancia al radar en metros y l el factor de atenuación.

Por tanto, el radar es capaz de medir el factor de reflectividad, Z , de las gotas de agua contenidas en el volumen de muestreo de su haz. Dicho factor de reflectividad es una propiedad de la lluvia que se puede relacionar con otras de sus propiedades, como es el caso, por ejemplo, el contenido de agua líquida por unidad de volumen de aire (W), o la intensidad de la lluvia (R). Así, estudiando las características de la precipitación se puede llegar a establecer una relación $Z - R$ entre la reflectividad (que se mide) e intensidad (lo que interesa estimar), en función de la distribución de tamaños de las gotas (relación usualmente llamada granulométrica).

No hay que olvidar que esa función permite relacionar esas propiedades de la lluvia teniendo en cuenta únicamente la granulometría de la lluvia para el volumen de atmósfera muestreado.

III.4 Ecuación de calibración

El uso hidrológico del radar meteorológico ofrece posibilidades muy interesantes para el avance en el conocimiento de la naturaleza de la lluvia y su cuantificación. La medida proporcionada por el radar permite obtener en tiempo real de forma centralizada una especie de radiografía del campo de lluvia, con una buena definición de su alta variabilidad espacial y temporal.

No obstante, la estimación cuantitativa de la lluvia por medio del radar requiere de un largo y costoso proceso de confiabilidad y calibración de esta potente herramienta que, de hecho, tan sólo proporciona una estimación indirecta de la intensidad de la lluvia. Así, para poder decodificar los niveles de reflectividad reflejados en esa *radiografía* del campo de lluvia y convertirlos en una cuantificación de la intensidad de lluvia, se necesita primero depurar y filtrar los errores inherentes a la propia medida del radar, para luego pasar a ajustar una conversión de la reflectividad (Z , lo que en verdad mide el radar) en intensidad de lluvia (R , lo que interesa en medir).

Ese proceso se puede abordar de múltiples maneras, pero hoy en día parece claro que para llevarlo a cabo es preciso tratar de depurar separadamente cada una de las fuentes de posibles errores antes de proceder a la comparación radar - pluviógrafos. Para hacerlo se debe hacer estudios de los ecos fijos y sectores bloqueados, del calibrado electrónico del radar y de las correcciones a introducir con la distancia. Una vez analizados estos aspectos se podrá estar seguros de que se ha obtenido la mejor imagen del radar posible y con ello realizar la transformación en intensidades a partir de la mejor relación $Z - R$ posible.

La reflectividad vista por el radar Z será una estimación de la que realmente caracteriza al volumen de la atmósfera muestreado (aproximadamente $2 \times 2 \times 2 \text{ km}^3$) y tendrá incorporados los posibles problemas de detección debidas al propio radar, a los ecos no meteorológicos detectados, a los inducidos por la distancia, etc).

La intensidad de lluvia media por el pluviógrafo R , será la correspondiente al volumen del agua que entre a su área de recepción (superficie de unos 200 cm^2) en el tiempo estipulado de muestreo, y no la R correspondiente a la de las gotas presentes en el volumen de muestreo del radar, generalmente a una altura del orden de 1 km por encima del pluviógrafo. Además R estará afectada por los posibles errores debidos a la calibración del pluviógrafo o inducidos por el viento o la turbulencia creada sobre el aparato.

El resultado de la comparación entre Z y R tendrá en cuenta pues, no sólo los factores que dependen puramente de la distribución de tamaños de las gotas de lluvia, sino también los

otros factores que son fuente de fluctuaciones en la comparación. El resultado final de esa comparación permitirá evaluar la bondad de la estimación del radar y proponer un ajuste para la corrección de los posibles defectos sistemáticos.

Sin embargo, no hay que olvidar que las aplicaciones hidrológicas no requieren estimaciones puntuales del campo de lluvia, sino de sus estimaciones sobre áreas relativamente importantes en comparación con los 200 cm² muestreados. Así, una red de pluviógrafos, por densa que sea, no tendrá sentido hidrológico en sí misma más que para ser la base de una interpolación espacial del campo de lluvia en la zona de interés. Y ahí los errores cometidos por cualquiera de los métodos de interpolación espacial, por más sofisticados que sean, no permitirá mantener la confianza que la estimación puntual sí la tenía.

En consecuencia, el proceso de ajuste tendrá que tomar en cuenta a los pluviógrafos (que actualmente es el mejor medio de medir la lluvia sobre un punto), pero sin olvidar que el radar es hoy en día el único instrumento capaz de reproducir los patrones espaciales de la lluvia y de llevar a una estimación de la lluvia sobre áreas del orden de 1 o 2 km² de extensión.

El objetivo principal de este capítulo es describir el método de calibración hidrológica del radar meteorológico, que se basa en la comparación de las precipitaciones medidas por el radar con las precipitaciones medidas por pluviómetros. El método se aplica a las precipitaciones de tipo convectivo y a las precipitaciones de tipo estratiforme. El método se basa en la comparación de las precipitaciones medidas por el radar con las precipitaciones medidas por pluviómetros. El método se aplica a las precipitaciones de tipo convectivo y a las precipitaciones de tipo estratiforme.

El método de calibración hidrológica del radar meteorológico se basa en la comparación de las precipitaciones medidas por el radar con las precipitaciones medidas por pluviómetros. El método se aplica a las precipitaciones de tipo convectivo y a las precipitaciones de tipo estratiforme. El método se basa en la comparación de las precipitaciones medidas por el radar con las precipitaciones medidas por pluviómetros.

IV. SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DE LAS FECHAS DE ANÁLISIS

IV.1 Selección de las tormentas para su análisis

Los datos de lluvia medidos por la red estaciones pluviográficas operadas por la **DGCOH**, fueron proporcionados para realizar un estudio que se elaboró dentro del Instituto de Ingeniería [Ref. 10], para esta dependencia, las cuales fueron proporcionadas en dos tipos de archivos, unos con extensión .DBF (datos de los años 1995 - 1997) y el segundo con extensión .PLU (datos del año 1998).

Para los archivos con extensión .DBF el Instituto tomó de cada una de las estaciones que conforman a la red los 20 valores más grandes de lluvias en 24 h para el periodo de registro proporcionado.

Para determinar la frecuencia de los eventos por día en las estaciones pluviográficas, se elaboraron tablas mensuales donde se indicaban los días del año en que se habían

presentado los 20 valores máximos de precipitación, ellas se hicieron para 49 estaciones de las 63 que integran la red, pues era la única información que poseían los archivos .DBF y se muestran en las **Tablas IV.1**.

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1995

ESTACIÓN 1			ESTACIÓN 2			ESTACIÓN 3			ESTACIÓN 4		
MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)
1	26	7.11	5	24	41.14	5	25	37.91	1	31	16.00
1	30	8.89	5	27	21.08	5	28	14.98	5	25	39.11
2	9	8.38	6	21	19.30	6	10	35.56	5	28	17.52
3	25	21.84	6	29	10.92	6	19	17.77	6	13	17.01
3	28	19.95	6	30	19.55	6	21	19.30	6	19	19.55
6	21	7.56	7	1	15.24	6	29	19.81	6	29	47.49
6	30	21.59	7	11	26.41	6	30	35.05	6	30	29.71
7	1	19.81	7	14	19.55	7	11	17.77	7	12	12.70
7	4	11.68	7	25	21.58	7	12	20.82	7	15	18.28
7	11	9.65	8	8	11.43	7	30	30.71	7	30	32.51
7	18	9.65	8	9	27.94	8	9	29.92	8	5	16.00
8	5	9.14	8	11	10.66	8	11	15.74	8	8	25.14
8	9	19.55	8	15	29.21	8	16	16.25	8	9	33.30
8	11	7.36	8	16	29.21	8	22	19.05	8	16	14.98
8	16	8.38	8	22	61.21	8	26	24.89	8	22	13.46
8	17	9.9	8	26	19.55	9	26	27.17	9	27	19.05
8	22	13.71	11	17	21.33	11	1	25.40	10	27	23.87
8	23	16.51	11	18	19.81	11	17	15.49	11	1	43.94
12	26	6.6	12	26	10.92	11	18	17.01	12	26	13.20
12	30	17.78	12	30	22.60	12	30	19.81	12	30	23.36

ESTACIÓN 5			ESTACIÓN 6			ESTACIÓN 7			ESTACIÓN 8		
MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)
1	30	14.73	1	21	18.54	3	29	11.68	3	1	14.22
3	29	43.94	3	30	20.06	3	30	18.79	5	25	62.23
5	25	35.05	5	25	17.08	5	4	18.54	5	27	11.43
5	28	13.71	6	21	18.54	5	25	83.82	6	10	23.11
6	13	23.36	6	30	20.06	6	21	28.19	6	21	18.79
6	19	25.65	7	4	21.33	6	29	11.68	6	29	11.93
6	29	43.94	7	5	12.69	6	30	18.79	6	30	29.71
7	1	22.09	7	11	32.51	7	4	35.56	7	1	16.50
7	11	23.36	7	14	13.46	7	11	34.54	7	11	29.71
7	12	18.54	7	15	21.33	7	14	25.65	7	12	16.51
7	13	10.41	7	25	20.06	7	17	15.74	7	14	14.98
7	30	33.33	7	30	13.20	7	30	12.19	7	30	22.60
8	6	11.68	8	5	16.76	8	5	15.49	8	5	17.01
8	9	13.46	8	8	13.71	8	9	13.20	8	22	13.74
8	11	14.73	8	9	54.35	8	17	21.08	9	2	11.17
8	16	11.71	8	16	20.57	8	22	40.13	10	24	14.73
8	26	19.55	8	17	16.00	11	17	17.77	11	17	16.25
9	26	12.44	8	22	45.97	11	22	19.81	11	18	12.19
11	17	11.93	8	26	13.46	12	26	13.20	12	26	13.20
12	30	25.14	12	30	19.81	12	30	22.35	12	30	21.84

ESTACIÓN 9			ESTACIÓN 10			ESTACIÓN 11			ESTACIÓN 12		
MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)	MES	DIA	(mm)
5	25	29.21	5	1	12.70	1	30	14.22	1	30	14.22
5	28	19.95	5	25	39.62	5	25	27.17	5	4	32.00
6	21	27.93	6	10	23.11	6	19	16.92	5	25	42.16
6	30	32.76	6	19	14.98	6	29	19.30	6	13	24.89
7	3	22.35	6	29	19.30	7	1	20.82	6	2	23.11
7	4	58.16	7	11	16.51	7	2	10.92	7	7	11.93
7	11	24.13	7	12	18.54	7	7	14.73	7	11	24.89
7	12	24.89	7	15	17.27	7	11	26.92	7	12	16.25
7	15	21.33	7	25	20.32	7	12	11.43	8	4	21.84
7	25	30.73	7	30	30.48	7	15	11.42	8	5	26.92
7	30	30.98	8	5	37.84	7	30	17.27	8	6	14.98
8	5	23.87	8	14	36.57	8	5	23.11	8	10	20.57
8	6	19.05	8	22	13.46	8	10	25.14	8	22	13.97
8	8	39.36	8	26	16.51	8	14	28.95	8	26	13.46
8	21	24.89	9	2	14.22	8	26	22.86	9	2	22.09
8	22	43.94	9	22	12.44	9	2	14.47	9	19	16.51
8	25	21.84	9	26	24.89	11	19	15.49	9	22	18.79
9	12	21.33	10	24	14.47	12	25	17.78	10	19	11.68
9	26	21.84	12	26	14.47	12	26	14.47	12	26	18.03
10	21	18.54	12	30	26.41	12	30	27.68	12	30	30.73

Tablas IV.1 20 lluvias máximas en 24 h por estación del año de 1995

ESTACIÓN 13			ESTACIÓN 14			ESTACIÓN 15			ESTACIÓN 16		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	30	12.93	1	30	14.73	5	25	23.36	5	25	24.64
5	4	16.23	5	4	12.95	6	13	18.03	5	30	22.86
5	25	23.11	5	10	12.44	6	29	7.11	6	20	23.11
6	19	13.71	5	25	23.62	7	6	7.87	6	21	18.80
6	29	23.36	5	28	20.57	7	11	6.60	6	27	18.29
7	11	32.76	5	31	10.41	7	12	23.36	6	30	61.98
7	12	16.23	6	13	13.20	7	13	9.90	7	11	18.54
7	13	10.92	6	19	22.60	7	16	7.62	7	12	39.12
7	17	18.28	6	29	11.42	7	30	10.41	7	15	15.75
8	5	9.9	7	12	22.60	8	5	9.39	7	21	25.65
8	10	27.68	7	13	12.69	8	12	14.98	7	27	28.70
8	14	12.19	8	5	17.01	8	15	8.12	7	30	13.72
8	16	25.39	8	9	10.41	8	22	8.12	8	25	20.57
9	2	10.41	8	14	14.47	8	25	34.54	8	27	14.22
9	26	9.14	8	16	10.90	8	27	8.12	9	4	15.75
11	3	11.43	8	22	12.70	9	2	10.16	9	14	20.57
11	18	9.65	8	23	10.16	9	26	24.12	9	22	15.24
11	21	11.27	9	2	17.01	11	17	11.68	9	25	16.26
12	26	14.98	11	18	10.41	12	26	13.71	10	23	25.15
12	30	26.92	12	30	26.41	12	30	11.12	12	30	23.88

ESTACIÓN 17			ESTACIÓN 18			ESTACIÓN 19			ESTACIÓN 20		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	30	13.46	1	30	15.49	1	30	14.73	1	30	13.49
5	21	17.78	5	23	58.17	5	4	10.41	5	25	36.37
5	25	17.53	6	12	20.32	5	25	35.56	6	12	18.03
6	13	36.07	6	20	23.11	6	13	13.49	6	13	20.32
6	27	47.25	6	27	22.09	6	30	9.39	6	14	18.28
6	30	26.92	6	30	20.07	7	2	9.39	7	2	16.00
7	2	16.26	7	12	17.78	7	11	14.73	7	12	22.85
7	11	18.54	7	17	16.10	7	12	17.77	8	4	13.71
7	12	18.29	7	25	15.00	7	17	14.98	8	5	13.71
8	5	13.72	8	22	15.00	8	4	21.08	8	10	22.35
8	7	16.76	8	24	13.46	8	5	21.08	8	16	14.98
8	23	17.02	9	2	16.10	8	6	9.90	8	26	16.51
9	5	18.29	9	14	31.00	8	10	26.92	9	2	15.49
9	14	22.35	9	19	16.26	8	21	10.41	9	22	16.76
9	22	42.93	9	20	16.26	8	22	16.00	11	3	35.30
9	23	13.21	11	3	21.84	9	2	15.49	11	16	22.09
9	25	16.26	11	16	22.10	11	17	13.46	11	18	12.95
11	18	13.21	11	18	13.21	11	18	10.66	11	21	12.70
11	21	13.72	12	26	13.97	12	26	11.93	12	26	15.74
12	30	25.4	12	30	23.37	12	30	21.33	12	30	31.24

ESTACIÓN 21			ESTACIÓN 22			ESTACIÓN 23			ESTACIÓN 24			
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	
5	25	25.65	5	25	47.75	5	25	19.81	5	25	24.12	
5	30	30.47	5	30	25.90	5	30	16.23	5	31	20.57	
6	30	30.54	6	20	23.62	6	20	26.92	6	13	26.16	
7	4	18.79	6	27	33.52	6	21	19.30	6	14	16.51	
7	6	19.3	6	30	30.98	6	27	69.59	6	20	17.01	
7	12	38.35	7	1	28.95	6	27	36.83	6	1	26.67	
7	6	25	26.92	7	6	25.40	6	30	29.71	6	27	32.51
7	27	35.3	7	11	28.44	6	1	13.46	6	29	22.35	
7	28	23.62	7	12	45.21	7	4	13.46	6	30	34.28	
7	30	24.63	7	27	22.35	7	6	15.49	7	12	22.85	
8	5	18.54	7	30	27.94	7	13	17.52	8	6	16.76	
8	8	19.3	8	5	29.71	8	5	21.33	8	7	19.05	
8	25	28.7	8	7	31.73	8	16	20.32	8	22	20.31	
9	14	18.28	8	27	25.65	9	23	14.73	8	24	16.00	
9	23	36.32	9	22	26.16	9	25	16.00	9	2	21.33	
9	26	33.02	9	23	57.40	9	27	21.84	9	25	30.73	
10	25	19.04	9	25	35.81	10	19	47.49	10	25	17.52	
11	3	25.65	9	27	32.25	10	20	15.49	11	21	15.23	
11	17	23.11	11	3	26.92	11	3	22.85	12	26	14.98	
12	30	20.82	12	30	29.97	12	26	13.46	12	30	28.19	

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1995

ESTACIÓN 25			ESTACIÓN 26			ESTACIÓN 27			ESTACIÓN 28		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
5	25	30.22	5	25	16.51	1	30	14.73	1	30	14.23
5	30	33.02	5	30	34.29	5	25	23.11	5	24	24.89
6	14	23.87	6	14	20.06	6	13	17.01	6	12	35.81
6	27	67.31	6	16	18.79	6	14	27.93	6	13	14.73
6	29	24.12	6	20	14.73	6	20	24.13	6	29	20.82
6	30	39.47	6	27	13.71	6	29	15.49	8	4	8.89
7	12	42.41	6	29	12.69	6	30	26.16	8	10	10.66
7	13	19.3	6	30	13.46	7	11	17.27	8	14	15.74
8	5	23.36	7	12	23.36	7	12	16.76	8	26	32.57
8	6	36.06	7	18	12.69	7	27	15.49	8	27	9.65
8	8	23.36	7	29	14.73	8	7	17.78	9	2	16.23
8	12	32.76	8	4	15.24	8	8	37.33	9	4	9.90
8	16	27.93	8	6	37.08	8	16	14.98	9	22	18.03
8	22	30.22	8	16	35.81	8	22	20.82	9	27	10.41
9	3	21.08	9	4	12.19	9	2	27.43	10	24	12.19
9	14	19.55	9	23	14.22	9	4	17.78	11	3	19.30
9	25	28.19	10	20	13.71	11	3	23.87	11	18	9.90
10	20	31.75	10	24	20.06	11	18	15.49	11	21	12.70
10	21	26.92	10	25	20.57	12	26	16.76	12	26	15.74
12	30	27.17	11	3	23.87	12	30	31.75	12	30	27.94

ESTACIÓN 29			ESTACIÓN 30			ESTACIÓN 31			ESTACIÓN 32		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	30	13.46	1	30	20.21	1	30	20.06	1	30	18.28
6	6	13.2	3	5	12.19	6	17	21.59	3	14	9.65
6	12	12.7	6	13	10.41	6	20	24.38	6	23	13.96
6	20	14.47	6	20	16.76	6	24	11.43	6	14	10.16
6	29	14.22	6	29	34.29	6	29	38.33	6	17	22.10
7	11	20.82	7	11	17.01	7	12	15.74	6	20	11.93
7	12	17.52	7	12	12.44	8	7	8.38	6	22	9.65
7	13	15.74	7	13	9.90	8	8	12.19	6	24	18.54
7	22	10.66	8	2	10.15	8	18	15.24	6	29	15.23
7	30	13.2	8	4	9.65	8	21	8.63	7	1	19.55
8	4	12.44	8	5	10.92	8	22	8.63	7	12	19.55
8	8	17.78	8	8	16.76	8	23	14.73	7	31	18.03
8	16	29.46	8	10	14.98	9	15	8.12	8	7	11.43
8	22	16.76	8	22	20.06	9	22	12.70	8	23	23.87
8	26	13.97	9	2	10.16	10	24	9.65	9	3	9.14
8	27	15.49	9	22	13.20	10	25	10.92	9	22	24.89
9	25	12.44	11	3	14.73	10	28	8.38	10	24	16.76
11	21	10.66	11	21	15.24	11	21	9.90	11	21	10.66
12	26	10.66	12	26	13.46	12	26	13.20	12	26	12.44
12	30	29.71	12	30	30.22	12	30	33.78	12	30	27.68

ESTACIÓN 33			ESTACIÓN 34			ESTACIÓN 35			ESTACIÓN 36		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	30	20.82	5	25	38.86	1	30	16.51	5	25	20.06
5	25	21.08	6	14	56.64	5	25	16.25	5	27	30.98
6	14	14.47	6	17	14.22	6	17	17.78	6	13	23.36
6	16	12.70	6	20	28.44	6	20	16.25	6	14	37.59
6	17	36.83	6	23	15.24	6	29	15.49	6	17	25.39
6	24	12.95	6	29	19.30	7	11	30.22	6	20	52.57
6	29	10.16	6	30	15.23	8	4	20.31	6	23	16.21
7	12	18.03	7	1	15.24	8	6	29.20	6	27	20.57
7	13	8.63	8	4	16.76	8	6	16.25	6	29	26.16
7	19	16.25	8	6	14.22	8	30	17.01	7	11	55.37
8	22	56.38	8	7	15.74	8	21	18.79	7	12	25.40
8	24	19.30	8	8	13.96	8	22	21.58	8	4	19.55
8	27	19.05	9	24	23.36	8	23	16.25	8	6	42.16
9	2	8.89	9	2	28.19	9	24	16.76	8	16	17.01
9	22	31.24	9	4	15.49	9	2	17.77	9	14	33.27
10	24	19.81	9	21	25.14	9	19	27.43	9	19	38.10
10	29	8.89	11	24	13.71	11	3	36.62	9	23	22.09
11	21	11.68	11	3	14.22	11	18	13.20	11	3	26.41
12	26	11.68	12	21	15.24	12	26	15.49	12	26	16.25
12	30	32.25	12	30	27.93	12	30	36.57	12	30	34.28

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1995

ESTACIÓN 37			ESTACIÓN 38			ESTACIÓN 39			ESTACIÓN 40		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
5	25	19.04	1	30	16.51	1	30	30.73	1	30	16.00
6	14	19.05	2	3	12.70	2	9	18.54	5	25	18.54
6	16	28.19	6	13	16.25	5	23	25.40	6	13	16.76
6	20	26.92	6	14	17.78	5	25	18.54	6	14	13.71
6	22	23.62	6	20	23.62	5	28	23.62	6	23	17.01
6	27	42.41	7	12	14.47	6	14	20.82	6	30	29.71
6	29	28.19	7	28	16.25	6	22	30.98	8	2	12.95
7	6	21.08	7	31	17.37	6	27	18.54	8	5	23.62
7	12	31.75	8	6	22.35	7	8	20.82	8	6	12.95
7	13	27.94	8	9	18.86	7	11	16.50	8	9	22.86
7	14	32.76	8	11	14.47	7	12	16.50	8	18	12.70
7	31	21.08	8	12	16.00	7	13	20.82	9	2	16.00
8	6	10.07	8	16	24.13	7	29	55.11	9	22	9.39
8	6	87.88	8	17	16.00	8	6	34.29	10	25	11.68
8	16	24.12	8	22	52.83	8	14	18.54	11	3	12.44
8	27	20.06	8	24	13.97	8	16	21.08	11	18	11.93
9	2	49.02	9	25	70.86	8	18	81.78	11	21	14.47
10	24	27.68	10	24	21.84	8	21	24.63	12	25	16.00
11	3	37.39	11	3	51.81	9	27	21.08	12	26	19.05
12	30	32.00	12	30	32.76	12	30	29.21	12	30	31.73

ESTACIÓN 41			ESTACIÓN 42			ESTACIÓN 43			ESTACIÓN 44		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	30	18.54	1	30	19.30	1	30	17.78	1	30	13.20
6	13	18.79	6	13	19.04	5	25	10.92	5	25	24.63
6	27	29.46	6	16	18.28	5	28	11.17	5	27	12.44
6	29	36.37	6	17	29.46	6	14	37.59	5	28	18.79
6	30	20.82	6	29	17.52	6	16	9.65	6	21	12.95
7	11	14.22	6	30	11.17	6	17	26.67	6	29	11.93
7	12	14.73	7	4	25.14	6	19	19.04	6	30	48.23
7	13	27.68	7	11	12.70	6	20	11.43	7	1	11.93
8	6	24.63	7	12	12.95	6	21	14.47	7	4	17.27
8	8	16.51	7	13	13.97	6	22	11.17	7	11	12.70
8	9	15.24	7	19	13.71	6	29	12.66	7	15	9.65
8	16	32.00	8	7	23.87	7	8	8.12	7	18	18.03
8	17	14.22	8	22	44.44	8	9	23.36	8	8	35.41
8	22	14.03	8	27	11.68	8	17	9.90	8	9	15.24
9	14	18.54	9	22	29.21	8	22	35.30	8	16	29.97
9	25	25.40	10	24	24.63	9	2	23.11	8	17	24.12
11	3	13.71	11	21	12.95	9	3	16.25	8	21	25.65
12	25	13.24	12	25	10.66	11	21	18.54	9	3	30.48
12	26	13.71	12	26	17.27	12	25	15.49	9	4	18.03
12	30	36.37	12	30	36.32	12	30	36.57	12	30	12.44

ESTACIÓN 45			ESTACIÓN 46			ESTACIÓN 47			ESTACIÓN 48		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
5	25	55.88	5	25	12.69	5	25	22.35	5	25	18.03
6	29	14.98	6	10	18.54	5	28	11.43	6	21	33.52
6	30	21.84	6	21	20.82	6	11	17.27	6	30	31.24
7	4	21.59	6	30	43.94	6	19	15.23	7	4	56.64
7	11	30.73	7	4	18.54	6	21	38.60	7	7	19.05
7	14	10.66	7	11	26.67	6	29	14.73	7	11	20.57
7	15	24.89	7	14	20.57	6	30	19.30	7	12	22.35
7	18	13.71	8	8	16.25	7	12	15.24	7	16	13.71
7	25	22.85	8	14	12.70	7	15	12.19	7	25	44.19
7	30	15.49	8	17	12.95	7	30	22.09	7	30	28.93
8	5	10.66	8	21	39.87	8	9	15.49	8	5	27.17
8	8	19.30	8	24	18.54	8	11	13.20	8	6	16.51
8	9	19.30	8	25	18.79	8	16	23.62	8	8	39.11
8	22	20.82	8	26	12.19	8	17	16.33	8	22	42.41
8	26	11.93	9	2	15.49	8	22	22.09	9	23	27.68
8	27	9.90	9	12	42.16	8	24	13.20	9	26	24.12
9	2	13.46	9	22	13.46	9	26	22.35	10	20	13.71
11	18	10.16	11	25	19.55	11	1	26.92	10	21	17.01
12	26	11.43	12	22	34.79	11	17	36.57	10	24	20.57
12	30	16.25	12	30	19.81	12	30	17.01	12	30	18.54

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1995

ESTACIÓN 49		
MES	DÍA	(mm)
5	25	23.09
6	21	69.34
6	29	25.14
6	30	29.71
7	5	33.52
7	7	22.55
7	11	43.43
7	12	50.79
7	25	36.57
7	27	32.76
7	30	22.85
8	3	30.22
8	5	30.47
8	24	24.63
8	27	24.13
9	23	35.56
9	26	26.41
11	17	44.70
12	26	28.19
12	30	25.39

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1996

ESTACIÓN 1			ESTACIÓN 2			ESTACIÓN 3			ESTACIÓN 4		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
2	18	8.38	4	24	7.87	4	16	9.90	4	24	7.36
5	27	16.51	5	31	8.88	5	27	13.71	6	18	23.11
6	20	35.05	6	15	8.12	5	31	10.41	6	21	12.44
6	26	16.50	6	20	22.09	6	16	20.82	6	25	11.17
7	7	19.05	6	26	14.47	6	18	9.65	6	26	26.83
7	17	25.90	7	7	26.92	6	26	22.35	7	4	11.17
7	30	25.90	7	30	22.09	7	7	19.81	7	7	20.06
8	15	7.62	8	3	12.95	7	30	26.16	7	13	26.16
9	1	14.47	8	15	21.33	8	15	12.95	7	30	39.11
9	4	11.43	9	1	31.24	8	23	9.65	8	15	7.61
9	10	10.16	9	4	19.55	8	26	15.49	8	23	9.65
9	14	15.49	9	10	29.71	9	1	16.50	8	25	9.65
9	17	27.68	9	13	16.76	9	4	25.90	9	4	18.03
9	19	10.66	9	14	23.11	9	10	26.41	9	10	12.70
9	21	8.12	9	19	7.11	9	14	30.73	9	14	16.25
9	22	18.28	9	22	7.87	9	21	20.82	9	18	43.43
10	3	28.44	10	3	15.24	9	22	18.79	9	21	6.60
10	4	10.16	10	4	14.47	10	3	31.49	9	22	15.24
10	5	19.05	10	5	24.38	10	5	15.49	10	5	12.19
12	19	7.62	12	19	7.87	12	19	12.19	12	19	10.41

ESTACIÓN 5			ESTACIÓN 6			ESTACIÓN 7			ESTACIÓN 8		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	24	17.22	4	24	18.79	4	24	18.03	4	24	10.15
6	16	11.42	5	27	37.84	5	27	31.24	5	27	21.33
6	18	11.17	6	20	18.28	6	18	7.61	6	18	9.39
6	21	19.55	6	21	11.68	6	20	13.46	6	26	8.63
6	26	13.96	6	26	10.16	6	26	7.36	6	30	24.89
6	30	23.62	7	7	24.12	6	30	27.94	7	7	17.27
7	4	12.19	7	30	21.08	7	7	24.13	7	30	11.68
7	6	11.68	8	15	17.52	7	30	26.16	8	7	11.68
7	7	13.74	8	17	18.79	8	14	11.93	8	15	10.66
7	13	20.06	9	4	11.17	8	15	10.92	9	1	57.65
7	30	24.63	9	10	15.24	8	22	7.36	9	4	19.05
8	4	17.78	9	13	27.17	9	1	24.63	9	14	17.01
8	16	20.57	9	14	22.86	9	4	20.82	9	18	9.90
8	17	15.21	9	18	16.25	9	14	23.62	9	21	23.62
8	24	11.17	9	20	19.30	9	18	20.82	9	22	9.65
9	4	28.19	9	21	13.20	9	21	14.98	10	3	21.33
9	14	13.20	9	22	13.46	10	3	9.39	10	4	43.43
9	21	11.93	10	3	23.62	10	4	52.07	10	5	17.77
10	5	13.46	10	4	52.83	10	5	37.59	10	22	10.66
12	19	12.95	10	5	34.03	12	19	7.36	12	19	14.47

Tablas IV.1 20 lluvias máximas en 24 h por estación del año de 1996

ESTACIÓN 9			ESTACIÓN 10			ESTACIÓN 11			ESTACIÓN 12		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	23	33.81	4	23	15.49	4	23	8.63	4	23	11.43
4	24	15.49	4	24	35.05	4	24	22.35	4	24	13.46
5	24	14.73	5	27	18.54	5	27	11.68	5	27	18.79
6	1	35.60	5	29	19.05	5	31	11.93	5	31	11.68
6	16	9.90	7	7	15.24	6	21	13.20	6	4	10.41
6	20	16.76	7	13	30.98	6	30	14.98	6	26	18.03
7	4	18.28	7	22	17.01	7	2	19.81	7	2	10.16
7	7	17.52	7	30	36.82	7	13	24.89	7	7	9.39
7	23	14.47	8	7	14.22	7	30	18.54	7	13	47.49
7	27	12.19	8	15	30.47	8	4	11.43	7	30	26.92
7	30	25.14	9	1	23.87	8	15	10.66	8	15	35.55
7	31	24.38	9	4	25.14	8	16	23.62	8	16	20.82
8	2	10.41	9	14	14.98	8	17	13.46	8	24	19.81
8	15	12.95	9	17	22.09	8	24	10.66	9	4	12.95
8	25	11.43	9	18	28.19	8	28	8.89	9	12	18.79
8	27	12.95	9	21	21.59	9	4	11.17	9	17	10.92
10	2	11.43	9	22	29.97	9	21	16.25	9	18	11.17
10	3	44.44	10	3	25.39	10	3	13.20	9	19	16.76
10	5	16.25	10	4	42.67	10	5	10.41	10	23	10.16
12	30	12.92	10	5	19.81	12	19	10.41	12	19	9.39

ESTACIÓN 13			ESTACIÓN 14			ESTACIÓN 15			ESTACIÓN 16		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	23	8.12	4	23	12.19	4	23	41.65	4	23	38.35
5	30	11.17	4	24	29.71	5	27	12.44	5	23	45.21
6	4	18.79	6	4	13.96	6	14	32.76	6	1	20.31
6	15	8.12	6	17	14.73	6	15	17.01	6	14	20.82
6	21	10.66	6	30	40.63	6	17	10.41	6	16	21.59
6	30	27.43	7	6	8.63	6	19	10.16	6	17	16.25
7	13	8.12	7	30	33.78	6	26	18.54	6	18	22.35
7	21	8.38	8	4	15.24	7	4	10.41	7	4	18.03
7	30	29.97	8	5	8.12	7	7	14.22	7	7	26.41
8	4	20.57	8	16	24.63	7	17	13.97	7	17	20.57
8	5	11.68	8	23	9.65	7	30	19.55	7	20	24.38
8	23	9.14	8	24	10.66	8	14	21.08	8	13	27.68
8	24	15.74	8	28	16.25	8	15	16.25	9	4	19.55
8	28	24.13	9	4	8.89	8	28	19.81	9	14	17.27
9	1	19.30	9	5	27.43	9	6	13.97	9	17	26.16
9	4	10.66	9	14	25.65	9	13	11.17	9	19	39.37
9	14	17.78	9	21	18.54	9	14	24.63	9	21	43.17
9	19	23.36	10	3	24.38	9	17	22.85	9	26	15.49
10	5	11.43	10	5	15.74	9	19	80.77	10	3	17.27
12	19	12.69	10	25	13.71	9	22	14.98	10	5	22.09

ESTACIÓN 17			ESTACIÓN 18			ESTACIÓN 19			ESTACIÓN 20		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	23	14.22	4	23	13.71	4	23	19.55	5	27	18.28
5	31	18.54	5	27	13.97	4	24	10.66	5	31	19.55
6	14	59.68	5	31	18.28	5	27	18.79	6	4	14.98
6	15	17.27	6	15	28.19	5	31	11.93	6	15	13.97
6	18	15.74	6	26	14.22	6	15	17.52	6	26	13.97
6	26	14.98	7	20	18.54	6	26	14.47	7	3	13.71
6	28	13.46	7	30	24.38	7	13	30.22	7	4	14.22
7	4	12.95	7	31	31.49	7	30	19.30	7	13	48.00
7	13	13.2	8	5	10.16	7	31	14.22	7	30	52.32
7	17	14.22	8	14	12.44	8	12	9.14	8	5	24.89
7	20	23.62	8	15	20.82	8	15	42.14	8	15	28.19
7	21	13.46	8	16	21.84	8	16	13.20	8	16	24.12
8	14	14.47	8	31	26.66	8	28	16.50	8	31	21.33
8	15	16.5	9	4	41.66	9	4	17.77	9	4	14.98
9	4	34.86	9	9	12.44	9	17	19.30	9	7	11.43
9	12	42.92	9	12	35.81	9	18	12.19	9	14	13.69
9	14	22.6	9	14	18.28	9	19	10.92	9	18	33.02
9	19	17.78	9	19	13.71	9	22	21.08	10	4	26.41
10	3	39.62	10	3	22.60	10	3	15.24	10	5	16.51
10	5	18.28	10	5	12.19	10	4	36.89	10	23	16.25

Tablas IV.1 20 lluvias máximas en 24 h por estación del año de 1996

ESTACIÓN 21			ESTACIÓN 22			ESTACIÓN 23			ESTACIÓN 24		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	23	37.84	4	23	29.71	6	7	63.49	5	31	19.55
5	23	17.78	6	1	38.35	6	18	31.49	6	14	50.54
6	14	13.46	6	16	18.28	6	24	21.59	6	15	35.81
6	16	28.19	6	18	38.60	6	28	30.73	6	16	19.81
6	17	20.82	6	25	16.50	7	4	30.98	7	4	21.58
6	19	20.82	6	28	24.14	7	15	24.89	7	5	17.01
7	4	18.79	7	4	32.25	7	17	22.52	7	7	22.86
7	7	26.92	7	6	32.00	8	24	21.82	7	13	20.32
7	13	20.31	7	13	17.52	8	26	21.33	7	20	14.98
7	17	13.2	7	15	17.01	8	27	36.57	7	21	17.01
8	13	19.55	7	17	17.27	9	4	27.94	7	24	16.25
8	14	14.22	8	2	16.25	9	7	24.13	8	11	13.46
8	28	23.36	8	4	17.77	9	9	22.86	8	15	15.49
8	30	18.28	8	26	18.79	9	14	20.06	9	4	23.11
9	14	13.46	8	27	25.90	9	19	20.57	8	8	15.49
9	17	16.76	9	10	20.82	9	21	22.43	9	10	42.67
9	19	47.75	9	19	20.31	9	27	20.57	9	12	62.99
9	21	26.6	9	21	33.78	10	4	23.36	9	14	33.52
9	26	14.98	9	27	18.54	10	5	21.33	9	17	37.84
10	3	34.03	10	5	16.31	12	19	22.35	10	3	36.32

ESTACIÓN 25			ESTACIÓN 26			ESTACIÓN 27			ESTACIÓN 28		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
6	13	21.33	4	23	8.38	5	31	29.21	6	4	12.70
6	14	57.65	6	13	33.32	6	4	16.76	6	12	10.41
6	15	19.04	6	14	16.76	6	15	14.98	6	26	18.54
6	16	36.06	6	16	18.03	6	17	10.66	7	2	10.66
6	17	15.49	6	29	24.66	6	19	24.89	7	4	10.15
6	18	26.60	6	30	9.39	6	26	10.92	7	13	9.39
7	3	17.01	7	2	12.44	7	4	10.41	7	17	10.16
7	4	19.30	7	5	9.65	7	13	22.86	7	18	14.47
7	5	22.35	7	6	11.68	7	17	9.90	7	20	19.30
7	24	18.79	9	4	11.43	7	30	25.39	7	30	31.74
8	24	18.54	9	7	14.22	7	31	19.30	8	5	18.28
8	26	22.35	9	9	14.47	8	5	31.24	8	15	14.98
8	27	20.06	9	13	9.39	8	15	21.84	8	16	17.52
9	4	22.60	9	14	8.12	8	16	11.17	8	31	37.08
9	8	38.35	9	17	8.12	9	4	38.54	9	1	12.19
9	10	27.68	9	23	13.20	9	7	11.93	9	7	10.16
9	12	20.32	9	24	10.92	9	12	47.24	9	17	11.43
9	14	32.00	9	27	11.43	9	14	18.79	9	21	10.92
9	19	24.12	10	6	11.93	9	16	13.46	10	5	10.92
10	5	25.65	12	19	12.95	9	17	16.25	12	19	9.65

ESTACIÓN 29			ESTACIÓN 30			ESTACIÓN 31			ESTACIÓN 32		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	23	10.66	4	24	5.58	4	24	7.11	4	24	11.17
5	24	10.41	6	25	7.11	4	30	5.33	6	6	12.19
6	26	10.92	6	26	6.85	5	18	5.08	6	19	10.36
7	4	26.92	7	3	5.33	6	1	5.07	6	20	15.24
7	20	29.46	7	4	6.60	6	6	8.89	7	3	14.22
7	30	25.90	7	7	7.87	6	19	5.33	7	4	6.85
8	15	30.22	7	17	7.61	6	20	19.30	7	5	20.31
8	16	23.11	7	30	33.27	6	26	4.57	7	6	7.61
8	22	6.85	8	5	16.25	7	3	16.51	7	30	11.17
8	23	8.89	8	15	18.03	7	5	7.36	8	4	13.71
8	24	10.92	8	16	23.62	7	15	4.82	8	17	14.98
8	26	9.39	8	24	9.14	7	17	14.22	8	23	7.11
9	1	16.00	8	26	18.54	7	30	12.44	8	24	11.17
9	5	11.17	9	2	5.58	8	5	8.38	8	26	13.46
9	7	6.85	9	4	26.92	8	15	5.58	9	4	9.39
9	14	14.98	9	5	8.12	8	22	6.35	9	7	6.85
9	18	6.85	9	12	7.36	8	23	6.34	9	14	19.30
9	23	8.89	9	14	29.46	8	24	18.03	9	24	12.70
10	4	7.62	9	21	6.34	8	25	6.60	10	23	8.38
12	19	12.44	10	4	12.95	12	19	13.46	12	19	14.47

Tablas IV.1 20 lluvias máximas en 24 h por estación del año de 1996

ESTACIÓN 33			ESTACIÓN 34			ESTACIÓN 35			ESTACIÓN 36		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	24	11.43	6	14	19.05	6	4	27.17	6	4	15.49
6	6	14.73	6	15	13.97	6	17	13.46	6	9	13.46
6	20	19.81	7	3	13.20	6	18	12.95	6	18	22.35
7	3	18.28	7	4	16.00	6	19	13.96	7	3	16.76
7	4	6.85	7	5	19.30	7	3	13.97	7	5	9.51
7	5	8.12	7	21	13.96	7	5	28.44	7	6	17.27
7	6	6.85	7	24	13.96	7	6	10.41	7	21	23.88
8	4	7.87	7	31	16.25	7	9	11.17	7	22	24.38
8	15	8.12	8	5	17.01	7	13	13.46	7	24	12.70
8	17	12.19	8	14	18.28	7	30	13.20	8	4	10.41
8	23	8.12	8	5	17.77	8	5	14.73	8	27	11.18
8	24	11.93	8	24	14.73	8	24	12.70	8	31	23.88
8	26	9.65	8	31	24.89	8	31	33.27	9	7	60.30
8	27	19.30	9	8	34.29	9	12	14.22	9	8	11.68
9	4	7.36	9	10	16.51	9	14	22.35	9	12	21.84
9	7	14.22	9	12	30.73	9	17	14.22	9	14	13.21
9	9	9.50	9	17	15.49	9	21	10.66	9	21	10.41
9	21	16.51	10	3	17.77	9	23	23.11	9	23	33.02
10	24	5.84	10	5	15.23	9	24	15.74	10	3	23.11
12	19	13.46	12	19	12.19	12	19	11.68	12	19	12.70

ESTACIÓN 37			ESTACIÓN 38			ESTACIÓN 39			ESTACIÓN 40		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	24	12.95	4	24	20.83	6	9	10.92	6	4	25.91
6	9	14.48	6	9	11.94	6	14	21.08	6	16	8.89
6	13	15.49	6	11	6.10	6	17	10.67	6	19	19.56
6	14	14.96	6	14	25.15	6	29	30.48	7	5	9.91
6	17	12.95	6	16	7.87	6	30	15.49	7	30	14.48
6	18	66.8	6	18	71.37	7	3	17.78	8	5	24.89
7	6	15.75	7	3	11.18	7	5	10.92	8	15	10.92
7	17	18.03	7	4	10.67	7	6	20.83	8	16	13.46
7	20	20.07	7	6	14.22	7	17	14.48	8	17	10.92
8	4	44.45	7	17	21.84	7	21	13.97	8	24	13.46
8	5	13.72	7	20	9.65	7	25	13.46	8	26	9.14
8	8	14.22	7	21	8.13	8	11	17.27	8	31	17.27
8	17	18.29	7	23	13.97	8	15	12.19	9	3	15.75
8	24	27.43	7	30	6.60	8	24	9.14	9	4	31.75
8	26	12.45	8	12	18.54	9	5	9.40	9	12	21.34
9	3	24.13	8	15	6.30	9	7	23.86	9	14	21.34
9	7	22.61	8	24	14.73	9	11	9.65	9	17	16.76
9	14	20.83	8	31	47.75	9	14	12.45	9	21	11.94
9	17	20.32	10	8	6.86	9	27	12.70	9	24	13.72
12	19	14.73	12	19	13.97	12	19	20.07	12	19	11.18

ESTACIÓN 41			ESTACIÓN 42			ESTACIÓN 43			ESTACIÓN 44		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	24	24.64	4	24	14.99	4	24	25.40	5	27	12.95
6	17	12.19	6	6	9.40	5	27	6.60	6	26	14.22
6	18	21.59	6	16	13.21	5	30	12.95	7	7	38.35
6	19	6.86	6	20	9.40	6	6	11.18	7	8	9.14
7	3	19.56	7	3	7.87	6	18	15.49	7	17	14.96
7	6	12.70	7	6	8.13	6	19	12.95	7	30	47.24
7	17	13.21	7	11	5.84	7	3	9.62	8	15	10.92
7	21	23.62	7	24	7.11	7	4	10.92	8	22	11.94
7	24	8.89	7	30	10.41	7	6	38.65	8	23	8.38
8	7	5.59	8	6	6.60	7	17	7.87	8	24	8.13
8	15	5.59	8	8	12.70	7	21	13.46	8	28	8.38
8	17	8.38	8	15	9.65	7	30	6.86	8	29	21.84
8	24	24.13	8	22	3.27	8	15	16.26	9	7	9.40
8	26	6.60	8	23	6.10	8	23	8.89	9	14	16.26
8	31	19.30	8	24	8.13	8	24	8.13	9	17	29.21
9	7	16.26	8	26	5.84	8	31	15.75	9	18	14.99
9	17	12.70	9	4	20.32	9	3	8.64	9	19	26.42
9	23	14.22	9	7	11.94	9	5	6.35	9	21	18.54
9	26	7.37	9	21	11.94	9	11	6.60	9	22	16.76
12	19	12.70	12	19	12.95	12	19	14.99	12	19	7.87

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1996

ESTACIÓN 45			ESTACIÓN 46			ESTACIÓN 47			ESTACIÓN 48		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	24	12.45	4	24	21.84	4	30	6.60	4	23	34.29
5	24	10.92	6	1	8.64	5	31	7.62	4	24	14.22
5	27	26.42	6	20	24.89	6	16	8.86	5	24	23.11
6	26	18.80	6	25	24.38	6	20	13.46	6	16	22.35
6	30	8.38	7	7	22.61	6	21	8.38	6	19	27.43
7	7	24.89	7	16	12.70	6	25	9.14	6	25	14.22
7	30	20.83	7	17	13.97	6	26	17.78	6	26	22.35
8	15	18.03	7	30	13.53	7	7	20.70	7	4	13.49
8	17	8.64	8	8	9.63	7	17	7.62	7	7	19.56
8	26	13.97	8	15	10.67	7	30	37.59	7	27	26.67
8	29	16.31	8	23	10.16	8	1	7.62	7	30	17.53
9	4	23.37	8	24	10.41	8	15	11.68	8	2	14.23
9	5	8.89	8	28	9.40	8	23	8.89	8	4	14.73
9	6	12.05	9	4	13.46	9	1	21.84	8	14	22.10
9	10	14.73	9	9	8.89	9	4	14.73	8	24	13.21
9	13	14.73	9	13	23.91	9	13	10.67	9	6	17.53
9	14	20.83	9	14	35.05	9	14	22.86	9	13	20.57
9	17	10.92	9	18	38.35	9	19	8.64	9	14	27.94
9	18	19.05	9	19	9.40	9	22	13.21	9	17	29.97
9	21	18.54	9	22	24.89	12	19	9.40	9	21	19.05

ESTACIÓN 49		
MES	DÍA	(mm)
4	23	47.24
5	29	31.24
6	1	26.67
6	18	15.49
6	19	26.92
6	20	23.61
6	26	21.59
6	28	23.37
7	4	23.51
7	7	27.69
7	17	18.03
8	26	21.84
8	17	31.75
8	29	26.37
9	4	15.49
9	9	17.27
9	19	42.67
9	21	26.16
9	26	19.56
9	27	35.63

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1997

ESTACIÓN 1			ESTACIÓN 2			ESTACIÓN 3			ESTACIÓN 4		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
3	16	8.64	3	21	7.11	3	21	9.91	3	21	11.84
3	21	8.64	3	20	7.87	4	8	17.02	4	8	11.68
4	23	14.22	6	22	8.64	4	23	8.38	4	17	14.22
5	17	9.65	6	23	20.57	5	3	18.54	4	19	7.37
5	20	6.10	6	27	9.14	5	20	10.67	4	23	11.18
6	22	28.45	7	3	8.89	5	22	21.84	5	20	7.62
6	23	17.02	7	7	10.41	6	22	14.73	6	22	20.32
6	27	13.97	7	14	21.84	6	23	41.15	6	23	41.15
6	30	8.13	7	15	13.72	7	7	12.70	7	7	9.65
7	7	11.94	7	16	17.27	7	14	26.42	7	14	32.51
7	14	16.76	7	17	19.30	7	15	23.40	7	15	23.62
7	15	5.59	7	24	13.21	7	16	10.41	7	17	10.92
7	16	21.59	7	26	7.57	7	17	14.99	7	23	21.84
7	17	10.92	7	29	8.38	7	23	45.47	7	24	7.87
7	24	9.65	8	13	7.62	7	26	17.02	7	26	21.59
8	13	4.83	8	17	8.89	8	13	17.27	7	29	10.16
8	29	11.43	9	5	19.81	9	5	20.07	8	8	9091.00
9	5	24.18	9	7	11.43	9	7	16.51	8	13	14.48
9	7	6.10	9	11	13.97	9	18	10.41	8	29	15.75
9	12	4.82	9	13	11.94	9	21	10.41	9	5	17.53

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1997

ESTACIÓN 5			ESTACIÓN 6			ESTACIÓN 7			ESTACIÓN 8		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	9	8.64	3	16	10.67	1	9	16.26	1	9	14.22
1	16	21.59	4	9	9.14	3	16	13.21	4	9	14.22
3	11	10.67	5	3	13.21	3	21	11.68	5	15	11.18
3	21	9.14	5	7	9.40	4	9	16.26	5	22	9.40
4	9	8.64	6	23	25.65	5	7	14.99	6	23	15.75
4	16	21.59	6	25	9.65	6	23	17.27	6	25	19.05
5	22	9.40	7	3	21.08	6	25	20.83	7	4	10.16
6	23	33.27	7	14	16.00	7	4	15.49	7	14	14.99
6	25	20.83	7	15	14.22	7	7	13.72	7	15	19.56
7	7	13.46	7	17	20.83	7	14	20.32	7	16	12.19
7	14	19.56	7	21	9.14	7	15	20.32	7	17	30.73
7	15	34.29	7	29	21.34	7	16	27.94	7	18	14.73
7	17	7.62	8	13	12.95	7	17	36.07	7	21	16.26
7	23	10.92	8	17	24.38	7	23	27.94	7	23	44.20
7	26	26.92	8	19	13.97	7	26	12.45	7	26	19.05
8	19	25.65	8	25	13.46	8	29	17.02	8	29	21.08
8	29	28.70	8	29	9.64	8	13	25.40	8	29	12.70
8	29	12.70	8	5	34.54	8	29	12.45	9	5	49.53
9	5	18.29	9	7	11.94	9	5	36.32	9	11	16.76
9	21	12.70	9	13	29.21	9	13	25.65	9	18	12.27

ESTACIÓN 9			ESTACIÓN 10			ESTACIÓN 11			ESTACIÓN 12		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
2	15	11.68	3	21	8.89	3	11	20.57	1	9	13.72
3	21	8.38	4	7	9.65	3	21	9.14	1	16	25.91
4	7	17.02	4	18	13.72	4	16	28.45	1	16	11.94
4	9	13.97	5	8	13.97	4	18	9.91	4	16	25.91
5	15	8.38	5	20	8.89	5	8	10.67	4	18	11.94
6	25	17.27	6	2	15.75	5	18	10.16	5	22	21.08
7	1	14.22	6	23	9.65	5	22	9.14	5	23	10.92
7	4	17.53	7	4	9.4	6	2	26.42	6	2	15.24
7	14	15.75	7	7	10.92	6	23	13.72	6	23	13.97
7	15	21.34	7	14	10.41	6	25	19.56	7	6	14.48
7	17	23.88	7	15	19.56	7	4	11.18	7	14	26.16
7	23	18.8	7	17	54.36	7	14	17.53	7	15	26.16
7	26	25.15	7	23	24.89	7	15	20.83	7	17	53.09
8	5	12.45	7	26	35.65	7	17	34.54	7	18	10.67
8	17	16.76	8	17	28.19	7	23	21.59	7	18	22.1
8	18	13.72	8	25	18.29	7	26	42.67	8	17	23.35
8	19	21.08	8	27	17.02	8	17	8.89	8	19	23.35
8	29	34.29	8	29	24.64	8	27	10.41	8	29	9.65
9	5	44.7	9	5	33.27	8	29	14.73	9	5	51.31
9	18	10.92	9	13	18.54	9	5	33.27	9	12	18.28

ESTACIÓN 13			ESTACIÓN 14			ESTACIÓN 15			ESTACIÓN 16		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	23	9.65	4	16	10.92	4	7	11.18	4	7	18.29
3	21	9.91	5	3	27.69	4	18	11.18	5	3	30.48
4	7	6.60	5	24	13.46	5	18	9.40	6	21	19.81
4	10	6.10	6	2	39.12	5	20	9.40	7	1	18.03
4	16	13.21	6	23	45.72	6	2	9.14	7	14	16.00
4	20	6.10	6	30	13.97	6	25	10.92	7	15	26.96
4	23	9.65	7	4	13.21	7	14	10.16	7	17	16.26
5	24	11.94	7	11	20.32	7	15	20.83	7	24	20.32
6	2	49.02	7	15	49.28	7	17	21.34	7	26	22.61
6	18	16.26	7	24	11.68	7	23	11.43	7	28	19.56
6	23	18.54	7	26	46.23	7	24	11.43	8	6	20.57
7	15	16.00	8	12	14.99	7	26	33.53	8	17	14.99
7	24	11.18	8	17	11.18	8	5	19.56	8	18	33.02
7	26	18.29	8	19	10.92	8	17	13.21	8	28	23.88
8	19	8.38	8	27	22.39	8	18	13.97	8	29	21.54
8	25	9.91	8	29	41.15	8	26	9.91	9	2	15.75
8	27	6.10	9	11	15.51	8	28	36.83	9	6	17.02
8	29	11.43	9	12	41.15	8	29	38.10	9	7	30.48
9	5	11.18	9	17	18.29	9	5	35.37	9	8	20.37
9	11	9.65	9	21	42.67	9	13	9.91	9	14	32.51

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1997

ESTACIÓN 17			ESTACIÓN 18			ESTACIÓN 19			ESTACIÓN 20		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	16	12.19	4	16	20.37	3	11	21.59	4	7	10.41
3	19	11.93	5	20	10.66	4	16	7.11	4	16	10.92
4	16	12.19	5	22	30.22	4	18	7.87	4	18	9.90
5	3	30.22	6	2	11.43	5	20	8.63	6	2	43.43
6	1	13.97	6	18	11.43	6	2	23.87	6	23	18.03
6	24	13.96	6	25	12.70	6	23	10.66	6	23	13.46
6	25	13.46	7	1	19.81	7	1	14.22	7	4	13.94
7	1	27.17	7	7	18.54	7	6	16.76	7	6	12.19
7	12	15.74	7	15	9.39	7	7	14.47	7	15	18.79
7	17	14.98	7	20	13.97	7	14	24.38	7	17	28.95
7	20	11.17	7	21	13.96	7	15	20.37	7	23	9.90
7	24	13.71	7	24	17.01	7	17	35.05	7	24	9.39
7	27	10.41	7	26	12.93	7	23	22.60	7	26	19.30
7	28	17.01	7	27	9.90	7	24	10.16	8	6	9.39
8	16	11.93	7	30	11.17	7	26	21.59	8	12	19.05
8	18	71.37	8	17	13.20	7	29	7.11	8	17	16.76
8	28	33.27	8	18	76.70	8	27	8.12	8	29	10.41
8	29	18.54	8	28	17.78	8	29	8.38	9	5	22.60
9	6	13.2	8	29	21.08	9	5	17.59	9	6	9.39
9	8	24.13	9	12	8.89	9	12	11.42	9	12	15.74

ESTACIÓN 21			ESTACIÓN 22			ESTACIÓN 23			ESTACIÓN 24		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
5	3	32.57	5	3	16.50	6	18	26.16	1	7	14.22
6	26	12.95	6	28	22.35	6	23	29.20	3	19	16.25
7	6	14.73	7	4	21.33	6	28	23.62	5	3	35.54
7	14	16.00	7	12	23.11	7	2	20.82	6	1	16.51
7	15	18.54	7	15	23.11	7	7	21.08	6	28	22.35
7	18	18.54	7	17	16.51	7	11	37.40	7	1	27.68
7	21	16.00	7	26	32.00	7	15	18.28	7	7	14.73
7	24	16.76	7	28	26.16	7	17	18.54	7	12	31.49
7	26	20.32	8	6	22.33	7	18	23.36	7	15	30.48
8	5	17.27	8	14	41.14	7	23	20.57	7	17	17.52
8	6	27.17	8	16	17.01	7	26	27.17	7	26	19.05
8	17	16.51	8	17	17.78	8	3	19.81	7	27	26.66
8	18	37.65	8	18	17.01	8	8	19.05	7	28	21.84
8	29	14.47	8	28	24.13	8	11	21.59	8	6	18.03
9	5	17.78	9	1	52.32	8	16	22.10	8	17	22.35
9	7	19.81	9	12	22.09	9	1	37.59	8	18	16.76
9	8	17.01	9	13	22.35	9	6	27.68	8	28	24.89
9	12	25.65	9	21	17.52	9	8	33.78	9	1	22.86
9	13	41.90	9	24	23.11	9	15	53.08	9	6	26.16
9	21	21.08	9	30	23.62	9	24	19.81	9	8	45.72

ESTACIÓN 25			ESTACIÓN 26			ESTACIÓN 27			ESTACIÓN 28		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
1	7	24.38	5	10	16.00	1	7	12.19	3	21	11.68
4	7	24.38	5	20	13.71	4	7	12.19	4	7	10.66
5	3	21.59	7	2	31.73	4	16	10.92	4	16	10.66
6	1	31.49	7	7	20.82	5	18	9.90	4	18	15.24
6	23	20.37	7	12	12.19	6	2	29.97	6	2	27.43
6	28	28.70	7	13	13.97	6	23	11.42	6	23	39.62
7	2	24.13	7	15	14.98	6	25	11.17	6	25	9.63
7	4	19.30	7	19	13.71	7	4	22.86	7	15	23.36
7	11	17.27	7	23	17.52	7	6	16.76	7	17	22.85
7	12	47.24	7	25	12.70	7	7	21.59	7	23	8.89
7	15	37.84	8	1	26.92	7	15	11.17	7	24	5.33
7	17	20.06	8	2	11.43	7	17	22.35	7	26	19.05
7	23	16.76	8	3	13.46	7	23	12.70	8	5	5.08
7	28	19.05	8	4	13.46	7	24	22.35	8	6	13.46
7	29	20.06	8	16	10.92	7	26	16.50	8	12	18.54
8	17	18.79	8	17	17.52	8	8	11.17	8	19	8.63
8	19	26.16	9	1	42.67	8	12	22.85	8	29	11.17
9	1	35.56	9	6	27.43	8	16	10.92	9	2	5.58
9	6	27.68	9	8	20.32	8	18	17.52	9	5	34.54
9	8	47.75	9	15	17.27	9	5	15.74	9	12	8.12

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1997

ESTACIÓN 29			ESTACIÓN 30			ESTACIÓN 31			ESTACIÓN 32		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
3	18	5.84	3	21	6.83	4	7	20.06	4	7	25.40
3	21	15.23	4	7	22.35	4	23	5.84	5	18	16.25
4	7	14.98	4	16	9.90	5	20	5.58	5	20	8.12
4	16	10.92	4	18	9.63	6	2	11.43	6	2	9.14
4	18	6.60	6	2	17.01	6	7	13.97	6	17	7.36
5	3	10.68	6	23	25.40	6	16	7.62	6	23	16.25
5	22	5.33	6	25	26.67	6	23	17.78	6	25	17.52
6	2	7.11	7	5	17.78	6	25	10.16	6	28	8.63
6	23	11.68	7	7	34.29	7	2	6.60	7	2	12.70
7	5	10.41	7	8	9.39	7	16	30.47	7	7	13.71
7	7	20.32	7	15	17.01	7	18	21.08	7	15	29.97
7	15	12.70	7	17	12.44	7	27	26.92	7	24	16.00
7	18	11.68	7	18	12.78	8	29	22.09	7	26	16.76
7	24	9.14	7	24	16.76	8	1	13.71	7	28	8.89
7	26	16.51	7	26	11.68	8	18	10.92	8	1	8.38
7	29	11.68	8	8	13.71	8	26	5.33	8	28	11.17
8	12	13.97	8	12	10.87	8	27	9.65	8	29	18.54
8	27	12.70	9	6	12.70	8	28	11.17	9	6	10.41
8	29	7.11	9	12	10.66	8	29	7.62	9	8	9.90
9	12	11.93	9	21	19.05	9	15	5.58	9	12	7.62

ESTACIÓN 33			ESTACIÓN 34			ESTACIÓN 35			ESTACIÓN 36		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	7	19.81	3	19	9.65	4	7	29.21	4	7	25.14
4	18	9.14	4	7	16.51	4	16	11.42	4	16	12.44
4	21	19.55	4	17	17.27	4	18	17.01	5	20	13.97
5	18	9.90	4	18	16.50	5	3	10.16	6	23	19.55
5	20	9.39	5	3	16.51	5	18	9.90	6	25	19.55
6	2	10.41	5	20	15.49	6	23	8.89	7	2	14.22
6	23	12.95	5	22	11.43	6	28	13.46	7	6	24.89
6	25	15.23	6	24	11.68	7	5	27.68	7	7	24.12
7	2	6.34	6	25	17.01	7	7	27.43	7	12	21.08
7	7	16.76	7	1	9.14	7	12	45.21	7	15	31.49
7	15	33.27	7	5	8.89	7	15	19.81	7	17	24.13
7	24	25.14	7	7	14.98	7	17	15.49	7	25	17.27
7	26	14.98	7	12	11.68	7	23	8.63	7	26	17.27
7	28	17.78	7	17	13.96	8	12	22.60	7	28	14.47
8	1	10.66	7	25	15.49	8	17	21.33	8	18	14.47
8	29	32.00	7	28	23.60	8	18	11.17	8	19	18.54
9	6	10.92	7	29	16.76	8	29	9.39	8	26	18.79
9	8	13.20	7	31	20.57	9	5	13.46	9	6	19.05
9	15	15.74	8	12	9.14	9	6	8.38	9	12	21.58
9	24	6.35	9	8	10.66	9	12	9.65	9	13	14.47

ESTACIÓN 37			ESTACIÓN 38			ESTACIÓN 39			ESTACIÓN 40		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
4	9	14.73	3	21	11.93	3	21	17.78	3	21	9.14
4	16	14.22	4	7	11.93	4	7	15.24	4	7	27.93
5	20	19.30	6	2	13.71	4	16	15.74	4	16	11.17
6	2	15.24	6	30	27.43	5	20	16.31	5	22	8.38
7	1	25.65	7	1	23.62	6	2	19.81	6	2	22.35
7	2	37.91	7	2	12.65	6	23	13.97	6	20	13.20
7	6	24.89	7	5	10.16	6	28	15.49	6	23	32.00
7	7	16.25	7	7	20.31	7	2	47.24	6	25	30.47
7	12	20.06	7	14	14.98	7	5	17.78	7	5	19.30
7	15	24.38	7	15	11.68	7	15	16.31	7	12	9.65
7	17	18.79	7	17	22.86	7	25	21.08	7	15	20.06
7	25	23.87	7	23	12.44	7	26	14.98	7	17	49.02
8	1	36.06	7	25	16.76	7	29	16.76	7	24	10.41
8	2	18.03	7	26	17.01	7	31	24.63	7	26	11.68
8	4	22.60	8	2	12.95	8	3	16.25	8	8	10.16
8	18	25.14	8	19	59.43	8	17	14.73	8	12	21.33
8	19	22.35	8	28	13.46	8	18	13.20	8	16	16.00
9	6	33.01	9	1	15.49	8	28	21.33	8	29	9.65
9	8	16.51	9	7	10.41	9	4	28.70	9	6	9.65
9	15	14.47	9	12	14.22	9	6	30.73	9	12	14.47

Tablas IV.1 20 lluvia máximas en 24 h por estación del año de 1997

ESTACIÓN 41			ESTACIÓN 42			ESTACIÓN 43			ESTACIÓN 44		
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)
3	16	9.63	4	7	20.32	3	19	10.41	5	3	9.90
3	21	9.39	4	16	8.12	4	7	28.70	5	17	13.97
4	7	13.20	4	18	18.28	4	16	12.44	5	22	8.89
4	18	17.27	5	18	15.74	4	20	10.92	5	23	13.71
4	21	14.98	5	20	10.66	5	20	12.44	6	21	27.17
6	23	19.81	6	2	15.49	6	2	16.00	6	22	52.32
6	25	11.17	6	23	30.48	6	24	11.43	6	23	37.59
7	2	11.42	6	25	11.42	7	1	34.03	6	27	11.68
7	7	17.78	7	5	15.24	7	2	9.65	6	30	22.86
7	15	14.22	7	7	12.19	7	15	26.16	7	2	9.65
7	17	10.66	7	14	8.63	7	18	9.90	7	7	13.46
8	2	20.32	7	15	18.28	7	23	22.60	7	12	8.12
8	17	26.41	7	24	11.17	7	26	21.33	7	14	11.17
8	26	10.52	7	25	14.98	7	29	11.17	7	16	10.16
8	28	35.05	7	26	12.95	8	2	26.16	7	17	39.87
8	29	18.03	8	1	12.70	8	18	13.97	7	30	12.69
9	1	11.68	8	3	11.93	8	27	15.74	8	18	25.63
9	5	21.08	8	29	15.49	8	29	11.17	8	26	13.96
9	12	13.97	9	6	10.92	9	4	18.28	9	5	11.93
9	15	17.01	9	8	18.28	9	11	17.01	9	8	14.73

ESTACIÓN 45			ESTACIÓN 46			ESTACIÓN 47			ESTACIÓN 48			
MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	MES	DÍA	(mm)	
4	7	8.63	3	21	13.20	4	9	12.69	5	18	13.20	
4	8	16.59	4	1	8.89	4	23	25.90	6	1	18.54	
4	9	8.89	4	7	10.92	5	3	17.52	6	23	14.47	
4	3	17.77	4	16	7.36	5	3	20	7.61	6	26	25.90
6	23	17.52	5	10	9.39	5	23	16.25	7	1	22.60	
6	23	20.06	5	20	9.39	6	22	23.09	7	4	12.19	
6	23	11.93	5	22	6.60	6	23	19.55	7	14	17.01	
7	14	21.33	6	2	23.62	6	27	9.14	7	15	19.81	
7	15	20.57	6	27	11.68	7	14	26.92	7	17	22.86	
7	17	20.31	6	30	29.97	7	15	9.90	7	23	14.73	
8	8	16.76	7	1	10.16	7	16	8.63	7	24	11.93	
8	13	8.63	7	2	6.60	7	17	18.79	7	26	29.21	
8	19	13.46	7	16	73.40	7	21	8.63	8	5	38.35	
8	26	12.70	7	17	32.25	7	23	19.30	8	17	17.01	
8	29	15.24	7	20	6.85	7	24	12.70	8	18	23.11	
9	5	25.90	7	24	10.16	8	13	9.65	8	26	14.22	
9	7	8.89	8	4	17.01	8	29	8.38	8	29	27.43	
9	8	14.22	8	29	41.40	9	5	11.68	9	5	32.76	
9	11	9.39	9	7	6.35	9	7	10.66	9	8	15.49	
9	13	49.02	9	12	6.85	9	18	10.66	9	13	29.71	

ESTACIÓN 49		
MES	DÍA	(mm)
5	3	13.23
5	7	27.17
6	1	14.98
6	25	16.76
6	26	24.12
7	1	14.22
7	17	29.97
7	23	15.24
8	5	13.20
8	6	17.52
8	14	17.01
8	17	13.71
8	18	13.46
8	28	24.13
9	5	23.36
9	7	25.40
9	11	17.78
9	12	20.06
9	13	20.82
9	24	14.98

De esta manera se seleccionaron los días en los que se presentó el mayor registro de precipitación para todos los periodos de las tormentas.

Para identificar con detalle la localización de las estaciones pluviográficas, se elaboró una tabla con los datos correspondientes a cada estación, ella contiene el número de la estación con el que la DGCOH la identifica, el nombre y sus coordenadas geográficas (Tabla II.1).

Las fechas que se seleccionaron para el estudio fueron las siguientes:

Año 1995	Días										
Agosto	4	5	6	8	9	16	22	26			
Septiembre	22	25	26								
Octubre	24										
Noviembre	3	17	18	21							
Diciembre	26	30									

Año 1996	Días										
Abril	23	24									
Mayo	27	31									
Junio	14	15	16	18	20	26					
Julio	7	13	17	30							
Agosto	4	5	15	16	23	24	26	31			
Septiembre	1	4	7	10	12	14	17	18	19	21	22
Octubre	3	4	5								
Diciembre	19										

Año 1997	Días										
Marzo	21										
Abril	7	16	18								
Mayo	3	20	22								
Junio	2	23	25								
Julio	1	2	7	12	14	15	17	23	24	26	29
Agosto	17	18	19	28	29						
Septiembre	5	6	7	8	12	13					

En la selección de las fechas para el estudio el Instituto de Ingeniería optó por un criterio adicional, que consistió en determinar que las lluvias cumplieran con la condición de que

$$hp_{24h,j}^k \geq 50mm$$

donde $hp_{24h,j}^k$ es la lluvia en 24 h de la estación j en el año k

Éste valor se consideró debido a que precipitaciones mayores a 50 mm provocan mayores daños en la zona donde se presenta (Tablas IV.2).

Tablas IV.2 Lluvias iguales o mayores a 50 mm

AÑO : 1995			
MES	DÍA	ESTACIÓN	hp (mm)
8	4	37	100.08
8	6	37	87.88
8	9	6	54.36
8	18	39	81.79
8	22	2	61.21
8	22	33	56.39
8	22	38	52.83
8	26	28	52.58
9	23	22	57.40
9	25	38	70.87
11	3	38	51.82

AÑO : 1996			
MES	DÍA	ESTACIÓN	hp (mm)
6	7	23	63.50
6	14	17	59.69
6	14	24	50.55
6	14	25	57.66
6	18	37	66.80
6	18	38	71.37
7	30	20	52.32
9	1	8	57.66
9	4	17	54.86
9	7	36	60.20
9	12	24	62.99
9	19	15	80.77
9	27	49	55.63
10	4	6	52.83
10	4	7	52.07
10	4	19	56.90

AÑO : 1997			
MES	DÍA	ESTACIÓN	hp (mm)
5	3	21	52.58
6	2	13	50.09
6	22	44	52.32
7	2	37	57.91
7	11	23	57.40
7	16	46	73.41
7	17	10	54.36
7	17	12	53.09
8	18	17	71.37
8	18	18	76.71
8	18	21	57.66
8	19	38	59.44
8	27	14	72.39
9	1	22	52.32
9	5	12	51.31
9	5	15	55.37
9	15	23	53.09

Una vez efectuada la comparación de las fechas de las tormentas que cumplieran tanto con la distribución espacial (más de 10 estaciones) y que fueran mayores a 50 mm se llegó a un total de 33 fechas para el periodo que abarca los años 1995-1997.

Para el año de 1998 la selección se hizo por observación directa, es decir escogiendo las tormentas que en ese año ocasionaron mayores problemas en el DF.

Para la presentación de las fechas seleccionadas se elaboró una tabla en donde se aprecia el resumen de las cuatro temporadas de lluvia para cada año (Tabla IV.3).

Tabla IV.3 Fechas seleccionadas de cuatro temporadas de lluvia.

1995	1996	1997	1998
4 de Agosto	7 de Junio	3 de Mayo	1 de Agosto
6 de Agosto	14 de Junio	2 de Junio	16 de Septiembre
9 de Agosto	18 de Junio	22 de Junio	26 de Septiembre
18 de Agosto	30 de Julio	2 de Julio	27 de Septiembre
22 de Agosto	15 de Agosto	11 de Julio	
26 de Agosto	1 de Septiembre	15 de Julio	
23 de Septiembre	4 de Septiembre	17 de Julio	
25 de Septiembre	7 de Septiembre	18 de Agosto	
3 de Noviembre	12 de Septiembre	19 de Agosto	
	19 de Septiembre	27 de Agosto	
	27 de Septiembre	1 de Septiembre	
	4 de Octubre	5 de Septiembre	
		15 de Septiembre	

Para el cálculo de las precipitaciones medias, de las fechas seleccionadas se necesitaba contar con sus respectivas imágenes de radar, lo cual no siempre sucedió, por lo que las fechas seleccionadas mostradas en la **Tabla IV.3**, se redujeron a 12 tormentas (**Tabla IV.4**).

Tabla IV.4 Fechas seleccionadas para su análisis y ayuda para la calibración de las imágenes de radar.

1995	1996	1997	1998
23 de Septiembre	14 de Junio	2 de Junio	16 de Septiembre
	18 de Junio	15 de Julio	26 de Septiembre
	13 de Julio		27 de Septiembre
	15 de Agosto		
	1 de Septiembre		
	19 de Septiembre		

Para la selección de los periodos de lluvia, el Instituto de Ingeniería se encargó de elaborar los hietogramas de precipitación media, y así establecer el inicio y duración de las tormentas.

IV.2 Obtención de las precipitaciones medias por medio de pluviógrafos

Para obtener la lluvia registrada por los pluviógrafos se dispone de datos proporcionados por el Instituto de Ingeniería, ésta información consiste en los valores de la precipitación registrada a intervalos de 15 minutos de cada una de las 63 estaciones pluviográficas.

Para procesar la información del pluviógrafo, fue necesario en primera instancia, generar una malla rectangular con espaciamiento de 1km x 1km a partir de los datos proporcionados por estos aparatos; esto se hizo con el fin de poner la información del pluviógrafo en correspondencia con la matriz del radar. La malla se generó con el programa **SURFER**, el cual proporciona mallas rectangulares a partir de puntos dispersos por medio de la interpolación de los datos y utilizando como límite las coordenadas extremas de los pluviógrafos.

Para el caso particular de la cuenca del Río Mixcoac, la precipitación media se obtiene por medio de una malla de 1 km x 1 km, entonces

$$\overline{hp} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i a_i)}{A} \quad (\text{IV.1})$$

donde

\overline{hp}	precipitación media, en mm
n	número de pixeles de la malla de 1 km por 1 km
P_i	precipitación registrada en la estación i , en mm
a_i	área del pixel correspondiente a la estación i , en km ²
A	área total de la cuenca, en km ²

Como todas las áreas a_i tienen las mismas dimensiones debido a que la generación la malla con espaciamiento de 1 km x 1 km, entonces la ecuación anterior se convierte en

$$\overline{hp} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i a_i)}{n a_i} \quad (\text{IV.2})$$

Simplificando términos la ecuación finalmente queda como

$$\bar{h}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i) \quad (\text{IV.3})$$

El procedimiento anterior se hizo para cada una de las fechas de la **Tabla IV.3** y para cada uno de los intervalos de 15 minutos; con ello se elaboró el hietograma de cada fecha y a partir de él, se obtuvo el periodo de análisis de cada tormenta (**Figs. IV.1**).

Al revisar los resultados obtenidos por medio de los hietogramas, para cada una de las tormentas seleccionadas, se definió la duración de la lluvia. Los resultados obtenidos se presentan a continuación

FECHA	DURACIÓN
23/09/1995	15:00-18:45
14/06/1996	19:00-24:00
18/06/1996	17:30-22:45
13/07/1996	18:00-20:15
15/08/1996	18:30-22:15
01/09/1996	15:15-17:00
19/09/1996	16:15-18:00
02/06/1997	19:00-22:15
15/07/1997	16:45-18:45
16/09/1987	00:45-05:45
26/09/1998	19:00-05:00
27/09/1998	15:45-19:00

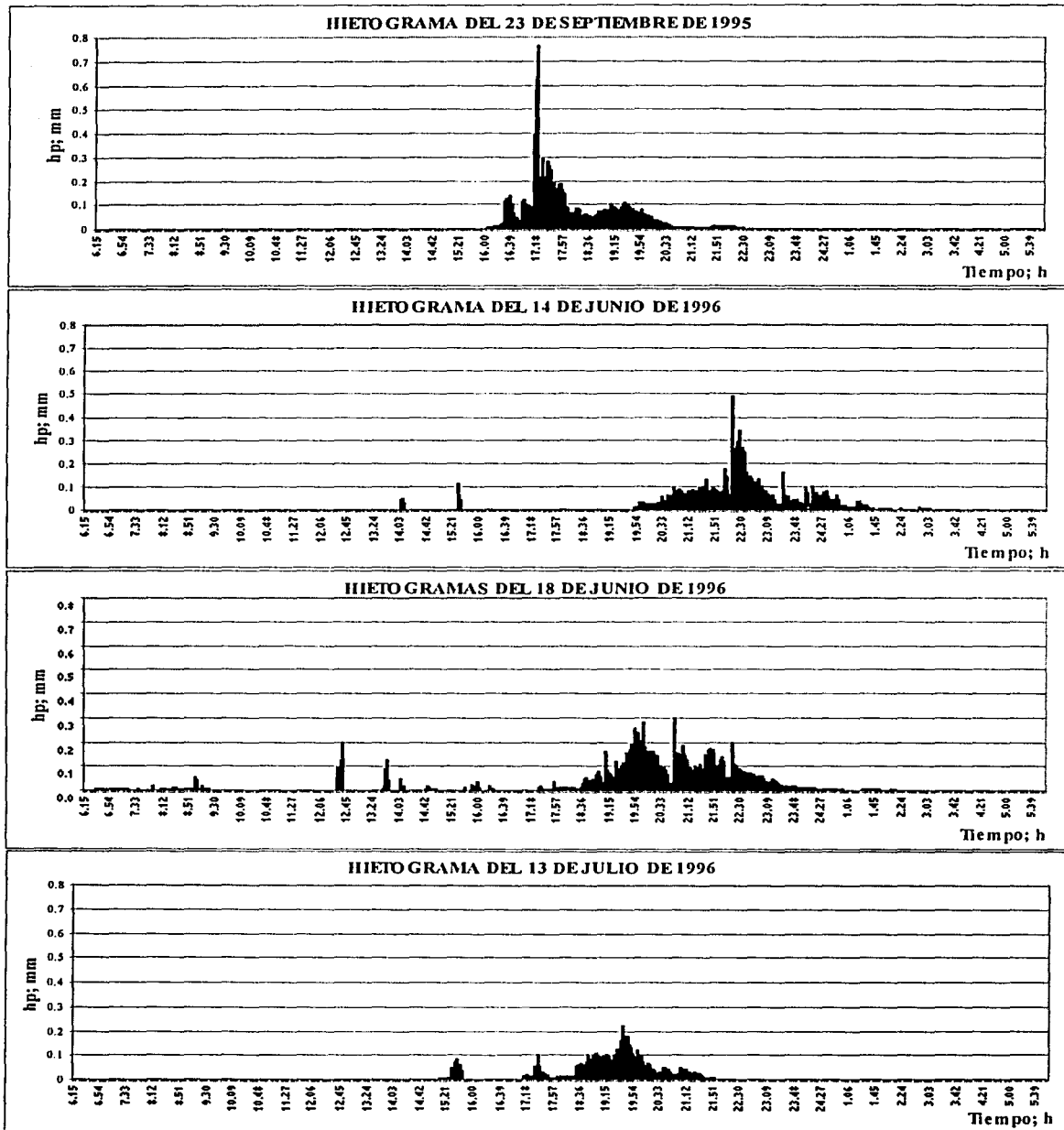


Fig. IV.1a Hietogramas de precipitaciones medias en el D.F. para cada una de las fechas seleccionadas.

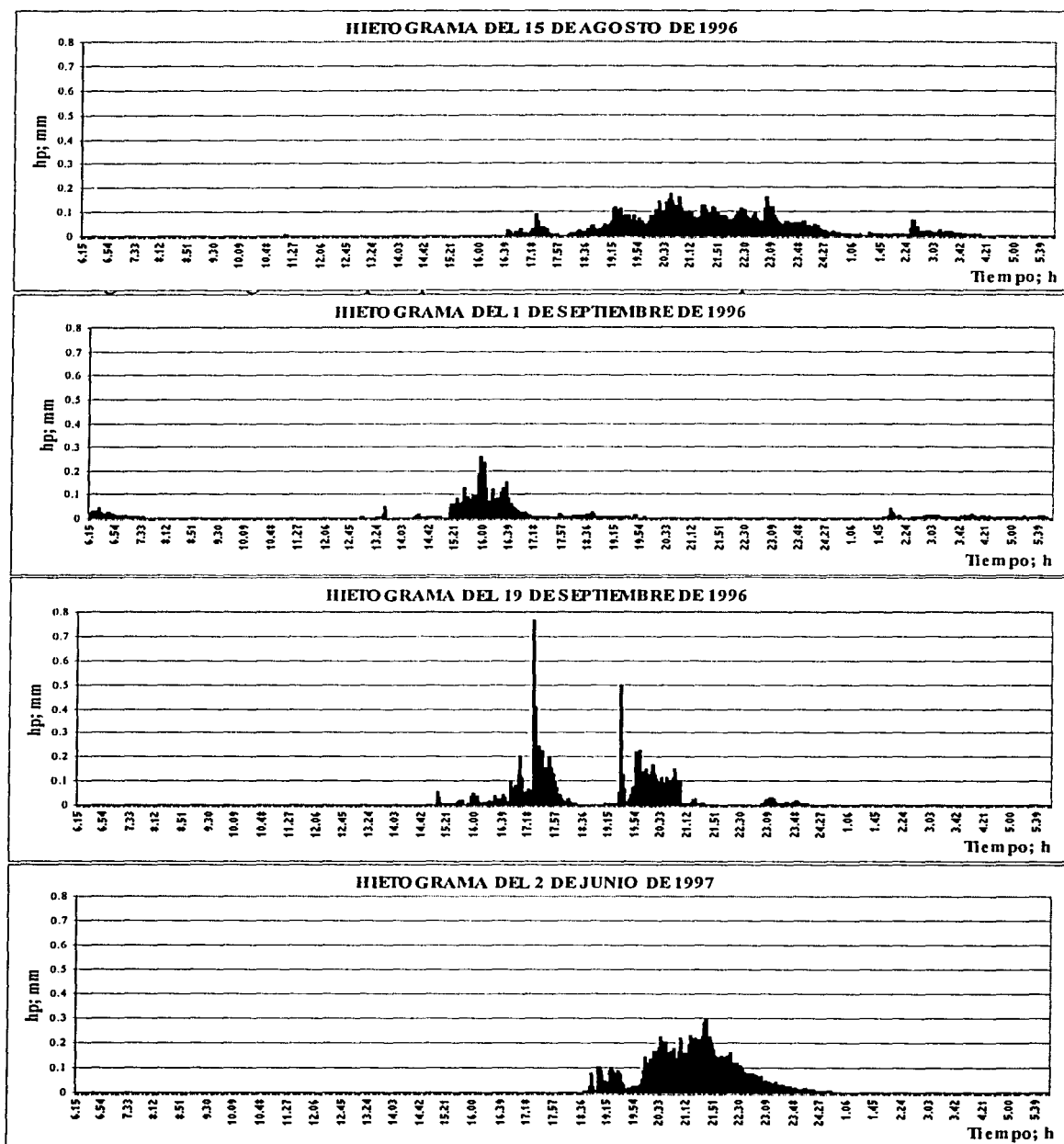


Fig. IV.1b Hietogramas de precipitaciones medias en el D.F. para cada una de las fechas seleccionadas.

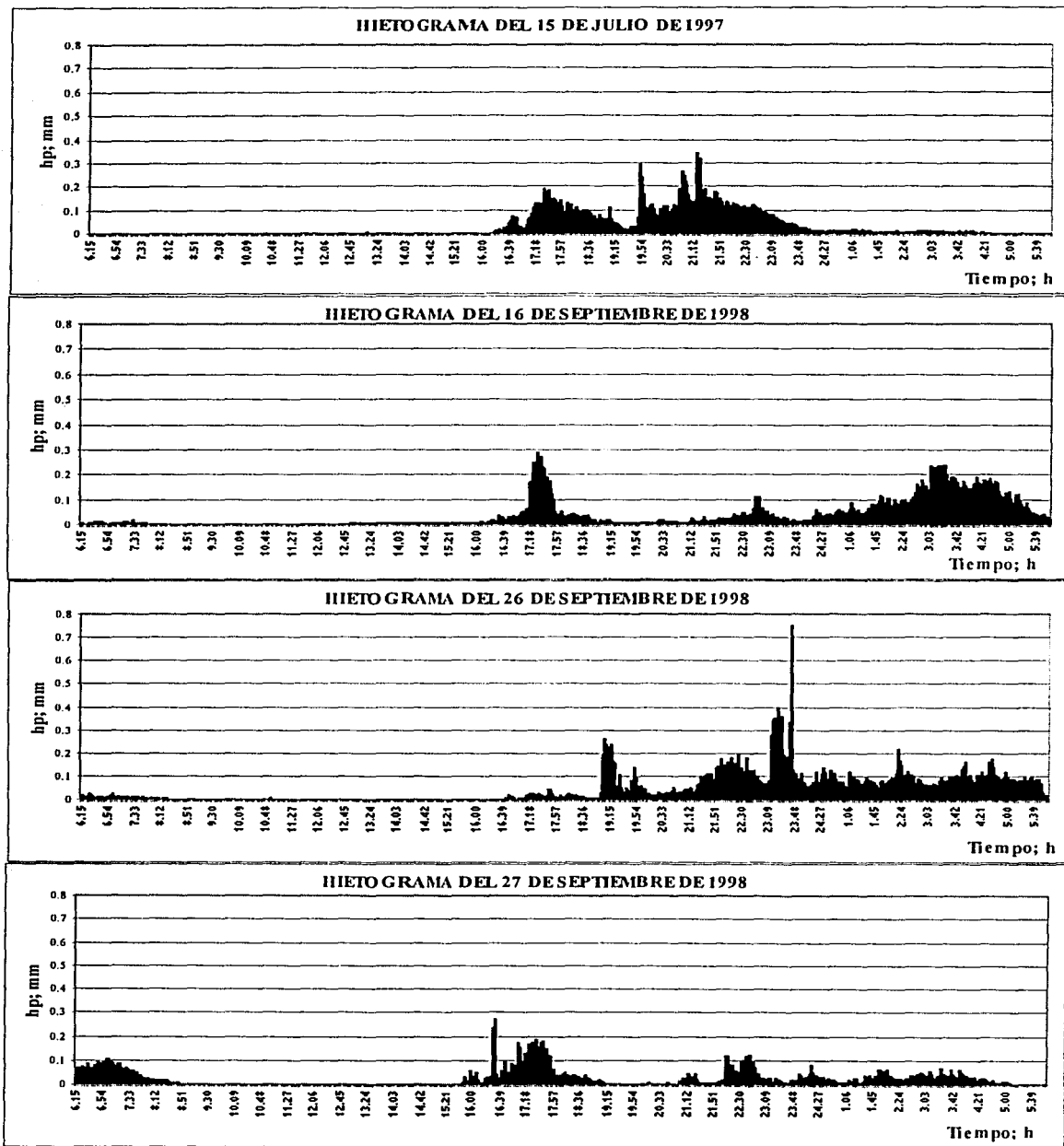


Fig. 4.3c Hietogramas de precipitaciones medias en el D.F. para cada una de las fechas seleccionadas.

IV.3 Obtención de la ecuación de calibración

Después de seleccionar las fechas de lluvia registradas por las estaciones pluviográficas y poder contar con los registros correspondientes a ellos, se solicitó al Sistema Meteorológico Nacional (SMN) información para realizar el análisis y determinar la ecuación de calibración.

Los registros de radar proporcionados por el SMN consistían en archivos con extensión .PIC, en formato binario; los cuales están formados por dos bloques, uno de 512 *bytes*, que contienen la descripción general de la imagen (fecha, hora, diámetro de cobertura, tamaño del píxel, ubicación del radar y los parámetros necesarios para la transformación de los datos a reflectividad); el segundo consta de una matriz de 240x240 píxeles, cada píxel se representa por un *byte*, un *byte* está representado por 8 *bits* que puede tener un valor de 0 o 1, por ello representa únicamente números en base dos, entonces el máximo valor que puede almacenar un *byte* es 2^8 que es 256, por lo anterior la información numérica contenida en él (*byte*) se encuentra en el intervalo de 0 a 255.

Antes de transformar la lectura del radar a datos de reflectividad, se recortó la matriz original de 240 x 240 a una matriz que delimitara el área que abarca al DF., para realizar este procedimiento se desarrolló un programa que se encargara de seleccionar dicha área, cuya dimensión fue de 49 x 66 píxeles.

Los datos obtenidos de esta matriz no corresponden directamente a la reflectividad, sino más bien a una escala de valores de ésta (0-255), por lo que fue necesario recurrir a la transformación de los datos por medio de parámetros proporcionados en el primer bloque de los archivos del radar. La transformación que proporciona el radar corresponde a una de un producto **PseudoCAPPI**, descrito con anterioridad en el capítulo I. Los datos leídos en el radar (0-255) se transformaron a reflectividad, en decibelios, por medio de la expresión siguiente

$$z = mx + b \quad (IV.4)$$

donde

z	reflectividad medida por el radar, en decibelios (dBZ)
m	parámetro de transformación (pendiente de la recta)
x	valor del pixel de la matriz de 240 X 240
b	parámetro de transformación (ordenada al origen de la recta)

los valores de los parámetros de transformación para todas las fechas fueron $m = 0.40$ y $b = -30.00$. Éstos parámetros fueron extraídos del encabezado de la imagen del radar.

En la Fig. IV.2 se muestra la representación gráfica de la ecuación de transformación, expresada por la ec. (IV.4).

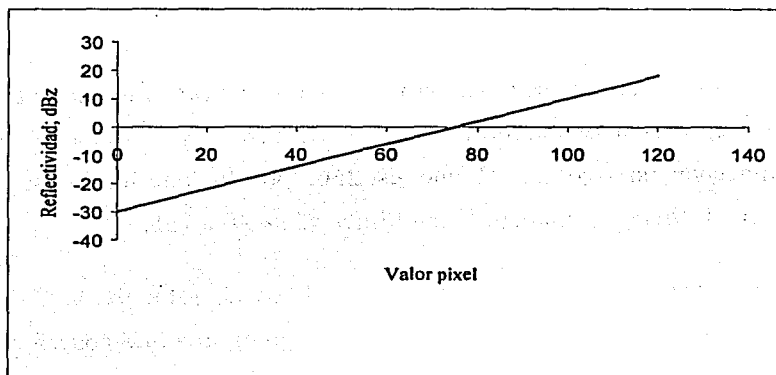


Fig. IV.2 Transformación de valores de los píxeles a reflectividad

La ecuación de transformación mencionada proporciona el valor de la reflectividad estimada por el radar en decibelios, pero es necesario el valor de la reflectividad en mm^6/m^3 , para obtener una ecuación de calibración parecida a las obtenidas por los autores mencionados en el capítulo III de este escrito. Para hacer esto último se aplicó entonces la ecuación general que relaciona el factor de reflectividad (dBZ), obtenido anteriormente, con la reflectividad en mm^6/m^3 . Para ello se recurre a la expresión

$$Z = 10^{\frac{z}{10}} \quad (\text{IV.5})$$

donde

Z	reflectividad medida en mm^6/m^3
z	reflectividad medida en dBZ

Para efectuar el procedimiento de análisis comparativo entre las mediciones del pluviógrafo y del radar para determinar la mejor ecuación de calibración ($Z = f(R)$), se usaron tres criterios, a saber:

1. Comparación de los valores de cada uno de los pixeles de la matriz correspondiente al pluviógrafo, (datos punt), con el valor de cada uno de los pixeles de la matriz de reflectividad del radar, (también datos punt).

$$(Z_{punt} - R_{punt})$$

2. Comparación del valor de cada uno de los pixeles de la matriz del pluviógrafo (datos punt), con el promedio de pixeles de 3×3 de la matriz reflectividad del radar (datos prom).

$$(Z_{prom} - R_{punt})$$

3. Comparación utilizando los promedios de pixeles de 3×3 de la matriz correspondiente al pluviógrafo (datos prom), con los promedios de 3×3 de la matriz de reflectividades del radar (datos prom).

$$(Z_{prom} - R_{prom})$$

Como condición se empleó la isoyeta de 10 mm del periodo de lluvia como parteaguas como umbral de lluvias para realizar la calibración y con esto definir el área de análisis.

Para la aplicación del primer criterio, se procedió a la elaboración de otro programa que ajustará las matrices del pluviógrafo y del radar, con el fin de lograr el acoplamiento de datos pixel por pixel; este programa es ComPunt.java, el cual recorta la matriz del radar de 49×66 a 44×56 [Programa No. 1 Anexo].

Para el segundo y tercer criterio, se utilizó el programa Comparacion.java, el cual recorta las matrices del radar y pluviógrafo a 42×54 [Programa No. 2 Anexo].

Una vez obtenidas las matrices con las mismas dimensiones, para elaborar la correlación entre los datos del pluviógrafo y del radar fue necesario colocar los datos de las matrices en pares de puntos $R - Z$ con las mismas coordenadas, en correspondencia con la posición de cada uno de los pixeles del pluviógrafo y del radar, esto porque partimos de datos conocidos que corresponden a los valores de intensidad que proporciona el pluviógrafo (R), y pretendemos obtener su correspondiente valor de reflectividad (Z), obteniendo entonces una función de tipo $R = f(Z)$, donde los valores de Reflectividad (Z) e Intensidad (R) que corresponden a las variables independiente y dependiente, respectivamente.

Se consideró un retraso de 15 minutos en los datos del pluviógrafo, haciendo la suposición de que la lluvia registrada por el radar se registra 15 minutos antes que lo haga el pluviógrafo. Este criterio es un resultado obtenido de estudios anteriores realizados en el Instituto de Ingeniería [Ref. 10].

Se ordenaron los pares de puntos $R - Z$ para cada una de las fechas y los criterios seleccionados a cada intervalo y, para obtener la ecuación de calibración, se requirió unir todos los datos anteriores en un solo conjunto de pares de puntos ordenados. Por tanto, para cada fecha se analizaron un total de tres grupos de datos correspondientes a los tres criterios descritos al inicio de éste subcapítulo.

$$(Z_{punt} - R_{punt}, Z_{prom} - R_{punt}, Z_{prom} - R_{prom}).$$

La información anterior se filtró de tal modo que para la cuenca del Río Mixcoac no se consideraron registros de pluviógrafo con intensidades menores a 1 mm/h, esto se hizo para eliminar errores de interpolación generados por el **SURFER**, ni tampoco se consideraron valores de reflectividad menores a $10 \text{ mm}^6/\text{m}^3$, pues valores menores o iguales a éste podían representar polvo o contaminación en lugar de lluvia.

La ecuación de ajuste a utilizarse es de forma exponencial ya que se pretende llegar a una forma aproximada a las ecuaciones de calibración del radar como son las presentadas en el

capítulo III de éste trabajo obtenidas por otros autores, por tanto, la ecuación de ajuste se escribe como

$$R = aZ^b \quad (\text{IV.6})$$

donde

- R intensidad de lluvia, en mm/h
- Z reflectividad, en mm^6/m^3
- a y b coeficientes que dependen del ajuste realizado, así como del tipo de lluvia que se presenta

Para cada uno de los pares de puntos mencionados anteriormente se encontraron tres ecuaciones de ajuste; la primera, considerando todos los puntos; las otras dos corresponden a la separación por tipo de lluvias. En estudios anteriores hechos por el Instituto de Ingeniería [Ref. 10], se determinó que el valor del umbral entre lluvias convectivas y estratiformes fue de $1259 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ (31 dBZ), es decir, para datos de reflectividad menores a $1259 \text{ mm}^6/\text{m}^3$, correspondía a lluvias estratiformes y para mayores a lluvias convectivas.

Con los datos obtenidos en los procedimientos anteriores se generaron nueve curvas de ajuste por medio del programa *gnuplot*, y para cada uno de ellos, se calculó su coeficiente de determinación, que corresponde al cuadrado del coeficiente de correlación. El coeficiente de correlación, se utiliza como una medida comparativa entre los diferentes ajustes que se determinaron en cada caso, si el valor de la correlación tiende a ser 1 se considera que el ajuste es bueno.

La ecuación que se utilizó para calcular el coeficiente de correlación está dado por la expresión

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y - y')^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}} \quad (\text{IV.7})$$

donde

r	coeficiente de correlación
y	punto de en análisis
y'	ecuación de la curva de ajuste.
\bar{y}	media de la muestra

La ecuación de calibración se obtiene utilizando gráficas logarítmicas por lo que es necesario determinar la correlación a partir de los logaritmos de los pares de puntos correlacionados.

Los ajustes, estimados de la calibración de cada uno de los criterios mencionados anteriormente, y sus correspondientes coeficientes de correlación se presentan en la tabla que se muestra a continuación:

	Ecuación de ajuste	Datos utilizados	Coefficiente de correlación
1	$R = 1.18428383Z^{0.177408}$	$Z_{prom} - R_{prom} (todos)$	$r = 0.43183677$
2	$R = 1.22134737Z^{0.17382}$	$Z_{prom} - R_{punt} (todos)$	$r = 0.42066138$
3	$R = 1.42259409Z^{0.155209}$	$Z_{punt} - R_{punt} (todos)$	$r = 0.38545817$
4	$R = 0.60052487Z^{0.262251}$	$Z_{prom} - R_{prom} (Convectivas)$	$r = 0.40835034$
5	$R = 2.21392549Z^{0.0636411}$	$Z_{prom} - R_{prom} (Estratiformes)$	$r = 0.1147044$
6	$R = 0.57446424Z^{0.267255}$	$Z_{prom} - R_{punt} (Convectivas)$	$r = 0.40717195$
7	$R = 2.27484075Z^{0.0600826}$	$Z_{prom} - R_{punt} (Estratiformes)$	$r = 0.10781512$
8	$R = 0.64296895Z^{0.252888}$	$Z_{punt} - R_{punt} (Convectivas)$	$r = 0.39098338$
9	$R = 2.4390292Z^{0.0548068}$	$Z_{punt} - R_{punt} (Estratiformes)$	$r = 0.09763319$

Con los resultados de la tabla anterior, se efectuó la selección de los dos ajustes cuyo coeficiente de correlación fuera el que tuviera el mayor valor dentro de los nueve propuestos, por lo que las ecuaciones elegidas para la estimación de la lluvia en este trabajo, resultaron ser los ajustes 1 y 2 (que cumplen con los criterios 2 y 3, además de que ambos ajustes emplean la condición de usar la isoyeta de 10 mm como frontera (Fig. IV.3 y Fig. IV.4).

En las Figs. IV.3 y IV.4, y con los datos de la intensidad $R(mm/h)$ y la reflectividad $Z(mm^6/m^3)$ se construyó la gráfica de $R-Z$ para obtener la ecuación de calibración para este caso. En estas figuras se incluyó el trazo de la recta que representa la ecuación de Marshall - Palmer (ec. III.2), como comparación con los ajustes obtenidos en este estudio. Cabe destacar que en éstas figuras, se observa que, debido a la dispersión de algunos valores hacia los ejes X y Y, la curva de ajuste no sigue la tendencia de la mayoría de los puntos.

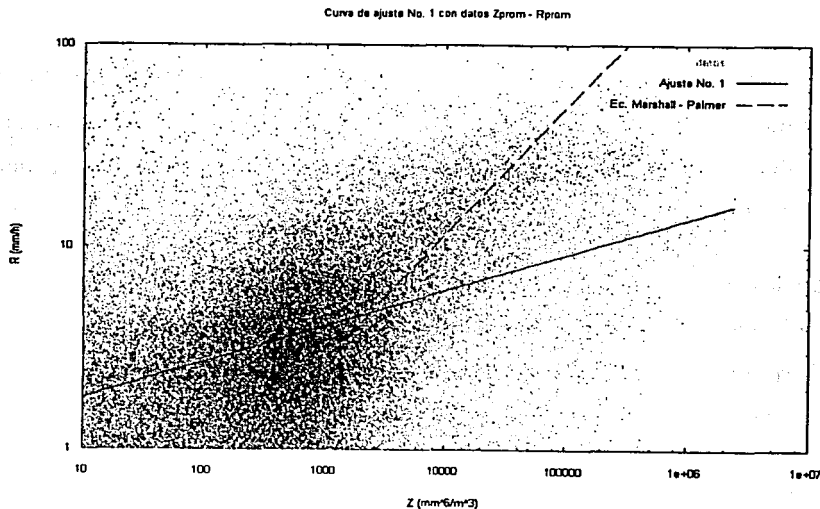


Fig. IV.3 Curva de ajuste 1 con datos $Z_{prom} - R_{prom}$

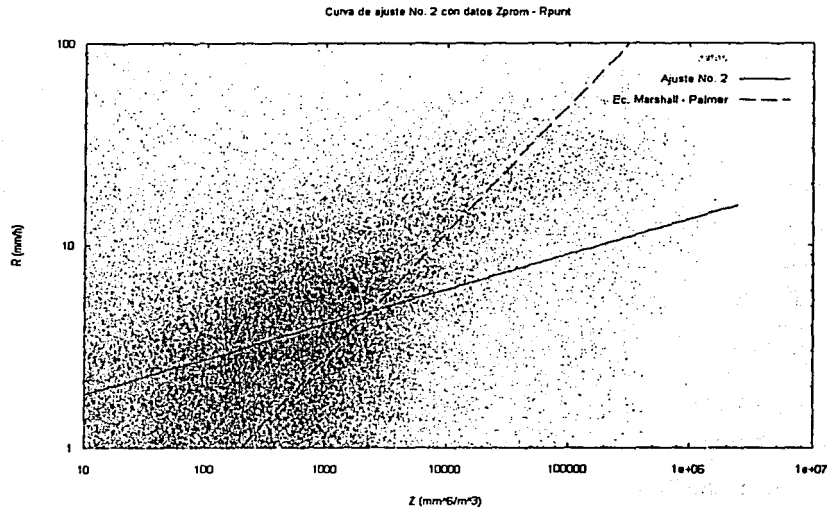


Fig. IV.4 Curva de ajuste 2 con datos $Z_{prom} - R_{punt}$

IV.4 Estimación de la lluvia a partir de la ecuación de calibración

Se estimó la lluvia a partir de las ecuaciones seleccionadas como las mejores en la calibración hidrológica y de la de Marshall - Palmer (ec. III.2), ya que ésta ecuación la tiene integrada en el software de despliegue de imágenes captadas por el radar meteorológico del cerro “La Catedral”.

El valor de las precipitaciones medias sobre la cuenca del Río Mixcoac, se obtuvo para cada una de las anteriores ecuaciones y para el pluviógrafo con la ec. (IV.3) y se determinaron sus correspondientes curvas masa, (que es la representación gráfica de la precipitación acumulada con respecto al tiempo).

La comparación de las curvas masa obtenidas con las ecuaciones de ajuste del radar y la del pluviógrafo permitió observar que tan buena era la aproximación de los ajustes al utilizar los datos del pluviógrafo para la estimación de lluvia.

Al revisar las curvas masa acumuladas de todas las fechas fue notorio que de los ajustes obtenidos, no existía alguno que realmente siguiera la tendencia de las curvas masa acumuladas del pluviógrafo, esto es, las curvas masa estimadas a partir de las ecuaciones de ajuste presentan valores de precipitación muy grandes y no permitían ver lo observado por el pluviógrafo (Fig. IV.5), por lo que fue necesario obtener una nueva ecuación de calibración.

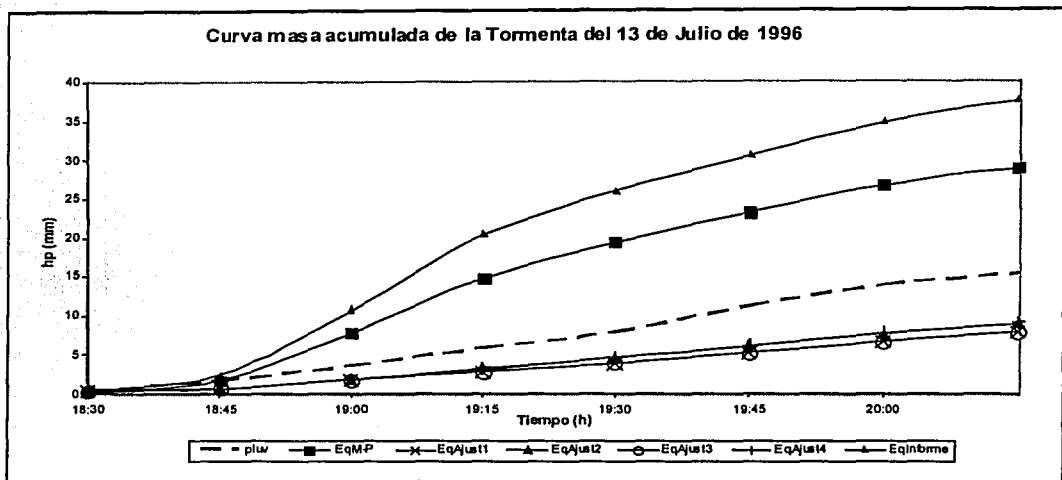


Fig. IV.5 Ejemplo de curva masa acumulada con las calibraciones obtenidas

La nueva propuesta de calibración se obtuvo gráficamente promediando las curvas de ajuste seleccionadas con anterioridad en la hoja logarítmica, incluyendo en esta gráfica, la curva de la ecuación de Marshall - Palmer. Para la nueva propuesta de ecuación de ajuste, se buscó calcular una ecuación que estuviera dentro del rango que delimitaban los promedios de las curvas de ajuste obtenidas en el estudio realizado por el Instituto de Ingeniería [Ref. 10] y los promedios de los ajustes obtenidos en este trabajo, la propuesta entonces se obtuvo en la curva llamada Ajuste No. 3 y se muestra en la Fig. IV.6.

La ecuación resultante con los promedios de las ecuaciones del informe del Instituto y los promedios de las ecuaciones de este trabajo resultó la que a continuación se muestra

$$R = 0.16998638Z^{0.44584686} \quad (\text{IV.8})$$

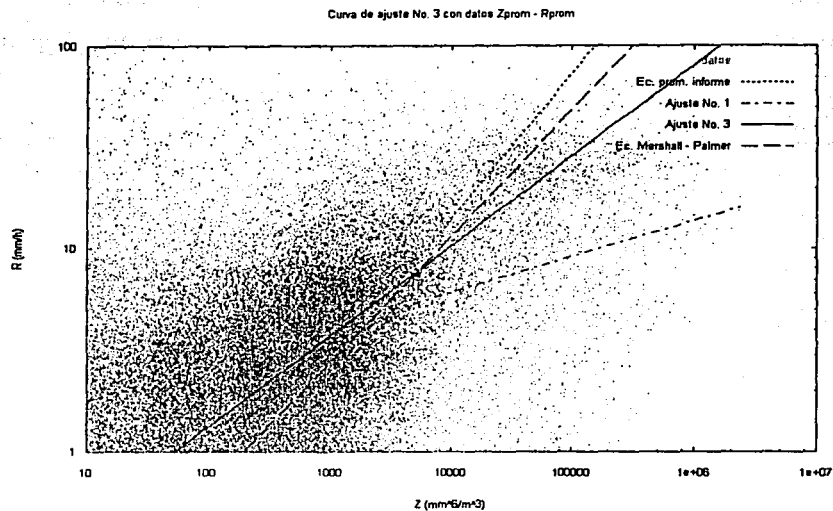


Fig. IV.6 Curva de ajuste No. 3 con promedios de los ajustes obtenidos anteriormente y calibración propuesta por el Instituto, con datos $Z_{\text{prom}} - R_{\text{prom}}$

Al calcular el coeficiente de determinación de la ec. (IV.8) se presentó el valor negativo de $r^2 = -0.314826$, debido a que la curva se forzó a pasar entre las curvas promedio de los ajustes obtenidos en este trabajo y los promedios de las ecuaciones del informe del Instituto y por tanto no necesariamente seguía con la tendencia de la acumulación de los datos de intensidades (R) y reflectividades (Z) de las tormentas analizadas.

A la nueva ecuación de calibración, se le aplicó el mismo procedimiento que al de las ecuaciones de calibración obtenidas anteriormente, y una vez desarrollado esto, se dibujaron las curvas masa acumuladas correspondientes al pluviógrafo, la que representa la ecuación de Marshall - Palmer y la del ajuste corregido ec. (IV.8).

Cuando se trazaron las curvas masa mencionadas anteriormente, se logró una mejor aproximación a la tendencia de la curva del pluviógrafo en varias tormentas, aunque en otras no se ajustó tan bien. Aún con los resultados obtenidos de esta manera, se eligió ésta calibración, ya que era la que presentó el mejor resultado cuando se hizo la comparación con los datos de pluviógrafo.

V. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para las tormentas seleccionadas se escogió el modo de presentación siguiente:

Para cada tormenta:

- a) Hietogramas de precipitación media, obtenidos con promedios de matrices de 3x3 pixeles para las estaciones pluviográficas, con la ecuación de calibración obtenida ec. (IV.8) y en los cálculos hechos usando la fórmula de Marshall – Palmer ec. (III.2), tomando en consideración el retraso de 15 minutos que se debe tomar en cuenta en los pluviógrafos (Figs. V.1).

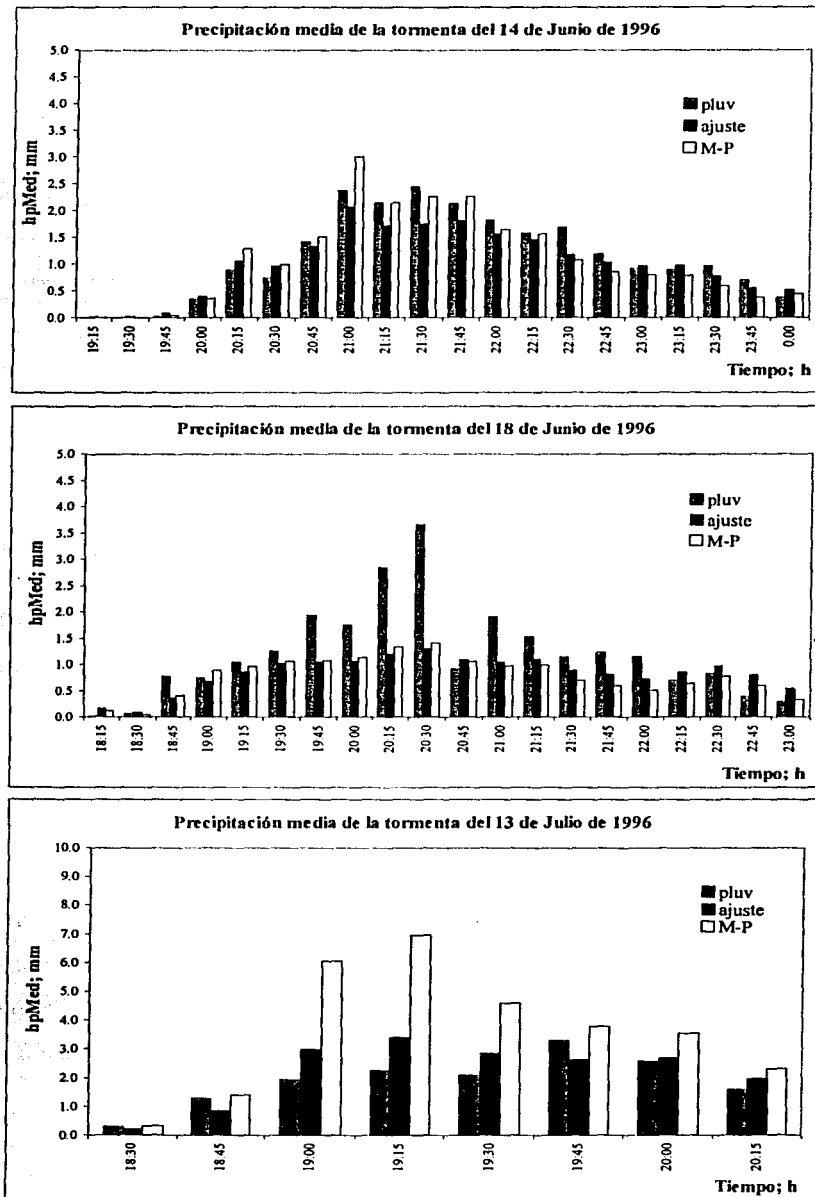


Fig. V.1a Hietogramas de precipitación media para cada una de las tormentas de análisis

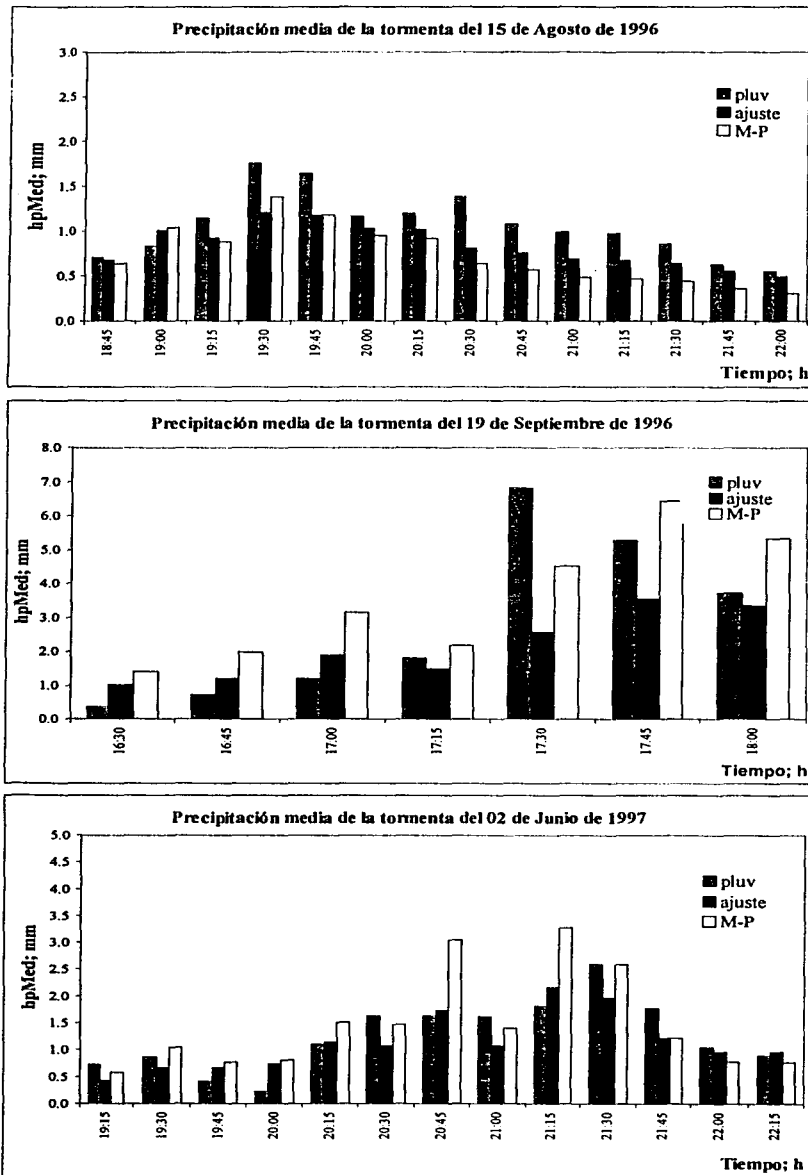


Fig. V.1b Hietogramas de precipitación media para cada una de las tormentas de análisis

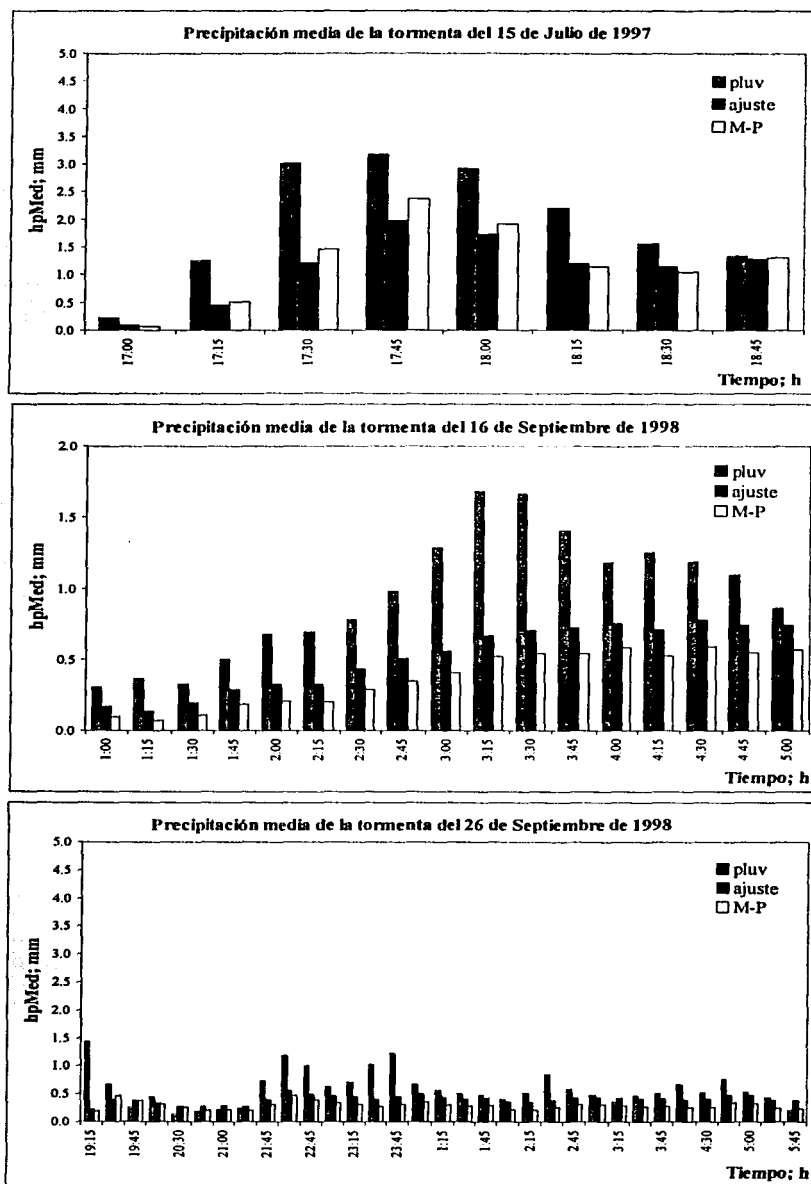


Fig. V.1c Hietogramas de precipitación media para cada una de las tormentas de análisis

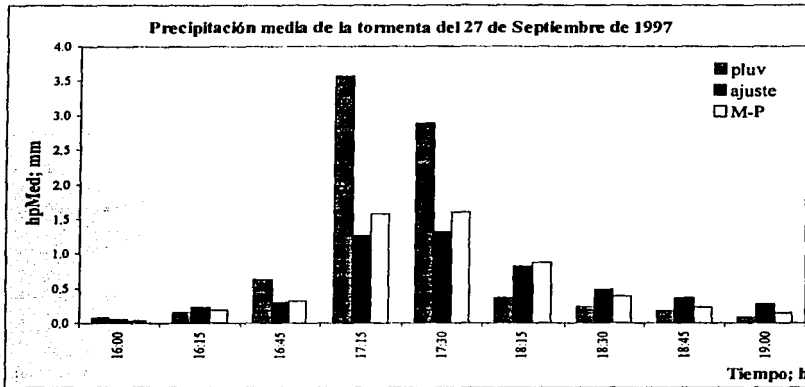


Fig. V.1d Hietogramas de precipitación media para cada una de las tormentas de análisis

- b) Curvas de comparación de precipitación media, obtenidas con promedios de matrices de 3x3 pixeles para las estaciones pluviográficas, con la ecuación de calibración obtenida ec. (IV.8) y en los cálculos hechos usando la fórmula de Marshall – Palmer ec. (III.2), tomando en consideración el retraso de 15 minutos que se debe tomar en cuenta en los pluviógrafos (Figs. V.1) y para pluviógrafos precipitaciones medios mayores o iguales a 0.8 mm.

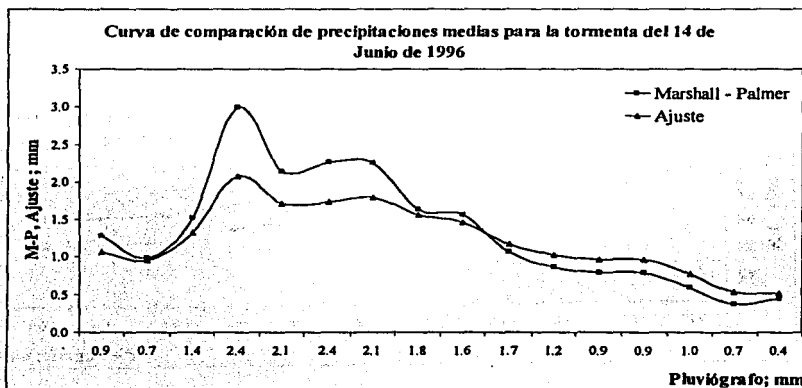


Fig. V.2a Curvas de comparación de precipitaciones medias entre la ecuación de Ajuste y la ecuación de Marshall – Palmer para las tormentas seleccionadas.

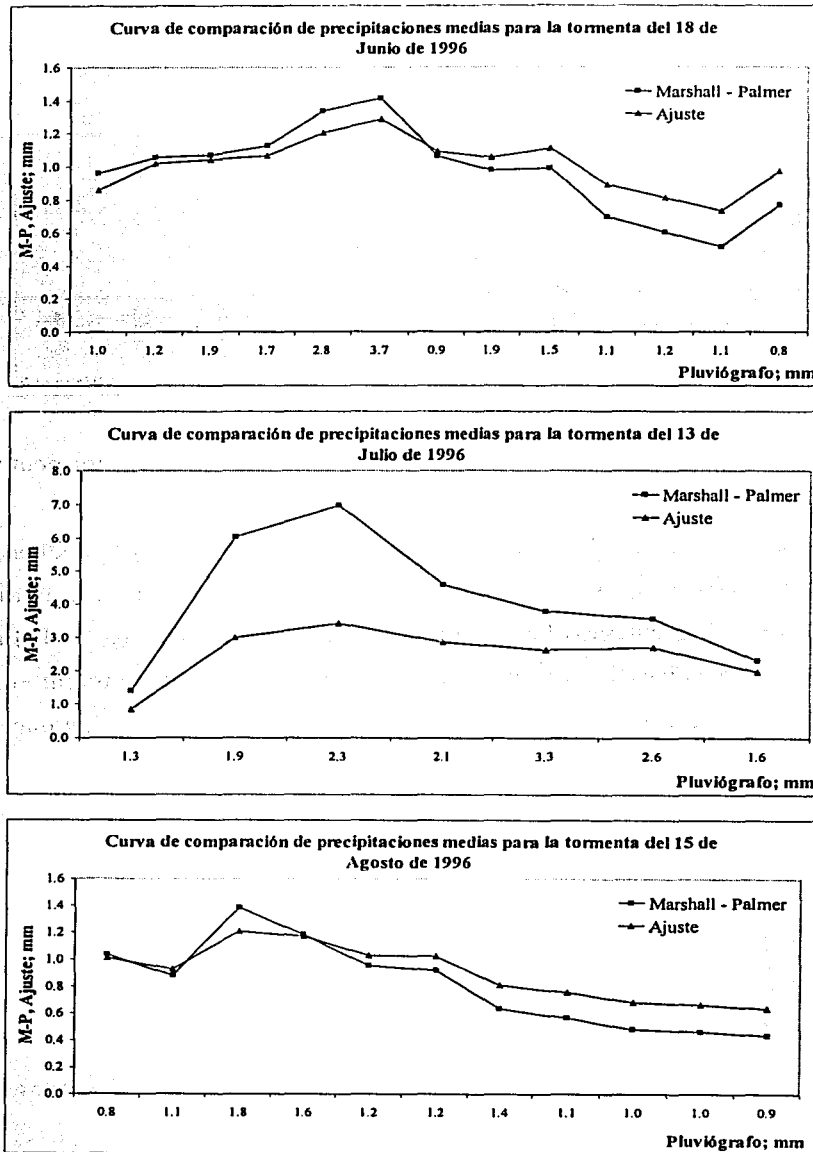


Fig. V.2b Curvas de comparación de precipitaciones medias entre la ecuación de Ajuste y la ecuación de Marshall – Palmer para las tormentas seleccionadas.

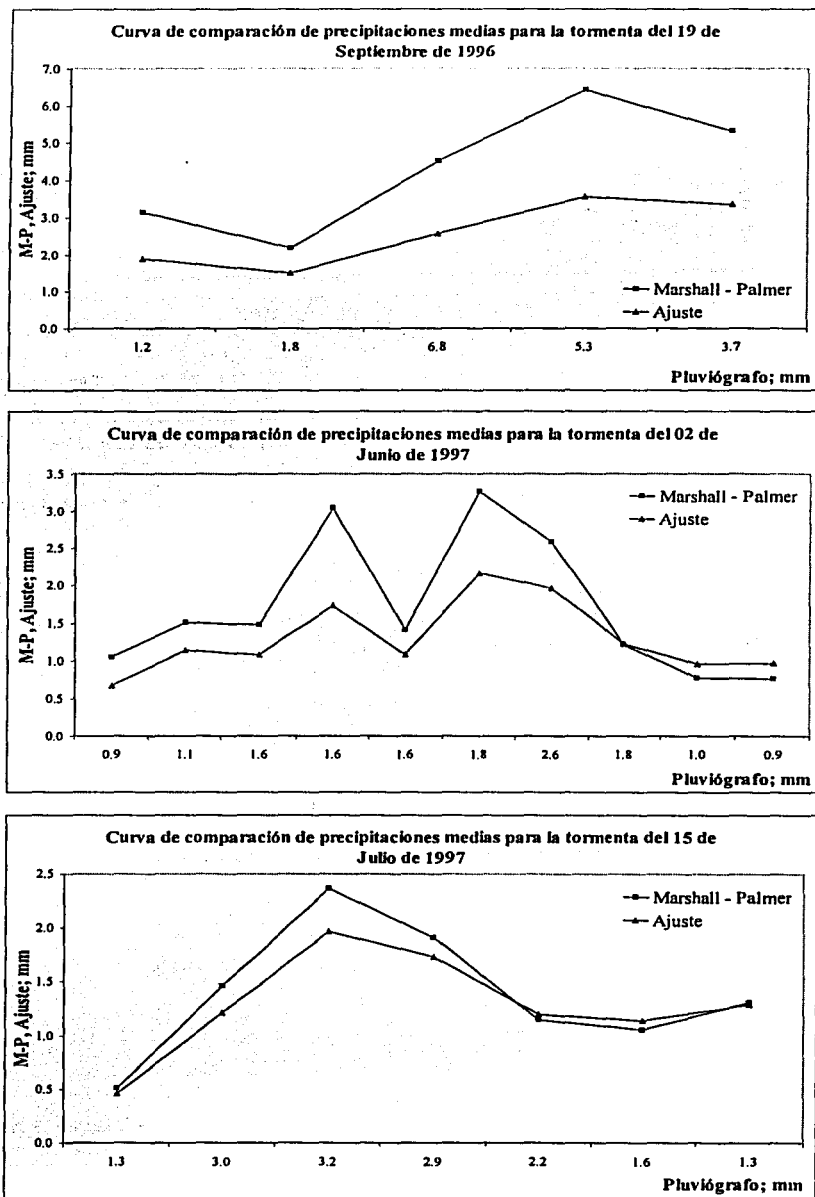


Fig. V.2c Curvas de comparación de precipitaciones medias entre la ecuación de Ajuste y la ecuación de Marshall – Palmer para las tormentas seleccionadas.

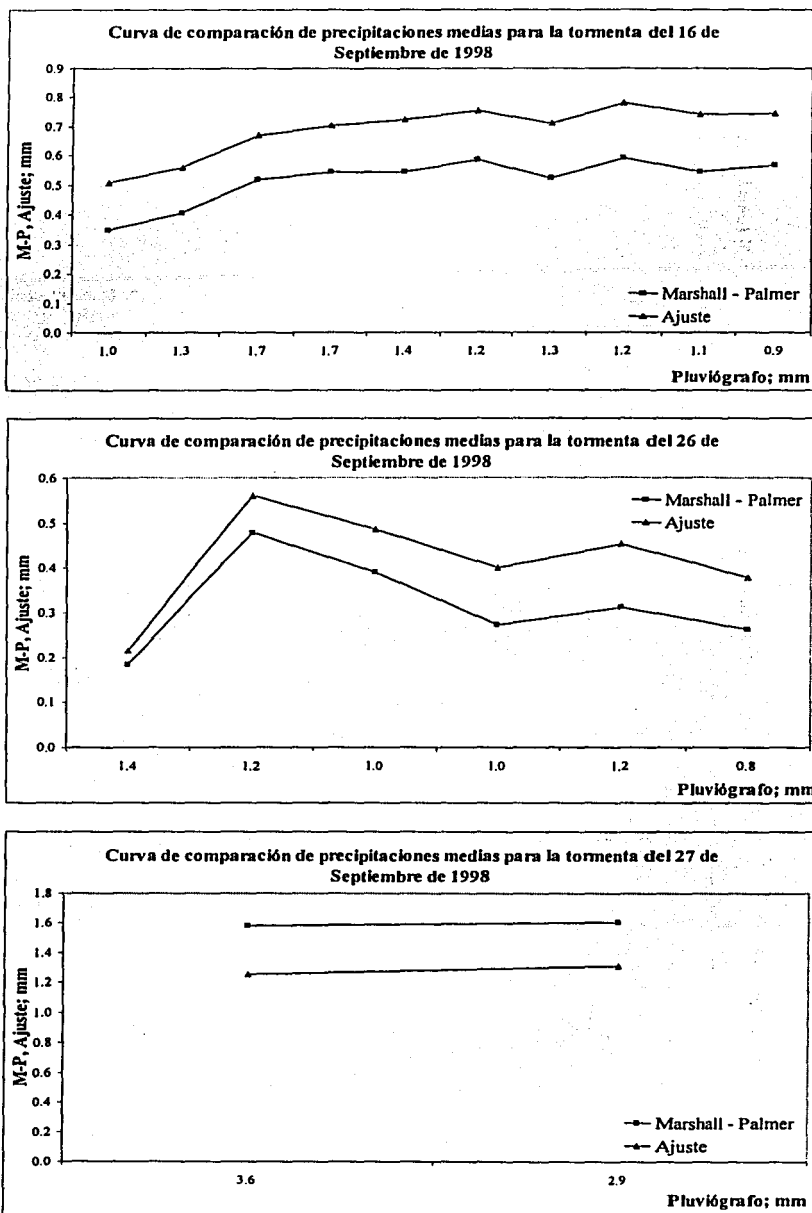


Fig. V.2d Curvas de comparación de precipitaciones medias entre la ecuación de Ajuste y la ecuación de Marshall – Palmer para las tormentas seleccionadas.

- c) Curva de precipitaciones medias acumuladas de pluviógrafos, estimadas con la mejor calibración, la ecuación de Marshall – Palmer y las curvas obtenidas a partir de las ecuaciones calculadas en el informe del Instituto que sirvió como antecedente para el trabajo (Figs. V.3).

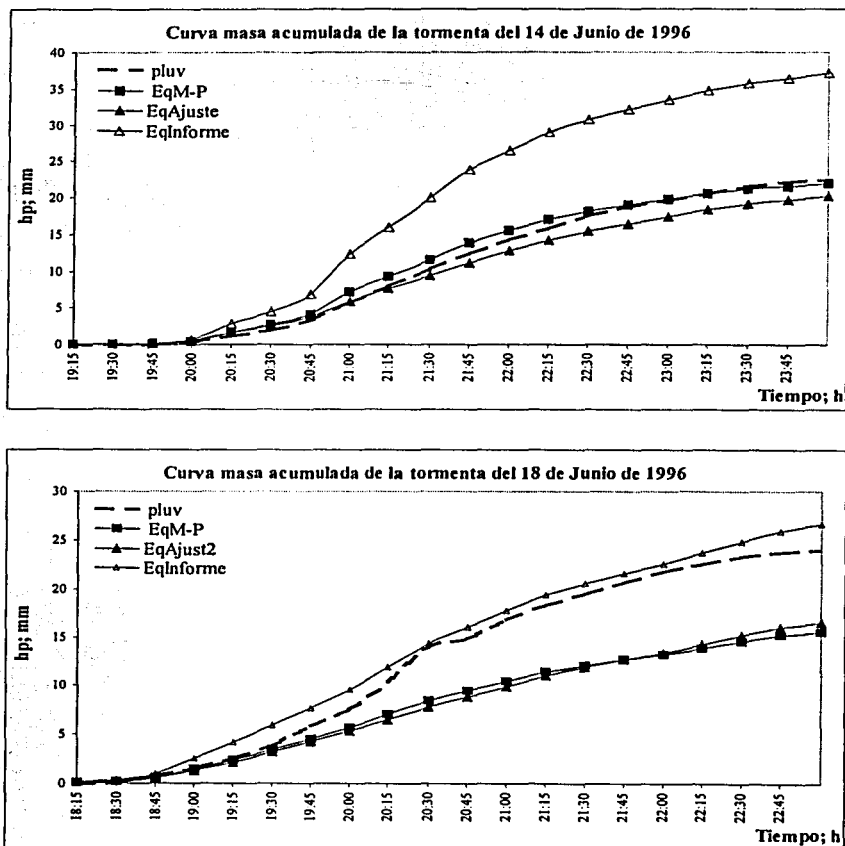


Fig. V.3a Curvas de precipitaciones medias acumuladas para cada una de las tormentas de análisis.

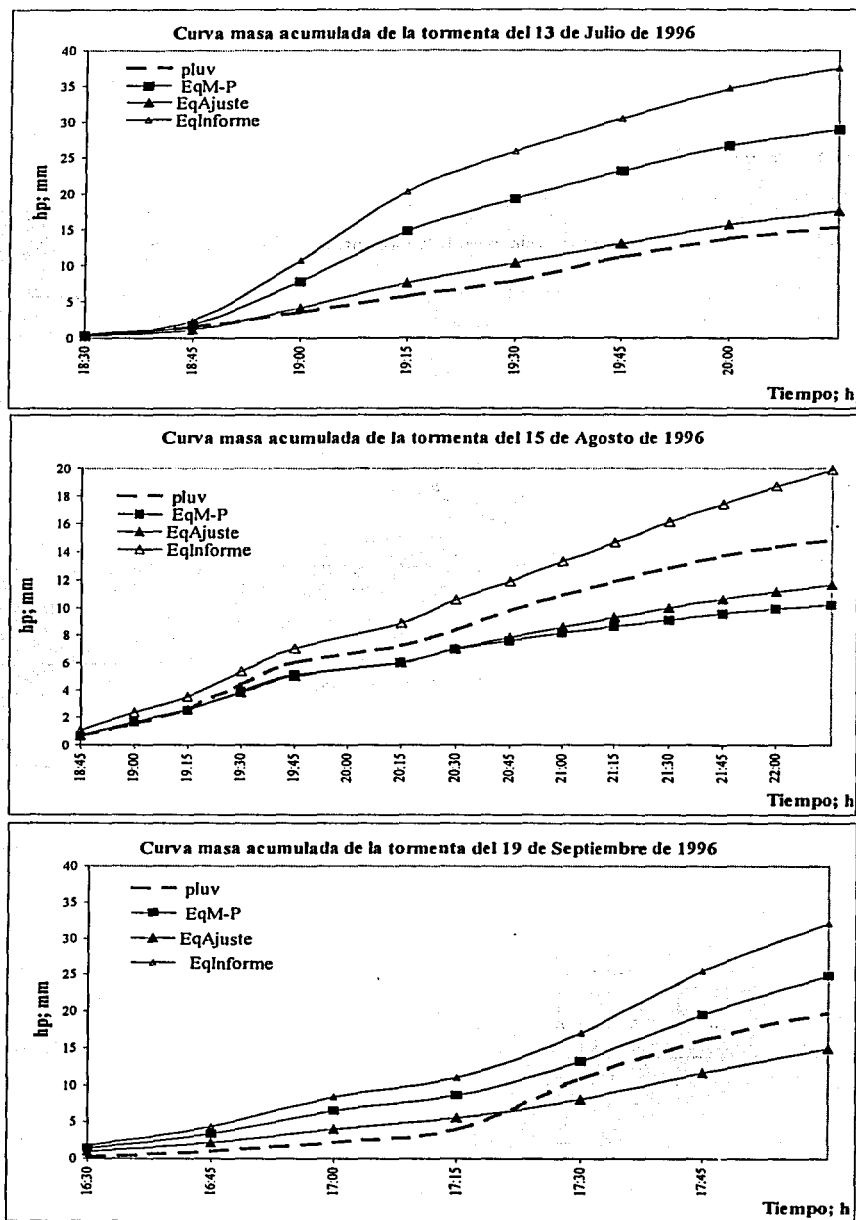


Fig. V.3b Curvas de precipitaciones medias acumuladas para cada una de las tormentas de análisis.

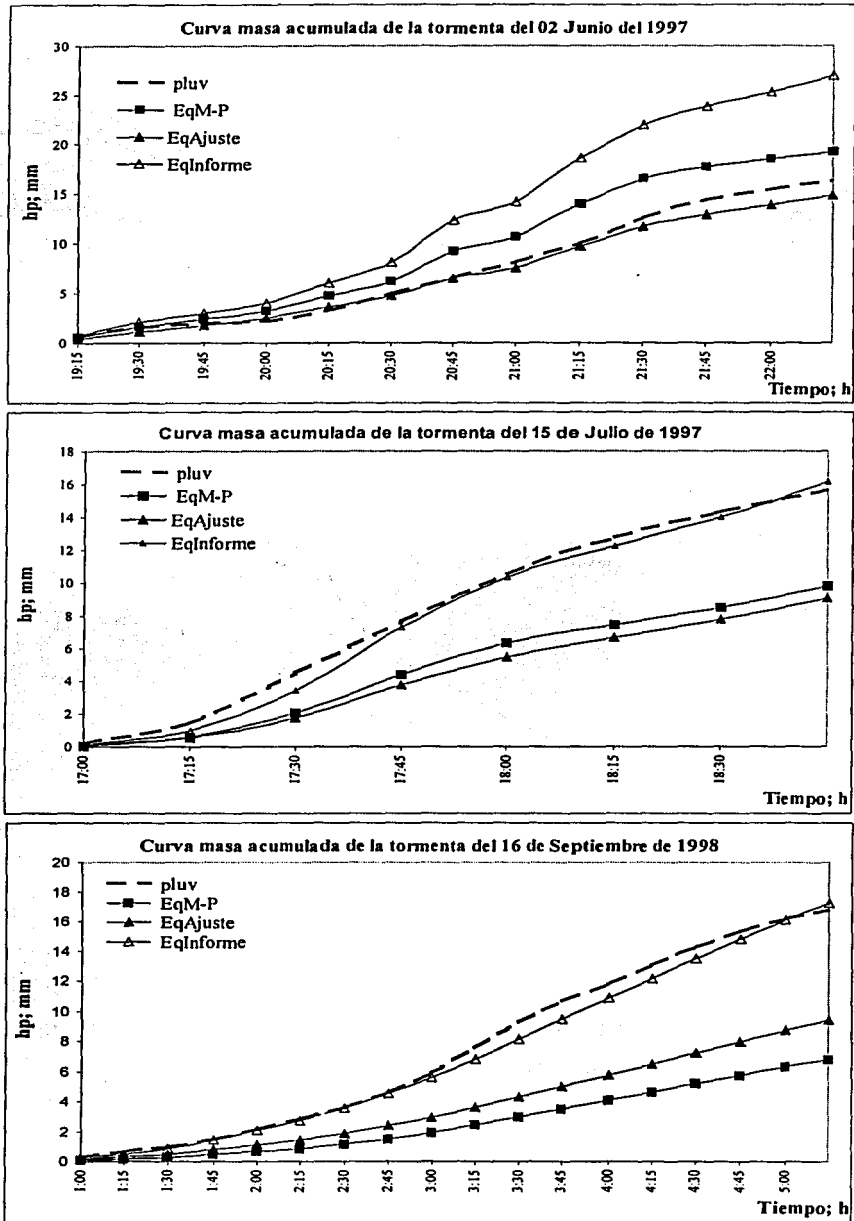
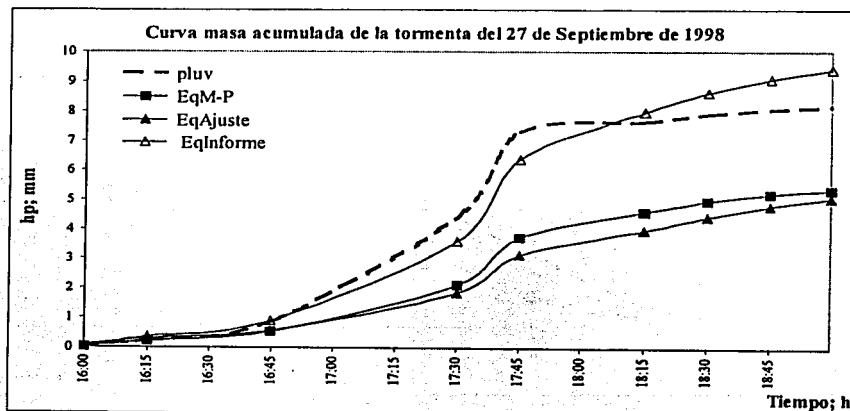
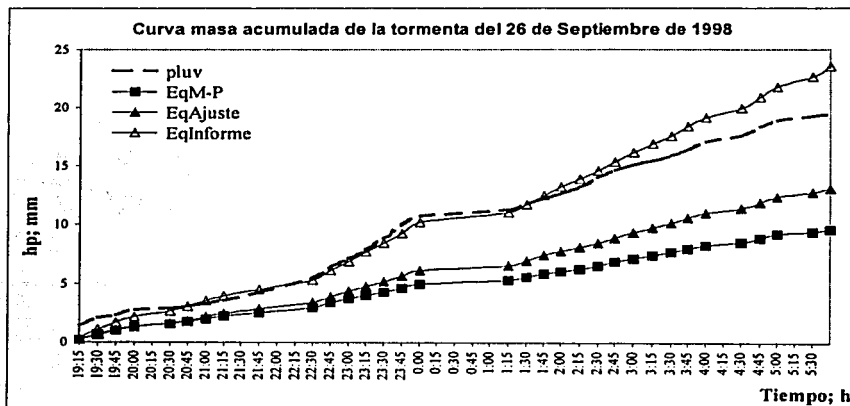


Fig. V.3c Curvas de precipitaciones medias acumuladas para cada una de las tormentas de análisis.



d) Imágenes de cada una de las tormentas acumuladas generadas en *SURFER*, representadas por isoyetas, vistas en planta y en isométrico (Figs. V.4).

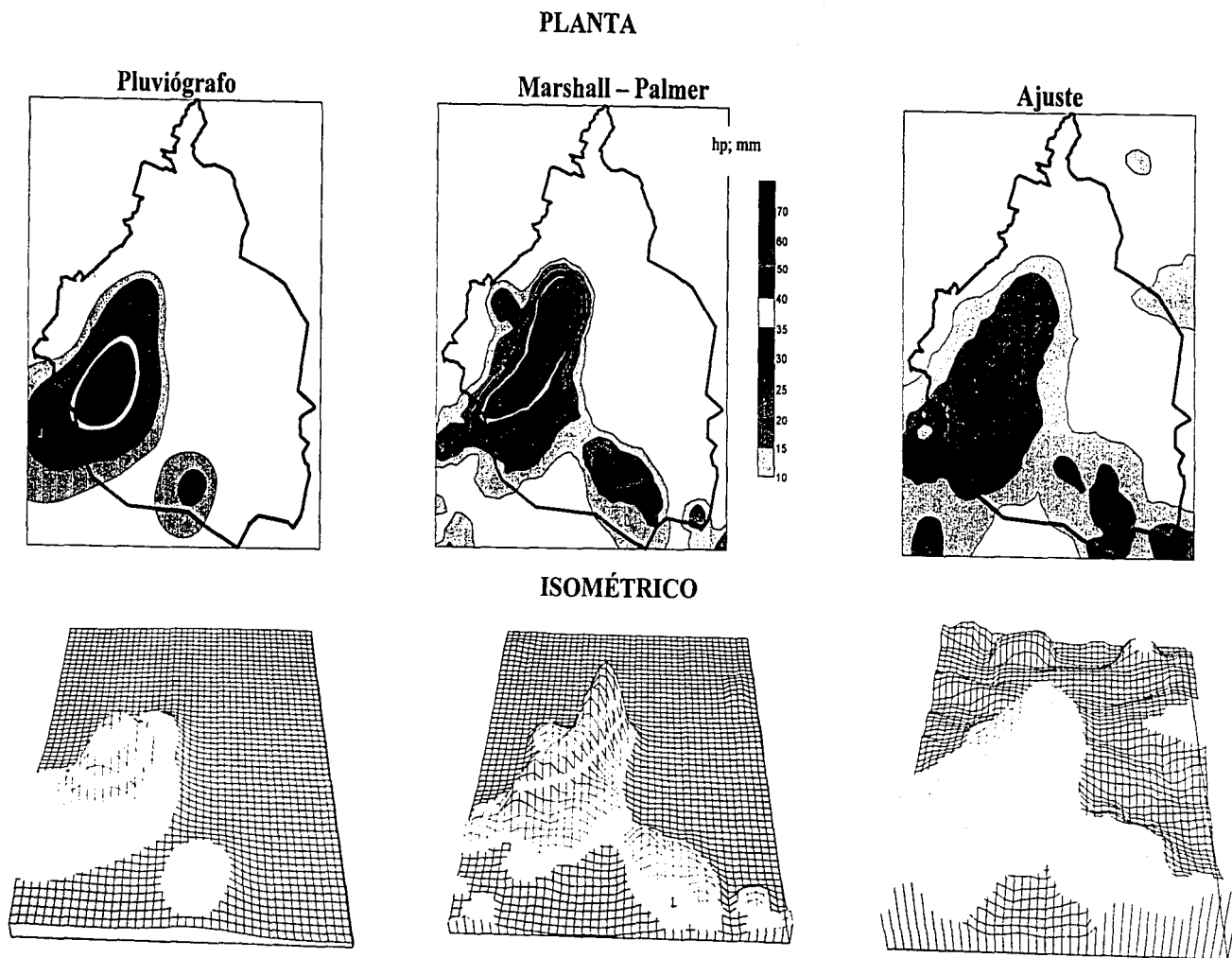


Fig. V.4a Imágenes de la Tormenta acumulada del 14 de Junio de 1996

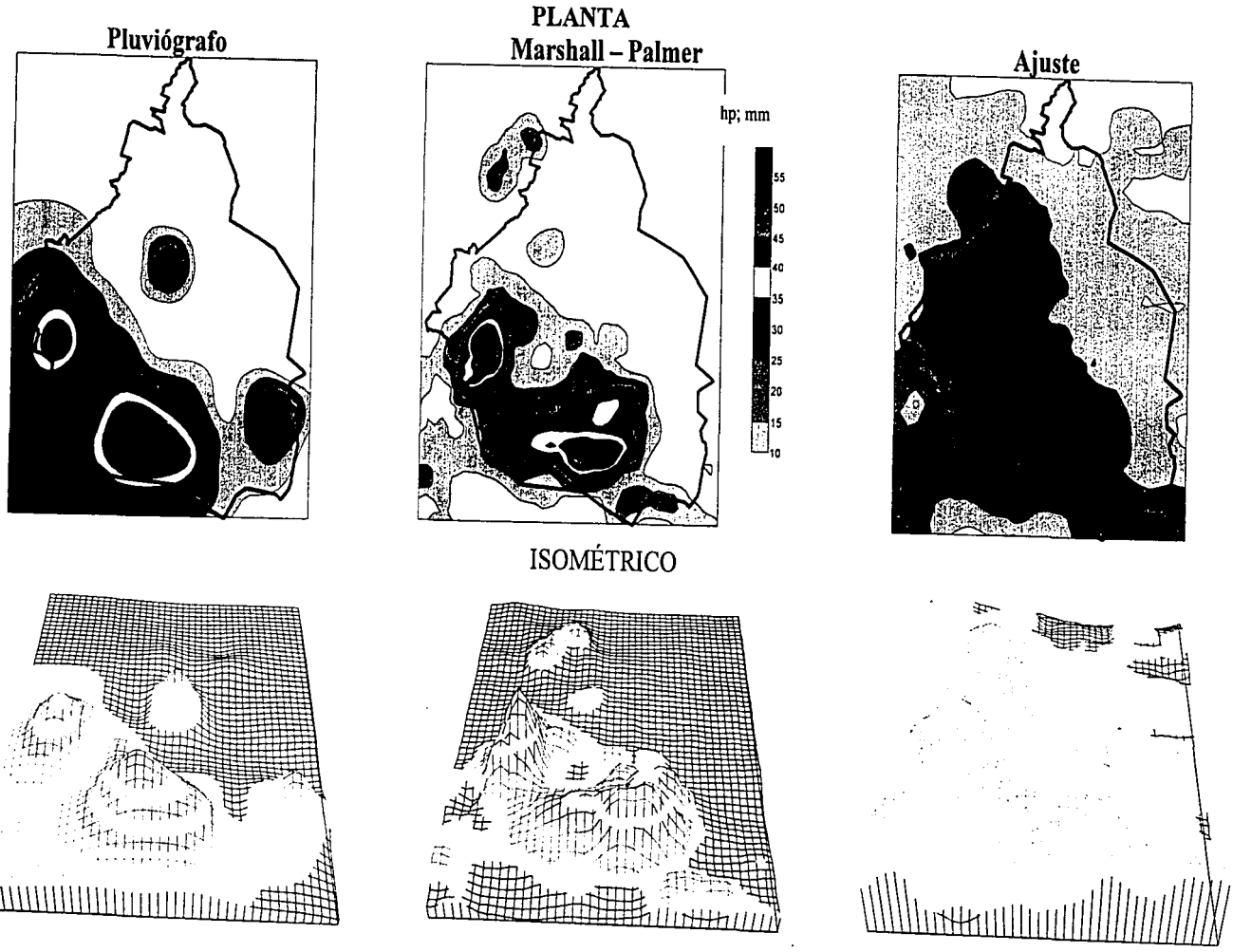


Fig. V.4 b Imágenes de la Tormenta acumulada del 18 de Junio de 1996

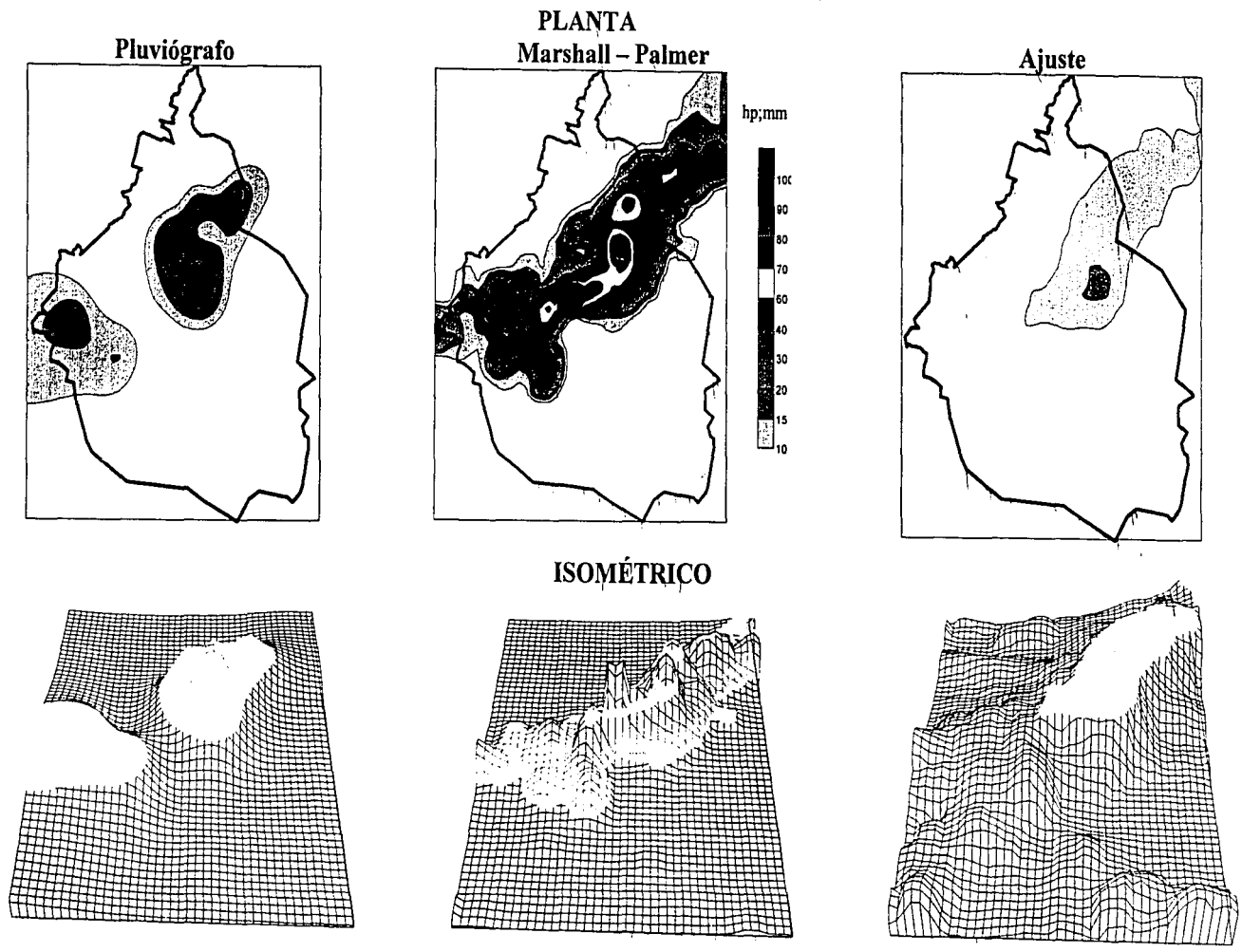


Fig. V.4c Imágenes de la Tormenta acumulada del 13 de Julio de 1996

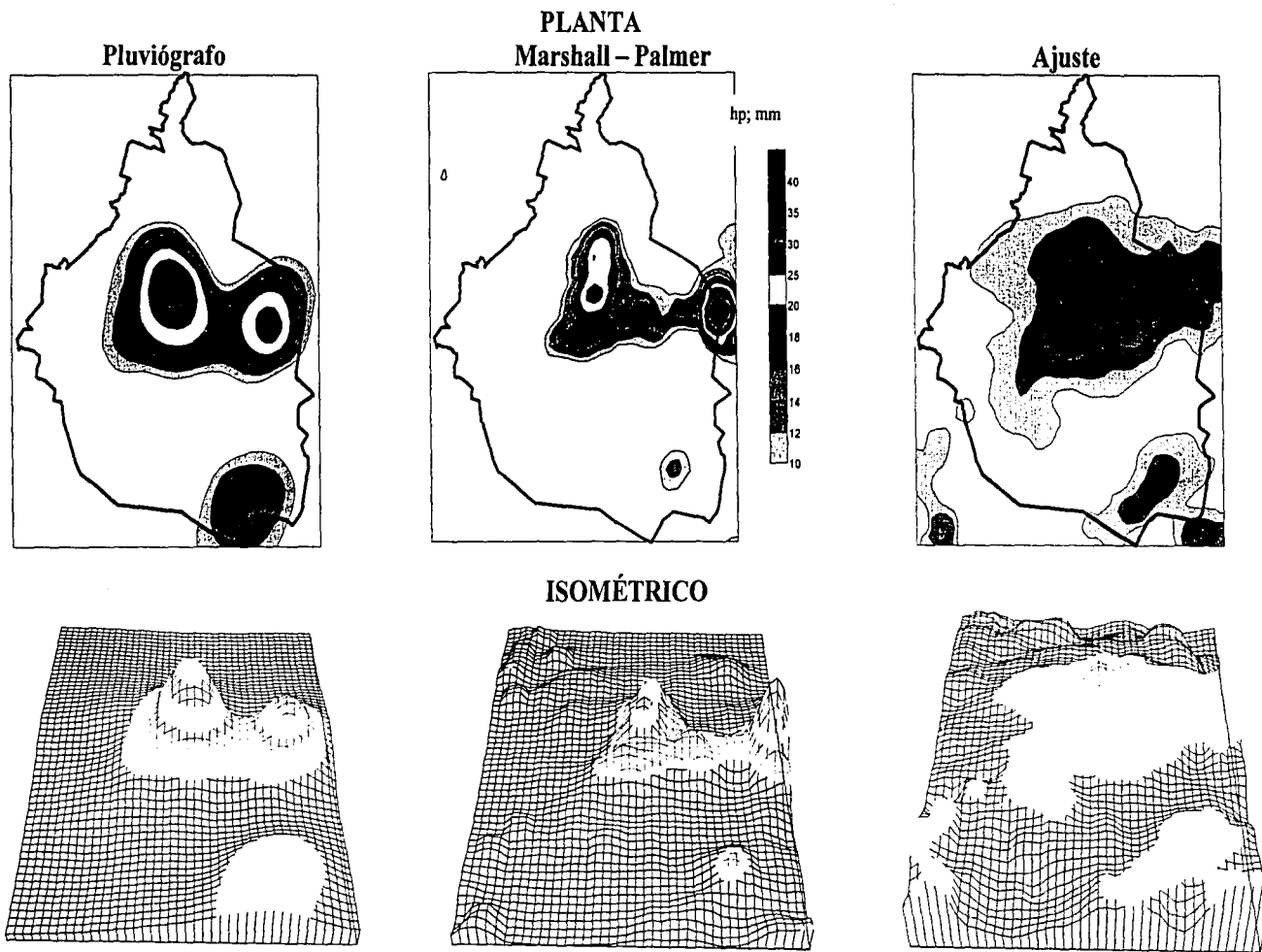


Fig. V.4d Imágenes de la Tormenta acumulada del 15 de Agosto de 1996

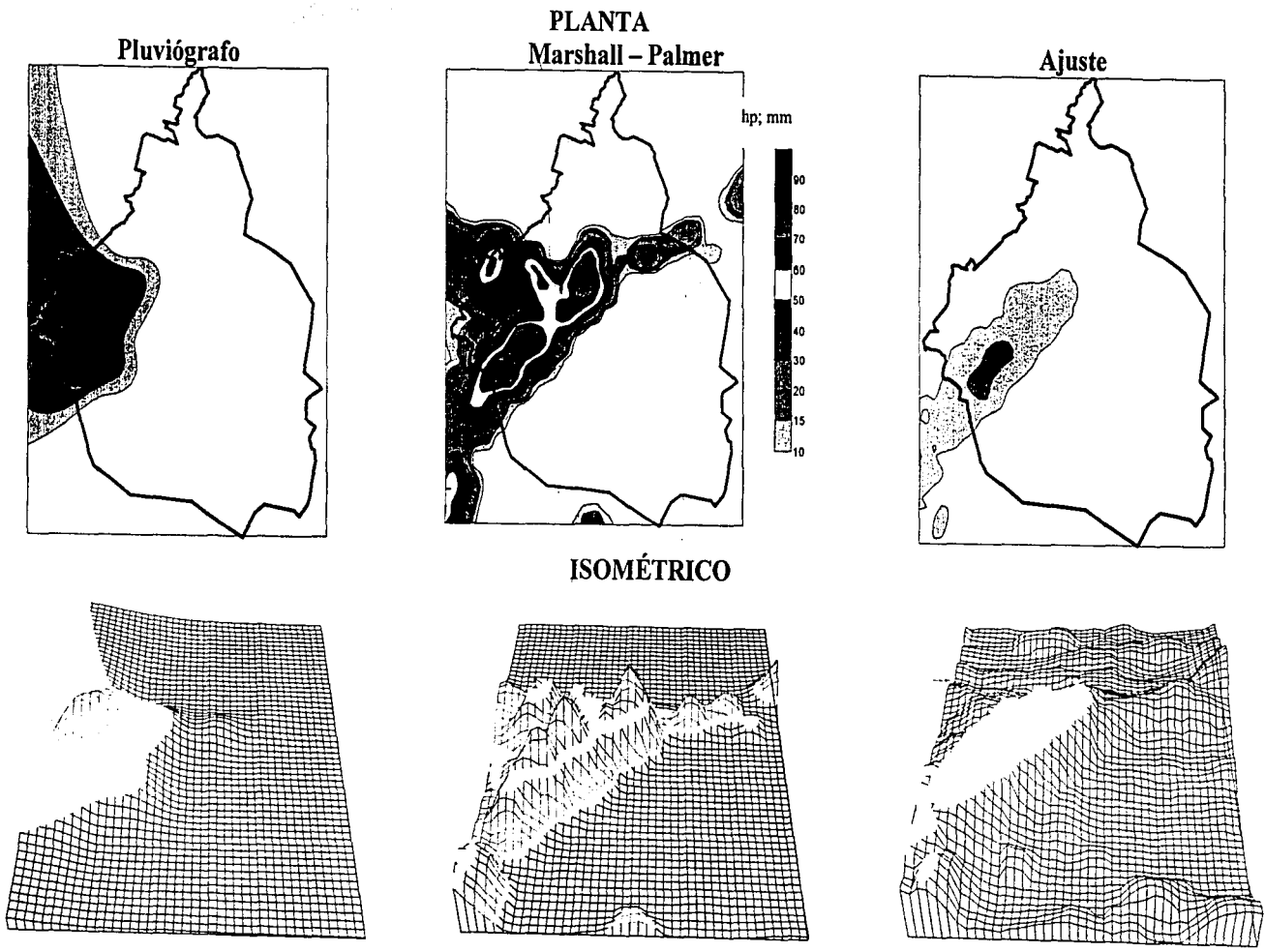


Fig. V.4e Imágenes de la Tormenta acumulada del 19 de Septiembre de 1996

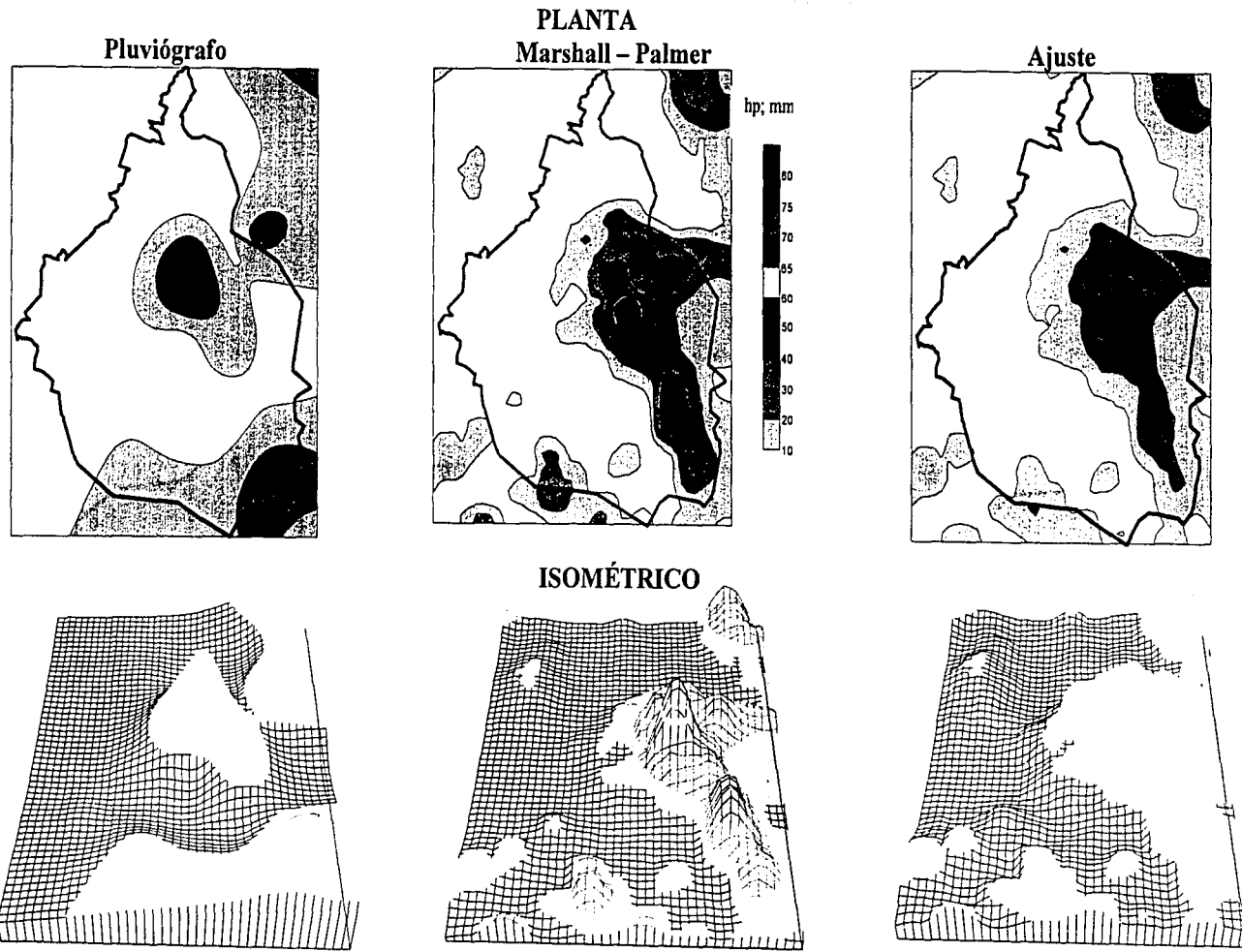


Fig. V.4f Imágenes de la Tormenta acumulada del 02 de Junio de 1997

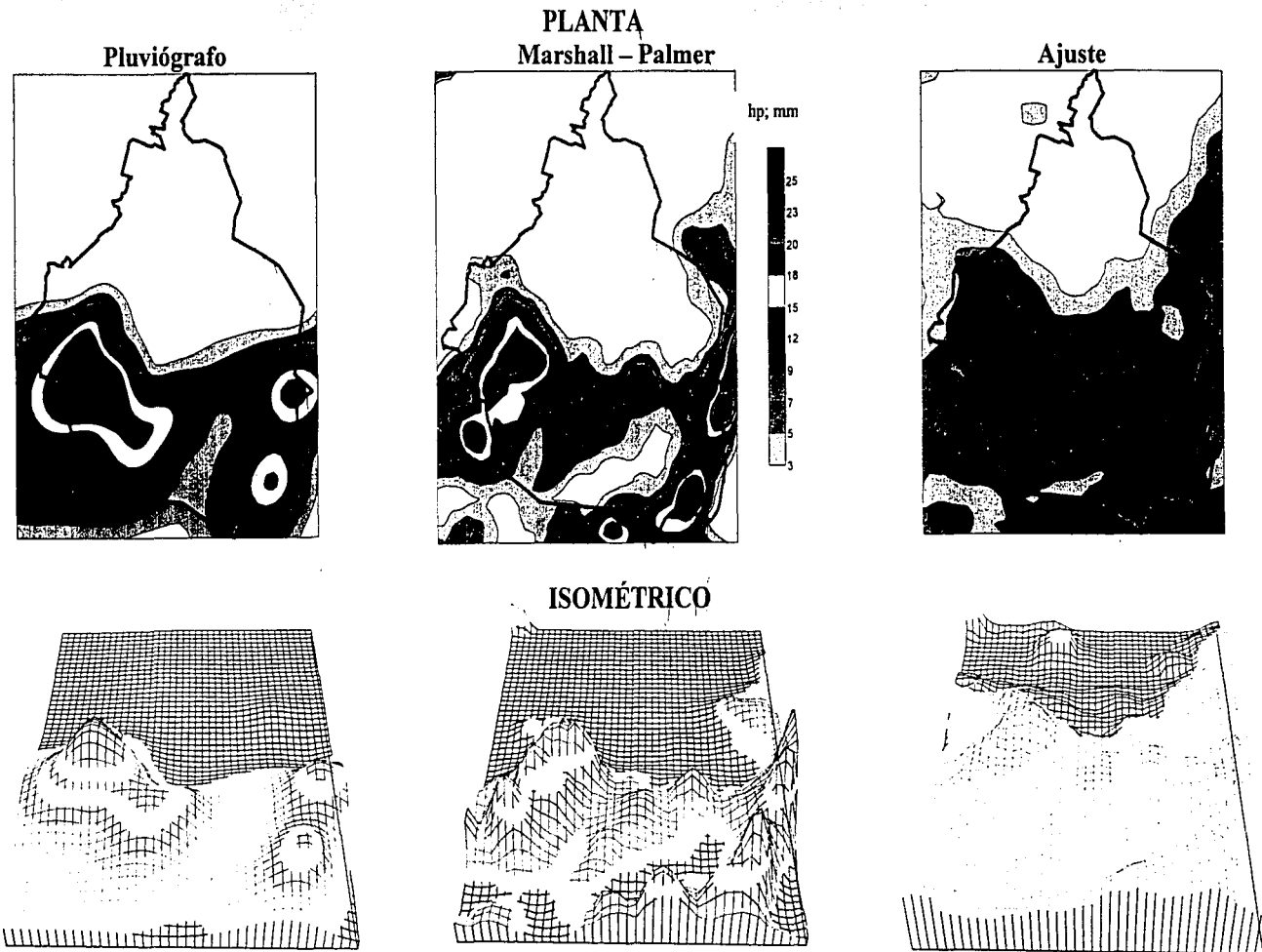


Fig. V.4g Imágenes de la Tormenta acumulada del 15 de Julio de 1997

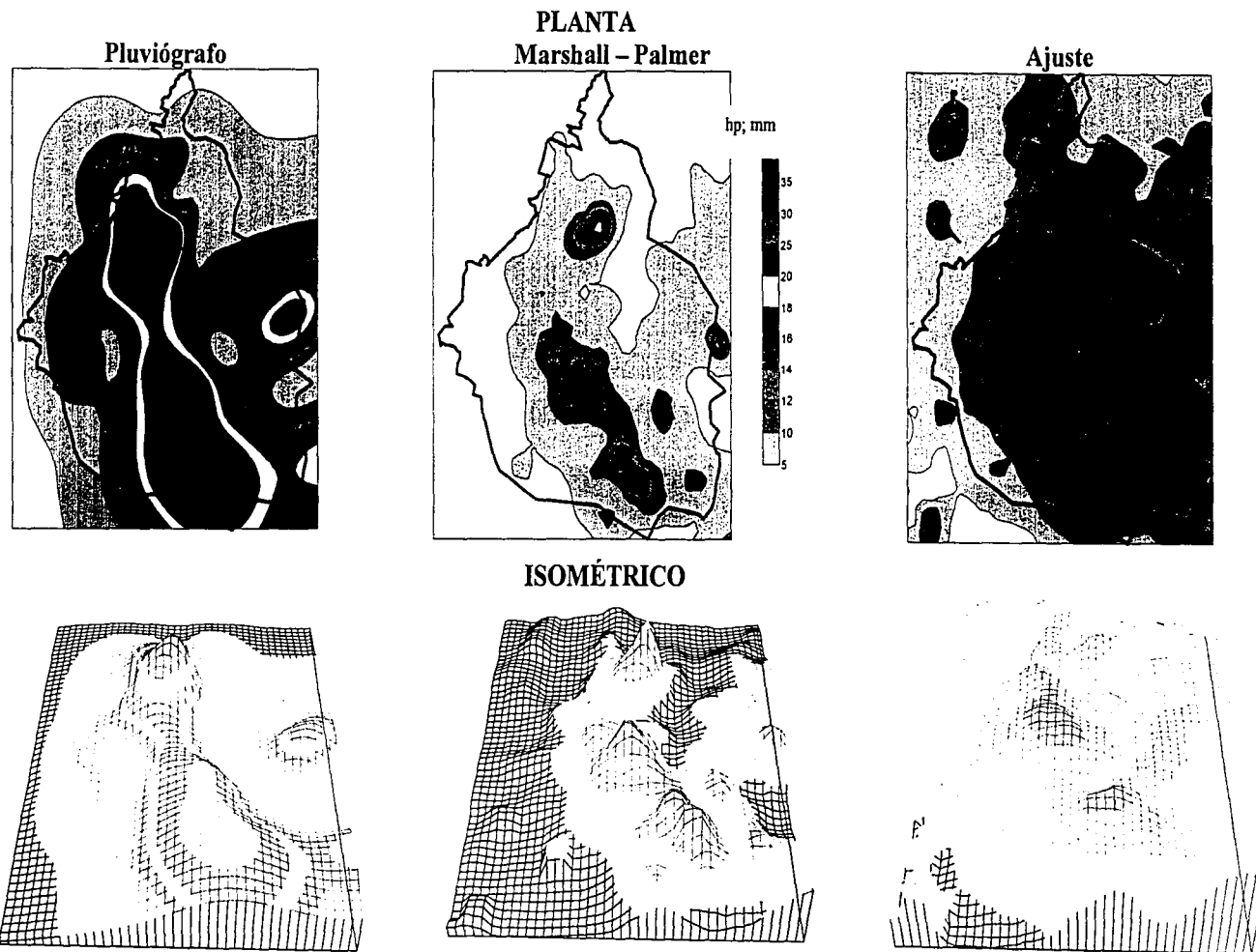


Fig. V.4h Imágenes de la Tormenta acumulada del 16 de Septiembre de 1998

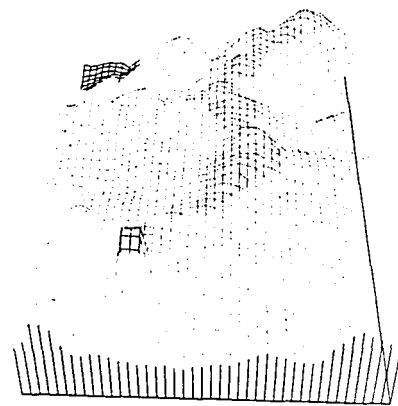
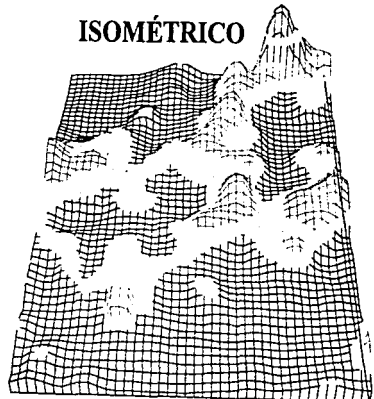
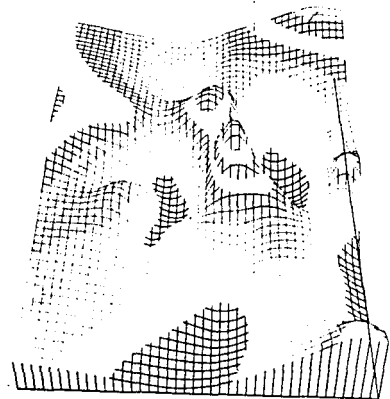
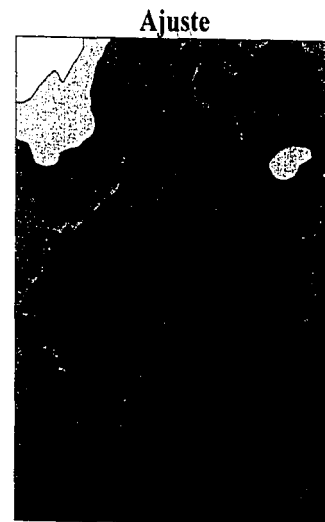
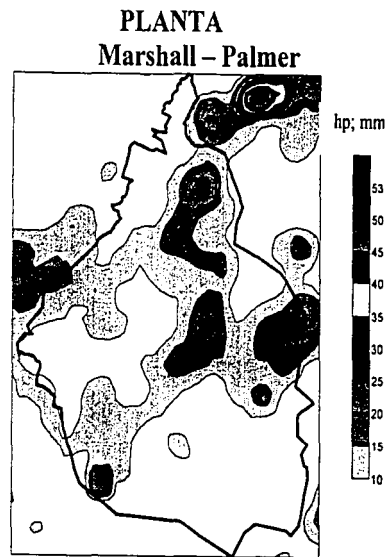
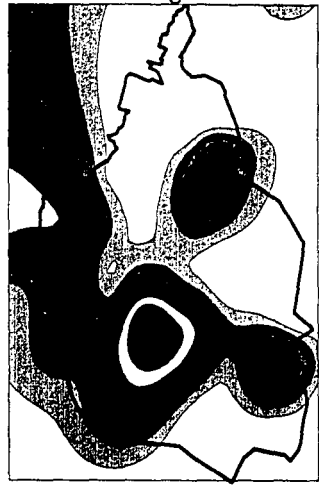


Fig. V.4i Imágenes de la Tormenta acumulada del 23 de Septiembre de 1998

Pluviógrafo



PLANTA
Marshall - Palmer



Ajuste



ISOMÉTRICO

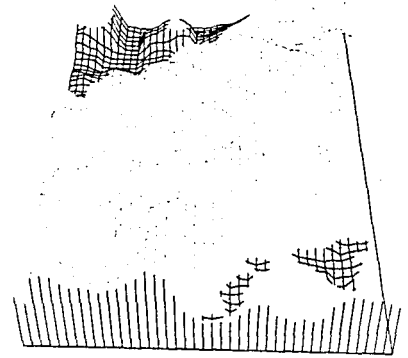
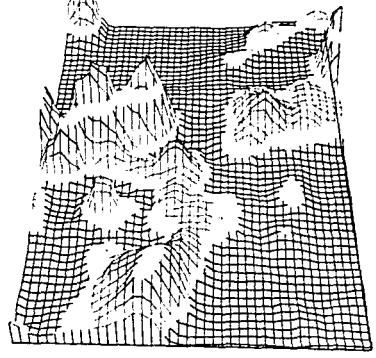
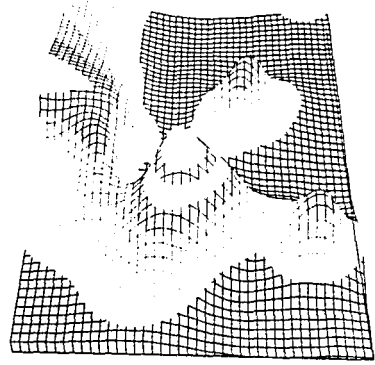


Fig. V.4j Imágenes de la Tormenta acumulada del 27 de Septiembre de 1998

Para ejemplificar de manera más detallada el análisis de los resultados obtenidos, se seleccionó una de las doce tormentas analizadas, con la condición de que la calibración obtenida cumpliera con tener la mejor aproximación a lo estimado por los pluviógrafos.

La tormenta seleccionada fue la del 01 de septiembre de 1996 y se muestra lo siguiente:

- 1) Hietograma de precipitación media, obtenido con promedios de matrices de 3x3 píxeles de pluviógrafos, ecuación de calibración obtenida y con los cálculos obtenidos a partir de la Ecuación Marshall – Palmer, tomando en cuenta el retraso de 15 minutos en los cálculos con pluviógrafos (Fig. V.5)

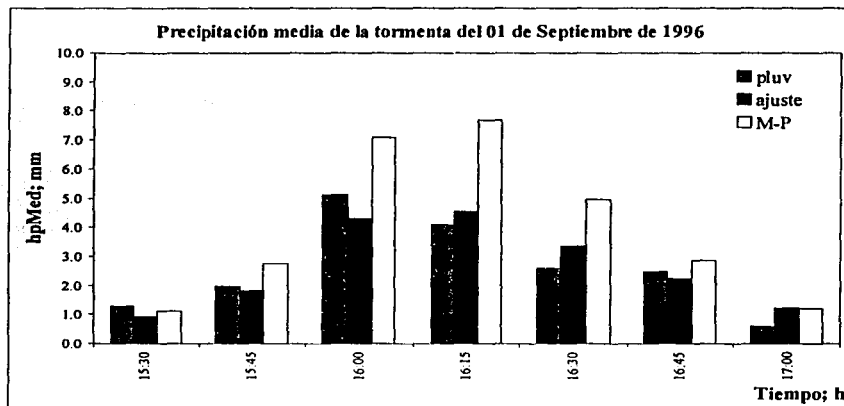


Fig. V.5 Hietograma de precipitación media para la tormenta seleccionada

- 2) Curvas de comparación de precipitación media, obtenidas con promedios de matrices de 3x3 píxeles para las estaciones pluviográficas Fig. V.6, con la ecuación de calibración obtenida ec. (IV.8) y en los cálculos hechos usando la fórmula de Marshall – Palmer ec. (III.2), tomando en consideración el retraso de 15 minutos que se debe tomar en cuenta en los pluviógrafos y para pluviógrafos precipitaciones medios mayores o iguales a 0.8 mm (Fig. V.6).

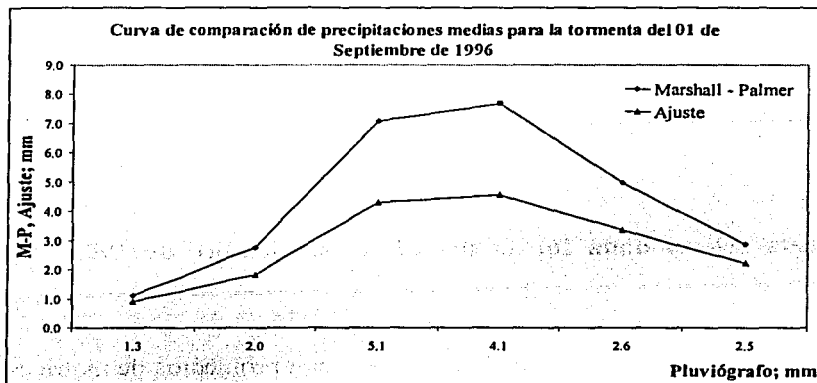


Fig. V.6 Curvas de comparación de precipitaciones medias entre la ecuación de Ajuste y la ecuación de Marshall – Palmer para la tormenta seleccionada.

- 3) Curva de precipitaciones medias acumuladas de pluviógrafos, estimadas con la mejor calibración ec. (V.8), la ecuación de Marshall – Palmer ec. (III.2) y las curvas obtenidas a partir de las ecuaciones calculadas en el informe del Instituto [Ref. 10] que sirvió como antecedente para el trabajo (Fig. V.7)

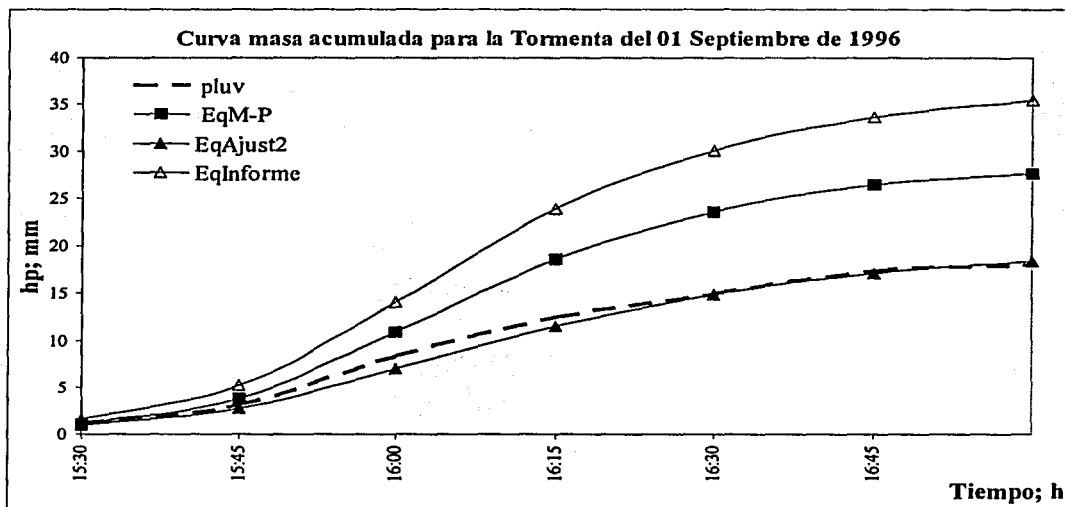


Fig. V.7 Curva de precipitación media acumuladas para la tormenta seleccionada

- 4) Imágenes de intensidades del radar correspondientes a cada intervalo de duración de la tormenta seleccionada que proporcionó el SMN (Fig. V.8)

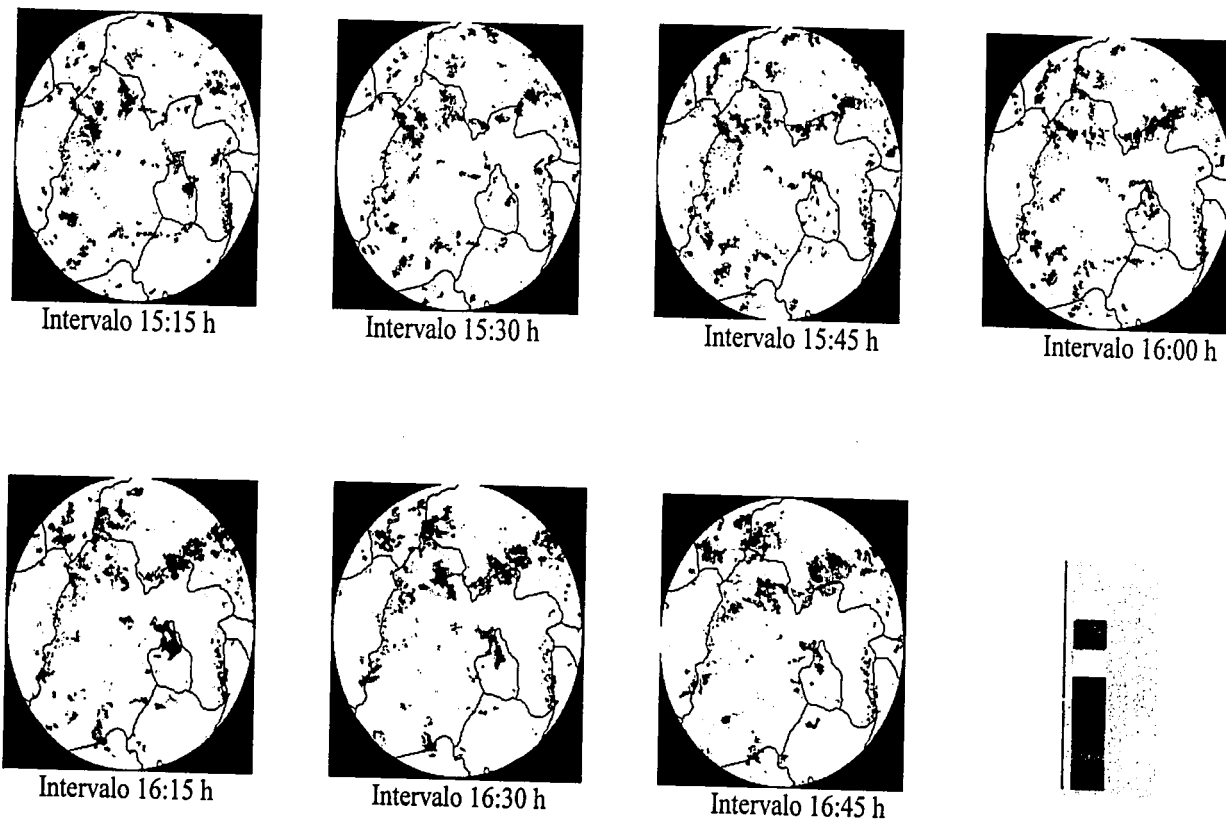


Fig. V.8 Imágenes de radar para la Tormenta del 01 de Septiembre de 1996

- 5) Imágenes para cada intervalo de 15 minutos, creadas a partir de los datos del pluviógrafo, de la calibración, y los correspondientes a la aplicación de la ecuación de Marshall – Palmer, generadas en SURFER (Figs. V.9)

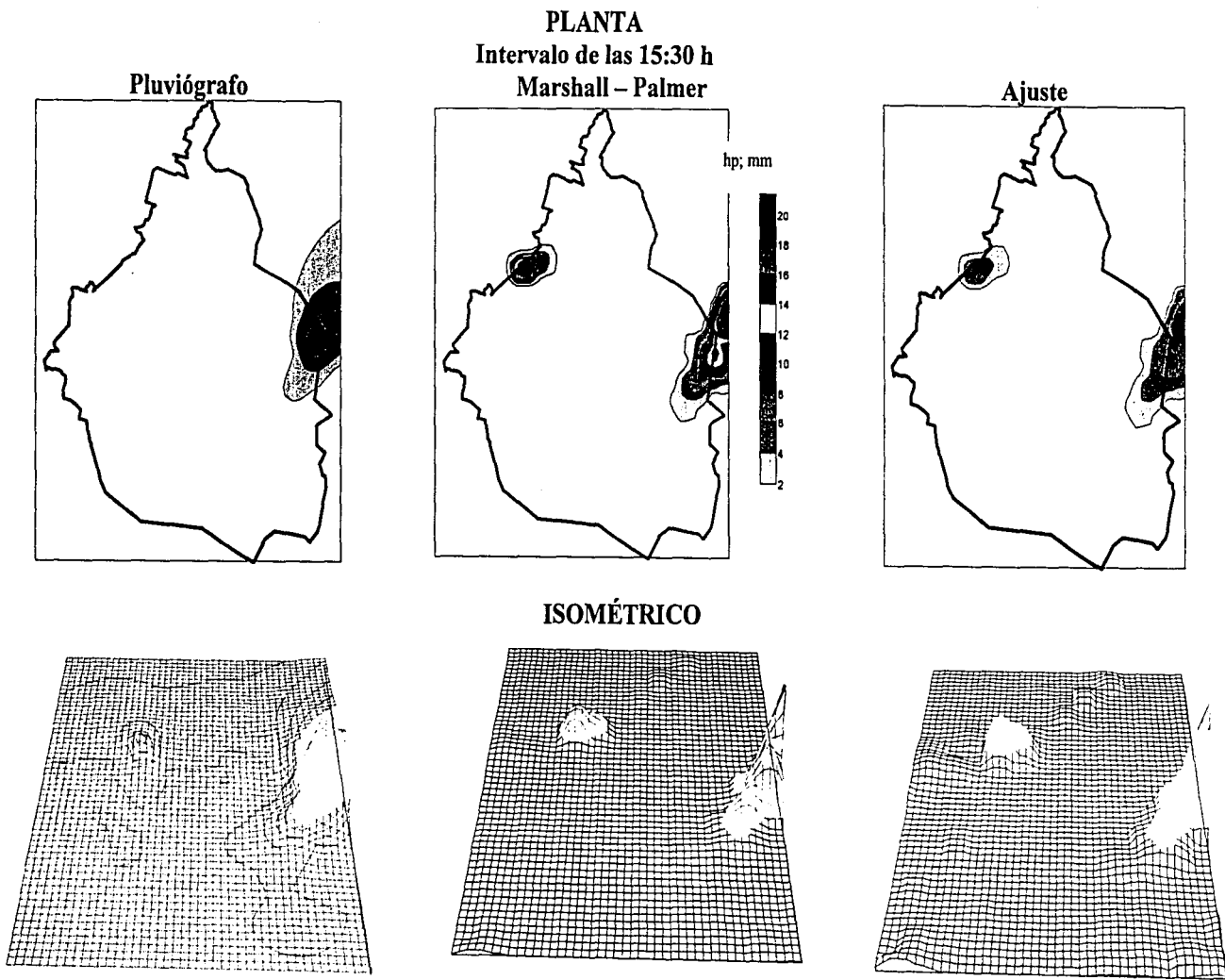


Fig. V.9a Imágenes del intervalo de las 15:30 h de la Tormenta del 01 de Septiembre de 1996

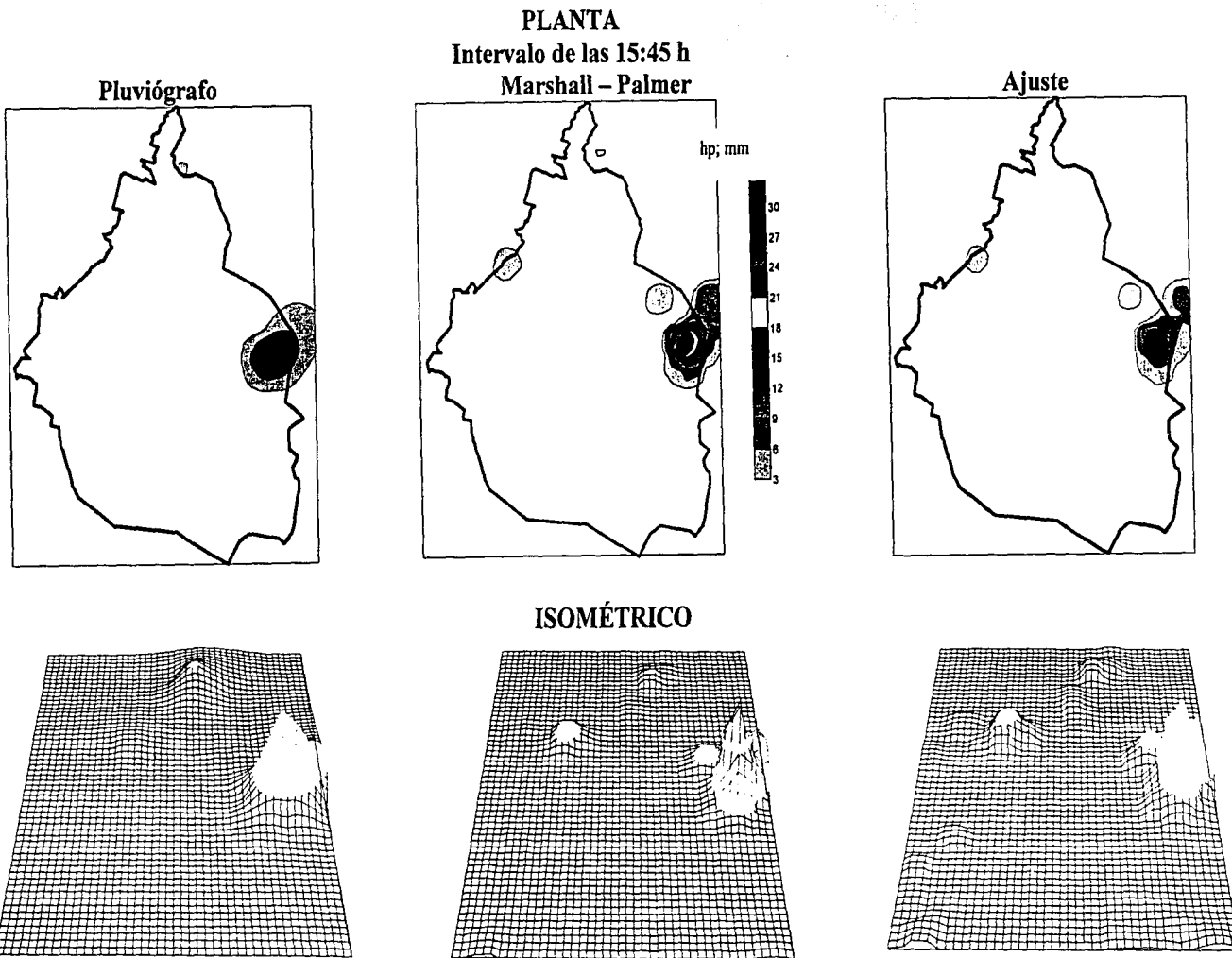


Fig. V.9b Imágenes del intervalo de las 15:45 h de la Tormenta del 01 de Septiembre de 1996

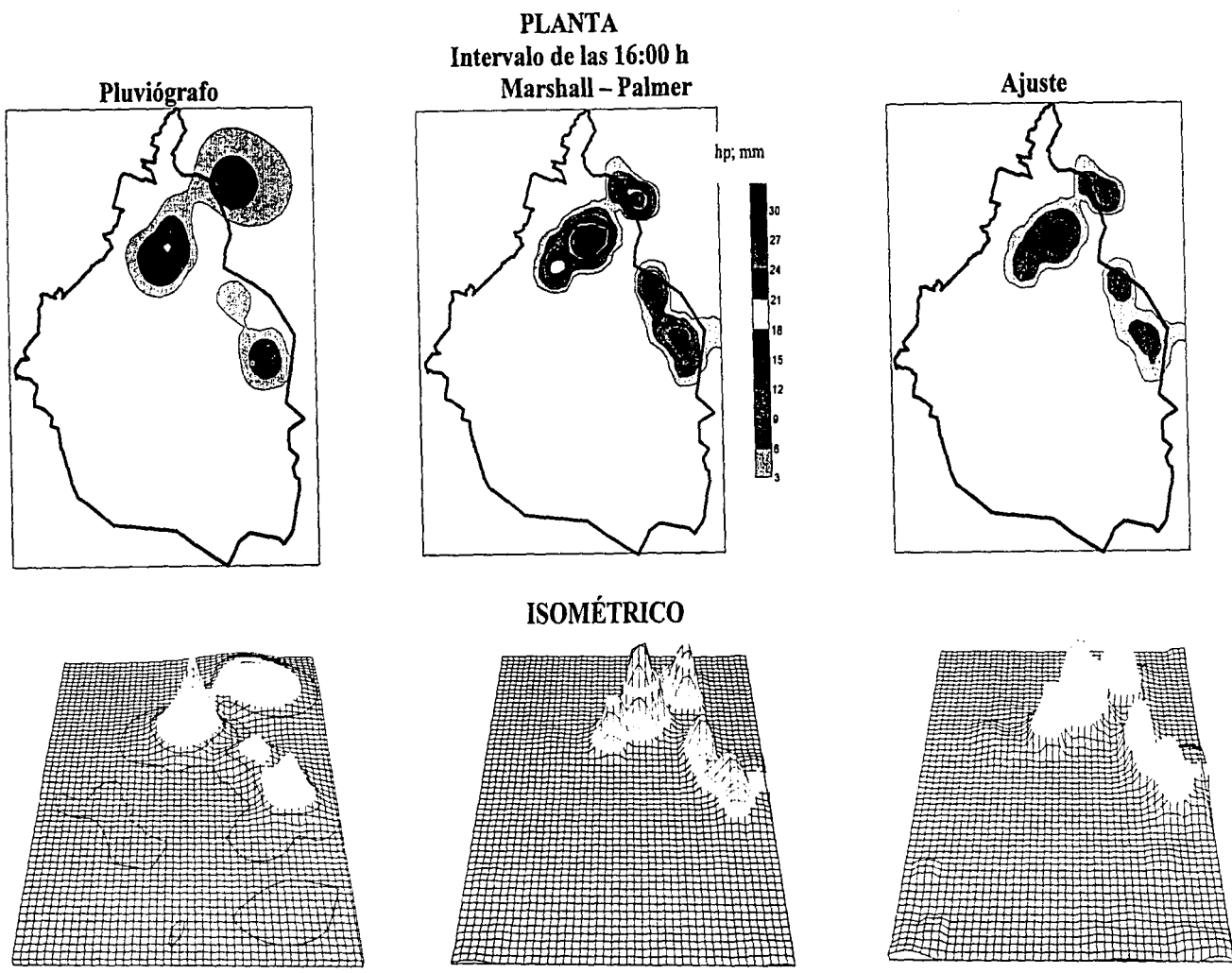


Fig. V.9c Imágenes del intervalo de las 16:00 h de la Tormenta del 01 de Septiembre de 1996

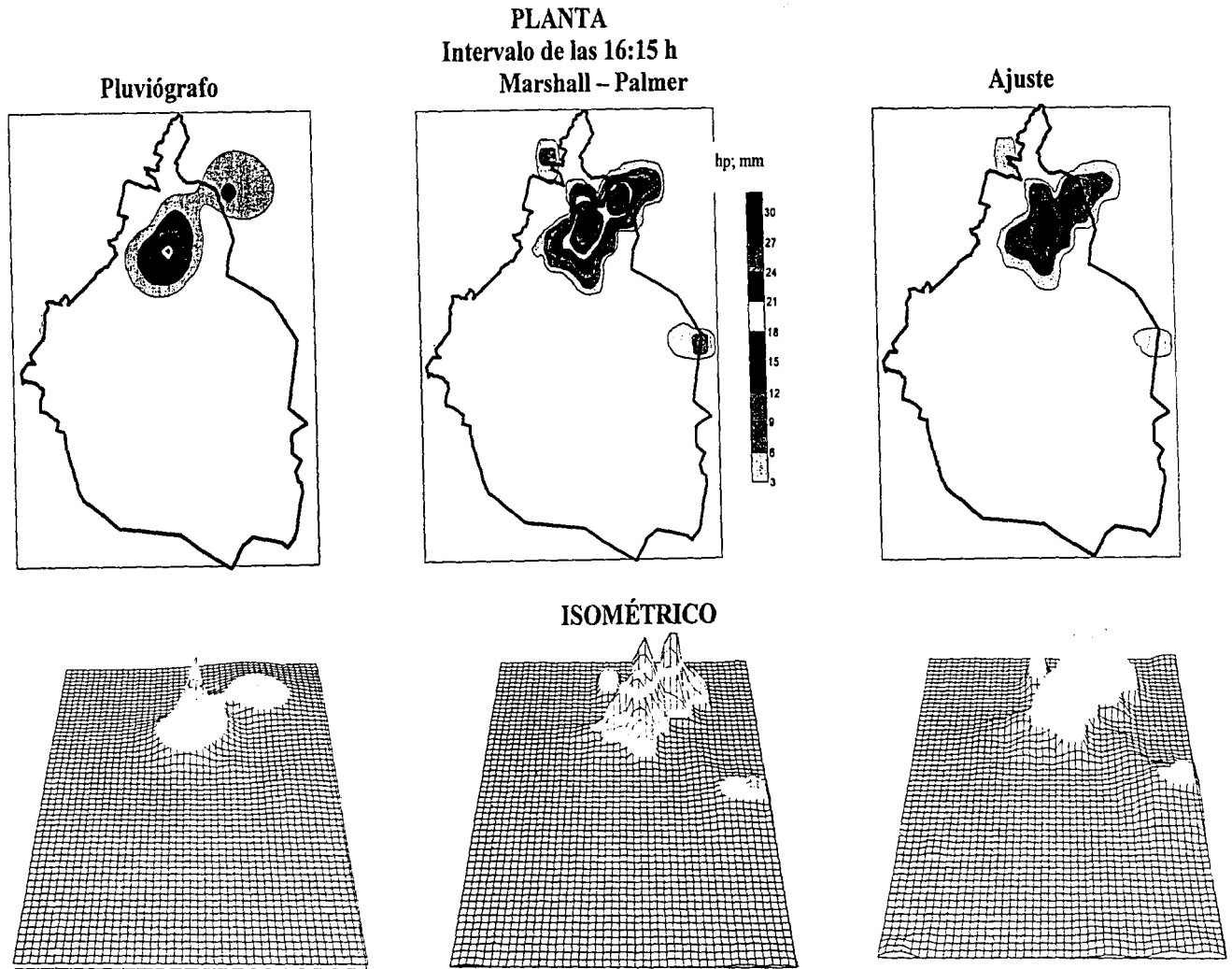


Fig. V.9d Imágenes del intervalo de las 16:15 h de la Tormenta del 01 de Septiembre de 1996

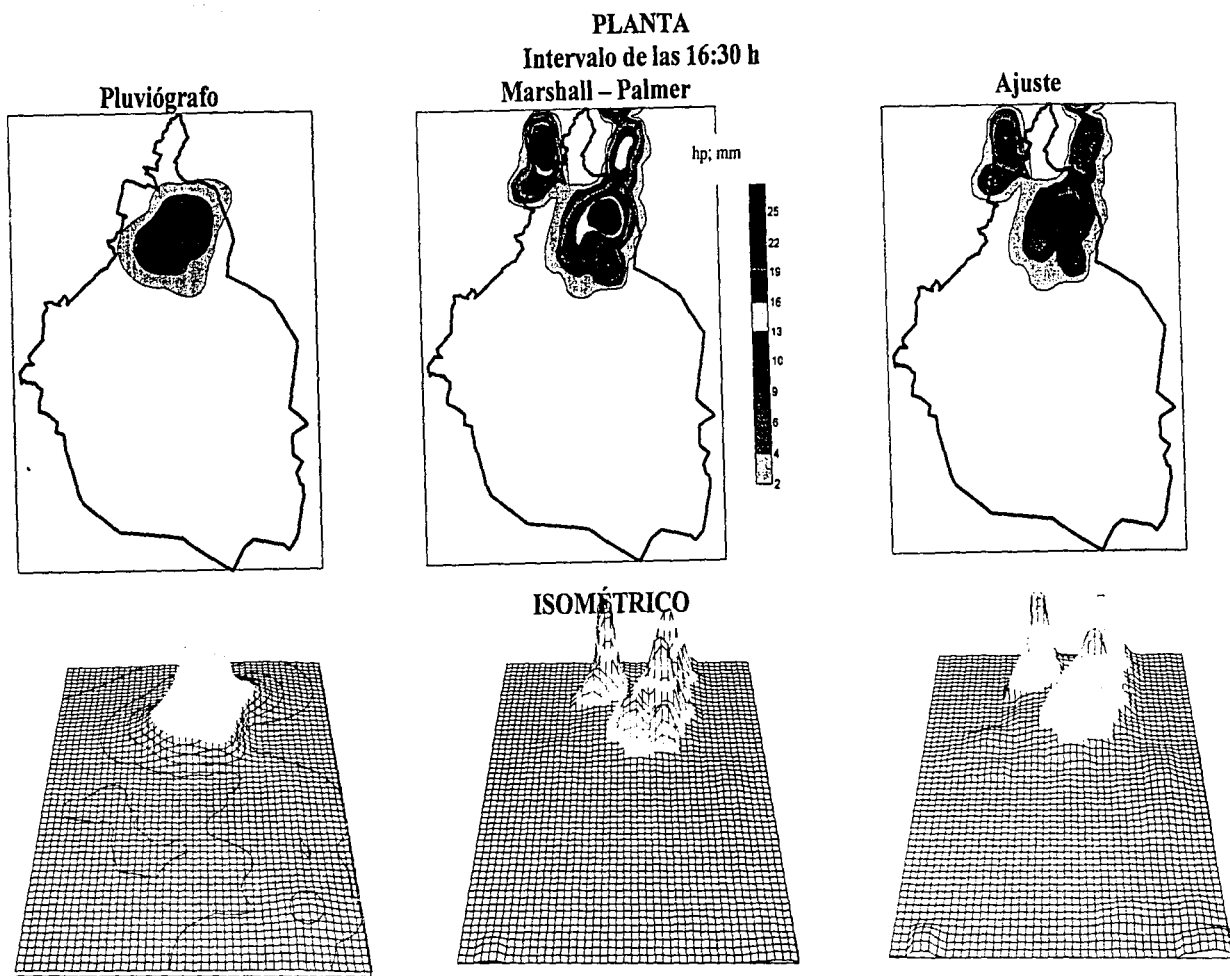


Fig. V.9e Imágenes del intervalo de las 16:30 h de la Tormenta del 01 de Septiembre de 1996

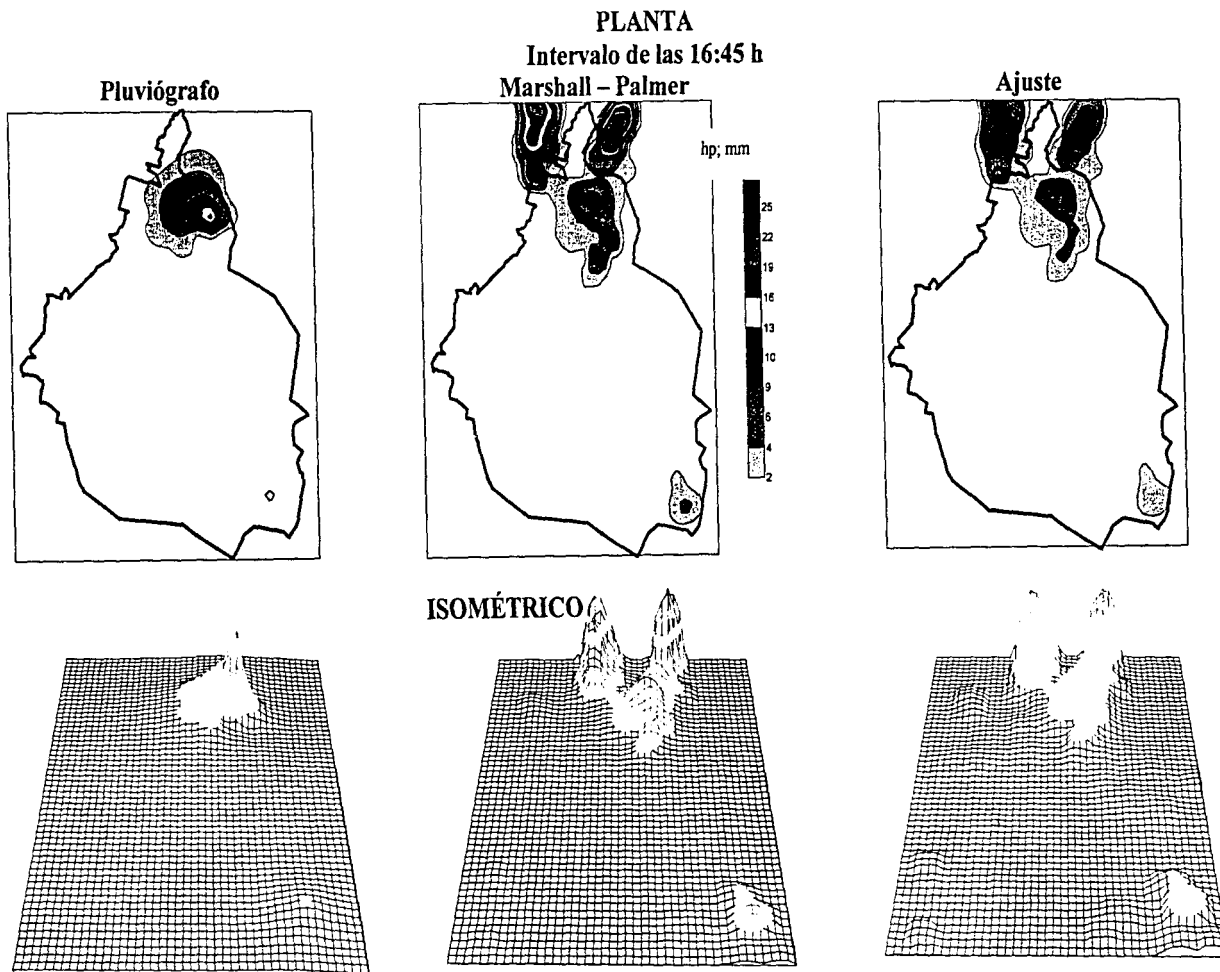


Fig. V.9f Imágenes del intervalo de las 16:45 h de la Tormenta del 01 de Septiembre de 1996

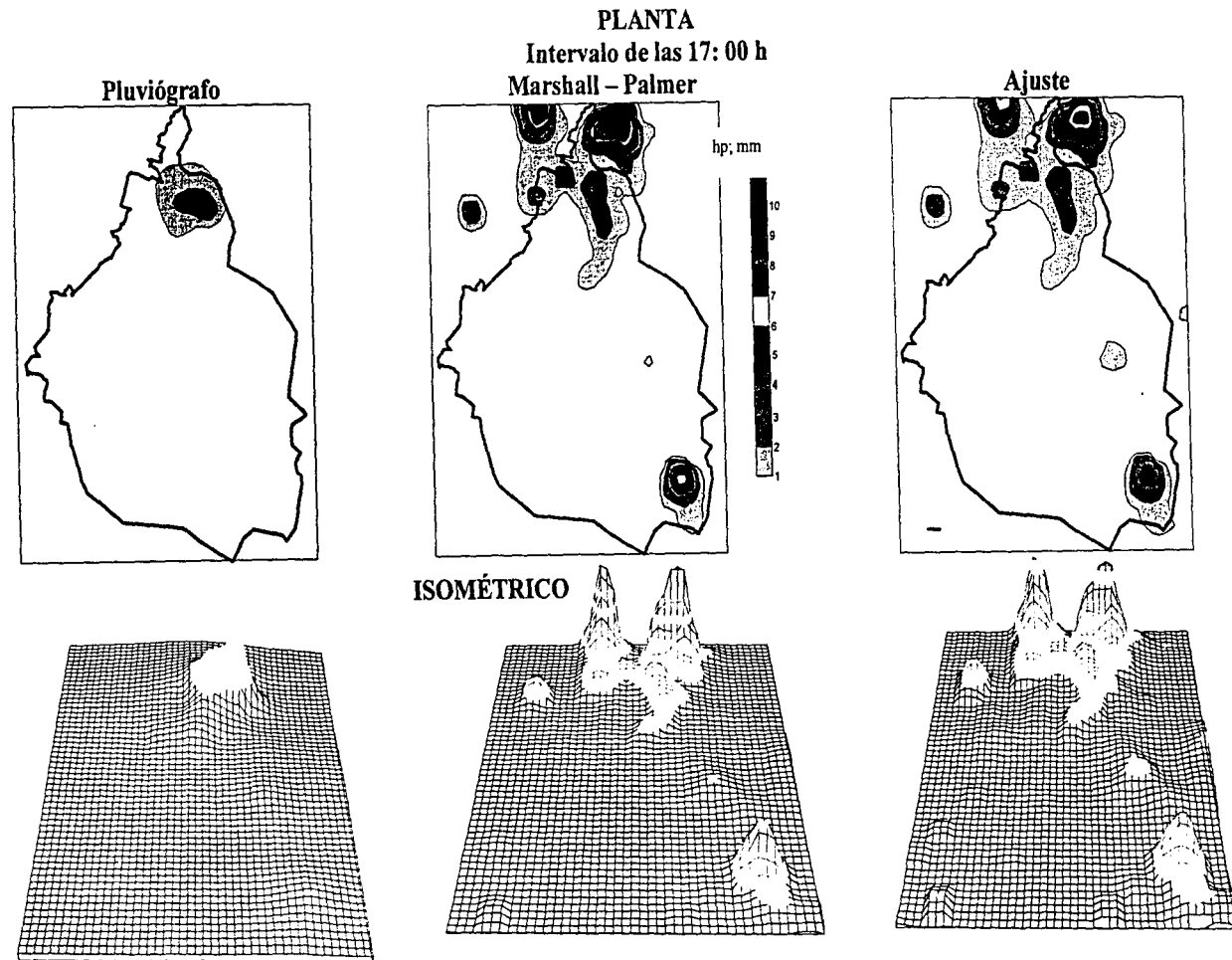


Fig. V.9g Imágenes del intervalo de las 17:00 h de la Tormenta del 01 de Septiembre de 1996

- 6) Imágenes de la tormenta acumulada creadas a partir de los datos del pluviógrafo, de la calibración, y los correspondientes a la aplicación de la ecuación de Marshall – Palmer, generadas en SURFER (Fig. V.10)

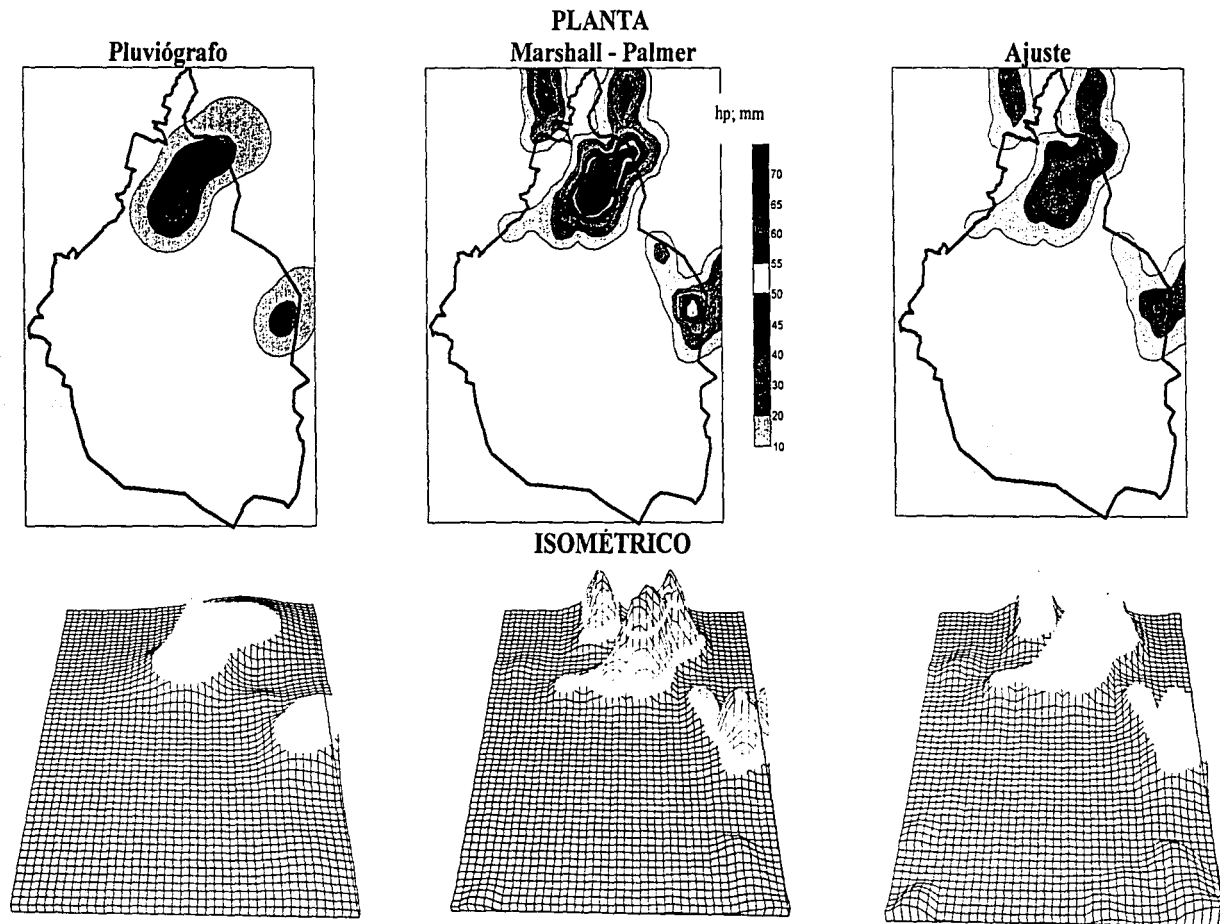


Fig. V.10 Imágenes de la Tormenta acumulada del 01 de Septiembre de 1996

Para el análisis de resultados tenemos lo siguiente:

1. Por medio de los hietogramas de cada tormenta (**Figs. V.1 y V.5**) se observa que cuando las lluvias son ligeras, la ecuación para lluvias estratiformes de Marshall-Palmer tiende a sobrestimar la lluvia y cuando las lluvias son intensas, la ecuación de Marshall-Palmer tiende a subestimar la lluvia. En el caso de la ecuación obtenida en este análisis, la tendencia de la estimación de lluvias representa un término intermedio ya que suaviza la tendencia a subestimar y sobreestimar.
2. Por medio de las curvas de comparación de precipitaciones medias (**Figs. V.2**) entre la ecuación de ajuste y la ecuación de Marshall – Palmer, con lo que estima el pluviógrafo se observó que para la mayoría de las fechas de análisis, los valores de precipitación obtenidos con de la ecuación de ajuste ec. (IV.8) presentan valores por debajo de lo que se estima con la de Marshall – Palmer, esto representa que las precipitaciones obtenidas por medio del ajuste tienden a subestimar lo registrado por el pluviógrafo.
3. Para comprobar la bondad del ajuste se construyeron las curvas masa de cada una de las tormentas seleccionadas con las ecuaciones de Marshall – Palmer, la del ajuste obtenido es este trabajo y la obtenida por el Instituto de Ingeniería en trabajos previos [**Ref. 10**] y con los datos registrados por el pluviógrafo (**Figs. V.3**). En éstas curvas se observa que con la ecuación de ajuste obtenida en este trabajo para la mayoría de las fechas se tiende a subestimar la lluvia con respecto a lo que mide el pluviógrafo. Lo anterior puede deducirse fácilmente de la **Fig. IV.6** donde se observa que la pendiente de la curva de ajuste afecta sensiblemente la estimación de la lluvia, es decir, un valor alto de Z produce un valor bajo de R .
4. Finalmente se presentan las imágenes de las lluvias acumuladas para cada tormenta (**Figs. V.4**) y las imágenes de cada intervalo de la tormenta del 1 de septiembre de 1996 (**Fig. V.9**) así como las acumuladas de dicha tormenta (**Fig. V.10**) donde se

muestran lo medido con el pluviógrafo, las lluvias que actualmente estima el radar (ec. de Marshall-Palmer) y las lluvias que se obtendrían con la ecuación de ajuste que se obtuvo como resultado de este análisis, en éstas figuras se puede apreciar como la lluvia se distribuye en determinadas áreas que abarca el DF. Lo que significa que las lluvias se presentan por zonas.

VI. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.

Con los resultados obtenidos utilizando la calibración anterior ec. [IV.8], se observó que ésta no tenía validez en toda la zona de estudio (cuenca del Río Mixcoac), por lo que, resulta necesario, realizar una nueva propuesta de calibración hidrológica que incluya la distribución de lluvia tomando como referencia las diferentes zonas que se presentan en toda el área de estudio. Sin embargo con la calibración obtenida, el objetivo de éste trabajo se cumplió satisfactoriamente ya que consistió en la obtención de la calibración del radar meteorológico del Cerro de la Catedral y la comparación de los datos obtenidos, comprobando la bondad de los resultados obtenidos, para su posterior aplicación en modelos de lluvia-escurrimiento.

En los que se refiere a la validez de la calibración para la cuenca analizada, se observaron principalmente dos zonas climáticas en el DF; donde la zona 1 corresponde a la zona caracterizada por la planicie y la 2 por la montañosa. Esta zonificación se determinó en el estudio que realizó el Instituto de Ingeniería partiendo del comportamiento observado de las lluvias, de la topografía del terreno y de las

temperaturas medias anuales observadas en el área de estudio [Ref. 10], y cuya zonificación se observa en las Figs. VI.1.

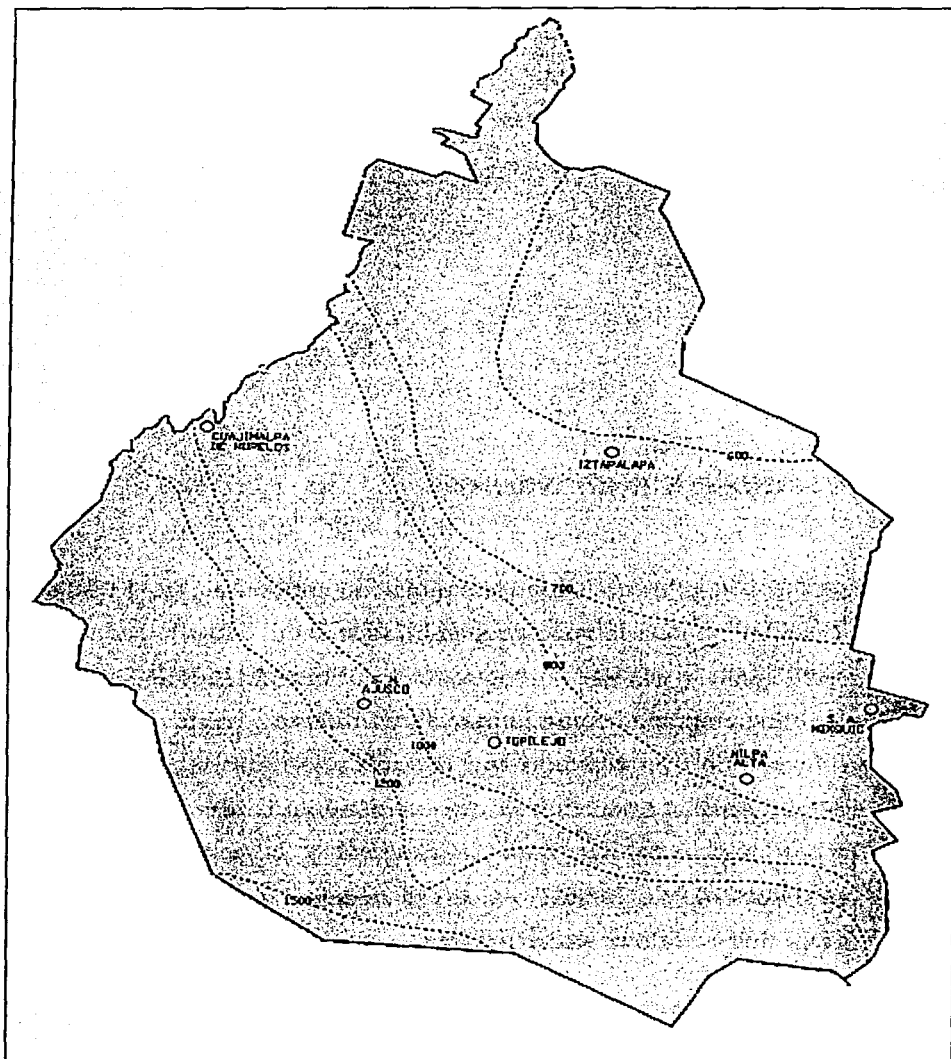


Fig. VI.1a Carta de Precipitación Total Anual, 1: 1 000 000. Fuente: INEGI

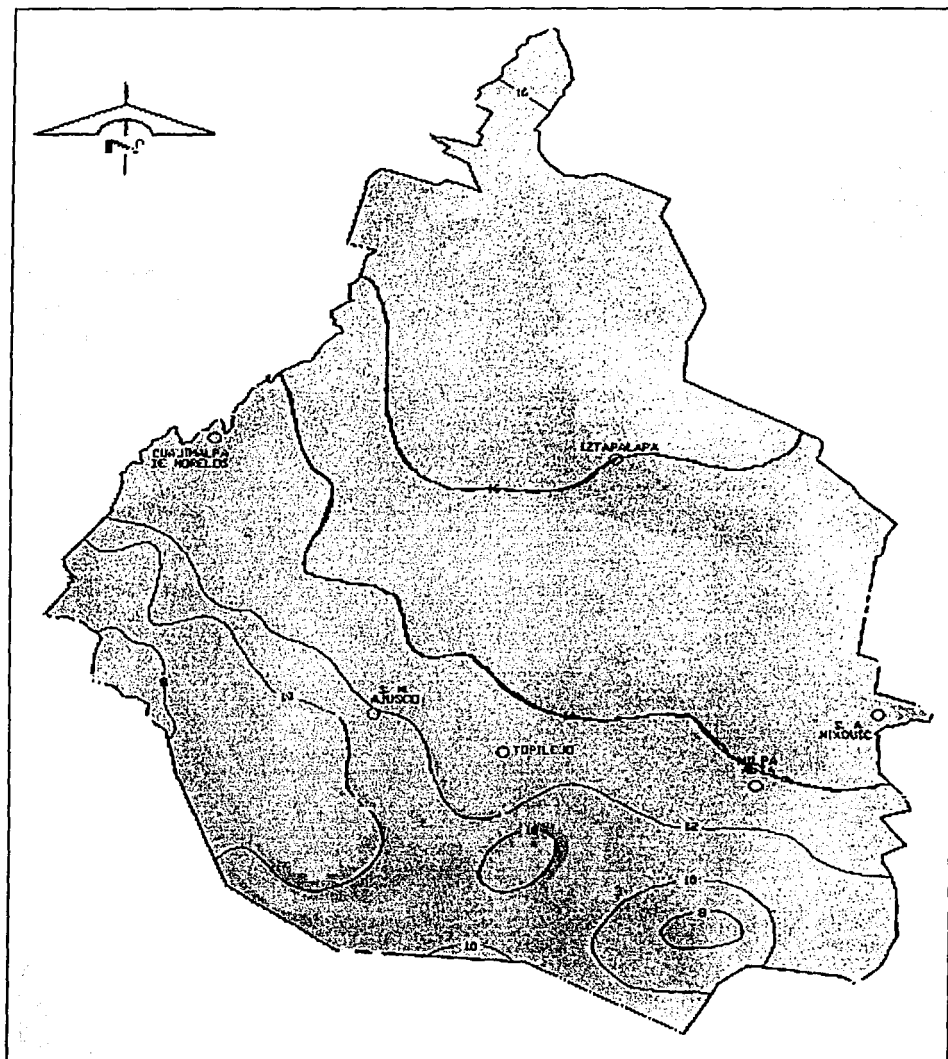


Fig. VI.1c Carta de temperaturas medias anuales, 1: 1 000 000. Fuente: INEGI

Debido a que las gotas de agua que se presentan en una tormenta no caen verticalmente, como se supone al aplicar el método de calibración (relación Z-R), se ve, que los

mejores valores de correlación se obtuvieron al tomar los promedios de matrices de 3 x 3 píxeles para los cálculos realizados, por tanto, con los resultados obtenidos con la calibración, se observó que la mejor relación se obtiene con la calibración estimada con los promedios de nueve píxeles (Rosengaus y Rosenfeld llegan a una conclusión similar [Refs. 11 y 12]). También se observó que se obtiene una mejor correlación si las mediciones del radar se suponen con un retraso de 15 min. con respecto a las del pluviógrafo.

Las tormentas que se estimaron a partir de los parámetros de calibración obtenidos para cada tormenta y tipo de lluvia reproducen con buena aproximación y para casi todas las fechas, las observaciones hechas por los pluviógrafos, además de que mejoran las estimaciones hechas a partir de los parámetros de radar obtenidos con la Ecuación de Marshall – Palmer (Figs. IV.3 y IV.4).

De los problemas que se presentaron al tratar de analizar un mayor número de tormentas, el más importante consistió en la falta de las imágenes de radar, por lo que se recomienda que se mantengan funcionando en forma ininterrumpida al radar durante la temporada de lluvias y que su mantenimiento se realice durante la época del estiaje.

Con los hietogramas obtenidos de cada tormenta (Figs. V.1), se pudo apreciar una de las conclusiones a las que ya se había llegado en anteriores estudios [Ref. 10]; cuando las lluvias son ligeras, la ecuación para lluvias estratiformes de Marshall-Palmer tiende a sobrestimar la lluvia y cuando las lluvias son intensas, la ecuación de Marshall-Palmer tiende a subestimar la lluvia. En el caso de la ecuación obtenida en este análisis, la tendencia de la estimación de lluvias representa un término intermedio ya que suaviza la tendencia a subestimar y sobreestimar.

Otra conclusión importante que se pudo comprobar con la realización de este trabajo fue que utilizando el radar meteorológico en pronósticos de escurrimiento se obtienen resultados confiables además de que con esto permitirá su empleo en regiones donde no

se cuenta con la densidad de pluviógrafos suficientes para la obtención de modelos lluvia-escorrimento con fines de predicción de avenidas y alertamiento.

En posteriores estudios, se requiere que para una mejor distribución espacial de los pluviógrafos, estos se encuentren georeferenciados como lo está el radar, ya que las coordenadas de los pluviógrafos no proporcionan una ubicación muy precisa y esto contribuye a que se presente incertidumbre en la ubicación de los mismos y como consecuencia el criterio de comparación de valores puntuales, es decir, píxel por píxel, no es muy precisa. Si se utilizaran geoposicionadores (GPS) se reduciría la incertidumbre en la localización de los pluviógrafos.

Un punto a destacar y que es importante indicar, recae en conocer las alturas de la base y del tope de las nubes, pues no existe manera alguna de saber en forma precisa la parte de la lluvia en la que se está midiendo, dado que el radar se encuentra instalado a 1780 msnm. Para identificar lo que registra el radar, se sabe que existen dos métodos que permitirían conocer la altura de la base y el tope de las nubes; uno que es por medio de radiosondeos y otro, por medio del análisis del producto vertical del radar conocido como RHI (indicador en altura distancia). (Mencionado en el capítulo I).

El Sistema Meteorológico Nacional (SMN) utiliza el método de radiosondeos diariamente de las 5:00h y 17:00 h, esto se implementó desde 1997, por lo que a partir de este año se dispuso de información regular, y en consecuencia, dicho método no se pudo utilizar para éste trabajo ya que para las fechas que se seleccionaron, no estaba disponible la información necesaria.

Hay que aclarar que por el análisis por medio del producto RHI, que se podría utilizar, no es respaldado por el SMN ya que no despliega la información como es requerida por este producto, por lo que tampoco fue posible su utilización.

Por otra parte, se debe tomar en cuenta que, de contarse con la información del producto RHI sería posible mejorar la calibración hidrológica obtenida, ya que de no ser así, se seguirán haciendo sólo suposiciones acerca de lo que sucede en la atmósfera, aunque es

de notarse que si no se dispone dichas variables, aún existen elementos necesarios para lograr buenas calibraciones, por lo que esto no se debe considerar como un impedimento para futuros propuestas de calibración.

Otro punto que hay que tomar en consideración, con respecto a la utilización de los radares, es que por medio de ellos, es posible la identificación de incendios forestales y quemas agropecuarias, ya que ellos han tenido una gran importancia debido a los impactos económicos, ambientales, y sociales, que este siniestro produce al país, mismos que se han visto acentuados por las condiciones meteorológicas adversas que los provocan. La manera en que son detectados estos sucesos, es por medio de la identificación en las imágenes por la columna de humo que los caracteriza, su comportamiento y dispersión de la bruma en la atmósfera.

La estimación cuantitativa de la precipitación, puede realizarse por medio de pluviógrafos, radares meteorológicos, o una combinación de ambos lo cual resulta más apropiado, ya que los primeros son más precisos para realizar mediciones puntuales de precipitación, pero no son del todo satisfactorios para la medición de una zona; mientras que los segundos proporcionan mediciones temporales y espaciales de la precipitación; sin embargo, la exactitud de tales mediciones puede no ser recomendable.

Las mediciones de precipitación de los radares puede perfeccionarse, calibrando los datos de precipitación detectada por el radar con las mediciones de lluvia de las estaciones pluviométricas. Con una apropiada calibración, los aspectos positivos de cada método se retienen y la combinación del sistema es mejor que cada uno de los sistemas por separado.

A escalas grandes, las intensidades de precipitación detectadas del radar pueden no ser representativas de la superficie de lluvia. Bajos niveles de crecimiento de gotas de lluvia en neblina o en los estratos bajos de las nubes, así como un bajo nivel de evaporación de

gotas en un aire relativamente seco puede resultar en que la intensidad de precipitación se convierta en una función del peso.

Los resultados anteriores refuerzan la conclusión, determinada en anteriores análisis, de que es necesaria la clasificación de los tipos de lluvia antes de correlacionarlos, pues se ha demostrado que mejoran los resultados de las estimaciones de lluvia del radar con respecto a lo medido por los pluviógrafos.

Resumen de conclusiones:

1. Antes de correlacionar los datos del radar para obtener una ecuación de calibración, es necesario hacer la clasificación de los tipos de lluvia.
2. La calibración obtenida en éste trabajo (ec. IV.8), no tiene validez en toda la cuenca del Río Mixcoac.
3. Se debe obtener una ecuación de calibración basándose en las zonas que se presentan en el área de estudio.
4. Utilizando los datos de radar se obtienen resultados confiables en pronósticos de escurrimientos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Battan, L. J., (1973) **“Radar Observation of the Atmosphere”**, University of Chicago Press, EUA
- [2] Rinehart R. E. (1991) **“Radar for Meteorologists”**, 2ª edición, Departamento de Ciencias Atmosféricas, Universidad de Dakota del Norte, EUA
- [3] Servicio Meteorológico Nacional, **“Manual de Operación para Estaciones de Radar Meteorológico”**, informe técnico interno, SARH, México
- [4] R.R. Rogers; Física de las nubes; editorial Reverté, S.A. pp 173-174.
- [5] Valdés Manzanilla, Arturo; Meteorología del radar, **“Curso sobre radares y estaciones meteorológicas automáticas”**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- [6] Ridenour, L. (1965): **Radar System Engineering**. New York Dover Publications, Inc., 748 pp
- [7] Doviak, R.J. and D.S. Zrníc, 1984: **Doppler Radar and Weather Observations**. Academic Press, San Diego, CA, 458 pp.

- [8] Rinehart, R., (1994): **Radar for Meteorologists**. Knight Printing Co., Fargo, ND, 334 pp.
- [9] Collier, Christopher, (1996): **Applications of Weather Radar Systems**. John Wiley And Sons
- [10] González, F.; Franco V.; Fuentes G.; Méndez B. y Esquivel G. (1998) "Estimación de la precipitación en la cuenca del valle de México a partir de datos de lluvia captados por medio de radar", Informe del Instituto de ingeniería de la UNAM elaborado para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Gobierno del Distrito Federal, Proy. 8353
- [11] Rosenfeld, D., et. al. (1994): **The Window Probability Matching Method for Rainfall Measurements with Radar**. Journal of Applied Meteorology, Vol. No. 33, pp. 682-693
- [12] Rosengaus, M. (1999): **Participación en la Campaña de Estimulación de Lluvias**. Informe de los proyectos TH-9082 y TH9083. SEMARNAP-CNA-IMTA.

ANEXO

PROGRAMA No. 1

```

/*Programa que recorta la matriz de Promedios del radar para ajustarla
al tamaño de la matriz del Pluviógrafo
*/
import java.io.*;
import java.util.*;

class CompPunt
{
    //Metodo que controla todo el programa
    public
    static void main(String args[])throws Throwable
    {
        //Se obtiene el directorio actual de trabajo
        File dir= new File(System.getProperty("user.dir"));
        String radar;
        String pluv;
        File archivos[] =null;
        //Punto del origen de la matriz del Pluviografo
        float ox= 458451.337f;
        float oy=2106379.406f;

        int nradar=0;
        archivos=dir.listFiles();
        boolean posradar[] =new boolean[archivos.length];
        System.err.println("archivos: "+archivos.length);
        for(int i=0;i<archivos.length;++i)

        //Abre los archivos de la matriz del radar
        if((archivos[i].getName()).startsWith("Radar")||
            (archivos[i].getName()).startsWith("radar"))
            {
                nradar++;
                posradar[i]= true;
            }
        else
            posradar[i]=false;

        for(int i=0;i<archivos.length;++i)
        {
            if(posradar[i])
            {
                radar =archivos[i].getName();
                System.err.println(radar);
                for(int j=0;j<archivos.length;++j)
                {
                    pluv =archivos[j].getName();
                    //Abre los archivos de la matriz de Pluviografo
                    //correspondiente a la misma hora del archivo de radar

                    if((radar.substring(5,10)).equals(pluv.substring(0,5)))
                    {
                        System.err.println(pluv);
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```



```

FileReader archpluv =new FileReader(archivos[j]);
FileReader archrad =new FileReader(archivos[i]);
BufferedReader vpluv=new BufferedReader(archpluv);
BufferedReader vrad=new BufferedReader(archrad);

String line=vpluv.readLine();
line=vpluv.readLine();

//Lee el origen de la matriz del Radar y decide
//cuantas lineas se deben recortar para ajustar el
//tamaño a la matriz del Pluviografo
StringTokenizer sep=new StringTokenizer(line);
String x,y,basura;
basura= sep.nextToken();
basura= sep.nextToken();
x=basura.substring(2);
basura= sep.nextToken();
y=basura.substring(2);
float xx=Float.parseFloat(x);
float yy=Float.parseFloat(y);
int dx=(int)(xx-ox)+500;
int dy=(int)(yy-oy)+500;
dx=dx/1000;
dy=dy/1000;
System.err.println("x: "+dx+" y: "+dy);
dy=8-dy;
System.err.println("x: "+dx+" y: "+dy);
//Abre el archivo de resultados
FileWriter fw= new
    FileWriter("Zp"+pluv.substring(0,5)+".txt");
//Recorta los renglones que no se acoplan con la
//matriz de pluviografo
for(int k =0;k<207;++k)
    vrad.readLine();
for(int k=0;k<dy;++k)
    vrad.readLine();
int alto;
if(dy<0) alto=56+dy;
else alto=56;
//Elimina las columnas que no se acoplan con la matriz
//del pluviografo y escribe en el archivo la matriz de
//datos que se compararan con los del radar
for(int k=0;k<alto;++k)
{
    line=vrad.readLine();
    sep=new StringTokenizer(line);
    for(int l=0;l<dx;++l)
        sep.nextToken();
    int ancho;
    if(dx>2) ancho=44-dx;
    else ancho=44;
    for(int m=0;m<ancho;++m)
    {
        String numero=sep.nextToken();
        fw.write(numero+" ");
    }
    fw.write("\n");
}

```

```
    }  
    fw.close();  
    vrad.close();  
  }  
}  
}
```


PROGRAMA No. 2

```
/*Programa que recorta la matriz de Promedios del radar para ajustarla
al tamaño de la matriz del Pluviógrafo
*/
import java.io.*;
import java.util.*;

class Comparacion
{
    //Metodo que controla todo el programa
    public
    static void main(String args[])throws Throwable
    {
        //Se obtiene el directorio actual de trabajo
        File dir= new File(System.getProperty("user.dir"));
        String radar;
        String pluv;
        File archivos[] =null;
        //Punto del origen de la matriz del Pluviografo
        float ox= 458451.337f;
        float oy=2106379.406f;

        int nradar=0;
        archivos=dir.listFiles();
        boolean posradar[] =new boolean[archivos.length];
        System.err.println("archivos: "+archivos.length);
        for(int i=0;i<archivos.length;++i)

        //Abre los archivos de la matriz del radar
        if((archivos[i].getName()).startsWith("Radar")||
        (archivos[i].getName()).startsWith("radar"))
        {
            nradar++;
            posradar[i]= true;
        }
        else
            posradar[i]=false;

        for(int i=0;i<archivos.length;++i)
        {
            if(posradar[i])
            {
                radar =archivos[i].getName();
                System.err.println(radar);
                for(int j=0;j<archivos.length;++j)
                {
                    pluv =archivos[j].getName();
                    //Abre los archivos de la matriz de Pluviografo
                    //correspondiente a la misma hora del archivo de radar

                    if((radar.substring(5,10)).equals(pluv.substring(0,5)))
                    {
```

```

System.err.println(pluv);
FileReader archpluv =new FileReader(archivos[j]);
FileReader archrad =new FileReader(archivos[i]);
BufferedReader vpluv=new BufferedReader(archpluv);
BufferedReader vrad=new BufferedReader(archrad);

String line=vpluv.readLine();
line=vpluv.readLine();

//Lee el origen de la matriz del Radar y decide
//cuantas lineas se deben recortar para ajustar el
//tamaño a la matriz del Pluviografo
StringTokenizer sep=new StringTokenizer(line);
String x,y,basura;
basura= sep.nextToken();
basura= sep.nextToken();
x=basura.substring(2);
basura= sep.nextToken();
y=basura.substring(2);
float xx=Float.parseFloat(x);
float yy=Float.parseFloat(y);
int dx=(int)(xx-ox)+500;
int dy=(int)(yy-oy)+500;
dx=dx/1000;
dy=dy/1000;
System.err.println("x: "+dx+" y: "+dy);
dy=8-dy;
System.err.println("x: "+dx+" y: "+dy);
//Abre el archivo de resultados
FileWriter fw= new
FileWriter("c"+pluv.substring(0,5)+".txt");
//Recorta los renglones que no se acoplan
//con la matriz de pluviografo
for(int k =0;k<274;++k)
    vrad.readLine();
    for(int k=0;k<dy;++k)
        vrad.readLine();
    int alto;
    if(dy<0) alto=56+dy;
    else alto=56;
//Elimina las columnas que no se acoplan con la matriz
//del pluviografo y escribe en el archivo la matriz de
//datos que se compararan con los del radar
for(int k=0;k<alto;++k)
{
    line=vrad.readLine();
    sep=new StringTokenizer(line);
    for(int l=0;l<dx;++l)
        sep.nextToken();
    int ancho;
    if(dx>2) ancho=44-dx;
    else ancho=44;
    for(int m=0;m<ancho;++m)
    {
        String numero=sep.nextToken();
        fw.write(numero+" ");
    }
}

```

```
        fw.write("\n");  
    }  
    fw.close();  
    vrad.close();
```

```
    }
```

```
    }
```

```
    }
```

```
    }
```

```
    }
```

```
    }
```


Glosario

1. Antena

La antena es el dispositivo que dirige la señal del radar hacia el espacio. Una antena que envía la radiación con igual intensidad en todas direcciones (como la antena de una radiodifusora o análogo a un foco aislado sin "reflector") es llamada isotrópica. La mayoría de las antenas empleadas con radares meteorológicos enfocan la energía en una sola dirección (como una linterna), a este tipo de radares se les llama direccionales. Las antenas están compuestas por un cuerno alimentador y un reflector al que generalmente se le llama antena (Ver Fig. I.2)

2. Atenuación

Ésta se define como la reducción de intensidad de la onda electromagnética a lo largo de su ruta [Ref. 1] ya que la radiación electromagnética que pasa a través de cualquier medio, reduce su potencia en una cantidad que depende del tipo y densidad del material atravesado [Ref. 2].

La atenuación que sufre el radar es debido principalmente a dos tipos de efectos: absorción y dispersión. Con una longitud de onda de 10 cm la atenuación por gases es despreciable y para longitudes de onda de 3 cm o menos puede tener serios efectos. La atenuación más importante es la debida a la precipitación y con una longitud de onda de 10 cm ésta no es demasiado significativa, sin embargo para longitudes de ondas de 3 y 5.6 cm puede ser importante.

3. Despliegue

Anteriormente se empleaba una consola donde se desplegaban en una pantalla, a donde llegaba la imagen por medio de tubos de rayos catódicos de forma analógica, los productos de los radares meteorológicos obtenidos a partir de los barridos realizados, donde la imagen se podía ver sólo en el momento que se generaba la información sin poderse almacenar para su posterior análisis. Actualmente los radares modernos emplean pantallas de computadoras incorporadas al sistema con niveles de reflectividad de hasta 256 (0-255) valores, los cuales pueden ser almacenados en formato digital como información generada por los barridos del radar. Estos barridos los realiza el

radar girando sobre su propio eje para detectar los blancos meteorológicos que caen dentro de su radio de cobertura a un ángulo mínimo (cercano a los cero grados sobre la horizontal) y almacenar esta información, se eleva un grado para realizar el siguiente barrido y almacenar la información generada de éste y así sucesivamente, hasta generar un número de barridos suficiente para obtener un volumen de muestreo que permita el análisis de la estructura de aquellas tormentas que fueran detectadas dentro del radio de alcance del radar. El radar del cerro Catedral, por ejemplo, realiza diez barridos con éste fin.

4. Guía de onda

Para ser capaz de detectar la señal de retorno enviada por los blancos que encuentra en su camino, el radar requiere una energía mínima para que esta señal pueda ser detectada, los cables, que generalmente se emplean en aparatos electrónicos, no son muy útiles para llevar esta señal desde el receptor hasta el mezclador y al amplificador debido a sufren grandes pérdidas de energía. Por lo tanto, para tener la menor pérdida desde la salida de la señal, se emplea un conductor metálico rectangular hueco por donde viaja la señal y cuya dimensión depende de la longitud de onda de la señal emitida. La guía de onda se une con juntas especiales que aíslan la señal entre el transmisor y el receptor y conectan el switch transmisor/receptor y la antena. Esto permite que el transmisor y el receptor puedan colocarse en un mismo sitio.

5. Indicador de Altura y Distancia (RHI)

Otro producto muy útil en el estudio de las tormentas es el Indicador de Altura y Distancia (RHI por sus siglas en inglés). Este producto generalmente es empleado una vez que se ha detectado la posición en planta de la tormenta y se obtiene mediante un barrido vertical de la tormenta (Fig. I.5). Con este producto se puede observar la estructura vertical de la tormenta y su altura, lo que representa una ayuda bastante útil para los meteorólogos e hidrólogos. Las variaciones en el tiempo de esta estructura vertical permiten determinar el movimiento vertical ascendente del aire húmedo.

6. Indicador de Posición en Planta de Altitud Constante (CAPPI)

Debido a que las observaciones tomadas por el radar con el producto PPI tiene el inconveniente de que se aleja más de la superficie del terreno conforme más alejado esté

del radar para ángulos de elevación de la antena > 0 ; los radares modernos generan un producto a partir de varios barridos del radar a diferentes ángulos de elevación ϕ de la antena llamado CAPPI. Un producto CAPPI (PPI de altura constante) toma mediciones de cada uno de los barridos (PPI) a un nivel constante con respecto a la superficie del terreno a nivel del mar y posteriormente la computadora reconstruye todas estas mediciones y las presenta como si se hubiera medido a partir de un barrido a altura constante del terreno (Fig. I.6)

7. Indicador de posición en planta (PPI)

Uno de los indicadores o productos generados por el radar es el Indicador de Posición en Planta (PPI) el cual presenta la información sobre los ecos detectados por el radar en coordenadas polares (azimut y distancia). Este producto representa una medición a altura constante con respecto a la horizontal (ϕ constante), es decir, no sigue la curvatura de la tierra y, por lo tanto, los ecos estimados tienen mayor altura, con respecto a la superficie del terreno, conforme más alejado esté de la posición del radar (Fig. I.4)

8. Pedestal

Base moldurada que sirve de soporte a la antena del radar.

9. PseudoCAPPI

Un producto que mezcla los ecos más bajos de reflectividad de los productos PPI y CAPPI es el llamado PseudoCAPPI. Este producto es muy útil para fines hidrológicos ya que interesa conocer la zona más baja de la atmósfera para su comparación con lo que registran los pluviógrafos sobre el terreno.

10. Radar

La palabra radar es una abreviatura del vocablo inglés "*radio detection and ranging*" y ha sido definido como "el arte de detectar la presencia de objetos, determinando su dirección y distancia, por medio de ecos de radio, reconociendo sus características y empleando los datos así obtenidos" (Battan, 1973) [Ref. 1]. El término "objeto" en meteorología de radar se traduce como cualquier cosa que exista en la atmósfera y que devuelva una cantidad de potencia detectable a un receptor (de radar).

11. Radomo

El Radomo es una cubierta, destinada normalmente para proteger una antena contra los efectos de su entorno físico sin perjudicar sus prestaciones eléctricas.

12. Receptor

Ya que las señales que regresan hacia el radar son muy débiles, el receptor del radar es un dispositivo diseñado para detectar y amplificar las señales muy débiles recibidas por la antena. Por lo tanto, los receptores empleados deben ser de excelente calidad. Los receptores empleados por los radares meteorológicos mezclan o combinan dos frecuencias, en este caso la de entrada y la de salida, para obtener una frecuencia intermedia que le permita leer, registrar y desplegar la señal. A este tipo de receptores se les llama superheterodinos (del verbo heterodinar: mezclar o combinar dos frecuencias distintas en un elemento no lineal de manera que se produzcan frecuencias distintas a las de la entrada).

13. Reflector

Superficie paraboloidea, constituida por una chapa o, las más de las veces, por una tela metálica que se coloca detrás de la antena para concentrar las ondas muy cortas en un haz muy estrecho y dirigirlas en determinada dirección, de modo análogo a la reflexión de la luz por los reflectores ópticos.

14. Switch Transmisor/receptor

Para ser capaz de detectar las señales de retorno, el radar posee un dispositivo llamado receptor, el cual es muy sensible a las señales de baja potencia bajas (de hasta 10^{-4} W o menos). Ya que el transmisor puede emitir señales desde miles hasta millones de watts de potencia y a que el receptor detecta señales tan bajas, esta diferencia provocaría que, si el receptor recibiera por error la señal de alta potencia, se quemaría inmediatamente debido a su alta sensibilidad a la detección de las señales. Para evitar esto se añadió al sistema del radar un switch especial para proteger el receptor de la alta potencia del receptor. Este dispositivo controla la señal de salida, para proteger al receptor, dirigiendo ésta hacia la antena, la cual, a su vez, dirige la señal hacia el espacio alejándola del receptor. Cuando el radar está en modo de recepción el switch dirige la señal hacia el receptor consiguiéndose, de esta manera sencilla, tener en el mismo sitio

el transmisor y el receptor. De otra manera, el receptor tendría que colocarse en un sitio alejado del radar para protegerlo de las altísimas potencias de los transmisores.

15. Transmisor

Es la fuente de radiación electromagnética que emplea el radar para generar las señales de alta frecuencia que irradia hacia el espacio. Los tres tipos de transmisores más importantes para los radares meteorológicos son

- de Magnetrón.- Se utiliza para producir o amplificar corrientes de frecuencias muy elevadas y el flujo de electrones es controlado por un campo magnético. Puede generar señales de hasta 250 kW de potencia.
- de Klistrón.- Es un modulador de velocidades cuyo haz electrónico modulado excita oscilaciones continuas en una cavidad resonante de alta frecuencia y puede utilizarse como amplificador, oscilador, mezclador o multiplicador de altas frecuencias. Genera señales de más de 2 MW de potencia.
- de Estado sólido.- El funcionamiento de los elementos electrónicos depende del control de fenómenos eléctricos o magnéticos en un sólido, en particular un semiconductor, es decir, se emplea un semiconductor para que funcionen los circuitos. Un solo transmisor puede transmitir señales pequeñas, de hasta 50 W. Sin embargo, combinando y controlando varios transmisores pueden alcanzar a transmitir potencias de salidas más altas.

El transmisor más empleado en los radares meteorológicos es el transmisor de magnetrón. El pulso de radiación electromagnética generado por el transmisor viaja a la velocidad de la luz y si incide sobre cualquier blanco a lo largo de su trayectoria, la energía será reflejada o re-radiada hacia todas direcciones, una de éstas direcciones apunta hacia el radar regresando, por tanto, cierta porción de ésta energía hacia el radar. Si la señal es suficientemente fuerte, el radar la detectará y la desplegará en una pantalla.

