

31
2ET

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**



FACULTAD DE CIENCIAS

**"OBTENCION DE UN MODELO DE ESTIMACION
DE LOS NIVELES DE INCIDENCIA DE
DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LA
REPUBLICA MEXICANA A PARTIR
DE ALGUNOS PARAMETROS
METEOROLOGICOS"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
A C T U A R I O
P R E S E N T A :

RAUL FRANCO QUINTANA



MEXICO, D.F.

1995



FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

M. EN C. VIRGINIA ABRIN BATULE

Jefe de la División de Estudios Profesionales

Facultad de Ciencias

Presente

Los abajo firmantes, comunicamos a Usted, que habiendo revisado el trabajo de Tesis que realiz(ó)ron el pasante(s) Raúl Franco Quintana

con número de cuenta 8602451 - 0 con el Título: _____

Obtención de un modelo de estimación de los niveles de incidencia
de descargas atmosféricas en la República Mexicana a partir de
algunos parámetros meteorológicos.

Otorgamos nuestro Voto Aprobatorio y consideramos que a la brevedad deberá presentar su Examen Profesional para obtener el título de Actuario

GRADO	NOMBRE(S)	APELLIDOS COMPLETOS	FIRMA
M. en C.	Arturo	Galván Diego	
Director de Tesis Mat.	Margarita Elvira	Chavez Cano	
Act.	Amalia	Maldonado Rosas	
M. en C.	Beatriz Eugenia	Rodríguez Fernández	
Suplente M. en C.	William José	Gallardo	
Suplente			

Dedico el esfuerzo invertido en mi formación académica a dos grandes personas:

Mis padres.

Dedico el empeño empleado en este trabajo a:

Mis hermanas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente:

Al M. en C. Arturo Galván Diego por la confianza y amistad demostradas así como el apoyo brindado para la realización de este trabajo. En él, más que a un asesor vi a un amigo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Instituto de Investigaciones Eléctricas por permitirme utilizar sus valiosos recursos humanos y materiales.

A la maestra Margarita Chavez Cano por su incondicional asesoría.

De manera especial, a mis amigos que me apoyaron desinteresadamente y de quienes guardo un profundo respeto y agradecimiento.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
INTRODUCCION.....	1

CAPITULO 1

LA DESCARGA ATMOSFERICA: CONCEPTO, PARAMETROS Y MEDICION

1.0	INTRODUCCION.....	5
1.1	MECANICA DE LA DESCARGA ATMOSFERICA.....	6
1.2	INFLUENCIA DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS SOBRE LOS SISTEMAS ELECTRICOS.....	7
1.3	CARACTERIZACION DE LAS TORMENTAS ELECTRICAS.....	8
1.4	DISPOSITIVOS DE MEDICION DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS..	9
	1.4.1 CONTADOR DE RAYOS.....	9
	1.4.2 LOCALIZADOR DE TORMENTAS ELECTRICAS.....	10
1.5	UTILIDAD DEL LOCALIZADOR Y EL CONTADOR DE RAYOS.....	12
	1.5.1 SELECCION DE RUTAS PARA LINEAS.....	12
	1.5.2 CORRELACION ENTRE SALIDAS Y TORMENTAS... ..	12
	1.5.3 ADVERTENCIAS DE DESCARGAS.....	12
1.6	CONCLUSIONES.....	13

CAPITULO 2

LA DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA: MEDICION Y APLICACION

2.0	INTRODUCCION.....	15
2.1	DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA.....	16

2.2	PROGRAMA DE MEDICION DE LA DRT EN MEXICO.....	17
2.3	MAPA DE ISODENSIDAD DE RAYOS A TIERRA.....	20
2.4	CONCLUSIONES.....	22

CAPITULO 3

MODELO DE ESTIMACION DE LA DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA

3.0	INTRODUCCION.....	24
3.1	MODELOS INDIRECTOS PARA ESTIMAR LA DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA.....	26
3.2	PARAMETROS METEOROLOGICOS SELECCIONADOS.....	28
3.3	REGRESION LINEAL MULTIPLE.....	29
3.4	VARIABLES INDEPENDIENTES.....	32
3.5	SELECCION DE VARIABLES.....	35
3.6	METODO STEPWISE DE SELECCION DE VARIABLES.....	35
	3.6.1 STEPWISE FORWARD REGRESSION.....	36
	3.6.2 STEPWISE BACKWARD REGRESSION.....	36
3.7	NORMALIDAD.....	36
3.8	HOMOSCEDASTICIDAD.....	38
3.9	ECUACIONES DE AJUSTE OBTENIDAS.....	38
	3.9.1 ANALISIS DE NORMALIDAD PARA LAS ECUACIONES DE PREDICCION.....	42
	3.9.2 ANALISIS DE HOMOSCEDASTICIDAD PARA LAS ECUACIONES DE PREDICCION.....	42
3.10	CONCLUSIONES.....	57
	CONCLUSIONES.....	59
	BIBLIOGRAFIA.....	61

RESUMEN

Los sistemas de energía eléctrica están expuestos a disturbios causados por fenómenos naturales, tales como vientos huracanados, sismos, inundaciones, tormentas eléctricas, etc. Según los reportes de fallas de líneas de transmisión elaboradas por la Comisión Federal de Electricidad, las fallas que con mayor frecuencia se presentan, son ocasionadas por la incidencia de las descargas eléctricas atmosféricas.

Los graves problemas que pueden generar las interrupciones (apagones) en el suministro de energía eléctrica han llevado a investigar a nivel mundial las descargas eléctricas atmosféricas (rayos) como una de las principales causas.

En el sector eléctrico y de comunicaciones se han establecido esquemas de protección a partir del conocimiento de los parámetros principales del rayo, de los cuales los parámetros de incidencia representan un papel muy importante. El parámetro de la Densidad de Rayos a Tierra, definido como el número de descargas atmosféricas que inciden en el área de un kilómetro cuadrado por el período de un año, es el parámetro de incidencia que permite cuantificar de manera confiable la severidad de las tormentas.

Para el registro de la Densidad de Rayos a Tierra se utiliza un dispositivo llamado contador de rayos a tierra, el cual proporciona el número de rayos a tierra por kilómetro cuadrado al año. En México, los estudios tendientes a obtener información de dicho parámetro de incidencia comenzaron en 1983 con la instalación de una red de 115 contadores de rayos distribuidos sobre todo el

territorio nacional. El objetivo principal de estos estudios es obtener mapas de Densidad de Rayos a Tierra confiables los cuales sirven tanto para diseñar en forma óptima y eficiente los sistemas de protección contra el efecto de las descargas atmosféricas como para definir la trayectoria óptima de futuras líneas de transmisión considerando los niveles de Densidad de Rayos a Tierra.

Debido a que existen regiones de la República Mexicana en las cuales no se tiene información del parámetro de la Densidad de Rayos a Tierra, ya que la cobertura de los contadores de rayos es limitada, se han estudiado métodos indirectos de obtención de dicho parámetro. Estos modelos indirectos son de gran ayuda para estimar la DRT en los lugares donde no se tiene un dispositivo de medición.

En el presente estudio se propone un nuevo modelo indirecto de estimación de la Densidad de Rayos a Tierra a partir de los parámetros meteorológicos de Precipitación, Temperatura y Humedad. Para este propósito se utilizó la metodología de análisis de regresión lineal múltiple. Con base en los resultados obtenidos se planteó la idea de hacer una regionalización de los sitios correspondiente al parámetro de Altura Sobre el Nivel del Mar.

Con los resultados obtenidos de este nuevo método de estimación se afinarán los mapas de Densidad de Rayos a Tierra construidos originalmente para de esta manera observar los niveles de la severidad de las tormentas eléctricas en las diversas regiones del país.

INTRODUCCION

Para el sector eléctrico, uno de los problemas a considerar es la continuidad con que es suministrada la energía eléctrica, ya que debe de cumplir con calidad a cualquier centro de consumo y a cualquier condición de demanda. Esta continuidad se ve afectada en forma importante por diversos fenómenos naturales.

Las fallas que con mayor frecuencia se presentan en los sistemas de energía eléctrica son ocasionados por la incidencia de las descargas eléctricas atmosféricas comúnmente conocidas como rayos, evento característico de las tormentas eléctricas. Desafortunadamente los diseños de protección contra rayos no siempre proporcionan la reducción esperada de los daños causados por este fenómeno natural. Las razones son diversas, pero principalmente sucede que los diseños están basados sobre los parámetros más representativos del rayo, los cuales muestran valores diferentes en las distintas regiones geográficas del territorio nacional, por lo que el conocimiento o caracterización de los parámetros de las tormentas eléctricas y la adopción de métodos de protección constituyen dos aspectos fundamentales para reducir los daños ocasionados por este fenómeno.

Con base en lo anterior se hace indispensable un mejor conocimiento de este fenómeno natural, así como de la actividad atmosférica en la República Mexicana, lo cual puede proporcionar elementos de juicio para la protección de las líneas de potencia.

La necesidad de obtener un parámetro que permitiera cuantificar la severidad de las tormentas motivó el desarrollo de

dispositivos para el monitoreo de las descargas atmosféricas, uno de ellos utilizado en nuestro país es el contador de rayos.

En 1979, se instalaron en la República Mexicana 25 contadores de rayos los cuales no tuvieron un gran desarrollo debido a la escasa seguridad física de las instalaciones, a la gran extensión ocupada por la instalación y a la limitada discriminación entre las descargas a tierra y entre nubes. Posteriormente, se instaló una red de contadores más grande, utilizando un nuevo tipo de contador con una mejor característica de discriminación de la ocurrencia de rayos entre nubes.

En el año de 1983 entró en operación una nueva red de 115 contadores de rayos distribuidos en la país para obtener la Densidad de Rayos a Tierra. Estos contadores fueron ampliamente utilizados en Sudáfrica, en donde se realizaron las investigaciones correspondientes para su desarrollo y prueba.

La información obtenida en el período 1983 - 1993 sirvió para generar mapas de isodensidad de rayos a tierra en los cuales se pueden observar los diferentes niveles de la Densidad de Rayos a Tierra en el territorio nacional.

Debido a que existen regiones de la República Mexicana en las cuales no se tiene información del parámetro de la Densidad de Rayos a Tierra (DRT) ya que la cobertura de los contadores de rayos es limitada se han estudiado métodos indirectos de obtención de dicho parámetro. Estos modelos indirectos son de gran ayuda para estimar la DRT en los lugares donde no se tiene un dispositivo de medición.

En este trabajo se propone un modelo indirecto de estimación de la DRT partiendo del hecho de que las descargas atmosféricas tienen una dependencia con los parámetros meteorológicos de Temperatura, Precipitación y Humedad ya que se ha podido establecer que cuando se acentúan los niveles de estos parámetros, también se produce un mayor número de descargas atmosféricas. Tomando en cuenta que el ascenso orográfico es un factor del que depende la formación de nubes de gran extensión asociadas con actividad eléctrica atmosférica se procedió con la agrupación de las localidades por el parámetro de Altura Sobre el Nivel del Mar (ASNM) de tal forma que se obtuvo una ecuación de ajuste correspondiente a cada grupo de ASNM. El modelo de estimación fue construido con base en la metodología del análisis de regresión lineal múltiple. El cálculo de los coeficientes de las variables independientes, en la ecuación de regresión, se hizo utilizando el método de mínimos cuadrados. Para el ajuste fueron consideradas siete variables de las cuales se seleccionaron aquellas que contribuían con información para predecir la DRT utilizando el método "stepwise forward" de selección de variables.

Una vez obtenida la ecuación de ajuste para cada grupo de ASNM, se hizo un análisis de los residuales tomando en consideración las condiciones de normalidad y homoscedasticidad las cuales ayudan a determinar la efectividad del modelo de estimación.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se indican los conceptos fundamentales de la descarga atmosférica, los parámetros de incidencia característicos de las tormentas eléctricas y los dispositivos actualmente desarrollados para el monitoreo de las descargas atmosféricas. En el Capítulo 2 se describe el concepto de la Densidad de Rayos a Tierra que es el parámetro que permite cuantificar la severidad de las tormentas eléctricas. Asimismo se comenta acerca del programa de medición de la DRT en México. En el Capítulo 3 se describen los distintos modelos indirectos desarrollados hasta la fecha para la estimación de la DRT. Se indican los parámetros meteorológicos seleccionados y el motivo de su selección así como una breve explicación del método de regresión lineal múltiple empleado para la obtención del modelo de estimación. Se comenta lo referente al método de selección de variables y las pruebas de normalidad y homoscedasticidad que indican la efectividad del modelo encontrado con base en un análisis de los residuales.

CAPITULO 1

LA DESCARGA ATMOSFERICA: CONCEPTO, PARAMETROS Y MEDICION

1.0 INTRODUCCION

Los sistemas de energía eléctrica, por sus características de operación, están expuestos a diversos fenómenos naturales tales como huracanes, vientos fuertes, sismos, inundaciones, tormentas eléctricas, etc.. Las fallas que con mayor frecuencia se presentan son ocasionadas por la incidencia de las descargas eléctricas atmosféricas, comúnmente conocidas como rayos. Las descargas atmosféricas, según reportes de la Comisión Federal de Electricidad, son la mayor causa de interrupciones en el servicio eléctrico.

A nivel mundial, la tendencia general es caracterizar los parámetros básicos de las tormentas eléctricas para su aplicación en sistemas eléctricos de energía. Desde hace muchos años el rayo ha estado sujeto a diversos estudios con el fin de conocer sus parámetros más importantes para controlar sus efectos destructivos. En el sector eléctrico y de comunicaciones se han establecido esquemas de protección a partir del conocimiento de los parámetros principales del rayo, de los cuales los parámetros de incidencia representan un papel muy importante y son conocidos como densidad de rayos a tierra, polaridad, multiplicidad y localización del rayo.

Hace algunos años, la estimación de la severidad de las tormentas se realizaba por medio del número de días tormenta observado, considerando al día tormenta como aquel en que por lo

menos se escucha un trueno. Sin embargo, esta estimación presenta una gran dispersión debido a que un día tormenta puede contener desde una hasta cientos de descargas atmosféricas.

Lo anterior motivó el desarrollo de dispositivos especializados para el monitoreo de las descargas. Actualmente, existen dos tipos de dispositivos comúnmente utilizados: el contador de rayos y el localizador de tormentas. Los resultados obtenidos por estos dispositivos establecen la severidad de las tormentas con un alto grado de confiabilidad.

En este capítulo se indicarán los conceptos fundamentales de una descarga atmosférica, los parámetros característicos que son de interés para el sector eléctrico y los dispositivos actualmente desarrollados para su monitoreo.

1.1 MECANICA DE LA DESCARGA ATMOSFERICA

De todos los fenómenos naturales que pueden afectar el servicio de energía eléctrica, la descarga atmosférica a tierra es una de las causas que con mayor frecuencia produce interrupciones en el suministro de energía eléctrica, según estadísticas reportadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [10].

Los resultados más recientes de algunos estudios realizados por diversos investigadores indican que, cuando se forma la nube de tormenta se inicia el fenómeno del rayo o descarga atmosférica. Existen varios mecanismos posibles por los cuales la carga eléctrica puede ser generada en la nube. Estos incluyen los efectos de fricción entre las partículas de hielo y separación de cargas en el congelamiento de las gotas de agua. Las partículas de hielo positivamente cargadas se acumulan en la parte superior de la nube, y las partículas más pesadas, como granizo y gotas de agua, cargadas negativamente se acumulan en la parte inferior de la nube.

La nube se descargará cuando su base se aproxime a algún objeto alto en la tierra. Así, la carga negativa de la nube seguirá una trayectoria hacia abajo atraída por una carga positiva en el suelo produciendo espectaculares relámpagos bifurcados de tal forma que la energía que se libera calienta el aire circundante a la trayectoria del rayo, produciendo los familiares estallidos y retumbos de truenos. El relámpago es la parte visible de la descarga eléctrica (rayo) que puede ocurrir dentro de una nube, de nube a nube, o de nube a tierra y es bifurcado porque la descarga busca la trayectoria de menor resistencia a través del aire la cual es generalmente irregular. Se ha observado que cuando existen

tormentas también existen altas temperaturas en el aire además de una alta humedad [3].

La descarga atmosférica es uno de los fenómenos naturales más importantes, que se presenta con mucha frecuencia y que afecta en diversas formas. La ocurrencia de descargas atmosféricas sobre edificios o casas causa un efecto destructivo. Anualmente este fenómeno causa daños muy extensos a nivel mundial, particularmente en los sistemas eléctricos manifestándose en pérdida de millones de pesos por daños a transformadores, conductores, aisladores, postes, etc.

Aún cuando se estima que las descargas entre nubes constituyen alrededor del doble del número de descargas a tierra, son estas últimas las que se han estudiado en forma más extensa debido a sus efectos destructivos.

1.2 INFLUENCIA DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS SOBRE LOS SISTEMAS ELECTRICOS

Las líneas de transmisión representan para el sector eléctrico el medio para transportar la energía eléctrica de las centrales generadoras hacia los centros de consumo, de ahí la importancia de mantenerlas en óptimas condiciones ya que son los elementos más vulnerables a las descargas atmosféricas, contaminación, vientos fuertes y vandalismo.

El crecimiento del país condiciona en forma paralela el desarrollo de la producción de energía eléctrica y como consecuencia el de los sistemas de transmisión en los diferentes niveles de voltaje (400, 230 y menos de 230 kV). Con base en lo anterior es de vital importancia dar un mantenimiento adecuado a las líneas de transmisión así como el incorporar los sistemas de protección necesarios.

Para el sector eléctrico, la exposición a las tormentas eléctricas de las instalaciones de energía eléctrica dependen en gran medida de la magnitud de dichas tormentas. Los resultados obtenidos en los últimos años, según reportes de la Comisión Federal de Electricidad muestran que las causas que han provocado el mayor índice de salidas de línea han sido, por orden de importancia, las siguientes: descargas atmosféricas, contaminación, vientos fuertes e ignoradas.

Por ejemplo, para 1992, se obtuvo un índice nacional de salidas por falla en líneas de transmisión de 2.43, el cual

comprende los voltajes de 400 a 115 kV, siendo este índice mayor al del año anterior debido a que en el voltaje de 161-115 kV ocurrieron 58 salidas más provocadas por mayor presencia de lluvia (precipitación), que incrementó en un 30% las salidas por descargas atmosféricas presentándose 1171 fallas. Las causas de salidas, junto con su correspondiente porcentaje para dicho año se muestran en la figura 1.1.

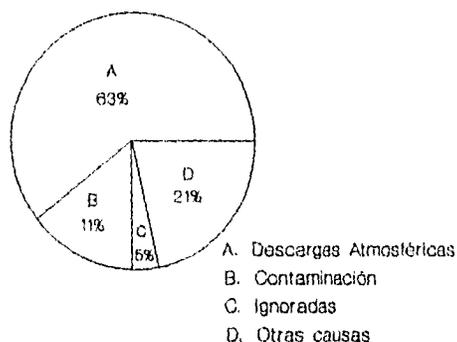


Figura 1.1 Causas de fallas en las líneas de transmisión en la República Mexicana para 1992.

1.3 CARACTERIZACION DE LAS TORMENTAS ELECTRICAS

Caracterizar las tormentas eléctricas significa conocer las condiciones en las cuales se presentan éstas y definir cualitativa y/o cuantitativamente los parámetros de interés para sus posteriores aplicaciones.

El conocimiento de los parámetros característicos de las tormentas eléctricas es de vital importancia para apoyar en la solución de los problemas relacionados con la incidencia de las descargas atmosféricas sobre instalaciones de energía eléctrica.

Los parámetros de incidencia son aquellos que caracterizan la terminación de las descargas eléctricas a tierra, los principales son:

- a) *Densidad de Rayos a Tierra (DRT)*. Este parámetro proporciona la frecuencia de la incidencia a tierra de las descargas atmosféricas por unidad de área en un período de tiempo.
- b) *Polaridad*. Este parámetro es importante debido a que un 90% de los rayos a tierra son de polaridad negativa (transferencia de carga negativa), en latitudes en donde se encuentra la República Mexicana.
- c) *Multiplicidad*. Este parámetro consiste en el número de descargas que se presentan en un solo evento o rayo.
- d) *Localización*. La localización consiste en conocer el sitio de incidencia del rayo con el fin de poder establecer con mayor precisión los efectos que causa sobre las instalaciones eléctricas.

1.4 DISPOSITIVOS DE MEDICION DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

La necesidad de medir la intensidad de las tormentas como un elemento más completo y real en la cuantificación de su severidad generó el desarrollo de dispositivos de monitoreo. Dos de los dispositivos con mayor aplicación son conocidos como contador de rayos y localizador de tormentas eléctricas.

1.4.1 Contador de rayos

El contador de rayos es un dispositivo que opera bajo el principio de incrementar un contador mecánico en el momento en que incide un rayo a tierra dentro del rango del contador. Este dispositivo proporciona la frecuencia en la incidencia de los rayos a tierra por unidad de área (DRT).

A finales de la década de los 70's, se habían desarrollado dos tipos de contadores para el registro de las descargas atmosféricas: el contador CIGRE-500 Hz y el contador CIGRE-10 kHz. Las características del segundo contador lo han hecho el más utilizado en el mundo, y son:

- 1) Radio efectivo de 19.9 km.
- 2) Buena discriminación de rayos entre nubes.
- 3) Banda central de respuesta a la frecuencia de 10 kHz.
- 4) Respuesta gobernada por los campos de radiación de rayos a tierra.
- 5) Relación de respuesta de rayos a tierra de 0.93.
- 6) Tiempo de respuesta de 1 segundo.
- 7) Interpretación sencilla de los registros.
- 8) Costo bajo de instalación, operación y recolección de datos comparado con dispositivos electrónicos comerciales más sofisticados.

A pesar de sus ventajas, este contador únicamente proporciona la DRT, es decir, la frecuencia por unidad de tiempo. La necesidad de contar con un dispositivo de mayor alcance originó que en el Instituto de Investigaciones Eléctricas se desarrollara un contador con base de tiempo, cuya característica principal es, además de proporcionar la DRT, indicar la fecha y hora de incidencia de la descarga atmosférica. La base de tiempo es muy importante para cuando se requiere realizar una correlación entre las interrupciones de las líneas de energía con la incidencia de las descargas atmosféricas.

1.4.2 Localizador de tormentas eléctricas

Los localizadores de tormentas tienen por lo menos 15 años que se han venido desarrollando. Su desarrollo ha evolucionado en la misma forma que la electrónica digital y la tecnología de monitoreo, ya que ha tenido un gran interés para diferentes aplicaciones.

El localizador, además de calcular la posición del rayo también determina la frecuencia de ocurrencia en una área y el momento de ocurrencia. En México se instaló un sistema de localización para el período de 1984 a 1986 con el objeto de caracterizar al rayo para el proyecto de protección de la línea.

Las aplicaciones de estos sistemas son bastante amplias en varios campos. En sistemas de potencia la información obtenida es de gran importancia, ya que su uso es variado, pudiéndose utilizar como contador de rayos, ya que el equipo consta de varias entradas adicionales, donde se pueden conectar los relevadores de los interruptores de una subestación y correlacionar las operaciones de los interruptores con rayos que incidan directamente sobre las líneas o cerca de ellas.

Ventajas:

- Diseñado para detectar aproximadamente del 80 al 90 % de las descargas a tierra, con rangos nominales de 45, 90, 180 ó 360 km.
- Capaz de determinar las coordenadas de cada rayo que termina en tierra, así como el número de descargas en el relámpago, amplitud de pico, tiempo de ocurrencia y frecuencia de ocurrencia en el área.
- Distingue rayos entre nubes de rayos a tierra por la forma de onda del campo eléctrico.
- La posición del rayo es calculada y los resultados son dados en tiempo real.
- Ancho de banda amplio de 1kHz a 1MHz.
- No se necesitan muchos localizadores para cubrir una área grande.
- Puede usarse como contador de rayos.

Desventajas:

- Su costo unitario es muy alto comparado con el contador.
- No deben instalarse bajo o cerca de techos o estructuras metálicas.
- Se requiere de alguna persona constantemente cerca del mecanismo para corregir posibles desplazamientos en el reloj analizador de posición.

La operación del equipo es completamente automática y no requiere la atención constante a ninguno de los componentes, solo las actividades de rutina, como lo es el cambio del papel de la impresora y del graficador cuando sea necesario, el cambio de cinta de la unidad grabadora cuando se sature la información y el corregir posibles desplazamientos.

1.5 UTILIDAD DEL LOCALIZADOR Y EL CONTADOR DE RAYOS

Ambos sistemas proporcionan una gran utilidad. Los datos de la Densidad de Rayos a Tierra son requeridos para diseñar y evaluar propuestas que pueden ayudar a minimizar el índice de salidas de líneas de transmisión y distribución y otras aplicaciones relacionadas con descargas. Algunas de las actividades que pueden realizarse con los resultados y operación de estos dos dispositivos de monitoreo de las descargas atmosféricas son:

1.5.1 Selección de rutas para líneas

En líneas aéreas largas de transmisión de energía eléctrica con frecuencia es conveniente disponer de datos de DRT como un instrumento para ayudar en la selección de la ruta más conveniente para proyectar las líneas, tratando de librar cruzamientos por regiones de alta incidencia de descargas. Un sistema grande de contadores o alternativamente un sistema de localizadores, podría proporcionar los datos necesarios para este propósito.

1.5.2 Correlación entre salidas y tormentas

En sistemas de transmisión y distribución se acostumbra llevar una anotación detallada de datos de disturbios en la forma de tiempo de ocurrencia de circuitos de salida. Es importante la correlación entre datos de salida y la ocurrencia de tormentas para evaluar la incidencia de las descargas en líneas individuales o circuitos. No todas las salidas y fallas en el suministro de energía eléctrica son debidas a descargas durante las tormentas.

1.5.3 Advertencias de descargas

Este es un importante aspecto de seguridad para servicios de cuadrillas, para asegurar que reparaciones y otros trabajos en las líneas sean ejecutadas sin riesgo de daños causados por descargas atmosféricas.

1.6 CONCLUSIONES

La descarga atmosférica es el fenómeno natural que más afecta al servicio de energía eléctrica según reportes de la Comisión Federal de Electricidad.

La descarga eléctrica atmosférica puede ser definida como una descarga eléctrica con una elevada corriente transitoria cuya trayectoria generalmente se mide en kilómetros. El rayo puede tomar lugar dentro de la nube, entre dos nubes ó entre nube y tierra. Los rayos estudiados principalmente en el sector eléctrico son los que ocurren de nube a tierra por su efecto sobre los sistemas eléctricos.

Es importante conocer las condiciones en las cuales se presentan las tormentas eléctricas así como definir sus parámetros característicos para el apoyo en la solución de los problemas relacionados con su incidencia sobre instalaciones eléctricas. Los principales parámetros de incidencia son: a) Densidad de rayos a tierra, b) Polaridad, c) Multiplicidad y d) Localización.

La necesidad de medir la densidad de rayos a tierra ha dado origen a la construcción de dispositivos tales como los contadores de rayos y los sistemas de localización. El contador de rayos proporciona una medición de la DRT sobre cierta área mientras que el localizador proporciona la localización de todos los rayos a tierra. Los contadores de rayos son generalmente usados en varios países del mundo debido a su bajo costo de instalación.

CAPITULO 2

LA DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA: MEDICION Y APLICACION

2.0 INTRODUCCION

En la búsqueda de un parámetro que permitiera cuantificar de manera confiable la severidad de las tormentas se determinó el parámetro de la Densidad de Rayos a Tierra (DRT) definido como el número de descargas atmosféricas que inciden en el área de un kilómetro cuadrado por el período de un año.

El programa de medición de la DRT en México comenzó en 1979 con la instalación de 25 contadores de rayos y debido a sus resultados se amplió a una red de 115 contadores en 1983 distribuidos a lo largo y ancho del país. Los lugares en los cuales se instalaron obedecieron principalmente a las regiones en las cuales la Comisión Federal de Electricidad tiene instaladas líneas de 400, 230 y 115 kV, así como regiones para instalar futuras líneas de distribución.

Con los registros obtenidos en el período de 1983 a 1993 de la DRT se generaron tanto mapas de isodensidad de rayos a tierra anuales como un mapa promedio para dicho período, los cuales muestran las características de las tormentas eléctricas en las diferentes regiones del país determinando los niveles de incidencia. Asimismo se construyó un modelo de estimación que permite predecir la DRT a partir de la información obtenida de los contadores de rayos durante un período de ocho años.

2.1 DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA

La mayoría de la información referente a descargas atmosféricas se manejó por mucho tiempo en términos de días tormenta. El día tormenta se define como aquel en el que por lo menos se escucha un trueno debido a una descarga atmosférica. Sin embargo, la información de los días tormenta no proporciona la severidad de las tormentas en una región determinada, ya que el día tormenta puede contener desde algunas descargas hasta cientos de ellas por lo cual no se pueden establecer valores estimados de la Densidad de Rayos a Tierra tomando como parámetro básico a los días tormenta.

Debido a lo anterior, surgió la necesidad de obtener un parámetro más confiable que permitiera cuantificar la severidad de las tormentas eléctricas. Es así como se empezó a emplear el parámetro de la Densidad de Rayos a Tierra (DRT) para dicha cuantificación. Este parámetro se define como el número de descargas atmosféricas (rayos a tierra) que inciden en el área de un kilómetro cuadrado durante un período de un año.

El parámetro de la DRT se calcula de la siguiente manera:

$$DRT = \frac{f * n}{\pi * r^2} \quad 2.1$$

en donde:

DRT : Densidad de Rayos a Tierra
f : Factor de corrección para rayos entre nubes (0.93)
n : Número de rayos registrados por el contador de rayos
r : Radio efectivo del contador de rayos (19.9 km)

Sustituyendo valores, la ecuación 2.1 puede escribirse como:

$$DRT = \frac{n}{1340} \quad 2.2$$

Actualmente, de acuerdo con algunos estudios iniciados desde hace más de veinte años, se tiene información de la DRT en varios países del mundo. En la tabla 1 se muestra el rango de la DRT para algunos países.

LUGAR	DRT		
Brasil	1.0	a	9.0
Australia	0.2	a	4.0
Italia	1.0	a	4.0
Sudáfrica	1.0	a	12.0
Alemania	1.0	a	5.5
México	1.0	a	12.0

Tabla 1. Densidad de Rayos a Tierra para algunos países.

2.2 PROGRAMA DE MEDICION DE LA DRT EN MEXICO

En 1979, se instalaron en la República Mexicana 25 contadores de rayos del tipo CIGRE-500 Hz de antena horizontal. Sin embargo, estos primeros contadores no tuvieron un gran desarrollo debido a la escasa seguridad física de las instalaciones, a la gran extensión ocupada por la instalación y a la inadecuada discriminación de las descargas entre nubes, lo cual producía un ineficiente registro de los rayos a tierra. La experiencia obtenida con estos 25 contadores de rayos motivó la instalación de una red de contadores más grande, utilizando un contador con una mejor discriminación de la ocurrencia de rayos entre nubes.

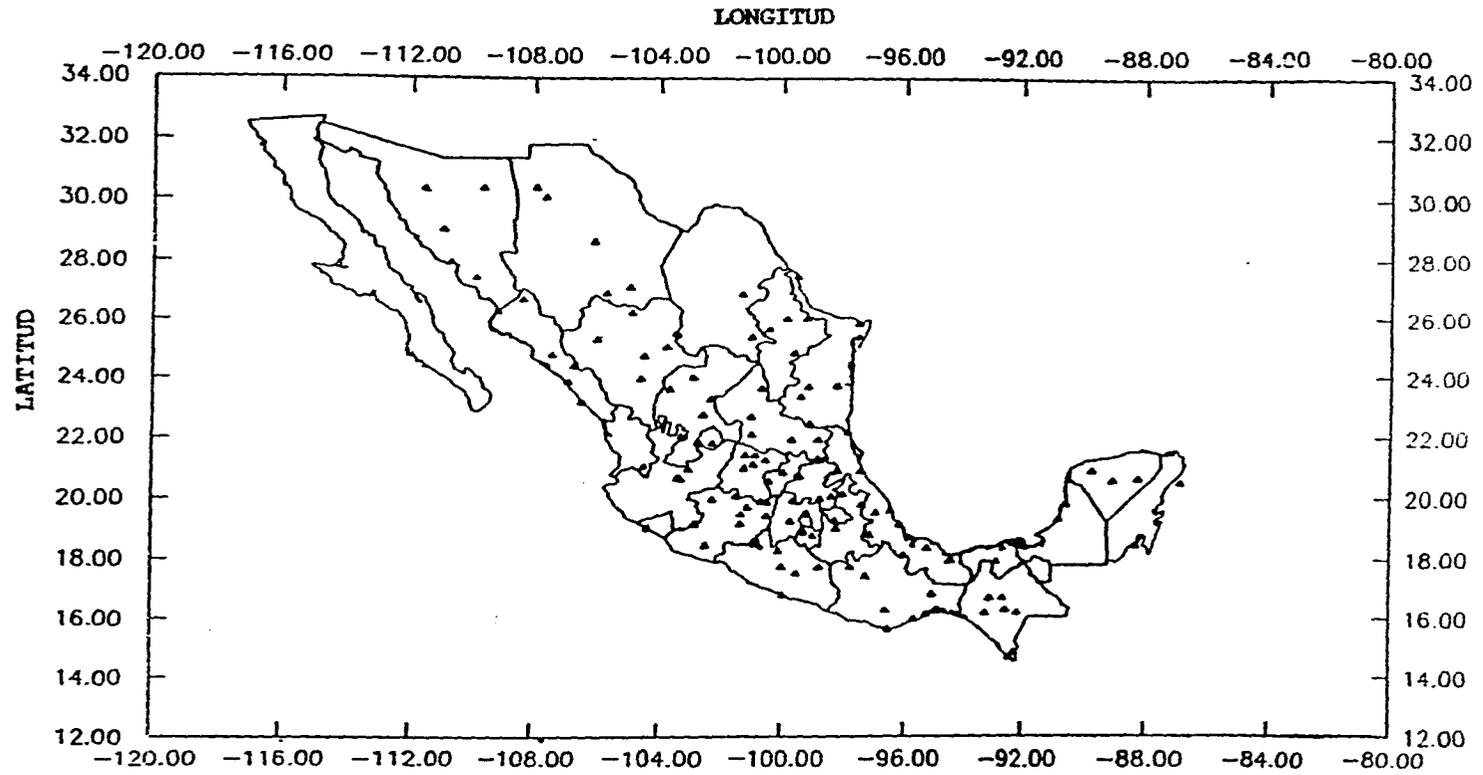
Como se mencionó en el capítulo anterior, las mejores características de discriminación de rayos entre nubes presentadas por el contador CIGRE-10 kHz para el registro del número de descargas por kilómetro cuadrado y por año así como lo sencillo de su instalación, operación y mantenimiento fueron condiciones definitivas para su selección en la red de 115 contadores de rayos instalada en la República Mexicana en 1983. Es así como en México se cuenta con la información de la DRT correspondiente al período 1983-1993 para aquellos lugares en donde se cuenta con un contador de rayos instalado.

La selección del sitio de instalación de cada contador se basó en la sugerencia por parte del personal de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la opinión de algunos especialistas en este campo. Los criterios fueron principalmente:

- 1) Los contadores se instalaron en regiones de interés para CFE, considerando la red eléctrica actual y las rutas de futuras líneas al año 2000.
- 2) Dentro de las regiones de interés se dió prioridad a las zonas críticas con alto porcentaje de interrupciones del servicio eléctrico debidas a las descargas atmosféricas.
- 3) Se usaron las instalaciones pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la Comisión Nacional del Agua (CNA), que cuenta con centros de observación en todo el país.
- 4) Se consideraron los sitios con mejores condiciones de ubicación que reunieron los requisitos mínimos de instalación y seguridad.

El mapa 2.1 muestra la ubicación de dichos contadores de rayos.

El personal que labora en las estaciones de observación fué el responsable del control y de la toma de lecturas del contador de rayos. Estas lecturas se tomaron diariamente y se concentraron en un formato que cubre un período de un mes de operación. En el formato se indica la fecha, el número de serie del contador, nombre del lugar, nombre del observador y las lecturas diarias de los rayos registrados por el contador.



Mapa 2.1 Ubicación de los contadores de rayos.

2.3 MAPA DE ISODENSIDAD DE RAYOS A TIERRA

El objetivo que se persigue al tener la información de la DRT es obtener mapas de isodensidad de rayos a tierra confiables, los cuales representan un elemento de apoyo para diseñar en forma óptima y eficiente los sistemas de protección contra el efecto de las descargas atmosféricas.

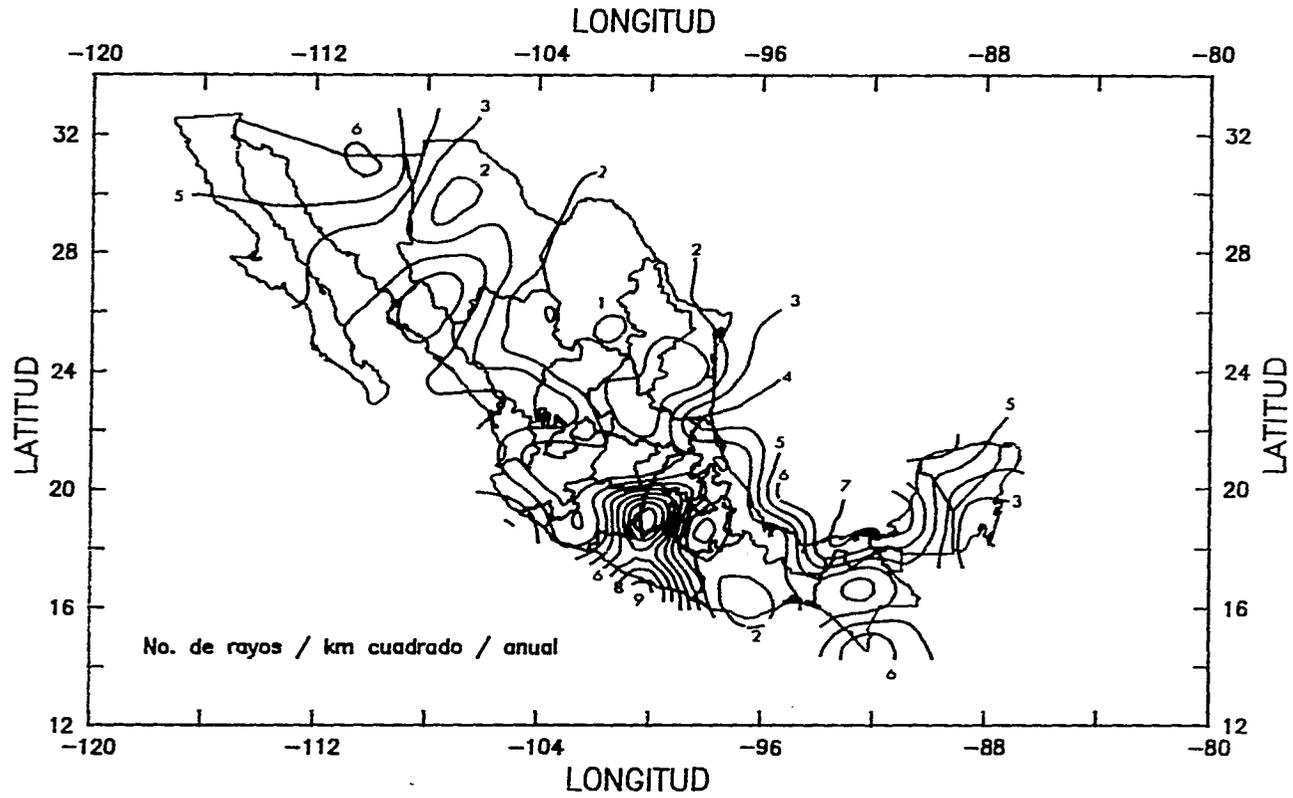
Estos mapas se generan utilizando un paquete computacional llamado SURFER, el cual utiliza diversos métodos de interpolación para generar, por medio de una red de puntos establecidos previamente para la interpolación, las isolíneas características a partir de la información puntual de los registros de la DRT. Dicho paquete calcula los valores de cada uno de los puntos definidos por los cruces de una red de interpolación predefinida. Cada cruce de la red predefinida es estimado tomando en cuenta los 10 valores de DRT reales más cercanos obtenidos por el contador de rayos. Con los valores estimados en cada cruce, se obtienen las isolíneas correspondientes. Estas isolíneas son sometidas a un proceso llamado "Spline", el cual suaviza el contorno de las isolíneas producto del análisis de interpolación.

La elaboración de dichos mapas ha permitido establecer las zonas representativas de incidencia de descargas atmosféricas en el país. Estas zonas han presentado un patrón de comportamiento, cuyas características pueden condensarse de la siguiente forma:

En general, las regiones Norte, Centro-Norte y Noreste de la República Mexicana son de baja incidencia, excepto la parte Norte de Sonora ya que se registra una alta incidencia en Nacozari y en Atil. Para la costa del Pacífico, se tienen niveles medios y elevados de DRT, excepto en la costa del estado de Oaxaca, donde el nivel es bajo. Para la costa del Golfo, se tienen niveles medios y elevados de DRT, excepto para la costa del estado de Tamaulipas. Las regiones Sur y Sureste de la República Mexicana registran en general niveles medios y elevados de DRT, excepto para los estados de Oaxaca, Quintana Roo y la parte central norte de Chiapas, donde los niveles son bajos.

El mapa de isodensidad de rayos a tierra correspondiente al período 1983-1993 se muestra en el mapa 2.2 en el cual se pueden observar los distintos valores de la Densidad de Rayos a Tierra en el territorio nacional. Los números representan el número de rayos a tierra por kilómetro cuadrado que inciden en promedio anualmente.

MAPA 2.2 ISODENSIDAD DE RAYOS A TIERRA 1983-1993



2.4 CONCLUSIONES

La Densidad de Rayos a Tierra es el parámetro usado para determinar la severidad de las tormentas ya que proporciona la frecuencia de la incidencia a tierra de las descargas atmosféricas por unidad de área para un período de tiempo.

En México, con el objeto de caracterizar la intensidad de las tormentas eléctricas en las diferentes regiones del país por medio de la densidad de las descargas atmosféricas a tierra, se inició la operación de una red de 115 contadores de rayos instalados en todo el territorio nacional con los cuales se han venido obteniendo los registros de la DRT. La ubicación de dichos contadores obedeció principalmente a zonas donde se encuentra instalada la red eléctrica actual y en las rutas de futuras líneas al año 2000.

Con dichos registros se construyeron mapas de isodensidad de rayos a tierra en los cuales se observan los distintos niveles de la Densidad de Rayos a Tierra en la República Mexicana.

CAPITULO 3

MODELO DE ESTIMACION DE LA DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA

3.0 INTRODUCCION

En la actualidad se han establecido algunos modelos indirectos para estimar la DRT en alguna región de interés. De hecho, existen algunas relaciones encontradas para estimar la DRT a partir de los días tormenta. Estos modelos indirectos no sustituyen a los dispositivos de medición, sino que representan herramientas de apoyo para el análisis de la severidad de las tormentas. Entonces queda perfectamente establecido que, para obtener la severidad de las tormentas, deben utilizarse dispositivos de medición especializados.

Estos modelos indirectos son útiles para estimar la DRT en aquellos lugares en donde no se tiene un dispositivo de medición. Si se pretendiera realizar un mapa de DRT con los resultados obtenidos de los modelos indirectos la información tendría un alto grado de incertidumbre.

Existen algunos modelos reportados en la literatura. Algunos de ellos relacionan la precipitación pluvial con los días tormenta, otros relacionan directamente los días tormenta con la DRT. En varios países ya se cuenta actualmente con información de la DRT obtenida con base en varios años de observación.

En el presente trabajo se propone un nuevo modelo que relaciona algunos parámetros meteorológicos (Precipitación Pluvial,

Temperatura Media y Humedad Relativa) con la DRT ya que se ha observado que, en general, cuando se acentúan los niveles de éstos parámetros, también se produce un mayor número de descargas atmosféricas. La construcción del modelo se basó en el análisis de regresión lineal múltiple.

En el análisis de regresión lineal múltiple se plantea el problema de predecir una variable Y (variable dependiente) con base en la información auxiliar proporcionada por un conjunto de variables (variables independientes) que se suponen relacionadas con Y y que por ello son útiles en su predicción. Es así como se considera a Y como una función lineal de dicho conjunto de variables independientes.

Para el cálculo de los coeficientes en la ecuación de ajuste se siguió el método de mínimos cuadrados en el cual se hace mínima la suma de los cuadrados de los residuales. En dicho ajuste fueron consideradas siete variables sobre las cuales se manejó una selección de variables con base en el método "stepwise forward".

El estudio de los residuales (o errores de ajuste) es muy importante para decidir la efectividad de un modelo de predicción. Si los errores son esencialmente aleatorios, entonces el modelo puede ser adecuado, pero si muestran algún tipo de patrón, entonces el modelo no toma cuidado de toda la información del conjunto de datos. Las siguientes son dos condiciones que ayudan en mencionado análisis.

Condición de homoscedasticidad:

Esta condición existe cuando la varianza de una serie es constante sobre el rango total de los valores de la serie. Cuando la serie de residuales exhibe varianza constante sobre el rango completo de periodos de tiempo decimos que exhibe homoscedasticidad.

Condición de normalidad:

Si una distribución de una muestra sigue aproximadamente la forma de una curva normal, es posible convertir la curva de frecuencias acumuladas en una "línea recta", utilizando para ello, una escala vertical llamada escala de probabilidad. Esta escala se ha construido de tal forma que cualquier distribución normal de frecuencias totales aparece como una línea recta.

Las variables independientes consideradas para la construcción del modelo de estimación fueron las siguientes: P, T, H, PT, PH, TH y PTH donde P es la precipitación pluvial, T es la temperatura media y H es la humedad relativa. Dicha información fué obtenida en las oficinas del Sistema Meteorológico Nacional.

3.1 MODELOS INDIRECTOS PARA ESTIMAR LA DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA

Como se mencionó en el punto 2.1, anteriormente la DRT se obtenía a partir del número de días tormenta. En un esfuerzo por determinar una correlación entre la información obtenida de los días tormenta (información obtenida generalmente de los Servicios Meteorológicos) y los valores de la DRT, se han establecido diferentes relaciones en diversas partes del mundo. La tabla 2 muestra algunas relaciones encontradas entre la DRT y los Días tormenta (Td). Sin embargo, como se puede apreciar, predomina una gran dispersión entre los días tormenta y la DRT. Para la República Mexicana se analizaron estas relaciones para las diferentes condiciones geográficas en las cuales se ubicaron los dispositivos de monitoreo. En la figura 3.1 se muestran estas relaciones.

LUGAR	DRT		
	Td=20	Td=50	Td=100
Brasil	0.9	2.4	5.2
Italia	0.6	2.7	7.9
Sudáfrica	1.7	5.3	12.6
USA	2.0	5.0	10.0
Nueva Guinea	0.2	0.5	1.0
Otros países	3.0	7.5	15.0

Tabla 2. Relaciones encontradas entre la DRT y los días tormenta para algunos países.

Por otra parte en Bogotá, Colombia se han estado haciendo estudios en los cuales, con base en un análisis sobre las condiciones meteorológicas de presentación de tormentas, un estudio de la confiabilidad en la toma de datos y la historia pasada de registros meteorológicos se seleccionaron los parámetros de pluviosidad, el brillo solar y la tensión de vapor para ser correlacionados con el nivel ceraúnico (número anual de días tormenta) [8].

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas (México), se diseñó un modelo de predicción en el cual, con base en la información reunida por la red de contadores de rayos es posible estimar la Densidad de Rayos a Tierra en aquellos lugares en los

Datos promedio 1983-1992 obtenidos de 64 Registros anuales a partir de 64 Estaciones en el período de 10 años

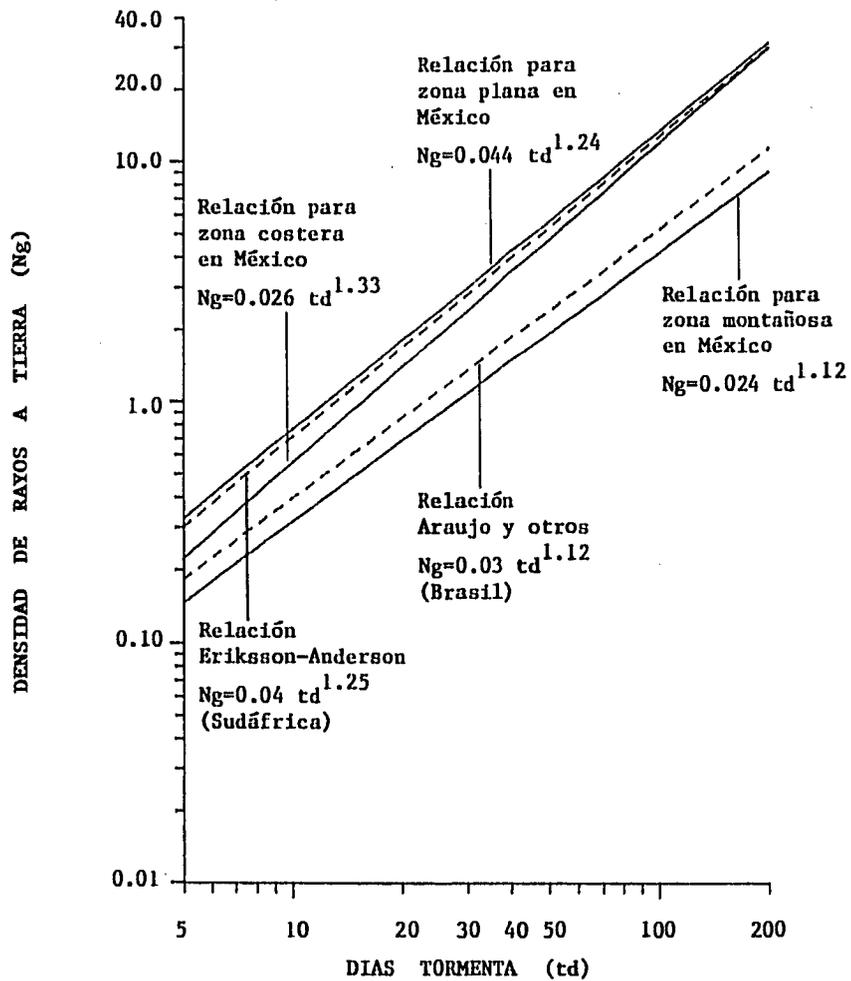


Figura 3.1 Correlación observada entre la densidad de rayos a tierra (Ng) y días tormenta (td) en la República Mexicana y otros países.

cuales existe una cobertura de algún contador de rayos. Dicha información es analizada estadísticamente, primero para la generación de mapas promedio de DRT, y segundo, para obtener tablas probabilísticas con la ayuda del modelo de predicción. Para la construcción de dicho modelo se utilizó información de un período de ocho años (datos históricos). Dicho conjunto de datos históricos es el obtenido de la red de contadores de rayos instalada en el país correspondiente a 115 lugares distribuidos en la República Mexicana.

Como puede apreciarse en el mapa 2.1, existen algunas zonas de la República Mexicana en las cuales no se tiene información de la DRT, debido a que la cobertura de los contadores de rayos es limitada, y la estimación se realiza por medio de la interpolación. En este caso, un modelo indirecto de obtención de la DRT sería de mucha utilidad para estimar, con base en un modelo estadístico, los valores de la DRT, con el fin de obtener una información mucho más fina que nos indique la severidad de las tormentas. Este modelo indirecto, propuesto en este trabajo, parte del hecho de que las descargas atmosféricas tienen una relación con los parámetros meteorológicos que definen a las tormentas eléctricas.

3.2 PARAMETROS METEOROLOGICOS SELECCIONADOS

Debido a que la secuencia de una tormenta eléctrica toma lugar cuando existen ciertas características climatológicas en una región determinada (por ejemplo, altas temperaturas y alta humedad en regiones tropicales y subtropicales, como las que existen en nuestro país), es necesario seleccionar todos aquellos parámetros que intervienen directa o indirectamente en la tormenta eléctrica. Generalmente en México, la generación de las descargas atmosféricas están acompañadas de un elevado nivel de precipitación pluvial, es decir, rara vez se presentan descargas cuando no hay lluvia y esto lo confirman los reportes de la Comisión Nacional del Agua al indicar en los mismos que cuando existe una mayor presencia de lluvia también existe un mayor número de descargas atmosféricas.

Por tanto, los parámetros meteorológicos seleccionados para realizar el análisis de relación con la DRT fueron: Precipitación Pluvial, Temperatura Media y Humedad Relativa.

Precipitación Pluvial

Agua procedente de la atmósfera (masa de aire que rodea la tierra), que en forma sólida (granizo) o en forma líquida se deposita sobre

la superficie de la tierra.

Temperatura

Indice del nivel térmico en el cual se encuentra una determinada cantidad de calor. La temperatura en el sistema práctico se mide en grados centígrados o Celsius ($^{\circ}\text{C}$). El grado centígrado se define como la centésima parte del intervalo de temperatura existente entre la temperatura del hielo fundente y la de ebullición del agua. La Temperatura Media Anual es el promedio de las temperaturas mensuales.

Humedad

La humedad es la cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera. La Humedad Relativa es aquella relación, expresada en tanto por ciento, entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y la que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura. Decimos que hay saturación cuando el aire húmedo tiene una composición tal que está en equilibrio con una superficie libre plana de agua pura que tenga la misma temperatura que el aire. La palabra equilibrio significa que no hay, en total, transferencia de moléculas de vapor del aire a la superficie del agua ni de la superficie del agua al aire.

3.3 REGRESION LINEAL MULTIPLE

Una ecuación de regresión es una ecuación para estimar una variable dependiente Y (también conocida como variable de respuesta), a partir de un conjunto de variables independientes las cuales podemos representar como:

$$X_0, X_1, X_2, \dots, X_n \quad 3.1$$

Para el caso de n variables, la ecuación de regresión lineal tiene la siguiente forma:

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n + \epsilon \quad 3.2$$

Donde ϵ es una variable aleatoria que está normalmente distribuida alrededor de cero (la media de ϵ), y tiene varianza V_ϵ . El cálculo de los valores de los parámetros (coeficientes de las variables independientes), se hace por el método de mínimos cuadrados. Los valores estimados por mínimos cuadrados se designan por:

$$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n \quad 3.3$$

de tal manera que la ecuación de ajuste se expresa como:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad 3.4$$

A las diferencias entre los valores observados Y y los valores estimados representados por \hat{Y} se les llama residuos o residuales. En 3.5 se muestra la expresión que se debe minimizar en el método de mínimos cuadrados [4].

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_{i1} - b_2 X_{i2} - \dots - b_n X_{in})^2 \quad 3.5$$

Con el objeto de representar gráficamente los conceptos del método de los mínimos cuadrados, es conveniente limitarse al caso de dos variables relacionadas, es decir, una variable dependiente Y y una variable independiente X . Esto es porque casos que comprenden tres o más variables presentan grandes dificultades de representación gráfica. Un ejemplo de un diagrama de dispersión de dos variables se representa en la figura 3.2. En ella se observa que sí existe una relación entre Y y X ya que, a medida que crece esta última, decrece la primera.

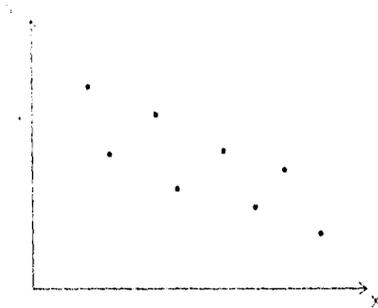


Fig. 3.2 Ejemplo de un diagrama de dispersión

Si suponemos que la ecuación de regresión que ajusta a los puntos de la figura 3.2 es la ecuación 3.6 la cual representa a una línea recta entonces dicha recta quedaría trazada como se muestra en la figura 3.3.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 \quad 3.6$$

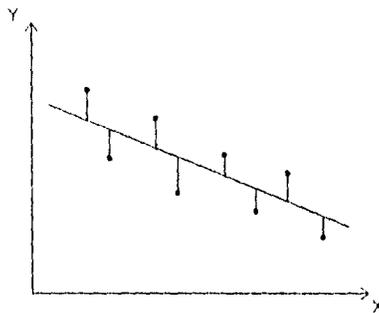


Fig. 3.3 Ejemplo de un diagrama de dispersión con una línea de ajuste, mostrando las desviaciones verticales cuya suma de cuadrados deberá ser reducida al mínimo por la ecuación adecuada de la recta

Si se hubiera supuesto una relación funcional más complicada como la mostrada en la ecuación 3.7, el problema sería algo más complejo de manejar matemáticamente, pero el principio es el mismo.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2^2 \quad 3.7$$

Los parámetros serían aún estimados minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones verticales con respecto a la curva apropiada. La figura 3.4 es un ejemplo para una ilustración de una situación asociada con el modelo matemático especificado en la ecuación 3.7.

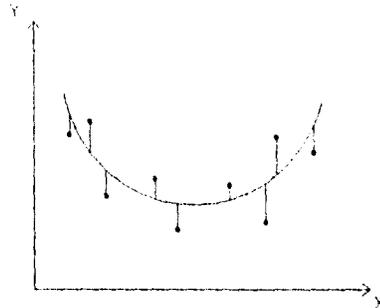


Fig. 3.4 Ejemplo de un diagrama de dispersión con un polinomio de segundo grado trazado, mostrando las desviaciones verticales

3.4 VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes consideradas para la construcción del modelo de ajuste en el presente estudio son las siguientes: P, T, H, P*T, P*H, T*H y P*T*H donde:

P : Precipitación pluvial

T : Temperatura media

H : Humedad relativa

Es importante hacer notar que, además de las variables P, T y H para el ajuste de la ecuación de predicción se consideraron a los términos (llamados términos de interacción) que contienen a los productos cruzados PT, PH, TH y PTH ya que se observó que un modelo de segundo orden describe mejor la relación de la variable dependiente DRT con las variables independientes consideradas permitiendo que la superficie tenga la suficiente flexibilidad para ajustarse a la curvatura y torsión de la verdadera superficie de respuesta.

La figura 3.5 ejemplifica de manera sencilla lo anterior. Si se emplea un modelo de primer orden para ajustar los puntos entonces el resultado es un mal ajuste [5].

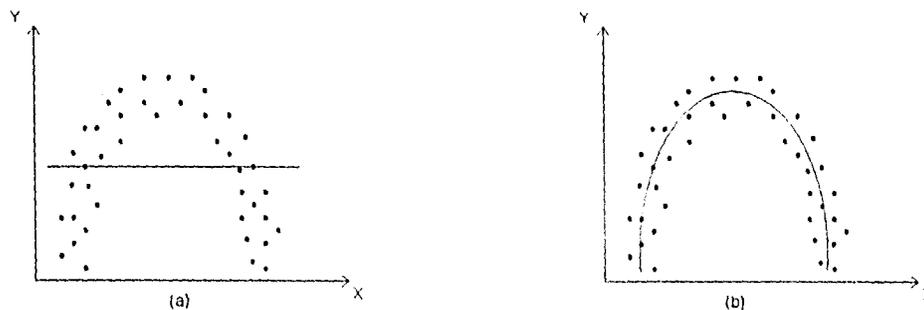
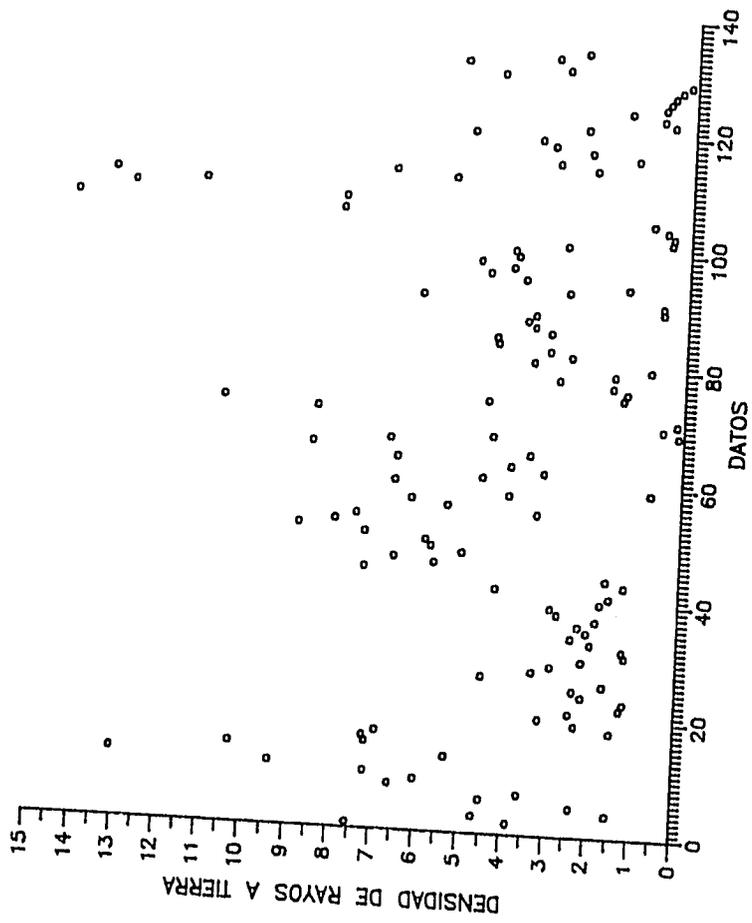


Fig. 3.5 Comparación entre el ajuste de modelos de primer y segundo orden a los mismos datos. (a) Modelo de primer orden, (b) Modelo de segundo orden.

La gráfica 3.1 muestra el diagrama de dispersión para la DRT.



Grafica 3.1

3.5 SELECCION DE VARIABLES

Existen muchos métodos para seleccionar a las variables independientes para la construcción de un modelo de regresión, entre ellas se encuentra, por ejemplo, el graficar los valores de alguna variable independiente en particular contra sus correspondientes valores en la variable dependiente para de esta forma observar alguna posible tendencia o relación.

Una forma de selección más adecuada es la que toma en cuenta el coeficiente de correlación de las variables que van entrando al modelo de regresión para observar de esta manera si son significativas o no, además de considerar el valor de la estadística t que mide la significancia de las variables. Dicha estadística se basa en $(n-k-1)$ grados de libertad donde n es el número de observaciones o datos y k es el número de variables independientes en el modelo [4].

3.6 METODO STEPWISE DE SELECCION DE VARIABLES

Este método de regresión múltiple permite seleccionar la forma de entrada de las variables independientes al modelo de ajuste. En cada paso, las variables son incluidas o removidas con el objeto de obtener un conjunto de variables significativas, es decir, un conjunto de variables que realmente contribuya con información para la predicción de la variable dependiente.

Dos métodos para hacer la selección de variables son los siguientes:

- 1) *Stepwise forward regression*
- 2) *Stepwise backward regression*

Es importante hacer notar que se dejan los nombres de los métodos en inglés por convención ya que la palabra *stepwise* es común encontrarla en la literatura referente a selección de variables. Por otro lado la palabra *forward* se refiere a una selección de variables "hacia adelante", es decir se comienza por una variable incluida en el modelo y se van adicionando más variables mientras que la palabra *backward* se refiere a una

selección de variables "hacia atrás", es decir, se comienza incluyendo en el modelo a todas las variables y se van retirando una a una las variables menos significativas.

3.6.1 Stepwise Forward Regression

En este método se comienza eligiendo a la variable independiente que tiene la más alta correlación (relación lineal) con la variable dependiente, se determinan los residuales para el modelo de regresión y se considera a los residuales como un nuevo conjunto de valores de la variable dependiente. Posteriormente, del resto de las variables independientes, se elige aquella cuya correlación sea la más alta con dicho conjunto de residuales y así, se continúa el proceso hasta el momento en el cual ya no se tengan variables independientes que tengan una relación significativa con el último conjunto de residuales.

3.6.2 Stepwise Backward Regression

En este método se comienza incluyendo en el modelo de regresión a todas las variables independientes y posteriormente se retira aquella variable que sea menos significativa en la ecuación, con base en su valor estadístico de t . Entonces, con dicha variable fuera, se calcula el nuevo modelo de regresión y se determina a la siguiente variable a remover. Este proceso sigue hasta el momento en que ya no se tengan más variables a remover, es decir, hasta el momento en el que todas las variables que se tienen en el modelo sean significativas con base en la estadística t .

3.7 NORMALIDAD

En el análisis de regresión lineal múltiple es necesario determinar si no se viola la hipótesis de normalidad, de tal suerte que el conjunto de residuales se grafican empleando una escala de probabilidad. Para graficar dicho conjunto de datos, se usa un papel especial denominado papel probabilístico normal cuyas características son: en un eje la escala es aritmética y en el otro la escala es de probabilidad.

La distribución normal es importante debido a que proporciona una buena aproximación de las distribuciones de datos encontrados en diversas aplicaciones y además porque se ha observado experimentalmente, que la mayor parte de los errores en mediciones y una gran variedad de observaciones físicas tienen aproximadamente distribuciones normales.

El papel probabilístico normal se puede usar directamente para datos agrupados o no agrupados, para comprobar su normalidad. En el presente estudio se utilizó al conjunto total de residuales sin ningún tipo de agrupación. En el caso de observaciones sin agrupar, el proceso a seguir es el siguiente:

- 1.- Se ordenan las observaciones de acuerdo con su tamaño (de menor a mayor).
- 2.- Se calcula el por ciento acumulativo comenzando con la mayor observación, con alguna de las dos expresiones siguientes:

$$Pa = \frac{i - \frac{1}{2}}{n} \times 100 \quad 3.8$$

$$Pa = \frac{(100i - 50)}{n} \quad 3.9$$

donde:

- Pa : Por ciento acumulativo
n : Número total de observaciones
i : Número de orden de la observación i-ésima del conjunto de datos ordenados previamente de menor a mayor.

Cuando n es grande, no es necesario graficar todos los puntos, ya que agrupándolos de cinco en cinco o de diez en diez, es

suficiente para comprobar que los datos se ajusten a una línea recta, es decir, verificar que su distribución siga, aproximadamente, la forma de una distribución normal. Si se observan separaciones grandes y obvias de la línea recta, hay evidencias reales de que los datos no siguen una curva normal.

3.8 HOMOSCEDASTICIDAD

La homoscedasticidad es la palabra usada para indicar varianza constante. Los modelos de regresión suponen un error que tiene una distribución normal con media cero y varianza V_{ϵ} .

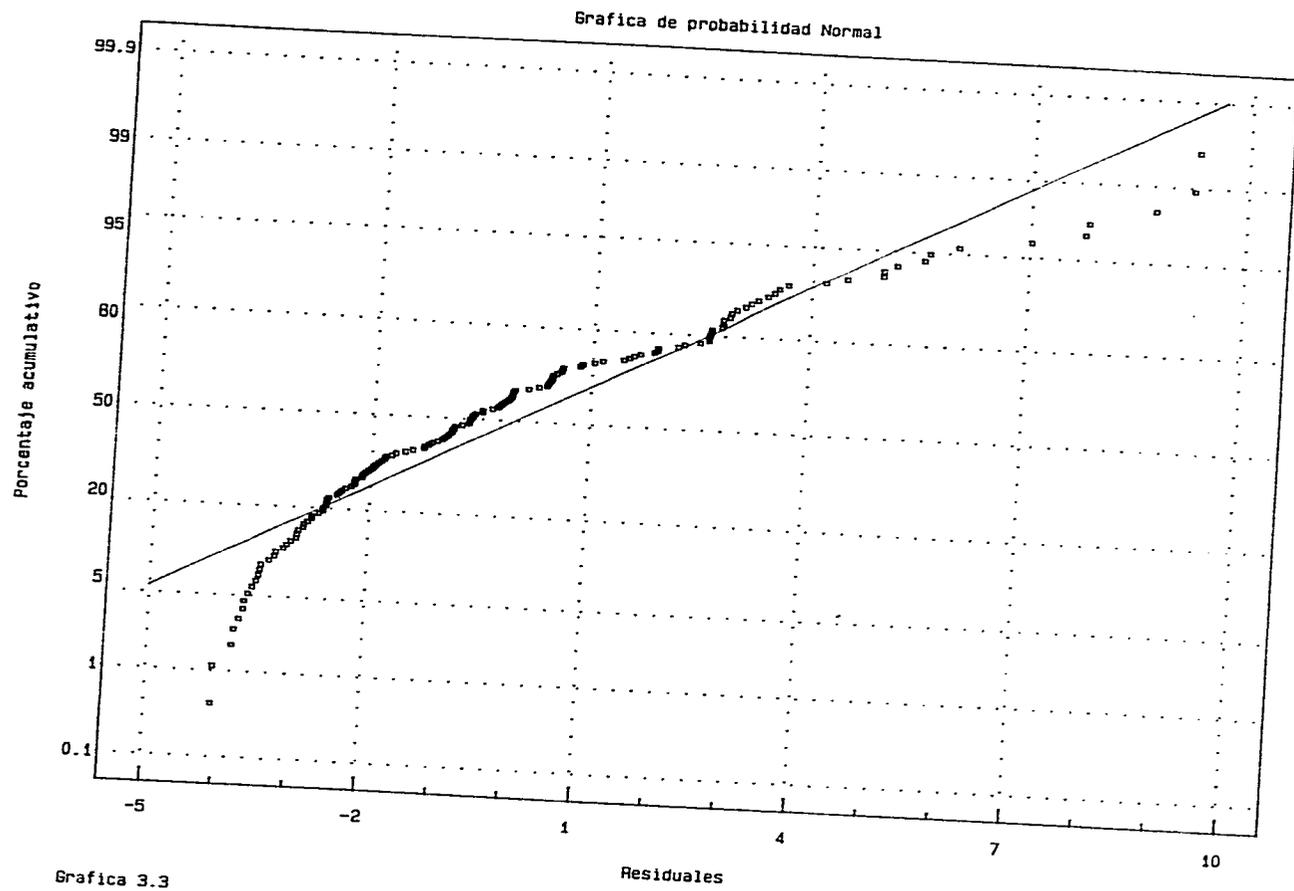
Graficando los residuales contra sus correspondientes valores en la ecuación de regresión (valores de \hat{Y}) se podrá observar si existe alguna dependencia de la magnitud del residual sobre la magnitud del valor de la ecuación. Los residuales deben mostrar aproximadamente igual dispersión para todos los valores de Y , en caso contrario, la varianza de los puntos no puede ser considerada constante. El hecho de que la varianza de los puntos sea constante permite comprobar que los datos fueron tomados de una misma población y no de poblaciones diferentes.

3.9 ECUACIONES DE AJUSTE OBTENIDAS

Para la construcción del modelo se consideraron dos maneras de proceder: la primera era utilizar al conjunto total de datos para hacer el ajuste de la ecuación de predicción y la segunda era proceder con una agrupación de los datos.

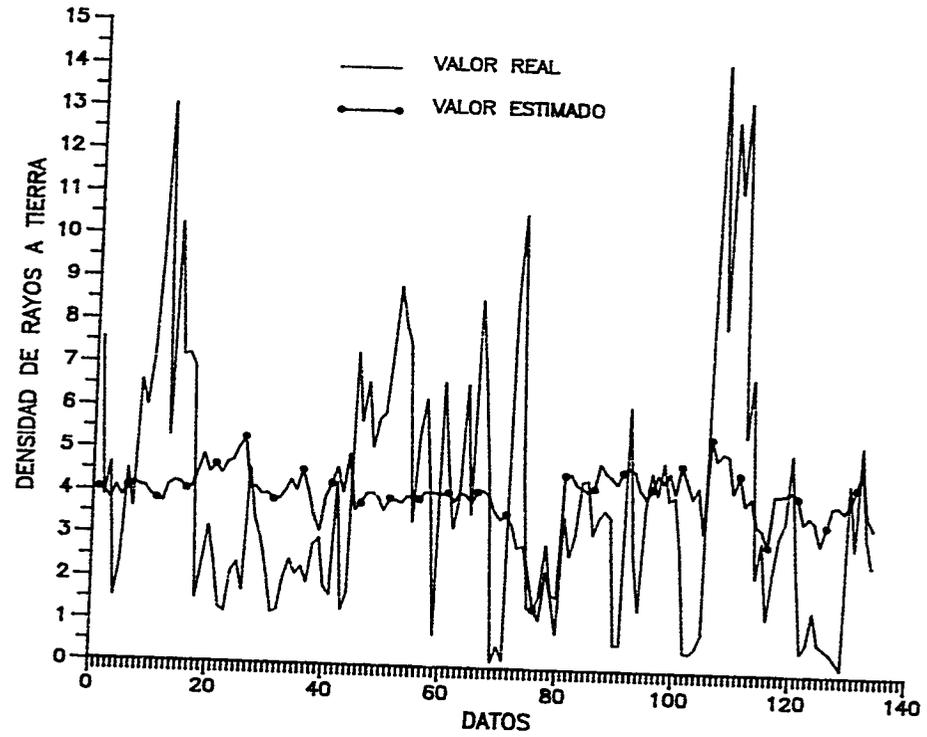
La selección de las variables independientes fué hecha siguiendo los pasos del proceso de selección llamado Stepwise en su opción "hacia adelante" (forward) ya que éste resultó ser el más idóneo por los resultados obtenidos en el ajuste.

La ecuación obtenida utilizando al conjunto total de datos fué la ecuación 3.10.



Grafica 3.3

Residuales



Grafica 3.2

$$\hat{Y} = 1.0198 \times 10^{-2} (P) + 5.5554 \times 10^{-4} (H) - 0.0138 \times 10^{-2} (P) (H) \quad 3.10$$

En la gráfica 3.2 se muestra el ajuste obtenido con esta ecuación. En ella se observa que el ajuste no es muy bueno ya que existe una notable diferencia entre los valores reales de la densidad de rayos a tierra y sus valores ajustados.

La gráfica 3.3 muestra al conjunto de residuales graficados utilizando el papel probabilístico normal. En esta gráfica se aprecian distancias considerables de los puntos a la recta concluyéndose entonces que la hipótesis de normalidad no es respetada.

En la actualidad se ha establecido que factores como el ascenso orográfico al que está sometido el aire, son condiciones de las que dependen por lo general el desarrollo de nubes de gran extensión asociadas con una actividad eléctrica atmosférica relativamente intensa. Además de que las regiones de poca precipitación coinciden, por lo general, con zonas que están abrigadas por cordilleras [7].

Debido a lo anterior se procedió entonces a realizar una agrupación de los lugares geográficos para los cuales se tenía disponible la información tomando como base el parámetro de Altura Sobre Nivel del Mar (ASNMM) correspondiente a cada lugar geográfico de tal forma que los grupos fueran aquellos en los que mejor se relacionaran las variables independientes con la variable dependiente de DRT.

Los grupos son los siguientes:

Altura 1 (A1)	:	0	-	200	metros
Altura 2 (A2)	:	200	-	1200	metros
Altura 3 (A3)	:	1200	-	2000	metros
Altura 4 (A4)	:	mayor a		2000	metros

Las ecuaciones de ajuste obtenidas para cada grupo son las siguientes:

para A1:

$$\hat{Y} = 0.0104 \times 10^{-2} (P) (T) + 0.1498 \times 10^{-2} (T) (H) \quad 3.11$$

para A2:

$$\hat{Y} = 0.32835 \times 10^{-1} (P) + .35775 (H) - 0.0371 \times 10^{-2} (P) (H) - 0.018105 (T) (H)$$

3.12

para A3:

$$\hat{Y} = 0.270116 (T) - 1.003491 \times 10^{-6} (P) (T) (H)$$

3.13

para A4:

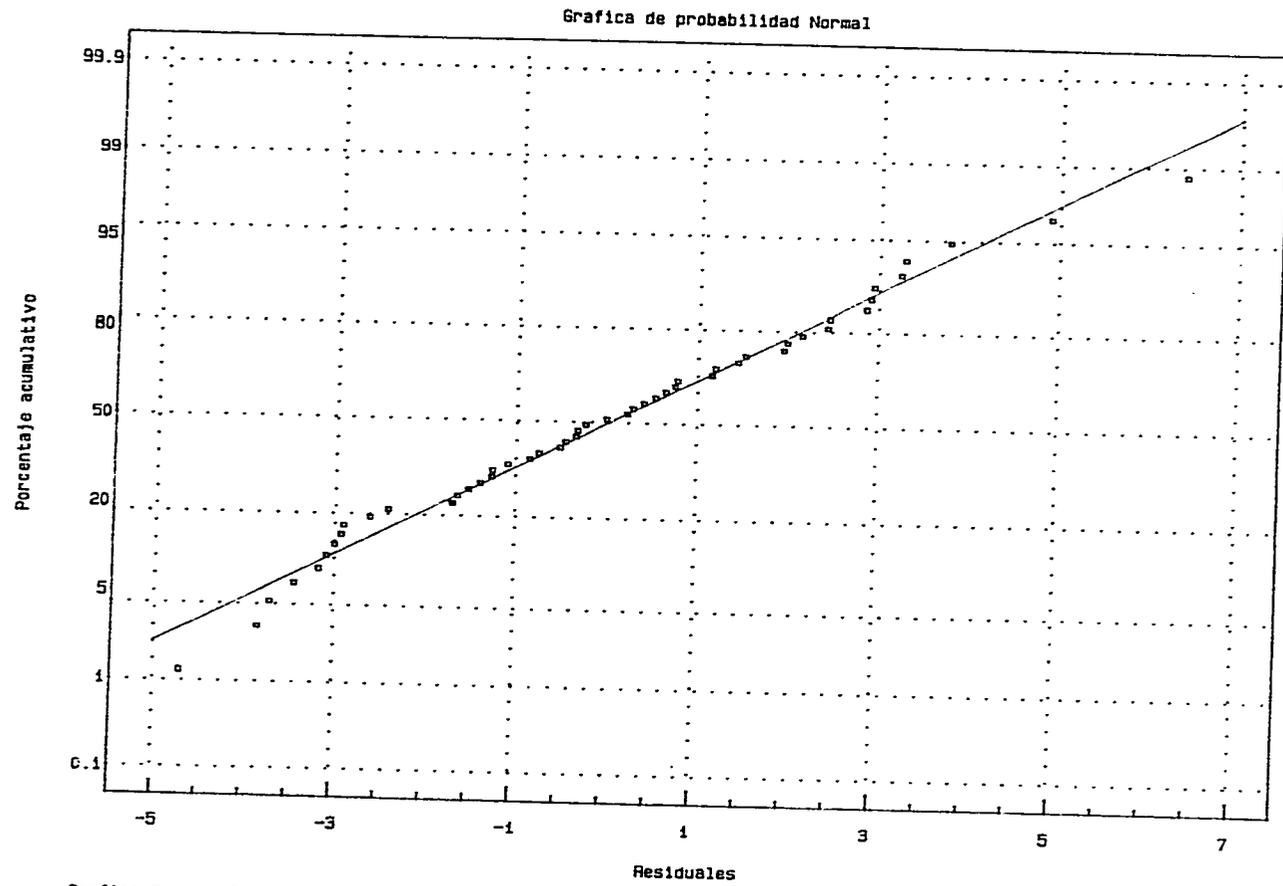
$$\hat{Y} = 0.064918 (P) + 1.139525 (T) - 0.194534 (H) - 0.04431 \times 10^{-1} (P) (T)$$

3.14

3.9.1 Análisis de normalidad para las ecuaciones de predicción

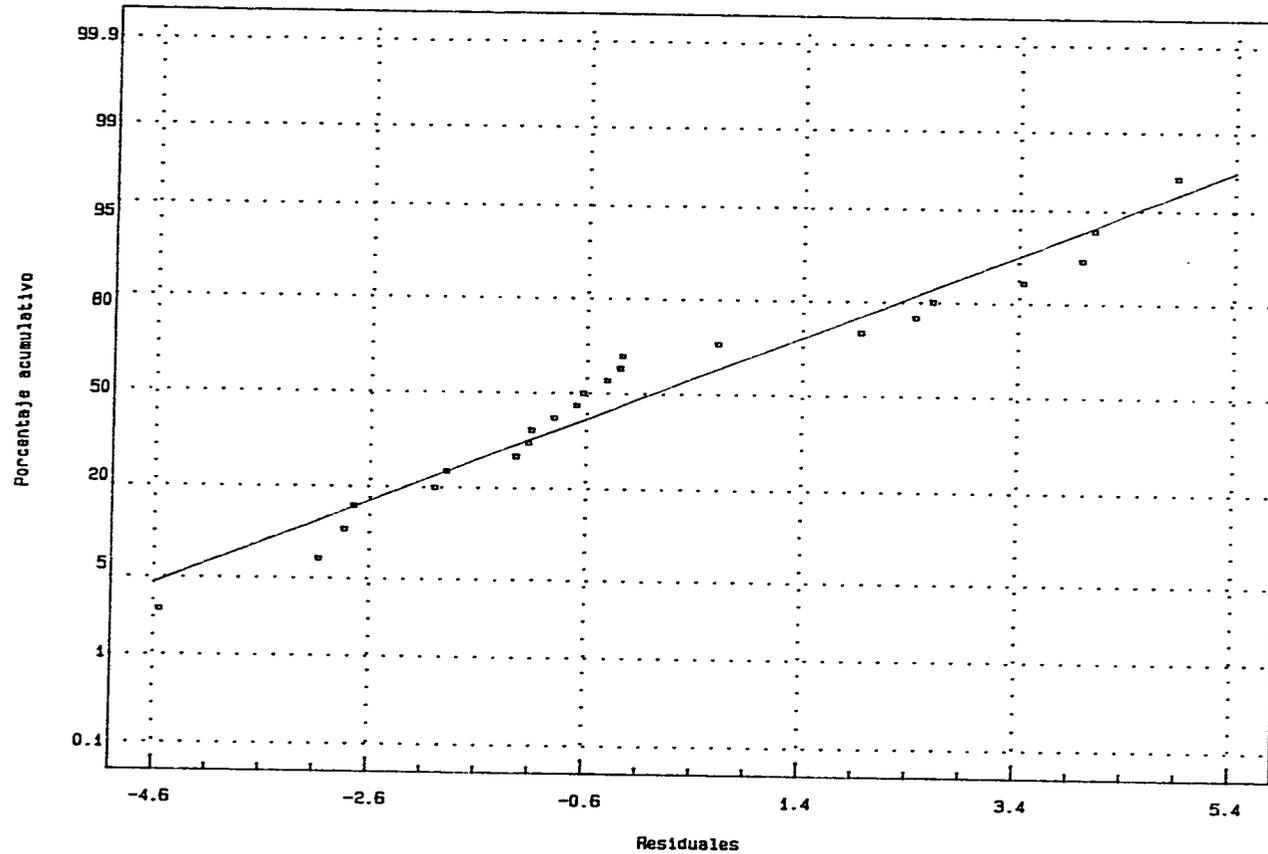
Las series de los residuales estimados son examinadas para establecer si estos se comportan como un proceso de ruido blanco gaussiano, es decir, una secuencia no correlacionada de perturbaciones aleatorias que sigan aproximadamente la forma de una distribución normal.

Graficando el conjunto de residuales obtenidos por la ecuación de ajuste para cada grupo (gráficas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7) en el papel probabilístico normal observamos que no se viola la hipótesis de normalidad ya que los cuatro conjuntos de residuales se ajustan aproximadamente a una línea recta verificándose, de esta manera, que no existen separaciones considerables de la línea.

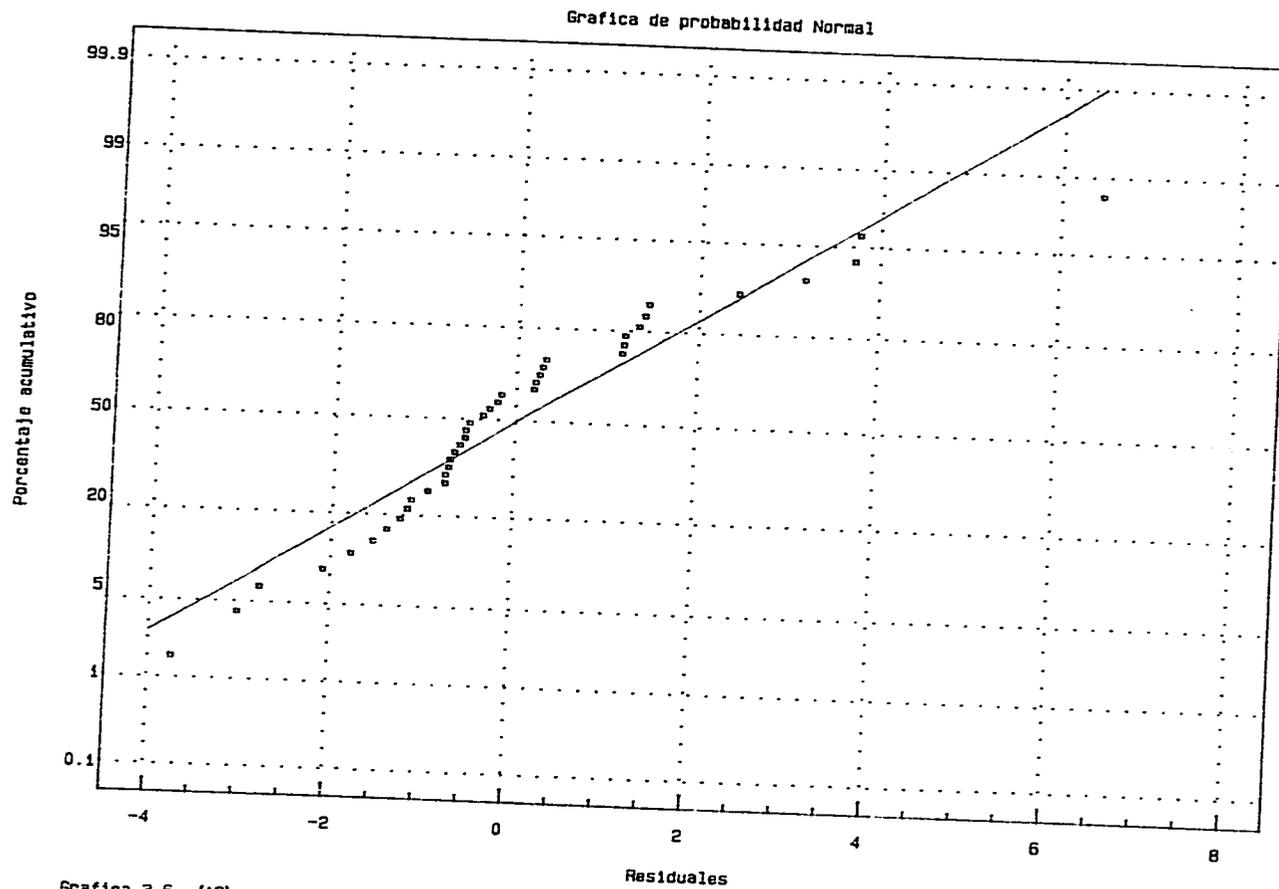


Grafica 3.4 (A1)

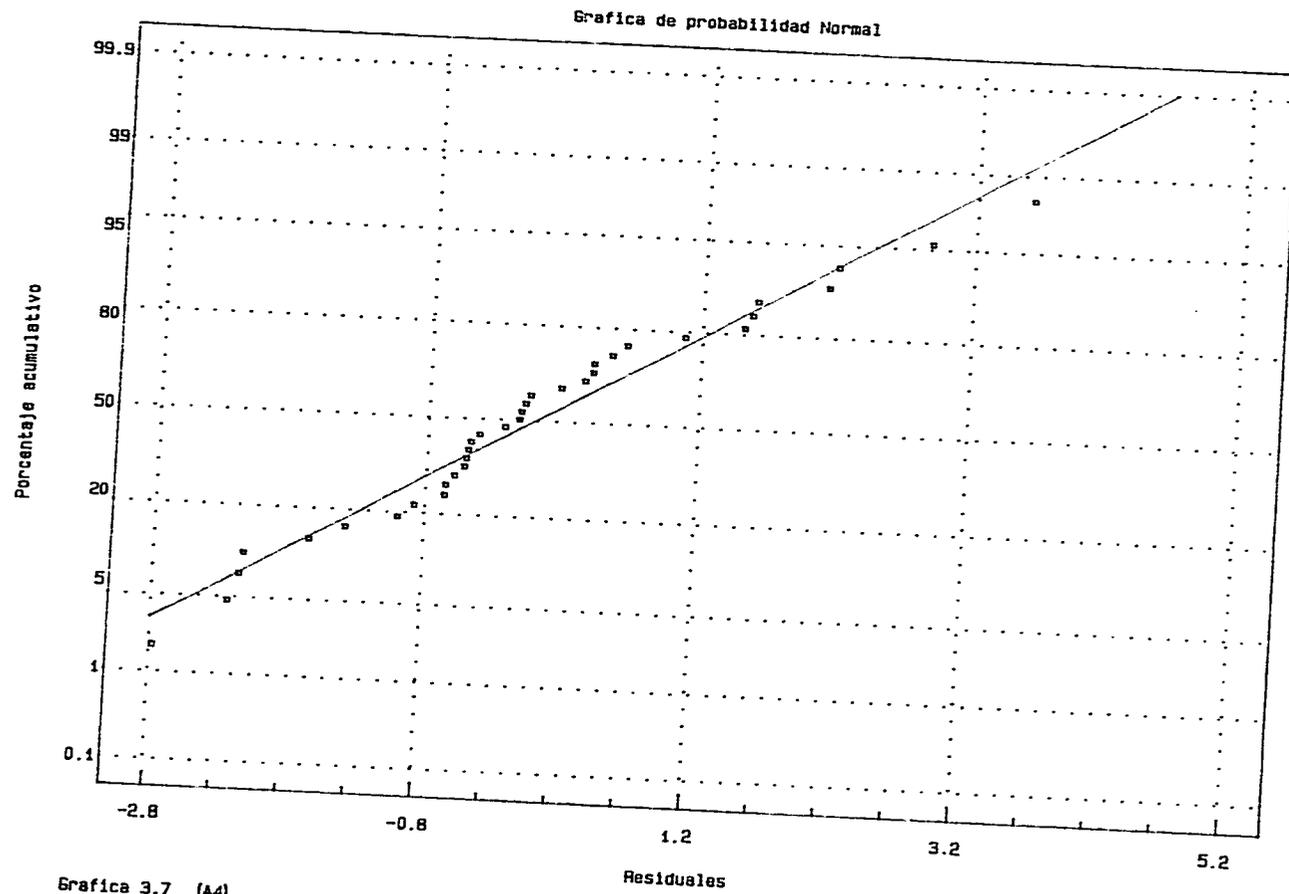
Grafica de probabilidad Normal



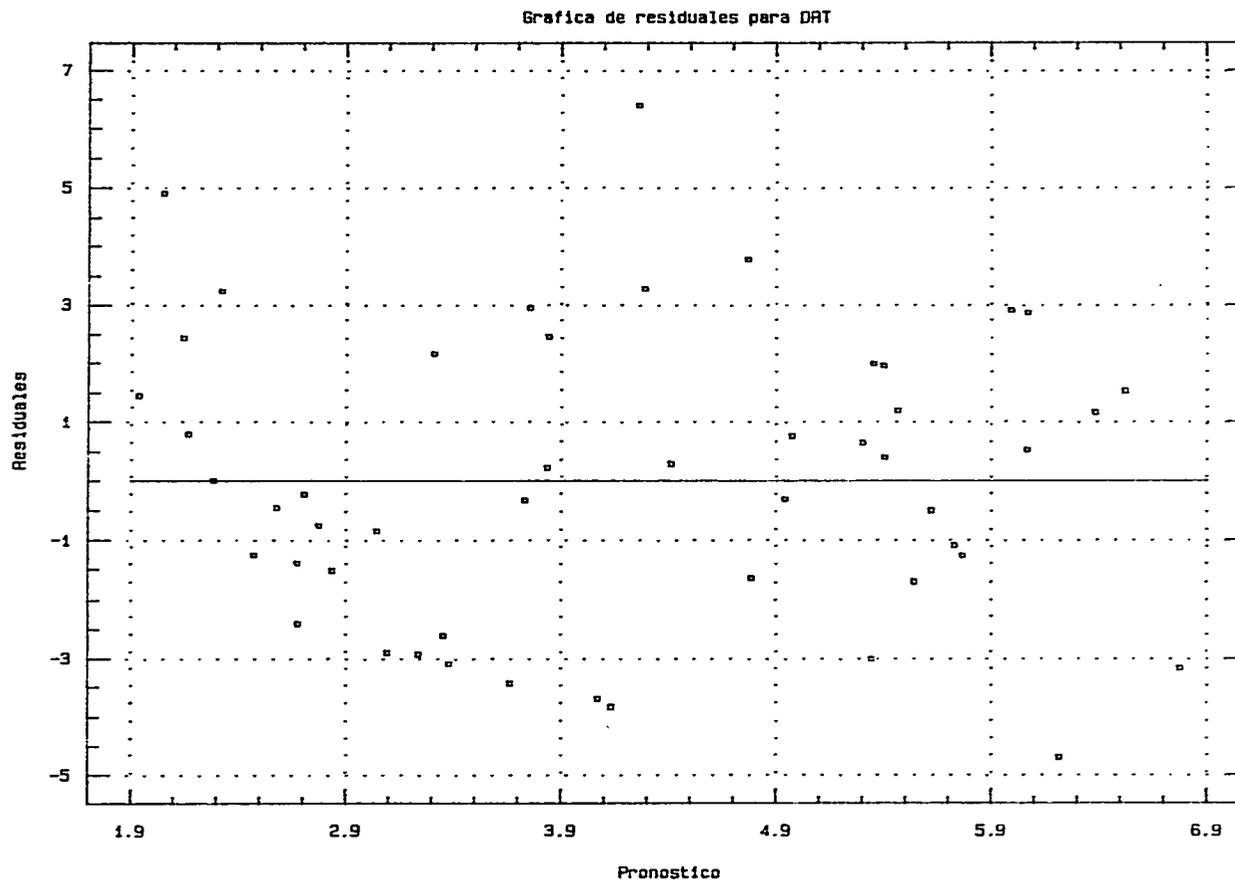
Grafica 3.5 (A2)



Grafica 3.6 (A3)



Grafica 3.7 (A4)



Grafica 3.8 (A1)

3.9.2 Análisis de homoscedasticidad para las ecuaciones de predicción

Para la ecuación A1 (gráfica 3.8) se observa una dispersión general de los puntos por lo que se concluye que la varianza es constante.

Para la ecuación A2 (gráfica 3.9) vemos que existe una notable acumulación de puntos en la parte inferior izquierda de la gráfica por lo que es necesario eliminar este tipo de dispersión irregular. Un método para estabilizar la varianza consiste en calcular el logaritmo de la variable dependiente ($\log Y$) antes de calcular el modelo de estimación, y proceder entonces con el nuevo ajuste de la ecuación de predicción [6]. Para la ecuación A3 (gráfica 3.10) sucede una situación análoga a la anterior ya que se observa una acumulación de los puntos en la parte derecha de la gráfica por lo que es necesario corregir esta inadecuada dispersión.

Para la ecuación A4 (gráfica 3.11) se observa una buena dispersión de los puntos concluyéndose también que la varianza de los puntos es constante.

Haciendo el cálculo de $\log Y$ para la construcción del nuevo modelo para las alturas A2 y A3 se obtienen las siguientes ecuaciones:

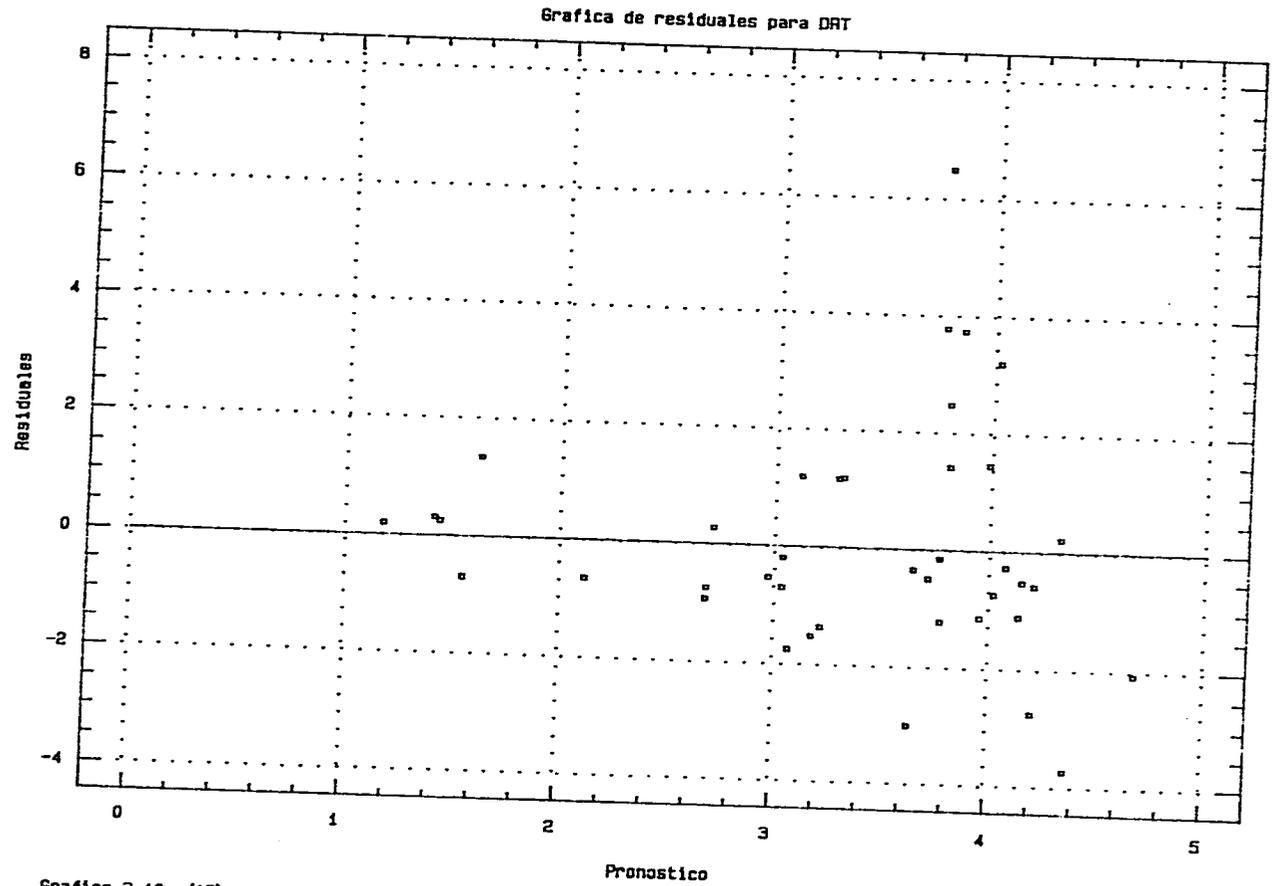
Altura A2:

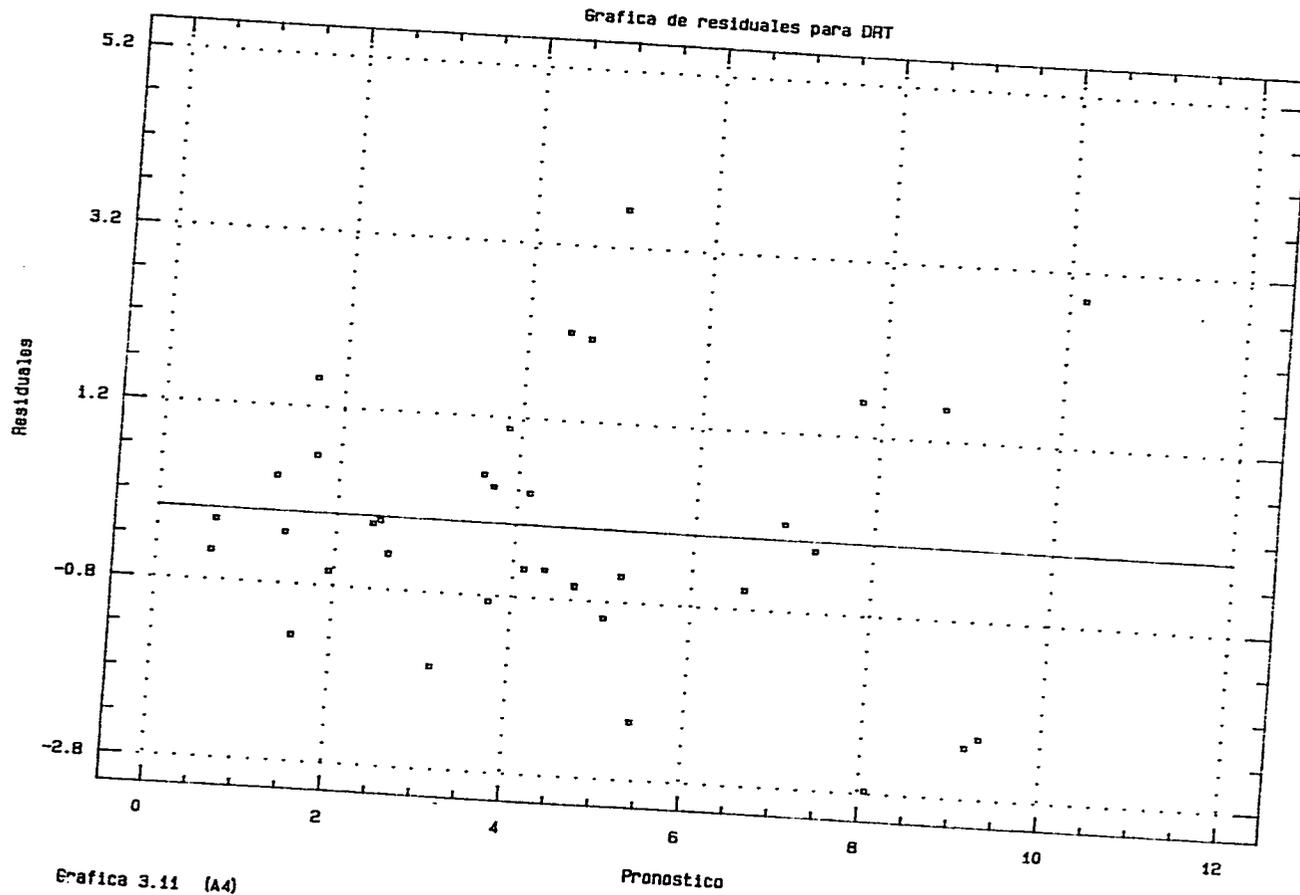
$$\log \hat{Y} = 4.885 \times 10^{-3} (P) - 0.053 \times 10^{-3} (P) (H) - 0.667 \times 10^{-3} (T) (H) \quad 3.15$$

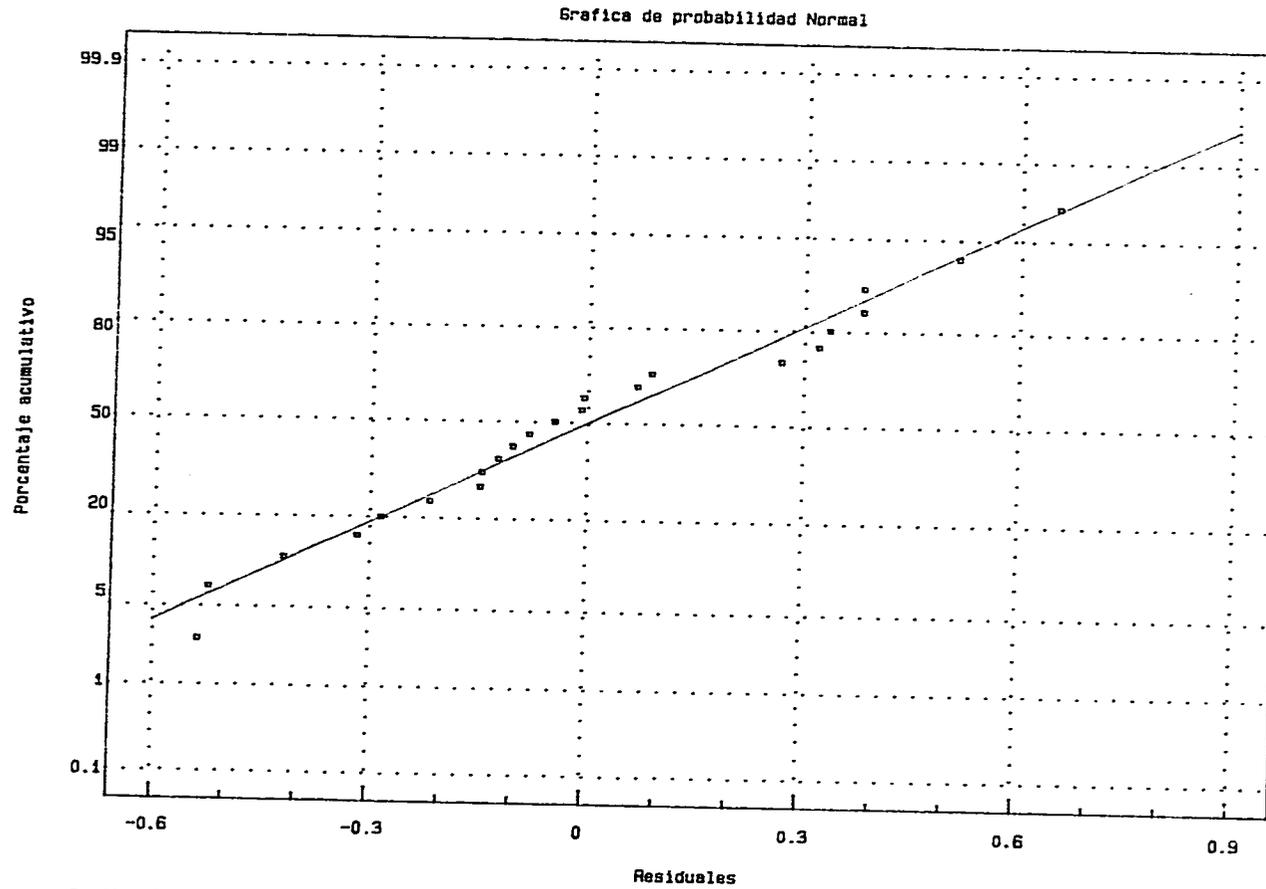
Altura A3:

$$\log \hat{Y} = 0.038879 (T) - 1.549412 \times 10^{-7} (P) (T) (H) \quad 3.16$$

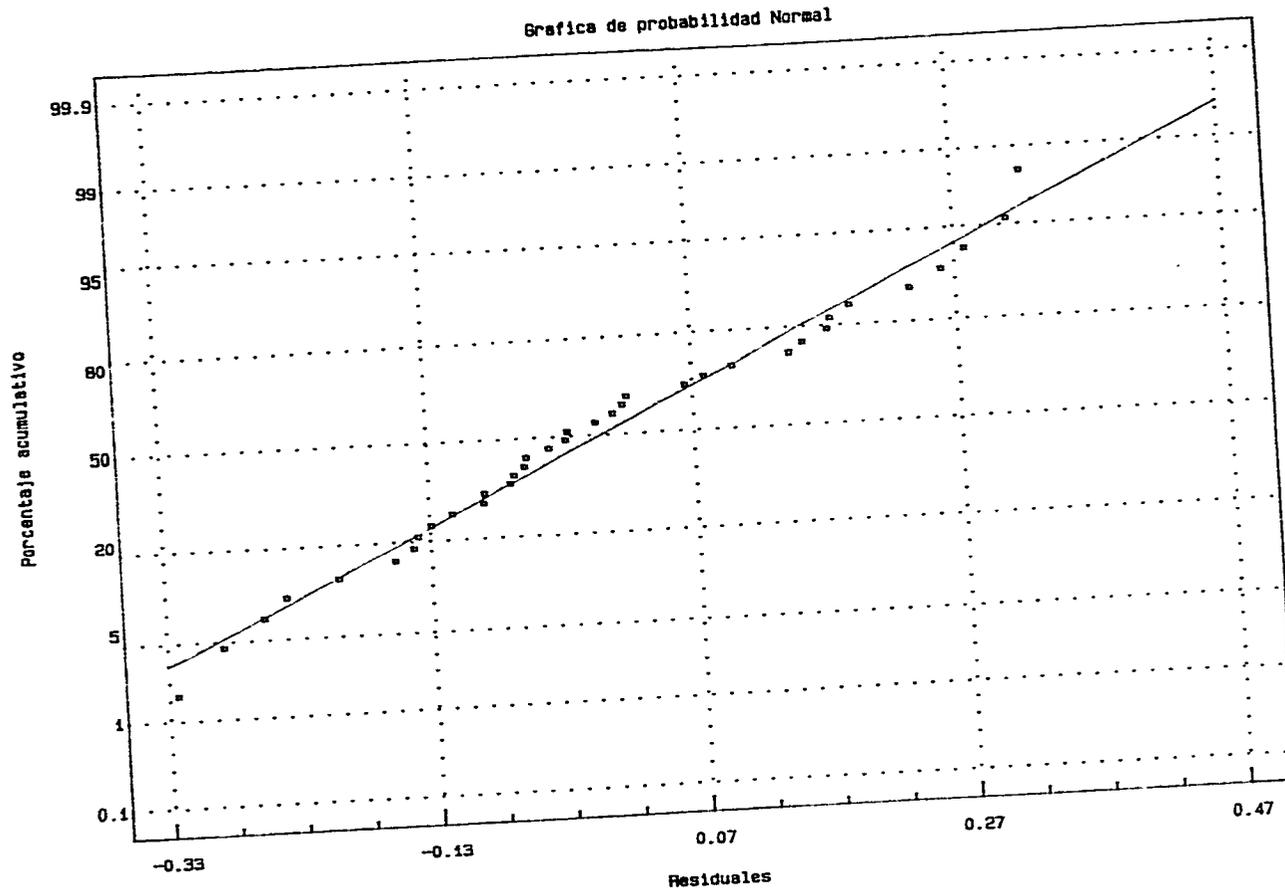
Observando la gráfica 3.14 de los residuales contra los valores ajustados para A2 ($\log Y$) vemos que los puntos están igualmente distribuidos indicando que están aproximadamente distribuidos normalmente. Análogamente, para A3 ($\log Y$) observamos en la gráfica 3.15 una modificación notable ya que, en comparación a la gráfica original (gráfica 3.10) mejoró el ajuste reflejándose en la dispersión de los puntos. De lo anterior concluimos que se tiene una varianza constante para los dos últimos modelos ajustados.



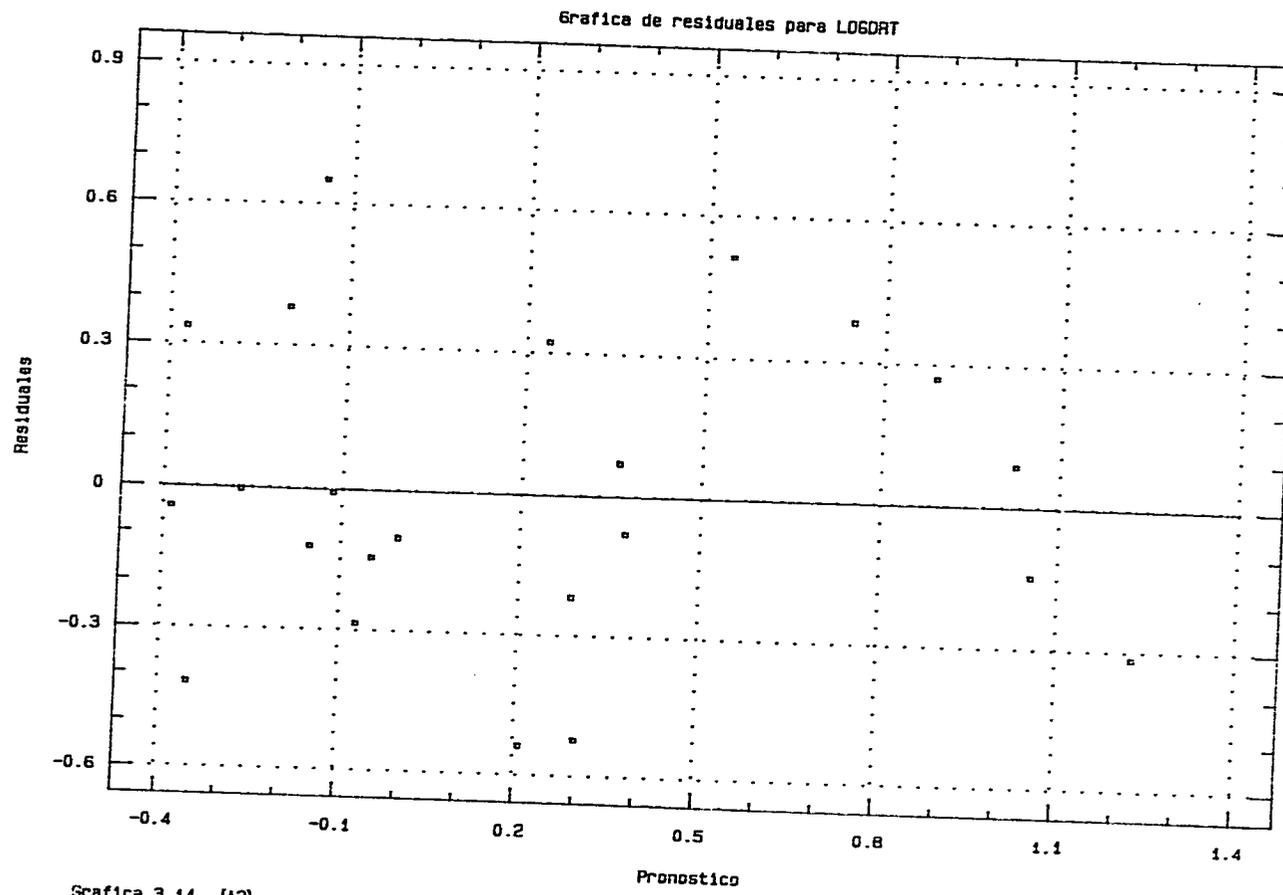




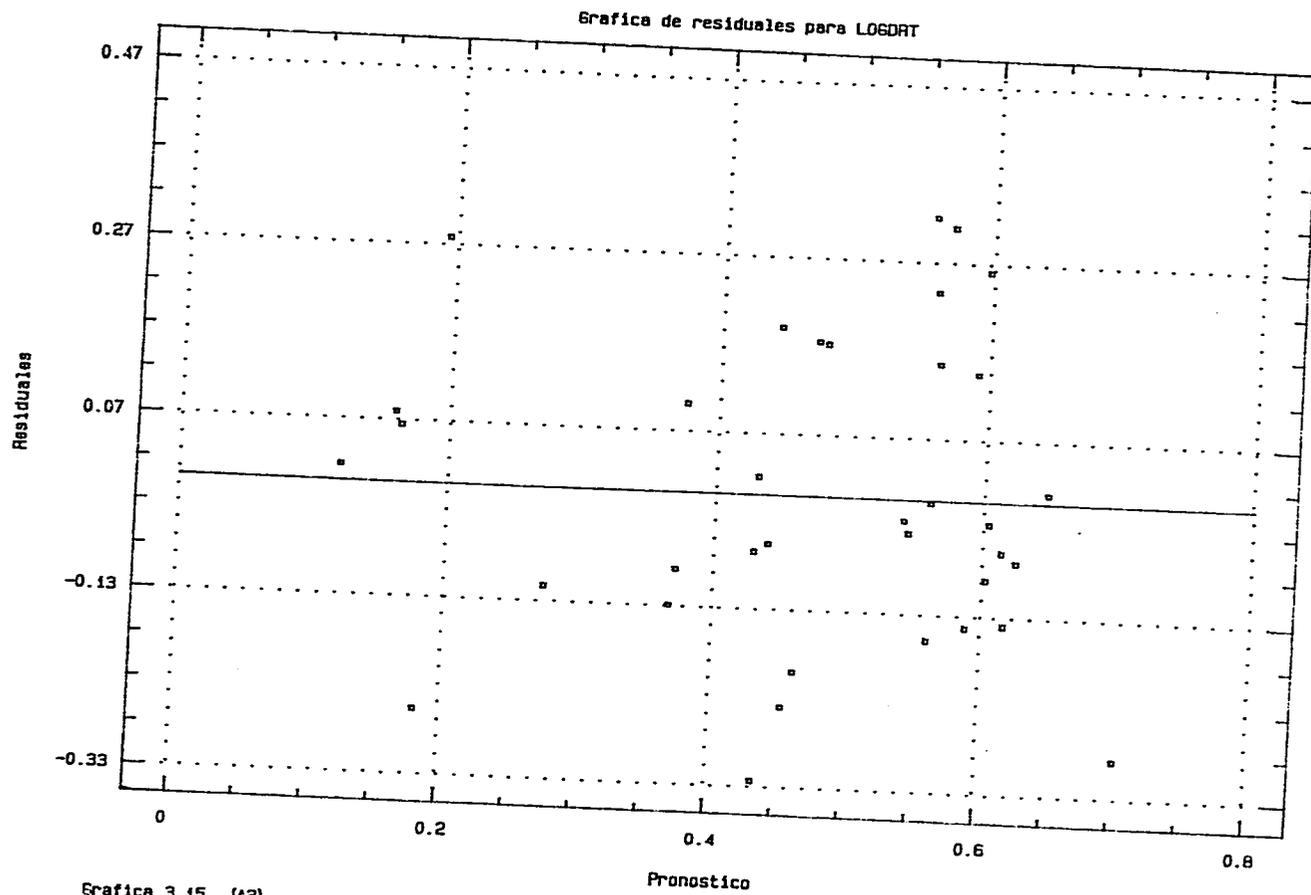
Grafica 3.12 (A2)



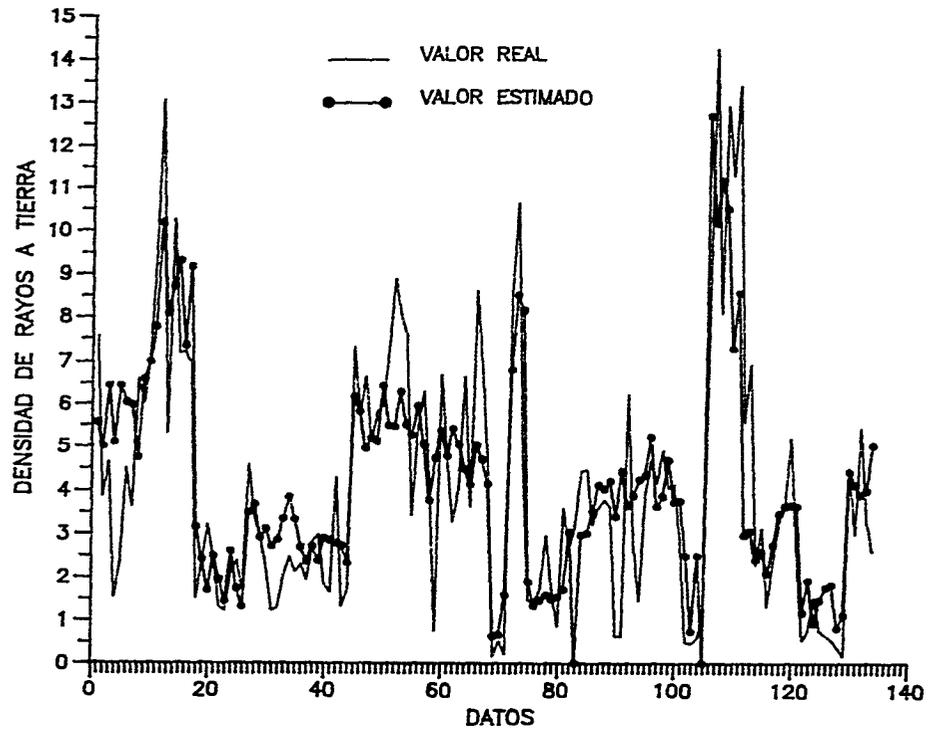
Grafica 3.13 (A3)



Grafica 3.14 (A2)



Grafica 3.15 (A3)



Grafica 3.16

En cuanto al análisis de normalidad para estos dos últimos ajustes se observa en la gráfica 3.12, para A2 (log Y) y en la gráfica 3.13, para A3 (log Y) que la hipótesis de normalidad no es violada ya que los residuales se aproximan a la línea recta trazada en el papel probabilístico normal.

La gráfica 3.16 muestra el nuevo ajuste con base en la agrupación de los datos por altura sobre el nivel del mar.

3.10 CONCLUSIONES

Debido a que la secuencia de una tormenta toma lugar cuando existen altas temperaturas y humedades, además de que las descargas atmosféricas se acentúan cuando existen precipitaciones de lluvia considerables, se sugiere la obtención de la DRT a partir de éstos parámetros meteorológicos. Una manera conveniente de obtención de los coeficientes en la ecuación de ajuste en un modelo de regresión lineal múltiple es siguiendo el método de mínimos cuadrados en el cual se minimiza la suma de los cuadrados de los residuales.

De entre los métodos que existen para seleccionar las variables independientes del modelo se sugiere el empleo del método stepwise de selección ya que este proporciona una manera rápida con buenos resultados de selección de variables en cualquiera de sus modalidades (forward o backward).

Una vez obtenida la ecuación de ajuste es conveniente hacer un análisis de residuales mediante el cual se puede observar qué tan útil resulta ser el modelo de estimación encontrado en el sentido de que se esté tomando en cuenta a las variables que realmente son significativas para su construcción. Los residuales no deben seguir ningún tipo de patrón ya que deben ser esencialmente aleatorios. Dos condiciones que ayudan al análisis de los residuales son las condiciones de homoscedasticidad y de normalidad. La primera nos indica si la serie posee varianza constante de tal forma que permite comprobar que los datos fueron tomados de la misma población, mientras que la segunda nos indica si se viola o no la hipótesis de normalidad, esto último se comprueba al observar que la serie de residuales se ajustan a una línea recta usando para este propósito el papel probabilístico normal.

La agrupación de los datos fué hecha con base en el parámetro de Altura Sobre el Nivel del Mar ya que se ha establecido que el ascenso orográfico de las localidades al que está sometido el aire, es una condición de la cual depende la formación de nubes de tormenta.

En la etapa de análisis de residuales se concluye que sí se cumplen las condiciones de normalidad y homoscedasticidad para el ajuste hecho en cada región de Altura Sobre el Nivel del Mar.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se obtuvo un modelo de estimación de la Densidad de Rayos a Tierra a partir de los parámetros meteorológicos de Precipitación pluvial, Temperatura media y Humedad relativa. Es importante comentar el hecho de que la validación del mismo no fué hecha debido a la imposibilidad de obtención de la información de los parámetros meteorológicos de fecha posterior a la empleada para la construcción del modelo ya que esta información es recogida en las estaciones climatológicas instaladas en toda la República Mexicana y de ahí es mandada al Sistema Meteorológico Nacional ubicado en el Distrito Federal, lugar donde fué obtenida toda la información disponible. Como el modelo trabaja con datos anuales, y para su construcción se manejaron datos correspondientes al periodo de 1983 a 1993, no se cuenta aún con la información correspondiente a 1994.

Por otro lado, con la ayuda de las ecuaciones de ajuste obtenidas será posible afinar los mapas construidos de isodensidad de rayos a tierra. Dicha afinación se reflejará principalmente en las zonas en las cuales no se cuenta con algún dispositivo de monitoreo instalado.

El desarrollo de modelos conjuntos para establecer relaciones entre la actividad eléctrica atmosférica y las variables meteorológicas es importante debido a que contribuyen a inferir características de las descargas eléctricas en zonas donde no se registre la información concerniente a ellas pero si exista la correspondiente a otras variables atmosféricas.

El conocimiento preciso de las descargas eléctricas atmosféricas permite el desarrollo de criterios para la especificación, diseño, mantenimiento y selección de los equipos de protección y operación de los sistemas eléctricos y electrónicos, así como una evaluación objetiva del comportamiento de estos ante las descargas y la consiguiente planificación de políticas de operación para minimizar el impacto de la actividad eléctrica atmosférica en ellos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Miller Irwin, Freud John. "Probability and Statistics for Engineers", Prentice - Hall, Inc., New Jersey 1980.
- [2] Petterssen Sverre. "Introducción a la Meteorología", Ed. Espasa - Calpe S.A., Madrid 1976.
- [3] Dunlop S., Wilson F. "Weather Forecasting", Hamlyn Publishing Group, Barcelona 1982.
- [4] Makridakis S., Wheelwright S., Mc. Gee V. "Forecasting: Methods and Applications", John Wiley & sons Inc., USA 1983.
- [5] Mendenhall W., Reinmuth J. "Estadística para Administración y Economía", Ed. Wadsworth International Iberoamérica, Trad. México 1978.
- [6] Cuthbert D. "Fitting Ecuations to Data", John Wiley & Sons Inc., USA 1980.
- [7] Torres H., Barreto T., Enciso L. "Análisis de series de tiempo meteorológicas multivariadas", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 1990.
- [8] Torres H., Castaño O., Pérez G., "Análisis de fenómenos atmosféricos por series de tiempo", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 1991.
- [9] "Estudio de Lineas y Subestaciones ante Descargas Atmosféricas y Contaminación", Reporte final para la CFE, IIE - Depto. de Transmisión y Distribución, Noviembre 1993.
- [10] "Síntesis de Fallas de Lineas de Transmisión 1992", CFE - Subdirección de Producción.
- [11] Ostle B., "Estadística aplicada", Ed. Limusa, México 1977.
- [12] Coutiño V. H., "Predicción de los Indices de Salida de Lineas de Transmisión a partir de Modelos Probabilísticos de la DRT", Tesis Profesional de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 1993.