

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**IDENTIFICACIÓN DE EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO
EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA MEDIANTE ANÁLISIS
ESTADÍSTICO DE SERIES DE TIEMPO DE PRECIPITACIÓN**

POR:

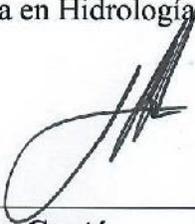
BRYAN EDUARDO CORTE LAZCANO

**TESIS PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
GRADO DE**

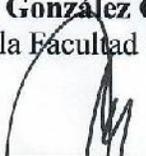
**MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA
SUBTERRÁNEA**



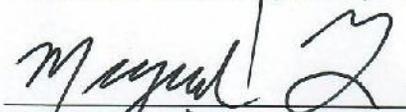
Identificación de evidencias de cambio climático en el estado de Chihuahua mediante análisis estadístico de series de tiempo de precipitación. Tesis presentada por Bryan Eduardo Corte Lazcano como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología Subterránea, ha sido aprobada y aceptada por:



M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador(a) Académico



Dr. Humberto Silva Hidalgo
Director de Tesis

Diciembre de 2019

Comité:

Dr. Humberto Silva Hidalgo
M.I. Rodrigo De la Garza Aguilar
Dra. María Socorro Espino Valdés
Dra. Guadalupe Irma Graciela Estrada Gutiérrez

© Derechos Reservados

Bryan Eduardo Corte Lazcano
Circuito No. 1, Campus
Universitario 2, Chihuahua, Chih.
México C.P. 31125

DICIEMBRE 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

13 de diciembre de 2019

ING. BRYAN EDUARDO CORTE LAZCANO
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Humberto Silva Hidalgo** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **"IDENTIFICACIÓN DE EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SERIES DE TIEMPO DE PRECIPITACIÓN"**.

ÍNDICE

1. Introducción

- 1.1 Justificación
- 1.2 Alcances y objetivo
- 1.3 Hipótesis
- 1.4 Metodología

2. Compendio de datos de precipitación

- 2.1 Fuentes de información
- 2.2 Estimación de registros faltantes de precipitación diaria por el método del USNWS
- 2.3 Base de datos de precipitación diaria

3. Marco teórico

- 3.1 Conceptos
- 3.2 Pruebas de normalidad
- 3.3 Pruebas de homogeneidad
- 3.4 Pruebas de persistencia y tendencia

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

4. Resultado del análisis estadístico a las series de datos de precipitación

- 4.1 Pruebas de normalidad
- 4.2 Estaciones sin aparente evidencia de cambio climático
- 4.3 Estaciones con aparente evidencia de cambio climático
- 4.4 Estaciones con casos especiales

5. Discusión

- 5.1 Identificación de evidencia de cambio climático
- 5.2 Mapa de identificación del estado de chihuahua con zonas que muestran evidencia de cambio climático

6. Conclusiones y recomendaciones

- 6.1 Conclusiones
- 6.2 Recomendaciones

7. Literatura citada

8. Anexos

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a todos los que están sumando por cambiar las acciones que afectan el medio ambiente y provocan o inciden en el cambio climático, un día a la vez, solucionaremos las cosas. No hay acción demasiado pequeña ni actitud positiva que sea inútil, la sinergia de los que queremos mejorar las cosas nos dará la fuerza para lograrlo.

También está dedicado a los que dan su tiempo, esfuerzo, trabajo y vida misma para elaborar las investigaciones científicas y estadísticas sobre las cuales está apoyado este trabajo, las bases las marca el pasado, el futuro se construye hoy.

Agradecimientos

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Humberto Silva Hidalgo por mantener siempre la confianza en mí de poder terminar en tiempo y forma este trabajo de investigación, a mis asesores y el personal de la Facultad de Ingeniería de la UACH, sin ellos no hubiera sido posible.

Por su puesto a mi familia que me apoyó en todo momento, mis padres que son arduos trabajadores y que siempre inculcaron sus valores en mí, agradezco el tenerlos y que puedan verme terminar una meta más en mi vida. También agradezco especialmente a mi hermano José Enrique por proporcionar el apoyo económico para costear todos los trámites de titulación y mi hermano Roberto por siempre estar atento a mis proyectos y estudios, aconsejándome en épocas difíciles.

Un agradecimiento importante al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por proporcionar por dos años la beca de manutención para poder realizar mis estudios de maestría de tiempo completo, por fomentar y posibilitar el sueño de estudiar un postgrado de calidad. Agradezco a mis amigos por seguir a mi lado aun cuando pasan los años, es menor el tiempo que nos vemos, siempre cuento con ellos y ellos siempre contarán conmigo.

Por último, agradezco a toda la familia ciclista, mis amigos de este deporte que tanto quiero por acompañarme en este camino y claro, a Alejandra mi compañera incondicional de rodada y de vida.

Resumen

El cambio climático es una condición en la cual por efectos antropogénicos, existen variaciones en los parámetros meteorológicos más importantes como lo son la precipitación, la temperatura, las tormentas máximas, la humedad y la evapotranspiración.

El objetivo fue identificar alteraciones en las series de tiempo de precipitación que evidencien la posible presencia de cambio climático en el Estado de Chihuahua y en su caso determinar el año en el que sucedió. Se usaron 35 estaciones climatológicas con registros de precipitación diaria localizadas dentro del Estado de Chihuahua. Los datos abarcan el periodo desde 1960 hasta 2018, debido a que muchos de los registros no existían, fueron completados por el método del servicio meteorológico de los Estados Unidos, apoyado con datos de estaciones contiguas.

Se hizo un análisis gráfico en el cual usando la evolución del promedio, la media móvil a cinco años y la tendencia, se identificó en qué punto en el tiempo la serie se dividía en dos poblaciones. A dichas series se les aplicaron cuatro pruebas de normalidad: *Pearson*, *D'Agostino*, *Ryan-Joiner* y *Kolmogorov-Smirnov*. Una vez determinada la normalidad de la serie se les aplicaron pruebas de homogeneidad paramétricas (cuando la serie tuvo normalidad), *T de Student*, *Cramer* o no paramétricas (cuando no existía normalidad), *Helmert* y *Secuencias*. Esto permitió determinar estadísticamente que existían dos poblaciones con comportamiento estadístico distinto al de la serie completa.

En 17 estaciones no se encontraron evidencias de algún aparente cambio climático pero en 16 estaciones sí. De las cuales 13 observan dos periodos con precipitación media menor en el periodo más reciente, es decir llueve menos, mientras que en 3 estaciones sucedió lo contrario, llueve más. El 75% de las estaciones analizadas con aparente cambio climático sucede en el periodo 1990 a 1994, sin encontrarse un patrón geográfico que se asocie.

Se recomienda sumar a este análisis, estudios similares de otros parámetros meteorológicos para dar un mayor entendimiento del cambio climático en el estado de Chihuahua.

Abstract

Climate change is an environmental condition where due to anthropogenic effects, weather most important parameters are changed, such as rainfall, temperature, humidity, maximum storms and evapotranspiration.

The main objective was to identify disturbances in the data time series of rainfall that may point to a possible climate change in the state of Chihuahua and in the given case determinate in which year that change happened. 35 climatological stations with daily rainfall registries where used. Data includes registries from 1960 to 2018, due to the many registers missing, the United States National Weather Service method to complete data was used, in conjunction with contiguous auxiliary weather stations.

A graphical analysis was made by using arithmetic average, average evolution 5 years forward and tendency. The data was evaluated with four normality tests, *Pearson*, *D'Agostino*, *Ryan-Joiner* and *Kolmogorov-Smirnov*. Then four homogeneity tests where applied: *T de Student* and *Cramer* for series with normal distribution and *Helmert and Sequences* for a non-normal distribution. This allowed to determine statistically two different series differing to the complete rainfall series.

Results of 17 climatological stations didn't show any apparent evidence of climate change while 16 did show apparent evidence, 13 of these showed two different series of rainfall with a minor average, which means it's raining less while in 3 stations was the opposite, more rainfall in average. 75% of the climatological stations with apparent climate change occurred between 1990 and 1994, there weren't any findings about an associated geographic pattern.

It is strongly recommended to sum to this investigation, analysis of the same nature on the other climatological variables to give a better understanding of climate change in the State of Chihuahua.



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 JUSTIFICACIÓN	7
1.2 ALCANCES Y OBJETIVOS	8
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	8
1.2.2. <i>Objetivos particulares</i>	8
1.3 HIPÓTESIS.....	9
1.4 METODOLOGÍA	9
2. COMPENDIO DE DATOS DE PRECIPITACIÓN	11
2.1 FUENTES DE INFORMACIÓN	11
2.2 ESTIMACIÓN DE REGISTROS FALTANTES DE PRECIPITACIÓN DIARIA POR EL MÉTODO DEL USNWS	11
2.2.1. <i>Análisis de homogeneidad de las series de tiempo de precipitación diaria</i>	14
2.3 BASE DE DATOS DE PRECIPITACIÓN DIARIA.....	15
3. MARCO TEÓRICO	17
3.1 CONCEPTOS	17
3.1.1. <i>Evolución del promedio</i>	17
3.1.2. <i>Promedio móvil</i>	18
3.2 PRUEBAS DE NORMALIDAD.....	19
3.2.1. <i>Pearson</i>	19
3.2.2. <i>D'Agostino</i>	20
3.2.3. <i>Ryan-Joiner</i>	21
3.2.4. <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	22
3.3 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD	23
3.3.1. <i>Helmert</i>	25
3.3.2. <i>Secuencias</i>	25
3.3.3. <i>T de Student</i>	26
3.3.4. <i>Cramer</i>	28
3.4 PRUEBAS DE PERSISTENCIA Y TENDENCIA.....	29
3.4.1. <i>Persistencia por la prueba de Anderson</i>	29
3.4.2. <i>Persistencia por prueba del punto de quiebre</i>	30
4. RESULTADO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO A LAS SERIES DE DATOS DE PRECIPITACIÓN	31
4.1 PRUEBAS DE NORMALIDAD.....	31
4.2 ESTACIONES SIN APARENTE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO	35

4.3 ESTACIONES CON APARENTE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO	37
4.3.1. <i>Camargo</i>	37
4.3.2. <i>Colina</i>	37
4.3.3. <i>Creel</i>	38
4.3.4. <i>Cuauhtémoc</i>	39
4.3.5. <i>El Tintero</i>	40
4.3.6. <i>Francisco I. Madero</i>	40
4.3.7. <i>Jiménez</i>	41
4.3.8. <i>Las Lajas</i>	42
4.3.9. <i>Luis L. León</i>	42
4.3.10. <i>Moris</i>	43
4.3.11. <i>Ojinaga</i>	44
4.3.12. <i>Peñitas</i>	45
4.3.13. <i>Tacubaya</i>	45
4.3.14. <i>Temósachic</i>	46
4.3.15. <i>Villa Ahumada</i>	47
4.3.16. <i>Villa Coronado</i>	47
4.4 ESTACIONES CON CASOS ESPECIALES	48
4.4.1. <i>Guachochi</i>	48
4.4.2. <i>Guadalupe y Calvo</i>	49
5. DISCUSIÓN	50
5.1 IDENTIFICACIÓN DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO	50
5.2 MAPA DE IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE CHIHUAHUA CON ZONAS QUE MUESTRAN EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	54
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
6.1 CONCLUSIONES.....	57
6.2 RECOMENDACIONES.....	58
7. LECTURA CITADA.....	59
8. ANEXOS	61
8.1 ANEXO 1: DATOS DIARIOS DE PRECIPITACIÓN 1960-2018	61
8.2 ANEXO 2: ANÁLISIS GRÁFICOS POR AÑO DE SERIES DE TIEMPO.....	64
8.3 ANEXO 3: PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD DE SERIES DE TIEMPO ANUALES	82
8.4 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD PARAMÉTRICAS	84
8.5 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD NO PARAMÉTRICAS	85

Índice de Figuras

FIG. 1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
FIG. 2 ETAPA 2 DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS A COMPLETAR.....	12
FIG. 3 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS FINALES DE PRECIPITACIÓN DIARIA PARA EL PERIODO 1960-2018.....	13
FIG. 4 DIVISIÓN DE POBLACIÓN SEGÚN EL FIN DE LA PRUEBAS PARAMÉTRICAS.....	24
FIG. 5 CAMPOS, ARANDA (1998). PRUEBA DE ANDERSON	29
FIG. 6 MAPA DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS POR DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA	34
FIG. 7 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1991 ESTACIÓN CAMARGO	37
FIG. 8 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 2000 ESTACIÓN COLINA.....	38
FIG. 9 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1994 ESTACIÓN CREEL.....	39
FIG. 10 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1993 ESTACIÓN CUAUHTÉMOC	39
FIG. 11 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1985 ESTACIÓN EL TINTERO	40
FIG. 12 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1992 ESTACIÓN FRANCISCO I. MADERO ...	41
FIG. 13 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1991 ESTACIÓN JIMÉNEZ.....	41
FIG. 14 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1991 ESTACIÓN JIMÉNEZ.....	42
FIG. 15 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1994 ESTACIÓN LUIS L. LEÓN.....	43
FIG. 16 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1990 ESTACIÓN MORIS	44
FIG. 17 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1993 ESTACIÓN OJINAGA	44
FIG. 18 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1993 ESTACIÓN PEÑITAS.....	45
FIG. 19 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1991 ESTACIÓN TACUBAYA.....	46
FIG. 20 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1976 ESTACIÓN TEMÓSACHIC	46
FIG. 21 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1992 ESTACIÓN VILLA AHUMADA	47
FIG. 22 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 1991 VILLA CORONADO	48
FIG. 23 ANÁLISIS DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, APARENTE AÑO DE CAMBIO: 2004 GUACHOCHI.....	48
FIG. 24 ESTACIÓN GUADALUPE Y CALVO.....	49
FIG. 25 DIFERENCIA ABSOLUTA ENTRE MEDIAS ANUALES DE PERIODOS EVALUADOS EN CADA ESTACIÓN. EN COLOR ROJO LAS QUE DISMINUYERON EN LA MEDIA, EN COLOR AZUL LAS QUE AUMENTARON EN LA MEDIA.....	51
FIG. 26 AGRUPACIÓN DE CAMBIOS DETECTADOS EN ESTACIONES POR AÑO.....	52
FIG. 27 APARENTES CAMBIOS AGRUPADOS POR FECHA.	52
FIG. 28 DIFERENCIAS ENTRE PERIODOS DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN.	53
FIG. 29 DIFERENCIA ENTRE DESVIACIONES ESTÁNDAR DE PERIODOS.....	53
FIG. 30 MAPA DE ESTACIONES CON APARENTE CAMBIO CLIMÁTICO	55
FIG. 31 MAPA DE ESTACIONES CON APARENTE CAMBIO CLIMÁTICO POR DÉCADA (CON DATOS DE DISMINUCIÓN EN LA MEDIA ANUAL DE PRECIPITACIÓN)	56

Índice de Tablas

TABLA 1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD	14
TABLA 2 BASE DE DATOS FINAL DE PRECIPITACIÓN DIARIA	15
TABLA 3 EJEMPLO DE EVOLUCIÓN DEL PROMEDIO	17
TABLA 4 EJEMPLO DE PROMEDIO (MEDIA) MÓVIL	18
TABLA 5 RESUMEN DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE NORMALIDAD	19
TABLA 6 DATOS DE SALIDA PEARSON, SI $R > R_C$ ENTONCES ES NORMAL	20
TABLA 7 DATOS DE SALIDA D'AGOSTINO.....	21
TABLA 8 DATOS DE SALIDA RYAN-JOINER	22
TABLA 9 DATOS DE SALIDA K-S TEST	23
TABLA 10 RESUMEN DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD	24
TABLA 11 RESULTADOS DEL TEST DE HELMERT PARA LA ESTACIÓN CHIHUAHUA (CNA) DATOS DE PAA	25
TABLA 12 RANGO DE U	26
TABLA 13 RESULTADOS DEL TEST DE SECUENCIAS: ESTACIÓN CHIHUAHUA (CNA) DATOS DE PAA Y RANGO DE U (CAMPOS, 1998)	26
TABLA 14 DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT Y GRADOS DE SIGNIFICANCIA	27
TABLA 15 RESULTADOS DEL T DE STUDENT: ESTACIÓN CHIHUAHUA (CNA) DATOS DE PAA	27
TABLA 16 RESULTADOS DEL TEST DE CRAMER: ESTACIÓN CHIHUAHUA (CNA) DATOS DE PAA.....	28
TABLA 17 RESULTADOS DE PRUEBAS DE NORMALIDAD	31
TABLA 18 RESUMEN DE ANÁLISIS GRÁFICO Y DE HOMOGENEIDAD A ESTACIONES QUE NO MUESTRAN APARENTE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO	35
TABLA 19 RESUMEN DE PARÁMETROS ENCONTRADOS EN ESTACIONES CON APARENTE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO.	50

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El cambio climático es una variación en la distribución estadística de los patrones meteorológicos durante un periodo prolongado de tiempo. El agua es el recurso natural más importante a nivel mundial. En esta tesis se intentará identificar evidencias de cambio climático a través del análisis estadístico de precipitación mensual y anual en el Estado de Chihuahua.

La precipitación se mide de manera diaria en estaciones meteorológicas a través de pluviómetros, de manera continua empleando pluviógrafos y en la actualidad mediante estaciones automáticas a tiempo real, con intervalos de medición cortos. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la encargada de recopilar dichos datos y ponerlos a disposición del público general. Es común que falten datos diarios en una o más estaciones llegando a faltar datos durante meses. Existen métodos como el del servicio meteorológico de los Estados Unidos (USNWS) para completar los datos faltantes, el cual considera que un dato faltante puede ser estimado en base a los datos observados de estaciones circundantes (Campos-Aranda, 1998).

Cuando un conjunto de datos son completados es necesario someter la muestra de manera mensual a una prueba de homogeneidad para cerciorarse que los datos que fueron estimados, corresponden a la misma población de datos. Las pruebas de homogeneidad determinan si una serie de datos corresponde una muestra de una única población (Campos-Aranda, 1998). Para esta investigación se plantea usar las pruebas paramétricas de T de Student que identifica cambios abruptos en la media y la prueba de Cramer que compara la media de toda la serie y la media de una cierta parte del registro.

Las pruebas no paramétricas son las de Helmert que analiza el signo de las desviaciones de cada evento y la prueba de Secuencias que contabiliza el número de rachas arriba o debajo de la media (Campos-Aranda, 1998).

Con la finalidad de definir si se deben usar pruebas paramétricas o no paramétricas es necesario evaluar si la serie de tiempo de datos se aproximan a una distribución

de probabilidad de normal o gaussiana. En caso de que el análisis demuestre normalidad en el comportamiento de los datos, se emplean pruebas paramétricas, en caso contrario se recurre a las no paramétricas.

Para fines de esta investigación, se proponen cuatro pruebas de normalidad: (1) la prueba Kolmogorov-Smirnov que es usada para determinar si una muestra viene de una población con una distribución específica normal o no normal basada en la función de distribución empírica (Chakravart, et al 1967), (2) la prueba Anderson-Darling es una prueba no paramétrica que tiene el mismo fin y es una modificación de la prueba de Kolmogorov aunque da más peso a las colas de la muestra (Stephens, 1974), (3) la prueba de Ryan-Joiner es también una prueba de bondad de ajuste para determinar si la muestra sigue una distribución normal (Ryan & Joiner, 1976) y (4) la prueba de D'Agostino es una prueba de ajuste de bondad para determinar la normalidad usando dos parámetros estadísticos que son la Curtosis y la asimetría estadística (D'Agostino, et al 1990).

Inicialmente, se efectuará un análisis gráfico de los registros de precipitación que conforman la serie de tiempo, con la finalidad de identificar visualmente cambios en el comportamiento estadístico de los datos. Para ello se trazarán sobre la serie de tiempo, el gráfico de la evolución del promedio, la línea de promedio de largo plazo y el gráfico del promedio móvil. Este análisis generalmente permite identificar, de ser el caso, la disociación de la serie de tiempo en dos posible poblaciones.

Teniendo los datos de precipitación completos, para el periodo de análisis del año 1960 al 2017; tomando en cuenta que varias referencias tienen para México, el cambio climático se presenta aparentemente entre 1989 y el año 1997 (falta referencia). Los 57 años de periodo de análisis, se pueden considerar como un buen historial para la realización de esta investigación. Por otro lado, se debe considerar que los datos de precipitación diaria antes de 1960 en el estado de Chihuahua son prácticamente inexistentes o insuficientes para dar una confiabilidad estadística.

1.1 JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la ONU (2018), en una escala global el cambio climático amenaza la manera de vivir y el futuro inmediato del planeta. Los cambios climáticos están provocando un aumento en los niveles del mar, afectando a la población tanto de países desarrollados como en vías de desarrollo (ONU, 2018c). Un déficit o exceso de precipitación provoca sequías o inundaciones que afectan la sostenibilidad socioeconómica de cualquier región (Gao, Wang, & Zhou, 2017).

En Chihuahua se complica la identificación de la presencia cambio climático, ya que la falta de información básica como la que proporcionan las pocas estaciones meteorológicas que existen es insuficiente y muchas estaciones han dejado de funcionar desde el año 2003, aunado a esto la posible alteración de datos debida al movimiento de la estación de lugar, así como las malas condiciones de los equipos de medición pueden provocar errores en la información existente. La investigación será de gran utilidad por los datos de precipitación diaria que se completarán y evaluarán, los cuales pueden ser utilizados para numerosas investigaciones relacionadas a la hidrología tanto superficial como subterránea. Las evidencias de cambio climático que se encuentren en cuanto a precipitación diaria y mensual pueden ser sumadas a otras investigaciones con el mismo enfoque, pero visto desde otros parámetros como lo pueden ser la temperatura, las curvas intensidad-duración-frecuencia y la cantidad de ciclones tropicales que impactan el Estado de Chihuahua. La metodología usada en cuanto análisis estadísticos puede ser útil como un proceso replicable a investigaciones de cambio climático, desde el punto de vista de precipitación, en otros estados de la república. La identificación del tiempo en el que ocurre un cambio climático en las distintas partes del estado donde se ubica cada estación climatológica permitirá investigaciones a detalle acerca de los recursos hídricos desde esta perspectiva. Los efectos del cambio climático también podrán ser afirmados o rechazados como causantes de inundaciones o sequías si se tiene un conocimiento de los tiempos en los que sucedió. Será de utilidad para estimaciones de las siguientes afectaciones que tendrá en los recursos hídricos del estado.

1.2 ALCANCES Y OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Identificar alteraciones en las series de tiempo de precipitación que evidencien la posible presencia de cambio climático en el Estado de Chihuahua y en su caso determinar el parteaguas temporal.

1.2.2. Objetivos particulares

- Recabar series de tiempo de precipitación diaria de 1960 a 2018 y analizarlas para identificar datos faltantes
- Completar datos faltantes de precipitación diaria empleando el método del USNWS
- Efectuar pruebas de normalidad a las series de tiempo completas para definir si se emplean pruebas paramétricas o no paramétricas de tendencia y persistencia.
- Evaluar la calidad de los datos estimados mediante pruebas estadísticas de homogeneidad.
- Realizar un análisis gráfico del comportamiento de la serie de tiempo incluyendo evolución del promedio, promedio móvil y promedio de largo plazo, para identificar dos o más posibles poblaciones.
- Aplicar pruebas de homogeneidad para confirmar o descartar la existencia de las dos o más posibles poblaciones.
- Realizar pruebas de tendencia y persistencia a la totalidad de las series de tiempo, incluyendo la disociación en los casos en que se confirme la presencia de dos poblaciones.
- Identificar geográficamente en que partes del estado existe un cambio climático, en cuales no y discriminar los valores de precipitación en donde pueda aparecer un falso positivo de cambio climático.

1.3 HIPÓTESIS

El análisis estadístico de la precipitación del periodo 1960 a 2018 puede identificar evidencias de la presencia de cambio climático en el Estado de Chihuahua.

1.4 METODOLOGÍA

Se obtuvo la información de estaciones de CONAGUA del periodo 1960-2018, los datos faltantes de cada estación para el periodo 2014-2018 se completaron por el método del US NWS (Campos-Aranda, 1998). Los datos completados de precipitación por este método fueron sometidos a cuatro pruebas de normalidad. La prueba Kolmogorov-Smirnov, la prueba Anderson-Darling, la prueba de Ryan-Joiner y la prueba de D'Agostino.

Una vez determinada la normalidad o no de los datos se aplicaron pruebas paramétricas de homogeneidad en caso de tener distribución normal o en caso contrario pruebas no paramétricas. Las pruebas paramétricas que se usaron fueron la T de Student y la prueba de Cramer. Las pruebas no paramétricas empleadas fueron la de Helmer y la prueba de Secuencias.

Ya determinada la normalidad y homogeneidad de los datos completos mensuales, se realizaron análisis gráficos mensuales de precipitación por estación, que incluyen la evolución del promedio de precipitación, el promedio móvil y el promedio a largo plazo. Todo con el fin de determinar si existe visualmente un cambio en los promedios de dos poblaciones dentro de la misma estación.

El periodo de análisis considerado fue de 58 años. Una vez identificadas de manera visual dos poblaciones aparentemente distintas se realizaron pruebas de homogeneidad para demostrar si cada muestra por separado se comporta como muestra única de una población, lo que se empleó para identificar evidencia de un cambio climático, finalmente se realizaron análisis de persistencia y tendencia a todas las series de datos mensuales. Un esquema de la metodología se presenta en la Figura 1.

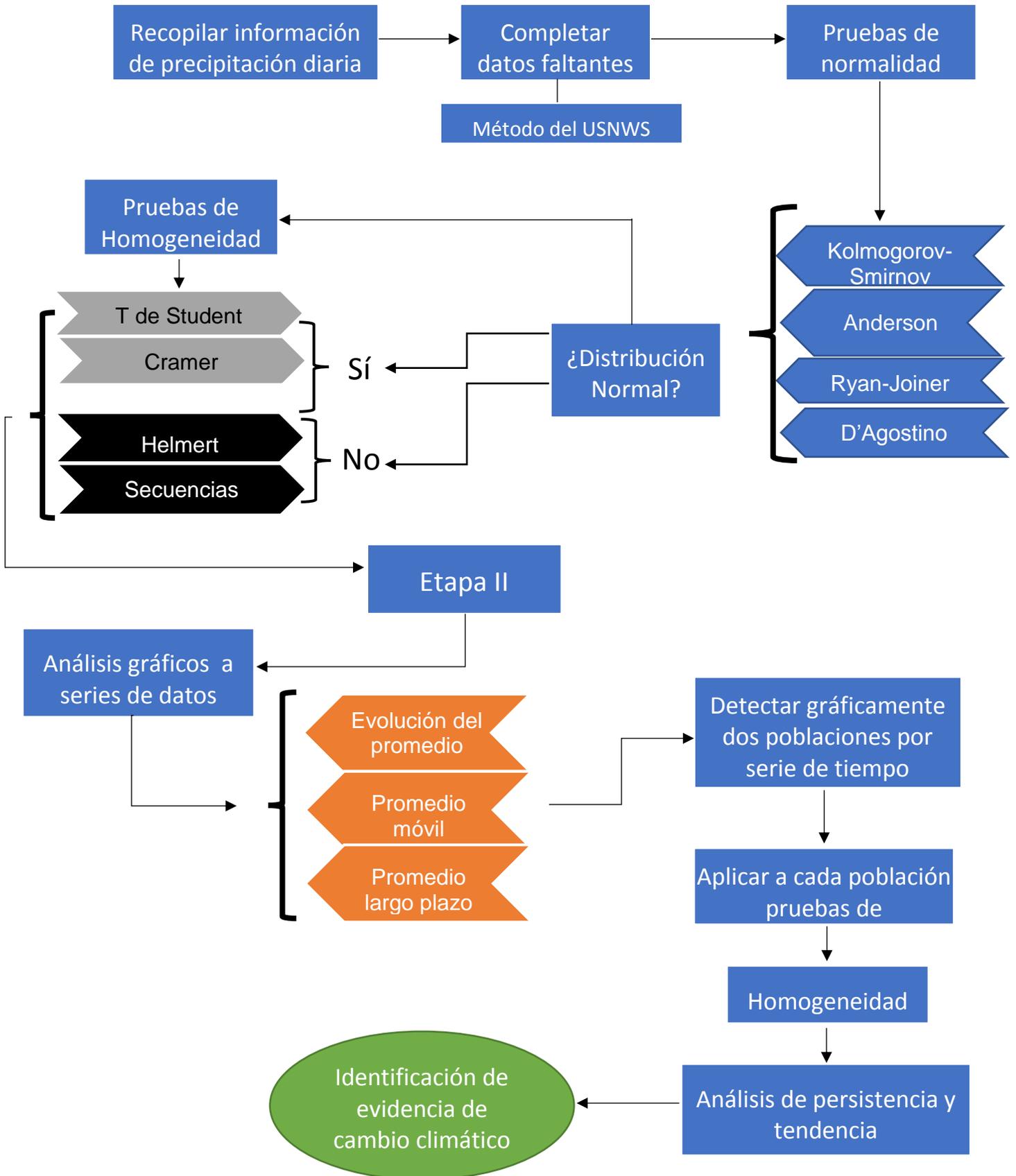


Fig. 1 Metodología de la investigación

2. COMPENDIO DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

Para la elaboración de este trabajo se utilizaron distintas fuentes de información, incluidas de organizaciones gubernamentales como CONAGUA, CFE y SEDENA. El trabajo de elaborar una base de datos de precipitación diaria ocurrió en dos partes, la primera que consistió en consultar información existente y la segunda en completar datos de precipitación diaria por el método del servicio meteorológico de los estados unidos (United States National Weather Service USNWS).

2.1 FUENTES DE INFORMACIÓN

Para dar una confiabilidad estadística se trazó el objetivo de tener la mayor cantidad de datos de precipitación diaria completos. Usando la base de datos de precipitación diaria existente para 68 estaciones meteorológicas el Estado de Chihuahua para el periodo 1960-2013, se obtuvieron los datos de precipitación observados hasta el año 2018 de 19 estaciones.

2.2 ESTIMACIÓN DE REGISTROS FALTANTES DE PRECIPITACIÓN DIARIA POR EL MÉTODO DEL USNWS

La estimación de datos fue hecha con apoyo de un análisis geográfico de las estaciones que podrían ser completas y por etapas.

- Etapa 1 se completaron 12 estaciones
- Etapa 2 se completaron 4 estaciones
- Etapa 3 se completaron 7 estaciones

En la Figura 2 se muestra el mapa de estaciones para realizar la Etapa 2, las cuales fueron completadas con el método del USNWS usando las estaciones más próximas pero que apoyaran el criterio de ocupar 4 cuadrantes distintos, en algunos casos fue necesario usar estaciones climatológicas ubicadas en Estados Unidos, los datos de estas estaciones fueron recabados de la página del NOAA, servicio gubernamental que administra la información.

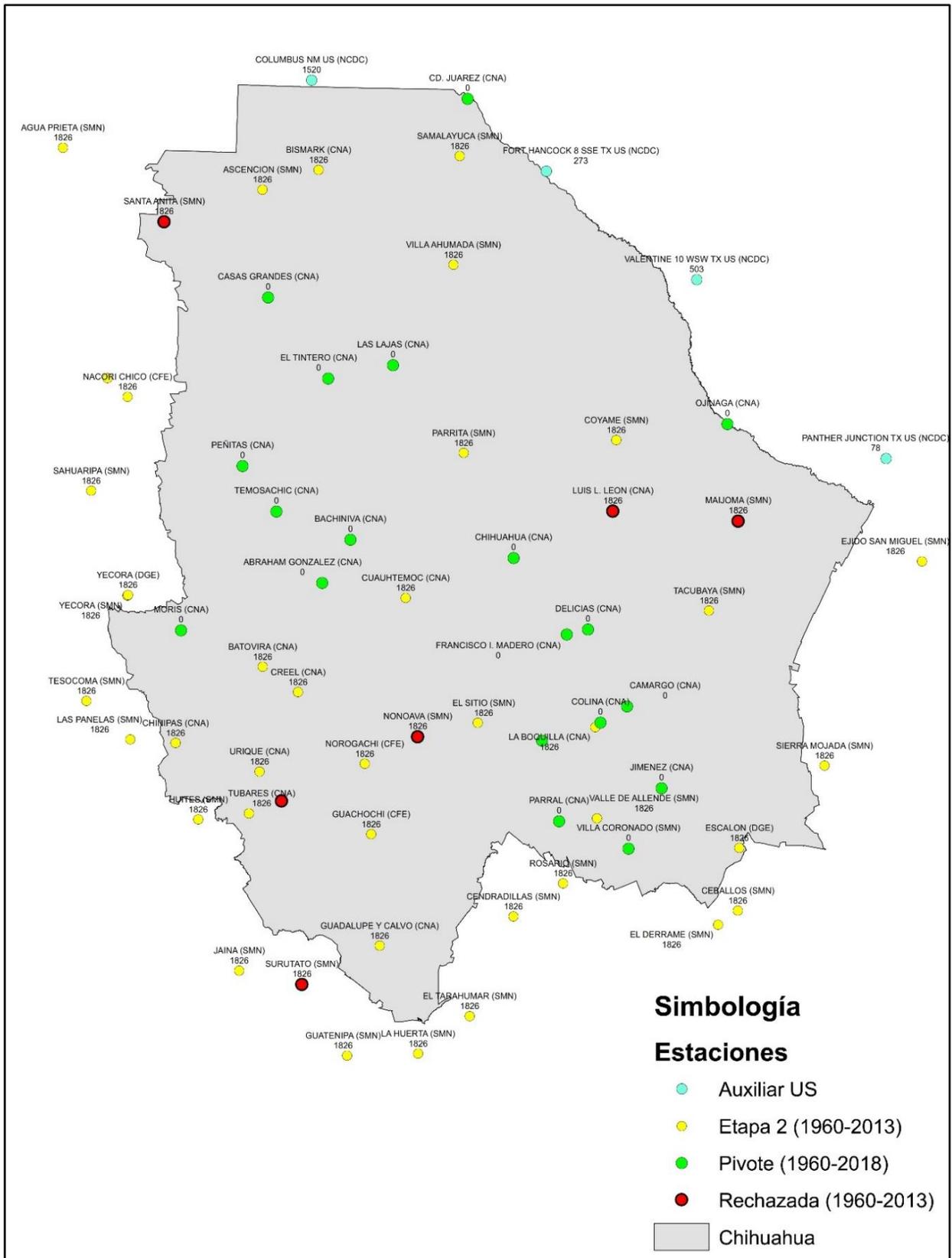


Fig. 2 Etapa 2 de estaciones climatológicas a completar

En la Figura 3 se muestran las 35 estaciones finales que contienen datos de precipitación diaria para el periodo 1960-2018, siendo la porción noreste la que menos estaciones tiene, pero al no ser zona serrana, se podría pensar que las variaciones climatológicas no son tantas como ocurre en la zona noroeste que es donde están las sierras y que se cuenta con una red más basta de estaciones. En el anexo 8.1 se encuentran los datos fuentes que generaron la Figura 3.

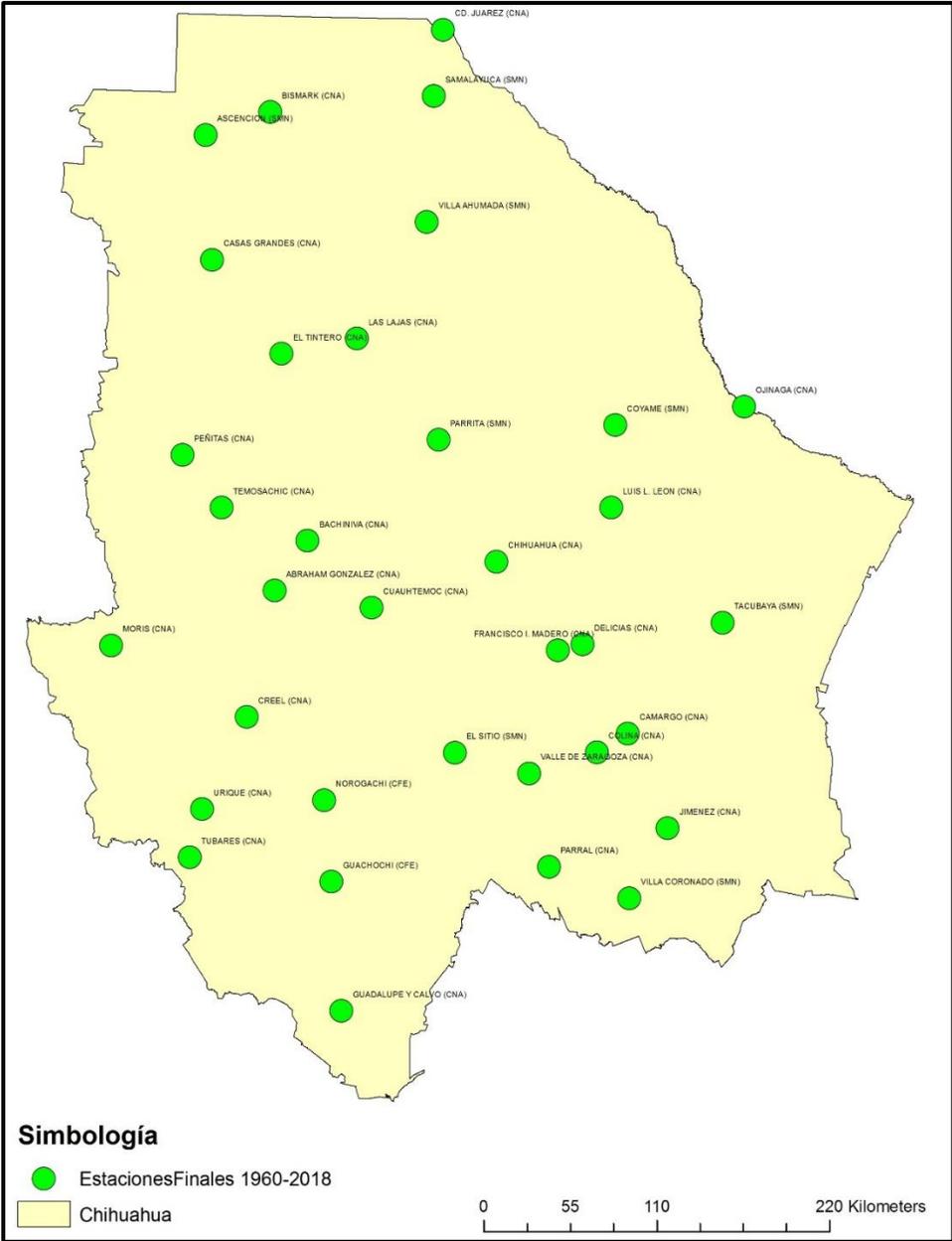


Fig. 3 Estaciones climatológicas finales de precipitación diaria para el periodo 1960-2018

2.2.1. Análisis de homogeneidad de las series de tiempo de precipitación diaria

A todas las estaciones completadas se les aplicaron las pruebas de homogeneidad mencionadas en el capítulo 1, así como pruebas de normalidad. En la Tabla 1 se presenta el resumen de las estaciones que se les aplicaron pruebas de homogeneidad.

Tabla 1 Resultados de pruebas de homogeneidad

Id	Nombre	Orden	Etapa
20	LAS LAJAS (CNA)	1	1
6	CASAS GRANDES (CNA)	2	1
24	OJINAGA (CNA)	3	1
33	VALLE DE ZARAGOZA (CNA)	4	1
25	PARRAL (CNA)	5	1
35	VILLA CORONADO (SMN)	6	1
13	DELICIAS (CNA)	7	1
30	TEMOSACHIC (CNA)	8	1
7	CD. JUÁREZ (CNA)	9	1
5	CAMARGO (CNA)	10	1
19	JIMÉNEZ (CNA)	11	1
9	COLINA (CNA)	12	1
12	CUAUHTÉMOC (CNA)	1	2
17	GUACHOCHI (CFE)	2	2
34	VILLA AHUMADA (SMN)	3	2
2	ASCENSIÓN (SMN)	4	2
32	URIQUE (CNA)	5	2
11	CREEL (CNA)	6	2
28	SAMALAYUCA (SMN)	7	2
18	GUADALUPE Y CALVO (CNA)	8	2
21	LUIS L. LEÓN (CNA)	10	2
26	PARRITA (SMN)	1	3
10	COYAME (SMN)	2	3
29	TACUBAYA (SMN)	3	3
4	BISMARCK (CNA)	4	3
23	NOROGACHI (CFE)	5	3
14	EL SITIO (SMN)	6	3
31	TUBARES (CNA)	7	3

2.3 BASE DE DATOS DE PRECIPITACIÓN DIARIA

En total se tienen 35 estaciones meteorológicas con datos de precipitación diaria completos para el periodo 1960-2018. Estos datos son la información de la CONAGUA, del SMN y de CFE, de la cual parte todo el análisis gráfico y estadístico para encontrar evidencias de cambio climático en cada punto geográfico del Estado De Chihuahua (Tabla 2).

Tabla 2 Base de datos final de precipitación diaria

Id	Nombre	Latitud	Longitud	X	Y	Altitud msnm
1	ABRAHAM GONZÁLEZ (CNA)	28.49	-107.47	258,063.69	3,153,541.69	2200
2	ASCENSIÓN (SMN)	31.09	-108.00	214,161.64	3,443,748.67	1400
3	BACHINIVA (CNA)	28.78	-107.26	279,025.53	3,185,303.94	2060
4	BISMARCK (CNA)	31.23	-107.57	255,499.18	3,458,299.11	1340
5	CAMARGO (CNA)	27.69	-105.17	483,042.58	3,062,483.88	1400
6	CASAS GRANDES (CNA)	30.38	-107.93	218,272.32	3,364,154.83	1600
7	CD. JUÁREZ (CNA)	31.72	-106.42	365,474.10	3,510,699.52	1180
8	CHIHUAHUA (CNA)	28.67	-106.03	399,288.67	3,171,951.38	1400
9	COLINA (CNA)	27.58	-105.37	463,311.85	3,050,467.49	1400
10	COYAME (SMN)	29.46	-105.26	474,972.95	3,258,890.51	1720
11	CREEL (CNA)	27.76	-107.63	240,331.46	3,072,935.85	2400
12	CUAUHTÉMOC (CNA)	28.40	-106.84	319,817.90	3,142,520.08	2170
13	DELICIAS (CNA)	28.20	-105.47	454,148.35	3,119,197.69	1200
14	EL SITIO (SMN)	27.57	-106.29	372,875.72	3,050,298.32	1600
15	EL TINTERO (CNA)	29.85	-107.46	262,553.73	3,304,392.12	1600
16	FRANCISCO I. MADERO (CNA)	28.16	-105.63	438,506.24	3,115,415.14	1200
17	GUACHOCHI (CFE)	26.82	-107.07	294,270.77	2,968,109.60	2400

Id	Nombre	Latitud	Longitud	X	Y	Altitud msnm
18	GUADALUPE Y CALVO (CNA)	26.08	-106.99	300,564.77	2,885,798.22	2600
19	JIMÉNEZ (CNA)	27.14	-104.91	508,481.12	3,002,051.68	1400
20	LAS LAJAS (CNA)	29.94	-106.96	310,379.33	3,314,079.52	1600
21	LUIS L. LEÓN (CNA)	28.98	-105.28	472,633.70	3,206,266.40	1200
22	MORIS (CNA)	28.15	-108.52	154,045.88	3,118,543.10	800
23	NOROGACHI (CFE)	27.29	-107.13	289,618.99	3,020,068.79	2200
24	OJINAGA (CNA)	29.57	-104.41	557,052.55	3,270,754.15	800
25	PARRAL (CNA)	26.92	-105.68	432,822.97	2,977,612.58	1800
26	PARRITA (SMN)	29.37	-106.42	362,496.03	3,249,447.71	1650
27	PEÑITAS (CNA)	29.25	-108.09	199,388.19	3,239,839.80	2200
28	SAMALAYUCA (SMN)	31.34	-106.48	359,552.99	3,468,501.90	1400
29	TACUBAYA (SMN)	28.32	-104.56	543,348.00	3,133,096.18	1600
30	TEMOSACHIC (CNA)	28.95	-107.83	224,379.27	3,206,291.02	2000
31	TUBARES (CNA)	26.94	-107.98	204,139.13	2,983,554.44	400
32	URIQUE (CNA)	27.22	-107.91	211,901.98	3,014,355.57	650
33	VALLE DE ZARAGOZA (CNA)	27.45	-105.81	420,231.43	3,037,068.03	1400
34	VILLA AHUMADA (SMN)	30.62	-106.51	355,056.70	3,388,308.82	1200
35	VILLA CORONADO (SMN)	26.74	-105.16	484,089.02	2,957,493.32	1600

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla la teoría que fundamenta la investigación, desde la perspectiva del planteamiento del problema. En primera instancia se definen conceptos básicos y en segundo orden se citan estudios previos donde dichos conceptos y pruebas se han usado con mayor o menor éxito, pero todos documentados.

3.1 CONCEPTOS

3.1.1. Evolución del promedio

La evolución del promedio o evolución de la media aritmética consiste en analizar gráficamente y en serie el promedio de “n” conjunto de datos conforme se van agregando más datos a la serie, de modo que se tenga “n+1” datos se tendrán también “n+1” evoluciones del promedio

Como ejemplo en la Tabla 3 se muestran los datos de los primeros 9 años de datos de precipitación mensual acumulada (PMA) en mm de la estación EL SITIO (SMN).

Tabla 3 Ejemplo de evolución del promedio

Año	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968
PMA	423.4	501.5	384.0	398.0	410.0	529.0	698.5	322.0	547.0
Evol. Prom.					423.4	441.0	477.8	458.3	468.2

Para 1964 el valor de la evolución del promedio de 423.4 se obtiene del promedio de los datos de 1960 a 1964 es decir $(423.4+501.5+384+398+410)/5$. De tal modo que para obtener la evolución del promedio de 1965 se deberá agregar el dato de PMA de dicho año y esta vez promediar dividiendo entre 6, es decir $(423.4+501.5+384+398+410 +529)/6 = 441$.

Este valor al ser graficado muestra conforme avanza la serie de tiempo como los datos se van comportando y si existen picos o anomalías visualmente detectables

que sugieran un posible cambio climático. Una parte vital de este análisis gráfico es que tanto difiere la línea promedio del periodo total de datos con respecto a la gráfica de evolución del promedio, ya que de resultar similares, no mostraría evidencia de cambio climático.

La evolución del promedio se ha usado en investigaciones de datos de calidad de agua en detección de metales y semimetales a través del tiempo de extracción (Blázquez-Pallí, 2016).

3.1.2. Promedio móvil

El promedio móvil es un conjunto de promedios calculados a partir de la división de subgrupos de observaciones consecutivas, esto se usa con el fin de suavizar los datos y reducir al mínimo las variaciones aleatorias que puedan suceder en las series de tiempo de datos diarios de precipitación en cada estación climatológica.

El periodo de la media móvil es el número de datos de la serie de tiempo que se toman para promediar, por ejemplo en la Tabla 4 se muestran los datos de precipitación de 5 días de la semana y abajo se muestra el promedio móvil con longitud igual a 2.

Tabla 4 Ejemplo de promedio (media) móvil

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Precipitación (mm)	10	20	5	0	7
Promedio Móvil	10	15	12.5	2.5	3.5

El primer promedio móvil es igual al dato de la observación del lunes, el siguiente promedio móvil es el promedio de los datos del día lunes y martes, es decir $(10+20)/2 = 15$.

Como el periodo definido del promedio móvil o media móvil es de 2, entonces el valor del promedio móvil para el día miércoles corresponde al promedio de los datos del día martes y miércoles $(20+5)/2 = 12.5$ y así sucesivamente.

Si se requiriera variar la el periodo (longitud) por ejemplo a 3, se promedian tres valores en lugar de dos.

Para esta investigación **se usó un periodo de media móvil de cinco**, para tener una suavidad de datos mejor, ya que en promedio se tienen 30 datos por mes.

Este parámetro estadístico se usado con éxito para estimar la demanda de inventarios para productos alimenticios en base a sus datos históricos (Pérez et al, 2013), así como para evaluar y predecir el crecimiento de la economía de un país (Braun, 2010).

3.2 PRUEBAS DE NORMALIDAD

La distribución más usada para modelar experimentos aleatorios es la distribución normal o Gaussiana, la cual se obtiene al considerar el modelo básico de una variable aleatoria binomial cuando el número de ensayos se va incrementando (Montgomery, 2002). Como se mencionó en la introducción, fueron 4 las pruebas que se aplicaron a las series de tiempo de precipitación. En esta sección se explica de manera breve cómo se realizaron dichas pruebas usando como ejemplo los datos de precipitación anual acumulada (PAA) de la estación CHIHUAHUA (CNA). En la Tabla 5 se muestra el resumen de resultados.

Tabla 5 Resumen de resultados de pruebas de normalidad

CHIHUAHUA (CNA)	
Resumen de Pruebas	
Normalidad	
Prueba	Resultado
Pearson	NORMAL
D'Agostino	NORMAL
Ryan-Joiner	NORMAL
Kolmogorov-Smirnov	NORMAL

3.2.1. Pearson

El coeficiente de Pearson mide el grado de asociación lineal entre dos variables cualesquiera, y puede calcularse dividiendo la covarianza de las dos series entre el producto de las desviaciones estándar (Fernández, 1997). Sumando este coeficiente y comparándolos con los valores de la media de la muestra, su

desviación estándar y rangos R con parámetros de amplitud y grados de libertad se puede determinar la normalidad de la muestra, es decir, la prueba determina por medio del coeficiente de correlación de Pearson si la población es normal. En la Tabla 6 se muestran los datos de salida, donde se puede apreciar que el valor de r que es el resultado de la prueba es mayor que rc el criterio de evaluación.

Tabla 6 Datos de salida Pearson, si $r > rc$ entonces es normal

Pearson	
MEDIA \bar{x}	405.79
DESVIACIÓN ESTÁNDAR σ	118.01
NÚMERO DE DATOS k	59
NÚMERO DE CLASES	7
MÁXIMO	668.90
MÍNIMO	170.30
RANGO R	498.60
AMPLITUD	71.23
GRADOS DE LIBERTAD (k-1)	58
NIVEL DE SIGNIFICACIÓN	0.05
X_R^2	77.93
R^2	0.9782
r	0.9891
rc	0.9798
$r > rc$? Si, Normal. No, No Normal	NORMAL

3.2.2. D'Agostino

También conocida como la prueba de normalidad K^2 , establece que la muestra es normal o no, basada en las muestras de Curtosis y asimetría. D'Agostino sugirió la siguiente transformación (Ecuación 1) para la asimetría:

$$Z_1(g_1) = \delta \operatorname{asinh}\left(\frac{g_1}{\alpha\sqrt{\mu_2}}\right)$$

Ecuación # 1

Las constantes usadas se muestran en la Ecuación 2

$$\begin{aligned} W^2 &= \sqrt{2\gamma_2 + 4} - 1, \\ \delta &= 1/\sqrt{\ln W}, \\ \alpha^2 &= 2/(W^2 - 1), \end{aligned} \quad \text{Ecuación \# 2}$$

En caso de que el coeficiente de Agostino sea mayor al valor de confiabilidad alfa entonces se habla de una muestra normal. En la Tabla 7 se muestran los criterios y resultados de la prueba.

Tabla 7 Datos de salida D'Agostino

D'Agostino	
n=	59
Coef. Asimetría (muestra)	0.2406
Se (asimetría)	0.3112
Coeficiente Curtosis	-0.4201
Se (Curtosis)	0.6133
Za	0.7732
Zc	-0.6850
Pvalue (asimetría)	0.2197
P value (Curtosis)	0.2467
alfa (porcentaje de error)	0.05
Límite superior	-0.3693
Límite inferior	0.8505
Límite superior (Curtosis)	-1.6220
Límite inferior (Curtosis)	0.7819
Za ² +Zc ² (estad. D'Agostino)	1.0670
Pagostino	0.587
Pagostino - alfa	0.537
¿Pagostino > alfa? Si, Normal	NORMAL

3.2.3. Ryan-Joiner

La prueba evalúa la normalidad de los datos en base a la correlación entre los mismos datos y las puntuaciones normales de los datos. Cuando el coeficiente de correlación se aproxima a 1 más probable es que la población de datos sea normal. Esta prueba (Ecuación 3) evalúa directamente la fuerza de la correlación, si se determina que está por debajo del valor crítico apropiado se rechaza la hipótesis nula de la normalidad.

$$R_p = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})b_i}{\sqrt{s^2(n-1) \sum b_i^2}}$$

Ecuación # 3

R_p Coeficiente de correlación

Y_i observaciones ordenadas

b_i puntuaciones normales de los datos ordenados

s^2 varianza de la muestra

En la tabla 8 se muestran los datos de salida de la prueba de Ryan-Joiner donde en caso de que el valor **Rp** sea mayor al indicador **cv(0.05)** se tratara de una población normal. En este caso resulto ser normal. El valor de **n** es el número de datos, que debido al periodo 1960-2018 resultan ser 59.

Tabla 8 Datos de salida Ryan-Joiner

Ryan-Joiner	
Rp =	1.00
Sum Yi*Bi=	6769.76
S=	116.40
n =	59
Sum CN^2	58.00
cv(0.10)	0.983233921
cv(0.05)	0.97955014
cv(0.01)	0.970557811
RP > cv (0.10)?	SI, NORMAL
RP > cv (0.05)?	SI, NORMAL
RP > cv (0.01)?	SI, NORMAL

3.2.4. Kolmogorov-Smirnov

En esta prueba se compara la ECDF (Función de distribución acumulada empírica) de los datos de la muestra con la distribución que se esperaría si el conjunto de datos fueran normales. Si la diferencia es grande, la prueba rechaza la hipótesis nula de normalidad. Si el valor de **p** de esta prueba es menor que el nivel de significancia, se concluye que la población es no normal.

- H_0 : Los datos siguen una distribución normal
- H_1 : Los datos no siguen una distribución normal

El estadístico se define por la ecuación 4

$$D = \max\{D^+, D^-\}$$

Ecuación # 4

En la Tabla 9 se muestran los datos de salida de la prueba K-S Test (Kolmogorov-Smirnov Test).

Tabla 9 Datos de salida K-S Test

K-S Test	
Dn	0.09165
Valor de significancia Dcr	0.1771
Dn > Dcr?	NORMAL

3.3 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD

Las estaciones climatológicas que registran los datos de precipitación diaria, al ser dispositivos muchas veces ubicados en condiciones aisladas o zonas serranas, pueden ser afectadas por varios sucesos externos e independientes de la calidad de la medición, además de que al usar estas pruebas se intenta demostrar que la tendencia original de la población cambió al ser dividida en dos periodos.

Campos Aranda (1992) enlista algunas causas de que los datos no sean homogéneos:

- Cambios en la localización de la estación, cambios en procedimientos de observación o reemplazo del operador
- Construcción de embalses cerca de la estación, deforestaciones y reforestaciones en la zona, apertura de áreas de cultivo nuevas, desecación de pantanos e industrialización en áreas circundantes

La idea principal de la homogeneidad es que no existan factores externos que cambien la cantidad de lluvia medida por estación e identificarlo mediante valores estadísticos como lo son la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de la muestra.

Existen dos tipos de pruebas, paramétricas o no paramétricas, cuál se use dependerá si las series de datos se comportan con una distribución normal o no.

Son cuatro las pruebas usadas para evaluar los datos. Las pruebas paramétricas de T Student y Cramer fueron las que se usaron para evaluar la homogeneidad de

las muestras normales, las pruebas no paramétricas de Helmert y Secuencias se usaron para evaluar la homogeneidad de las muestras no normales.

En la Tabla 10 se muestra el resumen de datos que aparece para cada estación durante su evaluación.

Tabla 10 Resumen de resultados de pruebas de Homogeneidad

Homogeneidad	
Prueba	Resultado
Helmert	HOMOGENEO
Secuencias	HOMOGENEO
T de Student	HOMOGENEO
Cramer	HOMOGENEO
Periodos Usados pruebas no paramétricas	
Periodo 1 =	1960-1984
Periodo 2 =	1985-2018

En las pruebas paramétricas se comparan dos periodos de datos. Esto tuvo dos fines, en el capítulo 2.2.1 se muestran las estaciones cuyos datos fueron evaluados ya que fueron completados por el método del USNWS, esto permitió determinar la homogeneidad de la nueva serie comparando datos observados con completados (mostrada en el camino de la izquierda de la Figura 4), mientras que el camino de la derecha divide los dos periodos a comparar en base a las observaciones gráficas de las series de datos completos, es decir las aparentes dos poblaciones que se dividen en el punto del tiempo donde se sospecha que existe cambio climático.

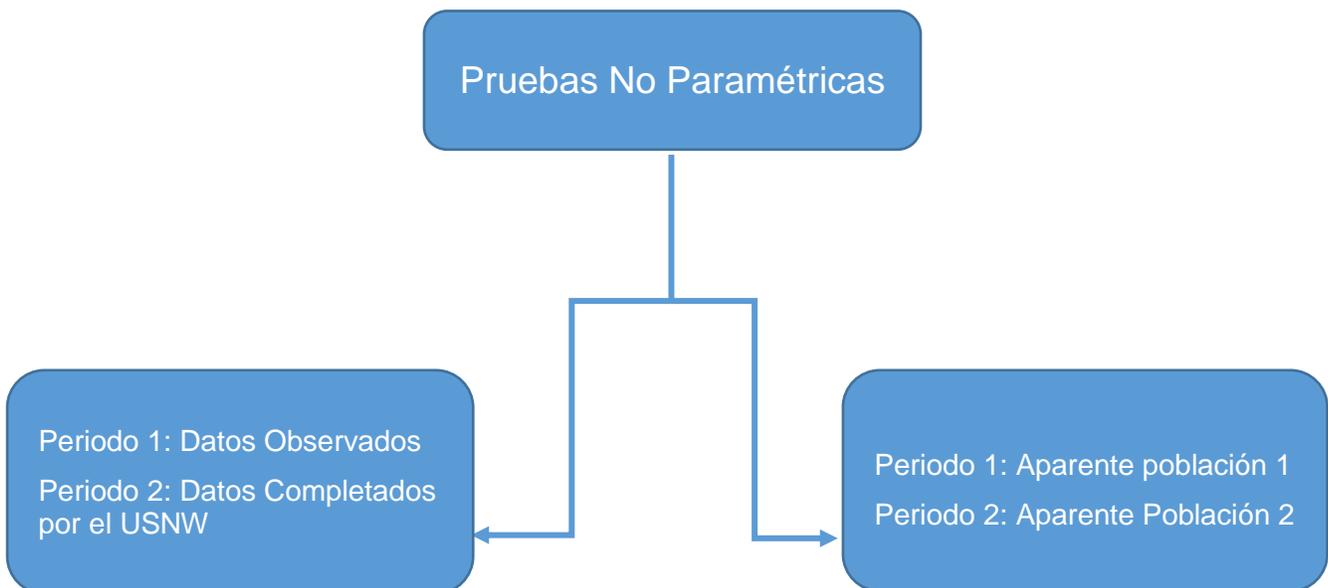


Fig. 4 División de población según el fin de la pruebas paramétricas

3.3.1. Helmert

En esta prueba se analizan los signos de las desviaciones de cada dato de precipitación P_j de la serie j respecto al valor medio de la misma es decir P_i . Si una desviación le sigue otra del mismo signo, una secuencia es creada (denotada con “S”), caso contrario fuera un cambio de signo se denotará como “C”. Cada dato exceptuando el primero define una secuencia o un cambio.

Si el valor de la raíz del número de datos menos 1 es mayor que el valor absoluto de la resta de secuencias “S” menos los cambios “C” (Ecuación 5) entonces se tratará de una serie homogénea (Tabla 11).

$$S - C = 0 \pm \sqrt{(n-1)}$$

$$S - C = \pm \sqrt{(n-1)}$$

Ecuación # 5

Tabla 11 Resultados del test de Helmert para la estación CHIHUAHUA (CNA) datos de PAA

Test de Helmert	
Promedio	405.79
S=	26
C=	32
n=	59
Raíz de n-1 =	7.62
ABS (S -C)	6
¿Raíz de n-1 > ABS (S -C)?	HOMOGENEO

3.3.2. Secuencias

La prueba analiza el número de secuencias denotadas por “U” por arriba o bajo la mediana de la serie completa, se marca con A o B si el dato correspondiente es mayor o menor que la mediana. Las secuencias de valores A y B son contabilizadas. El número de secuencias deberá estar dentro el rango de U (Tabla 12) para el número de datos de la serie. En la Tabla 13 se muestra el resultado, como el periodo fue el mismo para todas las estaciones, el Rango de U no cambia.

Tabla 12 Rango de U

Numero de datos n	Rango de U	Numero de datos n	Rango de U
12	5 – 8	32	13 – 20
14	5 – 10	34	14 – 21
16	6 – 11	36	15 – 22
18	7 – 12	38	16 – 23
20	8 – 13	40	16 – 25
22	9 – 14	50	22 – 30
24	9 – 16	60	26 – 36
26	10 – 17	70	31 – 41
28	11 – 18	80	35 – 47
30	12 – 19	100	45 – 57

Tabla 13 Resultados del test de Secuencias: Estación CHIHUAHUA (CNA) datos de PAA y rango de U (Campos, 1998)

Test de Secuencias	
Mediana	397.41
n=	59
u =	33
Rango de u para 59	25.6 - 35.4
Conclusión	HOMOGÉNEO

3.3.3. T de Student

Útil para obtener la homogeneidad de poblaciones que **no** tienen distribución normal. En ella usando el promedio, número de datos y la varianza de la serie de datos dividida en dos grupos, se comparan y permite encontrar si el conjunto se comporta de manera homogénea. Esta prueba permite detectar cambios repentinos y fuertes en el promedio de la serie (Campos, 1998), excepto cuando el número de datos entre cada periodo son desiguales, ya que la distribución de datos puede no ser sesgada.

Se dice que es un test fuerte cuando es insensible a la forma de distribución de probabilidades de la series, por esto se recomienda que las medias X_1 y X_2 de datos entre periodos sean similares.

La estadística de la prueba se define por la ecuación 6

$$t_d = \frac{X_1 - X_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}}$$

Ecuación # 6

Siendo S_1 y S_2 al cuadrado las varianzas x_i en los dos periodos de registro respectivamente. Entonces se puede calcular con la ecuación 7.

$$n_1 S_1^2 = \sum_1^{n_1} X_i^2 - \frac{1}{n_1} \left(\sum_1^{n_1} X_i \right)^2$$

Ecuación # 7

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de t de la distribución de t de Student de una o dos colas y con $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad, con un nivel de significancia de 5%. Los valores de t se muestran en la Tabla 14.

Para el caso de la detección del cambio climático, en esta prueba se comparan las dos poblaciones previamente divididas en dos grupos de periodos tras un análisis gráfico (Capítulo 4). La aplicación de resultados se muestra en la Tabla 15.

Tabla 14 Distribución t de Student y grados de significancia

Grados De libertad	Nivel de significancia 5%	Grados de libertad	Nivel de Significancia 5%
1	6.314	8	1.860
2	2.92	9	1.833
3	2.363	10	1.812
4	2.132	11	1.796
5	2.015	12	1.782
6	1.943	40	1.684
7	1.895	60	1.671

Tabla 15 Resultados del T de Student: Estación CHIHUAHUA (CNA) datos de PAA

Prueba T de Student	
Promedio 1	394.83
# de datos n_1	25.00
varianza 1	10,678.07
Promedio 2	413.84
# de datos n_2	34.00
varianza 2	16,553.29

Prueba T de Student	
td=	-0.60
Grados de libertad "v"	57.0
t(5%)	1.6753
td =	0.5980
Conclusión	HOMOGÉNEO

3.3.4. Cramer

Pensada para poblaciones con distribución normal, la prueba al igual que T de Student divide la serie de datos en dos poblaciones, para buscar homogeneidad de la serie discriminando diferencias entre los dos periodos de datos. El objetivo es tratar de comprobar que el análisis gráfico es correcto y las dos poblaciones seleccionadas no son homogéneas, lo cual podría ser aparente evidencia de cambio climático.

En esta prueba las diferencias entre el número de datos de un periodo respecto a otro pueden ser muy distintos. La prueba será cuando t_k (Ecuación 8) sea mayor al valor de significancia de 5% de la distribución t de Student.

$$t_k = \left\{ \frac{n'(n-2)}{n-n'[1+(Tk)^2]} \right\}^{\frac{1}{2}} (Tk)$$

Ecuación # 8

En la Tabla 16 se muestra la estadística de la fórmula de Cramer así como los datos de salida de la prueba de Cramer analizando la serie de datos 1960-2018 dividiendo en dos periodos de datos. Uno de 1960-1984 y el otro 1985-2018.

Tabla 16 Resultados del test de Cramer: Estación CHIHUAHUA (CNA) datos de PAA

Prueba de Cramer	
Promedio	405.8
Desviación Estándar	118.0
n =	59.0
media k=	413.8
n' =	34.0
τk=	0.1
tk=	0.6
t(5%)	1.6753
tk=	0.6029
Conclusión	HOMOGÉNEO

3.4 PRUEBAS DE PERSISTENCIA Y TENDENCIA

Las pruebas de persistencia y tendencia se usarán solo cuando el análisis gráfico lo requiera, esto será cada vez que las líneas de promedio móvil marquen un segundo grupo más allá del periodo de datos que existen.

La persistencia es un rasgo no aleatorio de una serie de datos cronológica que marca la tendencia que se observa en los registros que tan fuertemente es afectado un evento por el que le antecede (Campos, 1998).

3.4.1. Persistencia por la prueba de Anderson

En esta prueba se tiene un nivel de significancia del 5%. Entonces, se calcula un valor conocido como r_1 , el cual debe entrar en la zona delimitada por las curvas de control de la Figura 5. De ser así se considera **sin persistencia**, en caso contrario se le considerará de **tendencia aleatoria** (Campos, 1998).

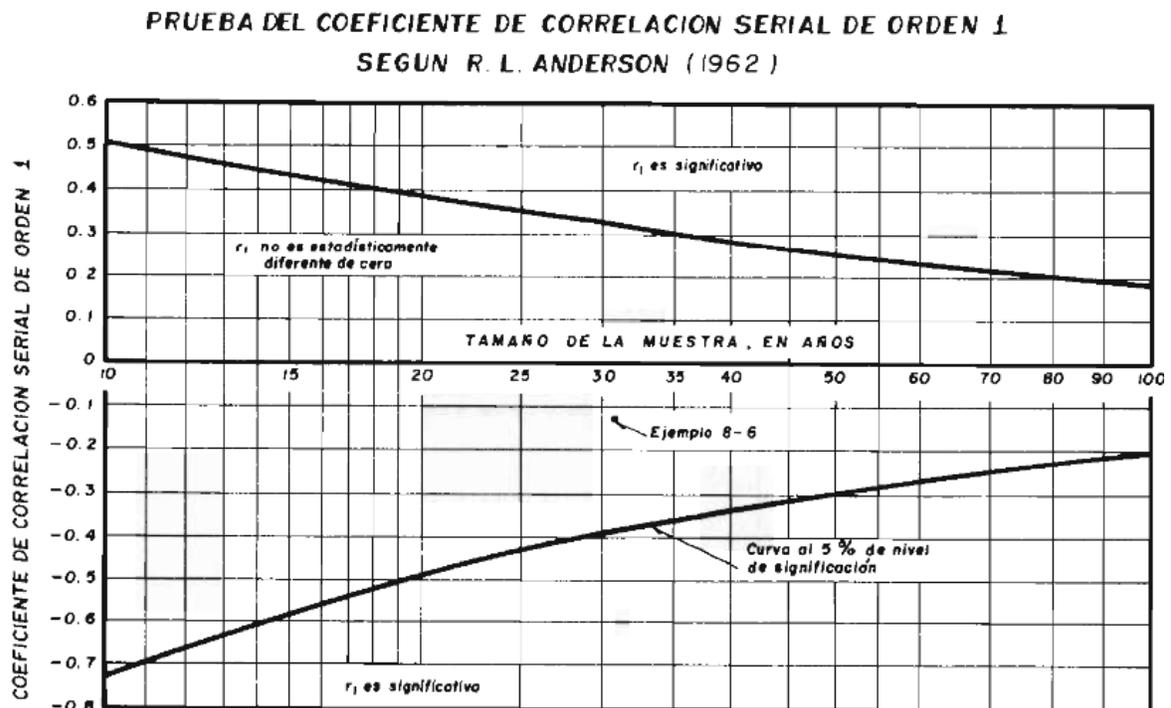


Fig. 5 Campos, Aranda (1998). Prueba de Anderson

3.4.2. Persistencia por prueba del punto de quiebre

Se puede decir que en una serie de datos que se presenta de manera cronológica, la persistencia se denota por un número de picos y puntos de quiebre bajos, en comparación con los que habría si fuera una tendencia aleatoria. Se evalúa el número de picos y puntos de quiebre, por medio de un valor "U" si este valor es mayor que 1.96 entonces existe persistencia, caso contrario será aleatoria.

4. RESULTADO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO A LAS SERIES DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

Se recopilaron en primera instancia los resultados de pruebas de normalidad en el apartado 4.1, para determinar con esta información cuáles pruebas de homogeneidad correspondientes.

4.1 PRUEBAS DE NORMALIDAD

En la Tabla 17 se resumen los resultados de pruebas de normalidad. Como criterio, se declaró como normal a la serie de datos de precipitación anual acumulada a aquellas series que tuvieron 3 o más resultados de normalidad, a las pruebas que tuvieron dos resultados como “normal” y dos como “no normal” se analizaron de manera individual los valores de las 4 pruebas para definir a cual distribución se acercaba más, es por esto que hay estaciones que tienen resultados empatados de “normal” y “no normal” pero algunas fueron declaradas con una u otra distribución.

Por ultimo las estaciones que tuvieron tres o cuatro resultados como “no normal” fueron definidas con esta designación.

Tabla 17 Resultados de pruebas de normalidad

ID	Nombre Estación	Pearson	D'Agostino	Ryan-Joiner	K-S Test	Normalidad
1	ABRAHAM GONZÁLEZ (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
2	ASCENSIÓN (SMN)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
3	BACHINIVA (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	X
4	BISMARCK (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	X
5	CAMARGO (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
6	CASAS GRANDES (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
7	CD. JUÁREZ (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
8	CHIHUAHUA (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
9	COLINA (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
10	COYAME (SMN)	NO NORMAL	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	X

ID	Nombre Estación	Pearson	D'Agostino	Ryan-Joiner	K-S Test	Normalidad
11	CREEL (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	X
12	CUAUHTÉMOC (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	X
13	DELICIAS (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
14	EL SITIO (SMN)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
15	EL TINTERO (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
16	FRANCISCO I. MADERO (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
17	GUACHOCHI (CFE)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	X
18	GUADALUPE Y CALVO (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	X
19	JIMÉNEZ (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
20	LAS LAJAS (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
21	LUIS L. LEÓN (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
22	MORIS (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
23	NOROGACHI (CFE)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	X
24	OJINAGA (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
25	PARRAL (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
26	PARRITA (SMN)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
27	PEÑITAS (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
28	SAMALAYUCA (SMN)	NO NORMAL	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	X
29	TACUBAYA (SMN)	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
30	TEMOSACHIC (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
31	TUBARES (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
32	URIQUE (CNA)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	X
33	VALLE DE ZARAGOZA (CNA)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
34	VILLA AHUMADA (SMN)	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓
35	VILLA CORONADO (SMN)	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL	✓

En total 10 estaciones resultaron con distribución “No Normal”, a estas estaciones se les evaluó su homogeneidad con las pruebas de Helmert y Secuencias, de las cuales la mayoría se concentra en la porción suroeste del estado.

Las 25 restantes tienen una distribución “Normal” y por tanto se usaron las pruebas de homogeneidad de Cramer y T de Student para evaluar las distintas poblaciones, en la Figura 6 se encuentra el mapa de distribución de estaciones por normalidad.

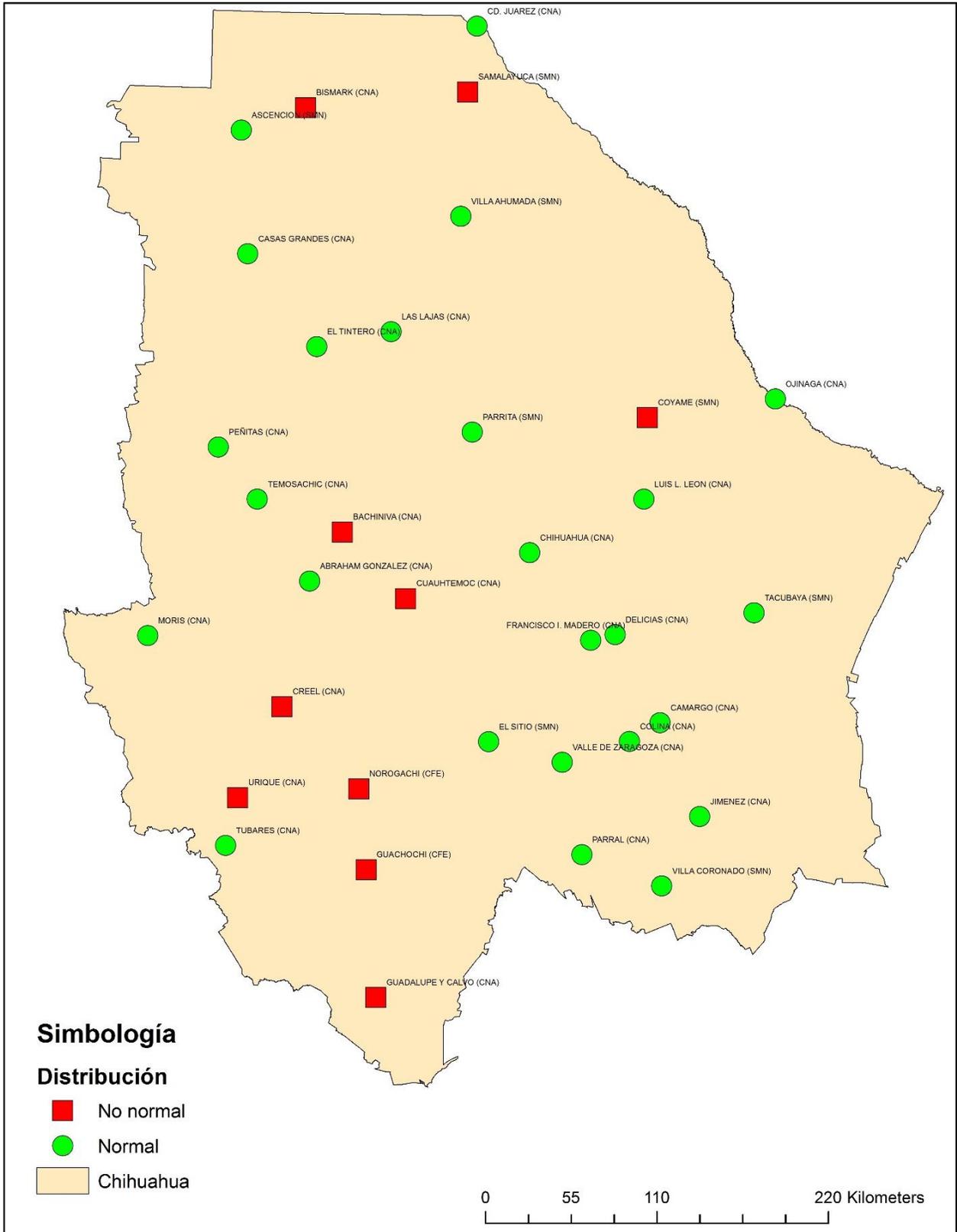


Fig. 6 Mapa de estaciones climatológicas por distribución estadística

4.2 ESTACIONES SIN APARENTE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO

En las estaciones de la Tabla 18 no se encontraron aparentes evidencias de cambio climático, en la mayoría de los resultados las pruebas dieron homogéneas, además de que el análisis gráfico (Anexo 8.2) no indica la presencia marcada de dos poblaciones aparentes.

Tabla 18 Resumen de análisis gráfico y de homogeneidad a estaciones que no muestran aparente evidencia de cambio climático

ID	Nombre	Homogeneidad	Notas
1	ABRAHAM GONZÁLEZ (CNA)	HOMOGÉNEO	La línea de evolución del promedio es prácticamente igual al promedio, la línea de promedio móvil oscila por arriba y abajo del promedio de la serie y cruza ligeramente en el año de 1995, las pruebas de homogeneidad para distintos periodos mostraron que se tratasen de dos poblaciones distintas
2	ASCENSIÓN (SMN)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
3	BACHINIVA (CNA)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
4	BISMARCK (CNA)	HOMOGÉNEO	Existe un máximo de precipitación en la gráfica en la década de los 70, pero no afecta la homogeneidad ni resultado en la división de dos poblaciones distintas aunque se probaran varios periodos de tiempo.
6	CASAS GRANDES (CNA)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
7	CD. JUÁREZ (CNA)	HOMOGÉNEO	Se percibe un cambio del periodo de 1960-1973 respecto a 1974-1995 luego vuelve a ver otro cambio en el periodo de 1995-2005. Los periodos de alta y baja precipitación que suceden hacen difícil evaluar estadísticamente las poblaciones, pero las pruebas de homogeneidad muestran un probable cambio en 1973 pero al ser pocos datos los evaluados (13 contra 46) se considera que la prueba no es representativa de su homogeneidad. Por lo que se descartó que exista un punto en el tiempo con probable evidencia de cambio climático.

ID	Nombre	Homogeneidad	Notas
8	CHIHUAHUA (CNA)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
10	COYAME (SMN)	HOMOGÉNEO	Gráficamente se observa en 1995 las lluvias comienzan bajar por debajo del promedio pero estadísticamente las pruebas en varios periodos muestra que se comporta de manera homogénea, además que las diferencias en el promedio son bajas.
13	DELICIAS (CNA)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
14	EL SITIO (SMN)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
23	NOROGACHI (CFE)	HOMOGÉNEO	Se aplicaron pruebas de persistencia y tendencia, debido a que se encontró un aparente comportamiento de disminución de la precipitación a partir del año 2005, pero mostraron ser aleatoria además de tener resultados homogéneos para la serie.
25	PARRAL (CNA)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
26	PARRITA (SMN)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
28	SAMALAYUCA (SMN)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación
31	TUBARES (CNA)	HOMOGÉNEO	Se definen 3 periodos 1960-1981, 1982-2001 y 2002-2018
32	URIQUE (CNA)	NO HOMOGÉNEO	Se encuentran periodos alternados de lluvias por encima y por debajo del promedio, lo que hace un efecto de ciclo que no detecta las pruebas. Además la línea de tendencia se mantiene recta.
33	VALLE DE ZARAGOZA (CNA)	HOMOGÉNEO	Ni las gráficas ni las pruebas de homogeneidad muestran un cambio puntual en el comportamiento de la precipitación

4.3 ESTACIONES CON APARENTE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO

4.3.1. Camargo

Las pruebas de homogeneidad muestran que existe un comportamiento en la serie de datos cuando se parte para el periodo 1960-1991 y 1992-2018.

Con una diferencia entre las medias de cada serie de 56.45 mm de disminución. En Camargo se presentan precipitaciones menores con años de sequía como 2011, las desviaciones estándar de ambos periodos y varianzas no son muy distintas lo cual quiere decir que la variación de la lluvias mantiene la misma tendencia oscilatoria en ambos periodos, sólo que en el último va a la baja. Podría señalar a 1991 como el año de cambio (Figura 7).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est.	Varianza	Coficiente Varianza
Inicia	1960	1991	371.927	107.336	11,520.93	0.289
Termina	1992	2018	315.477	108.561	11,785.48	0.344
Diferencia entre medias			56.45			

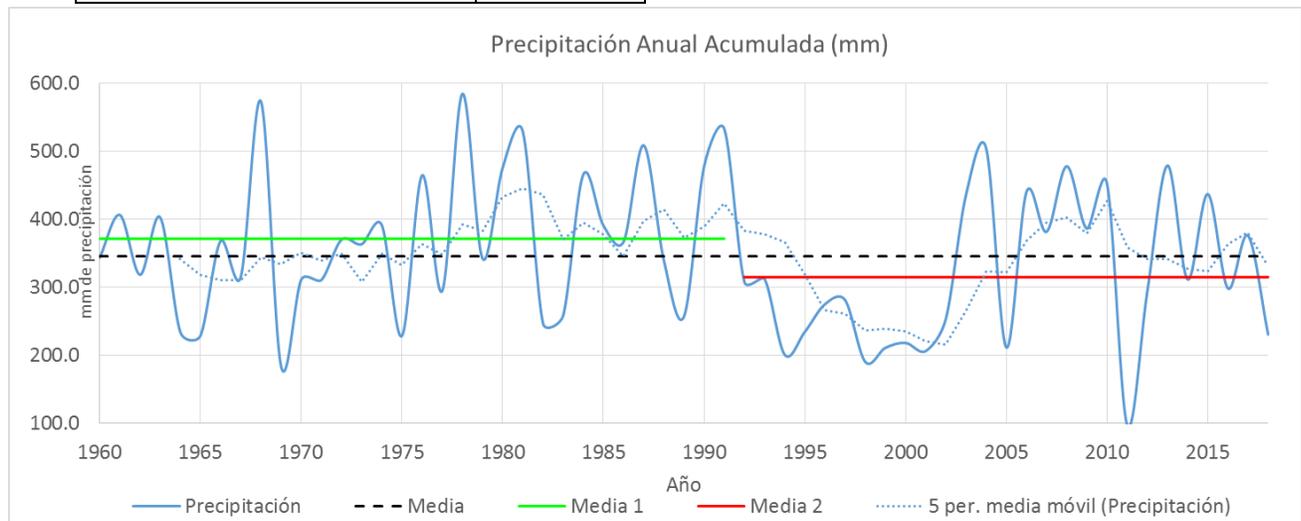


Fig. 7 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1991 Estación Camargo

4.3.2. Colina

El periodo para pruebas tiene un rango de años desbalanceado de 41 contra 18 años, sin embargo gráficamente y estadísticamente se detectaron dos poblaciones con tendencia a mayor cantidad de precipitación.

Un aumento de 64.01 mm de lluvia anual promedio (Figura 8). La media móvil a 5 años respalda el cambio así como las pruebas de homogeneidad

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est.	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	2000	336.419	108.371	11,744.18	0.322
Termina	2001	2018	400.465	140.645	19,781.11	0.351
Diferencia entre medias			64.05			

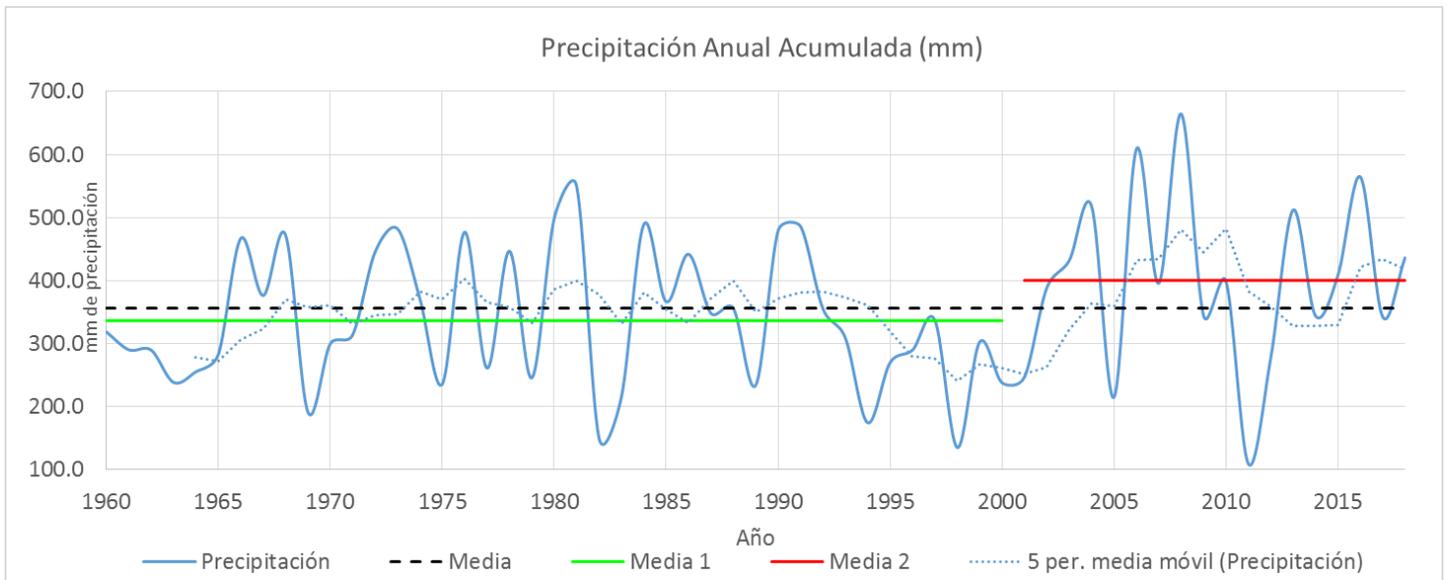


Fig. 8 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 2000 Estación Colina

4.3.3. Creel

En esta región serrana históricamente ocurren altas precipitaciones sin embargo a partir de 1995 se presenta un escalón en precipitación media de 90.1 mm de lluvia anual. A pesar de existir un valor atípico en 2004, en general se tiene una tendencia a la baja aleatoria.

La varianza y el coeficiente de variación muestran que los periodos se están alargando lo que puede ser indicativo de más días de lluvias intensas y también de sequía (Figura 9).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est.	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1994	751.544	141.843	20,119.39	0.189
Termina	1995	2018	661.536	191.086	36,513.75	0.289
Diferencia entre medias			90.01			

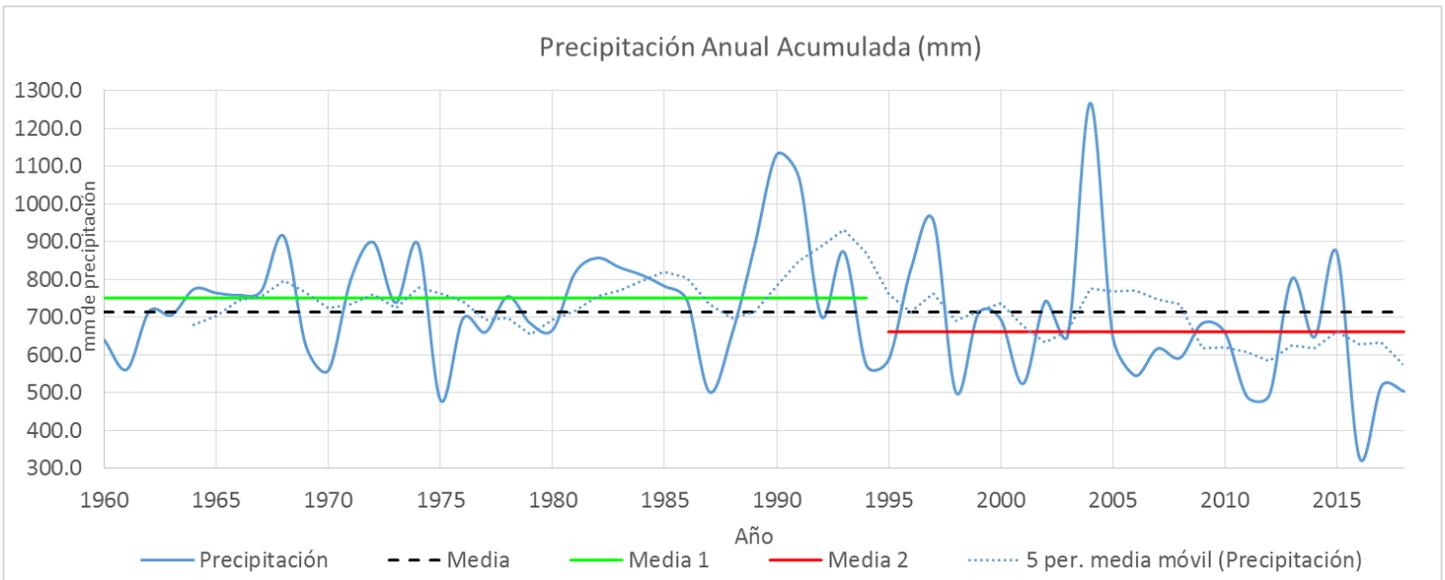


Fig. 9 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1994 Estación Creel

4.3.4. Cuauhtémoc

Se muestra un escalón a la baja en la precipitación media anual. Los últimos años también presentan tendencia aleatoria a la baja (Figura 10).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1993	483.772	140.114	19,631.93	0.290
Termina	1994	2018	421.955	104.870	10,997.78	0.249
Diferencia entre medias			61.82			

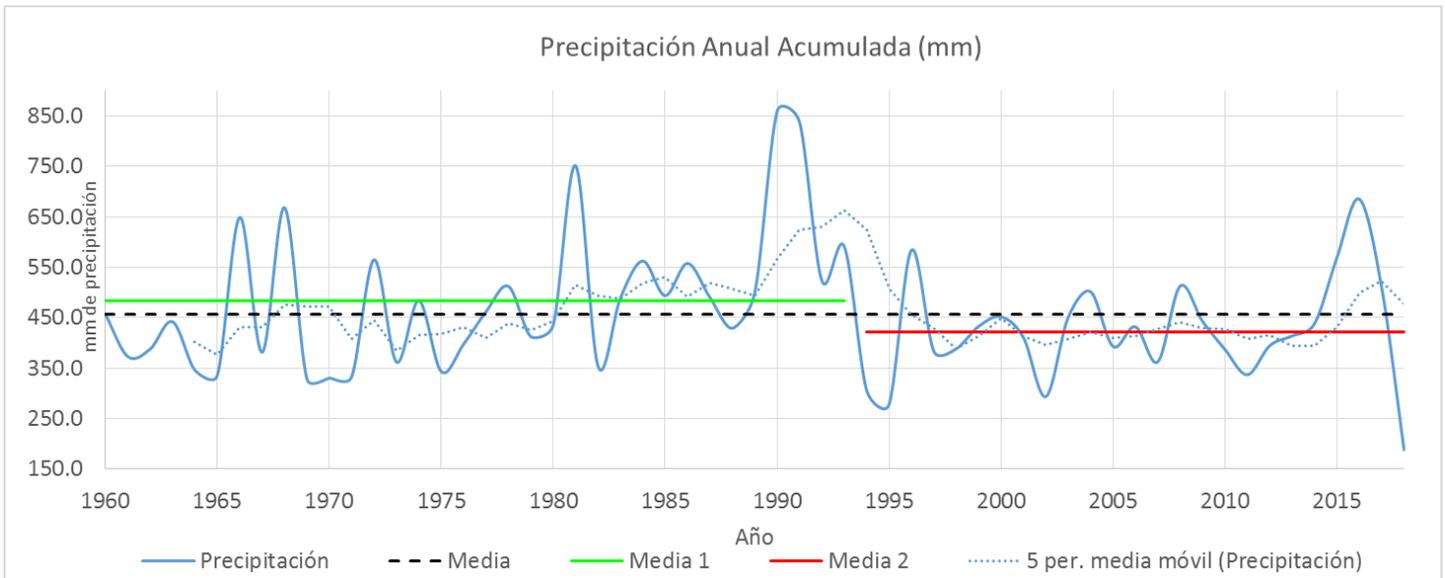


Fig. 10 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1993 Estación Cuauhtémoc

4.3.5. El Tintero

Las pruebas de homogeneidad que comparan los dos periodos de datos marcan una posible evidencia de cambio climático al resultar no homogéneas, gráficamente existe un escalón creciente en la media anual de precipitación. Fue una de tres estación cuyo cambio fue creciente (Figura 11).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1985	318.138	87.135	7,592.44	0.274
Termina	1986	2018	374.982	110.701	12,254.76	0.295
Diferencia entre medias			56.84			

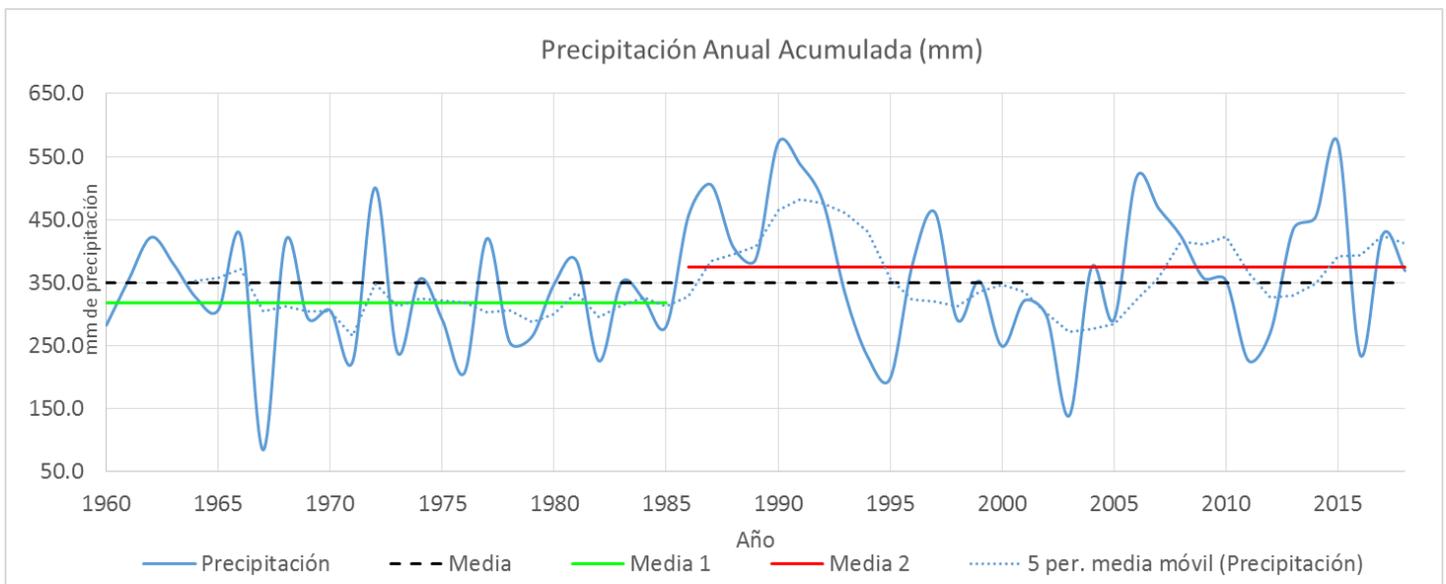


Fig. 11 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1985 Estación El Tintero

4.3.6. Francisco I. Madero

A pesar de que no existe una tendencia marcada, las pruebas de homogeneidad detectaron dos poblaciones distintas en las series de tiempo, con punto de cambio en 1992. El cambio en la media es relativamente pequeño y la desviación estándar y varianza no muestran grandes diferencias (Figura 12).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1992	330.302	103.787	10,771.81	0.314
Termina	1993	2018	281.415	111.533	12,439.56	0.396
Diferencia entre medias			48.89			

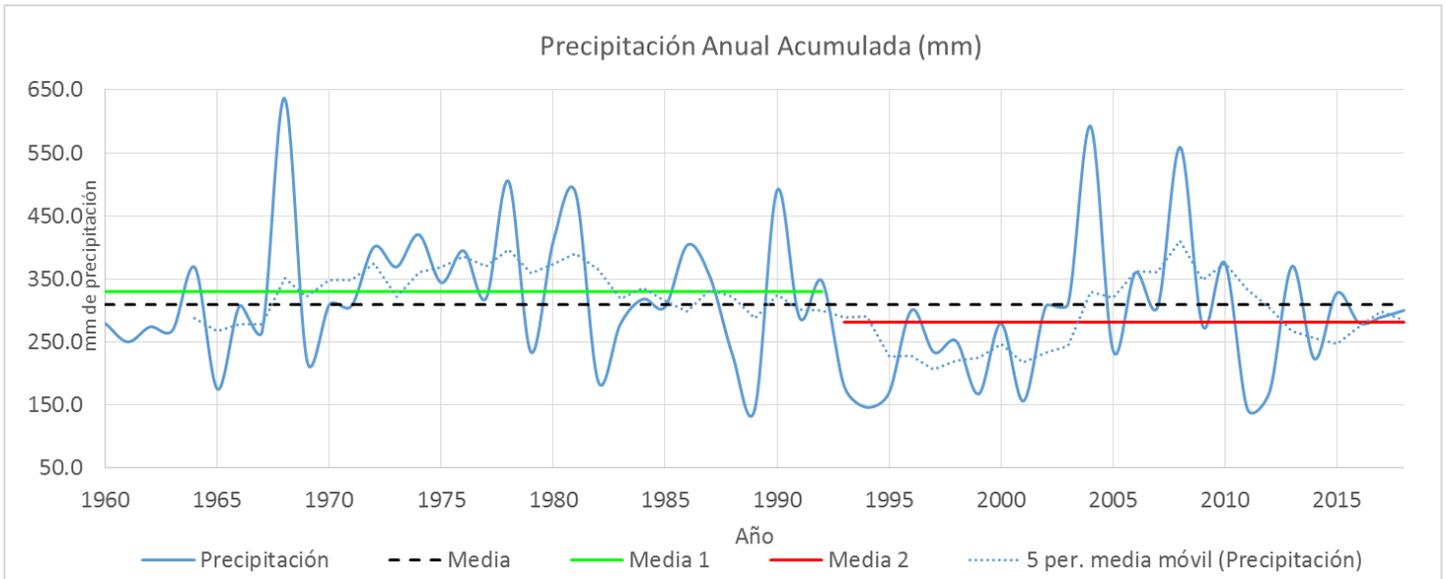


Fig. 12 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1992 Estación Francisco I. Madero

4.3.7. Jiménez

Se detectó una aparente evidencia de cambio climático en 1992, cualquier otro periodo de evaluación distinto en las pruebas de homogeneidad no resalta ningún cambio, el escalón promedio bajó 51.81 mm en la media anual y las desviaciones estándar presentan valores cercanos (Figura 13).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1991	371.291	99.256	9,851.75	0.267
Termina	1992	2018	319.477	116.681	13,614.54	0.365
Diferencia entre medias			51.81			

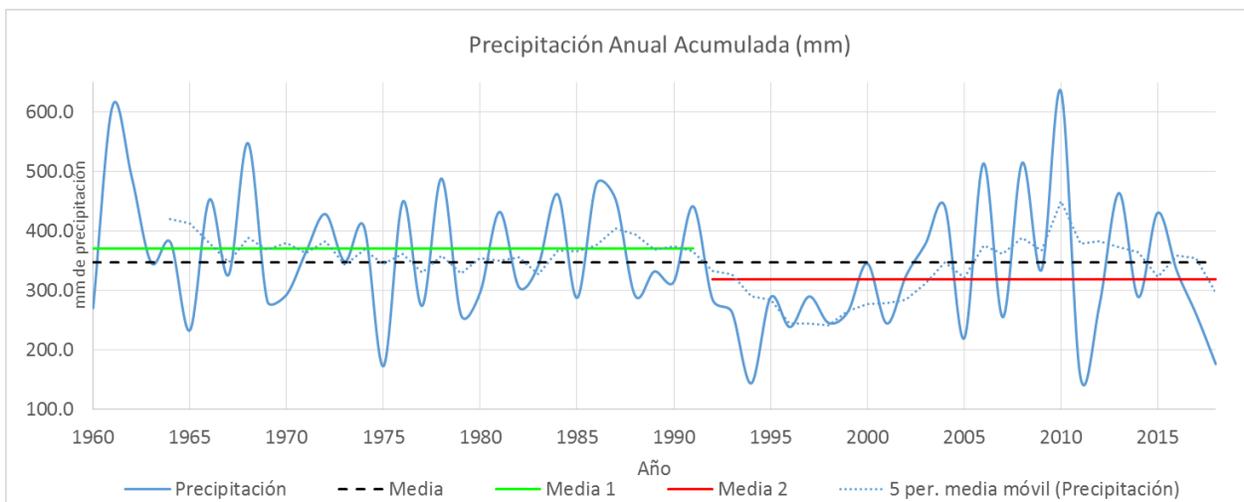


Fig. 13 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1991 Estación Jiménez

4.3.8. Las Lajas

Las pruebas de homogeneidad mostraron tres posibles periodos como poblaciones distintas: 1960-1985, 1986-2005 y 2006-2018. El escalón más marcado ocurre en 1985 con una diferencia de medias de precipitación anual de 49.02 mm. Evaluar un posible cambio climático es difícil ya que no existe tendencia y los demás parámetros estadísticos resultaron muy similares entre sí. Se declaró que existe aparente cambio más que nada en base al gráfico (Figura 14).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coficiente de Variación
Inicia	1960	1985	290.026	84.865	7,202.02	0.293
Termina	1986	2018	339.045	94.004	8,836.70	0.277
Diferencia entre medias			49.02			

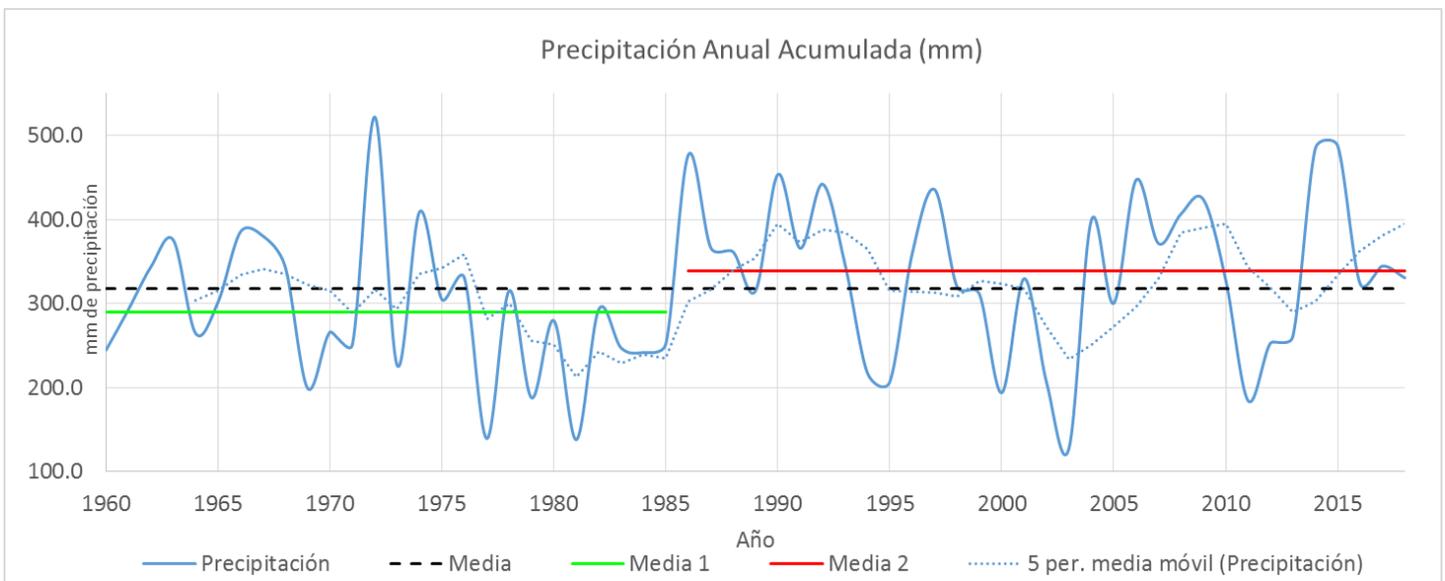


Fig. 14 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1991 Estación Jiménez

4.3.9. Luis L. León

Evaluando la homogeneidad separando periodos en 1994 se encontró que las poblaciones eran distintas, el escalón de la media disminuye 51.41 mm anuales. La desviación estándar, varianza y coeficiente de variación se encuentran similares entre periodos (Figura 15).

Se puede apreciar una tendencia a la baja pero no presenta persistencia.

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coficiente de Variación
Inicia	1960	1994	316.383	104.853	10,994.11	0.331
Termina	1995	2018	264.969	115.115	13,251.36	0.434
Diferencia entre medias			51.41			

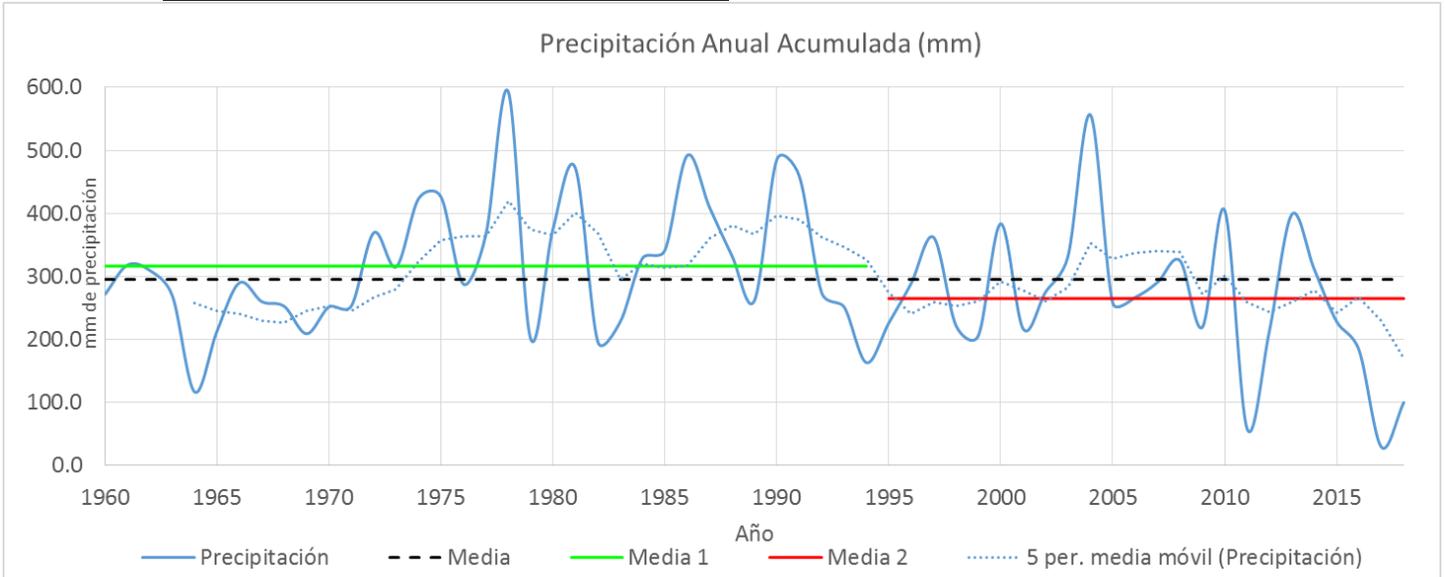


Fig. 15 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1994 Estación Luis L. León

4.3.10. Moris

También en esta estación se identificó un cambio en la década de los 90s, en 1990. Uno de los escalones más grandes entre medias de 125.53 mm anuales decreciente entre el periodo 1 y el periodo 2. Si bien la variación entre ambos periodos es muy similar, la desviación estándar y la varianza en especial se alejan bastante entre ellos (Figura 16).

El coeficiente de variación muestra que las ondulaciones de la serie de tiempo se mantienen constantes.

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coficiente de Variación
Inicia	1960	1990	915.183	244.107	59,588.32	0.267
Termina	1991	2018	789.656	202.305	40,927.15	0.256
Diferencia entre medias			125.53			

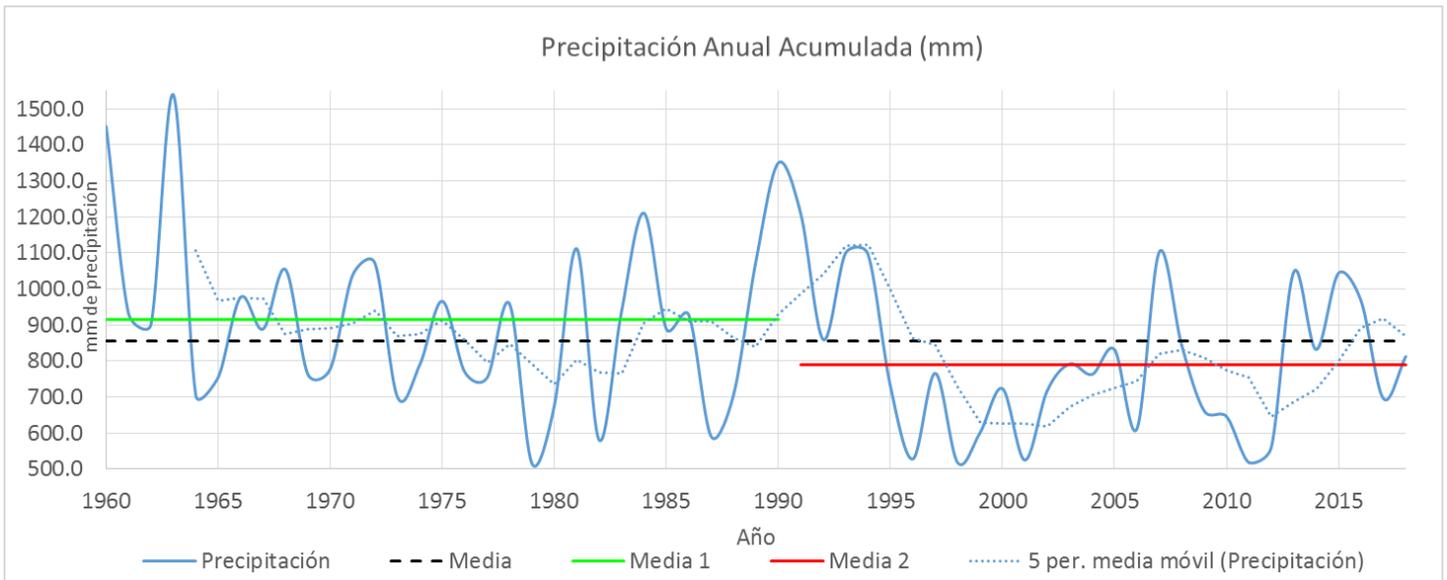


Fig. 16 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1990 Estación Moris

4.3.11. Ojinaga

Cualquier combinación de dos periodos evaluados muestran no ser homogéneos, por lo que se definió la fecha de cambio basada en la media móvil a 5 años, cuando cruza el plano de la media de la muestra (Figura 17).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1993	291.870	92.110	8,484.23	0.316
Termina	1994	2018	203.734	76.449	5,844.40	0.375
Diferencia entre medias			88.14			

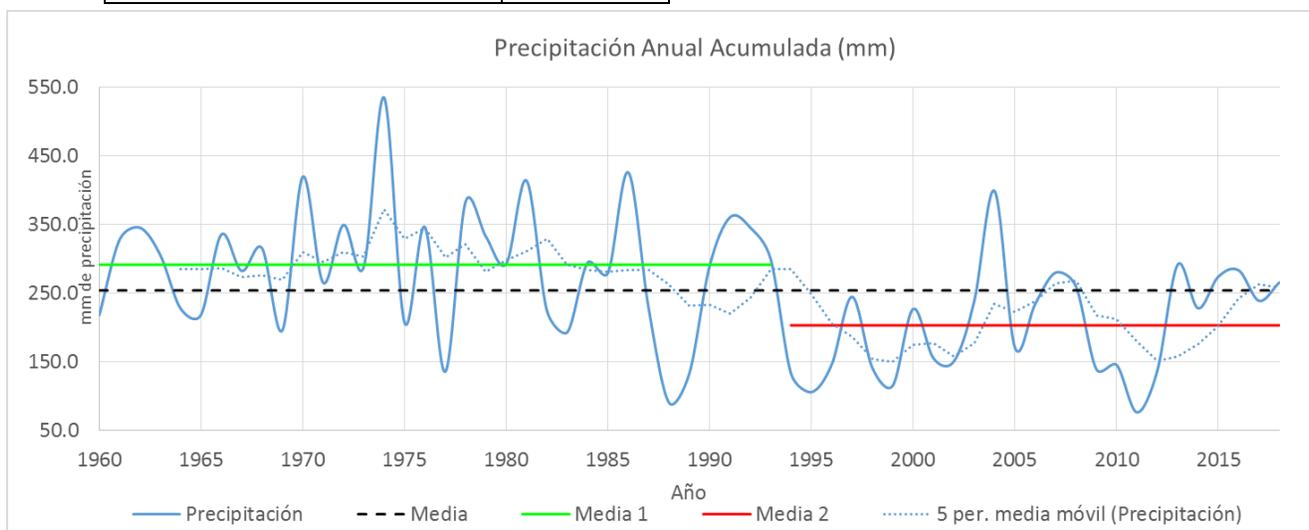


Fig. 17 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1993 Estación Ojinaga

4.3.12. Peñitas

Se encontró una baja en la media de la precipitación de 69.64 mm y las pruebas de homogeneidad resaltaron la existencia de dos poblaciones distintas, gráficamente es evidente el cambio en 1994, donde baja la precipitación (Figura 18).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1993	624.184	153.045	23,422.85	0.245
Termina	1994	2018	554.548	137.104	18,797.53	0.247
Diferencia entre medias			69.64			

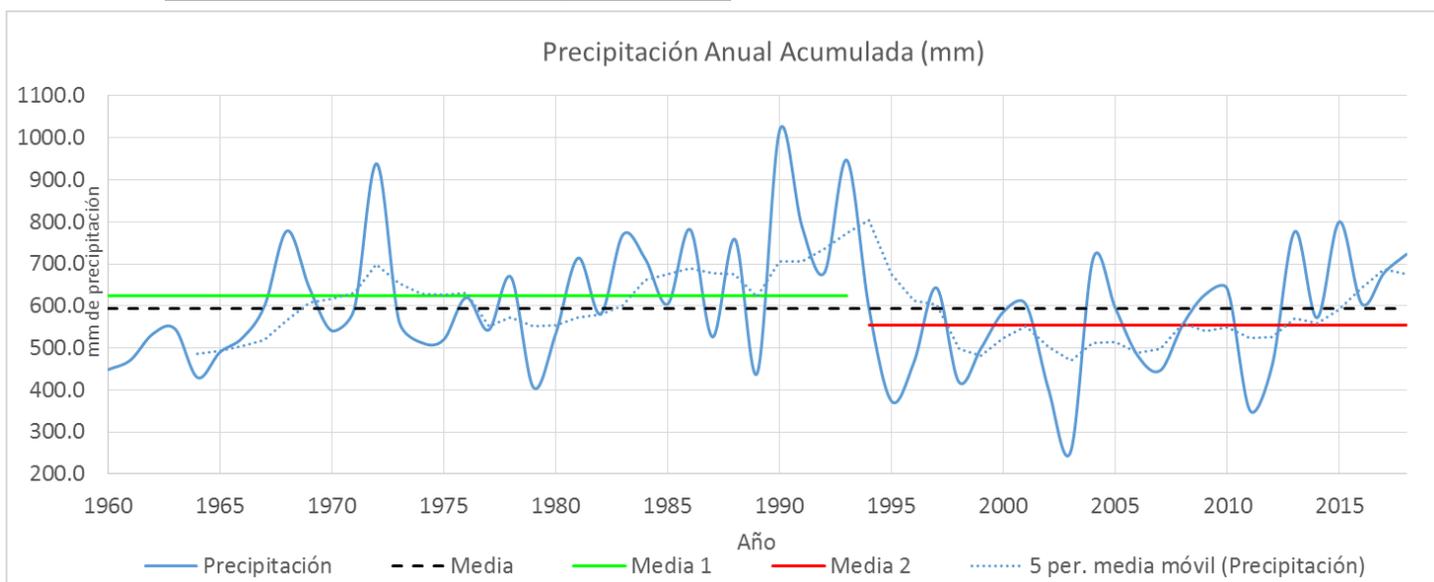


Fig. 18 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1993 Estación Peñitas

4.3.13. Tacubaya

Las pruebas de homogeneidad marcan dos poblaciones distintas partiendo desde 1985 pero gráficamente ese cambio se ve respaldado desde 1991 donde el escalón que forma la diferencia entre las medias de ambos periodos es de 110.81 mm decreciente. Los otros parámetros estadísticos de desviación estándar, varianza y coeficiente de variación resultaron similares entre sí (Figura 19).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1991	388.083	119.844	14,362.60	0.309
Termina	1992	2018	277.268	110.713	12,257.47	0.399
Diferencia entre medias			110.81			

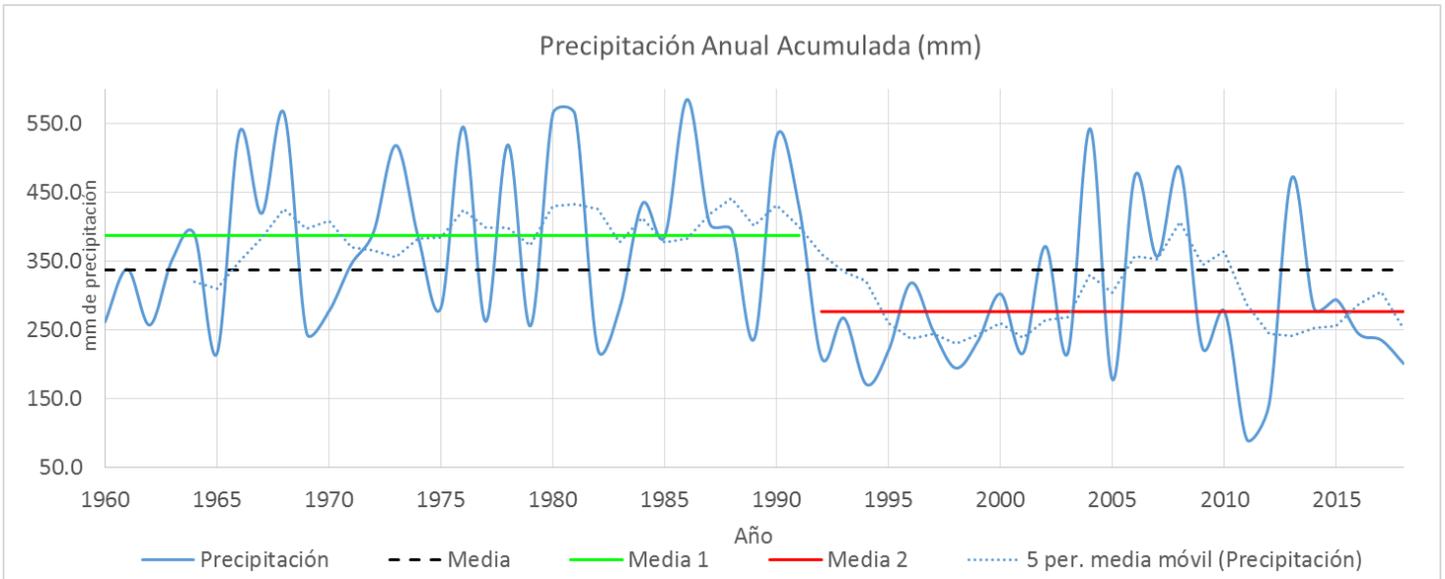


Fig. 19 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1991 Estación Tacubaya

4.3.14. Temósachic

Se muestra un cambio a la baja en 1976, se debe tomar con reserva debido al número de datos, tiene tendencia a la baja pero no muestra ser persistente, el escalón entre medias es de los mayores que se encontraron (Figura 20).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1976	544.711	150.175	22,552.51	0.276
Termina	1977	2018	470.573	111.115	12,346.61	0.236
Diferencia entre medias			74.14			

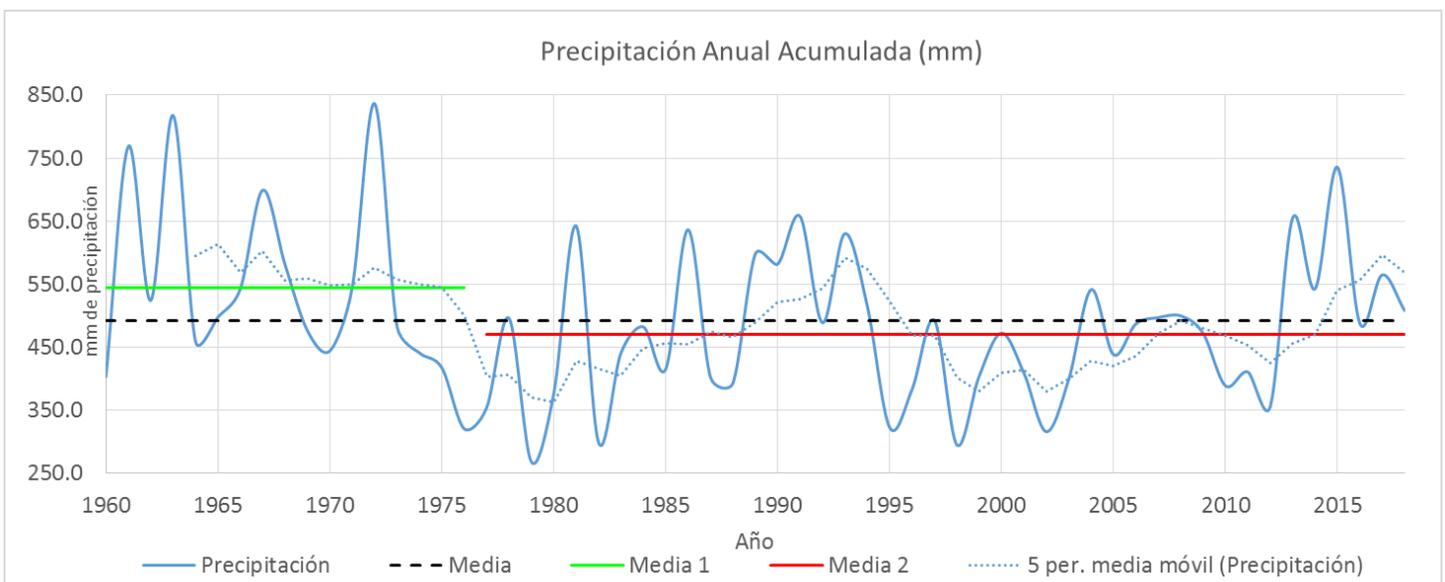


Fig. 20 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1976 Estación Temósachic

4.3.15. Villa Ahumada

Se encontró una aparente evidencia de cambio en 1992 con una diferencia entre medias de 63.14 mm a la baja, los parámetros estadísticos no muestran muchas diferencias pero las pruebas de homogeneidad marcan dos poblaciones distintas sin tendencia (Figura 21).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coficiente de Variación
Inicia	1960	1992	312.785	92.905	8,753.12	0.297
Termina	1993	2018	249.641	83.306	6,939.84	0.334
Diferencia entre medias			63.14			

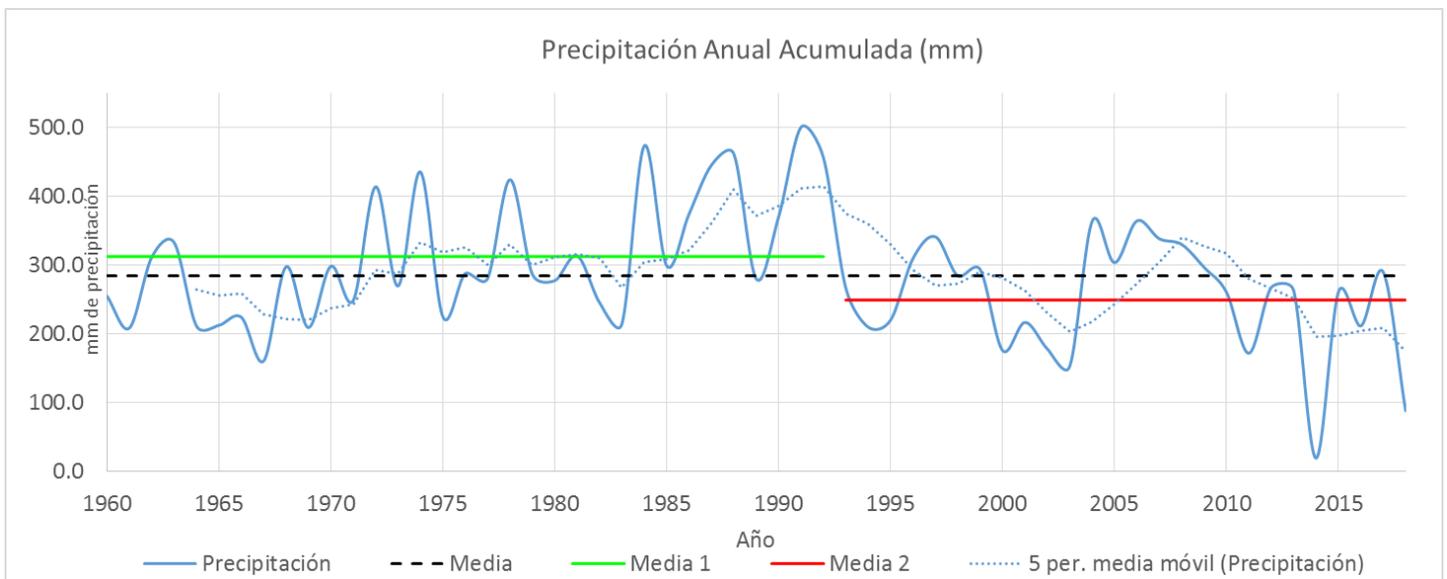


Fig. 21 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1992 Estación Villa Ahumada

4.3.16. Villa Coronado

Se encontraron dos periodos partidos en 1991, con un escalón grande de 115.61 mm de precipitación. La varianza del periodo uno es lo doble del periodo dos. Se considera que tiene tendencia pero no persistencia (Figura 22).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coficiente de Variación
Inicia	1960	1991	510.758	181.790	33,047.76	0.356
Termina	1992	2018	395.144	123.554	15,265.65	0.313
Diferencia entre medias			115.61			

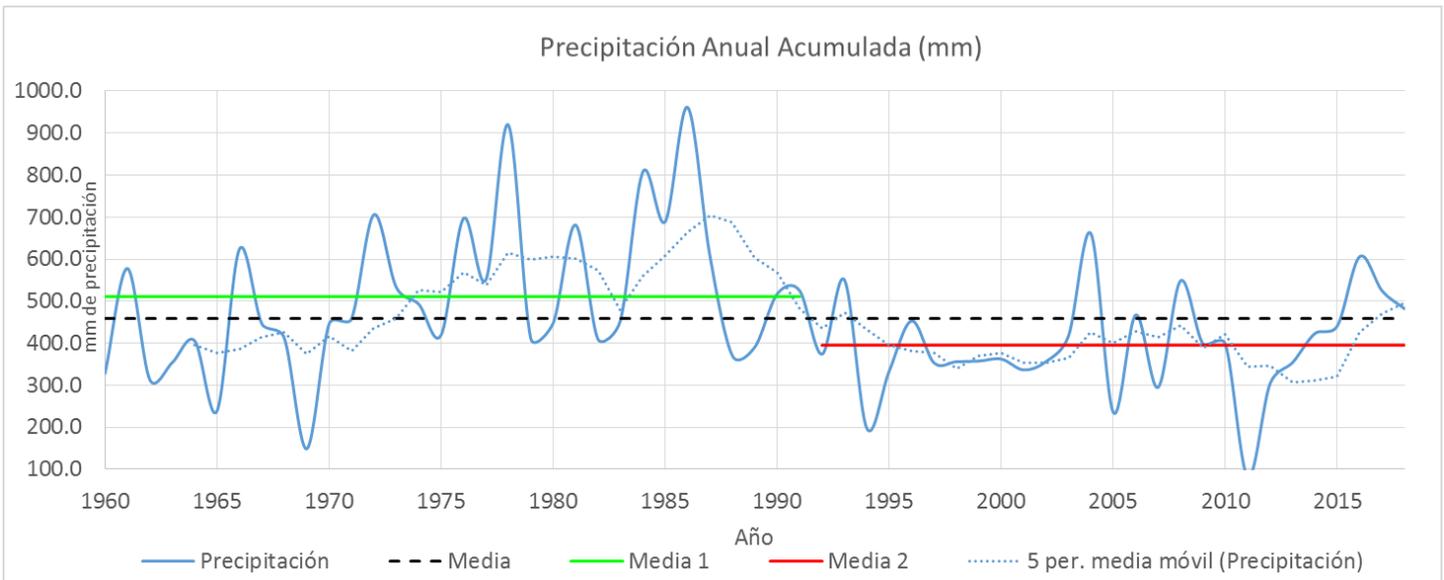


Fig. 22 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 1991 Villa Coronado

4.4 ESTACIONES CON CASOS ESPECIALES

4.4.1. Guachochi

Se le denominó como un caso especial ya que los datos de precipitación de los últimos 5 años son atípicamente bajos, lo cual impacta en la estadística de la serie y la hace difícil de interpretar. Las pruebas de homogeneidad marcan poblaciones distintas. El escalón que se forma entre medias es extraordinariamente grande, por lo que los datos se deben tomar con reserva, es decir indefinido (Figura 23).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est.	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	2004	782.129	180.091	32,432.62	0.230
Termina	2005	2018	585.957	193.418	37,410.47	0.330
Diferencia entre medias			196.17			

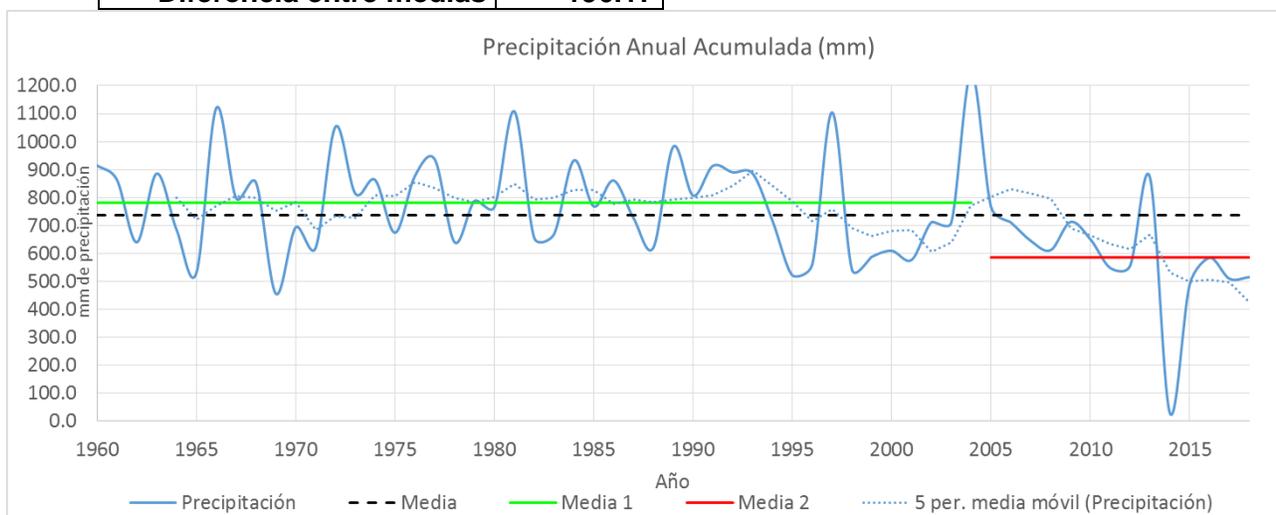


Fig. 23 Análisis de evidencia de cambio climático, aparente año de cambio: 2004 Guachochi

4.4.2. Guadalupe y Calvo

Al igual que en Guachochi, la serie baja de manera extrema sus valores de precipitación en los últimos años, lo cual puede ser indicativo de errores en la medición de datos, pero considerando que las fuentes son correctas, la interpretación se vuelve extremadamente difícil, ya que en cualquier punto las pruebas estadísticas marcan la serie como no homogénea, aunado a esto, el escalón que se forma entre las medias de los dos periodos es extraordinariamente grande con 307.78 milímetros. (Figura 24).

	Periodo 1	Periodo 2	Media (mm)	Desv. Est	Varianza	Coefficiente de Variación
Inicia	1960	1995	1159.240	191.683	36,742.45	0.165
Termina	1996	2018	851.456	397.746	158,201.57	0.467
Diferencia entre medias			307.78			

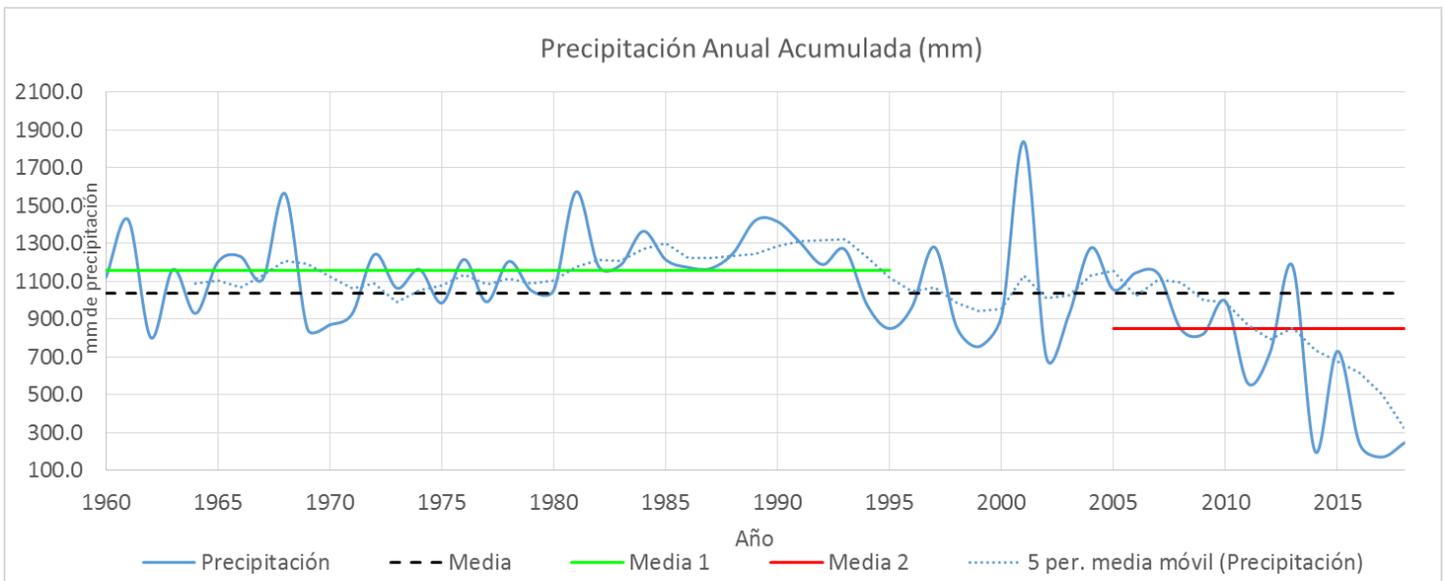


Fig. 24 Estación Guadalupe y Calvo

5. DISCUSIÓN

5.1 IDENTIFICACIÓN DE EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO

En total se encontraron 16 estaciones con aparente evidencia de cambio climático en base al análisis gráfico y estadístico, en la Tabla 19 se presentan ordenados de mayor a menor en base a las diferencias entre medias anuales de los periodos en que fueron partidas las series. Es relevante señalar que todos los saltos en medias anuales fueron mayores de 48.9 milímetros de precipitación.

Tabla 19 Resumen de parámetros encontrados en estaciones con aparente evidencia de cambio climático.

Nombre	Diferencia entre medias anuales (mm)	Media 1	Media 2	Desv. Est. 1	Desv. Est. 2	Varianza 1	Varianza 2	Coef. Var. 1	Coef. Var. 2
MORIS (CNA)	125.5	915.2	789.7	244.1	202.3	59,588.3	40,927.1	0.267	0.256
VILLA CORONADO (SMN)	115.6	510.8	395.1	181.8	123.6	33,047.8	15,265.6	0.356	0.313
TACUBAYA (SMN)	110.8	388.1	277.3	119.8	110.7	14,362.6	12,257.5	0.309	0.399
CREEL (CNA)	90.0	751.5	661.5	141.8	191.1	20,119.4	36,513.8	0.189	0.289
OJINAGA (CNA)	88.1	291.9	203.7	92.1	76.4	8,484.2	5,844.4	0.316	0.375
TEMOSACHIC (CNA)	74.1	544.7	470.6	150.2	111.1	22,552.5	12,346.6	0.276	0.236
PEÑITAS (CNA)	69.6	624.2	554.5	153.0	137.1	23,422.8	18,797.5	0.245	0.247
COLINA (CNA)	64.0	336.4	400.5	108.4	140.6	11,744.2	19,781.1	0.322	0.351
VILLA AHUMADA (SMN)	63.1	312.8	249.6	92.9	83.3	8,753.1	6,939.8	0.297	0.334
CUAUHTÉMOC (CNA)	61.8	483.8	422.0	140.1	104.9	19,631.9	10,997.8	0.290	0.249
EL TINTERO (CNA)	56.8	318.1	375.0	87.1	110.7	7,592.4	12,254.8	0.274	0.295
CAMARGO (CNA)	56.5	371.9	315.5	107.3	108.6	11,520.9	11,785.5	0.289	0.344
JIMÉNEZ (CNA)	51.8	371.3	319.5	99.3	116.7	9,851.8	13,614.5	0.267	0.365
LUIS L. LEÓN (CNA)	51.4	316.4	265.0	104.9	115.1	10,994.1	13,251.4	0.331	0.434
LAS LAJAS (CNA)	49.0	290.0	339.0	84.9	94.0	7,202.0	8,836.7	0.293	0.277
FRANCISCO I. MADERO (CNA)	48.9	330.3	281.4	103.8	111.5	10,771.8	12,439.6	0.314	0.396

En la Figura 25, se muestran las diferencias absolutas de medias anuales entre el periodo uno y el periodo dos de cada estación. Solo 3 estaciones incrementaron su media anual de precipitación (graficadas en color azul), lo cual representa el 18.75% del total.

Las 13 restantes tienen una marcada tendencia a la baja en la precipitación media anual que representan el 81.25% del total.

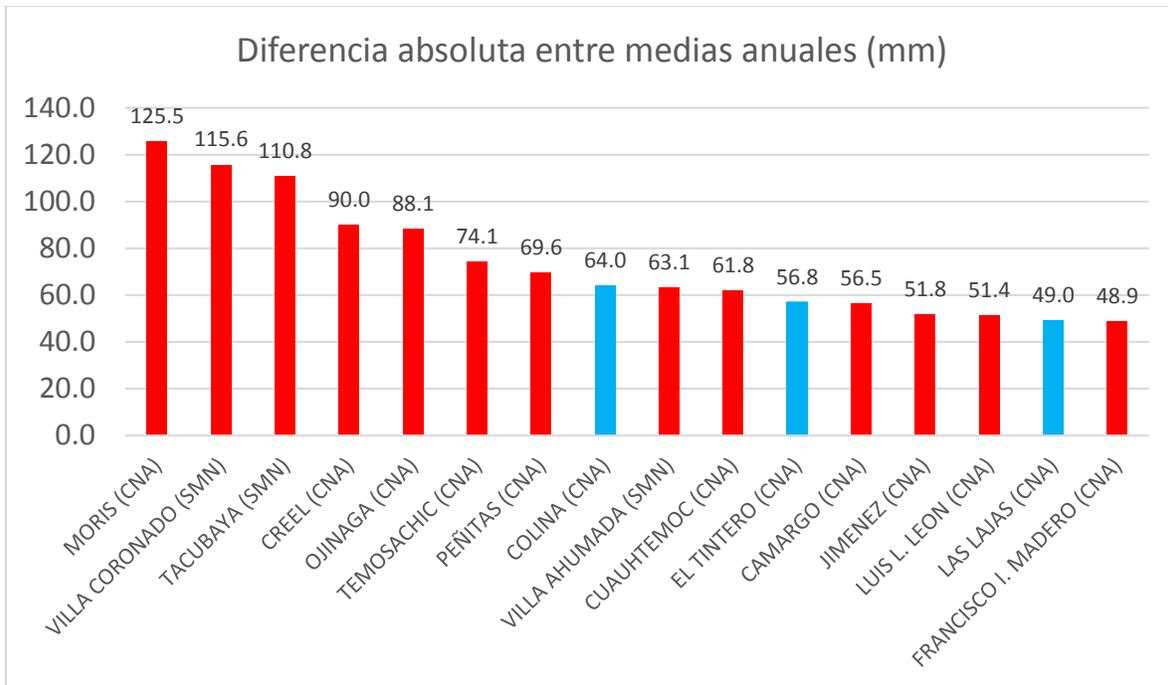


Fig. 25 Diferencia absoluta entre medias anuales de periodos evaluados en cada estación. En color rojo las que disminuyeron en la media, en color azul las que aumentaron en la media.

En las distintas series de tiempo de estaciones hubo años que tuvieron cambios en distintas estaciones, estas fechas fueron graficadas en la Figura 26. Tres cambios en el mismo año fue el máximo número que fueron todos en la década de los 90s. En 1977, 1985, y 2000 solo se detectó un cambio.

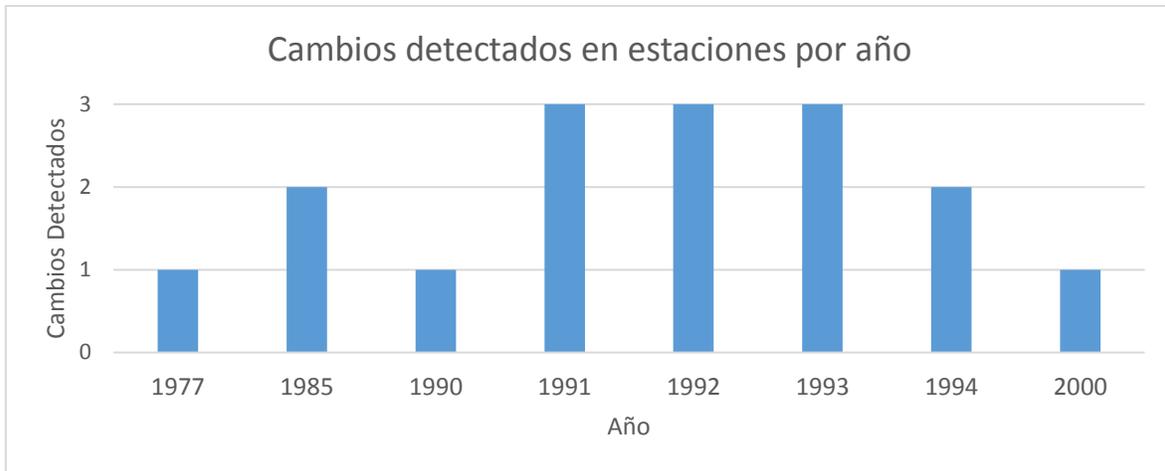


Fig. 26 Agrupación de cambios detectados en estaciones por año.

De manera similar agrupando por décadas cuántos aparentes cambios climáticos hubo, ocurrió uno en los 70s, dos en la década de los 80s, 12 en la década de los 90s lo cual representa un 75% de los cambios detectados, por último en los 00s ocurre un cambio.

Estos resultados coinciden con la tendencia de múltiples reportes internacionales acerca de la temporalidad de ocurrencia del cambio climático (Figura 27).

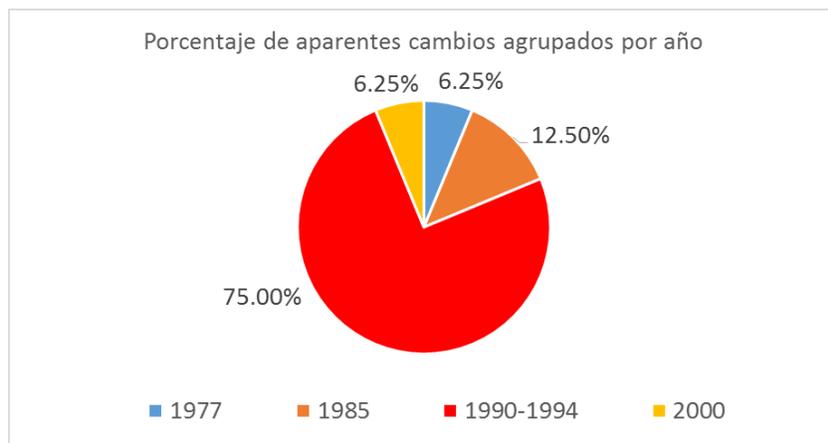


Fig. 27 Aparentes cambios agrupados por fecha.

Las diferencias entre los coeficientes de variación de los periodos donde se detectaron aparentes cambios climáticos están graficados en la Figura 28. Este parámetro podría indicar cuales estaciones tendrán periodos más prolongados de lluvias y sequias.

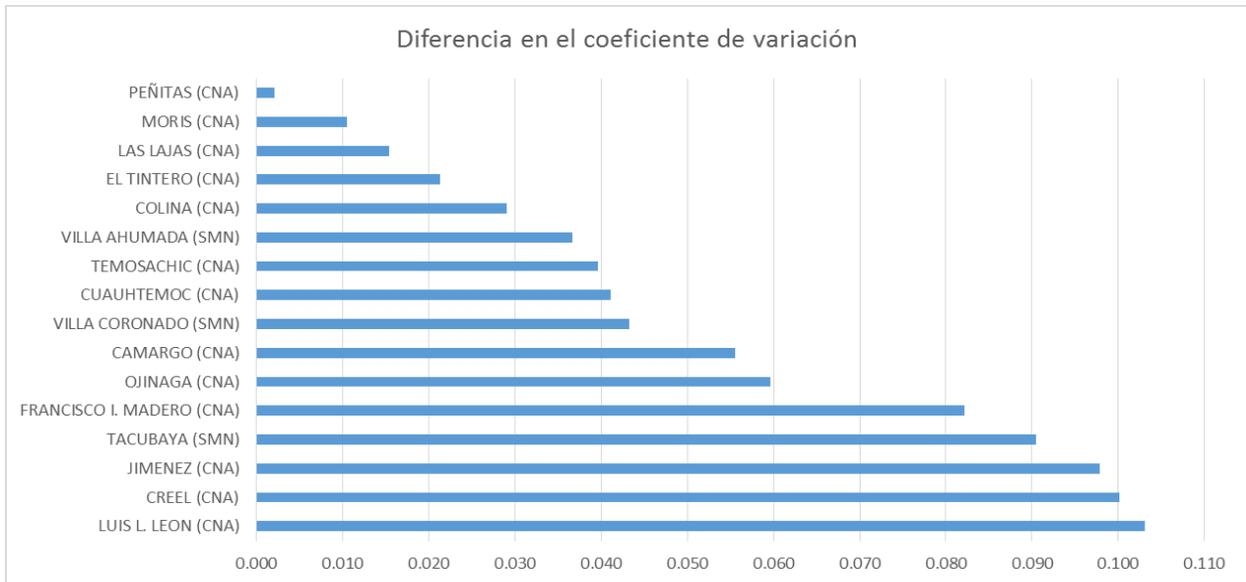


Fig. 28 Diferencias entre periodos del coeficiente de variación.

La desviación estándar es un parámetro útil que indica qué tan lejos están los datos alejados de la media de la población. Al graficar las diferencias de este parámetro entre cada periodo de cambio (Figura 29), se identifica Villa Coronado (SMN) como la estación con mayor diferencia en su comportamiento respecto a la media. Camargo es la estación que tiene un comportamiento prácticamente igual al de la media, esto muestra que un solo parámetro estadístico no es suficiente para encontrar una posible evidencia de cambio climático, sino que se requiere además de un análisis gráfico, un análisis estadístico profundo.

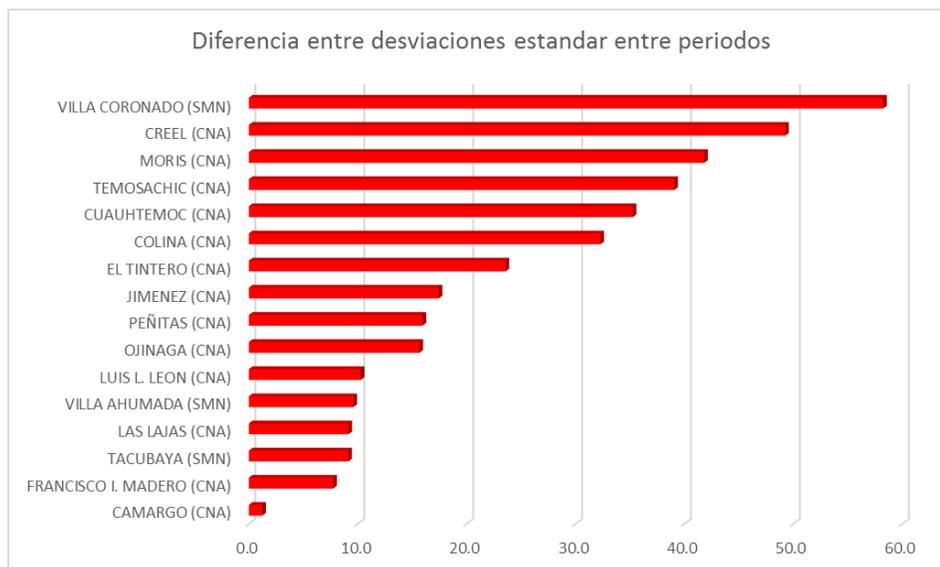


Fig. 29 Diferencia entre desviaciones estándar de periodos

5.2 MAPA DE IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE CHIHUAHUA CON ZONAS QUE MUESTRAN EVIDENCIA DE CAMBIO CLIMÁTICO

En la Figura 30 se muestra en color rojo las 16 estaciones con aparente evidencia de cambio climático, en color verde las 17 estaciones en las cuales no se encontró un comportamiento estadístico que respaldase un cambio climático. En color azul, las dos estaciones que debido a sus casos especiales no pudieron ser clasificadas a favor o en contra de tener evidencia de cambio climático.

Por último en la Figura 31 se muestran solamente las estaciones con aparente cambio climático por década y su diferencia en la media anual. No se detecta ningún patrón geográfico aparente que dicte una tendencia.

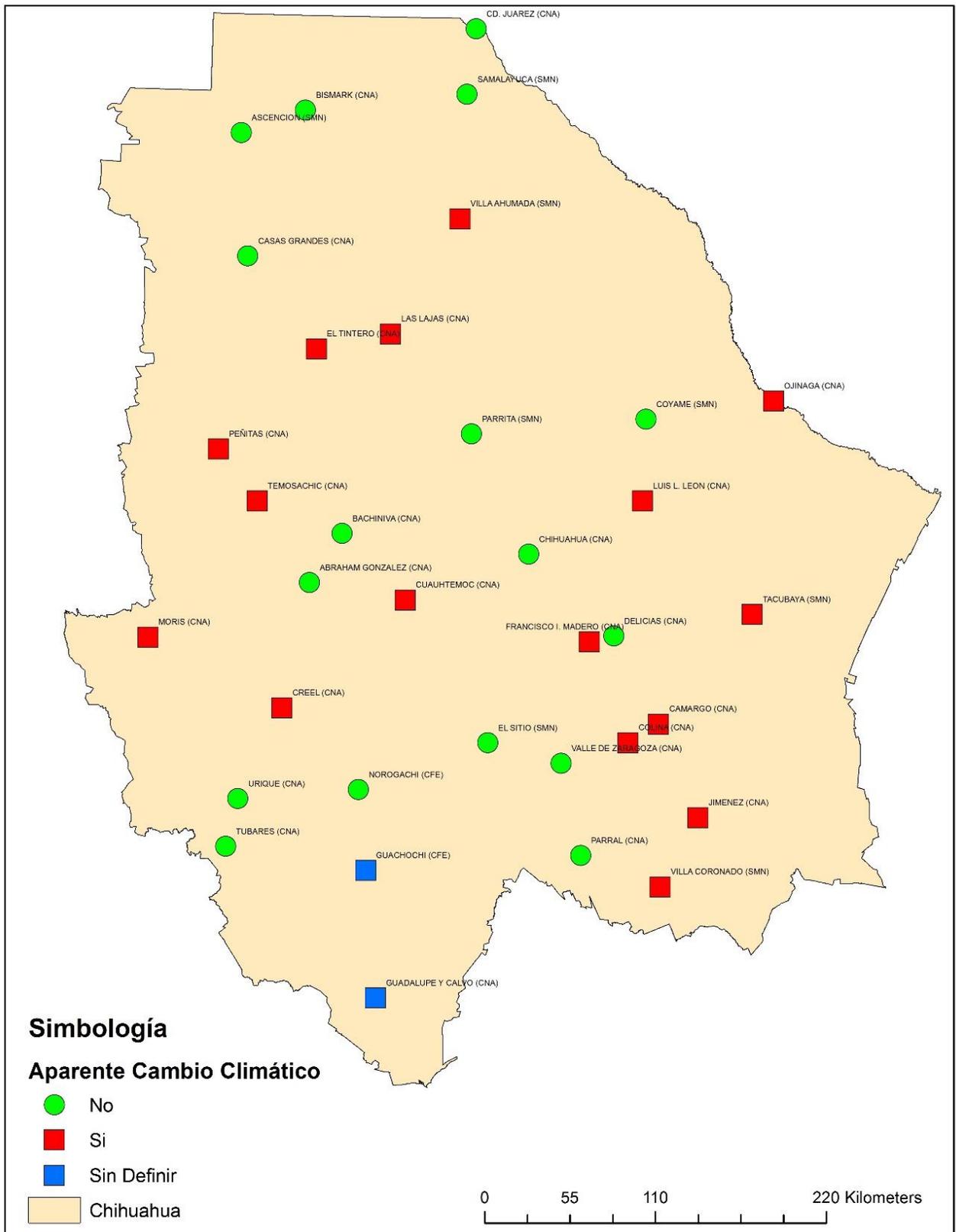


Fig. 30 Mapa de estaciones con aparente cambio climático

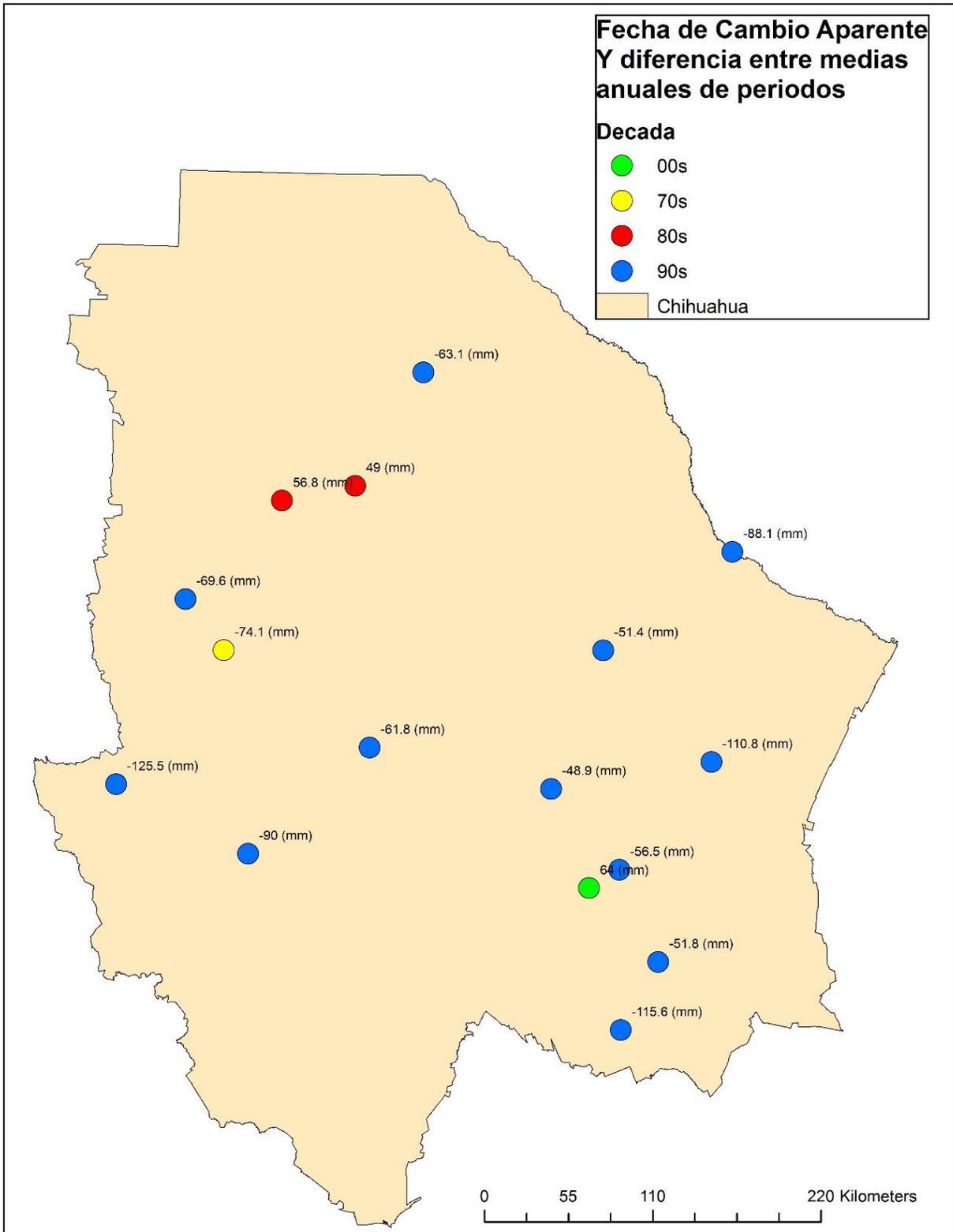


Fig. 31 Mapa de estaciones con aparente cambio climático por década (con datos de disminución en la media anual de precipitación)

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Se analizaron los registros de precipitación acumulada anual de 35 estaciones de precipitación diaria dentro del Estado de Chihuahua, para el periodo de 1960 a 2018, de las cuales tras aplicarles pruebas estadísticas 25 resultaron con distribución normal y por lo tanto se empleó en ellas pruebas paramétricas de homogeneidad y de persistencia. A las 10 estaciones restantes se les aplicaron pruebas no paramétricas o empíricas.

Mediante el análisis gráfico de las series de tiempo, la estimación de medidas de tendencia central y de dispersión, pruebas de homogeneidad y de tendencia, se determinó que en 16 estaciones muestran posible evidencia asociable a cambio climático, mientras que en 17 no fue posible observar evidencia aparente.

De las 16 estaciones con posible evidencia de cambio climático, 13 observan dos periodos (dos poblaciones con comportamiento estadístico diferenciado, no homogeneidad), con precipitación media menor en el periodo más reciente en relación al periodo antecedente, mientras que las 3 restantes ocurre lo contrario, se observa un incremento en la precipitación media del periodo más reciente.

En el 75% de las estaciones analizadas, el aparente cambio tiene lugar dentro de la ventana de tiempo de 1990 al año 1994, sin embargo no se observa un patrón o relación geográfica que se asocie.

El mayor descenso en el promedio de precipitación del periodo más reciente se registró en la estación Moris con 125.5 mm, mientras que el menor fue de 48.9 mm en la estación Francisco I. Madero. El mayor aumento en el promedio de precipitación del periodo más reciente se observó en la estación Colina con 64 mm y el menor de 49 mm en la estación las Lajas. La mayor desviación estándar entre periodos se encontró en Villa Coronado, mayor variabilidad fue en Luis. L. León.

Los resultados obtenidos en este trabajo se consideran importantes, ya que aportan evidencias de cambios estadísticos en la serie de tiempo de precipitación anual, sin

embargo no son concluyentes, ya que la precipitación es una de las variables que caracterizan el clima en una región.

6.2 RECOMENDACIONES

Las series de tiempo de datos de precipitación son sólo uno de los rasgos a analizar para encontrar evidencias de cambio climático, se recomienda además sumar análisis estadísticos de esta misma naturaleza para datos de temperatura, evaporación, humedad, presión atmosférica, curvas intensidad duración frecuencia, tormentas máximas, ciclones tropicales, evapotranspiración y escurrimiento superficial, entre otras.

Se recomienda mantener en buenas condiciones de operación la red climatológica del estado de Chihuahua y del país mismo, sólo con series de tiempo de largo plazo y registros confiables será posible entender los cambios que se produzcan en el clima de planeta y se podrá tomar previsiones con oportunidad.

Se recomienda a futuro realizar un análisis de pruebas de normalidad y homogeneidad mensual a todas las estaciones, ya que podría ser que se encuentren aparentes evidencias de cambio climático en más estaciones, cuando se enfoca a analizar los meses de lluvia en las distintas regiones, así como los meses de sequía.

En la medida que más variables en paralelo se analicen, se podrá tener un mejor entendimiento del cambio climático y cómo afectan todos los aspectos hidrometeorológicos del Estado de Chihuahua. Lo cual podrá dar un conocimiento mayor para preparar a la población para los inminentes cambios que están por suceder a nivel regional y mundial.

7. LECTURA CITADA

- Braun, Juan, Braun, Matías, Briones, Ignacio, Díaz, José. (2010). Economía Chilena 1810-1995. Estadísticas Históricas. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Blázquez-Pallí, Natàlia. (2016). Anexo A - Datos de agua realizados por la DESA. Resultados y análisis estadísticos completos.
- Montgomery, Douglas C., Runger, George C (2002). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. Limusa Wiley
- Pérez-Vergara, Ileana, Cifuentes-Laguna, Ana María, Vásquez-García, Carolina, & Marcela-Ocampo, Diana. (2013). Un modelo de gestión de inventarios para una empresa de productos alimenticios. *Ingeniería Industrial*, 34(2), 227-236. Recuperado en 03 de diciembre de 2019, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362013000200011&lng=es&tlng=es.
- Gao, T., Wang, H. J., & Zhou, T. (2017). Changes of extreme precipitation and nonlinear influence of climate variables over monsoon region in China. *Atmospheric Research*, 197(40), 379–389. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.017>
- CMNUCC. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992.
- Organización de las Naciones Unidas, 1998. Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.
- Campos Aranda (1998). Procesos del ciclo hidrológico, tercera reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería
- Ryan, Thomas A. Jr. & Joiner, Brian L. (1976). Statistics Department. The Pennsylvania State University
- Helsel D. R. & Hirsch R. M (2002). USGS. Statistical Methods in Water Resources, Book 4 Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey Chapter A3.

- Chakravarti, Laha, & Roy, (1967). Handbook of Methods of Applied Statistics, Volume I, John Wiley and Sons, pp. 392-394.
- Stephens, M. A. (1974). EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons, Journal of the American Statistical Association, 69, pp. 730-737.
- D'Agostino, Ralph B., Albert Belanger & Ralph B. D'Agostino, Jr (1990). "A suggestion for using powerful and informative tests of normality" (PDF). The American Statistician. 44 (4): 316–321.
- IPCC (2007). Climate change 2007: the physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, p. 996.
- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B. (2007). Freshwater resources and their management. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Paluticof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), Climate Change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contributions of the Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on ClimateChange. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 173–210.
- Pita Fernández S. Relación entre variables cuantitativas. Cad Aten Primaria 1997; 4: 141-144

8. ANEXOS

8.1 ANEXO 1: DATOS DIARIOS DE PRECIPITACIÓN 1960-2018

Tabla A1: Datos de precipitación recopilados y completados

Nombre	Latitud	Longitud	Rol	Periodo-Datos	Datos completos	# Datos Faltantes
ABRAHAM GONZALEZ (CNA)	28.49	-107.47	Pivote	1960-2018	Si	0
AGUA PRIETA (SMN)	31.33	-109.55	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
ASCENSIÓN (SMN)	31.09	-108.00	Pivote E2	1960-2018	Si	0
BACADEHUACHI (SMN)	29.81	-109.14	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
BACHINIVA (CNA)	28.78	-107.26	Pivote	1960-2018	Si	0
BATOVIRA (CNA)	27.92	-107.90	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
BISMARCK (CNA)	31.23	-107.57	Pivote E3	1960-2013	Hasta 2013	1826
CAMARGO (CNA)	27.69	-105.17	Pivote	1960-2018	Si	0
CASAS GRANDES (CNA)	30.38	-107.93	Pivote	1960-2018	Si	0
CD. JUÁREZ (CNA)	31.72	-106.42	Pivote	1960-2018	Si	0
CEBALLOS (SMN)	26.32	-104.35	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
CENDRADILLAS (SMN)	26.28	-106.01	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
CHIHUAHUA (CNA)	28.67	-106.03	Pivote	1960-2018	Si	0
COLINA (CNA)	27.58	-105.37	Pivote	1960-2018	Si	0
COLUMBUS NM US (NCDC)	31.83	-107.64	Auxiliar	1960-2018	No	1520
COYAME (SMN)	29.46	-105.26	Pivote E3	1960-2013	Hasta 2013	1826
CREEL (CNA)	27.76	-107.63	Pivote E2	1960-2018	Si	0
CUAUHTÉMOC (CNA)	28.40	-106.84	Pivote E2	1960-2018	Si	0
DELICIAS (CNA)	28.20	-105.47	Pivote	1960-2018	Si	0
EJIDO SAN MIGUEL (SMN)	28.64	-102.95	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826

Nombre	Latitud	Longitud	Rol	Periodo-Datos	Datos completos	# Datos Faltantes
EL DERRAME (SMN)	26.23	-104.50	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
EL SITIO (SMN)	27.57	-106.29	Pivote E3	1960-2013	Hasta 2013	1826
EL TARAHUMAR (SMN)	25.62	-106.32	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
EL TINTERO (CNA)	29.85	-107.46	Pivote	1960-2018	Si	0
ESCALÓN (DGE)	26.74	-104.34	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
FORT HANCOCK 8 SSE TX US (NCDC)	31.25	-105.81	Auxiliar	1960-2018	No	273
FRANCISCO I. MADERO (CNA)	28.16	-105.63	Pivote	1960-2018	Si	0
GUACHOCHI (CFE)	26.82	-107.07	Pivote E2	1960-2018	Si	0
GUADALUPE Y CALVO (CNA)	26.08	-106.99	Pivote E2	1960-2018	Si	0
GUATENIPA (SMN)	25.34	-107.22	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
HUITES (SMN)	26.89	-108.35	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
JAINA (SMN)	25.89	-108.03	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
JIMÉNEZ (CNA)	27.14	-104.91	Pivote	1960-2018	Si	0
LA BOQUILLA (CNA)	27.55	-105.41	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
LA HUERTA (SMN)	25.36	-106.70	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
LAS LAJAS (CNA)	29.94	-106.96	Pivote	1960-2018	Si	0
LAS PANELAS (SMN)	27.41	-108.88	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
LUIS L. LEÓN (CNA)	28.98	-105.28	Pivote E2	1960-2018	Si	0
MORIS (CNA)	28.15	-108.52	Pivote	1960-2018	Si	0
NACORI CHICO (CFE)	29.69	-108.98	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
NOROGACHI (CFE)	27.29	-107.13	Pivote E3	1960-2013	Hasta 2013	1826
OJINAGA (CNA)	29.57	-104.41	Pivote	1960-2018	Si	0
PANTHER JUNCTION TX US (NCDC)	29.33	-103.21	Auxiliar	1960-2018	No	78
PARRAL (CNA)	26.92	-105.68	Pivote	1960-2018	Si	0

Nombre	Latitud	Longitud	Rol	Periodo-Datos	Datos completos	# Datos Faltantes
PARRITA (SMN)	29.37	-106.42	Pivote E3	1960-2013	Hasta 2013	1826
PEÑITAS (CNA)	29.25	-108.09	Pivote	1960-2018	Si	0
ROSARIO (SMN)	26.51	-105.64	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
SAHUARIPA (SMN)	29.06	-109.23	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
SAMALAYUCA (SMN)	31.34	-106.48	Pivote E2	1960-2018	Si	0
SIERRA MOJADA (SMN)	27.29	-103.70	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
TACUBAYA (SMN)	28.32	-104.56	Pivote E3	1960-2013	Hasta 2013	1826
TEMOSACHIC (CNA)	28.95	-107.83	Pivote	1960-2018	Si	0
TESOCOMA (SMN)	27.66	-109.21	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
TUBARES (CNA)	26.94	-107.98	Pivote E3	1960-2013	Hasta 2013	1826
URIQUE (CNA)	27.22	-107.91	Pivote E2	1960-2018	Si	0
VALENTINE 10 WSW TX US (NCDC)	30.53	-104.64	Auxiliar	1960-2018	No	503
VALLE DE ALLENDE (SMN)	26.94	-105.40	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
VALLE DE ZARAGOZA (CNA)	27.45	-105.81	Pivote	1960-2018	Si	0
VILLA AHUMADA (SMN)	30.62	-106.51	Pivote E2	1960-2018	Si	0
VILLA CORONADO (SMN)	26.74	-105.16	Pivote	1960-2018	Si	0
YECORA (DGE)	28.37	-108.93	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826
YECORA (SMN)	28.37	-108.93	Auxiliar	1960-2013	Hasta 2013	1826

8.2 ANEXO 2: ANÁLISIS GRÁFICOS POR AÑO DE SERIES DE TIEMPO

Figura A1. ABRAHAM GONZÁLEZ (CNA)

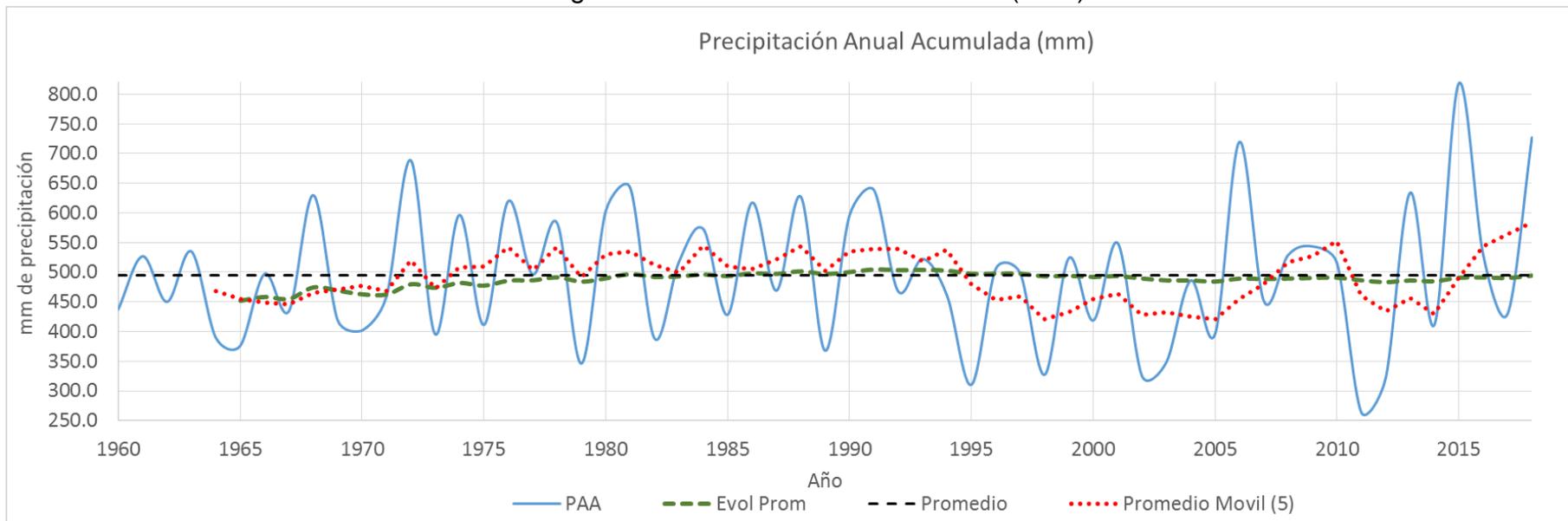


Figura A2. ASCENSIÓN (SMN)

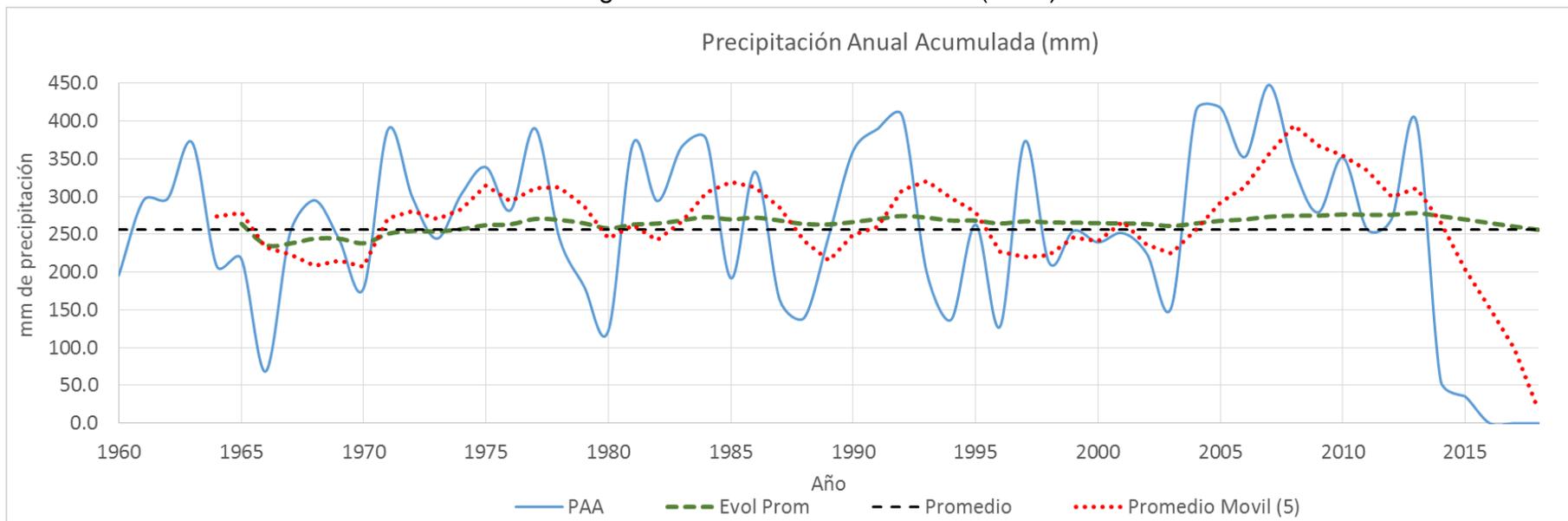


Figura A3. BACHINIVA (CNA)

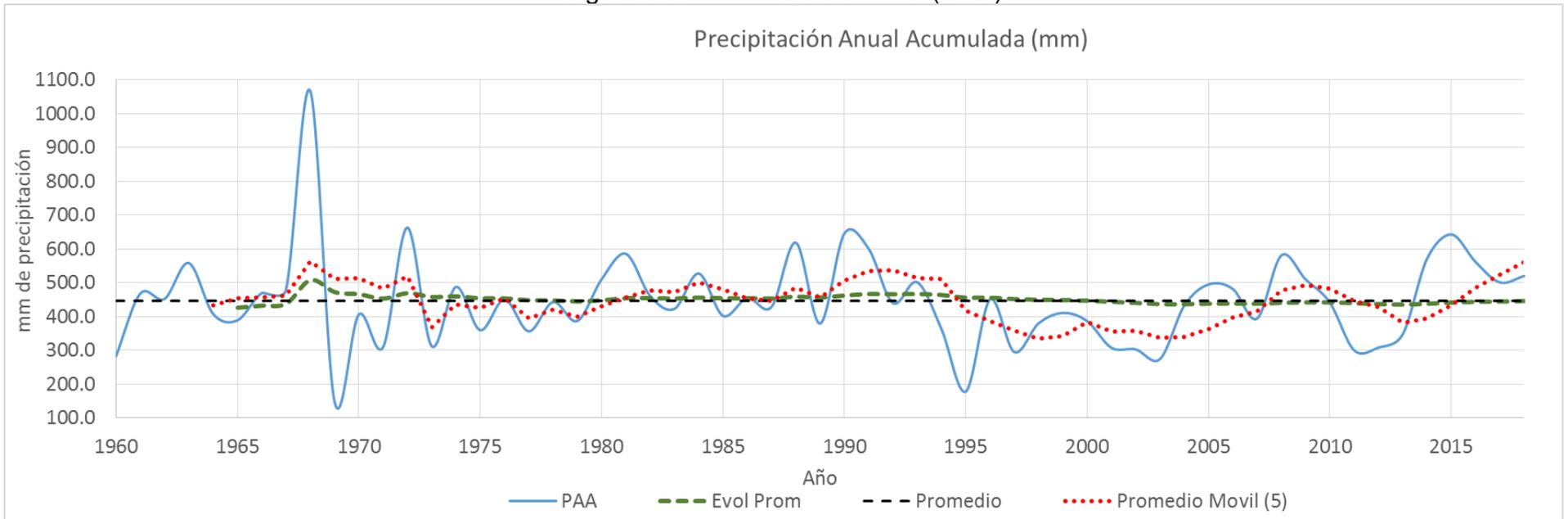


Figura A4. BISMARCK (CNA)

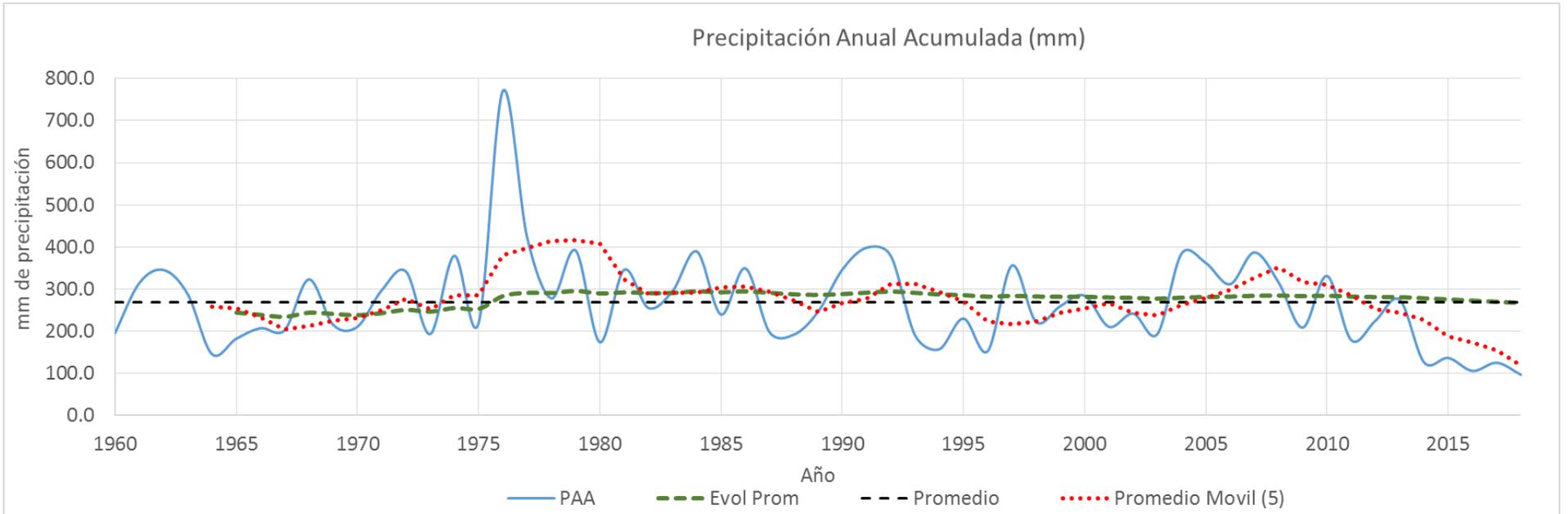


Figura A5. CAMARGO (CNA)

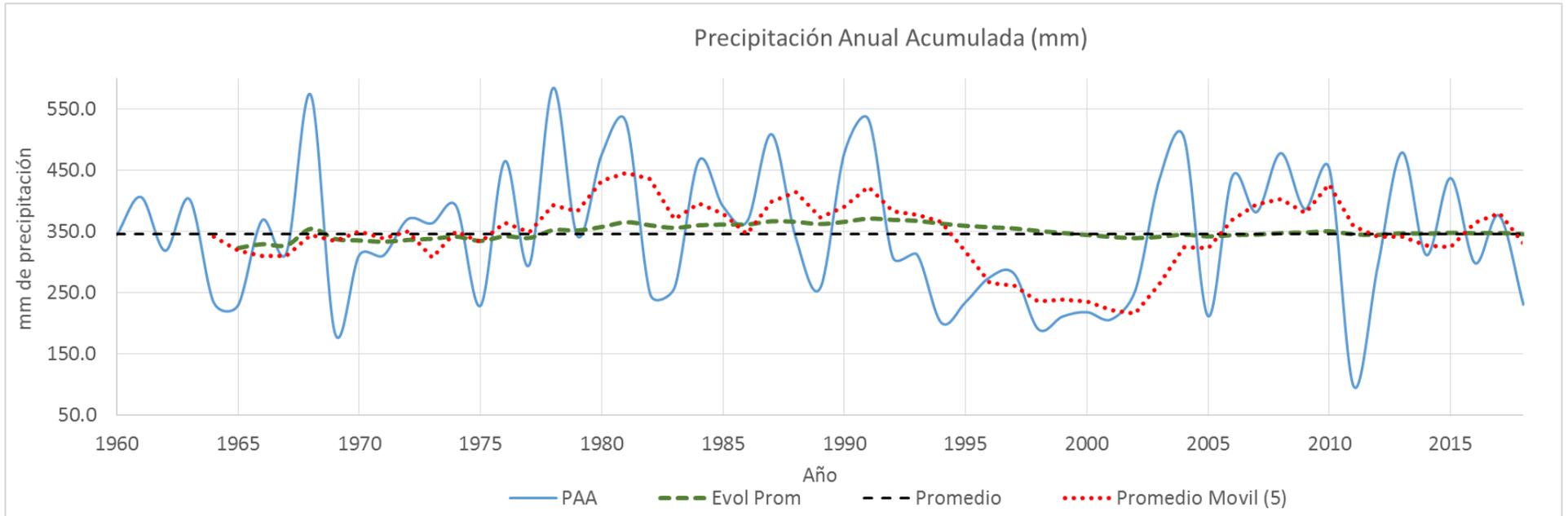


Figura A6. CASAS GRANDES (CNA)

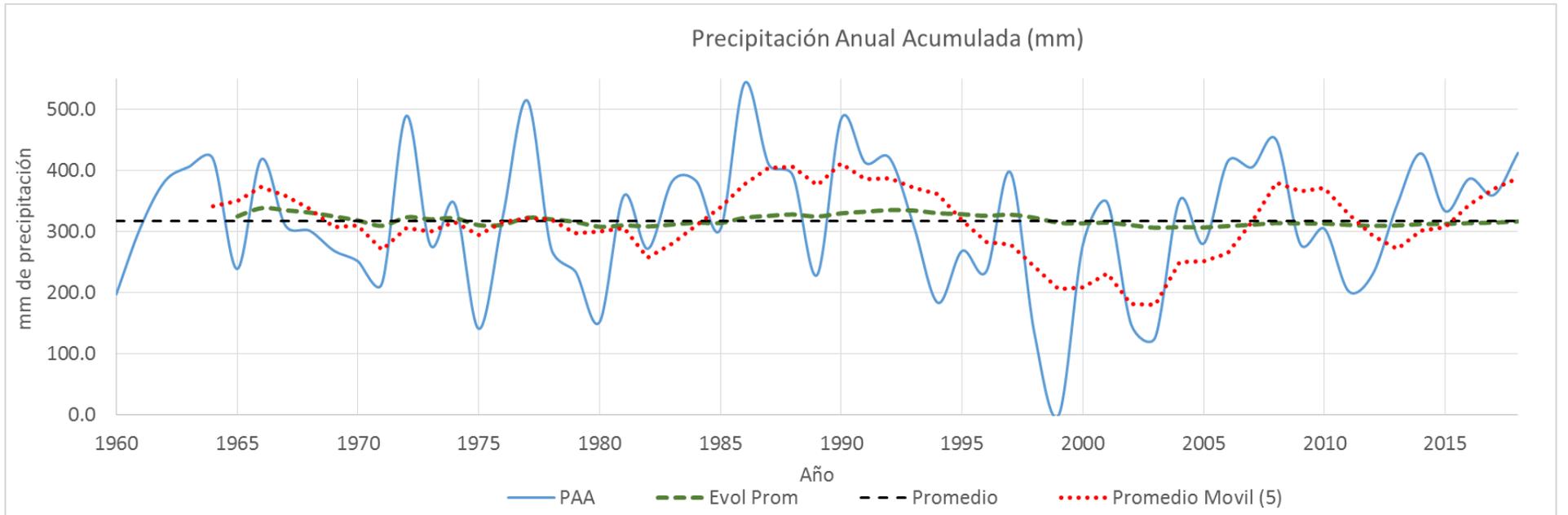


Figura A7. CD. JUÁREZ (CNA)

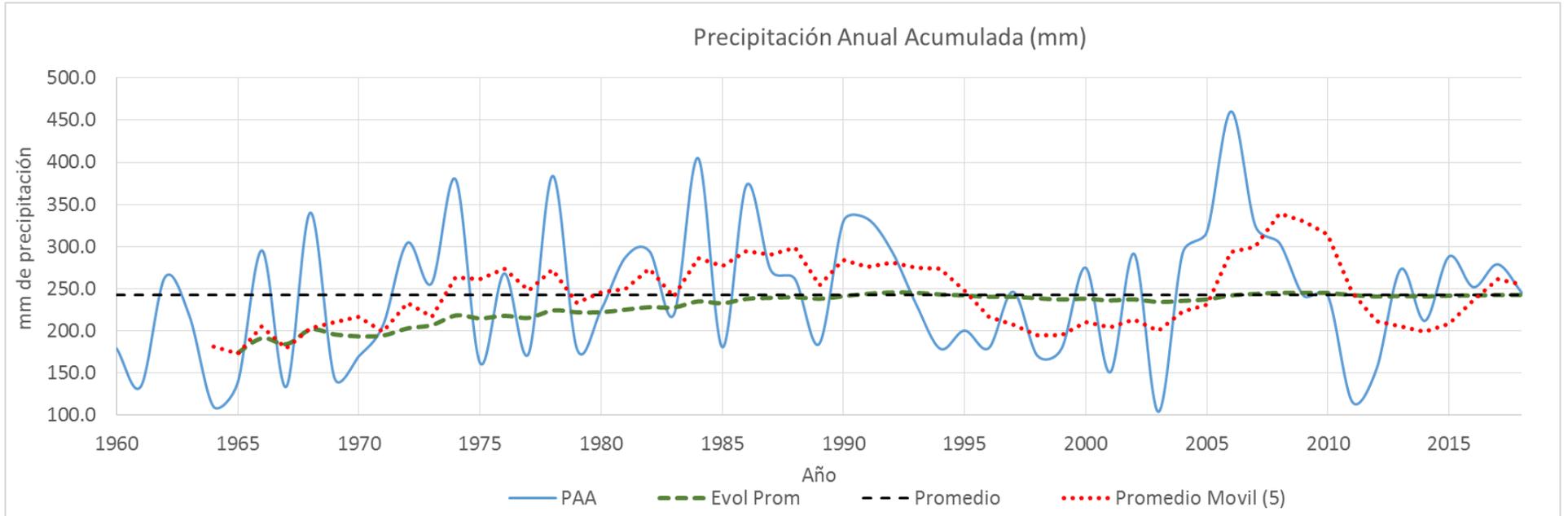


Figura A8. CHIHUAHUA (CNA)

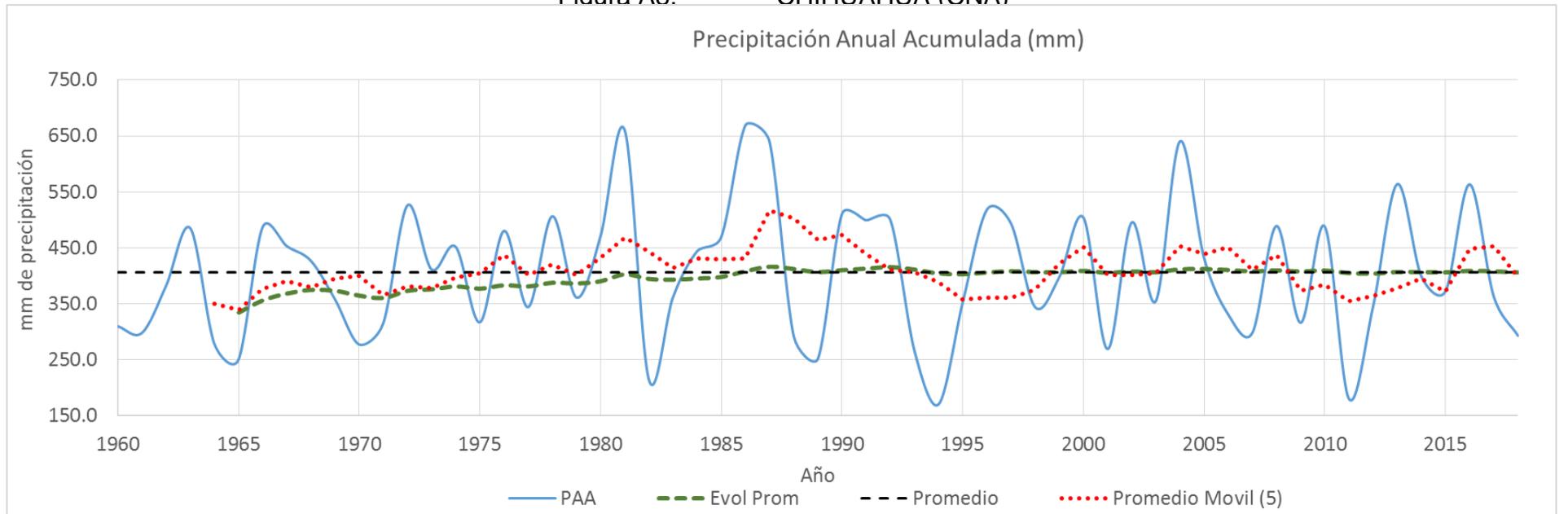


Figura A9. COLINA (CNA)

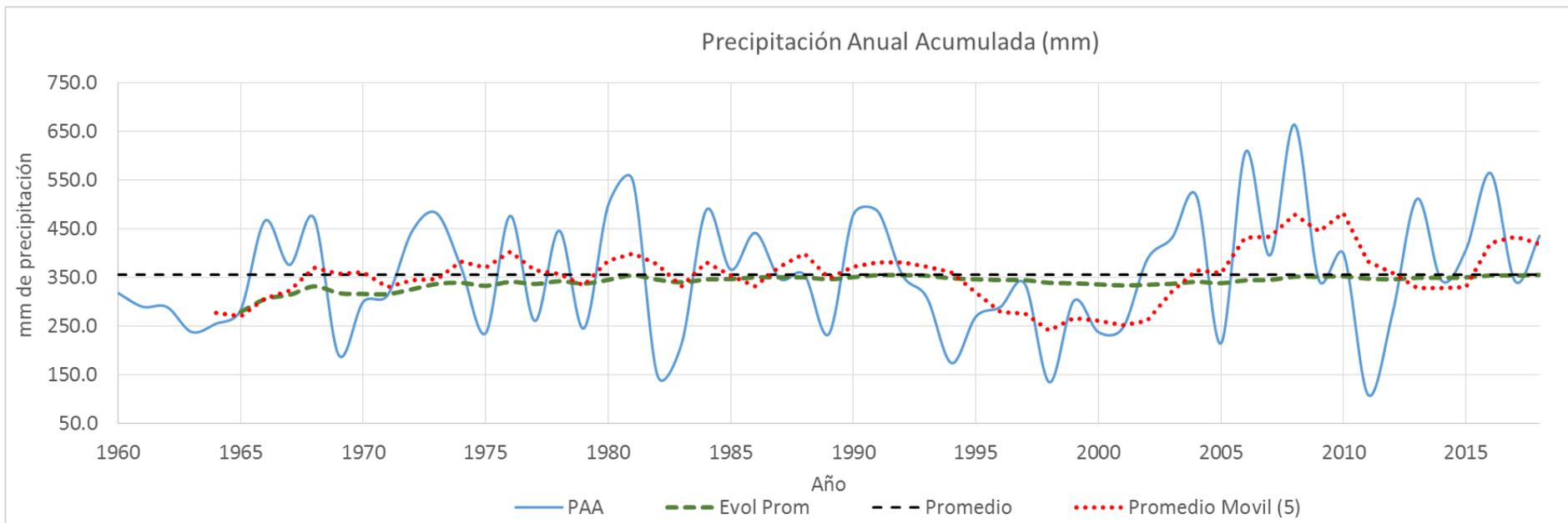


Figura A10. COYAME (SMN)

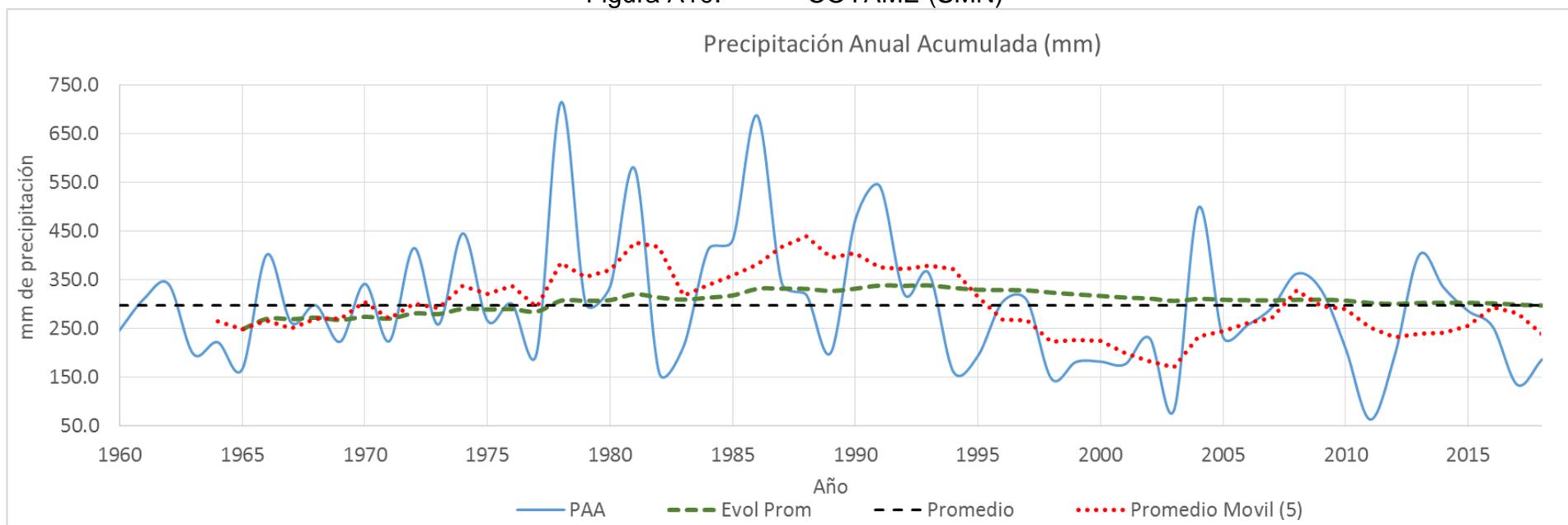


Figura A11. CREEL (CNA)

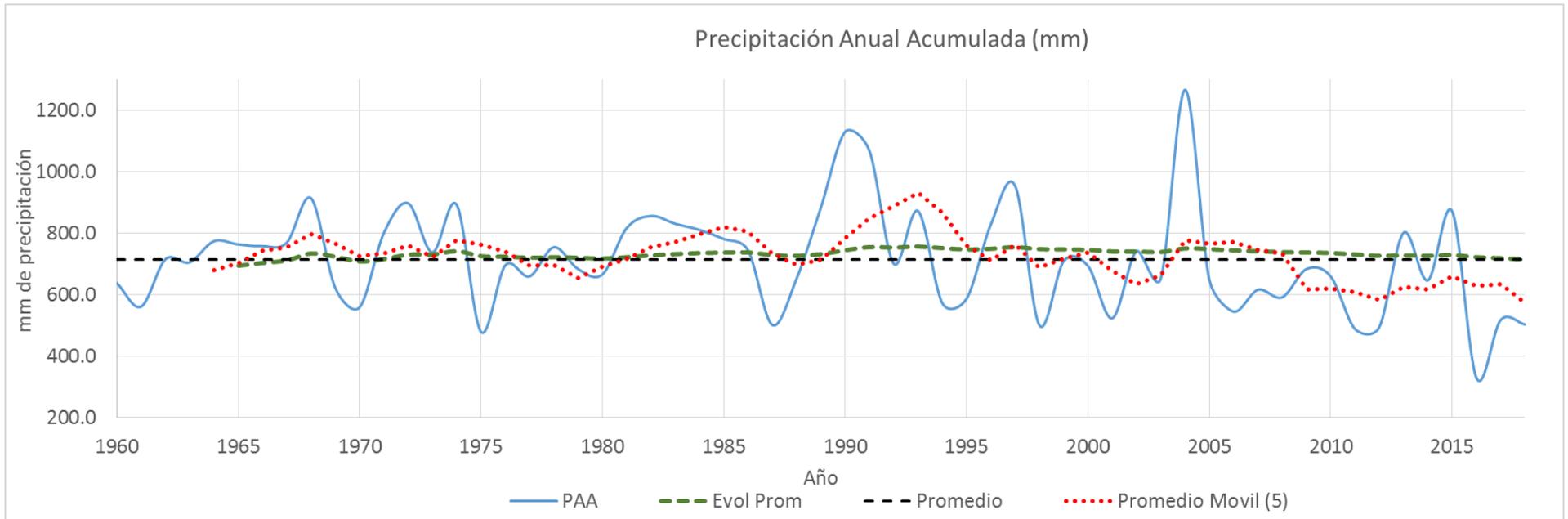


Figura A12. CUAUHTÉMOC (CNA)

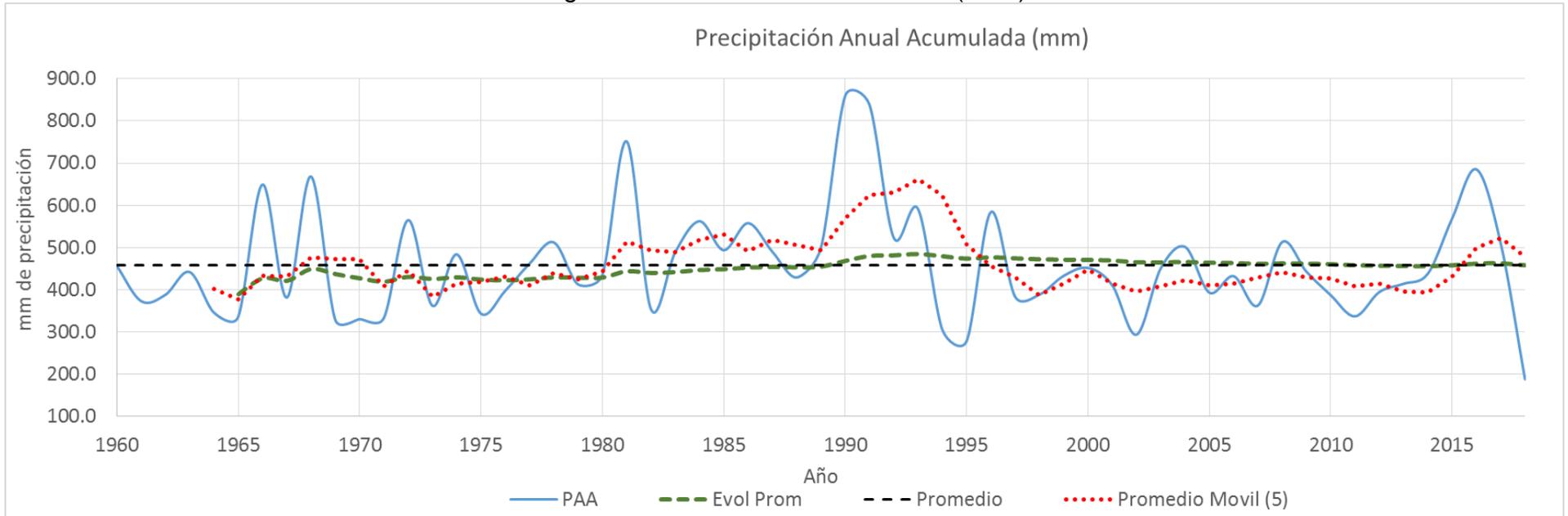


Figura A13. DELICIAS (CNA)

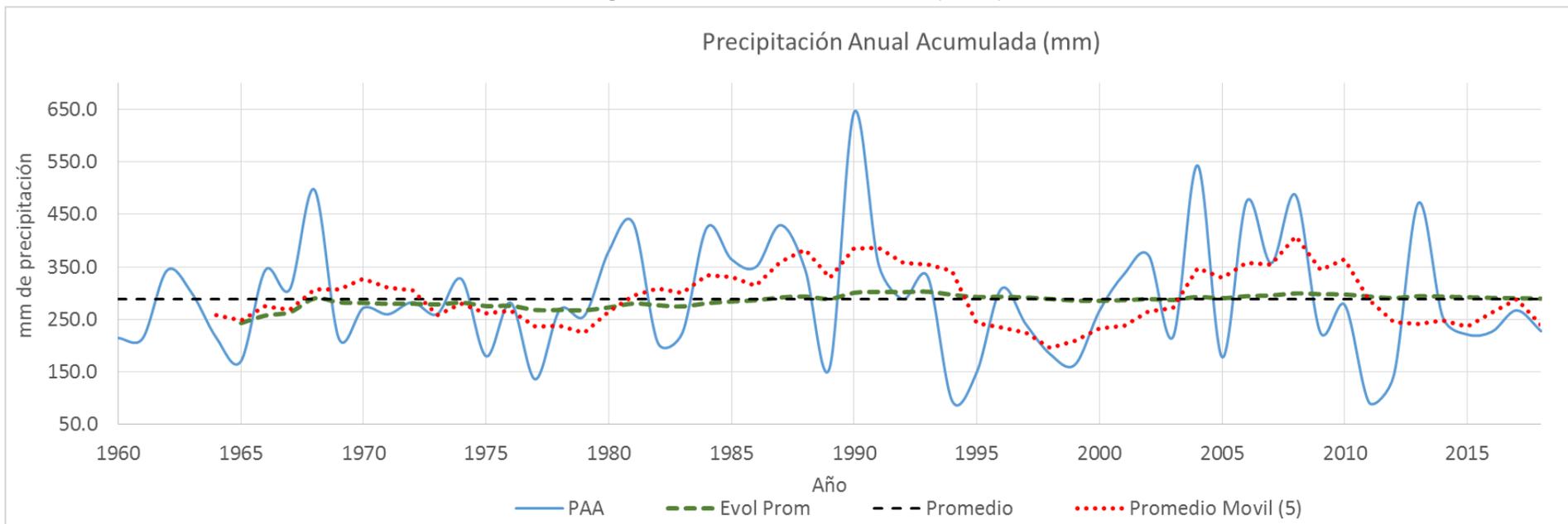


Figura A14. EL SITIO (SMN)

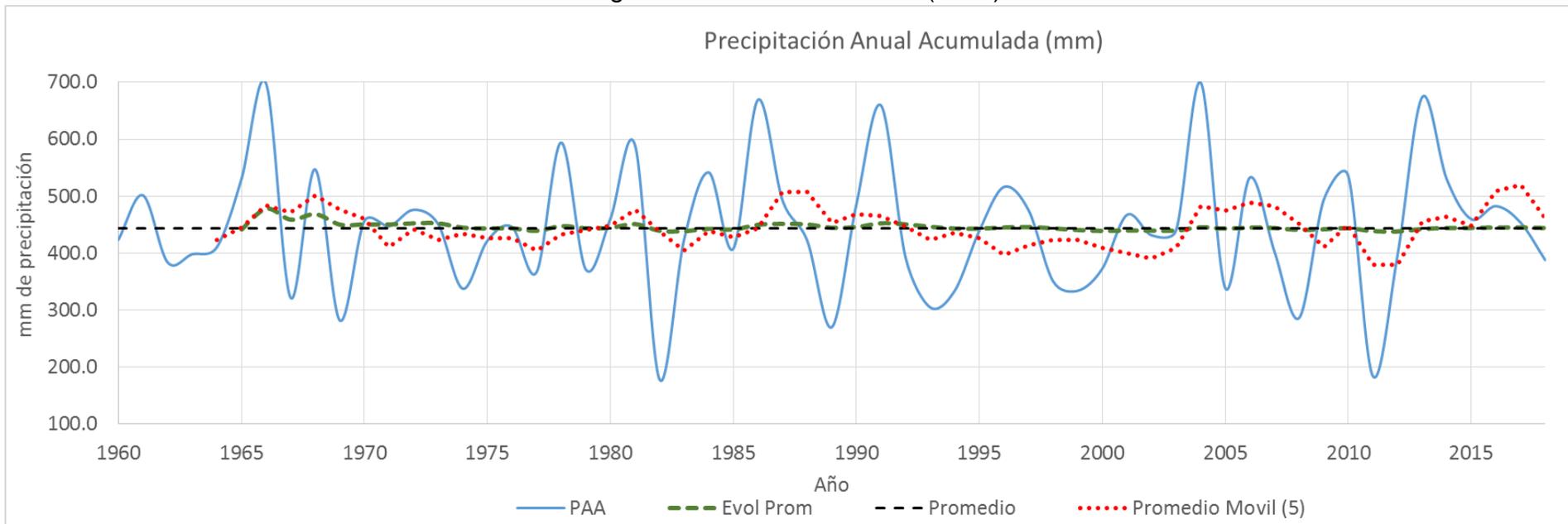


Figura A15. EL TINTERO (CNA)

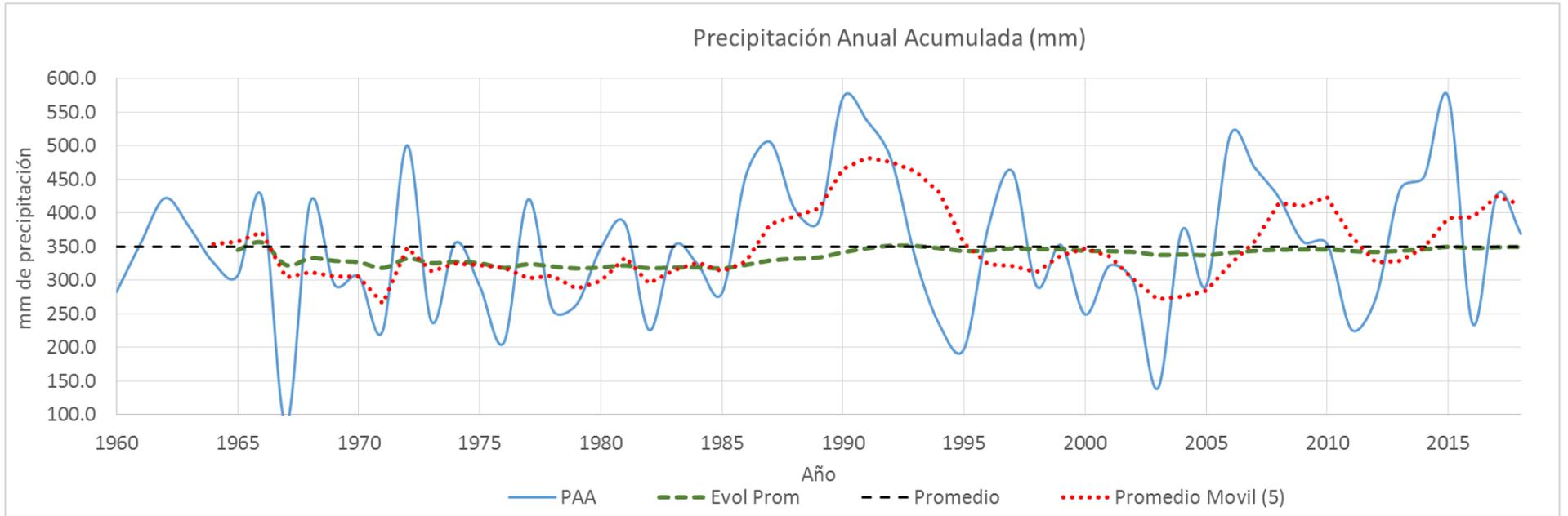


Figura A16. FRANCISCO I. MADERO (CNA)

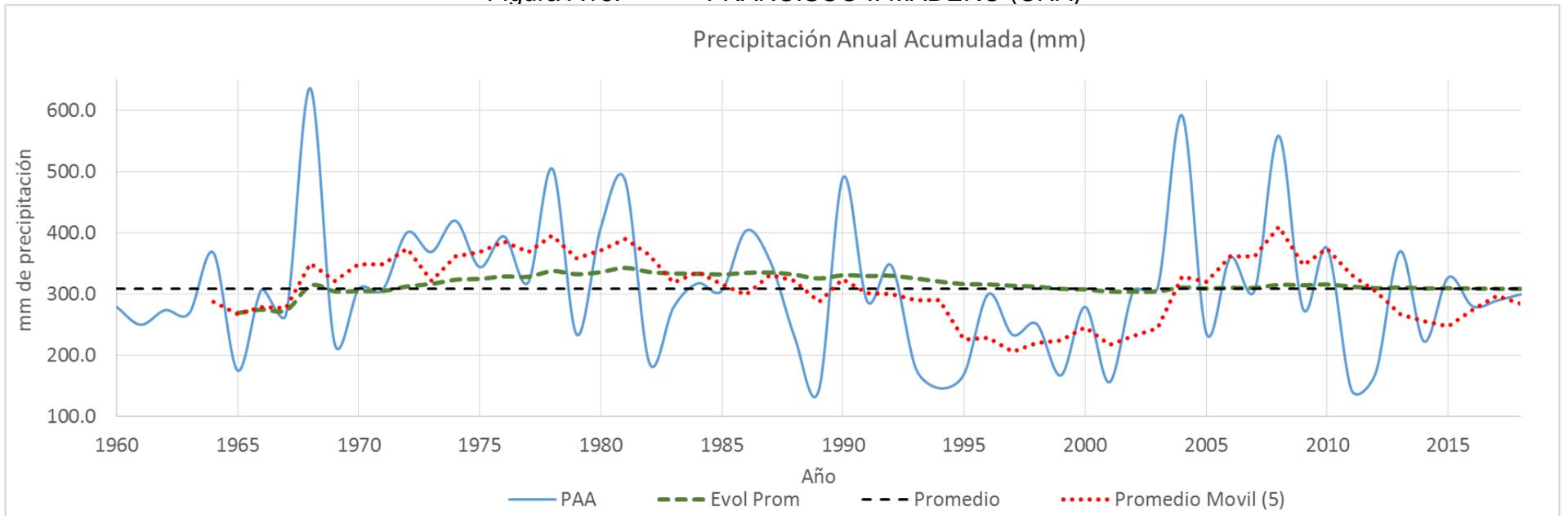


Figura A17. GUACHOCHI (CFE)

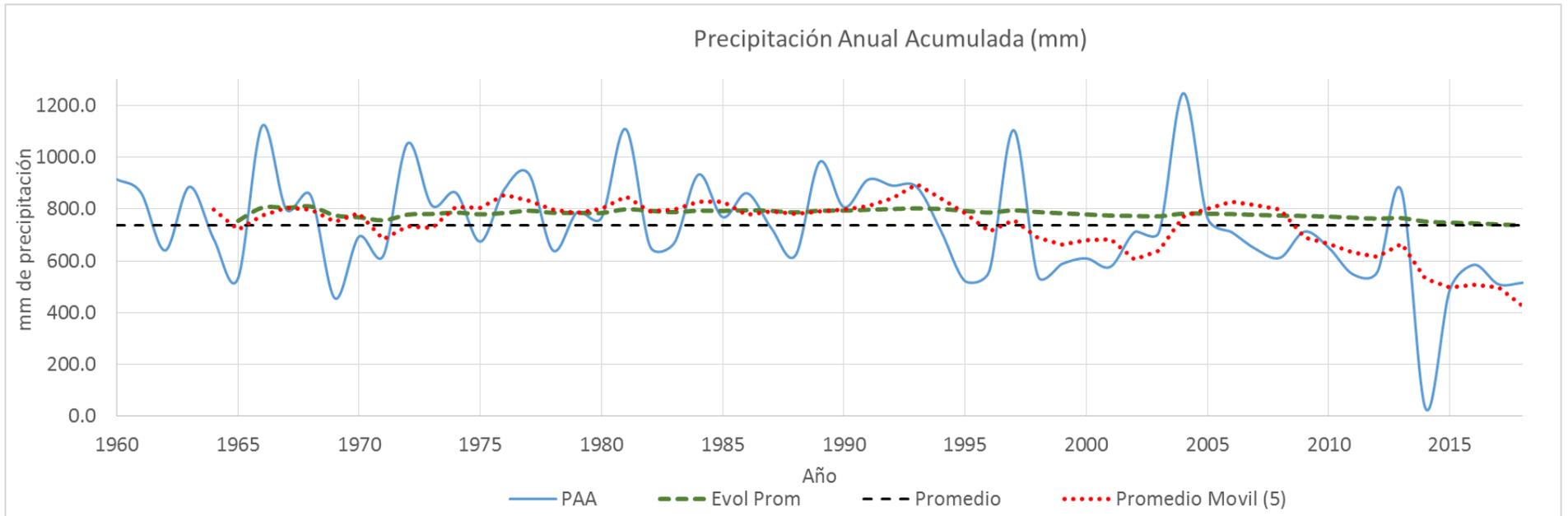


Figura A18. GUADALUPE Y CALVO (CNA)

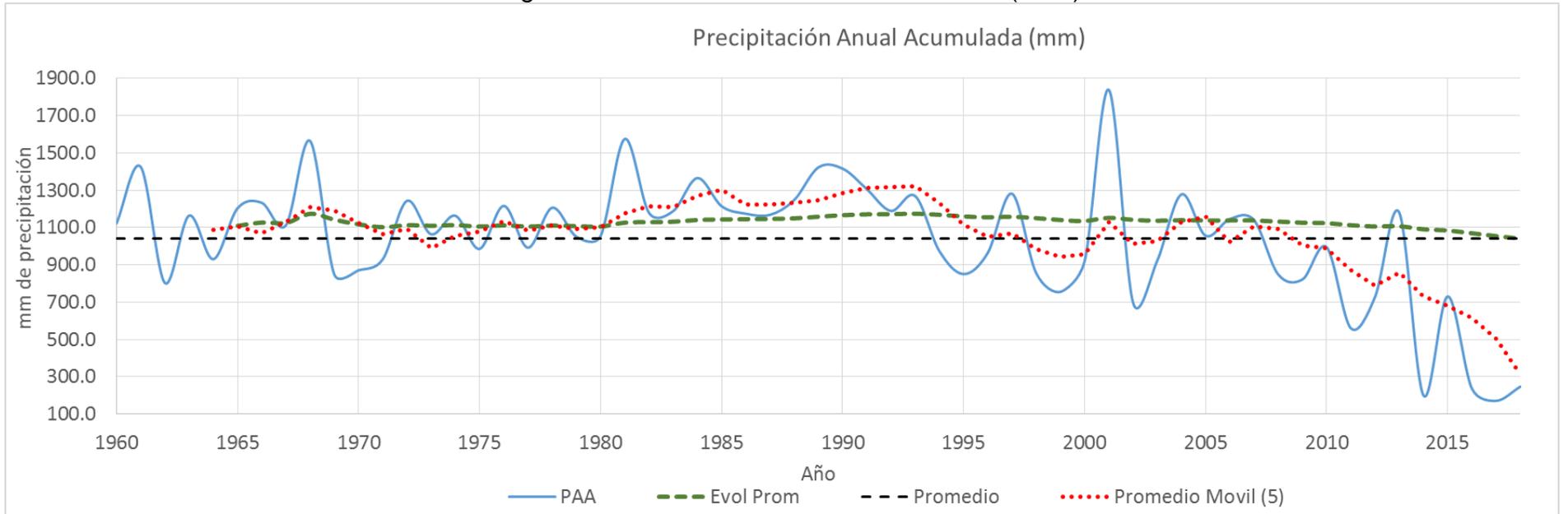


Figura A19. JIMÉNEZ (CNA)

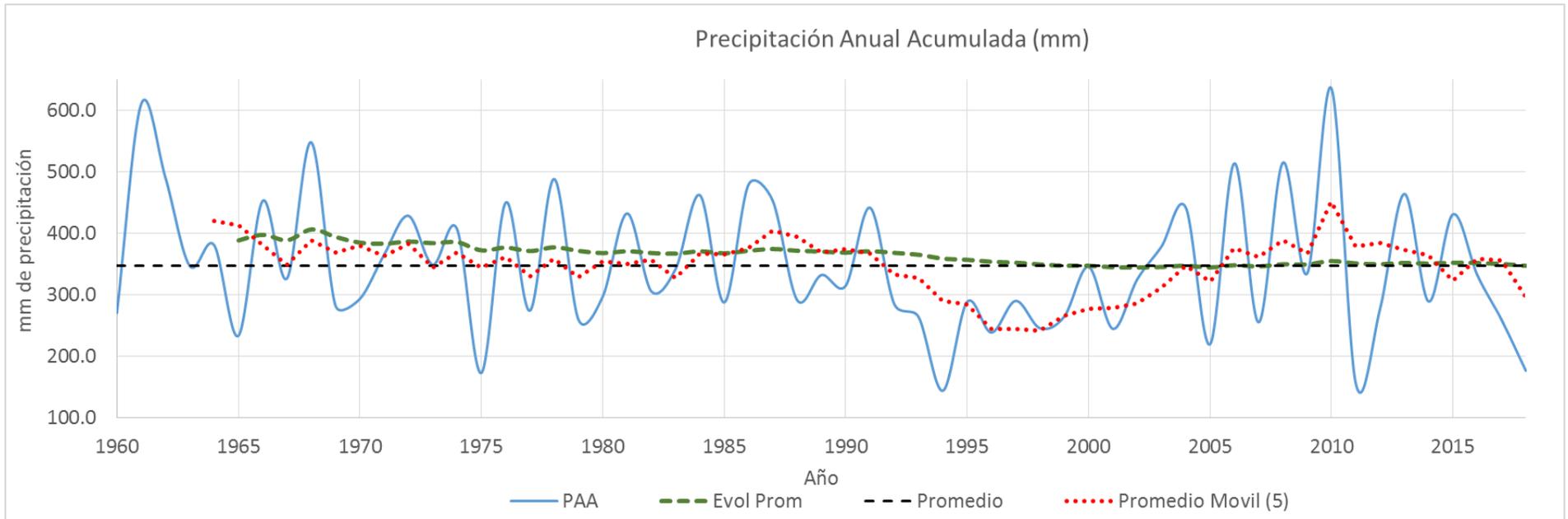


Figura A20. LAS LAJAS (CNA)

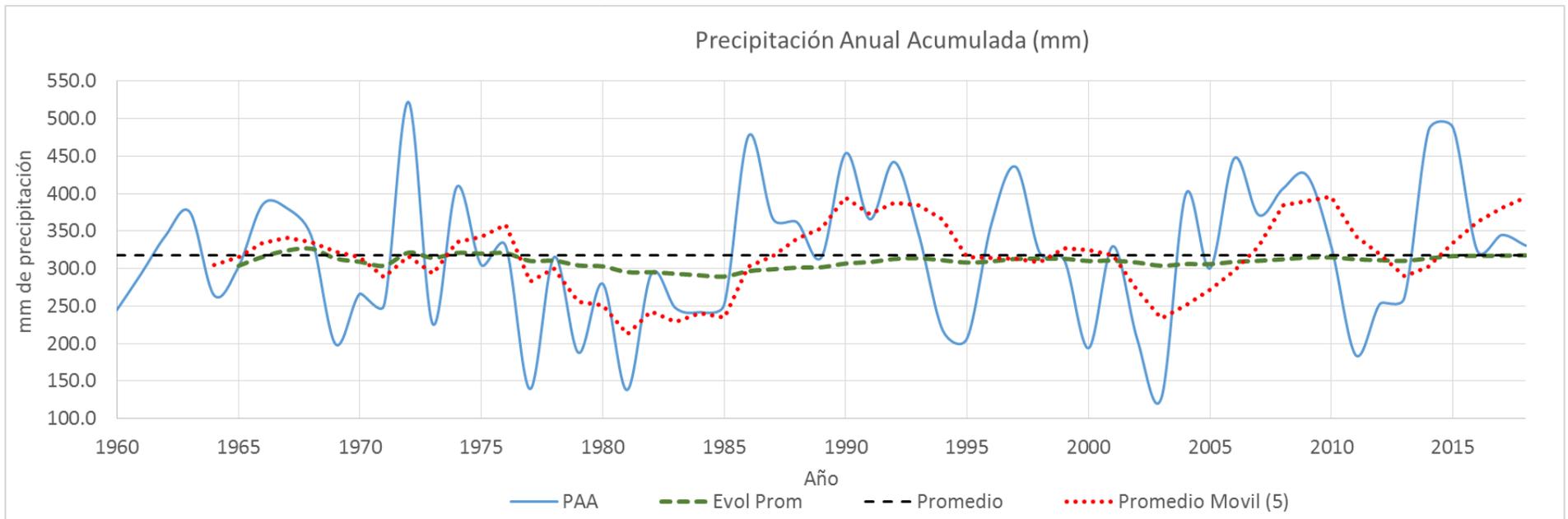


Figura A21. LUIS L. LEÓN (CNA)

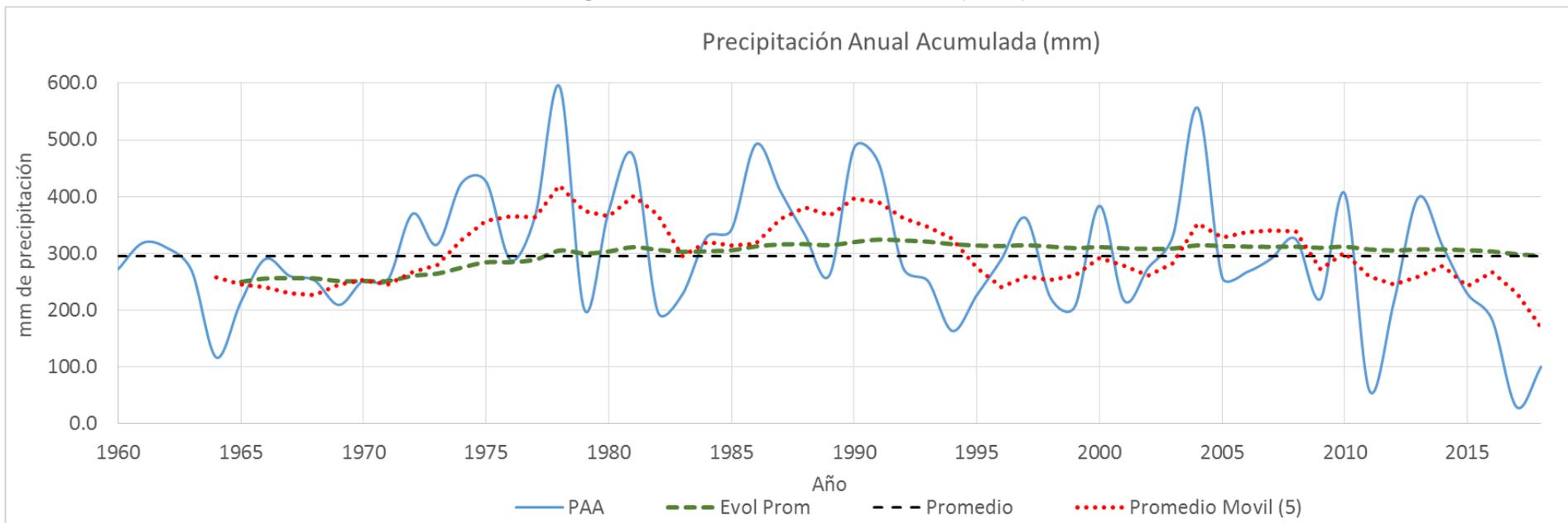


Figura A22. MORIS (CNA)

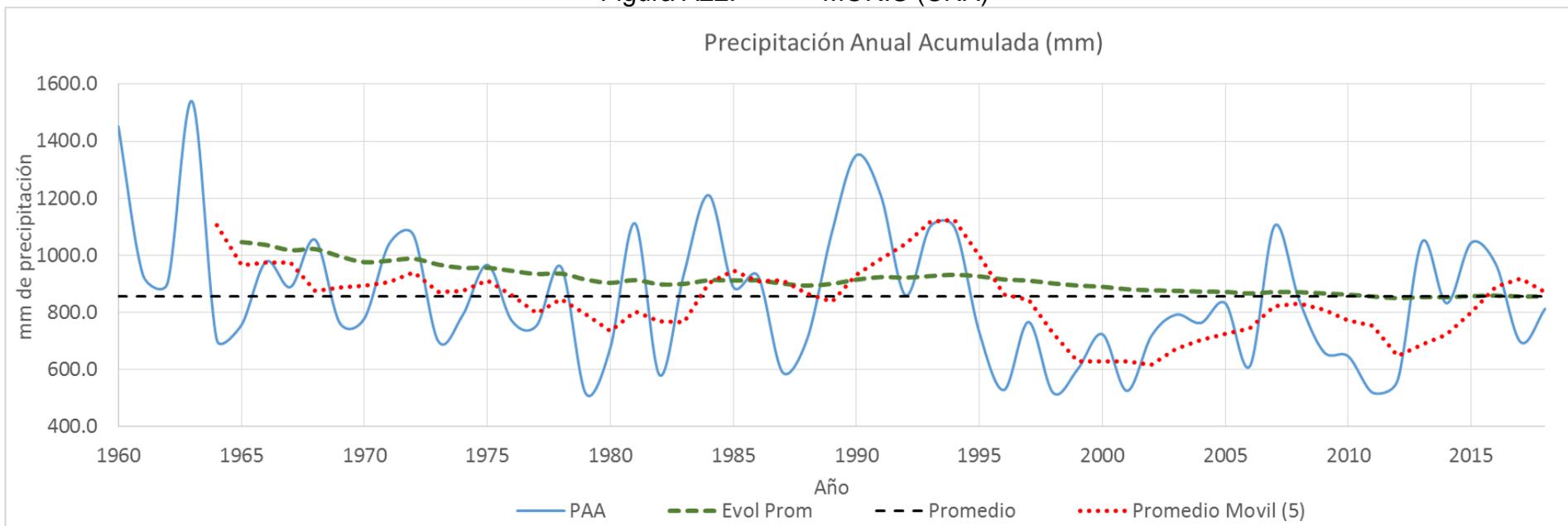


Figura A23. NOROGACHI (CFE)

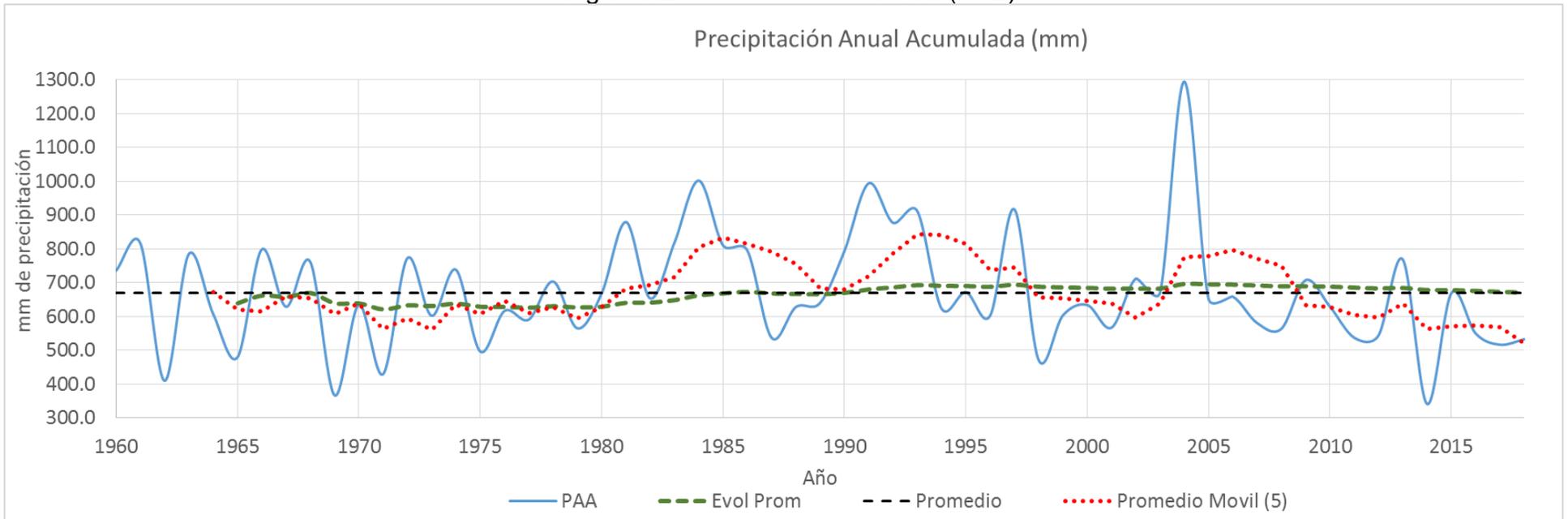


Figura A24. OJINAGA (CNA)

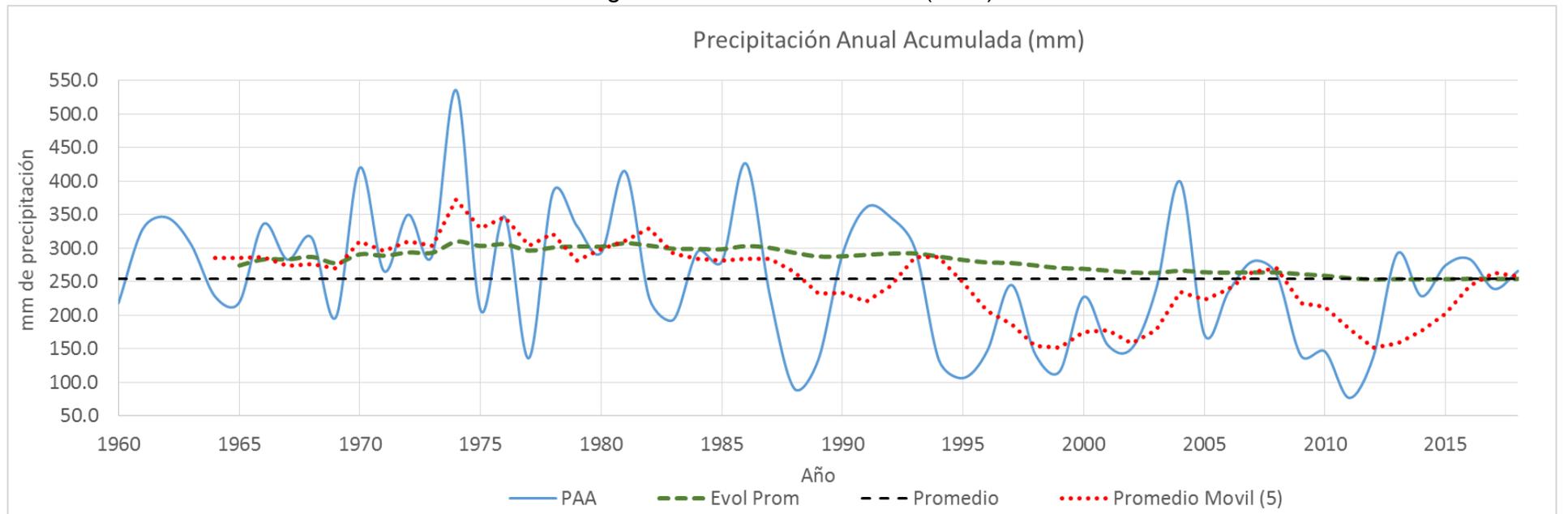


Figura A25. PARRAL (CNA)

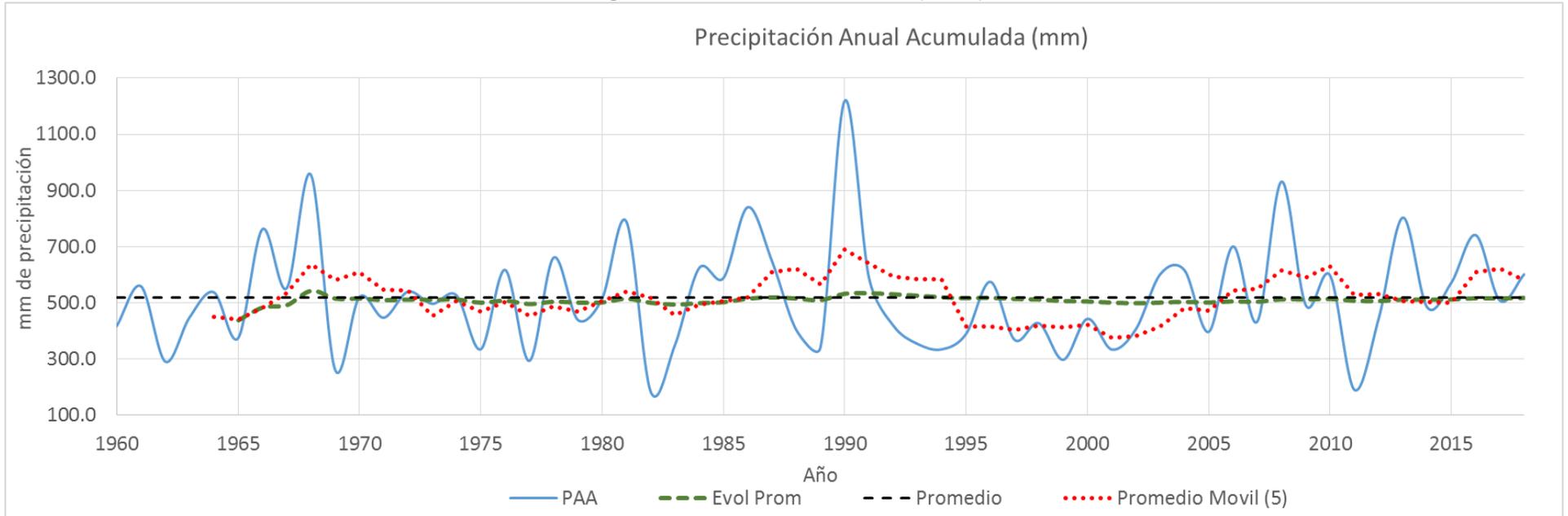


Figura A26. PARRITA (SMN)

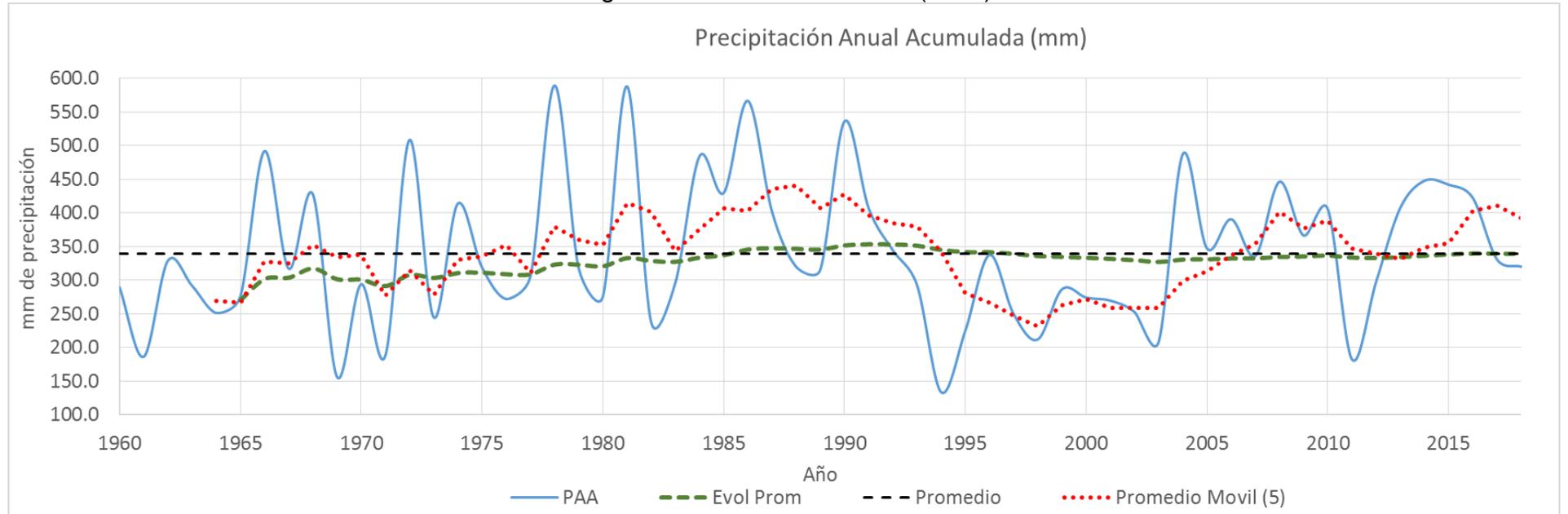


Figura A27. PEÑITAS (CNA)

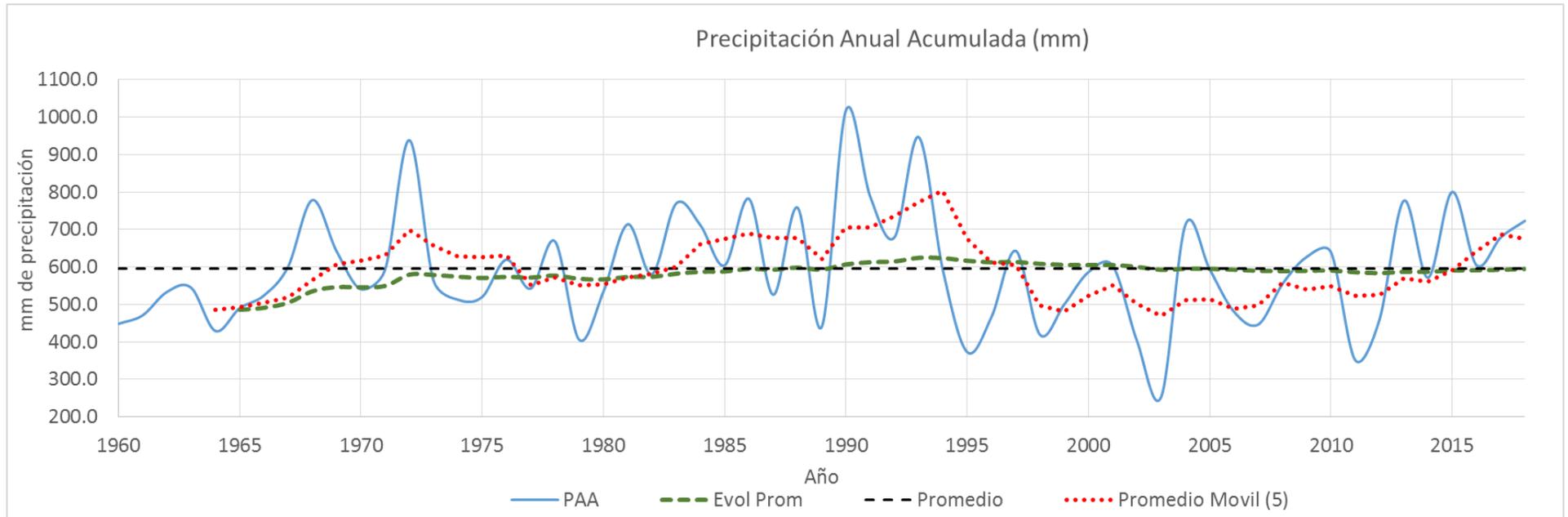


Figura A28. SAMALAYUCA (SMN)

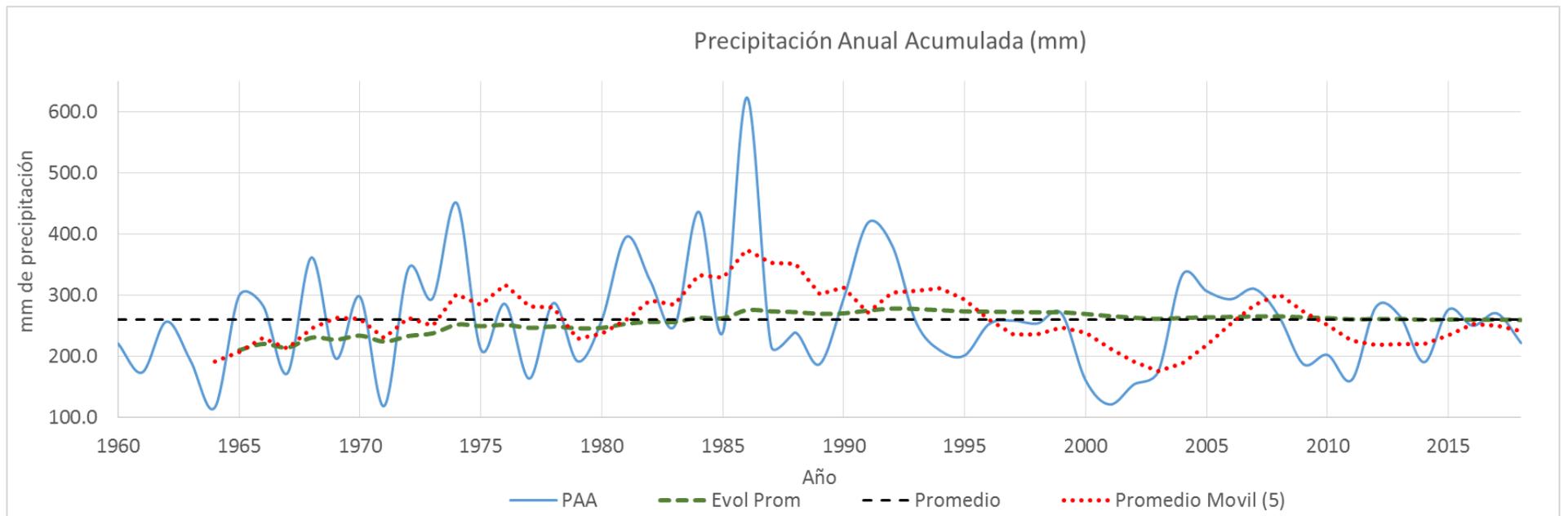


Figura A29. TACUBAYA (SMN)

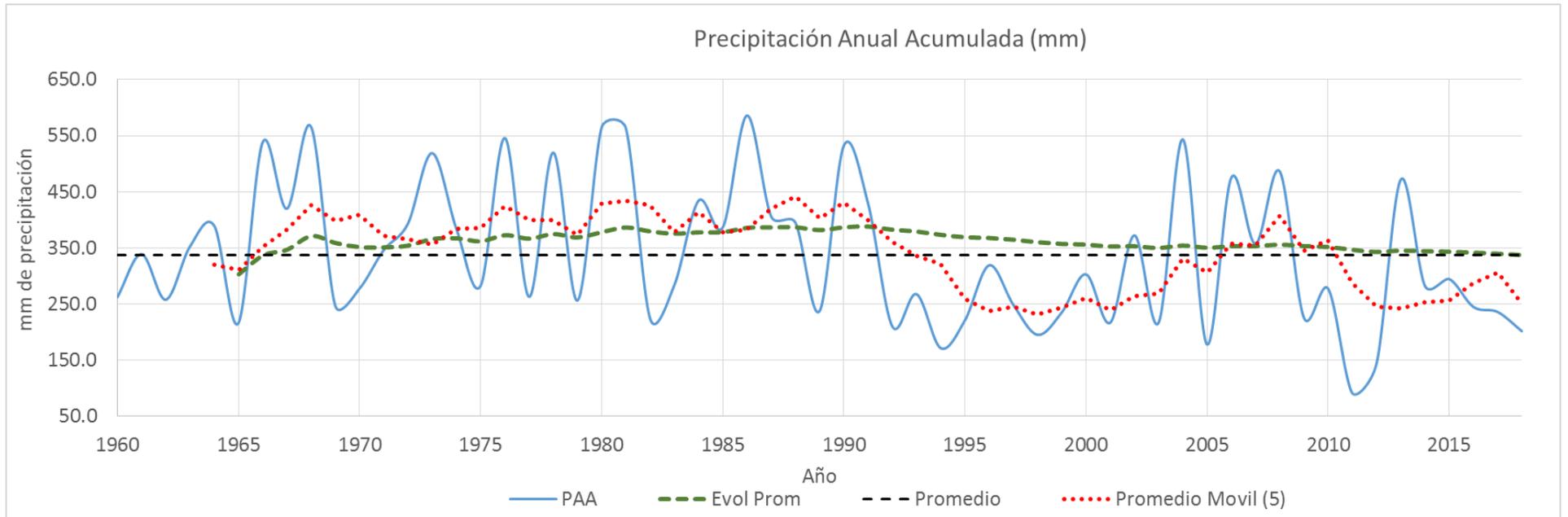


Figura A30. TEMOSACHIC (CNA)

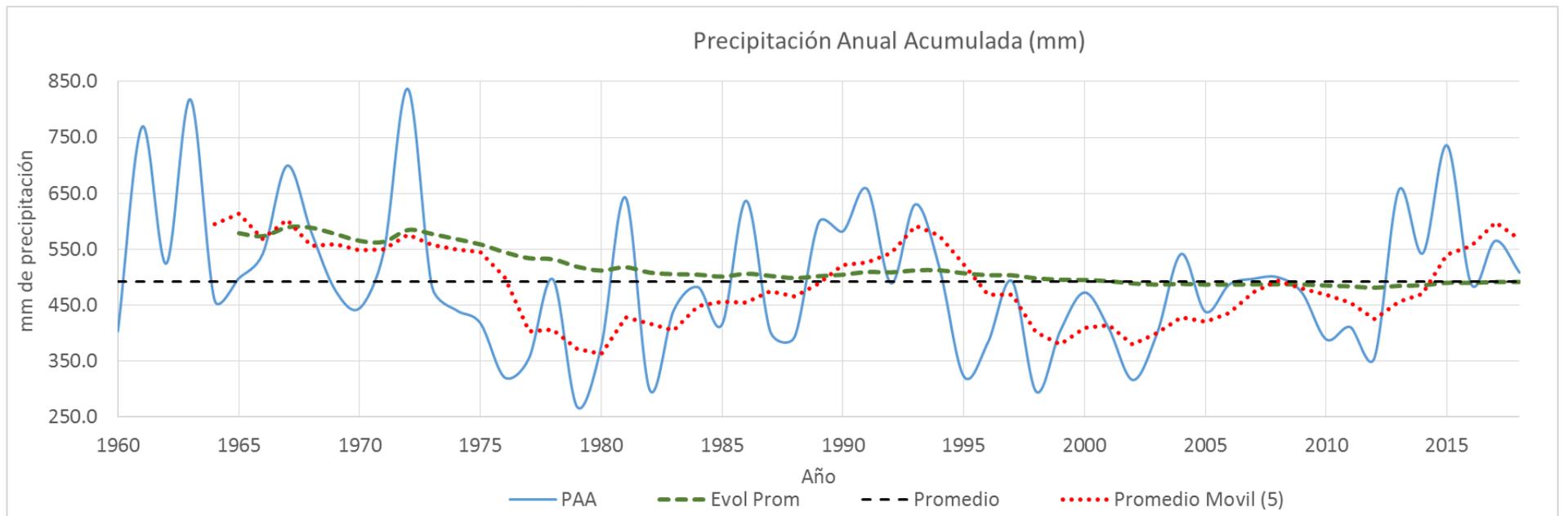


Figura A31. TUBARES (CNA)

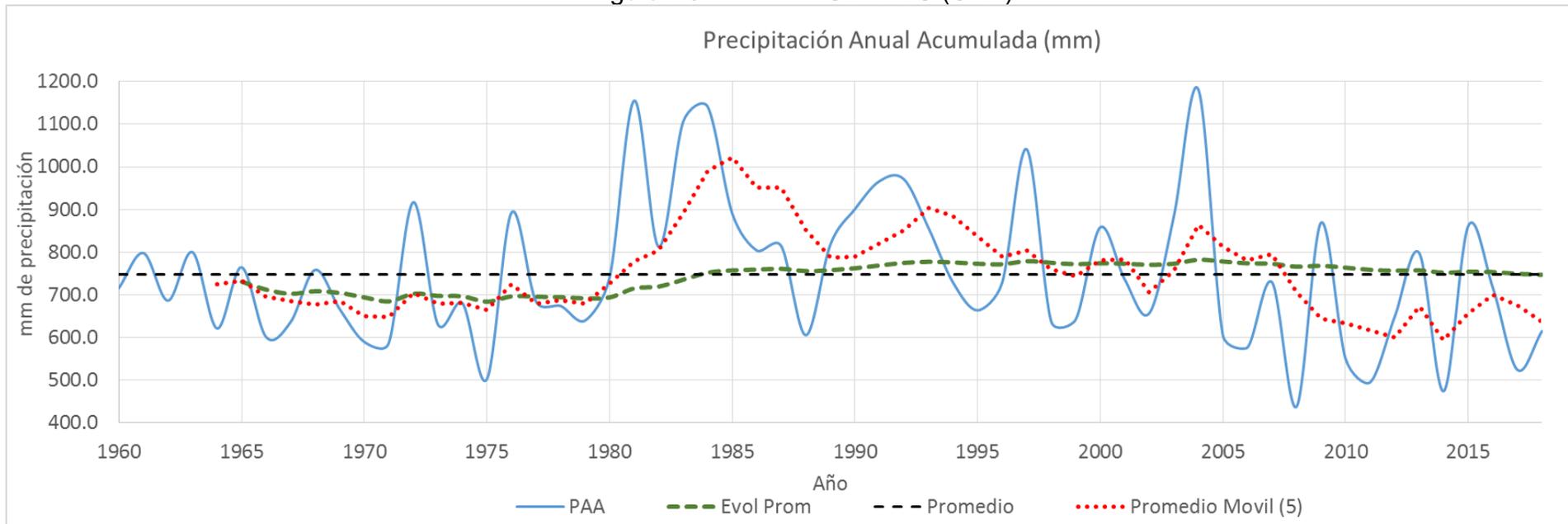


Figura A32. URIQUE (CNA)

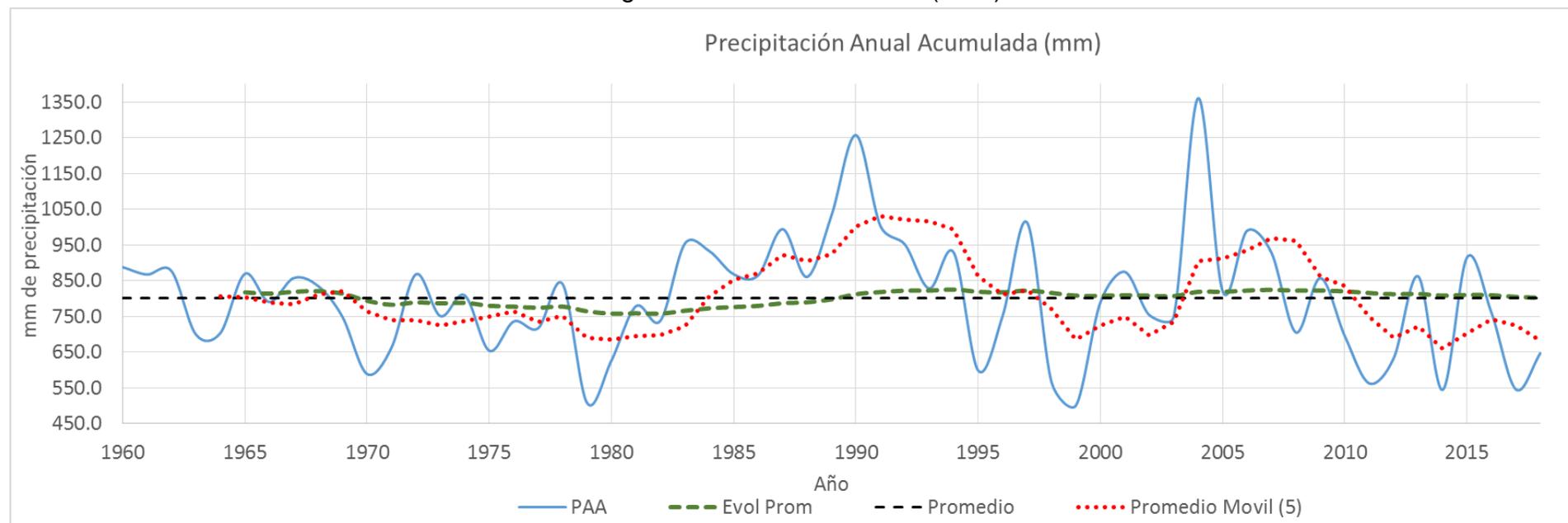


Figura A33. VALLE DE ZARAGOZA (CNA)

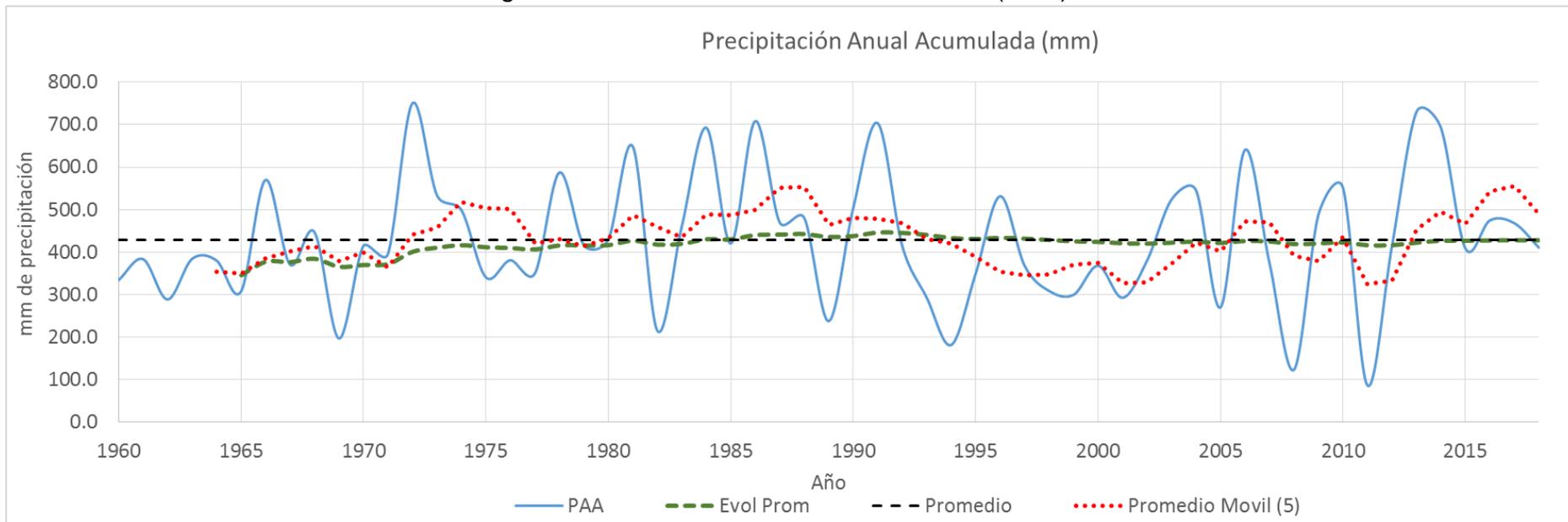


Figura A34. VILLA AHUMADA (SMN)

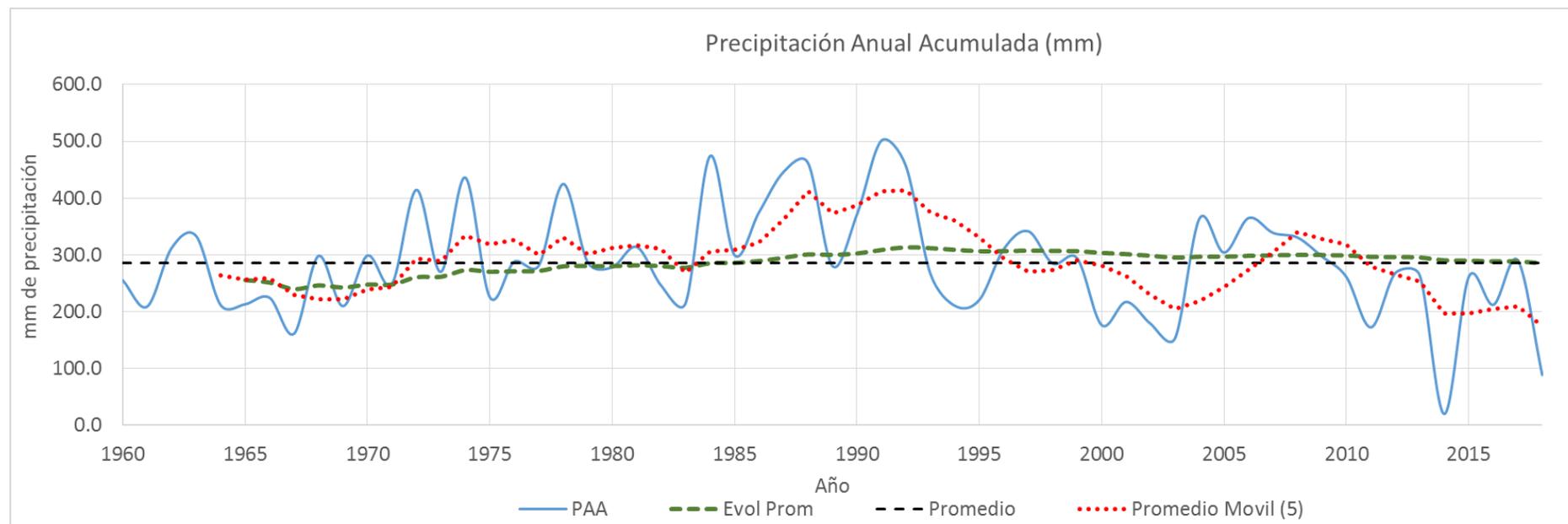
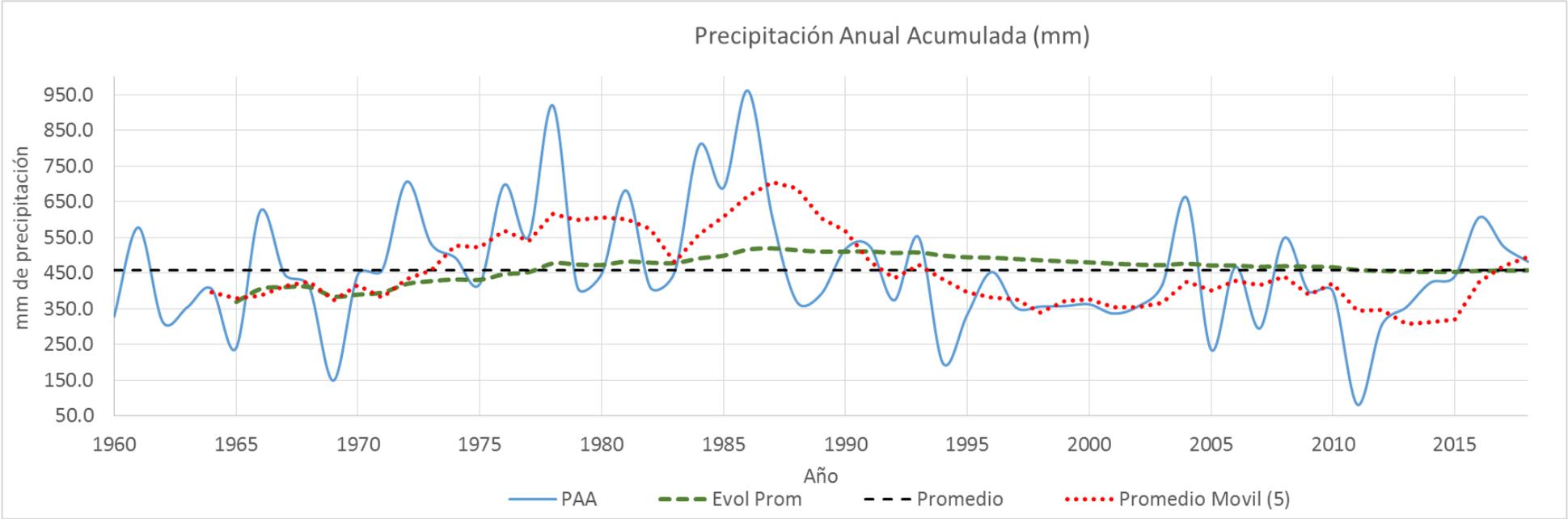


Figura A35. VILLA CORONADO (SMN)



8.3 ANEXO 3: PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD DE SERIES DE TIEMPO ANUALES

Tabla A2. Resultados de homogeneidad y normalidad

Nombre	Normalidad	Homogeneidad
ABRAHAM GONZÁLEZ (CNA)	✓	HOMOGÉNEO
ASCENSIÓN (SMN)	✓	HOMOGÉNEO
BACHINIVA (CNA)	X	HOMOGÉNEO
BISMARCK (CNA)	X	HOMOGÉNEO
CAMARGO (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
CASAS GRANDES (CNA)	✓	HOMOGÉNEO
CD. JUÁREZ (CNA)	✓	HOMOGÉNEO
CHIHUAHUA (CNA)	✓	HOMOGÉNEO
COLINA (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
COYAME (SMN)	X	HOMOGÉNEO
CREEL (CNA)	X	NO HOMOGÉNEO
CUAUHTÉMOC (CNA)	X	NO HOMOGÉNEO
DELICIAS (CNA)	✓	HOMOGÉNEO
EL SITIO (SMN)	✓	HOMOGÉNEO
EL TINTERO (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
FRANCISCO I. MADERO (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
GUACHOCHI (CFE)	X	NO HOMOGÉNEO
GUADALUPE Y CALVO (CNA)	X	NO HOMOGÉNEO
JIMÉNEZ (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO

Nombre	Normalidad	Homogeneidad
LAS LAJAS (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
LUIS L. LEÓN (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
MORIS (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
NOROGACHI (CFE)	X	HOMOGÉNEO
OJINAGA (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
PARRAL (CNA)	✓	HOMOGÉNEO
PARRITA (SMN)	✓	HOMOGÉNEO
PEÑITAS (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
SAMALAYUCA (SMN)	X	HOMOGÉNEO
TACUBAYA (SMN)	✓	NO HOMOGÉNEO
TEMOSACHIC (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO
TUBARES (CNA)	✓	HOMOGÉNEO
URIQUE (CNA)	X	NO HOMOGÉNEO
VALLE DE ZARAGOZA (CNA)	✓	HOMOGÉNEO
VILLA AHUMADA (SMN)	✓	NO HOMOGÉNEO
VILLA CORONADO (SMN)	✓	NO HOMOGÉNEO

8.4 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD PARAMÉTRICAS

Tabla A3: Pruebas de homogeneidad paramétricas con periodos

ID	Nombre	Normalidad	Homogeneidad	Periodo 1	Periodo 2	T de Student	Cramer
1	ABRAHAM GONZÁLEZ (CNA)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1989	1990-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
2	ASCENSIÓN (SMN)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1989	1990-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
5	CAMARGO (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1992	1993-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
6	CASAS GRANDES (CNA)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1994	1995-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
7	CD. JUÁREZ (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1973	1974-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
8	CHIHUAHUA (CNA)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1992	1993-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
9	COLINA (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-2000	2001-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
13	DELICIAS (CNA)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1994	1995-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
14	EL SITIO (SMN)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1997	1998-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
15	EL TINTERO (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1985	1986-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
16	FRANCISCO I. MADERO (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1992	1993-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
19	JIMÉNEZ (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1991	1992-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
20	LAS LAJAS (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1985	1986-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
21	LUIS L. LEÓN (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1994	1995-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
22	MORIS (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1990	1991-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
24	OJINAGA (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1993	1994-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
25	PARRAL (CNA)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1993	1994-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
26	PARRITA (SMN)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1992	1993-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
27	PEÑITAS (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1993	1994-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
29	TACUBAYA (SMN)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1991	1992-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO

ID	Nombre	Normalidad	Homogeneidad	Periodo 1	Periodo 2	T de Student	Cramer
30	TEMOSACHIC (CNA)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1977	1978-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
31	TUBARES (CNA)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1992	1993-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
33	VALLE DE ZARAGOZA (CNA)	✓	HOMOGÉNEO	1960-1991	1992-2018	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
34	VILLA AHUMADA (SMN)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1992	1993-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
35	VILLA CORONADO (SMN)	✓	NO HOMOGÉNEO	1960-1991	1992-2018	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO

8.5 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD NO PARAMÉTRICAS

Tabla A4: Pruebas de homogeneidad de Helmert y Secuencias

ID	Nombre	Normalidad	Homogeneidad	Helmert	Secuencias
3	BACHINIVA (CNA)	X	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
4	BISMARCK (CNA)	X	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
10	COYAME (SMN)	X	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
11	CREEL (CNA)	X	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
12	CUAUHTÉMOC (CNA)	X	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
17	GUACHOCHI (CFE)	X	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO
18	GUADALUPE Y CALVO (CNA)	X	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
23	NOROGACHI (CFE)	X	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
28	SAMALAYUCA (SMN)	X	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
32	URIQUE (CNA)	X	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO	NO HOMOGÉNEO