

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LA
PRECIPITACIÓN PLUVIAL DE ACUERDO AL
CICLO VEGETATIVO DEL MAÍZ EN
TEPECHITLÁN, ZACATECAS**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERA GEOFÍSICA

P R E S E N T A:

ROCÍO NEGRETE CADENA

Director de Tesis: Dr. TOMÁS MORALES ACOLTZI

MÉXICO, D.F., JUNIO 2002

**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.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-627

SRITA. ROCÍO NEGRETE CADENA
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Tomás Morales Acoltzi y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

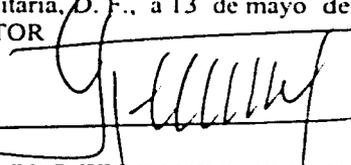
CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL DE ACUERDO AL CICLO VEGETATIVO DEL MAÍZ EN TEPECHITLÁN, ZACATECAS

- RESUMEN
- I INTRODUCCIÓN
- II REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS DEL MAÍZ
- III CARACTERIZACIÓN PROBLEMÁTICA
- IV METODOLOGÍA
- V RESULTADOS
- VI CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS
- BIBLIOGRAFÍA
- APÉNDICE

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 se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 13 de mayo de 2002
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*ggg

R

A mi madre

Agradezco sinceramente

A mi madre, Rosalinda Cadena, por todo su amor, su gran comprensión y su enorme apoyo lo que me ha permitido salir adelante en cada etapa de mi vida

A mi padre, Jesús Negrete, por apoyar todas mis decisiones y vigilar cada uno de mis triunfos.

A mi hermano César, por quererme, por ayudarme y por estar cerca de mí en todo momento.

A mi tía y a mis primos y primas por creer y confiar en mí.

A Nadxieli por ser mi más grande apoyo, mi mejor amiga y aquella que sabe permanecer en mi lugar no tranquilo.

Al Dr. Tomás Morales Acoltzi, por su tiempo, paciencia y dedicación en la atinada dirección de este trabajo.

A los miembros de la Comisión Revisora de la tesis, los Ings. Francisco A. Arroyo Carrasco y Gerardo Cifuentes Nava y los Dres. Blanca Mendoza Ortega y José Héctor Sandoval Ochoa, por sus valiosas aportaciones para el mejoramiento de este trabajo.

A Chela, a Robert y a Paul, por ser mis amigos incondicionales.

A todos mis profesores, de quienes he aprendido todo lo que ahora sé.

A mis compañeros y amigos de la Facultad de los cuales aprendí mucho.

A mi nueva gente, que siempre estarán ahí para renovar mis sentimientos y pensamientos, para salvarme y siempre creerán en mí.

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
I. INTRODUCCIÓN.....	5
II. REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS DEL MAÍZ.....	8
II.1 CICLO VEGETATIVO DEL MAÍZ.....	12
III. CARACTERIZACIÓN PROBLEMÁTICA.....	15
III.1 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y CLIMÁTICAS DEL ESTADO..	15
III.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	15
III.1.2 CLIMAS.....	16
IV. METODOLOGÍA.....	19
IV.1 DATOS.....	19
IV.2 ANÁLISIS CON ARMÓNICOS.....	23
IV.3 ANÁLISIS CON ONDÍCULAS.....	23
V. RESULTADOS.....	25
V.1 ANÁLISIS CON ARMÓNICOS.....	25
V.1.1 A ESCALA PENTADAL.....	25
V.1.2 IMPACTO SOBRE LA PRECIPITACIÓN DE VALORES EXTREMOS EN LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA.....	32
V.1.2.1 LA NIÑA.....	32
V.1.2.2 EL NIÑO.....	33
V.1.3 ESCALA DECENAL.....	47
V.1.4 ESCALA QUINCENAL.....	48
V.2 ANÁLISIS CON ONDÍCULAS.....	57

VI. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	62
VI.1 CONCLUSIONES.....	62
VI.2 SUGERENCIAS.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	66
APÉNDICE I.....	70
APÉNDICE II.....	74

RESUMEN

Actualmente, ante la globalización, **por un lado** los Productores tienen el reto de transformarse en "**empresarios**", que deben aprender a convivir con socios, banqueros e investigadores científicos, entre otros, de tal forma que con sus productos puedan competir en la actual dinámica mundial. para ello, los productores deben buscar alternativas de producción. más seguras, más rentables, etc., **por otro lado**, las Universidades deben transformarse en casi-autosuficientes, al menos en investigación científica. además, ésta debe estar vinculada a la solución de problemas del entorno. Los **investigadores** deberán contribuir con sus "**conocimientos actualizados**", sin que esto represente una barrera para la colaboración entre productores e investigadores.

En el Estado de Zacatecas, la mayor experiencia agrícola está dada para el **maíz**. Pues la gran diversidad en tipos de razas y nuevas variedades de **maíz**, permiten que haya maíces adaptados a muchas condiciones ambientales que se puedan presentar en **Zacatecas**

Dada la gran importancia de conocer la variabilidad de la **precipitación pluvial**, para contar con las herramientas que permitan realizar una planeación adecuada, que de cómo resultado una combinación óptima entre el agua disponible y su distribución en el tiempo con los requerimientos hídricos, por ejemplo, del **maíz**, se presentan diversos análisis de las series de tiempo a escala pentadal, decenal y quincenal. cuyos resultados comparados permiten concluir que las series de tiempo a escala **pentadal**, nos permite analizar la relación distribución de la precipitación y el ciclo vegetativo del maíz de mejor manera.

I. INTRODUCCIÓN.

El tiempo y el clima son factores decisivos para el contexto agrícola, en cuanto a que afectan directamente la producción de las cosechas. es por ello, que es muy importante para los productores, el que se genere un conocimiento nuevo y práctico acerca de la **variabilidad de la precipitación pluvial** para cada región.

En particular, en el Estado de **Zacatecas**, por un lado, la mayoría de la **producción agrícola** es de temporal, primavera-verano, la entidad tiene una topografía muy diversa generando micro climas muy variados, afectando la producción de granos y cereales, principalmente del **maíz**, ya que es un cultivo que demanda -al igual que otros cultivos- condiciones óptimas de suelo y clima para que se logren sus más altos rendimientos.

Por otro lado, se puede definir al período de crecimiento de los cultivos, por ejemplo del **maíz**, como el número de días durante el año en el que existe **disponibilidad de agua** y una temperatura favorable para su desarrollo.

En el Estado de **Zacatecas** se encuentran agro-sistemas que pueden ser considerados como de muy buena, buena y media productividad, en el cual pequeñas perturbaciones ambientales, pueden desequilibrar los agro-sistemas y tener problemas físicos, químicos y biológicos, lo que nos puede llevar a grandes pérdidas de producción.

Al final de la década de los noventas, se han realizado en forma sistematizada investigaciones, para el Estado de Zacatecas, del impacto de valores extremos en el clima, entre otros, asociados a los fenómenos conocidos como **EL NIÑO** y **LA NIÑA**, con énfasis en la precipitación pluvial (Magaña y Morales-Acoltzi 1998).

Además, actualmente, el **agua** es considerada un asunto de **seguridad nacional**, de acuerdo al Plan Nacional de Desarrollo del Presidente Fox, por otro lado, la **lluvia** por su alta variabilidad inter-anual e intra-anual, tiene un gran impacto en la **productividad básica de granos**, principalmente en el maíz, que es la base de la alimentación de la población Zacatecana, por lo cual, es muy necesario e importante, conocer la **variabilidad de la precipitación pluvial** a diferentes escalas de tiempo, para al menos una de las estaciones climatológicas del Estado de Zacatecas, con un período mayor de treinta años para que tenga representatividad el análisis, de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (WMO 1999).

Por un lado, poco se sabe de **"todo"** lo que se puede extraer del maíz, entonces es necesario retomar la relación **maíz-precipitación pluvial**, para generar conocimiento de tal forma que en un tiempo relativamente corto, se puedan plantear soluciones reales a los productores, acordes a los nuevos retos que compartimos.

Por otro lado, en el caso particular del **maíz** y sus requerimientos térmicos, la temperatura es importante durante el período vegetativo, ya que el punto de congelación del agua, desde el punto de vista físico, es de 0° C y las temperaturas a partir de las cuales las semillas germinan son de 4.5 a 5.5° C y las plantas se desarrollan sin dificultad; y otras cuya importancia para los seres vivos es manifiesta.

Las **fechas** en que la temperatura se registra **entre ciertos límites** son muy importantes desde el punto de vista agroclimático. Aún cuando las plantas, generalmente, no mueren con temperaturas por abajo de los 0° C, en muchas especies el crecimiento no se realiza sino hasta que alcanza una temperatura de unos 4.5° C, la efectividad de la temperatura en el crecimiento de las plantas se mide ya sea por el número de días en el año en que la

temperatura es mayor de 4.5° C, o por la cantidad acumulada de grados centígrados en que ésta supera esa cantidad, este umbral arriba de 4.5° C varía de acuerdo a la fenología de los cultivos.

La eficiencia térmica de un lugar, en combinación de una **distribución adecuada de precipitación** es de gran ventaja para que pueda crecer una gran diversidad de cultivos, es decir, existe una gran variedad de plantas que pueden germinar y desarrollarse.

Considerando una escala menor a la **mensual**, el inicio del período de crecimiento por **disponibilidad de humedad** es la **pentada**, (unidad de medida de la precipitación, que es la suma de la lluvia en cinco días consecutivos) donde el umbral de la humedad del suelo (10 mm) se alcanza y el fin de éste, en la **pentada** donde la **humedad del suelo** es igual o menor al valor umbral, pero a partir de aquí disminuye hasta ser igual a cero, o decrece monótonamente sin incrementarse por lograr el umbral otra vez (Griffiths, 1986).

El objetivo de esta investigación, es analizar el comportamiento de la **precipitación pluvial** a diferentes escalas de tiempo, para caracterizar el tipo de serie de tiempo, en relación a la fenología o ciclo vegetativo del **maíz**, aplicando métodos matemáticos disponibles recientemente, y que mejoran el clásico análisis de espectro de potencia.

II. REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS DEL MAÍZ

Tanto las limitaciones climáticas de la producción de **maíz** en México, como la necesidad de agua para la evapotranspiración en el cultivo del **maíz**, se asocian a un umbral que varía de 400 a 800 mm. Conceptualmente la **evapotranspiración** se define como la relación entre **planta-suelo-atmósfera**, desde el punto de vista hídrico. El total de agua usada en la evapotranspiración, varía considerablemente de acuerdo a los siguientes factores: duración del ciclo de cultivo, clima, **disponibilidad de agua**, **características hidrodinámicas del suelo** y prácticas de manejo del sistema **agua-suelo-planta**.

Para nuestro país, donde la mayor parte del cultivo es de temporal, la cantidad total anual de la **lluvia**, a lo largo de la temporada, y su distribución así como su eficacia, son factores fundamentales para la producción del **maíz**.

En particular, la **escasez de agua** en cualquier etapa del desarrollo de la planta afectará a la cosecha, pero las investigaciones en **maíz** han confirmado que la deficiencia de agua en el suelo durante el período de floración e inicio del llenado del grano, es particularmente crítica para el rendimiento del **maíz**. Esta observación es de especial importancia, dada la aparente **distribución bimodal** de la **precipitación pluvial** en algunas regiones del país, presentándose "**una**" **sequía** a mediados de la **estación lluviosa**, conocida como **canícula** o veranillo (en Centro América) por los agricultores (Amador y Olmedo, 1998a, 1998b)

Inicialmente Mosiño et al. (Mosiño y García 1966; Mosiño y Reyna 1988) al estudiar este fenómeno que llamó **sequía intraestival**, estableció que la causa de la sequía a medio verano, obedece a cambios en la circulación aérea que año con año tiene lugar sobre el Golfo de México. Recientemente Magaña, et. al (1999), han encontrado que la **sequía intraestival**, es parte del

ciclo anual, ya que ocurre sistemáticamente en la parte Sur central de México, Centro América y algunas regiones del Caribe, siempre durante la misma época del año. En el Océano Pacífico del Este, es donde la **canícula** es más intensa, justo donde se localiza durante el verano, una importante lente alargada de mar relativamente caliente. Cuando comienza la estación lluviosa, durante mayo y principios de junio se establece una zona de convección atmosférica profunda, frente a las Costas de México y de Centro América, que dan al Océano Pacífico. Simultáneamente, se forma una circulación ciclónica anómala en superficie sobre Norte América, al parecer, el resultado de esta fuerte actividad convectiva (Gill 1980). Cuando la actividad convectiva disminuye durante julio y agosto, esta circulación ciclónica se debilita, manifestándose como una anomalía anticiclónica de flujo de bajo nivel (925 mb) en los vientos, lleva a la formación de anomalías divergentes que inhiben el desarrollo de la actividad profunda sobre la región de agua caliente del Pacífico del Este. Tales cambios parecen estar modulados por las variaciones de la temperatura de la superficie del mar (TSM) en la región (Magaña y Morales-Acoltzi 1998).

Las fluctuaciones en la radiación solar (Lawrence K. J. 1998) que llegan a la superficie, provocan una mayor evapotranspiración y la intensificación del mezclado debido a los vientos alisios reforzados, hacen que la TSM disminuya unas cuantas décimas de grado en julio y agosto ($TSM < 28.5^{\circ}C$), en estos casos, la actividad convectiva profunda, es muy sensible a pequeñas fluctuaciones de la TSM alrededor de los $28^{\circ}C$ (Webster, 1994). El debilitamiento de los alisios a principios de septiembre, forma una anomalía convergente, que refuerza la actividad convectiva profunda y produce un segundo máximo en la precipitación sobre el sur de México y la costa de Centro América del lado del Pacífico (Schmitz and Mullen 1996).

Esto parece indicar, que la lente de agua caliente o alberca de agua caliente (Wang and Enfield, 2001; Magaña et al. 1999), que se forma durante el verano en el Pacífico del Este, posee características especiales que permiten reaccionar a pequeños cambios en vientos y radiación. La capa de mezcla es relativamente somera (30 metros, aproximadamente) en esta zona y diversos estudios muestran que aún en escalas de tiempo menores puede responder con cambios de temperatura en la capa. Por otra parte, los cambios en TSM, alrededor de los 28° C, pueden producir cambios en la profundidad y densidad de la actividad convectiva. El fenómeno en cuestión tiene una duración diferente, dependiendo del área de que se trate (Latif and Grotzner 2000) y el mínimo de precipitación puede caer en junio, agosto o septiembre, estos son los meses en que el maíz, sembrado entre febrero y junio, llega a las etapas críticas en que la escasez de agua afecta directamente al rendimiento.

Otro aspecto importante para la producción de maíz en México, es la precipitación total anual. El promedio general de lluvias en México, alcanza 700-717mm el cual es bastante bajo, y sitúa al país en conjunto en los límites de la agricultura de temporal con bajos rendimientos. Sin embargo, el promedio para todo el territorio mexicano no tiene prácticamente utilidad, ya que analizando las regiones del país, se advierte que el 23 % recibe más de 1000 mm de precipitación media anual y 42 % del país menos de 500 mm, pero aún más, tenemos que la escasez de agua no afecta en forma simultánea a todo el país sino que en enormes extensiones del norte, noreste, centro y sur se presenta sequía absoluta y relativa, por eso se observan notorios contrastes entre los escasos sitios, por un lado, donde se precipita más de 4500 mm al año como en algunas regiones de Chiapas, 3500 mm en el sur de Tabasco y 2500 mm en el Sureste de Veracruz, y por otro lado, solamente 800 mm en Tlaxcala, 700 mm en los valles centrales de Oaxaca y centro de

Sinaloa, 400 mm en Zacatecas y menos de 100 mm en Mexicali y la mayor parte de Baja California.

La siembra del **maíz** es de temporal en todo el país, a excepción de las áreas francamente desérticas. eso se debe a las técnicas utilizadas por los productores de las diferentes regiones, las cuales van desde la siembra con espeque, en terrenos con fuerte pendiente y con bajísimos rendimientos, hasta la producción en suelos de alta calidad, con irrigación y elevados rendimientos, o bien en condiciones primitivas, como en el caso de los sistemas trashumantes de tumba-roza-quema, que contrasta con los sistemas de tecnificación avanzada que utilizan todos los instrumentos e insumos modernos. Las áreas donde se puede lograr "**buenas cosechas**" deben disponer de "**precipitación pluvial bien distribuida**" y, que acumulen más de 800 mm de lluvia entre los meses de mayo a septiembre.

Estas áreas se localizan precisamente en los estados de la República Mexicana que son los principales productores del grano: Jalisco, Veracruz, Chiapas, Michoacán y Estado de México.

Otro factor climatológico, que actúa como limitante a la producción de **maíz**, es la presencia de **heladas** que ocurren en todas las zonas del país con alturas sobre el nivel del mar de 1000 m o más, al sur del Trópico de Cáncer y toda el área al norte del mismo, lo que incluye el 75 % del territorio nacional, como zona con presencia de **heladas**.

Prácticamente todas las especies de **maíz** presentan susceptibilidad a las bajas temperaturas, por lo que los agricultores procuran sembrar en fechas que aseguren el cumplimiento del ciclo vegetativo de la planta, dentro del período libre de **heladas** (Magaña y Morales-Acoltzi, 1998).

Las **granizadas** tienen también un efecto negativo en los rendimientos, afectan en forma drástica la superficie foliar y cuando se presentan en época

de floración, los daños en las espigas y en el jilote se reflejan en el llenado de la mazorca y, por consiguiente, en los rendimientos.

Los vientos ocasionan el acame de las plantas, lo que acarrea problemas de ataque de enfermedades, plagas y deficiencias en el llenado de grano, además, de dificultades en la cosecha.

El maíz prospera mejor en suelos fértiles, ricos en nutrientes, bien drenados, profundos, de textura media, en general, los mejores terrenos para el cultivo son los de aluvión, los formados en las orillas de los ríos y aquellos terrenos vírgenes, cubiertos por una vegetación espontánea.

El maíz no tiene exigencia muy destacada en lo que respecta al suelo, pero ha de ser un sustrato cultivado aireado - a través de las labores indispensables- en estado de buen tempero y biológicamente activo, entre otras propiedades en el caso de este cereal, con su temperatura de germinación alrededor de los 10° C, quedando los suelos pesados y fríos, ya que se modifica el balance de energía.

II.1 CICLO VEGETATIVO DEL MAÍZ

El maíz es un cereal que se adapta ampliamente a diversas condiciones ecológicas y edáficas, razón por la cual se cultiva en casi todo el mundo.

El maíz constituye la base de la alimentación de los pueblos latinoamericanos, por eso resulta obvia la gran importancia de estudiar la relación **maíz-precipitación**, entendiéndose esta como la etapa básica en la economía regional.

El ciclo vegetativo puede ser dividido en cuatro partes, **germinación, crecimiento, floración y fecundación, maduración-llenado de grano** con diferentes períodos, en la figura 1, se presenta en detalle el ciclo vegetativo

del maíz de temporal en el estado de **Zacatecas**, se resalta la duración, en días, de los periodos de cada etapa crítica.

El **maíz** requiere de condiciones óptimas de suelo y clima para que se logren los más altos rendimientos.

El **maíz**, particularmente, requiere de temperaturas moderadas a calientes, el límite inferior para su crecimiento está entre los 10 y 12° C. El límite superior favorable para el crecimiento depende de la **humedad disponible**. Cuando esta es abundante, el **maíz** crecerá bien a temperaturas mayores de 35° C, pero en condiciones normales de campo, las temperaturas máximas, entre 30 y 32° C son cercanas a lo óptimo. Cuando la humedad es escasa, las bajas temperaturas ayudan a la planta a tolerar un estrés hídrico.

Se considera al **maíz** más eficiente que la mayoría de los cultivos para el aprovechamiento de la humedad, requiere 370 partes de agua para producir una parte de materia seca en grano y rastrojo, lo anterior, indica que las necesidades de **agua** del **cultivo**, en condiciones óptimas, son de **800 a 1200 mm** durante su ciclo vegetativo.

Desde el punto de vista climático, al parecer el único inconveniente del **maíz** para ampliar su distribución, es la susceptibilidad de la planta a las **heladas**, quizá por su origen tropical, lo que obliga a los agricultores a introducir variedades precoces en los sitios donde éstas se presentan.

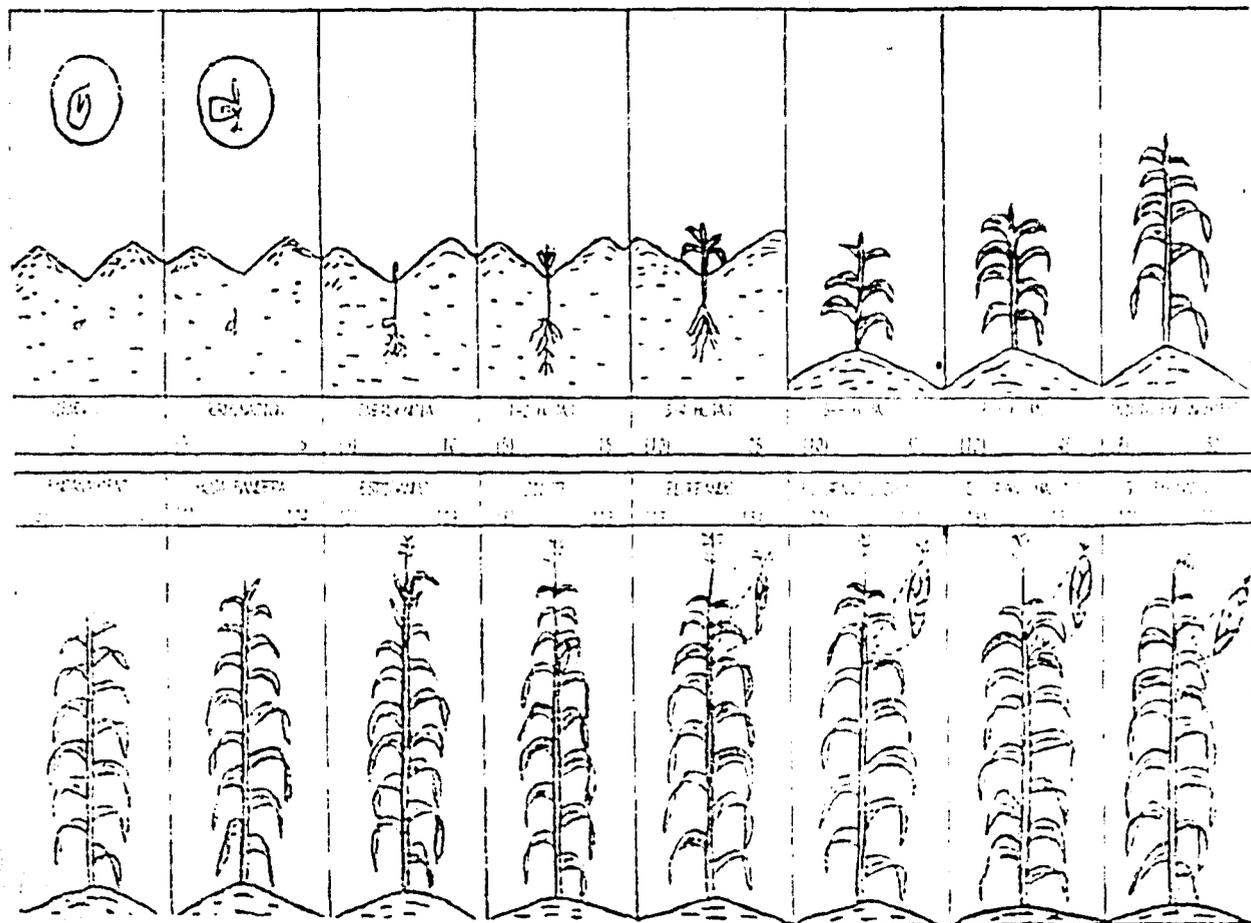


Fig.1 Ciclo vegetativo del maíz en el Estado de Zacatecas.

III. CARACTERIZACIÓN PROBLEMÁTICA

III.1 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y CLIMÁTICAS DEL ESTADO

III.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El Estado de **Zacatecas** se encuentra entre los paralelos 21°01' al 25°09' de Latitud Norte y entre los meridianos 100°48' al 104°20' de Longitud Oeste de Greenwich. Colinda hacia el norte con el Estado de Coahuila de Zaragoza, al oeste con los estados de Durango, Nayarit y Jalisco, al sur con los estados de Aguascalientes y Jalisco y al este con los estados de Aguascalientes y San Luis Potosí (Fig. 2).

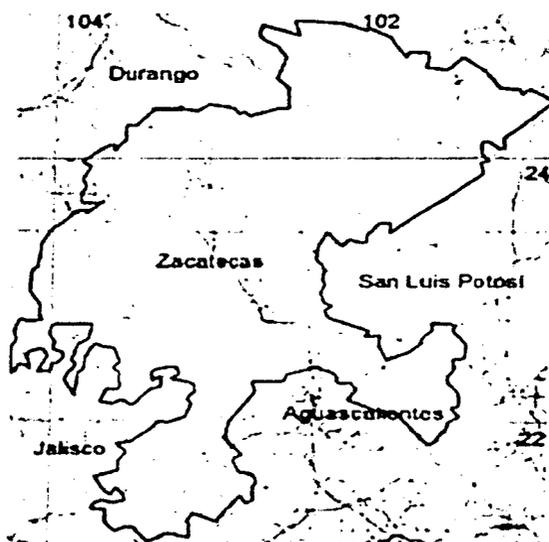


Fig.2 Ubicación geográfica del Estado de Zacatecas

La superficie que ocupa es de 74 668.67 km², que representan el 3.81 % del total de la superficie del país.

III.1.2 CLIMAS

El clima en el Estado de **Zacatecas** es generalmente seco, con una temperatura media anual de 16° C y una precipitación pluvial media de 510 mm. Los valores de temperatura máxima y mínima anual son 35° C máxima y 6° C mínima; mientras que para la precipitación los valores extremos son 910 mm y 324 mm, respectivamente.

Con base en las características morfológicas y el entorno geográfico en que se localiza el Estado de **Zacatecas**, se pueden encontrar diferentes variedades de climas, que pueden ser semisecos, templados y semicálidos.

Los climas semisecos se concentran en la región central y oriental del Estado, en la zona de transición entre el semidesierto y la Sierra Madre Occidental.

La distribución de los climas templados es en las partes altas de la sierras de la porción occidental del estado.

Los climas semicálidos tienen una distribución restringida en la parte sur y suroeste del estado.

El dominio en la entidad del clima seco no ha sido limitante para que se desarrollen actividades agrícolas y frutícolas. Los principales productos son el durazno, alfalfa, uva y manzana, que se cultivan en los municipios de Río Grande, Fresnillo, Villanueva, Tabasco, Huanusco y Jalpa, que son beneficiados por el curso de los ríos Aguanaval, Juchipila y Lazos. La actividad agrícola en las zonas con climas templados y semicálidos se desarrolla en los municipios de **Tepechitlán**, Momax y Tlaltenango. (Fig.3)

Debido a que el cultivo de **maíz**, aún es de suma importancia en el Estado, así como en el resto del País, ya que proporciona alimento básico al hombre como a los animales, éste debe proporcionar buen rendimiento en grano o forraje. Para esto hay conocimiento, pero aún mucho por conocer, sobre todo, con las condiciones climáticas que influyen en la plantación del cultivo, dado que éste es afectado constantemente por la distribución de la precipitación pluvial en mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Un ejemplo, muy claro es lo ocurrido en **1998**, en que la distribución de la **precipitación** fue muy **anormal**, es decir, hubo **sequía e incendios** y se inició la **lluvia hasta junio/julio e inundaciones en septiembre**. además está abierto el tema sobre el cambio climático a escala regional, con su estudio respectivo estudio de vulnerabilidad agrícola.

Para poder responder la problemática, podemos concluir, que se requiere analizar la precipitación pluvial con énfasis en:

- 1.- su variabilidad a diferentes escalas
- 2.- su comportamiento no-lineal (Ghil and Yiou 1996; Cannas and Cincotti 2002; Lin et al. 1999).

Por lo tanto se plantea el siguiente objetivo:

Caracterizar la serie de tiempo de **precipitación pluvial** con mayor periodo de registro del estado de Zacatecas, desde un punto de vista espectral, con énfasis en el método moderno: **Ondículas**.

Analizar la **precipitación pluvial**, a diferentes escalas en el tiempo, para caracterizarla de acuerdo al ciclo vegetativo del **maíz (germinación, crecimiento, floración y fecundación, maduración-llenado de grano.)**

Y por otro lado, se plantea la siguiente hipótesis de trabajo: Es posible caracterizar la variabilidad de una serie de tiempo de precipitación pluvial a diferentes escalas de tiempo, para su aprovechamiento.

IV. METODOLOGÍA

IV.1 DATOS

Los datos de precipitación utilizados para el presente estudio fueron obtenidos del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Las unidades en que se presentaron estos datos son los milímetros.

El ERIC contiene información de 143 estaciones climatológicas para el Estado de Zacatecas, con datos de precipitación pertenecientes al período de años comprendido entre 1961 y 1998, sin embargo, sólo algunas estaciones fueron elegidas por registrar el mayor número de datos efectivos y representativos de la región.

De todas las estaciones climatológicas existentes en el ERIC para el estado de Zacatecas, se seleccionaron aquellas que tienen el período más largo y completo de datos. De esta manera se seleccionaron las estaciones: Víctor Rosales, Concepción de la Norma, El Chique, El Platanito, El Tecomate, El Sauz, Excame III, La Florida, La Villita, Loreto y Nochistlán, para un primer análisis.

Estación Climatológica	Localización
32003 Víctor Rosales	Lat. 22°57' Long. 102°41'
32011 Concepción de la Norma	Lat. 24°32' Long. 101° 58'
32013 El Chique	Lat. 22°00'

	Long. 102°54'
32016 El Platanito	Lat. 22°35' Long. 104°03'
32017 El Tecomate	Lat. 21°58' Long. 103°03'
32018 El Sauz	Lat. 23°11' Long. 103°21'
32019 Excame III	Lat. 21°38' Long. 103°21'
32030 La Florida	Lat. 22°41' Long. 103°37'
32032 La Villita	Lat. 21°40' Long 103°21'
32033 Loreto	Lat. 22°18' Long. 101°59'
32039 Nochistlán	Lat. 21°22' Long. 102°51'

Se realizaron correlaciones sólo para algunas estaciones y meses de manera que se completaran los datos de precipitación faltantes.

Dado que los datos del ERIC son datos de precipitación diaria, se realizaron promedios de precipitación de cada estación para cada mes del período considerado (1961-1998). Estas series de datos mensuales fueron promediadas para obtener el ciclo anual de lluvia de cada estación y definir el período de lluvia con el que se trabajó. (Fig.4a y 4b).

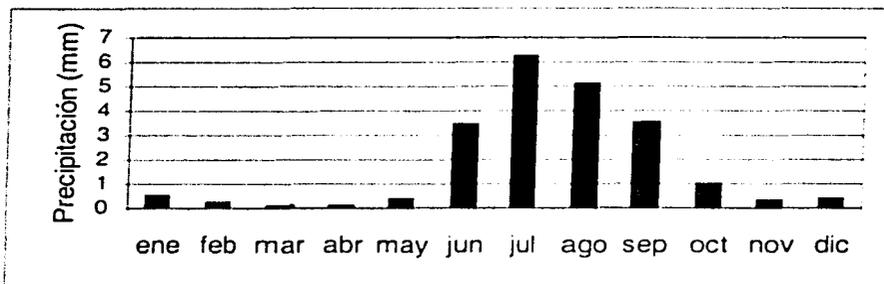


Fig. 4a Promedio de la precipitación diaria mensual para el período de 1961-1998 para la Estación Climatológica El Tecomate

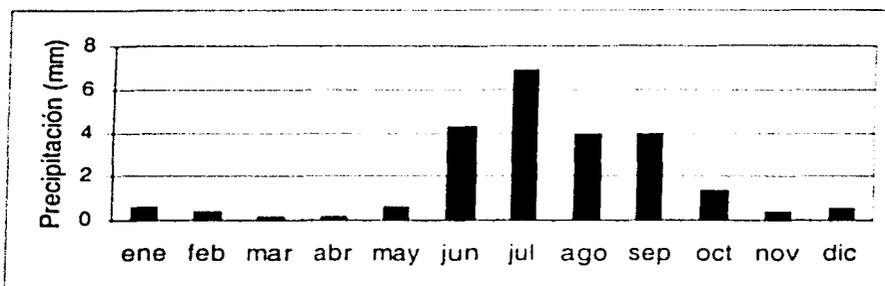


Fig. 4b Promedio de la precipitación diaria mensual para el período de 1961-1998 para la Estación Climatológica Excame III

Para el objetivo de esta investigación se tomaron en cuenta únicamente las estaciones que se encontraran ubicadas en la región de Tepechitlán que son: El Chique, El Tecomate, Excame III y La Villita (Fig.5), debido a que pertenecen a una región con gran actividad agrícola, donde lo que más se produce es el maíz.

Se realizaron promedios para las escalas: **pentadal**, **decenal** y **quincenal** para cada una de las estaciones antes mencionadas durante el período de años de 1961 a 1998.

-Se preparó un archivo **.DAT** para cada una de las tres escalas, aplicándole enseguida el paquete "statpack", por ejemplo, para realizar el análisis con armónicos.

IV.2 ANÁLISIS CON ARMÓNICOS.

Cuando se analiza una serie de datos o serie de tiempo y se encuentra que los valores fluctúan hacia abajo de su valor medio, es frecuentemente útil ajustarlos por series de Fourier, con el fin de investigar sus **características** periódicas, tendencias, etc. La limitación principal para este proceso, radica en el hecho de que los datos no se encuentran dados como una expresión analítica, pues no es una función continua, sino como una serie de tiempo de valores discretos, generalmente espaciados a intervalos regulares de tiempo.

De esta forma, sí se tiene una serie de tiempo de datos expresados como un número finito de puntos en un cierto intervalo, estos pueden ajustarse mediante una serie de Fourier, en funciones senos y cosenos. A la determinación de los coeficientes a_0 , a_n y b_n de la serie de este tipo, es a lo que se le conoce como **Análisis Armónico**.

Así, el análisis armónico proporciona el método para descomponer una señal en sus componentes armónicas, por ejemplo, en este trabajo la señal es un registro de datos de precipitación pluvial diaria, que llamaremos serie de tiempo, y ésta puede ser: **diaria, pentadal, semanal, decenal, quincenal o mensual**, de este modo se conocerán los constituyentes periódicos más importantes que se presentan en la señal, para la región estudiada.

IV.3 ANÁLISIS CON ONDÍCULAS

La transformada de **ondículas**, es una herramienta matemática que responde de una forma muy singular al problema de la resolución, a nivel de escala se tendrá una buena resolución en el tiempo y baja resolución en frecuencias, para altas frecuencias y una buena resolución en frecuencia y poca en el tiempo, para bajas frecuencias (Arneodo and Holscheider 1998; Belay and O' C 1998).

En otras palabras: la transformada en **ondículas** puede ser usada para analizar series de tiempo, que contienen **potencias no-estacionarias** a diferentes frecuencias. Aplicando el proceso conocido como **convolución**, básicamente, el procedimiento consiste en utilizar una **función ventana dinámica**, es decir, se considera una función que pueda compactarse/dilatarse y trasladarse flexiblemente, dependiendo de la resolución requerida y compararla de forma análoga a la Transformada de Fourier con Ventana (Brunet and Collineau, 1994).

Para que una función se pueda considerar como "**ondícula**" madre se deben cumplir las siguientes dos propiedades:

1. **Debe ser una función ventana.**- De esta forma, se permite localizar la señal X de la misma forma que en la Transformada de Fourier a tiempos Cortos.
2. **Debe ser oscilatoria.**- Junto con la primera propiedad, se tiene que la función debe ser una onda pequeña, de ahí el nombre de ondícula (Fournier, 2000; Muzy et al. 1994).

V. RESULTADOS

V.1 ANÁLISIS CON ARMÓNICOS

V.1.1 ESCALA PENTADAL

En la Figura 6 se muestra, a escala pentadal, la precipitación observada (línea continua) y la precipitación representada por el desarrollo de series de Fourier (línea en guiones), con un armónico, con dos armónicos, etc. para la estación **El Chique**.

Se observa, que al incluir 4 armónicos obtenemos una distribución bimodal cuyo remanso corresponde a la **canícula**, con un mínimo relativo en la precipitación en la pentada 12, pero al continuar incluyendo más armónicos, por ejemplo, 9 armónicos, se simula cada vez mejor la curva original de precipitación, sin embargo, se tiene variabilidad de corta duración. Cómo puede verse, al incluir el total de armónicos permitidos por el método, 14, se logró simular completamente la distribución de la precipitación observada en **El Chique**.

En el caso de la estación **El Tecomate**, Fig. 7, relativamente cerca de **El Chique**, se presenta el mínimo relativo de la precipitación simulado hasta el armónico 5, resaltando su carácter global en los forzamientos (principalmente forzamiento orográfico), es decir, esta estación tiene un carácter de sistema semi-aislado, con respecto a **El Chique**, por un lado los sistemas atmosféricos afectando a **El Chique**, son de un período mayor que los que afectarán a **El Tecomate**, por otro lado, resalta el carácter semiárido de **El Chique**, debido a que los valores de precipitación son mucho menores que los de las demás estaciones climatológicas.

Al sur de las dos estaciones anteriores, se encuentran **Excame III** (Fig.8) y **La Villita** (Fig.9). en el caso de la primera, la canícula o sequía

intraestival queda determinada con 6 armónicos, sin embargo, para **La Villita**, al igual que **El Chique**, la canícula es simulada en el armónico 4 (9d), resaltando una vez más que juegan un papel importante los forzamientos locales, como puede verse en la alta variabilidad que tiene **La Villita** con respecto a **Excame III** (pentadas 16-20), a pesar de estar relativamente en la misma región, a poca distancia.

Con el fin de filtrar los forzamientos locales en las estaciones, se presenta una serie de tiempo de precipitación, representando un promedio areal de las 4 estaciones anteriormente descritas. En la Fig. 10 se observa el comportamiento de la canícula en la región, en la serie simulada, nuevamente se captura el mínimo relativo hasta el armónico 5.

Cabe resaltar que para las **cuatro** Estaciones Climatológicas y el promedio areal de éstas, el mínimo relativo de la precipitación se localiza en la pentada 12.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de la pentada y el número de armónico en que se logra simular la canícula, para las cuatro Estaciones Climatológicas utilizadas en el presente estudio así como para el promedio areal de éstas.

Estación	Número de armónicos que simulan la canícula	Pentada que presenta el mínimo relativo de la precipitación
El Chique	4 armónicos	Pentada 12
El Tecomate	5 armónicos	Pentada 12
Excame III	6 armónicos	Pentada 12
La Villita	4 armónicos	Pentada 12
Promedio areal	5 armónicos	Pentada 12

Tabla 1 Resumen del número de armónicos y pentada en que se simula la canícula para las Estaciones Climatológicas El Chique, El Tecomate, Excame III y La Villita

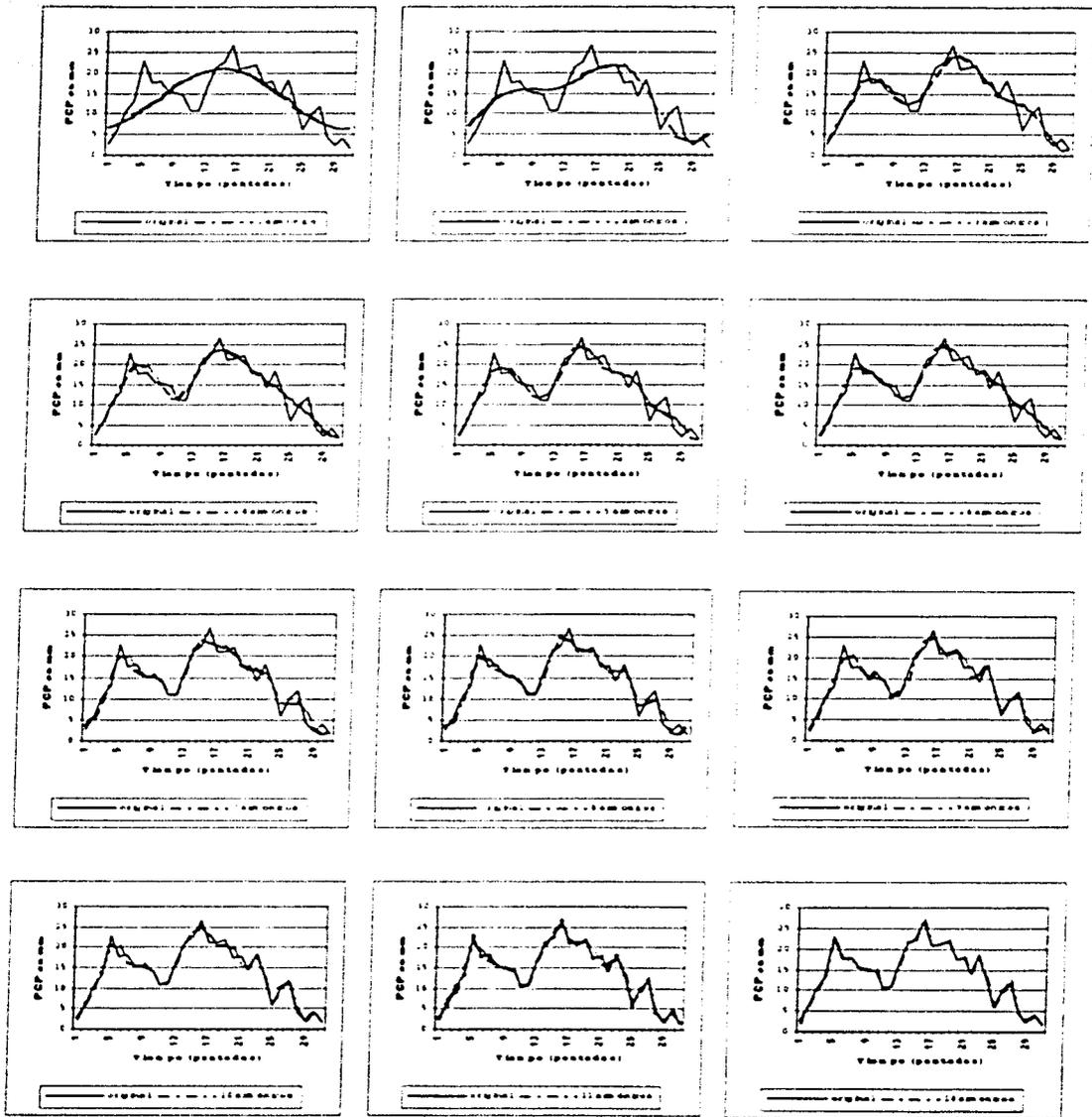


Fig. 6 Representación de la Precipitación Pluvial con Pentadas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica El Chique

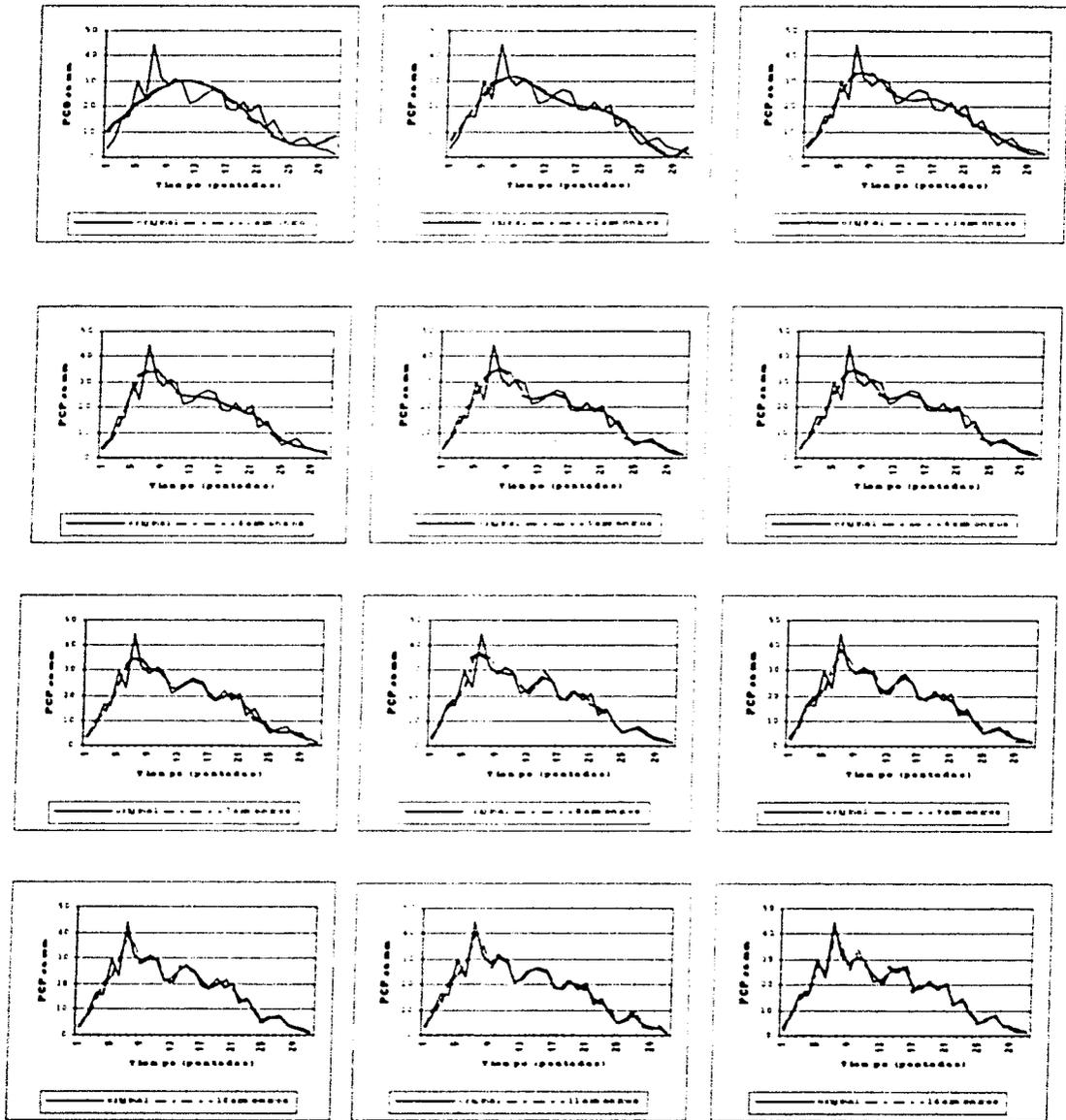


Fig.7 Representación de la Precipitación Pluvial con Pentadas por Medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica El Tecamate

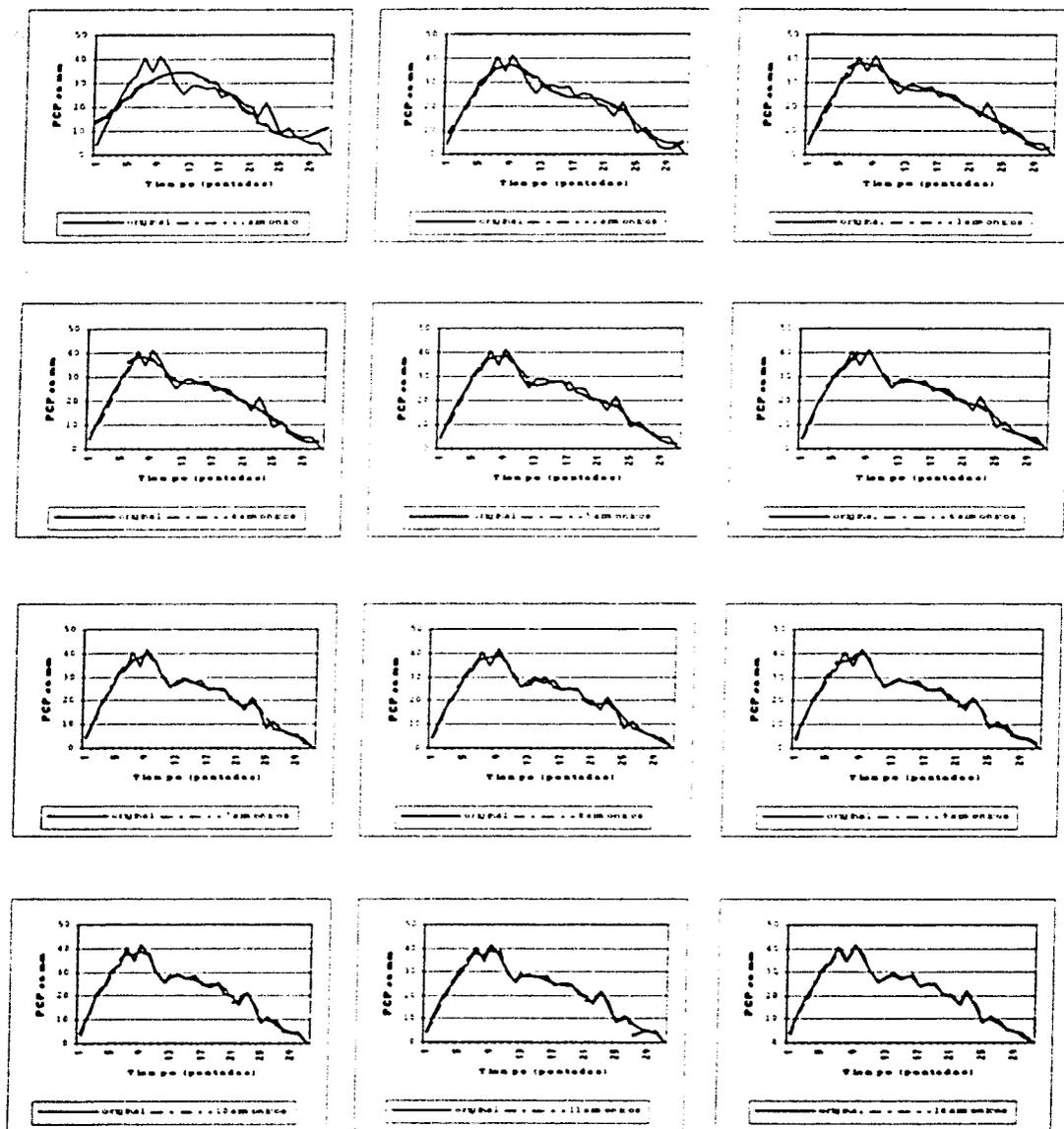


Fig.8 Representación de la Precipitación Pluvial con Pentadas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica Excame III

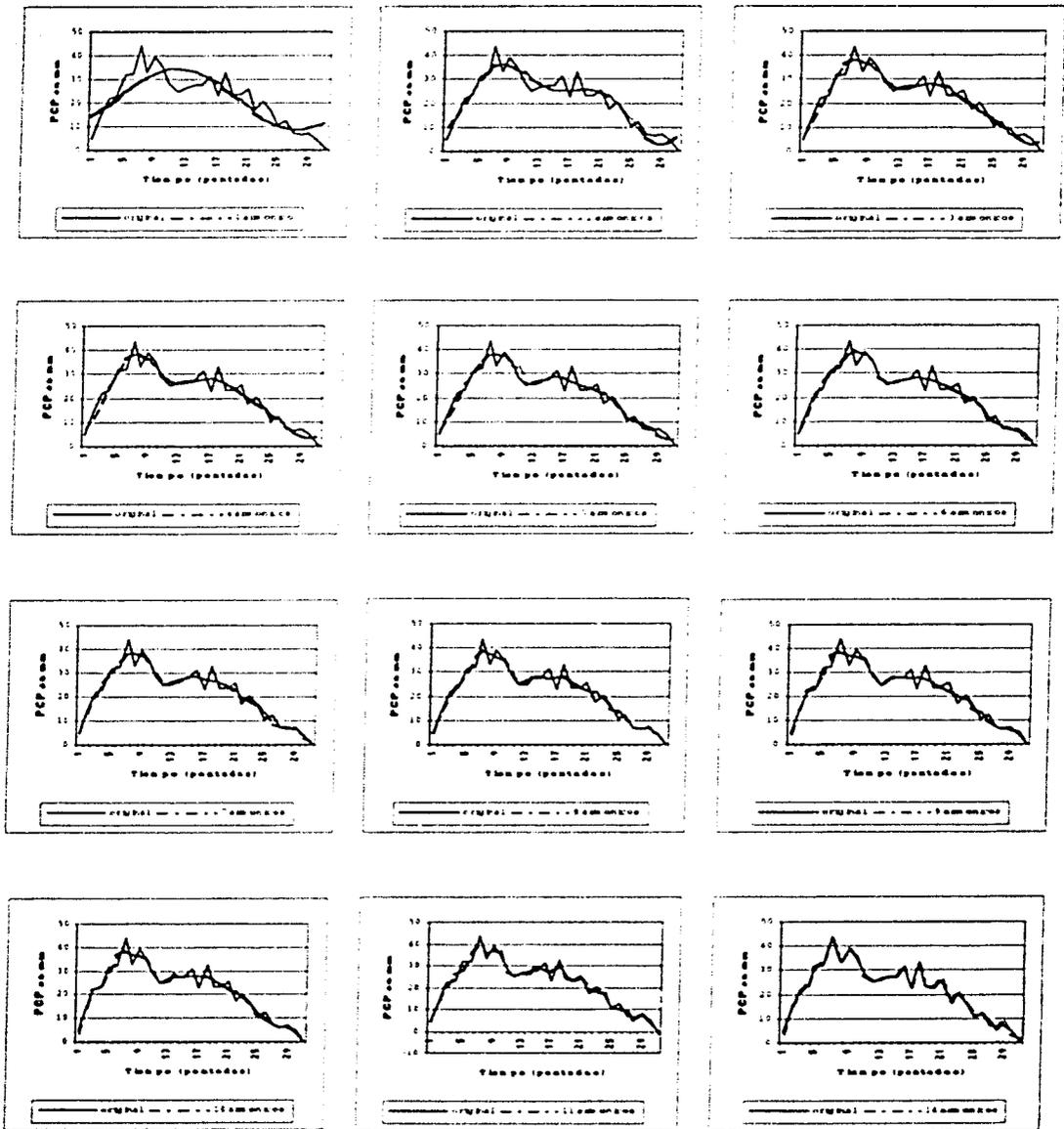


Fig.9 Representación de la Precipitación Pluvial con Pentadas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica La Villita

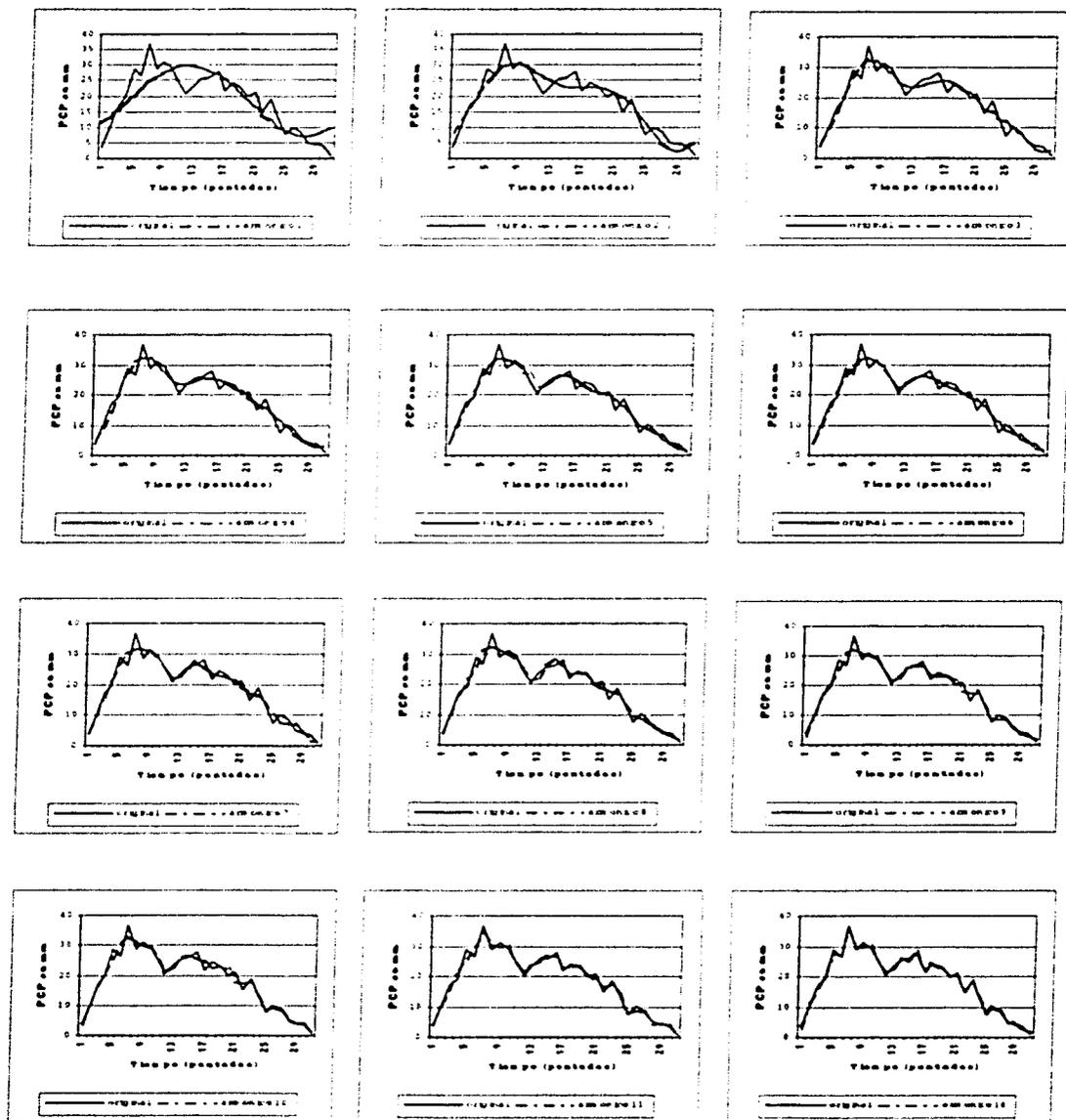


Fig.10 Representación de la Precipitación Pluvial con Pentadas por medio de Armónicos, línea continua = promedio de la observada, línea a guiones = teórica, del promedio areal de las Estaciones El Chique, El Tecamate, Excame III y La Villita

V.1.2 IMPACTO SOBRE LA PRECIPITACIÓN DE VALORES EXTREMOS EN LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Dentro de la variabilidad climática resalta un calentamiento extremo en el Océano Pacífico del Este, conocido como "EL NIÑO", y su contraparte como "LA NIÑA", con características cíclicas pero no periódicas, aún hay diferencias entre NIÑO-NIÑO y NIÑA-NIÑA, tanto en duración como en intensidad, haciéndose esto un importante problema a resolver. En este estudio consideramos los dos eventos, caracterizados por un promedio de todos los eventos disponibles de NIÑO y NIÑA, que se presentaron para el área, de acuerdo a las series de tiempo de precipitación.

V.1.2.1 LA NIÑA

La representación de la precipitación con pentadas para las estaciones **El Chique** y **El Tecomate** se presenta en las figuras 11a y 11b, respectivamente, para el caso de LA NIÑA. En el caso de **El Tecomate** se tiene alta variabilidad con respecto a **El Chique** pero en ambos casos se presenta la canícula,; para **El Chique** el primer máximo relativo es menor que el segundo y para **El Tecomate** se invierte esta propiedad. Con respecto a la simulación de la canícula, se logra con el armónico 7 en ambas estaciones.

En las figuras 11c y 11d, se presentan las estaciones **Excame III** y **La Villita**, respectivamente, para el caso de LA NIÑA. En ambas estaciones se tiene gran variabilidad en la precipitación observada. Con respecto a la simulación de la canícula, se presenta también un mínimo relativo en la pentada 12, sin embargo, posteriormente se presentan más canículas, en ambas estaciones. Hasta el armónico 8 se logra simular adecuadamente la presencia de la primera canícula.

Para el caso de **LA NIÑA** promedio, representativa de la composición de las 4 estaciones ya mencionadas (Fig. 11e), se muestra marcadamente la canícula para la región, lográndose simular con 7 armónicos, pero se logran caracterizar otros mínimos relativos, como canículas menores.

Se puede observar que el mínimo relativo de la precipitación aparece en la pentada 12 para las cuatro estaciones y para el promedio areal.

V.1.2.2 EL NIÑO

En las Figuras 12a y 12b se presenta el análisis con armónicos para el caso del calentamiento en el Océano Pacífico del Este para las estaciones **El Chique** y **El Tecomate**, respectivamente. En ambas estaciones se muestra mucha variabilidad a lo largo de toda la estación lluviosa, cabe resaltar que la variabilidad es mayor que la registrada en el caso de **LA NIÑA** (Fig. 11a y 11b). Al intercomparar la precipitación para ambos casos extremos, llueve más en casos de **LA NIÑA**.

Las estaciones **Excame III** y **La Villita**, se presentan en las Figuras 12c y 12d respectivamente, destacando mayor variabilidad en la primera estación con respecto a la segunda, con relación a la presencia de la canícula en la primera estación se tiene una familia de canículas, destacando un mínimo relativo en la pentada 12, lográndose simular hasta el armónico 8.

Aquí también, la lluvia total, en la estación lluviosa, generalmente es mayor con **LA NIÑA**.

EL NIÑO promedio de las 4 estaciones (Fig. 12e) muestra la presencia de varios mínimos relativos con respecto a **LA NIÑA** promedio, sin embargo, puede rescatarse el mínimo relativo asociado a la canícula que alcanza su máxima intensidad en la pentada 12, lográndose simular hasta el armónico 8.

Por último, en la Figura 13 se presenta la serie de precipitación para **El Tecomate**, curva continua negra, a escala pentadal, con sólo **5 armónicos**, mostrando la variabilidad interanual, para el período 1961-1996. Además, en dicha gráfica se representa también la **evapotranspiración potencial**. Se puede destacar que se tiene una alta variabilidad en la precipitación pluvial, año tras año en la estación **El Tecomate** pero, además, como ya se ha mencionado para las escalas pentadal y decenal, se presentan las **canículas**, que en ocasiones son dos o hasta tres en un mismo año. En cuanto a la evapotranspiración se puede decir que se ve más afectada en años de **NIÑO**, debido a su alta variabilidad a lo largo del período conocido como húmedo.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de la pentada y el número de armónico en que se logra simular la canícula, para las cuatro Estaciones Climatológicas utilizadas en el presente estudio así como para el promedio areal de éstas, para los años de **NIÑO** y de **NIÑA**.

Estación	Armónico en que se simula la canícula para los años de NIÑO	Armónico en que se simula la canícula para los años de NIÑA	Pentada en la que se presenta la canícula para los años de NIÑO	Pentada en la que se presenta la canícula para los años de NIÑA
El Chique	7 armónicos	7 armónicos	Pentada 12	Pentada 12
El Tecomate	8 armónicos	7 armónicos	Pentada 12	Pentada 12
Excame III	7 armónicos	8 armónicos	Pentada 12	Pentada 12
La Villita	8 armónicos	8 armónicos	Pentada 12	Pentada 12
Promedio areal	8 armónicos	7 armónicos	Pentada 12	Pentada 12

Tabla 1 Resumen del número de armónicos y pentada en que se simula la canícula para los años de NIÑO y NIÑA de las Estaciones Climatológicas El Chique, El Tecomate, Excame III y La Villita

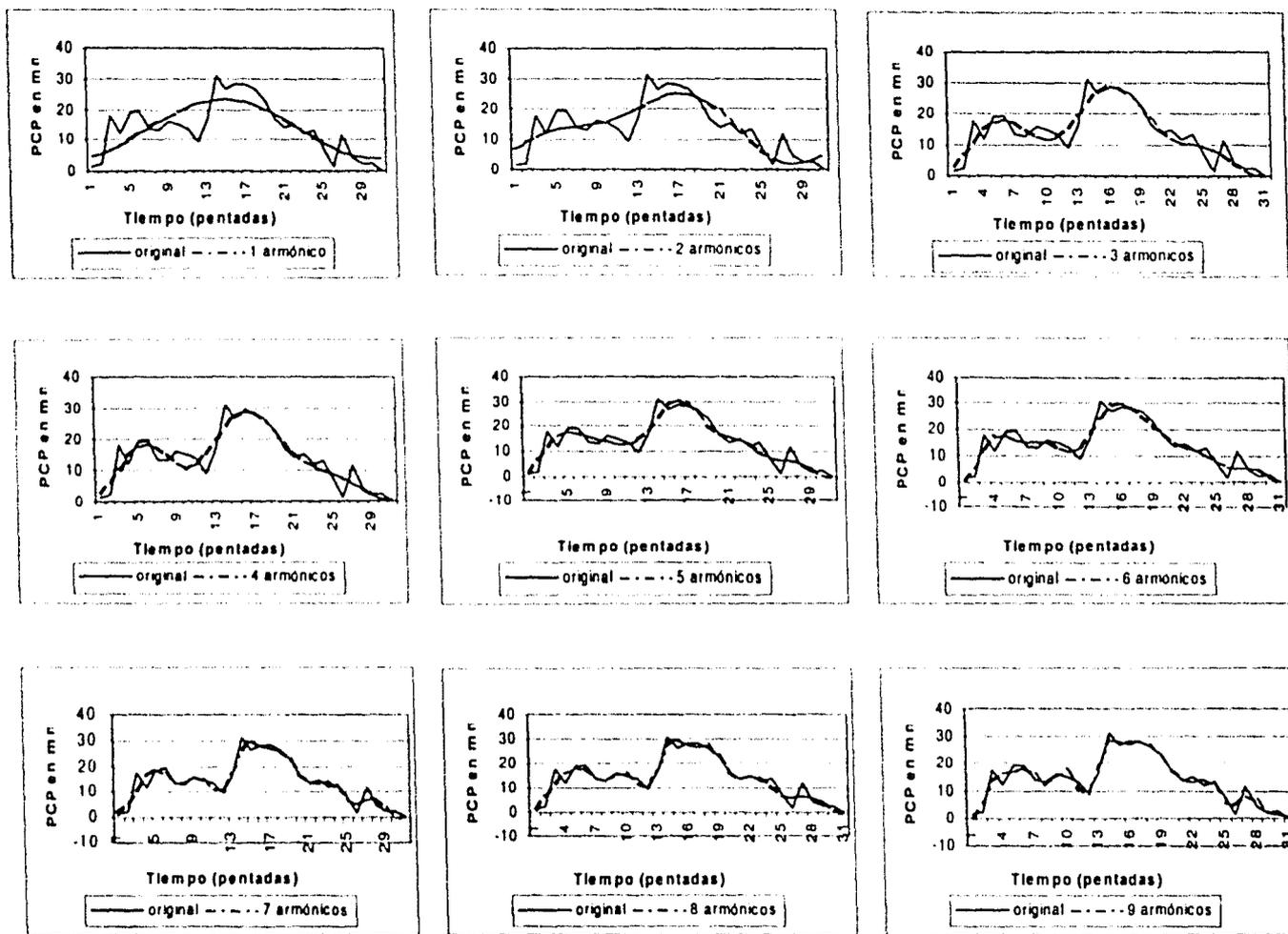


Fig. 11a Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑA (1967, 1968, 1970, 1971, 1974, 1975, 1976, 1984, 1985, 1988, 1989, 1990) para la Estación Climatológica de El Chique

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

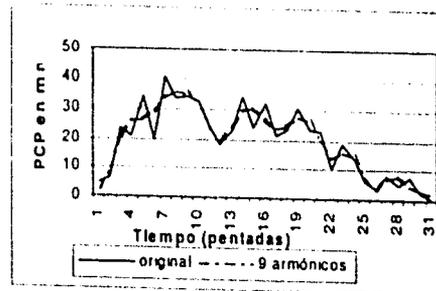
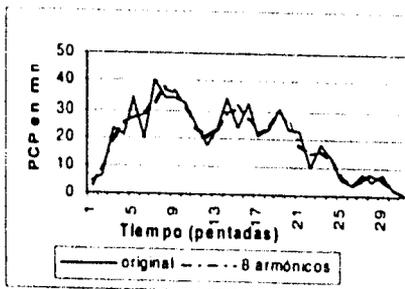
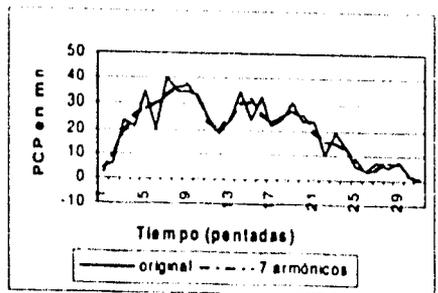
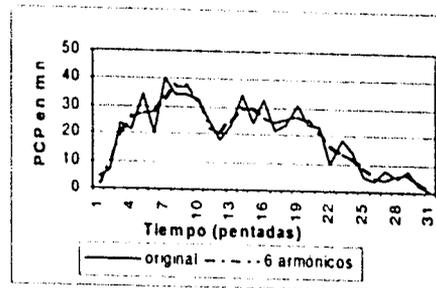
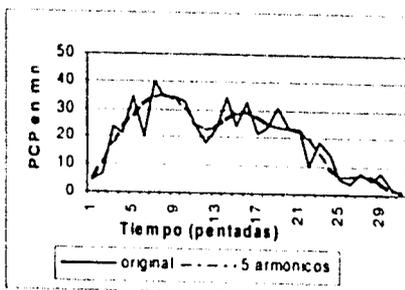
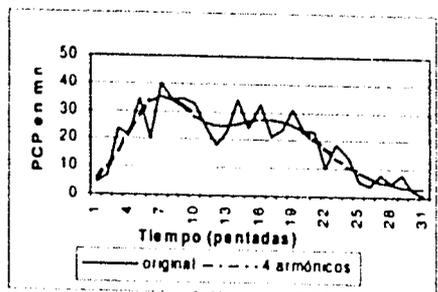
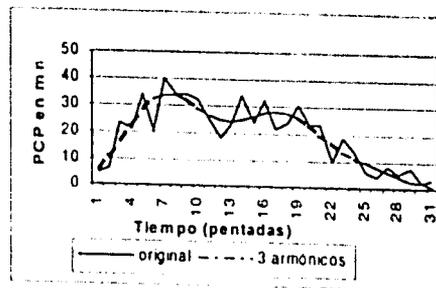
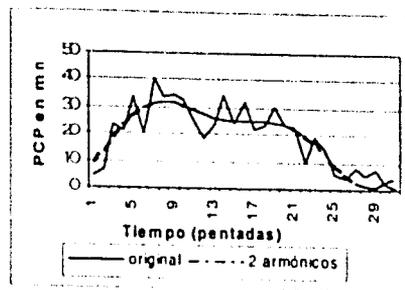
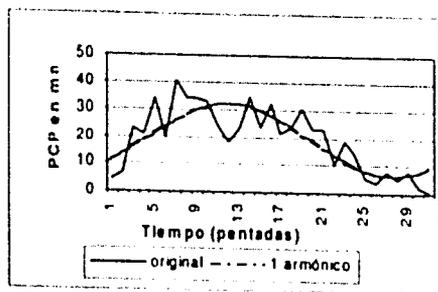


Fig. 11b Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑA (1967, 1968, 1970, 1971, 1974, 1975, 1976, 1984, 1985, 1988, 1989, 1990) para la Estación Climatológica de El Tecamate

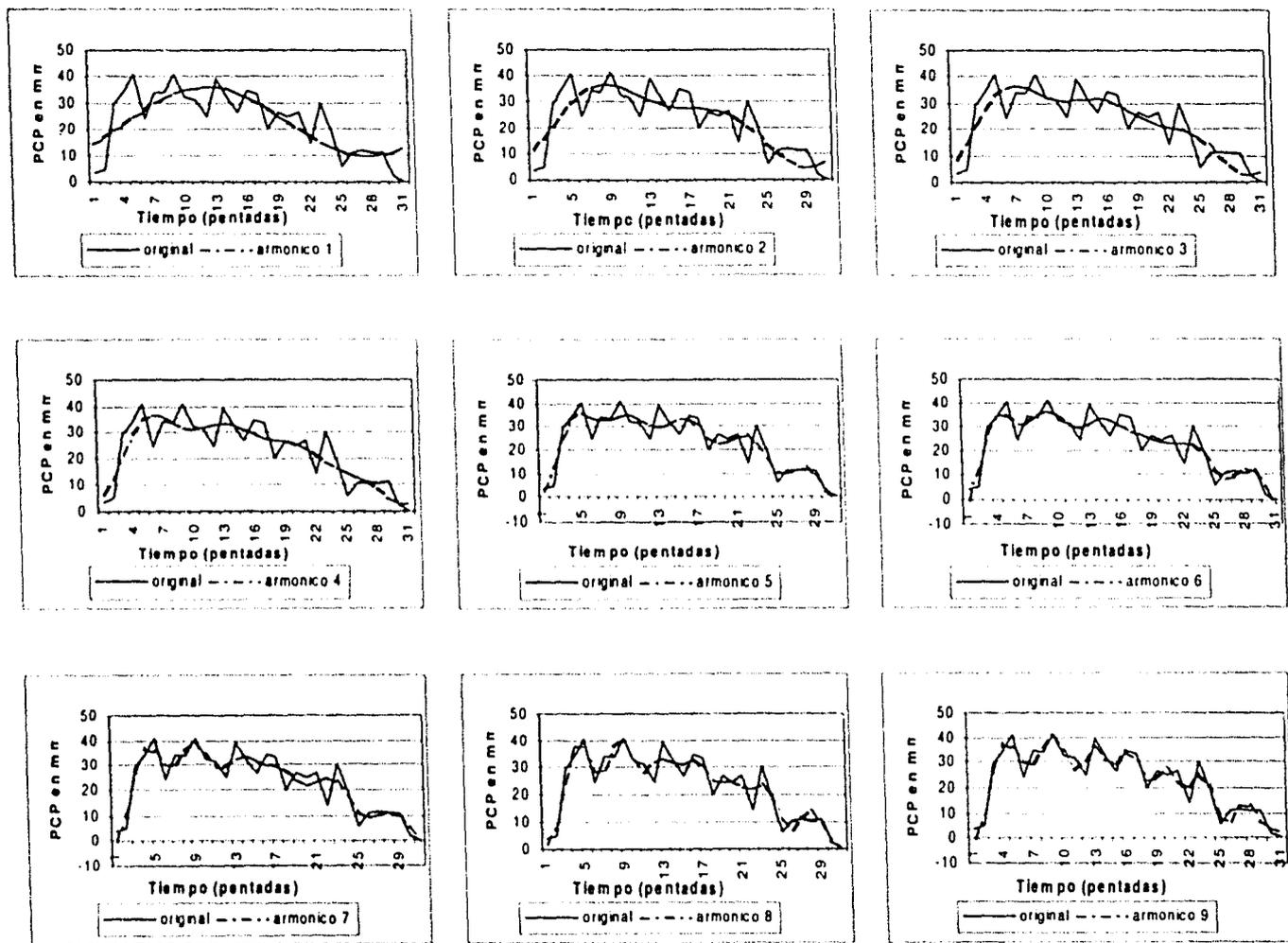


Fig. 11c Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑA (1967, 1968, 1970, 1971, 1974, 1975, 1976, 1984, 1985, 1988, 1989, 1990) para la Estación Climatológica de Excame III

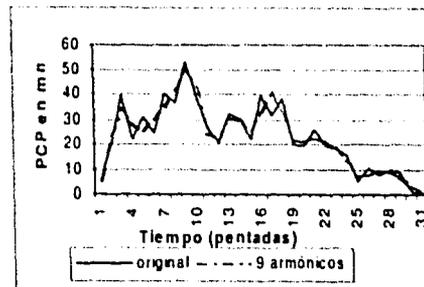
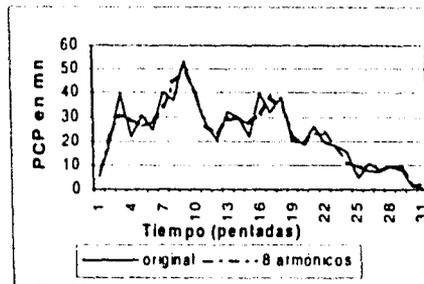
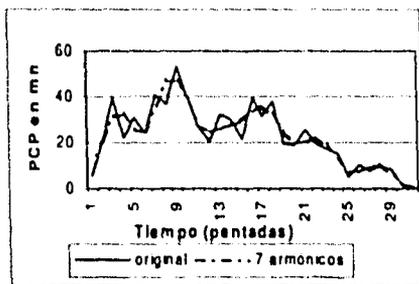
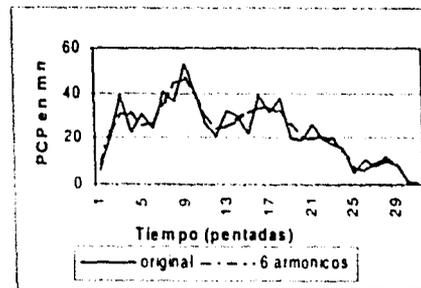
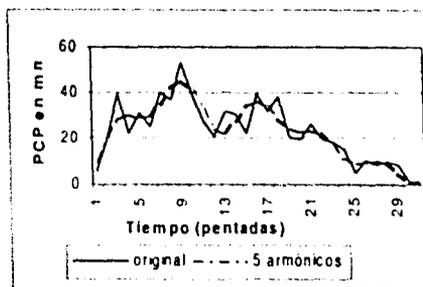
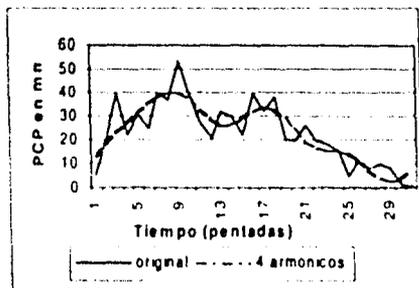
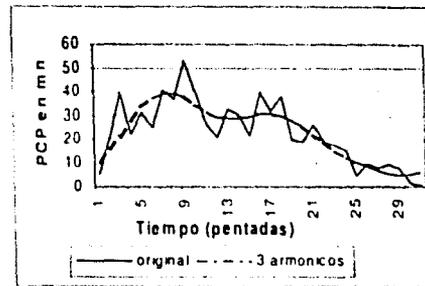
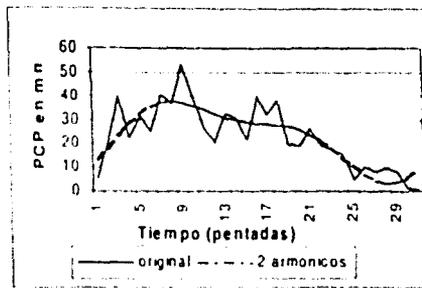
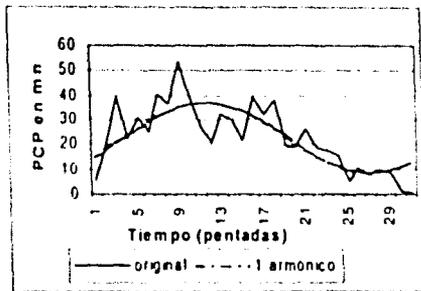


Fig. 11d Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑA (1967, 1968, 1970, 1971, 1974, 1975, 1976, 1984, 1985, 1988, 1989, 1990) para la Estación Climatológica de La Villita

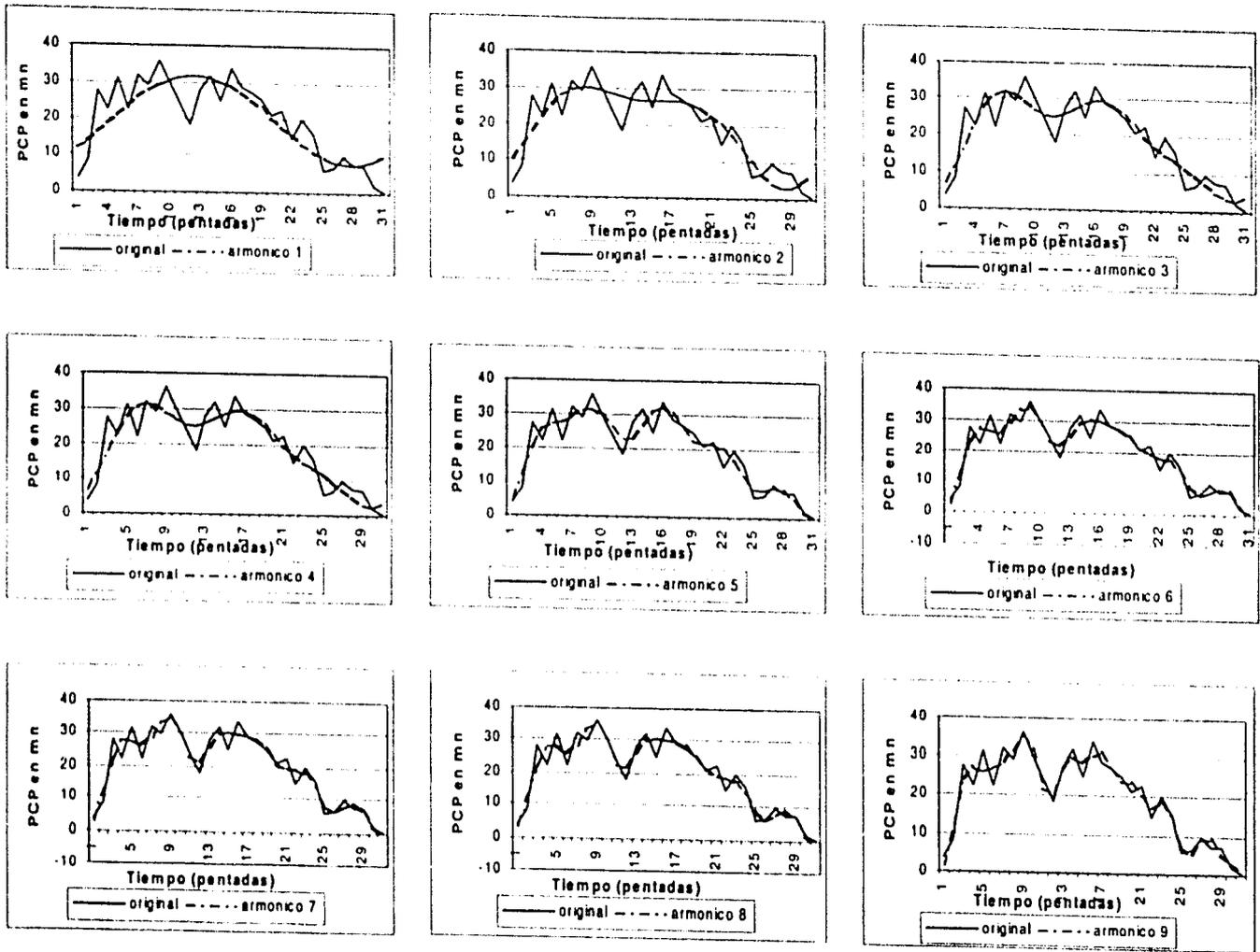


Fig. 11e Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑA (1967, 1968, 1970, 1971, 1974, 1975, 1976, 1984, 1985, 1988, 1989, 1990) para el promedio areal de las cuatro estaciones

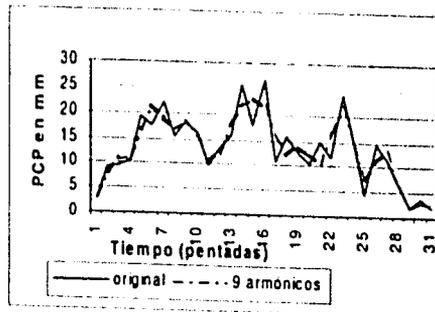
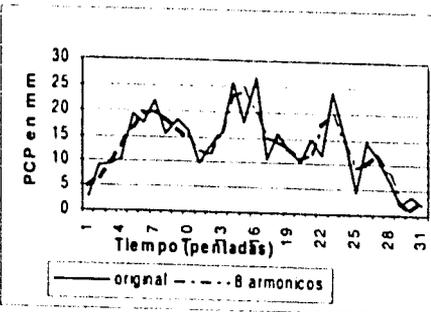
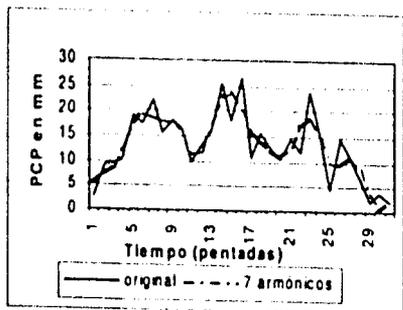
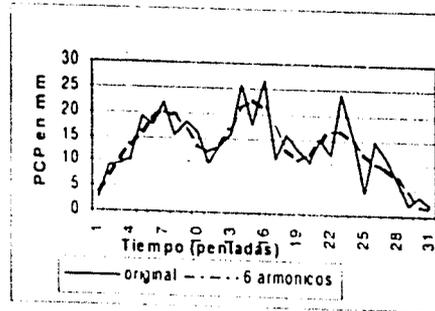
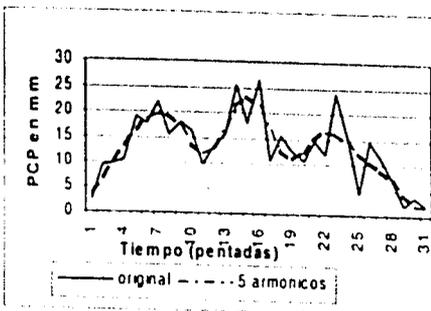
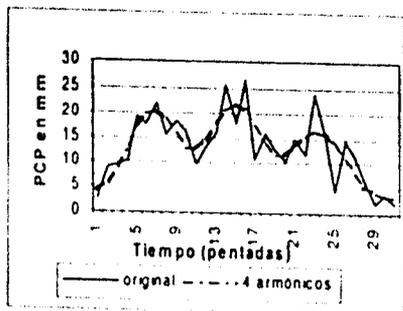
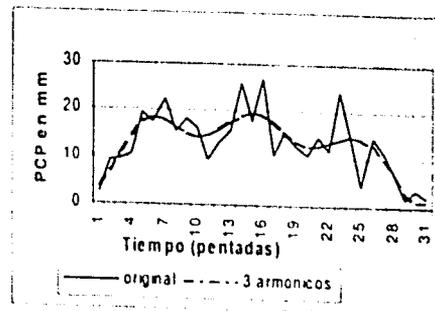
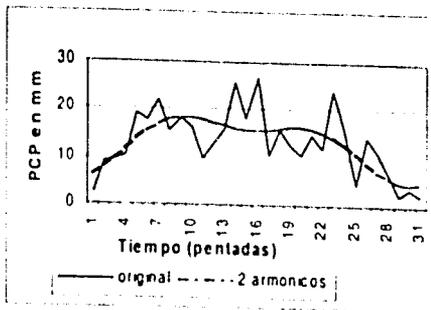
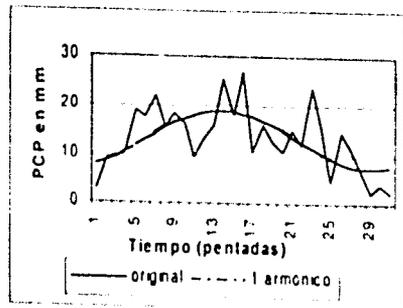


Fig. 12a Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑO (1965, 1966, 1972, 1973, 1982, 1983, 1986, 1987, 1991, 1992, 1997, 1998) para la Estación Climatológica de El Chique

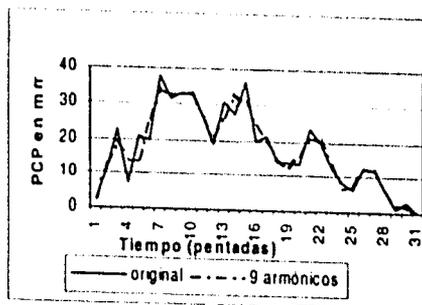
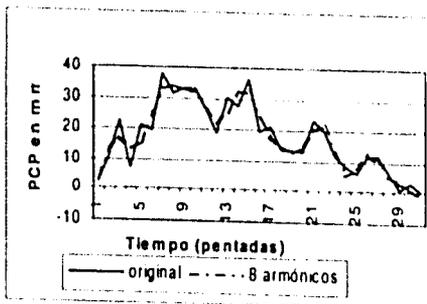
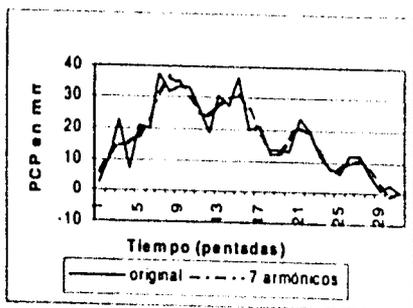
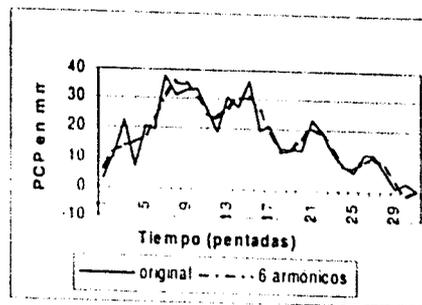
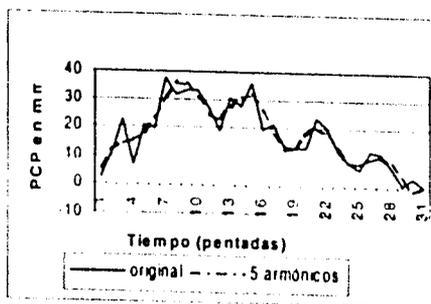
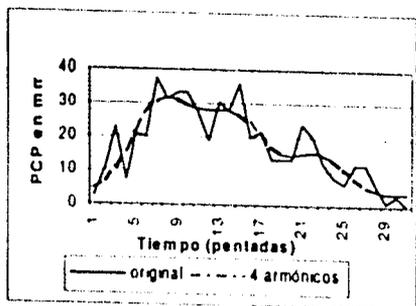
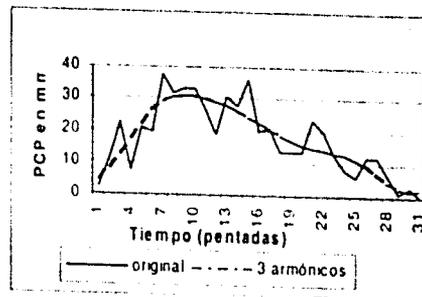
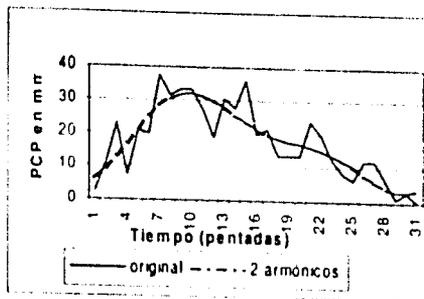
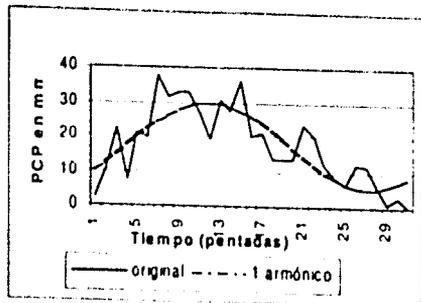


Fig. 12b Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑO (1965, 1966, 1972, 1973, 1982, 1983, 1986, 1987, 1991, 1992, 1997, 1998) para la Estación Climatológica de El Tecamate

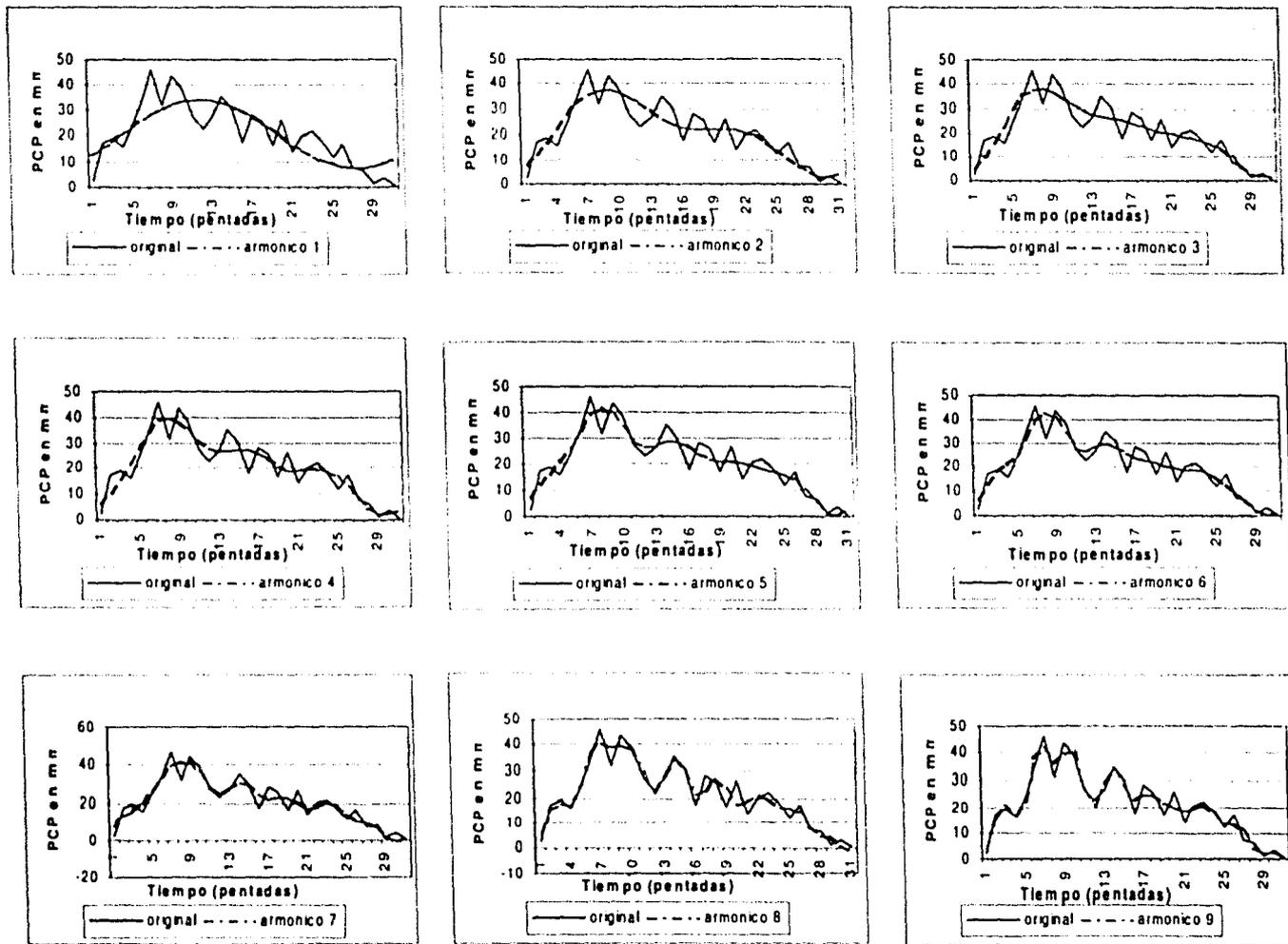


Fig. 12c Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑO (1965, 1966, 1972, 1973, 1982, 1983, 1986, 1987, 1991, 1992, 1997, 1998) para la Estación Climatológica de Excame III

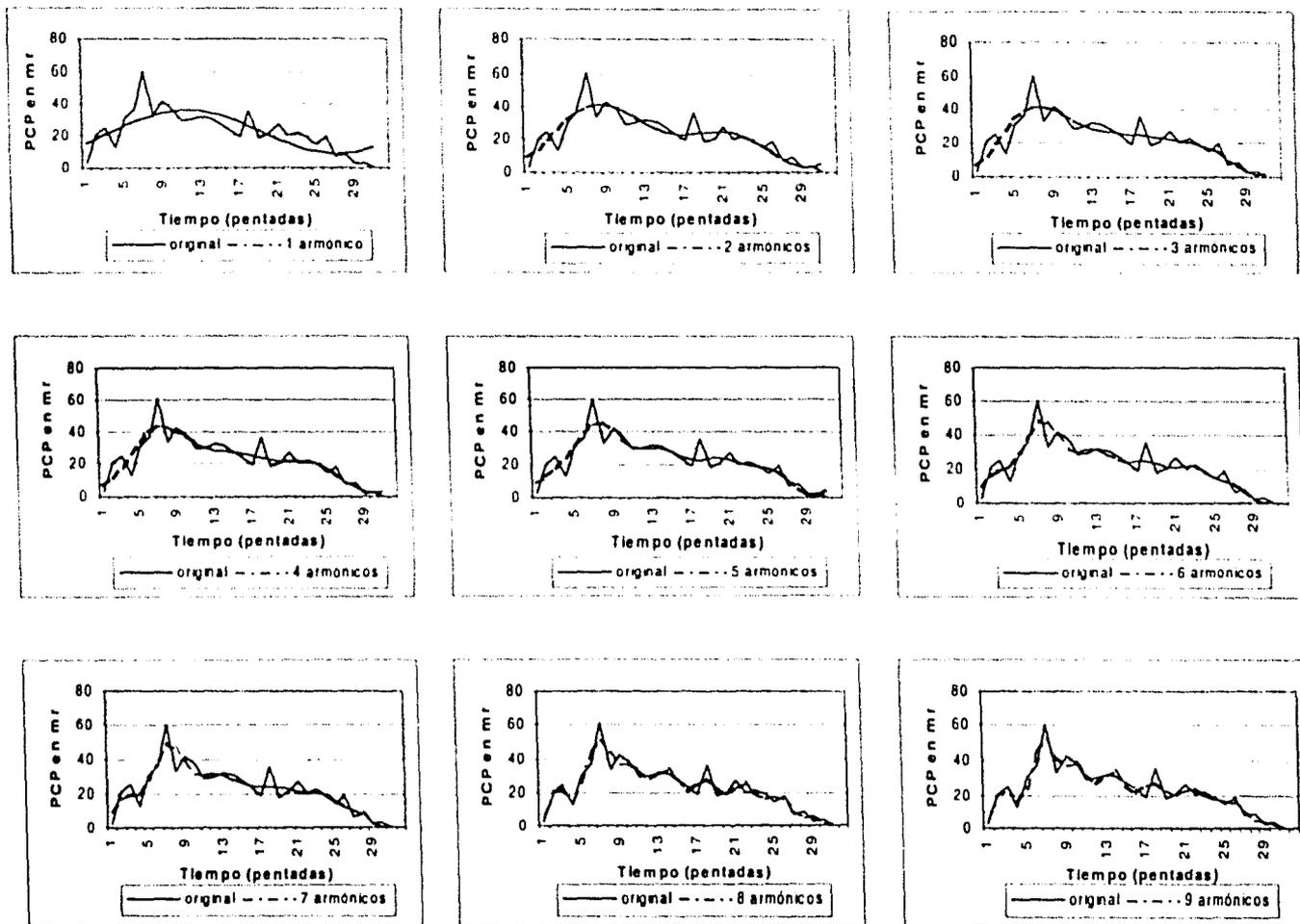


Fig. 12d Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑO (1965, 1966, 1972, 1973, 1982, 1983, 1986, 1987, 1991, 1992, 1997, 1998) para la Estación Climatológica de La Villita

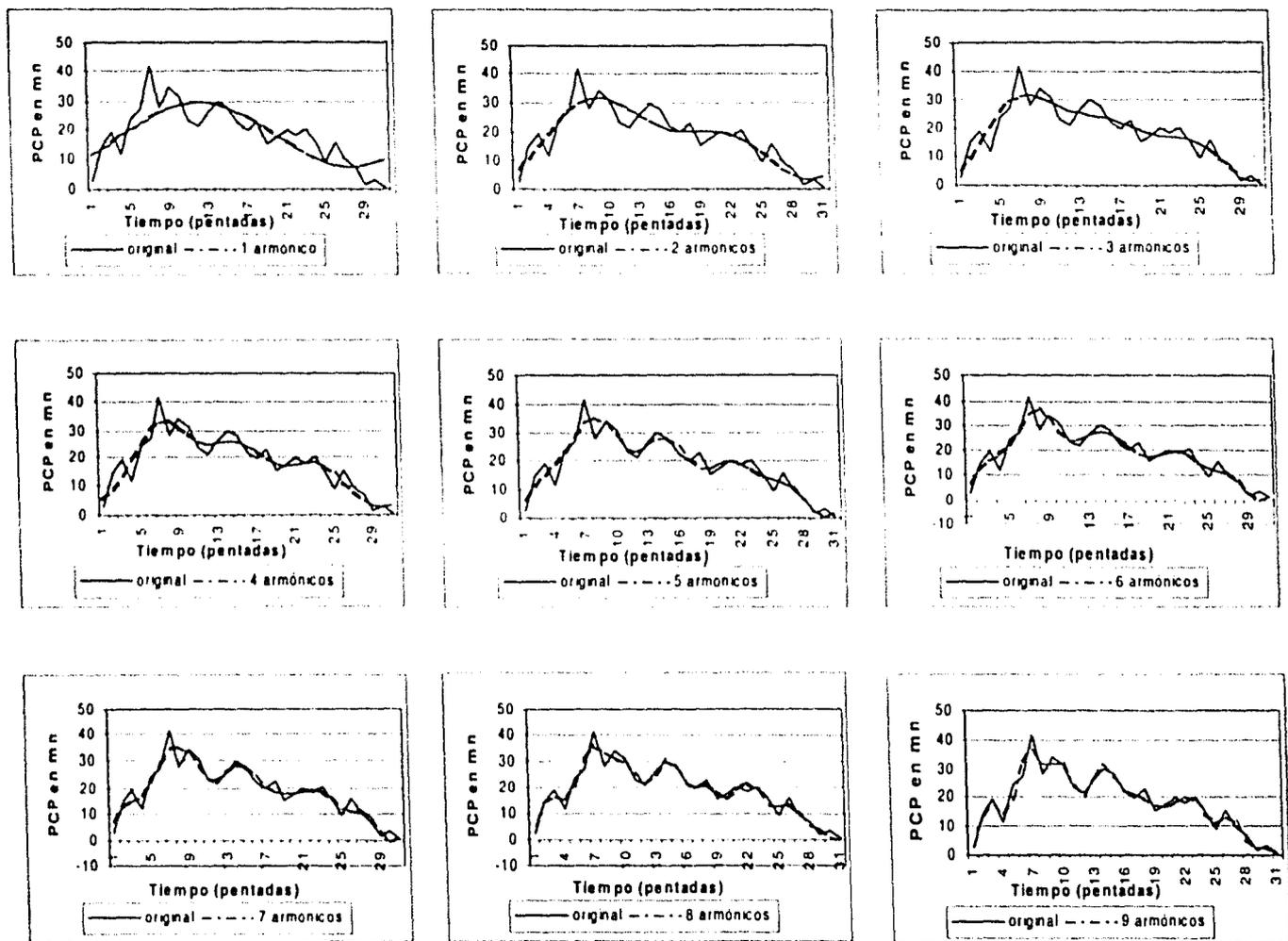


Fig. 12e Representación de la Precipitación Pluvial por medio de armónicos, del promedio de los años de NIÑO (1965, 1966, 1972, 1973, 1982, 1983, 1986, 1987, 1991, 1992, 1997, 1998) para el promedio de las cuatro estaciones

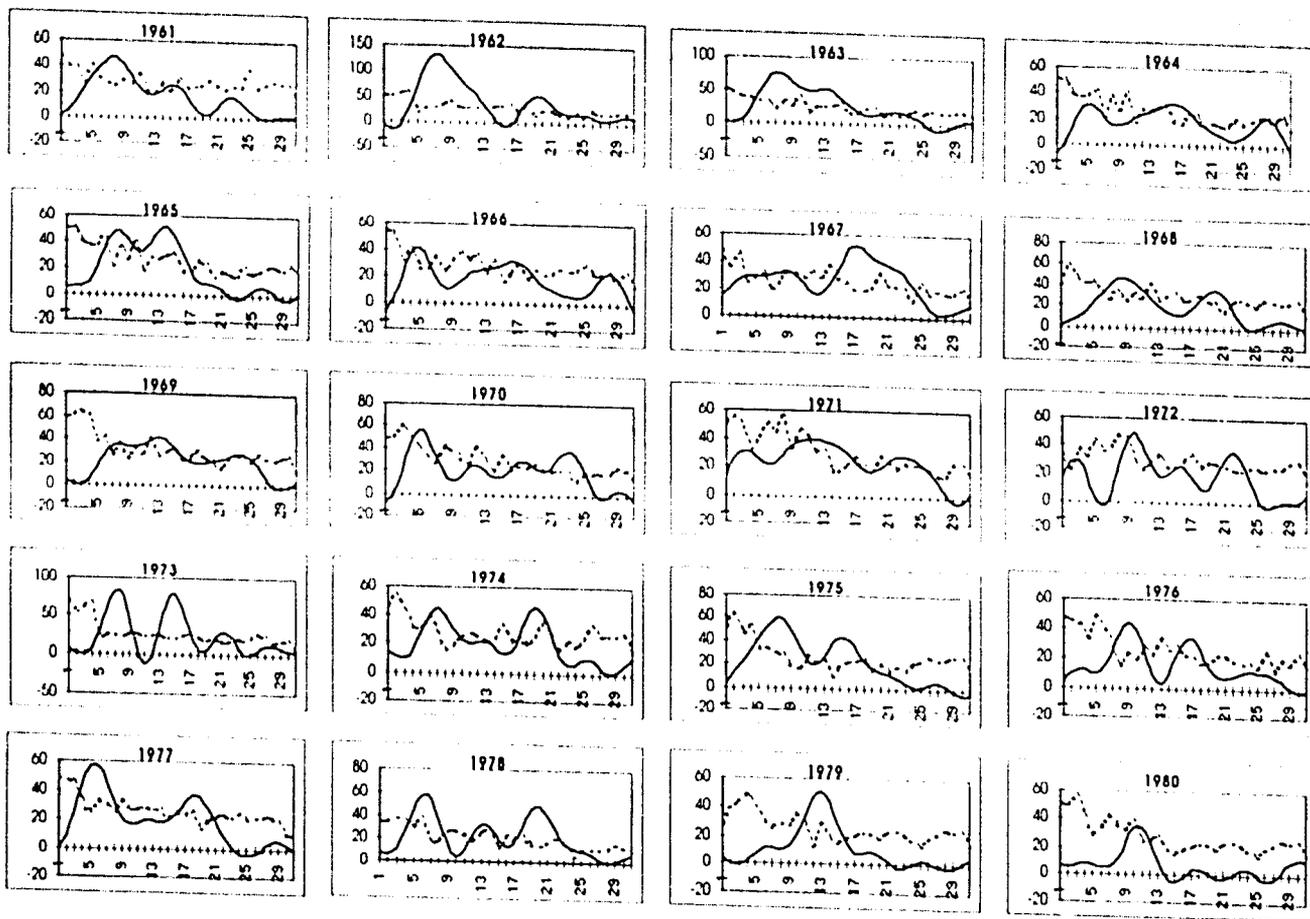


Fig. 13 Variabilidad interanual de la precipitación en escala pentadal con cinco armónicos en El Tecamate de 1961 a 1996, línea continua. Evapotranspiración potencial, línea a guiones.

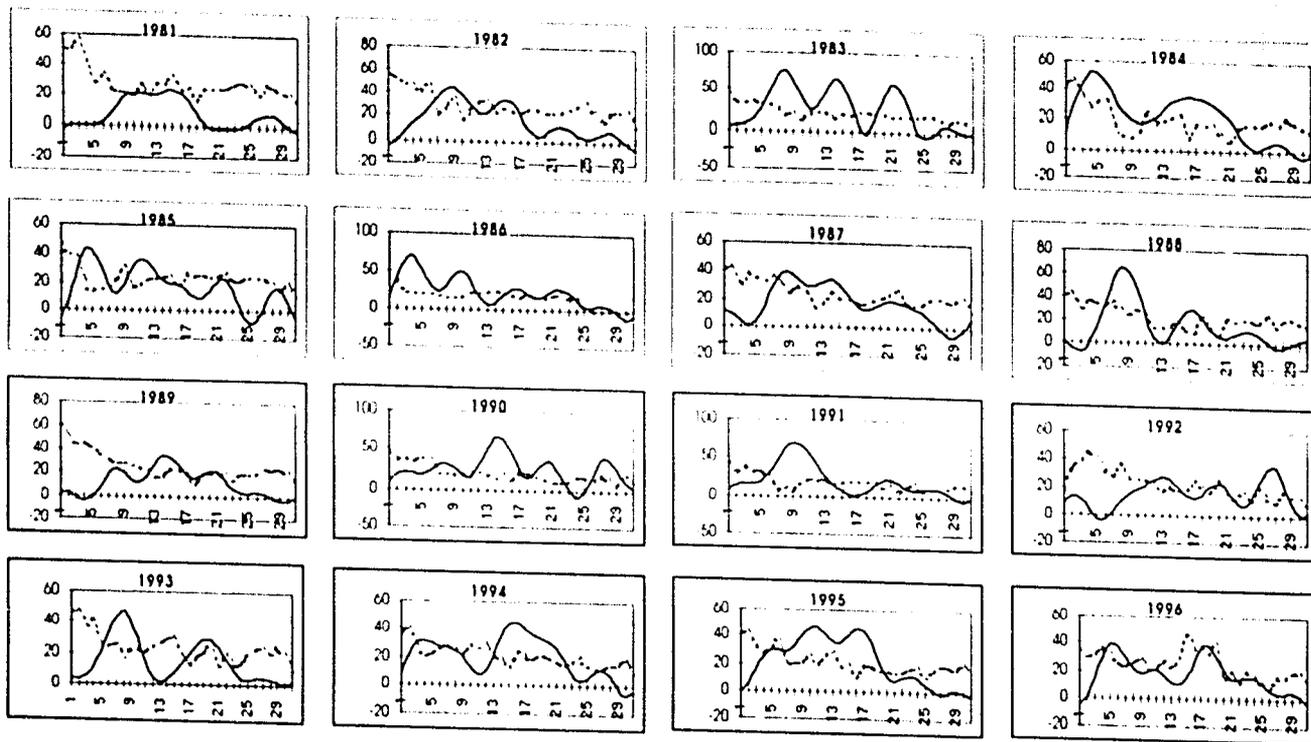


Fig. 13 Variabilidad interanual de la precipitación en escala pentadal con cinco armónicos en El Tecamate de 1961 a 1996, línea continua. Evapotranspiración potencial, línea a guiones.

V.1.3 ESCALA DECENAL

En la Fig. 14, se presenta la serie de tiempo de precipitación de la Estación Climatológica **El Chique**, a escala decenal, la serie observada se representa con línea continua y la serie representada con armónicos, con línea a guiones. Se presentan 6 cuadros puesto que el número de datos es de 15 y la teoría indica que se tendrán $15/2$ número de armónicos.

Como puede observarse, con los cuatro primeros armónicos se tiene una buena simulación de lo observado, siempre y cuando nos interesen los procesos de gran escala y de mayor duración. El mínimo relativo que representa la **canícula** se observa a partir del tercer armónico, sin embargo, es hasta el armónico 6 donde se puede establecer la presencia de la canícula en la decena 6.

La representación de la precipitación para la Estación **El Tecomate** se observa en la figura 15. En este caso no es posible definir con exactitud la presencia de canícula dado que la curva se encuentra muy suavizada, sin embargo, se puede establecer, comparando este resultado con **El Chique**, el carácter **semidesértico** de esta última al observar que en **El Tecomate** el valor de la precipitación diaria a escala decenal es mucho mayor a pesar de la cercanía relativa entre estas dos estaciones.

En la figura 16 aparece la Estación Climatológica de **Excame III** de la cual se observa que tampoco se puede establecer con precisión la aparición de la canícula a diferencia de **La Villita** (Fig.17) en la que se observa el mínimo relativo en la decena 6 al igual que en **El Chique**. A pesar de que **Excame III** y **La Villita** tienen una cercanía relativa, los factores locales como la diferencia de uso de suelo: completamente agrícola o cercano a un bosque; lomeríos a diferencia de un valle; entre otros, influyen en estos resultados.

V.1.4 ESCALA QUINCENAL

La representación de la precipitación por medio de armónicos a escala quincenal para las estaciones **El Chique** y **El Tecomate** se encuentran en las figuras 18 y 19 respectivamente, para el caso de la primera podemos observar, al igual que en las escalas utilizadas anteriormente, la presencia de la canícula, en este caso en la quincena 4, sin embargo, no es posible detectarla en El Tecomate.

Para el caso de las estaciones **Excame III** y **La Villita**, representadas en las figuras 20 y 21 respectivamente, se observa un comportamiento similar a El Tecomate, es decir, no se puede precisar la presencia de la canícula, simplemente se establece un máximo en la quincena 3 y a partir de ésta, una disminución en la precipitación.

En la Tabla 3 se presenta un resumen del número de armónicos que simulan la canícula, para las escalas decenal y pentadal, y el número de decena y pentada, respectivamente, en que se observa el mínimo relativo de la precipitación asociado a la canícula, para las cuatro estaciones estudiadas.

Estación	Armónicos que simulan la canícula para la escala decenal	Armónicos que simulan la canícula para la escala quincenal	Decena en que se presenta el mínimo relativo de la precipitación	Quincena en que se presenta el mínimo relativo de la precipitación
El Chique	6 armónicos	3 armónicos	Decena 6	Quincena 4
El Tecomate	-----	-----	Decena 6	-----
Excame III	-----	-----	-----	-----
La Villita	5 armónicos	-----	Decena 6	-----

Tabla 1 Resumen del número de armónicos, decena y quincena en que se simula la canícula para las Estaciones Climatológicas El Chique, El Tecomate, Excame III y La Villita

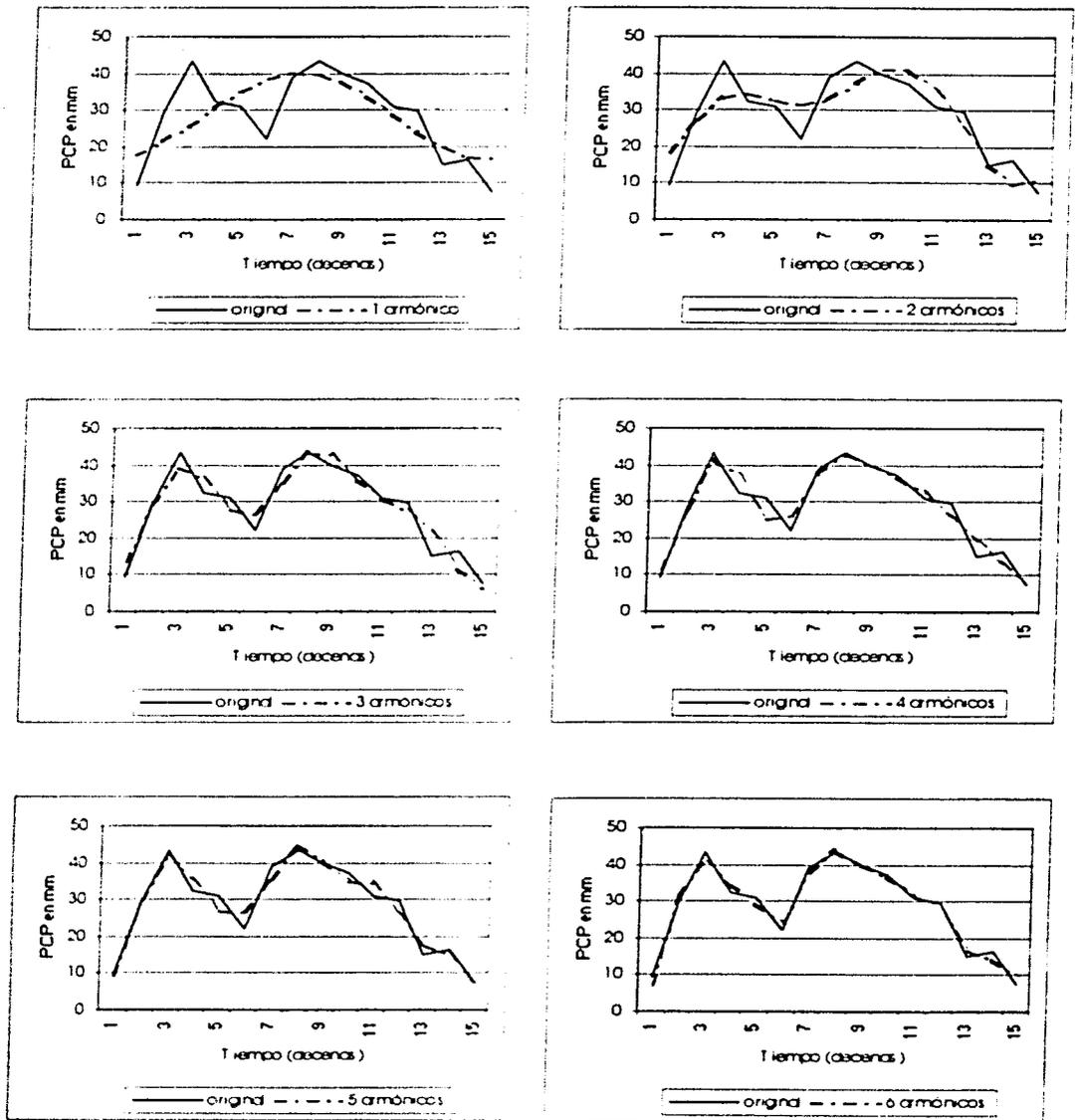


Fig. 14 Representación de la Precipitación Pluvial con Decenas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica El Chique

FALTA DE ORIGEN
TESIS CON

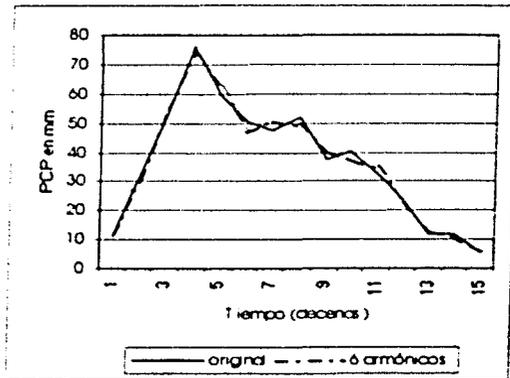
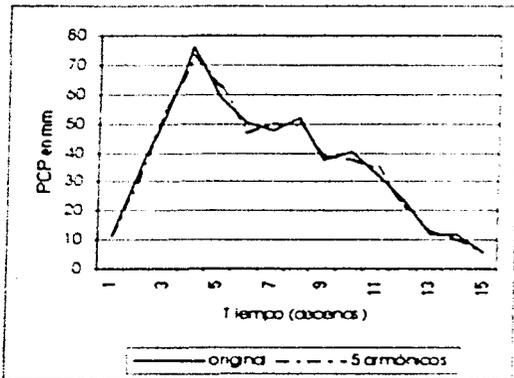
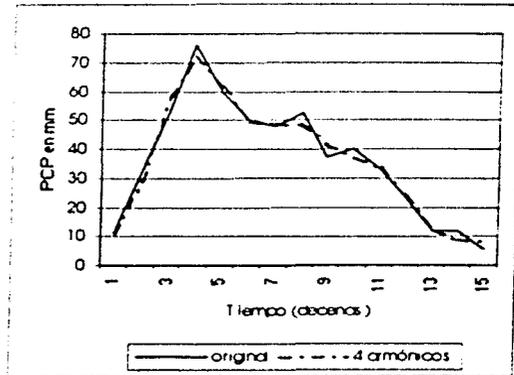
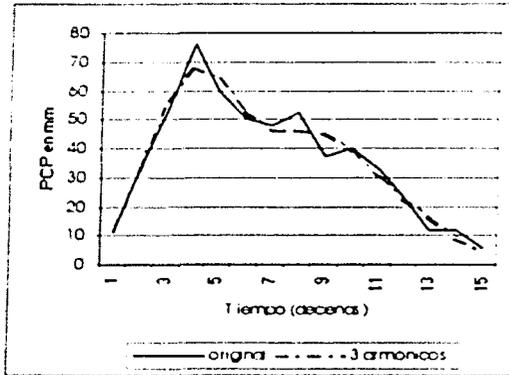
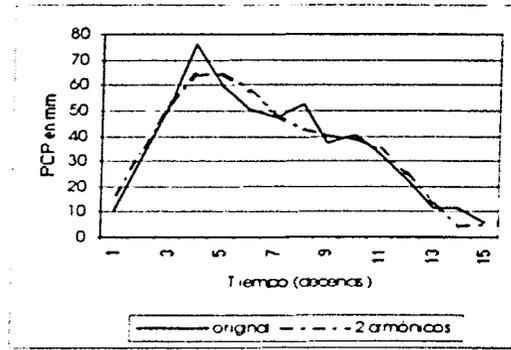
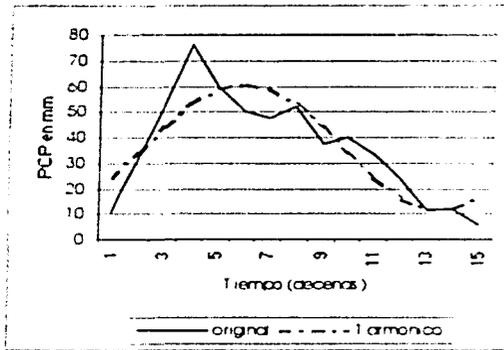


Fig. 15 Representación de la Precipitación Pluvial con Decenas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica El Tecamate

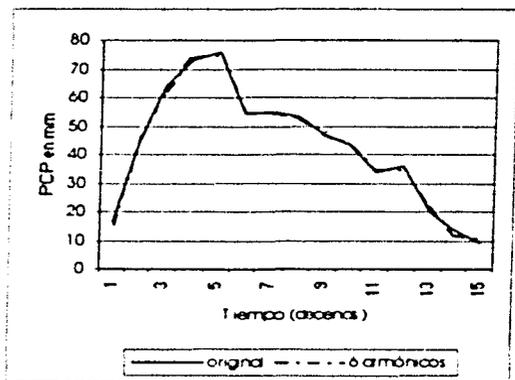
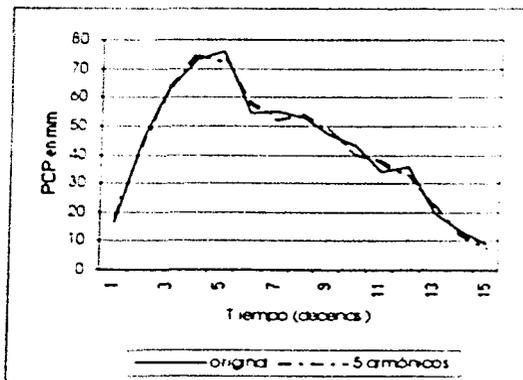
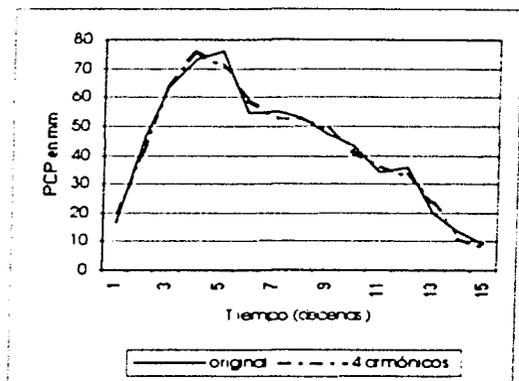
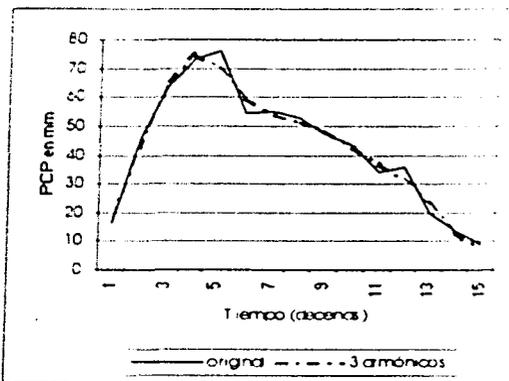
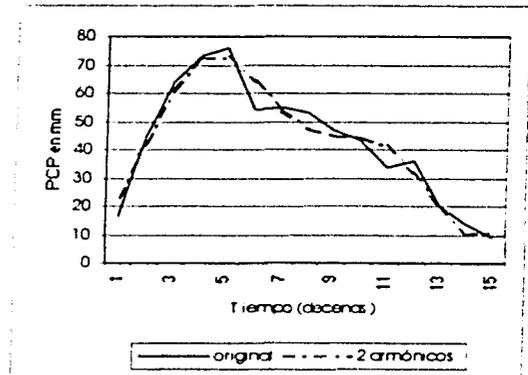
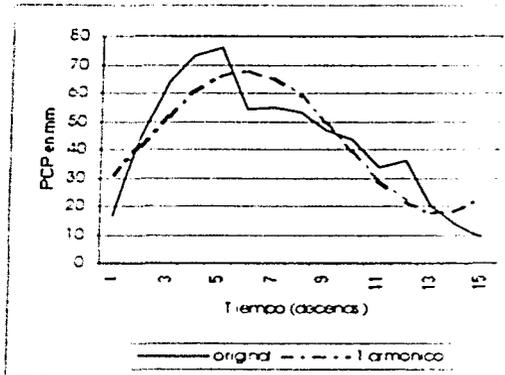


Fig. 16 Representación de la Precipitación Pluvial con Decenas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica Excame III

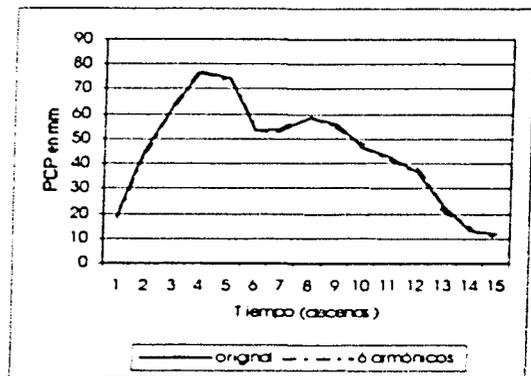
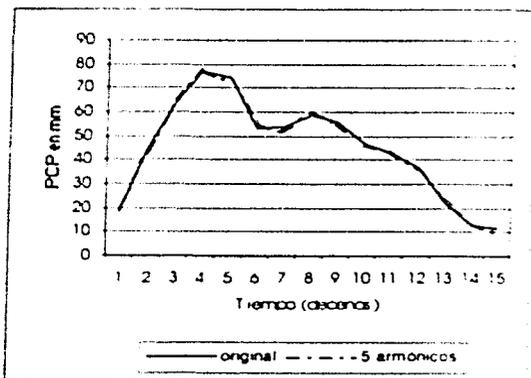
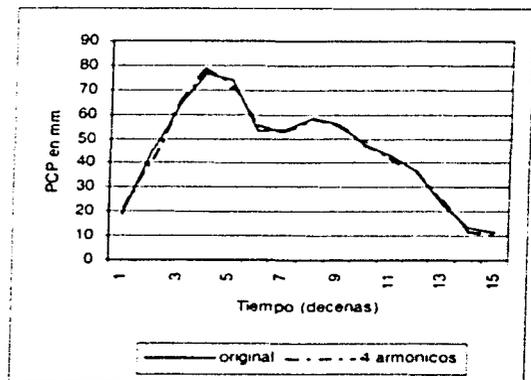
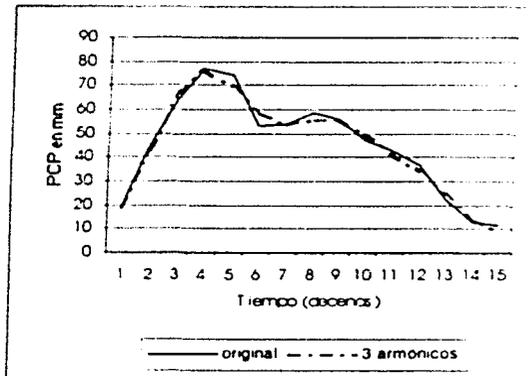
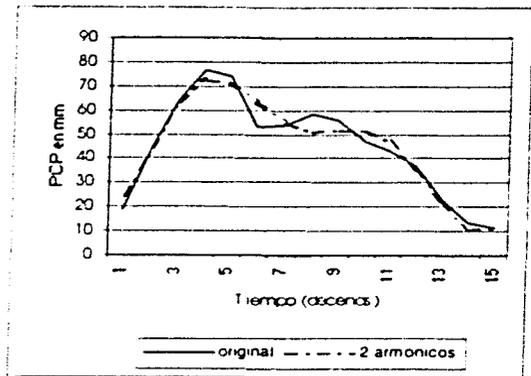
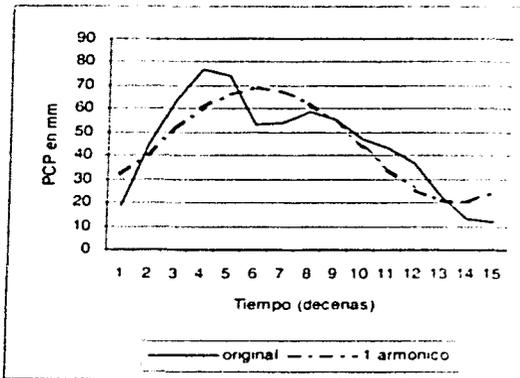


Fig. 17 Representación de la Precipitación Pluvial con Decenas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica La Villita

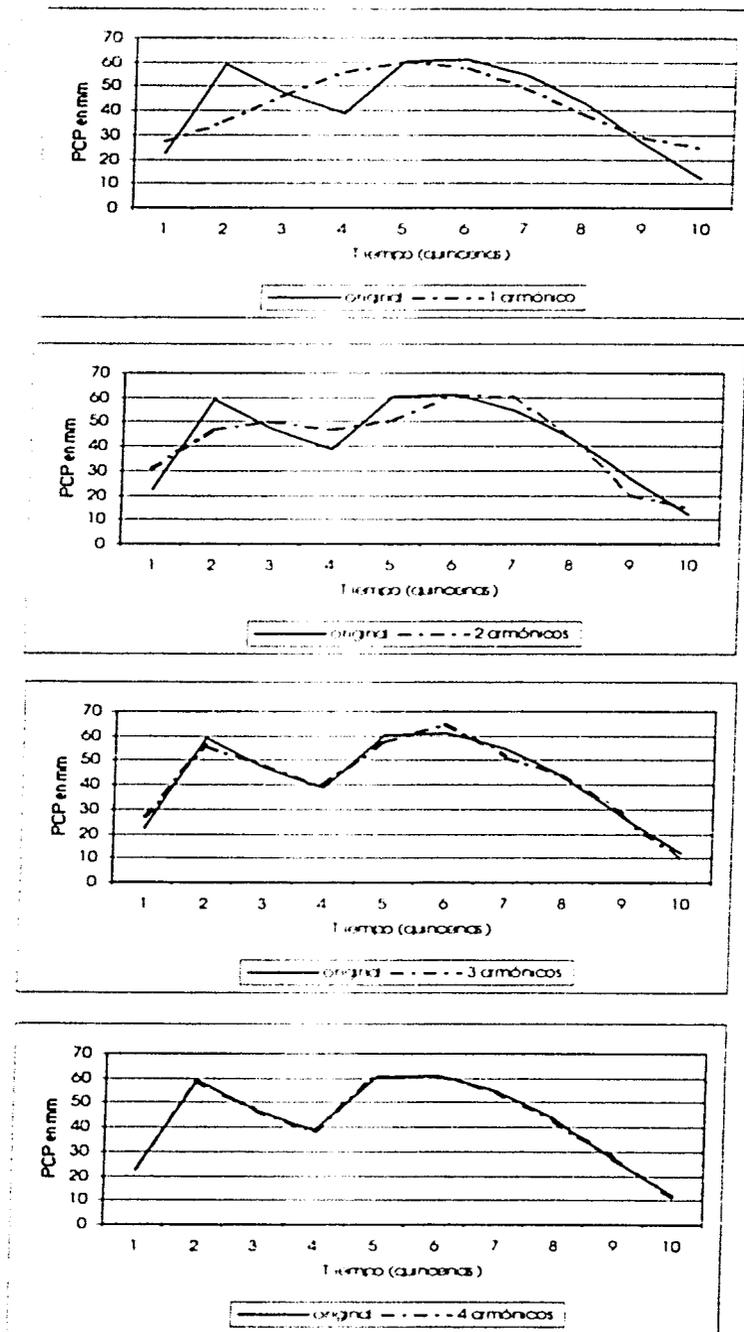


Fig. 18 Representación de la Precipitación Pluvial con Quincenas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica El Chique

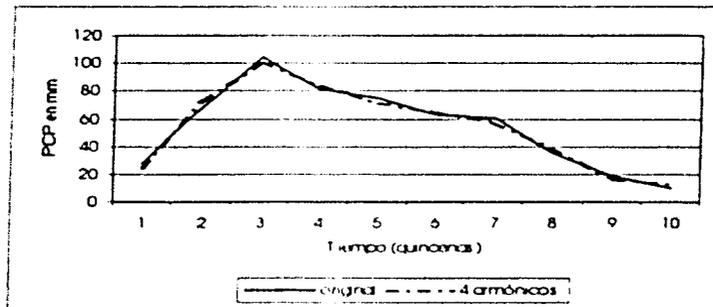
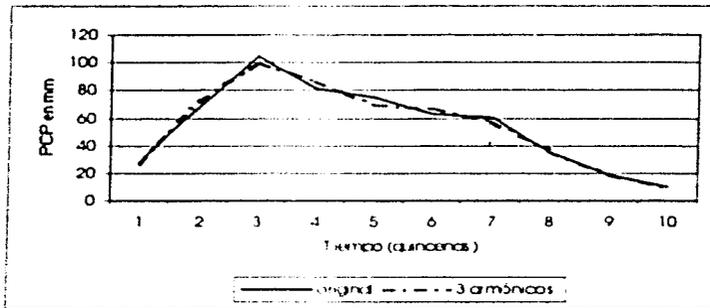
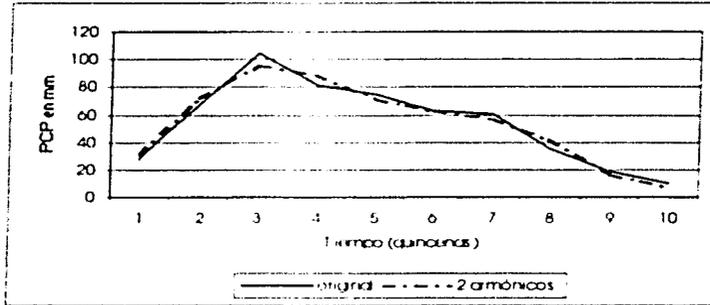
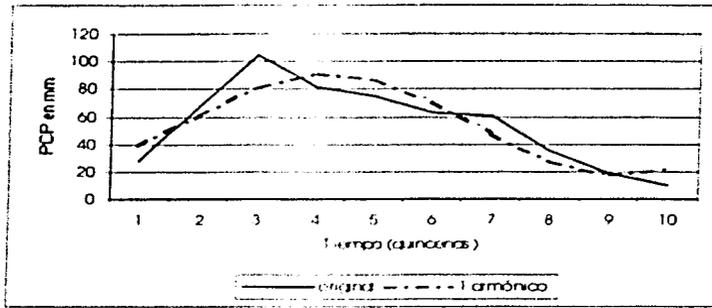


Fig. 19 Representación de la Precipitación Pluvial con Quincenas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica El Tecamate

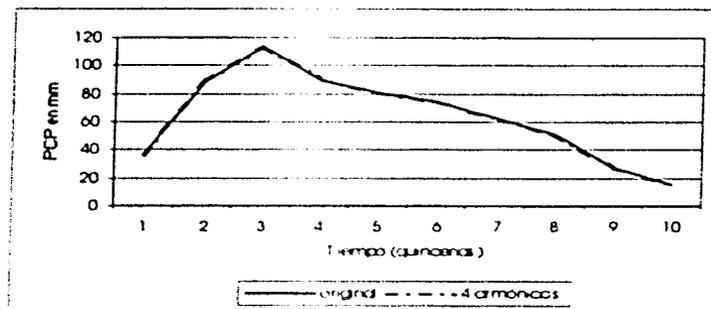
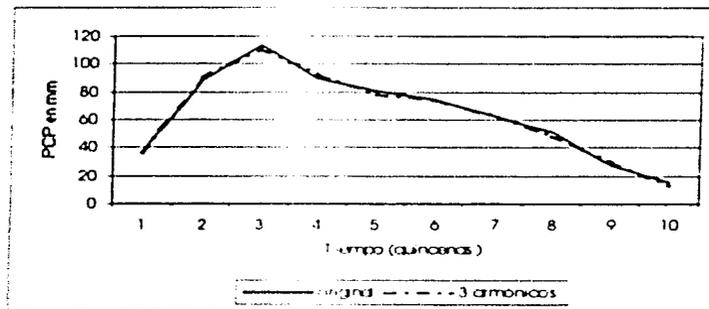
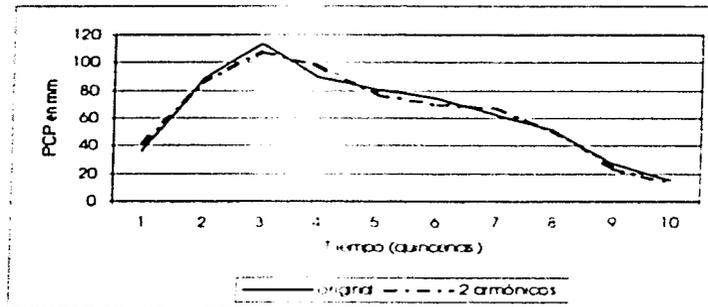
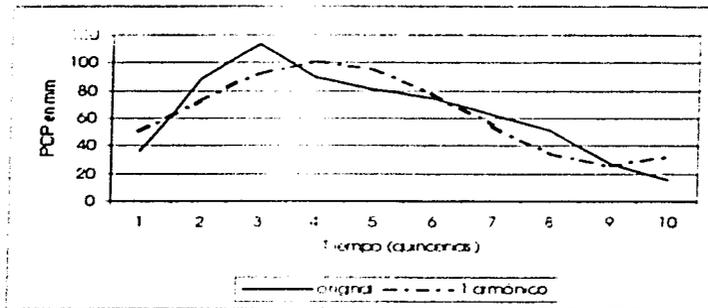


Fig. 20 Representación de la Precipitación Pluvial con Quincenas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica Excame III

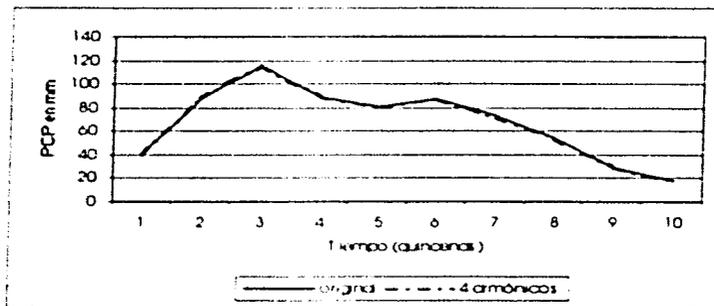
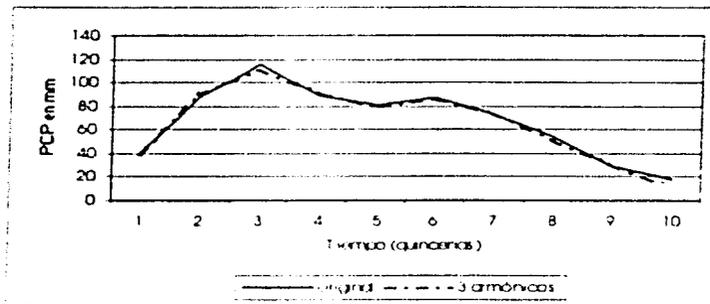
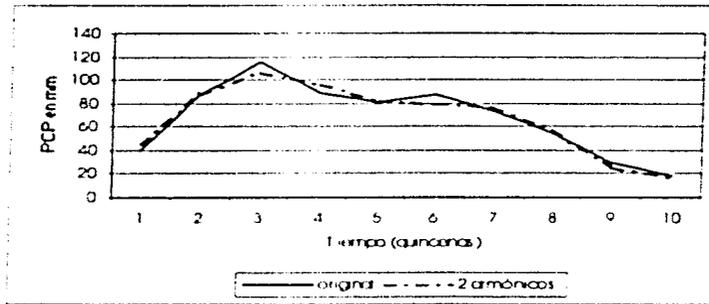
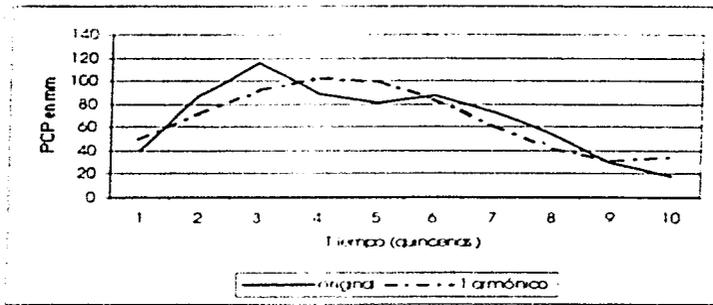


Fig. 21 Representación de la Precipitación Pluvial con Quincenas por medio de Armónicos, línea continua = observada, línea a guiones = teórica, para la Estación Climatológica La Villita

VI.2 ANÁLISIS CON ONDÍCULAS

En las Fig. 22, 23, 24 y 25. se presenta el análisis con ondículas de la serie de tiempo de precipitación para las cuatro estaciones: **El Chique, El Tecomate, La Villita y Excame III** respectivamente. a escala pentadal. Se observa que el período asociado a la alta variabilidad en el rango de 2 a 8 pentadas, se asocia al eje vertical de las figuras 22b, 23b, 24b y 25b, que a su vez nos indica que las series de tiempo de precipitación para las cuatro estaciones escogidas, a escala pentadal son no-estacionarias, es decir, las propiedades estadísticas, varían año con año, es también posible interpretar que la intensidad de la lluvia de verano para la temporada de precipitación es distinta para el mismo período.

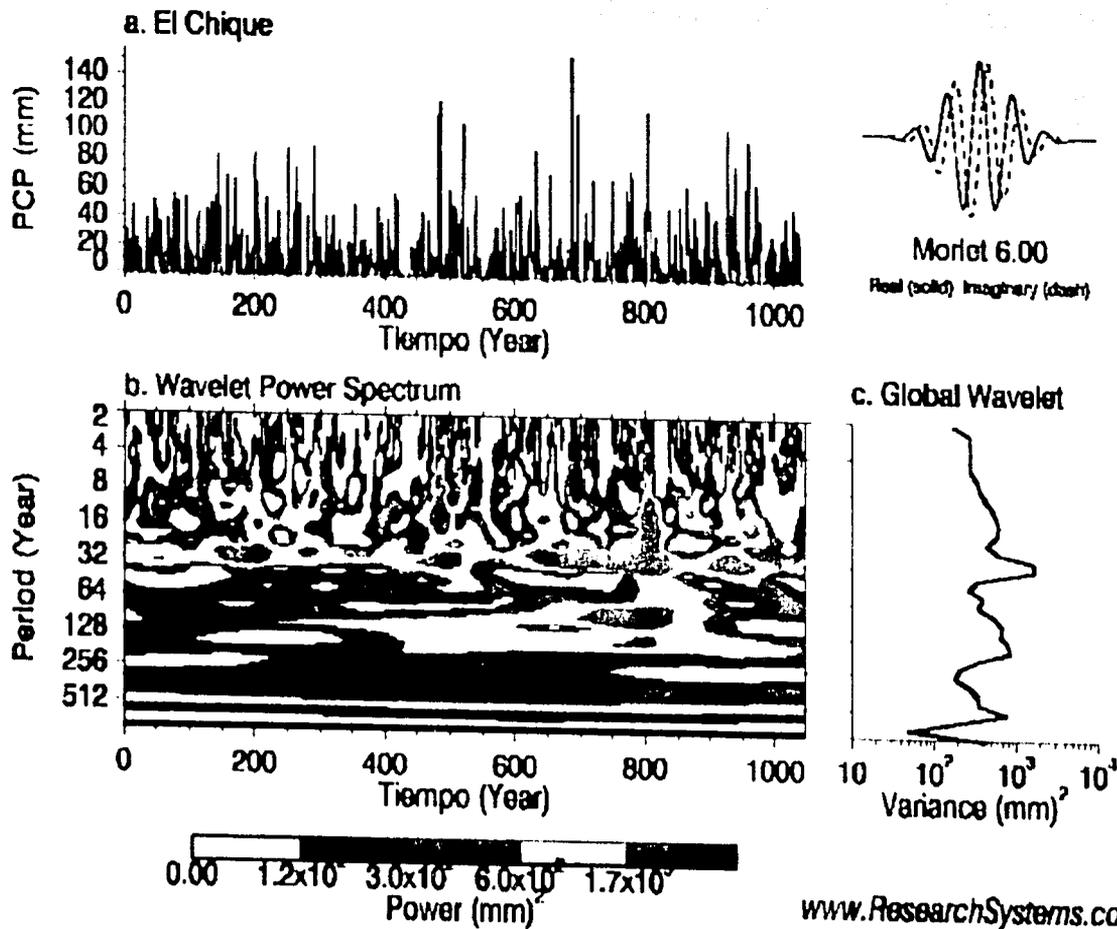


Fig. 22a Serie de tiempo de Precipitación Pluvial en Pentadas del periodo de lluvia. 22b Espectro de Potencia de acuerdo al Método de Wavelets u Ondeletas para la Estación Climatológica El Chique

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

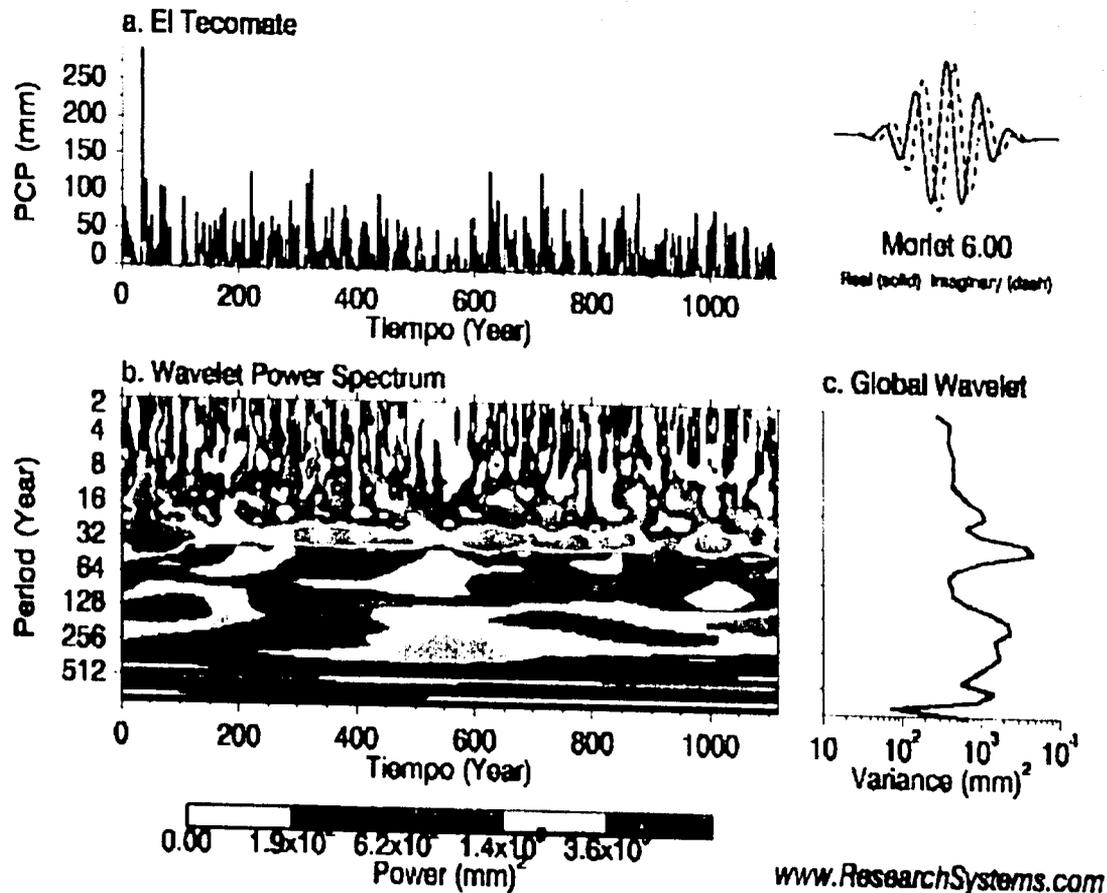


Fig. 23a Serie de tiempo de Precipitación Pluvial en Pentadas del periodo de lluvia, 23b Espectro de Potencia de acuerdo al Método de Wavelets u Ondeletas para la Estación Climatológica El Tecamate

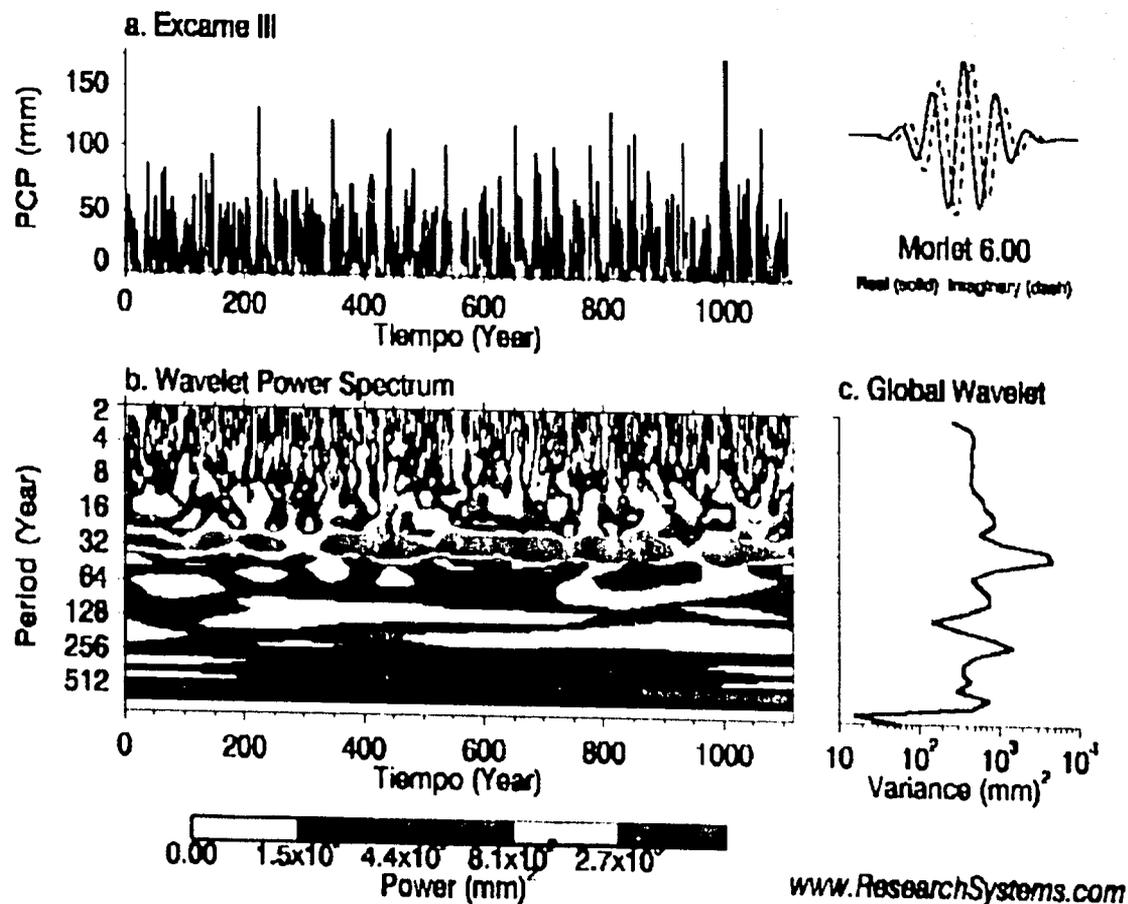


Fig. 24a Serie de tiempo de Precipitación Pluvial en Pentadas del periodo de lluvia, 24b Espectro De Potencia de acuerdo al Método de Wavelets u Ondeletas para la Estación Climatológica Excame III

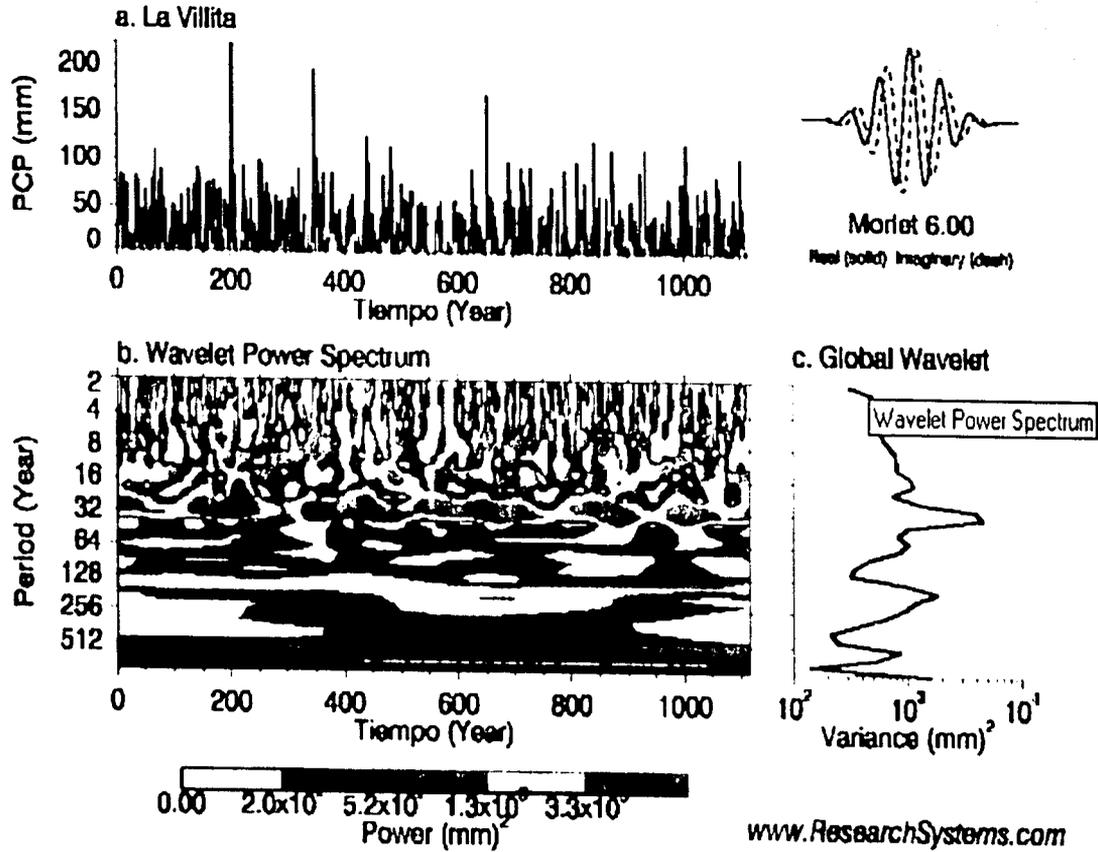


Fig. 25a Serie de tiempo de Precipitación Pluvial en Pentadas del periodo de lluvia, 25b Espectro de Potencia de acuerdo al Método de Wavelets u Ondeletas para la Estación Climatológica La Villita

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.

VI.1 CONCLUSIONES.

Las dos principales contribuciones de este trabajo fueron: por un lado, fue posible caracterizar como no-estacionaria la serie de tiempo de precipitación de las estaciones: **El Chique, El Tecomate, Excame III y La Villita**, de acuerdo a los resultados con la aplicación de ondículas, por otro lado, desde el punto de vista de interpretación dinámica de los armónicos se hace la propuesta de que en algunos años se presentan hasta **dos canículas**, además, se lograron identificar los **forzamientos locales**, tanto a nivel de estación local como a nivel regional.

Las diferentes escalas utilizadas en este estudio: **pentadal, decenal y quincenal** fueron consideradas de acuerdo a la duración de los ciclos vegetativos del maíz.

Fue muy importante aplicar el análisis de **Fourier** a la precipitación pluvial de cada una de las cuatro estaciones, así como de su promedio areal, para dos escalas: pentadal y decenal, pues de esta manera se pudo intercomparar en las dos escalas la presencia de una distribución bimodal, en la serie de tiempo de precipitación y la ubicación de la **canícula**.

Dada la gran necesidad de conocer la **variabilidad interanual** de la precipitación, en dichas estaciones, se analizó el período 1961 a 1998, escala pentadal (Fig. 13), de la precipitación observada, y la evapotranspiración potencial, en relación al ciclo vegetativo del maíz, lo cual permitió ver que en cada año se tiene una distribución diferente, y que en algunos años hay una "**distribución trimodal**", por ejemplo: 1973, 1978 y 1983, entre otras formas de distribución de la precipitación, y años en donde se presenta gran variabilidad en la precipitación como 1970, 1982 y 1992. Lo que sugiere que hay que tomar medidas precautorias también año con año, pues por ejemplo,

para el caso del maíz sería adecuado conocer la distribución de la precipitación a diferentes escalas, con un año de anticipación, de tal forma que se pudieran tomar decisiones con mayor certidumbre sobre la disponibilidad de agua, entre otras propiedades deseables para el cultivo seleccionado.

El análisis con **ondículas** o **ondículas** nos permitió ver la propiedad de **no-estacionaria**, para la serie de tiempo de precipitación, en la escala **pentadal**, de una manera más sencilla que la tradicional pues, anteriormente, era necesario para investigar esta propiedad de una serie de tiempo: se dividía la serie en dos sub-series preferentemente dos mitades de igual número de datos, luego se les calculaban las propiedades estadísticas como: media, moda, varianza, etc., se aplicaba una prueba de igualdad de varianzas, de ser iguales correspondería a una serie de tiempo estacionaria, y viceversa.

Como puede verse, cada año tiene una **diferente distribución** de precipitación pluvial en las 4 estaciones, por lo cual, podemos deducir que, si sembramos siempre la misma variedad de maíz y en la misma fecha, tenemos grandes posibilidades de **pérdidas**. Por lo cual, lo recomendable de acuerdo a este estudio, sería hacer un análisis de las condiciones ambientales que prevalecerán durante el año siguiente -indicándonos que es necesario un pronóstico de la precipitación a escala anual- y sembrar la variedad adecuada en la fecha pertinente, de acuerdo a la ocurrencia y ubicación de la canícula.

Los dos métodos de análisis aplicados aquí, son solamente un primer paso hacia el análisis de la variabilidad de series de tiempo **no-lineales**.

Se inició una etapa de explicación, desde un punto de vista dinámico, de la distribución de valores extremos de la precipitación, donde el valor mínimo corresponde a la **Canícula** o **sequía intraestival**.

Para recomendar un cajón con agua disponible y condiciones de temperatura apropiada para el cultivo del maíz, que sea realmente indicativo

de condiciones favorables, debe analizarse en forma integral: **período libre de heladas**, período de crecimiento, período húmedo y de temperatura adecuada al cultivo, sin embargo, queda demostrado que el análisis de la precipitación a diferentes escalas de tiempo proporciona bastante información complementaria acerca de la variabilidad de la precipitación, asociada al amplio rango de escalas interactuantes.

Cabe destacar, que como todo el análisis anterior está en función sólo de la relación **precipitación-maíz**, es necesario tener presente que se trata de una serie de tiempo con mucha variabilidad.

Con el análisis realizado en esta investigación, se ha logrado caracterizar a la serie de tiempo de precipitación pluvial de las cuatro estaciones **El Chique, El Tecomate, Excame III y La Villita**, destacando el haber determinado que las series de tiempo son no-estacionarias.

VI.2. SUGERENCIAS.

En el caso de resultar **no-estacionaria** una serie de tiempo, como fue el caso de las cuatro estaciones estudiadas, entonces esto nos permite considerar a dicha serie de tiempo como candidata a ser analizada por métodos no-lineales, es decir, para trabajos futuros se debe abordar el **enfoque no-lineal** para el análisis de la precipitación pluvial.

Es muy importante seguir investigando sobre el número adecuado de **armónicos** a incluir en un desarrollo de Fourier, considerando simultáneamente los pesos asociados a los coeficientes en el desarrollo de Fourier.

Otro aspecto importante, que debe considerarse durante la investigación de la "**canícula**", es el de "**calibrar**" la frecuencia en que ésta se presenta en cada una de las estaciones del Estado de Zacatecas.

Como el análisis realizado en esta tesis, nos indica que las 4 estaciones, tienen una serie de tiempo de precipitación no estacionaria, y, por lo tanto, tienen un alto grado de complejidad en la distribución de la precipitación, corroborando que los sistemas naturales (Miramontes P. 1996) son no-lineales y complejos por naturaleza (González H. y Arce H., 1996). Por lo tanto, la propuesta es aplicar análisis de fractales combinado con el concepto de eventos puntuales (Lin et al. 1999), para extraer algo del contenido del conocimiento oculto de la serie de tiempo de precipitación (Kumar and Foufola-Georgiou. 1993; Fraedrich K. and Larnder 2000).

Realizar el mismo análisis, incluyendo todas las estaciones del Estado de Zacatecas, cuyo período, permita investigar el grado de coherencia espacial en los resultados obtenidos en esta investigación, para esto es necesario actualizar los datos de precipitación diaria de todas las estaciones climatológicas del Estado y crear nuevas. También se deben considerar conceptos de cambio climático regional, para iniciar el proceso de generar posibles escenarios y estudiar la posible vulnerabilidad del Estado de Zacatecas, al cambio climático, en particular, lo referente al binomio clima-agricultura (WMO, 1999).

En relación a los valores extremos en la temperatura de la superficie del mar, EL NIÑO-LA NIÑA, se deben realizar estudios más detallados, por ejemplo, considerar fases de entrada o establecimiento del calentamiento o enfriamiento, pues corresponden a diferentes procesos físicos generando diferente distribución de la precipitación.

BIBLIOGRAFIA

- Amador, J. A. y Berta A. Olmedo 1998a **TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y CAUDAL EN PANAMÁ Parte I: CARACTERÍSTICAS GENERALES Y DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL**. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. Vol. 5. Núm.2. 120-135.
- Amador, J. A. y Berta A. Olmedo 1998b **TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y CAUDAL EN PANAMÁ Parte II: ENOS Y CAMBIO CLIMÁTICO**, Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. Vol. 5. Núm.2. 136-148.
- Arneodo A. and Grasseau G. Holschneider M. 1998. **WAVELET TRANSFORM OF MULTIFRACTALS**. Physical Review Letters, num.20, vol. 61, 14 November 1998 . 2281-2284
- Belay B. D. and O'C. S. D. 1998. **WAVELET ANALYSIS OF DYNAMICAL PROCESSES IN CIRRUS**. Geophysical Research Letters, vol. 25 , num. 9, may 1, 1347-1350
- Brunet Y. and Collineau S. 1994. **WAVELET ANALYSIS OF DIURNAL AND NOCTURNAL TURBULENCE ABOVE A MAIZE CROP**. En Foufoula-Georgio and Praveen kumar eds. 129-150
- Cannas B. And S. Cincotti 2002 **NEURAL RECONSTRUCTION OF LORENA ATTRACTORS BY AN OBSERVABLE, CHAOS, SOLITONS AND FRACTALS**. Vol. 14. No'1, 81-86
- Fraedrich K. and Larnder C. 2000 **SCALING REGIMES OF COMPOSITE RAINFALL TIME SERIES**. Tellus. 45A. 4. 289-298
- Fournier A. 2000. **INTRODUCCION TO ORTHONORMAL WAVELET ANALYSIS WITH SHIFT INVARIANCE : APLICACION TO OBSERVED ATMOSPHERIC BLOCKING SPATIAL STRUCTURE** . Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 57 march 29, 3856-3880

- Ghil M. and Yiou P. 1996. **SPECTRAL METHODS: WHAT THEY CAN AND CANNOT DO FOR CLIMATIC TIME SERIES.** In D. Anderson and J. Willebrand eds. Decadal Climate Variability: Dynamics and Predictability, 1-31
- Gill A. 1980. **SOME SIMPLE SOLUTIONS FOR HEAT-INDUCED TROPICAL CIRCULATIONS.** Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 106, 447-462
- González H. y Arce H. 1996. **EL CAOS, UN INTENTO POR DAR SENTIDO A LA REALIDAD.** Ciencias, num. 43, julio-septiembre, 4-11
- Griffiths J. F. 1986. **APPLIED CLIMATOLOGY, AN INTRODUCTION.** Oxford University Press.
- Kulkarni J.R. 2000. **WAVELET ANALYSIS OF THE ASSOCIATION BETWEEN THE SOUTHERN OSCILLATION AND THE INDIAN SUMMER MONSOON.** International Journal of Climatology, num 20, marzo-mayo-agosto, 89-104
- Kumar P. and E. Foufola-Georgiou 1993. **A NEW LOOK AT RAINFALL FLUCTUATIONS AND SCALING PROPERTIES OF SPATIAL RAINFALL USING ORTHOGONAL ONDÍCULAS.** JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY, VOLUME 32, 209-222
- Latif M. and Grotzner A. 2000. **THE EQUATORIAL ATLANTIC OSCILLATION AND ITS RESPONSE TO ENSO.** Climate Dynamics, num.16, august 1999, 213-218
- Lawrence K. J. 1998. **TRANSIENT SOLAR INFLUENCE ON TERRESTRIAL TEMPERATURE FLUCTUATIONS.** Geophysical Research letters, vol. 25, num. 2. January 15, 159-162
- Lin, S. C., Liu, C. L. and Lee, T. Y. 1999. **FRACTALITY OF RAINFALL: IDENTIFICATION OF TEMPORAL SCALING LAW.** Fractals. Vol. 7, 2. 123-131 pp. World Scientific Publishing Company

Magaña V. O. R. y Morales-Acoltzi T. 1998. **VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y AGRICULTURA EN MÉXICO.** Claridades Agropecuarias. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA). N° 57. 32-39

Magaña V. O. R., J. A. Amador and S. Medina 1999. **THE MIDSUMMER DROUGHT OVER MEXICO AND CENTRAL AMERICA.** J. of Climate, vol. 12. 1577-1588

Matsuoka T. Ueno T. Adachi T. and O. Kada M. 2000. **POWER LAWS, WEAK ESTIMATE AND WAVELET DE-NOISING.** Fractales, vol. 8 num. 1 , 73-83

Miramontes P. 1996 **LA GEOMETRIA DE LAS FORMAS VIVAS .** Ciencias, num. 42, abril-junio, 12-19

Mosiño, A. P. y E. García 1966. **EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA INTRAESTIVAL EN LA REPÚBLICA MEXICANA.** En Conferencia Regional Latinoamericana de la Unión Geográfica Internacional. Tomo III, 500-541

Mosiño, A. P. y T. Reyna T. 1988. **LA INTERRUPCIÓN DEL ALISIO, POR RECURVA DE LOS CICLONES TROPICALES EN EL GOLFO DE MÉXICO, CAUSA PARCIAL DE LA SEQUÍA INTRAESTIVAL.** En Conferencia Regional Latinoamericana de la Unión Geográfica Internacional. Tomo XV, 316-322

Muzy F. J., Baery E. and Arneodo A. 1994. **THE MULTIFRACTAL FORMALISM REVISITED WITH ONDÍCULAS.** International Journal of Bifurcation and Chaos, Agosto 8, vol. 4, num. 2 , 245-30

Povinelli J. R. and Feng Xin. 1996. **TEMPORAL PATTERN IDENTIFICATION OF TIME SERIES DATA USING PATTERN ONDÍCULAS AND GENETIC ALGORITHMS.**

Schmitz T. J. and Mullen L. S. 1996. **WATER VAPOR TRANSPORT ASSOCIATED WITH THE SUMMERTIME NORTH AMERICAN MONSOON AS DEPICTED BY ECMWF ANALYSES.** American Meteorological Society, vol. 9 , 1621-1634

Torrence C. and Compo P. G. 1998. **A PRACTICAL GUIDE TO WAVELET ANALYSIS**. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 79, num.1 January, 61-81

Wang Ch. and D. B. Enfield. 2001. **THE TROPICAL WESTERN HEMISPHERE WARM POOL**. Geophysical Research Letters, Volume 28, Number 8, April 15, 1635-1638

Webster P. J. 1994. **THE ROLE OF HYDROLOGICAL PROCESSES IN OCEAN ATMOSPHERE INTERACTIONS**. Rev. Geophys. 32, 427-475

WMO CLIMATE PREDICTION AND AGRICULTURE (CLIMAG)
Workshop, Geneva, Switzerland. September 1999

APÉNDICE I

EL MAÍZ.

Los hay de diversos colores, blanco, amarillo, rojo, azul morado, púrpura, negro y pinto, su domesticación influyó de manera determinante en el desarrollo de las culturas, la conquista y colonización americana, por su gran diversa variedad y uso, la planta, grano o cultivo ha sido denominado con diversos nombres.

Los botánicos la llaman gramínea o cereal, en Nahúatl se conocía como Tlayollt, Cetlio, Cinte o Cintle, en Maya Ixi, en Huasteco Tziz, los españoles, al principio de la conquista, lo llamaron Panizo hasta mediados de 1700, en Europa se le dieron muchas denominaciones *Panicum frementum*, *Milium*, *Fruentum asiaticum* y *Triticum indicum*, Carlos Linneo lo describió y clasificó como el Género *Zea* y de la Especie *mays*, los científicos en el mundo lo conocen actualmente como *Zea mays* L.

El maíz es la planta doméstica del género *Zea*, pertenece a la familia de las gramíneas, subfamilia *Andropogonacea*, tribu *maidea*, identificada específicamente como *Zea mays* L.

Como toda la planta cultivada presenta una amplia variabilidad fenotípica, en general, responde a la siguiente descripción: Planta anual, alta, robusta y monoíca, con vaina sobrepuesta y limbos anchos conspicuamente dísticos, espigas estaminadas con racimos largos que se parecen a espiguidillas, los racimos numerosos, formando panículas largas y esparcidas, inflorescencias femeninas, en las axilas de la hoja, las espiguillas en 8 a 16 ó hasta 30 hileras, en raquiz engrosado y casi leñoso (olote), todo esto encerrado en numerosas brácteas o espadas faláceas (totomoxtle o holoche), los estilos largos saliéndose de la punta, como una masa de hilo sedoso (jilote), los granos en la madurez mucho más largos que las glumas.

Hay una gran variación en cuanto a la presencia de los caracteres vegetativos de la planta, en algunos casos debido a mensajes genéticos y, en otros, a la respuesta ambiental, es así como en México se puede observar plantas adultas de maíz con altura inferior a 1 m o mayores de 4 m, cambia también drásticamente el tamaño y número de las hojas, la forma y tamaño de las espigas y de las mazorcas, así como de las raíces y los entrenudos.

Se consideran, a estos, los factores principales que han incidido en la evolución del maíz: las cruces interraciales, interespecíficas e intergenéticas, las mutaciones, el impulso genético y la selección natural y artificial.

La acción de estos factores en casi 10000 años de que se tiene noticia de la planta silvestre y en más de 5000 años de existir como planta cultivada, han llevado al nacimiento de las variedades que actualmente conocemos.

En México, el primer intento serio y sistemático de coleccionar e identificar a las razas de maíz que existen en el país, se debe a Wellhausen, Roberts y Hernández Xolocotzi. Estos investigadores identificaron 32 razas, de cada una de las cuales señalan sus principales características, su posible genealogía, su comparación con ancestros razas más cercanas, y su distribución geográfica.

Dentro de estas razas existen diferentes variedades y clases de maíz, las principales en nuestro país son:

Maíz pepitilla: de color blanco uniforme, textura córnea en las partes laterales y opaco en la base y parte central. Su producción se ubica en los estados de Morelos, Guerrero y Oaxaca.

Maíz blanco tierra fría: de color blanco con ligero matiz amarillento, también se presenta variedad en color amarillo, colorado, azul. Se produce en el Estado de México, y los estados de Tlaxcala, Puebla, Querétaro, Hidalgo, Chihuahua y Durango.

Maíz ancho blanco: dentro de esta variedad tenemos el maíz ancho amarillo y el maíz ancho mezclado. Se cosecha en los estados de Coahuila, Chihuahua, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas, **Zacatecas**, Campeche, Veracruz, Quintana Roo, Yucatán, Tabasco, Baja California Norte, Sonora, Colima, Jalisco, Chiapas, Aguascalientes, Guanajuato y Michoacán.

Maíz chato blanco: tiene como subclase el maíz chato amarillo, se produce en escala reducida en Nayarit y Chihuahua.

Maíz blanco adolado: como subclase se registra el maíz adolado amarillo y se cosecha solamente en Chihuahua.

Maíz cacahuazintle: se utiliza en la elaboración de determinados alimentos tradicionales y en la industria de la transformación, los estados productores principales son Guerrero y Oaxaca.

Maíz palomero: se usa únicamente en la industria de la transformación y se produce en los estados de México, Puebla y Tlaxcala.

A demás, de acuerdo a la forma de la mazorca se puede detectar la región de donde proceden así, por ejemplo, las formas cilíndricas son originadas de lugares cálidos, como son las regiones ubicadas de 0 a 1000 msnm, las semicilíndricas, son producidas en zonas situadas entre 1000 a 1900 msnm, las formas cónicas proceden de los valles altos localizados entre los 1900 y 2700 msnm, como el Valle de México y regiones de Puebla, Tlaxcala y Pachuca.

La gran diversidad en tipos de razas y nuevas variedades de maíz que actualmente existen en México, permiten que haya maíces adaptados a prácticamente todas las condiciones que se puedan presentar en el país, y en particular en **Zacatecas**.

Debido a esto podemos encontrar maíz cultivado desde las costas de ambos océanos hasta más de 3000 msnm, con temperaturas medias mensuales

durante su ciclo vegetativo de 28° C en las zonas más cálidas, hasta 12° C o menos, de promedio mensual en las más frías.

Requerimientos térmicos e hídricos del maíz.

TEMPERATURA		PERÍODO DE CRECIMIENTO	
Óptima	20 a 30 °C (FAO)	110 a 130 días	(Cultivo precoz) (FAO)
Mínima	10° C (FAO, DGASI)	140 a 160 días	(Cultivo Medio) (FAO)
Máxima	35° C (FAO)	170 a 180 días	(Cultivo tardío) (FAO)

La precipitación anual de 400 a 800 mm bien distribuidos durante el ciclo vegetativo. Altura en metros sobre el nivel del mar 0 a 3600 m.

Los datos de esta tabla deben tomarse con reserva, pues considera valores medios. además, por ejemplo en el Estado de Zacatecas, cada región tiene su propio balance de energía asociado a, por ejemplo, la gran variabilidad de su superficie -valles, lomeríos, montañosa, ...-, lo que da lugar a microclimas muy variados. (WMO 1999)

APÉNDICE II

SERIES DE FOURIER.

La base de las Series de Fourier, es la de representar funciones periódicas -continuas o discretas- por medio de funciones particulares. como son las trigonométricas.

El estudio de sistemas periódicos o cíclicos ha encontrado en las Series de Fourier una herramienta de gran importancia, principalmente en áreas como la climatología, hidrología, termodinámica, etc. En general, las Series de Fourier representan una forma conveniente de estudiar sistemas cíclicos, como es el caso de la precipitación, temperatura, etc.

CONCEPTOS DE SERIES DE FOURIER.

Una función $f(x)$ se dice que es periódica, si está definida para toda x real, y si existe un número positivo, T , tal que:

$$f(x + T) = f(x) \quad (1)$$

Al valor T se le llama el período de $f(x)$. De la misma forma, generalizando, se entiende que si n es un entero cualquiera

$$f(x + nT) = f(x) \quad (2)$$

Las funciones periódicas más conocidas son las funciones trigonométricas, ya que satisfacen completamente la condición de periodicidad en (2).

Frecuentemente, en algunos problemas prácticos se presentan sistemas periódicos (o que se les puede considerar como tales = hipótesis) y, que es por lo tanto, necesario tratar de representarlos por medio de alguna función periódica más sencilla. Esto puede realizarse por una serie trigonométrica de la forma.

$$f(x) = a_0 + \sum (a_n \cos_n x + b_n \sen_n x) \quad (3)$$

donde:

a_0 , a_n y b_n son los coeficientes de la serie.

SERIES DE FOURIER CON PERÍODO GENERAL.

Lo expuesto anteriormente sobre las Series de Fourier, de una función $f(x)$ con período de 2π , se debe realizar el siguiente cambio de variable

$$x = \frac{2pt}{T} \quad (4)$$

donde p y t representan un múltiplo del período general de una variable independiente.

Así, la serie (4) para la función $f(x)$ se transforma en la Serie de Fourier siguiente

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2pt}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2pt}{T}\right) \right) \quad (5)$$

donde:

T es un período cualquiera, y no se conocen los coeficientes: $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$.

La expresión (5), es la ecuación general de una Serie de Fourier. De aquí, puede ser observado que si $T = 2p$, se tiene nuevamente la forma dada en (4), como era de esperarse. Las fórmulas correspondientes para el cálculo de los coeficientes de la serie son:

$$a_0 = \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T f(t) dt \quad (6)$$

$$a_n = \left(\frac{2}{T}\right) \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2_n \pi t}{T}\right) dt$$

$$b_n = \left(\frac{2}{T}\right) \int_0^T f(t) \operatorname{sen}\left(\frac{2_n \pi t}{T}\right) dt$$

ANÁLISIS CON ARMÓNICOS

Las integrales de las fórmulas de Euler-Fourier se calculan aproximadamente al sustituirlas por sumatorias. Las fórmulas para el cálculo de los coeficientes se transforman en:

$$a_0 = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N f(i)$$

$$b_0 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{N}\right) f(i) \cos\left(\frac{2_n \pi t(i)}{T}\right) \quad (7)$$

$$b_0 = \left(\frac{2}{N}\right) \sum_{i=1}^N f(i) \operatorname{sen}\left(\frac{2_n \pi t(i)}{T}\right)$$

donde:

N es el número de datos o longitud del período fundamental

$f(i)$ es el valor de la i -ésima observación

n es el número de armónicos

$t(i)$ es el tiempo

T es el período

A la onda formada por los primeros dos términos de la serie de Fourier, se le conoce como primera armónica o como la oscilación u onda

fundamental. Sí el comportamiento de un sistema, no es explicado satisfactoriamente con la serie de Fourier formada por a_0 y la primera armónica $\left\{ \left(a_1 \cos\left(2\pi \frac{pt(i)}{T} \right) + b_1 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t(1)}{T} \right) \right) \right\}$ es necesario calcular las siguientes. La **segunda** armónica tiene un **período** igual a la **mitad** del **período fundamental**, es decir, varía dos veces más rápidamente, la **tercera**, un **tercio** del período fundamental y, así sucesivamente, hasta la armónica número $\frac{N}{2}$, que es la última que se puede calcular, y que tiene un período, $\frac{1}{N}$, del período fundamental (Fig. 2).

Por otra parte, sí de antemano se sabe que el sistema, que se pretende analizar con Series de Fourier presenta variaciones cíclicas o periódicas, es posible, sí se conoce aproximadamente el período de estas variaciones, calcular independientemente las armónicas que representen estos cambios. En caso contrario -que es lo más común- es necesario calcular la serie con el mayor número de armónicas o en todo caso la serie completa con $\frac{N}{2}$ armónicas. De esta manera, se puede extraer las componentes periódicas mas importantes, que se generan en los datos del sistema que es analizado.

Un problema con el que nos encontramos, en un análisis como éste, es el conocimiento del **período fundamental** T , por lo general este valor es desconocido y se le debe asignar un valor arbitrario. El valor que se asigna, comúnmente es **igual** o **mayor al número de datos utilizados** -pues cuando tomamos datos o muestreamos, lo hacemos durante el tiempo que tarda el sistema- si bien, la elección de este valor pudiera parecer incorrecta, esto es compensado con el cálculo de un número suficiente de armónicas, de modo que cualquier periodicidad importante que exista en el sistema, se haga

presente en la serie de Fourier calculada finalmente. Así, es probable, que algunas armónicas tomen un valor cercano a cero y sólo aquellas, que muestren periodicidades significativas, permanecerán en la serie.

Una vez que los coeficientes de cada armónica han sido calculados, puede resultar más fácil la interpretación, si se sintetiza a los dos miembros de cada armónica en la forma siguiente:

$$A_n \text{ sen } (nx + \Phi_n) \tag{8}$$

donde:

n es el número de armónico

Dado que,

$$\text{sen } (nx + \Phi_n) = \cos nx \text{ sen } \Phi_n + \text{sen } nx \cos \Phi_n$$

la ecuación (8) se expresa como

$$A_n \text{ sen } (nx + \Phi_n) = A_n \text{ sen } \Phi_n \cos nx + A_n \cos \Phi_n \text{ sen } nx \tag{9}$$

Considerando que $a_n = A_n \text{ sen } \Phi_n$ y $b_n = A_n \cos \Phi_n$, la ecuación (9) toma la forma siguiente:

$$A_n \text{ sen } (nx + \Phi_n) = a_n \cos nx + b_n \text{ sen } nx \tag{10}$$

que es la forma con que se expresa a la n -ésima armónica de una serie de Fourier.

Por lo tanto, si a_n y b_n son conocidos, se pueden calcular los valores de Φ_n y A_n , por medio de las relaciones siguientes

$$\Phi_n = \text{arc tan } (a_n/b_n) \tag{11}$$

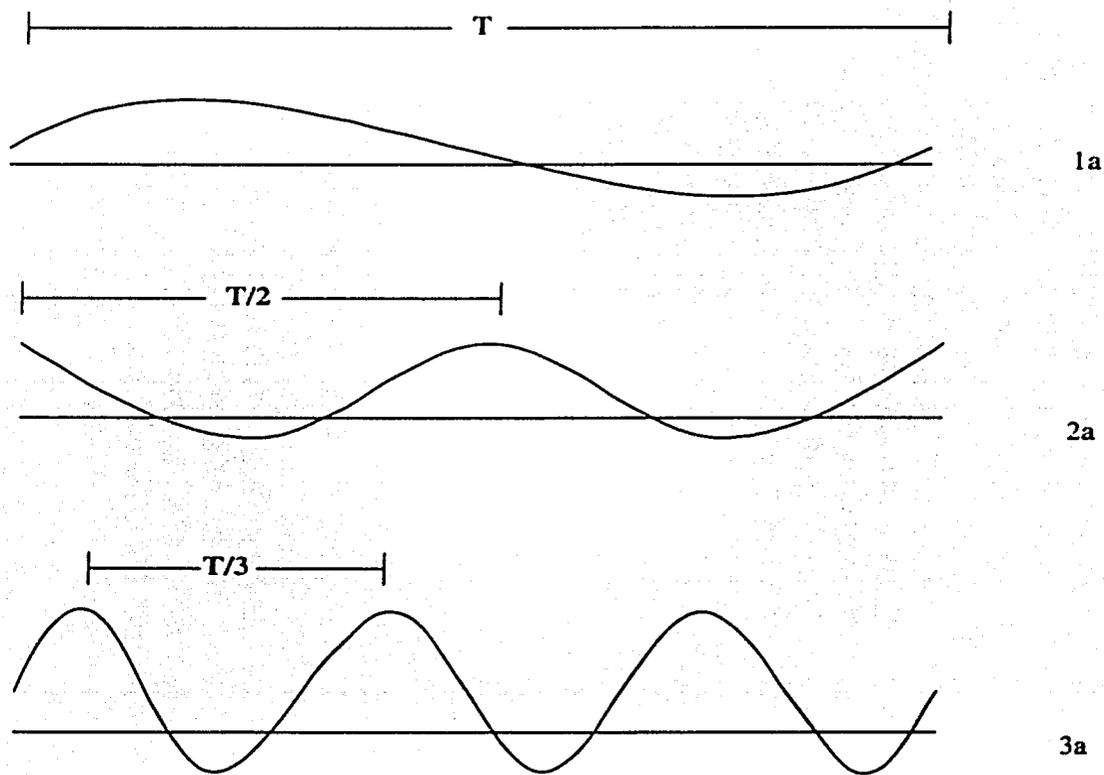
$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = (a_n^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

El valor A_n se conoce como la **amplitud** de la n -ésima armónica y representa todo rango, desde el punto más bajo al más alto de la onda, representada por la armónica.

De la misma forma Φ_n es el **Ángulo de Fase**, el cual indica el punto del ciclo donde la onda alcanza su valor máximo.

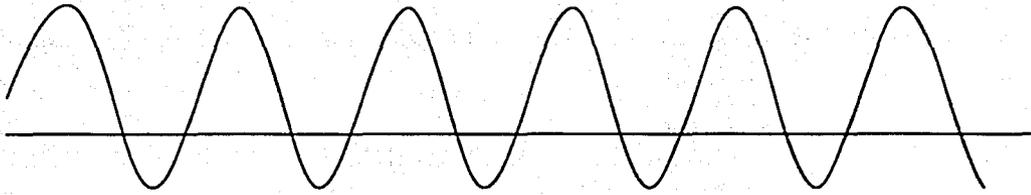
Representación gráfica de las armónicas individuales de una Serie de Fourier y la función periódica resultante de la suma de todas las armónicas Fig. 2.

FIG. 2: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ARMÓNICAS INDIVIDUALES DE UNA SERIE DE FOURIER Y LA FUNCIÓN PERIÓDICA RESULTANTE (ÚLTIMA CURVA) DE LA SUMA DE TODAS LAS ARMÓNICAS.

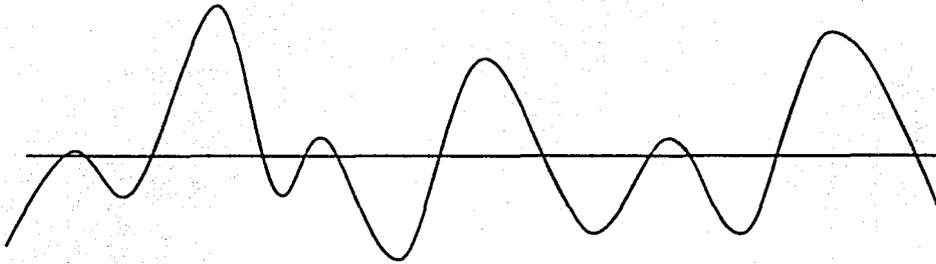


LA TESIS NO SALE
DE AQUÍ

|— T/6 —|



6a



Periódica

Entre algunos ejemplos de estas funciones se encuentran: **MORLET, PAUL, SOMBRERO MEXICANO, ...**, Figura 3, (Kulkarni, 2000; Matsuoka et al. 2000; Povinelli and Xin, 1996; Torrence and Compo, 1998).