

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Evaluación de la Tendencia de Evaporación en México Mediante la Prueba no Paramétrica de

Mann Kendall

Por:

**CARLOS DE JESÚS VÁZQUEZ DE LA TORRE**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México.

Junio de 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Evaluación de la Tendencia de Evaporación en México Mediante la Prueba no Paramétrica de

Mann Kendall

Por:

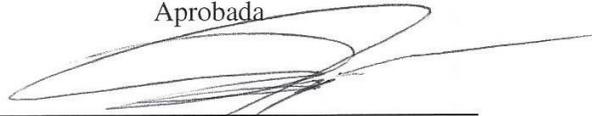
**CARLOS DE JESÚS VÁZQUEZ DE LA TORRE**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

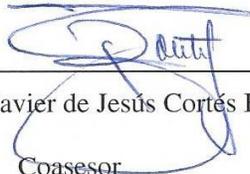
**INGENIERO FORESTAL**

Aprobada



Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal



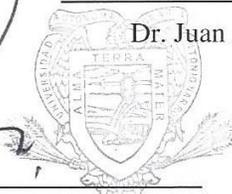
Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho

Coasesor



Dr. Juan Abel Nájera Luna

Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Junio 2014

## DEDICATORIAS

A DIOS: Por iluminar mi camino, por permitirme gozar y aprovechar al máximo cada momento de la vida y permitirme llegar a cumplir una meta más en mi vida.

A MI MADRE: Sra. Guadalupe de la Torre Martínez por su infinito amor y confianza, por apoyarme siempre incondicionalmente, ya que siempre me ayudaste cuando más te necesite, me faltan palabras para decirte cuanto te admiro y te quiero, mil gracias por ser mi inspiración.

A MI PADRE: Sr. Manuel de Jesús Vázquez Vázquez por el gran esfuerzo y apoyo que me brindaste en todos los momentos más difíciles de mi carrera por todo esto y más gracias.

A MI HERMANA (O): Profa. Ana Patricia Vázquez de la Torre por estar siempre conmigo ayudándome a salir adelante, por compartir momentos tristes y alegres, pero sobre todo porque dentro de nosotros nos une un gran amor, LIBRADO, MANUEL, REINOLL por su amistad sus consejos y compartir experiencia de la vida.

A MIS PRIMOS: Susana, Alejandro, Miguel Ángel, Santiago, Rosa, y muchos más que son, gracias por todos los buenos momentos que compartieron y los ánimos que me dieron para salir adelante por su amistad y sus mejores deseos.

A MIS ABUELOS: Carmen Espinoza (†) gracias por cuidarme y protegerme Manuela Martínez y Mariano de la Torre (†) gracias por su generoso afecto, cariño y comprensión que siempre me han brindado, por sus consejos que siempre me dieron fuerzas.

A MI COMPAÑERO: Omar Rueda Moreno por los buenos momentos compartidos, el apoyo y confianza.

A Mónica del C. Gallegos Hernández., Por todo lo que está por venir...

A LA FAM. GARCÍA COUTIÑO: Por su confianza y el cariño que demostraron a mí y mi familia, los buenos consejos que me ayudaron a salir adelante y cumplir mi meta.

A LA FAMILIA HERNÁNDEZ QUINTERO: Por la confianza y cariño que demostraron hacia mí, los buenos consejos que me ayudaron a salir adelante.

A LA FAMILIA MARTÍNEZ LÓPEZ: Por la amistad, confianza y cariño demostrado hacia mí, los buenos consejos que me ayudaron a salir adelante.

A MIS AMIGOS: Que no me es posible mencionar a todos pero gracias por su amistad y los buenos momentos compartidos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A MI ALMA MATER: Por la oportunidad de realizar mis estudios de Ingeniero Forestal por el apoyo para llegar a ser un profesionalista al servicio del campo y la sociedad.

Al Dr. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ: Asesor principal de este trabajo, por enseñarme a valorar el tiempo y el trabajo, pero sobre todo por su interés en mi superación, su entusiasmo y decidido apoyo en la realización de la tesis. Gracias porque además de ser mi asesor siempre me brindo su confianza y amistad gracias por creer en mí.

Al Dr. JAVIER DE JESÚS CORTÉS BRACHO: coasesor de la presente investigación por sus valiosos comentarios y observaciones que fortalecieron más el contenido del trabajo.

Al Dr. JUAN ABEL NÁJERA LUNA: coasesor de la presente investigación por sus valiosos comentarios y observaciones que fortalecieron más el contenido del trabajo

A TODOS LOS PROFESORES DEL DEPARTAMENTO FORESTAL: gracias por su comprensión, por su paciencia y por su interés en transmitir sus conocimientos.

AL SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL: Por la colaboración para la realización de este trabajo al proporcionar la información climatológica.

A TODOS MIS COMPAÑEROS DE LA CARRERA DE INGENIERO FORESTAL  
GENERACION CXVII.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> -----	I
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> -----	1
<b>1.1. Importancia del estudio</b> -----	1
<b>2. Objetivos</b> -----	3
<b>2.1. General</b> -----	3
<b>2.2. Específicos</b> -----	3
<b>2.3. Hipótesis</b> -----	3
<b>3. REVISIÓN DE LITERATURA</b> -----	4
<b>3.1. Proceso de evaporación</b> -----	4
<b>3.2. Factores que afectan la evaporación</b> -----	4
<b>3.3. Estudios afines</b> -----	4
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> -----	7
<b>4.1. Descripción físico-climática del área de estudio</b> -----	7
<b>4.2. Fuente de datos</b> -----	8
<b>4.3. Procedimientos</b> -----	8
<b>4.4. Prueba de tendencia Mann-Kendall</b> -----	9
<b>4.5. Pendiente estimador de Sen</b> -----	11
<b>4.6. Distribución geográfica de la tendencia</b> -----	11

<b>5. RESULTADOS Y DISCUSION</b>	12
<b>5.1. Tendencia de la evaporación total mensual</b>	13
<b>5.2. Tendencia de la evaporación promedio mensual</b>	16
<b>5.3. Tendencia de la evaporación máxima mensual</b>	19
<b>5.4. Tendencia de evaporación mínima mensual</b>	22
<b>6. Distribución de valores de la pendiente de la evaporación</b>	25
<b>7. Valores de la evaporación total, promedio, máxima y mínima</b>	27
<b>8. CONCLUSIONES</b>	30
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución geográfica de las estaciones climatológicas evaluadas en la República Mexicana. ....	9
<b>Figura 2.</b> Porcentaje y número de estaciones climatológicas con tendencias positivas y negativas mensuales en evaporación total A), evaporación media B), evaporación máxima C) y evaporación mínima D). ....	12
<b>Figura 3.</b> Patrones geográficos de la tendencia de la evaporación total mensual en la República Mexicana. ....	15
<b>Figura 4.</b> Patrones geográficos de la tendencia de la evaporación promedio mensual en la República Mexicana. ....	18
<b>Figura 5.</b> Patrones geográficos de la tendencia de la evaporación máxima mensual en la República Mexicana. ....	21
<b>Figura 6.</b> Patrones geográficos de la tendencia de la evaporación mínima mensual en la república Mexicana.....	24
<b>Figura 7.</b> Histogramas de frecuencia de datos mensuales de la evaporación total A), evaporación media B), evaporación máxima C) y evaporación mínima D). ....	26
<b>Figura 8.</b> Evaporación Total A), Evaporación Promedio B), Evaporación Máxima C) y Evaporación Mínima D) en México. ....	27

## RESUMEN

La presente investigación analiza la tendencia de la evaporación usando datos instrumentales mensuales de evaporación en México, con el objetivo de identificar las regiones susceptibles a cambios. El análisis de datos se basó en un total de 271 estaciones climatológicas distribuidas en todo el territorio mexicano, usando información proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional mexicano (SMN), variando desde 1950 - 2011. Los datos de evaporación mensual se valoraron mediante la prueba no paramétrica de Mann Kendall para después obtener la significancia estadística de la tendencia. Los resultados indican que la evaporación total, media, máxima y mínima presentan cambios importantes, representando el 77.7, 75.2, 77.9 y 63.7 % de las estaciones climatológicas evaluadas respectivamente y se manifiestan con decrementos principalmente en el centro y norte de la República Mexicana. En la evaporación total presenta el decremento en un rango de -0.2 a -0.8 mm/año, mientras que para la evaporación media presenta una disminución en la evaporación de -0.008 a -0.025 mm/año. Los resultados indican que la evaporación presenta una tendencia decreciente en la mayor parte de la república mexicana así como también existen áreas donde le evaporación tiene una tendencia positiva y regiones donde no hay cambios en la evaporación.

**Palabras claves:** evaporación, tendencia, México, Mann Kendall.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Importancia del estudio

La evaporación es un componente importante del ciclo hidrológico y las influencias de la disponibilidad de agua, el cambio climático como consecuencia del calentamiento global podría tener un impacto crítico en la evaporación y por lo tanto la disponibilidad de agua. La identificación de tendencias de evaporación en respuesta a las cambiantes condiciones climáticas podría ayudar a cuantificar los impactos potenciales del cambio climático en la evaporación. Burn y Hesch (2006) predicen un ciclo hidrológico intensificado en la respuesta al aumento de la temperatura por el calentamiento global.

Recientemente el cambio climático está recibiendo mucha atención, los cambios del clima en el mundo tiene un efecto significativo sobre los recursos hídricos que afecta a los medios de vida de las personas especialmente en las zonas áridas, en la mayor parte del territorio mexicano sufre problemas de escases de agua ya que las actividades agrícolas y pecuarias consumen el 77 % del total de agua en el territorio, la identificación en los cambios de evaporación ayuda a planificar futuros proyectos relacionados con el agua e identifica zonas de evaporación con tendencias superiores e inferiores para una adecuada planificación y gestión de proyectos hídricos (Elnesr y Alazba, 2013).

Hay cada vez más una creciente demanda de datos de evaporación para los estudios del sistema hidrológico y los flujos de energía, especialmente para los estudios que se refieren a los impactos del calentamiento global, pero los registros de evaporación puede contener muchos objetos de medición (heterogeneidades) causadas por cambios en el equipo, los cambios de exposición y los cambios de ubicación, sin embargo estimaciones más precisas de

la evaporación se puede obtener mediante la aplicación de datos meteorológicos empíricos pero los enfoques más precisos tienden a ser específicamente del sitio, por lo tanto los registros de evaporación son la principal fuente de datos sobre las tendencias históricas de evaporación (Kirono y Jones, 2007).

No hay método para desarrollar la escala de la medición de la cantidad de evaporación en la superficie cuando las condiciones de la superficie del suelo no son uniformes, a menudo que las series temporales a largo plazo de estos parámetros no están en los parámetros de las estaciones de mediciones hidrológicas e incluso si la serie temporal corta está disponible tendrá la limitación mencionada (Hooshmand *et al.*, 2013).

En efecto, la evaporación es definida como la cantidad de agua evaporada, en el caso de que no presentara una limitada disponibilidad, la cual se mide en mm/día y que depende de la temperatura y la humedad relativa ambiental así como también el viento. No obstante, si se considera que estos parámetros no varían, entonces la evaporación la cual es una variable escasamente estudiada puede aportar nuevos conocimiento sobre la variabilidad del clima y el cambio climático (Calbó *et al.*, 2010). Los mecanismos que causan las tendencias en la evaporación no se entienden claramente. Aunque no está muy estudiada recordando que las temperaturas globales están en aumento, son muchos los factores meteorológicos que puede resultar en un aumento o una disminución (Burn y Hesch, 2006). El parámetro de evaporación tiene una especial importancia por que combina cambios en muchos otros parámetros climáticos incluyendo temperatura, radiación, humedad y velocidad del viento más sin embargo tiene una influencia directa sobre el equilibrio hidrológico (Elnesr y Alazba 2013).

La variabilidad de la dinámica de la evaporación se puede atribuir principalmente a los cambios en los componentes aerodinámicos, con algunas aportaciones de irradiación solar. El viento cerca de la superficie podría ser el principal componente a la disminución de la evaporación mientras que el efecto combinado de la velocidad del viento y el déficit de presión de vapor puede contribuir al aumento de la evaporación (Boletín de la academia de ciencia de china, 2013).

## **2. Objetivos**

### **2.1. General**

Evaluar la tendencia de algunos parámetros de la evaporación en el territorio mexicano.

### **2.2. Específicos**

Evaluar la tendencia de la evaporación total, media, máxima y mínima mediante una prueba no paramétrica a escala mensual en México.

Identificar las regiones geográficas del país más susceptibles a los cambios de la evaporación y posibles impactos y consecuencias.

### **2.3. Hipótesis**

Existe una tendencia a incrementar la evaporación en la República Mexicana.

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1. Proceso de evaporación**

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua. El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. Para que este proceso se realice se requiere de energía como la radiación solar directa, y la temperatura del aire, el remplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento, por lo tanto la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar en el proceso de la evaporación (FAO, 2006).

#### **3.2. Factores que afectan la evaporación**

El clima, las características de la vegetación, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. El tipo de vegetación, la etapa de desarrollo y la cobertura deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración, los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo y el mal manejo pueden reducir la evaporación (FAO, 2006).

#### **3.3. Estudios afines**

Liu et al. (2010) encontraron que con el método de Kendall, la mayoría de las estaciones 219 de 298 mostraron tendencias negativas para la evaporación de bandeja en China y el 60 % 131 de 219 entre las estaciones negativas presentaron tendencias decrecientes significativas al 99 % de confiabilidad; por el contrario, sólo el 26,5 % (79 de 298) entre las estaciones presentan tendencias positivas durante 1959 – 2000 en China y 25 estaciones presentan tendencias

crecientes importantes. El resultado revelado por el modelo lineal ajustado es que: 217 estaciones presentan tendencias negativas con una pendiente media de -5.8 mm a -2, mientras que sólo 81 estaciones mostraron tendencias positivas con una pendiente promedio de 3 a 2 mm, sobre todo, había 132 estaciones que muestran tendencias significativas con un nivel de confiabilidad del 95 %, con un promedio pendiente de -6.8 a -2 mm.

Hooshmand et al. (2013) obtuvieron que las tendencias de las diferentes series de tiempo de evaporación de bandeja (anual, Otoño, Invierno, Primavera, Verano) determinados para las estaciones consideradas, los resultados de la aplicación de la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para determinar las tendencias monótonas en las series de tiempo de evaporación muestran, que las series temporales estudiadas (33 series de tiempo, es decir, el 66 %) tienen tendencias negativas y las series de tiempo restante (17 series de tiempo, es decir el 34 %) tienen tendencias positivas. Además, el 26 % de series de tiempo mostraron tendencias negativas estadísticamente significativas, y el 12% mostraron una tendencia positiva estadísticamente significativa. Por lo tanto el 62 % de las series temporales mostró tendencias no significativas.

Lawrimore y Peterson, (2000) reportaron que las tendencias de precipitación son positivas en todas las regiones excepto el sureste de EE.UU, lo que indica que la mayoría de las regiones en el Estados Unidos ha experimentado crecientes cantidades de precipitación durante los meses de estaciones cálidas entre 1948 y 1998. Por cada región con un aumento en la tendencia de la precipitación, la tendencia en la evaporación de bandeja es negativo, sin embargo, cuando se ha producido una tendencia hacia condiciones más secas durante la estación cálida, la tendencia de evaporación de bandeja es positiva, la tendencia de evaporación de bandeja son significativas al 95% de confiabilidad.

Elnesr y Alasba, (2013) obtuvieron que los valores más bajos de evapotranspiración ocurridos en la temporada de invierno, diciembre y enero, mientras que los valores más altos se produjeron durante los meses de verano, junio, julio y agosto. Los resultados muestran una alta variación en la evapotranspiración cerca de 5 a 15 mm/día en julio donde el mínimo y máximo absoluto de evapotranspiración muestran incluso mayor variación y rango de 3.9 mm/día en enero tan alto como 18.5 mm/día en julio.

Calbo et al. 2013) encontraron que la media de la evaporación anual y estacional muestran un ligero descenso seguido de una ligera recuperación, este comportamiento temporal es similar al observado en verano, primavera y en menor medida en otoño e invierno se muestra que existen importantes variaciones, con todas tendencias lineales estimadas para el periodo de 1985 – 2010 no son significativas en ninguna de estas series a excepción del verano con 0.20 mm/día por década.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. Descripción físico-climática del área de estudio**

El estudio se desarrolló para toda la República Mexicana, misma que se encuentra ubicada totalmente en el hemisferio Norte. La extensión territorial de México es de 1, 964, 375 km<sup>2</sup> de los cuales 5127 km<sup>2</sup> corresponden a superficie insular. Las coordenadas extremas que enmarcan el territorio mexicano son: al Sur 14° 32' 27'' latitud Norte, en la desembocadura del río Suchiate, frontera con Guatemala, al Norte 32° 43' 06'' latitud Norte, en el Monumento 206, en la frontera con los Estados Unidos de América, al Este 86° 42' 36'' en el extremo Sureste de la Isla Mujeres y al Oeste 118° 22' 00'' longitud Oeste, en la Roca Elefante de la Isla de Guadalupe, en Océano Pacífico (INEGI, 2005).

En cuanto al clima, la gran amplitud altitudinal de México, su ubicación a ambos lados del trópico de cáncer, la asimetría que caracteriza a las dos vertientes de México siendo la del Atlántico, por regla general más húmedo que la del pacífico. Tal circunstancia se debe, en gran medida, a la influencia de los vientos alisios y es parte de un notable gradiente de aumento de la aridez que afecta todo el país en dirección sureste-noroeste. El Trópico de Cáncer, además de ser una línea significativa desde el punto de vista térmico, marca también en forma aproximada la franja de transición entre el clima árido y semiárido de la zona anticiclónica de altas presiones, que se presentan hacia el norte, y el clima húmedo y semihúmedo influenciado por los vientos dominantes y por los ciclones hacia el sur (Rzedowski, 1983).

En el territorio mexicano se registra una precipitación contrastante ya que la media anual promedia 777 mm, variando desde 50 mm en el Noroeste y Noreste, hasta más de 4000 mm en el Sureste y costa sur del Pacífico. La gran diversidad de condiciones térmicas de México se pone de manifiesto por el hecho de que aun siendo atravesado por un extenso tramo de

ecuador térmico, en algunas de sus montañas se mantienen nieves perpetuas y glaciares. Haciendo abstracción de estas condiciones casi excepcionales cabe observar que los valores más frecuentes registrados en el país varían entre 10° y 28°C (Rzedowski, 1983).

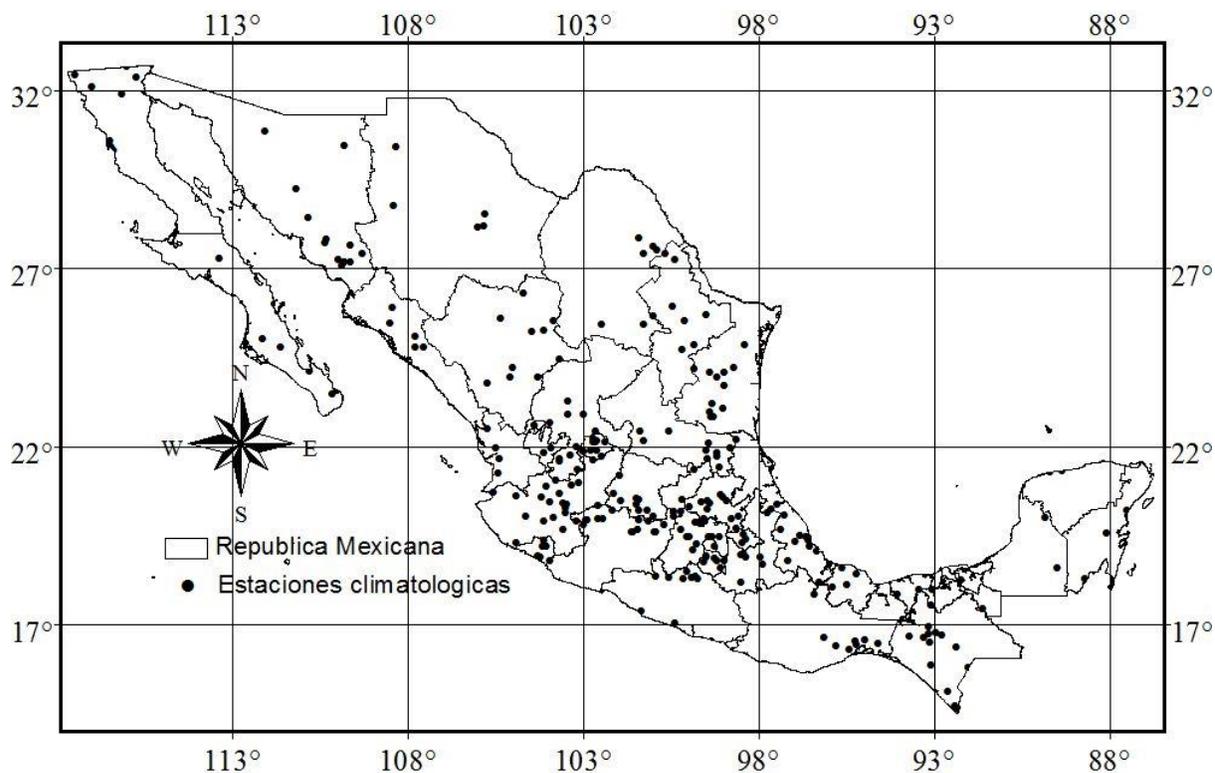
#### **4.2. Fuente de datos**

Se utilizó información de 271 estaciones climatológicas distribuidas en todo el país, cubriendo espacios geográficos razonables. Los datos analizados son supervisados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) y proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), variando desde 1950 - 2011. La información corresponde a registros diarios de evaporación registrada en cada estación climatológica (Figura 1).

Para la selección de estaciones climatológicas se consideraron los siguientes criterios: un porcentaje de información mayor al 80 %, así como un número de registro de al menos 50 años, algunas con menores registros para cubrir espacios geográficos del área de estudio, consistencia anual e interanual y la homogeneidad de las series.

#### **4.3. Procedimientos**

El conjunto de datos de evaporación se ordenaron por medio de una macro realizada en Excel, posteriormente mediante el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System) Versión 9.0 se realizaron análisis obteniendo como resultado los estadísticos de Media mensual, Suma mensual, Máxima mensual, Mínima mensual y su Coeficiente de Variación.



**Figura 1.** Distribución geográfica de las estaciones climatológicas evaluadas en la República Mexicana.

#### 4.4. Prueba de tendencia Mann-Kendall

Para calcular la tendencia de la evaporación mensual se ha investigado el uso de la prueba Mann-Kendall (MK). Mann (1945) originalmente utilizó esta prueba al igual que Kendall (1975), posteriormente se derivó la distribución estadística de la prueba. Su ventaja es que no compromete la forma original de la función de distribución de los datos, incluidos los censurados y los datos que faltan y se ha recomendado ampliamente por la Organización Meteorológica Mundial para su uso público, esta prueba ha sido utilizada en Canadá (Burn y Hesch, 2006), China (Fang fang *et al.*, 2007) sureste de Irán (Hooshmand *et al.*, 2013), para tendencias de variables hidroclimáticas. Por lo tanto, la prueba Mann-Kendall se ha

encontrado ser una excelente herramienta para la detección de tendencias por otros estudios en aplicaciones similares. La prueba MK considera solo los valores relativos de todos los términos de la serie  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  a analizar.

La estadística de prueba MK viene dada por:

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Donde  $x_i$  y  $x_j$  son los valores de los datos secuenciales, es el conjunto de datos la longitud de registro, y

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Bajo la hipótesis nula de ninguna tendencia, y el supuesto de que los datos son independientes e idénticamente distribuidos, la media cero y varianza  $S$  denotada por  $\sigma^2$  se calcula como:

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \quad (3)$$

La varianza normal estándar se utiliza para las pruebas de hipótesis, y se designa como el índice de tendencia estadística de prueba  $Z$ , de la siguiente manera:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sigma} & S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sigma} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Así, en una prueba de dos colas para la tendencia, la  $H_0$  que no existe una tendencia en el conjunto de datos, o bien se rechaza o se acepta en función de si el estadístico  $Z$  calculado es mayor o menor. El valor positivo de  $Z$  muestra una tendencia creciente y su valor negativo muestra una tendencia decreciente (Hooshmand *et al.*, 2013).

#### 4.5. Pendiente estimador de Sen

La estimación de la pendiente se utiliza para describir la relación entre una variable con otra u otras variables de interés. Se realiza para obtener la pendiente de las variables hidrometeorológicas en tiempo, los valores positivos de la pendiente muestran una pendiente creciente, mientras que los valores negativos de la pendiente indican una tendencia decreciente (Hooshmand *et al.*, 2013). En este estudio, la magnitud de la tendencia se estimó usando un método de la pendiente no paramétrica propuesto por Sen (1968)

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{x_j - x_k}{j - k} \right] \text{ para todo } k < j \quad (5)$$

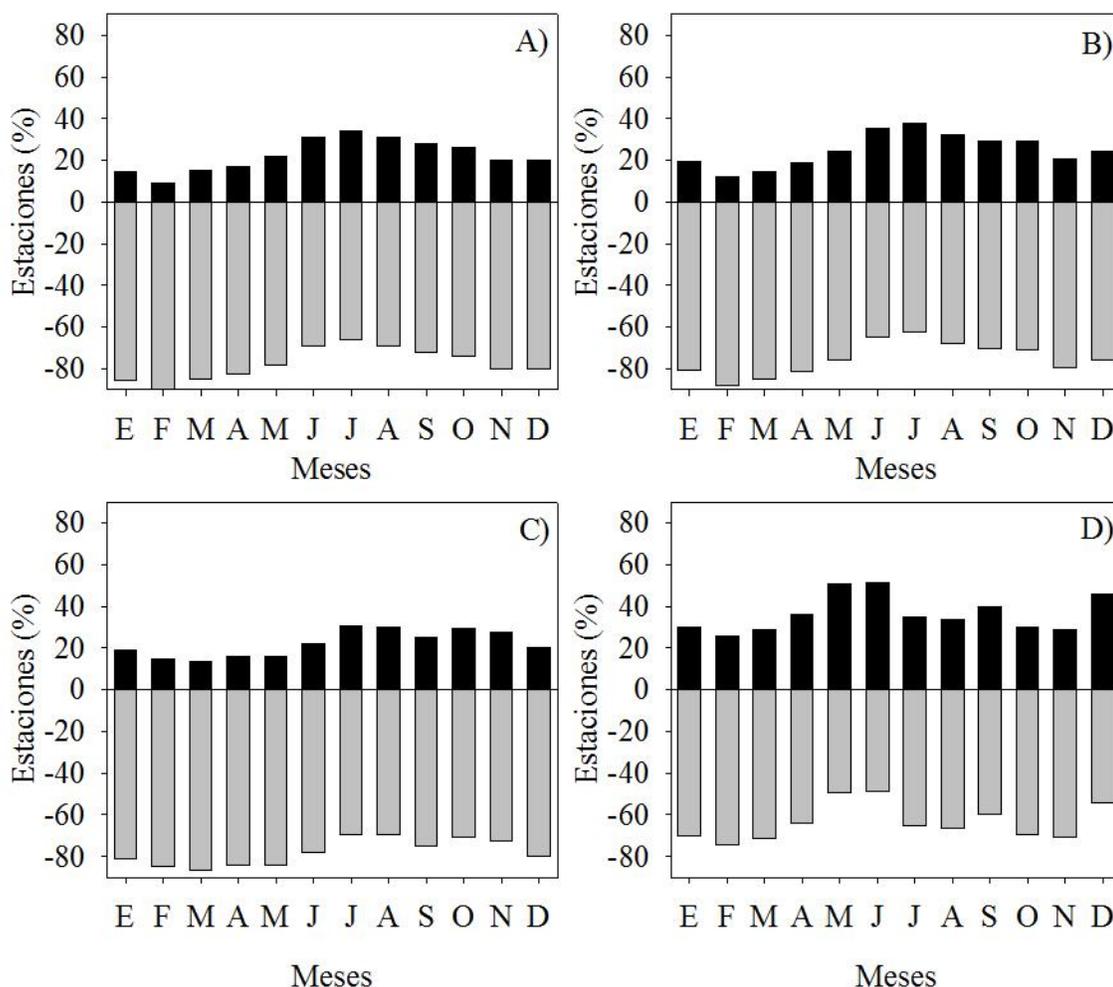
Donde  $1 < k < j < n$ .  $\beta$  es la mediana de todas las posibles combinaciones de pares para todo el conjunto de datos.

#### 4.6. Distribución geográfica de la tendencia

Posteriormente con los valores mensuales de la pendiente se procedió a realizar la interpolación con la ayuda del ArcView GIS 3.2, de tal manera que se generaron mapas de los cuatro parámetros de la evaporación para todo el territorio mexicano que muestran los patrones de la tendencia de la evaporación así como aquellas donde no se registran.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

De acuerdo con la prueba Mann-Kendall el 50 % de las estaciones climatológicas evaluadas muestran una tendencias en la evaporación, en las gráficas del total (Figura 2A), media (Figura 2B), máxima (Figura 2C) y mínima (Figura 2C) mensual obtenidas del número de estaciones climatológicas con una tendencia se observa que más del 77, 75, 77 y 63 % respectivamente las estaciones tienen una tendencia decreciente en todo el año y el resto con tendencias positivas.



**Figura 2.** Porcentaje y número de estaciones climatológicas con tendencias positivas y negativas mensuales en evaporación total A), evaporación media B), evaporación máxima C) y evaporación mínima D).

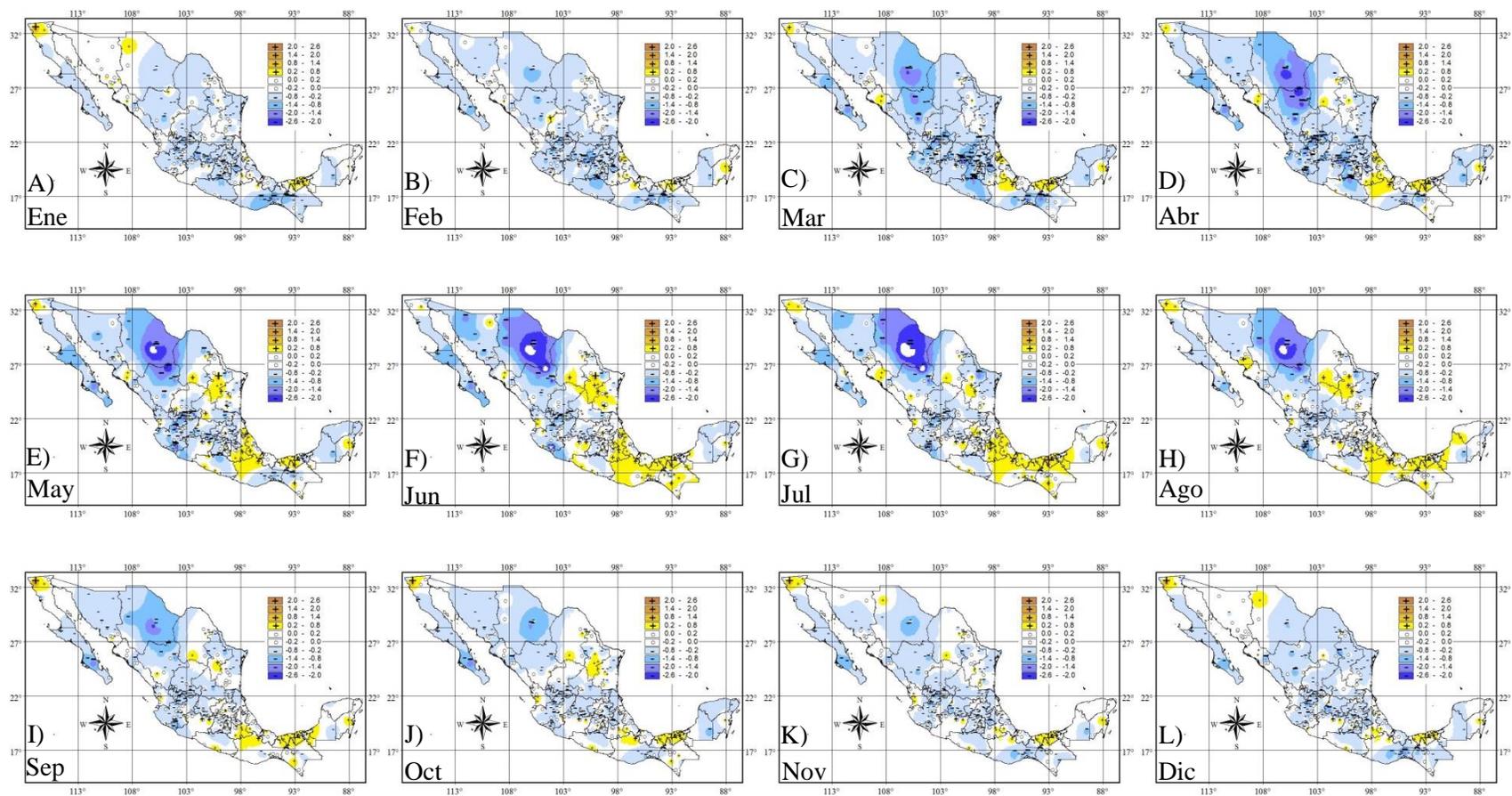
## 5.1. Tendencia de la evaporación total mensual

En la evaporación total como se mencionó anteriormente en promedio más del 77 % de las estaciones climatológicas presentan tendencias decrecientes significativas con un valor de  $p \leq 0.05$ , en el caso de los meses de enero a abril tienen el 86 % de las estaciones climatológicas con tendencias decrecientes en la evaporación mensual lo que representa a 126 estaciones climatológicas (Figura 2A), y las regiones donde se manifiesta esta tendencia es centro y norte del país (Figura 3A – 3D) con valores de -0.2 a -0.8 mm/año en los estados de Coahuila, Durango, Chihuahua, Sonora, México, Zacatecas, Hidalgo, Querétaro entre otros estados.

Los estados de Chihuahua, Sonora, Durango, Baja California Sur y Norte son los estados que comprenden la región donde la evaporación total mensual continua con la tendencia decreciente (Figura 3E – 3H) y se distribuye en un rango de -0.2 a -0.8 mm/año con una proporción de estaciones climatológicas del 70 % y que representa en promedio 86 estaciones climatológicas en los meses de mayo – agosto (Figura 2A), así como también se encuentran regiones donde la evaporación presenta una tendencia creciente en los estados de Chiapas, Tabasco, la mitad del estado de Veracruz y la región noreste de Oaxaca con un porcentaje de estaciones del 30 % (Figura 2A) que representa a 35 estaciones climatológicas con tendencias positivas en la evaporación.

En el último cuatrimestre del año septiembre – diciembre, 107 estaciones climatológicas que representan el 77 % continua con la tendencia decreciente en la evaporación (Figura 2A), en la región norte y centro de la República Mexicana (Figura 3I – 3L) es donde se manifiesta esta tendencia decreciente con valores de evaporación de -0.2 a -0.8 mm/año en los estado de Durango, Sonora, Chihuahua, San Luis Potosí, Guanajuato por mencionar algunos estados del territorio mexicano, para estos últimos 4 meses septiembre – diciembre se observa que las

regiones en las que la evaporación presenta una tendencia positiva tienen valores de 0.2 a 0.8 mm/año (Figura 3E – 3H) con una proporción de estaciones del 23 % (Figura 2A).



**Figura 3.** Patrones geográficos de la tendencia de la evaporación total mensual en la República Mexicana.

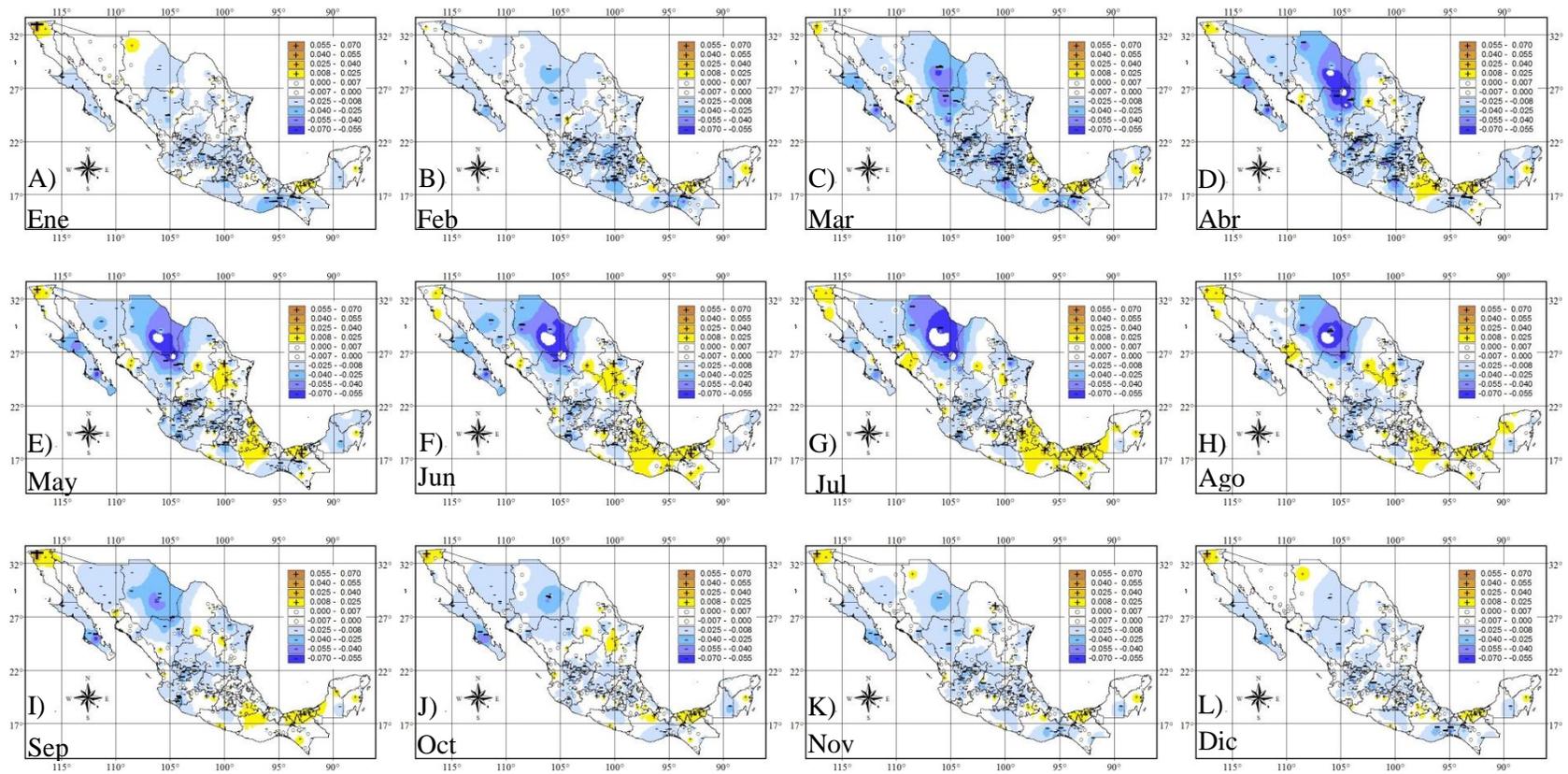
## 5.2. Tendencia de la evaporación promedio mensual

Para el promedio mensual de la evaporación hay un total de 135 estaciones climatológicas con una tendencia significativa al 95 % de confiabilidad , de las cuales más del 75 % de estas estaciones presentan tendencia decreciente distribuidas a lo largo de todo el año (Figura 2B), en los meses de enero – abril el 83 % de las estaciones climatológicas manifiestan una tendencia decreciente en la evaporación mensual y las regiones donde se manifiesta este fenómeno son norte, centro y parte de la región sur, sureste de la República Mexicana (Figura 4A – 4D) en los estados de Coahuila, Chihuahua, Durango, Guerrero por mencionar algunos, con valores de evaporación de -0.008 a -0.025 mm/año.

En los meses de mayo – agosto en promedio 80 estaciones muestran tendencia decreciente en la evaporación mensual que representa el 67 % de las estaciones que presentan una tendencia (Figura 2B) esta tendencia decreciente en la evaporación se manifiesta en la región norte de la República Mexicana (Figura 4E – 4H) en los estados de Durango, Chihuahua y Baja California Sur y en pequeñas regiones del centro del país, con valores de evaporación de -0.008 a -0.025 mm/año (Figura 8B), cabe destacar que para estos meses las regiones donde la evaporación tiene una tendencia creciente es más amplia como se observa en los estados de Oaxaca, Tabasco y regiones de Baja California, Nuevo León y Tamaulipas con un número promedio de 38 estaciones climatológicas y que representa el 32 % de las estaciones climatológicas con valores de 0.008 a 0.025 mm/año (Figura 2B).

Cabe mencionar que se observan estaciones climatológicas que presentan una tendencia positiva en los meses de junio y julio con valores de 0.008 a 0.025 mm/año, para los últimos cuatro meses del año, de septiembre – diciembre la proporción del número de estaciones climatológicas que presentan tendencias decrecientes en la evaporación es del 74 % que

representa a 103 estaciones climatológicas (Figura 2B) 6.5 % más que los 4 meses anteriores, los valores de la evaporación para estos últimos 4 meses fluctúan entre -0.008 a -0.25 mm/año (Figura 8B), y que se manifiestan en los estados de Chihuahua, Sonora, Durango, y pequeñas regiones del centro del país, así como también se observan que las regiones donde no hay una tendencia se amplía tal es el caso de los estados de Coahuila, Yucatán entre otros (Figura 4I – 4L).



**Figura 4.** Patrones geográficos de la tendencia de la evaporación promedio mensual en la República Mexicana.

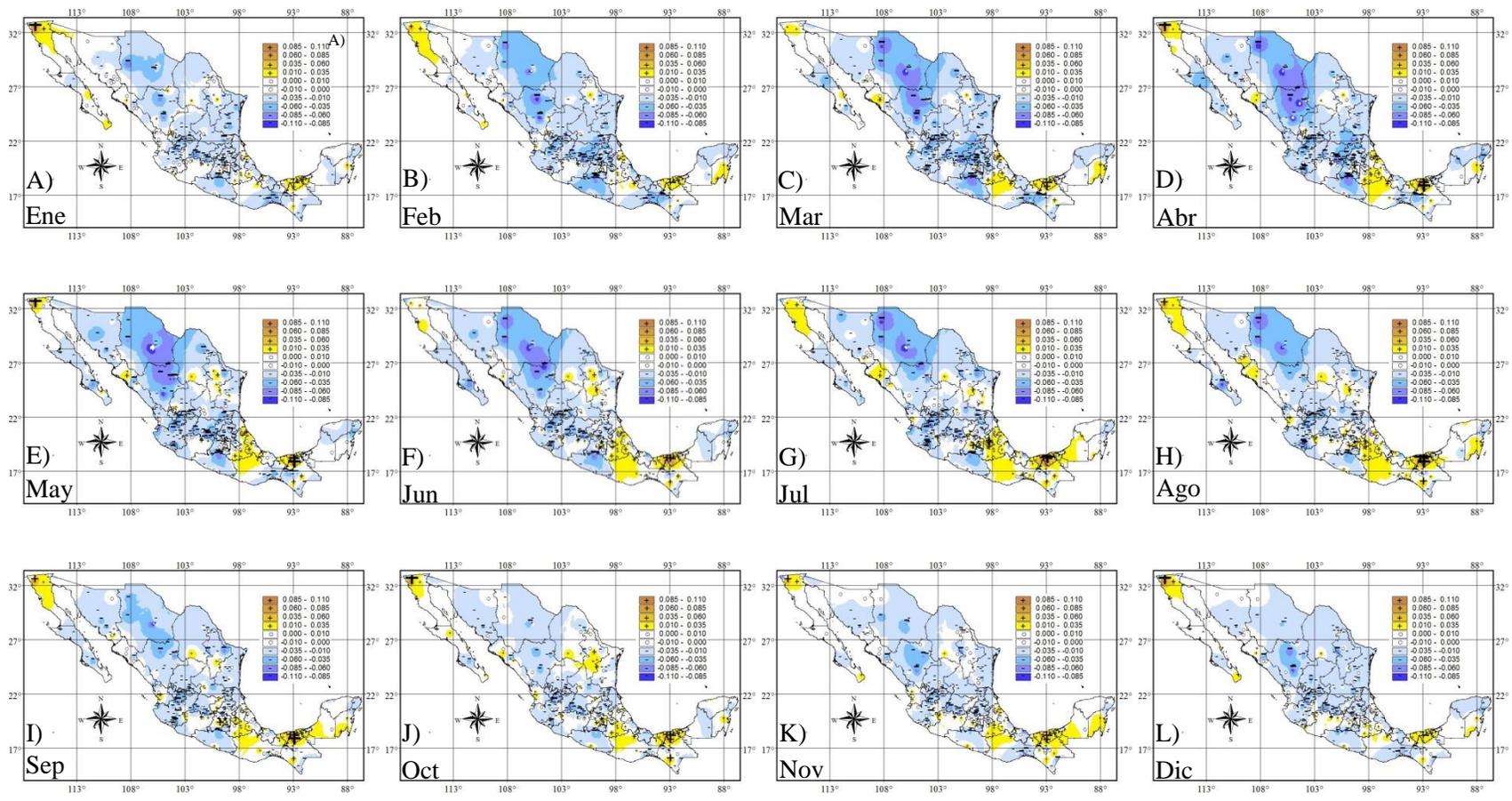
### **5.3. Tendencia de la evaporación máxima mensual**

A pesar de que los valores máximos de la tendencia de la evaporación mensual podrían indicar que tiene una tendencia creciente indican, que para la evaporación máxima mensual de los meses de enero a mayo tienen una uniformidad en el número de estaciones con tendencias decrecientes con un promedio de 83.9 % de estaciones climatológicas que representa a 113 estaciones (Figura 2C) con valores de evaporación que fluctúan entre -0.010 a -0.035 mm/año, manifestándose en la región norte, centro y partes de la región sureste de la República Mexicana (Figura 5A – 5E), en los estados de México, Zacatecas, San Luis Potosí, Chihuahua, Tamaulipas por mencionar algunos.

En los meses de junio, julio y agosto el número de estaciones climatológicas con tendencias decrecientes disminuyen a un 77.7, 69.5, y 69.7 % (Figura 2C) respectivamente, sin embargo esta disminución de estaciones no es un factor para que la evaporación tenga una tendencia positiva, en estos meses la tendencia decreciente de la evaporación mensual se distribuye en un rango de -0.010 a -0.035 mm/año, con estos valores de evaporación se observan regiones amplias que presentan la tendencia decreciente en la evaporación mensual siendo mayor que los meses anteriores (Figura 5F – 5H), en los estados de Chihuahua, Durango, Sonora Baja California Sur que comprende la región norte del país y en los estados de Colima, Michoacán por mencionar algunos los comprende el Pacífico mexicano.

Para el mes de septiembre hay un ligero aumento en el porcentaje de las estaciones climatológicas que presentan tendencias decrecientes con un valor de 74 % que representa a 92 estaciones climatológicas (Figura 2C) manifestándose en la región geográfica del centro, norte y pacífico de la República Mexicana (Figura 5I) con un rango de evaporación de -0.010 a -0.035 mm/año.

Para los meses de octubre, noviembre y diciembre el porcentaje de estaciones climatológicas con tendencias decreciente es del 70, 72 y 79 % respectivamente (Figura 2C), con valores de evaporación mensual que se distribuyen en un rango de -0.010 a 0.035 mm/año (Figura 5J – 5L), con estos altibajos del número de estaciones climatológicas con tendencias en la evaporación no es un factor que cambie la tendencia decreciente que hasta ahora se ha mantenido en la mayor parte de la República Mexicana, así como también se presentan las mismas regiones aisladas donde la evaporación presenta la tendencia creciente en los estados de Oaxaca, Tabasco y pequeñas regiones de Chiapas con valores de 0.010 a 0.035 mm/año.



**Figura 5.** Patrones geográficos de la tendencia de la evaporación máxima mensual en la República Mexicana.

#### **5.4. Tendencia de evaporación mínima mensual**

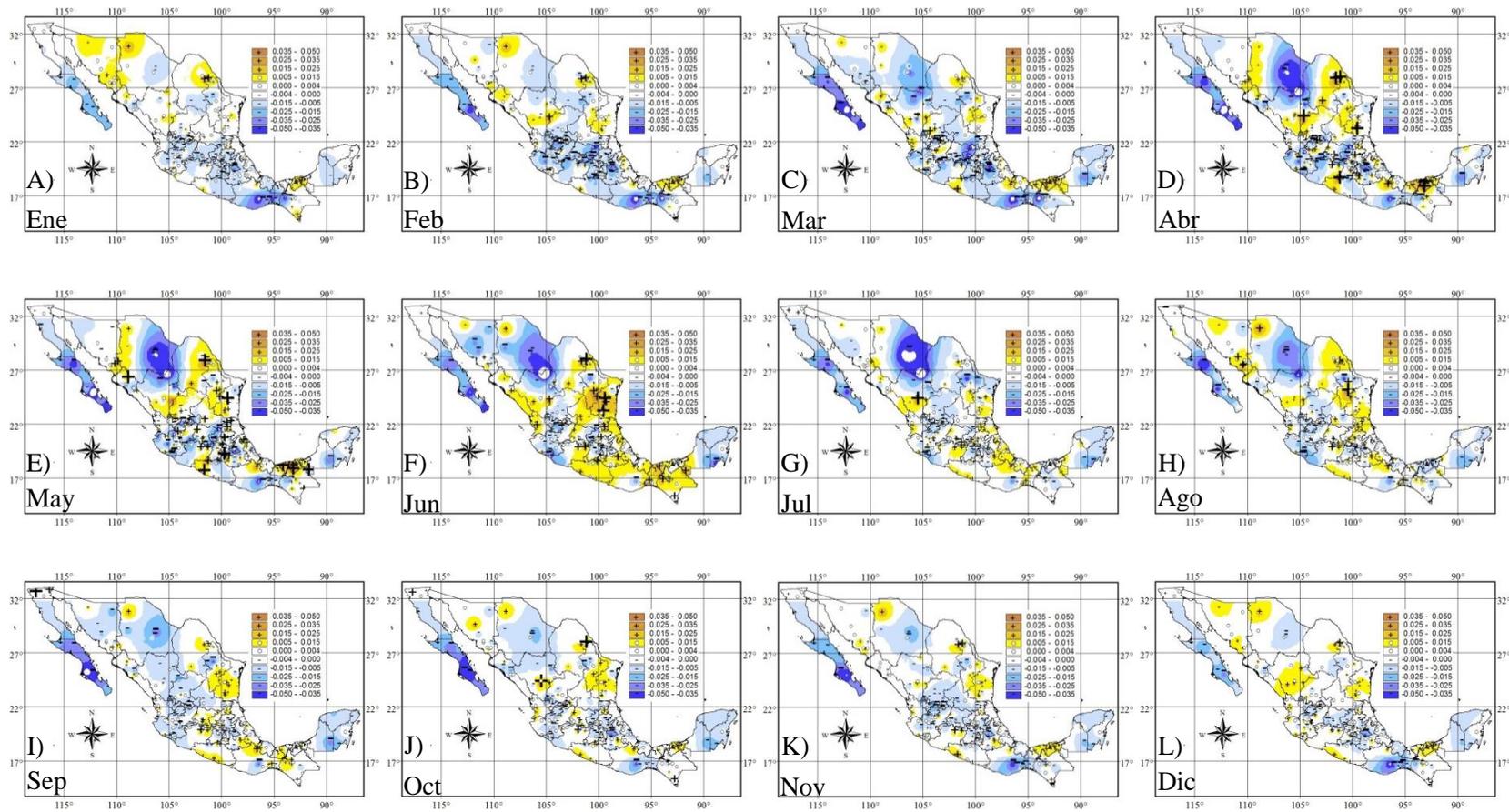
En la (Figura 2D) de porcentaje y número de estaciones climatológicas de los valores mínimos de la evaporación mensual, muestra una heterogeneidad en la distribución de las estaciones climatológicas que presentan una tendencia decreciente, para el caso de los primeros meses del año enero – marzo presentan en promedio 71.8 % que representa a 64 estaciones climatológicas, en los mapas donde se presenta los patrones geográficos de la tendencia de la evaporación en México (Figura 6A – 6C), se observa que para estos meses los valores de evaporación se encuentran en un rango de -0.005 a -0.015 mm/año en los estado de Chihuahua, Sonora, Baja California entre otros, así como también amplias regiones del noroeste, sureste y centro de la república mexicana donde los valores de la evaporación anual fluctúan entre los valores de -0.025 a -0.035 mm/año en los estados como Baja California Sur, al sur este de Oaxaca entre otros puntos, en la evaporación mínima mensual se observan regiones notables como el centro y norte del país en la que la evaporación no presenta ninguna tendencia.

Para los meses de abril, mayo y junio disminuye la proporción de estaciones climatológicas con tendencias decrecientes llega a un valor de 64.2, 49.9 y 48.6 % respectivamente (Figura 2D) donde la evaporación decreciente mensual se distribuyen en un rango de -0.015 a -0.025 mm/año en los estados de Chihuahua, Baja California, Colima, Guadalajara por mencionar algunos (Figura 6D – 6F), así como también se observa una amplia región en el estado de Chihuahua donde la evaporación decreciente tiene un valor de -0.035 a -0.050 mm/año, cabe mencionar que en los meses de mayo y junio el número de estacione climatológicas con tendencias positivas son superiores con una proporción de 51 % que representa a 39 estaciones, mientras que el número estaciones climatológicas con tendencias decrecientes es

de 37 un porcentaje de 49 %, y que se manifiesta en el sureste y parte de la región centro del país abarcando todo el estado de Guerrero, Chiapas, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz entre otros puntos y que tiene un valor de evaporación de 0.005 a 0.015 mm/año (Figura 6F).

Para los meses de julio a noviembre (Figura 2D) en promedio aumenta el número de estaciones climatológicas con tendencias decrecientes con un 65.2 % que representa a 47 estaciones y valores de evaporación de -0.005 a -0.015 mm/año (Figura 6G – 6K), para estos meses se observan en los patrones geográficos que la tendencia decreciente de la evaporación mínima mensual continua con la disminución, pero con regiones amplias en la Republica Mexica en las que no presenta ningún cambio en la evaporación mínima estados como Coahuila, Sonora, Sinaloa y parte de Durango.

Para el mes de diciembre (Figura 2D) el porcentaje de estaciones climatológicas con tendencias decrecientes de la evaporación mensual es de 54.4 % que representa a 56 estaciones con valores de -0.015 a -0.025 mm/año (Figura 6L) así como mayor son las regiones centro y norte de la República Mexicana donde la evaporación mensual no presenta cambios en la tendencia, en general para los meses de abril, mayo, junio y agosto puede decirse que hay un balance entre las regiones con tendencias crecientes y decrecientes.

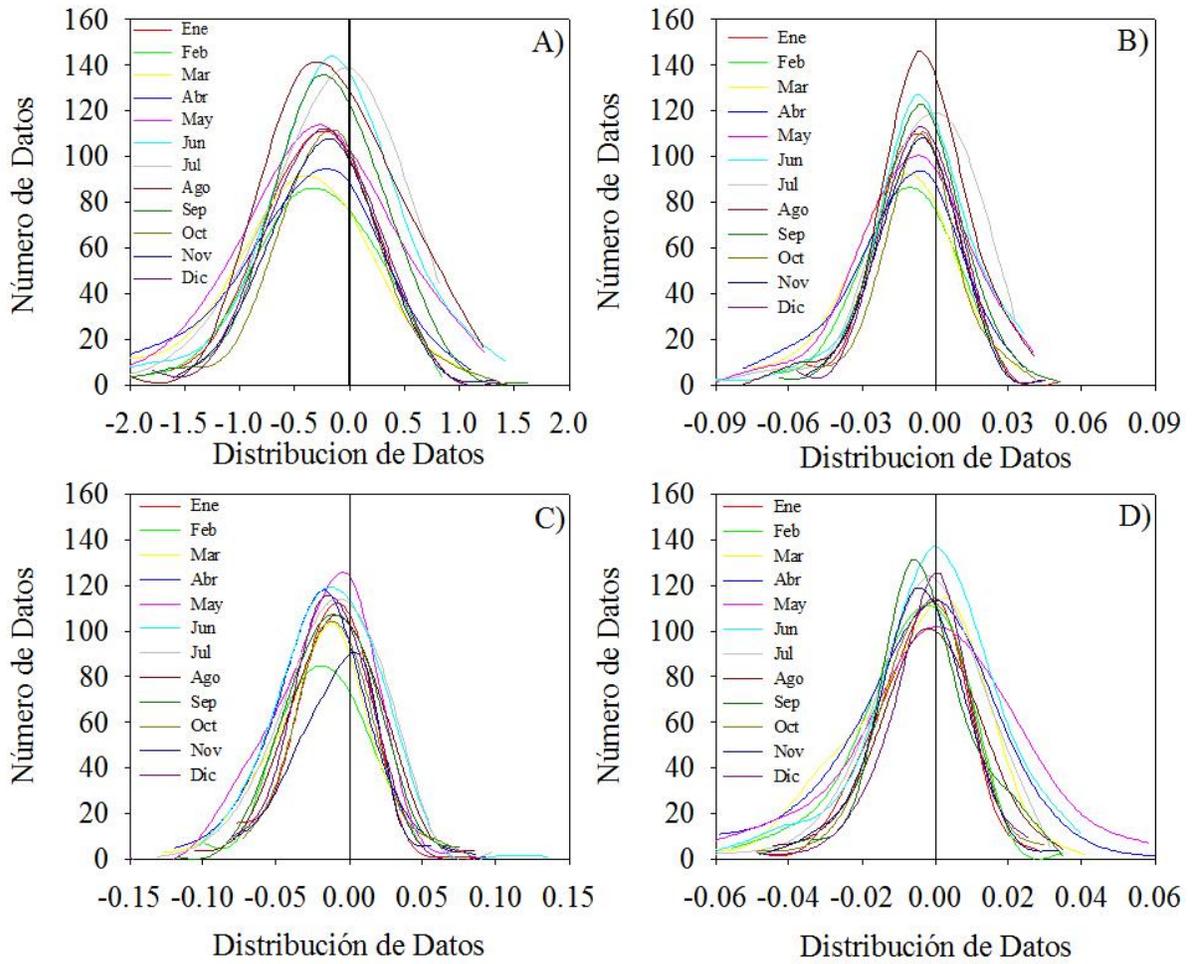


**Figura 6.** Patrones geográficos de la tendencia de la evaporación mínima mensual en la república Mexicana.

## **6. Distribución de valores de la pendiente de la evaporación**

La distribución de los valores de la pendiente de evaporación mensual (Figura 7) muestra que en su mayoría de datos el rango de distribución es cercano al cero con tendencia negativa, diferenciándose los rangos según sea el estadístico de interés, para el caso de la evaporación total y la evaporación media (Figura 7A – 7B) sus datos se distribuyen en un rango de -1 a 0 y de -0.03 a 0 respectivamente y que en los meses de junio, julio, agosto y septiembre el número de datos evaporación se encuentra entre los 120 y 140 datos, y por el contrario los meses con un número de datos bajos son de febrero y marzo presentando un número de datos de entre 80 y 100.

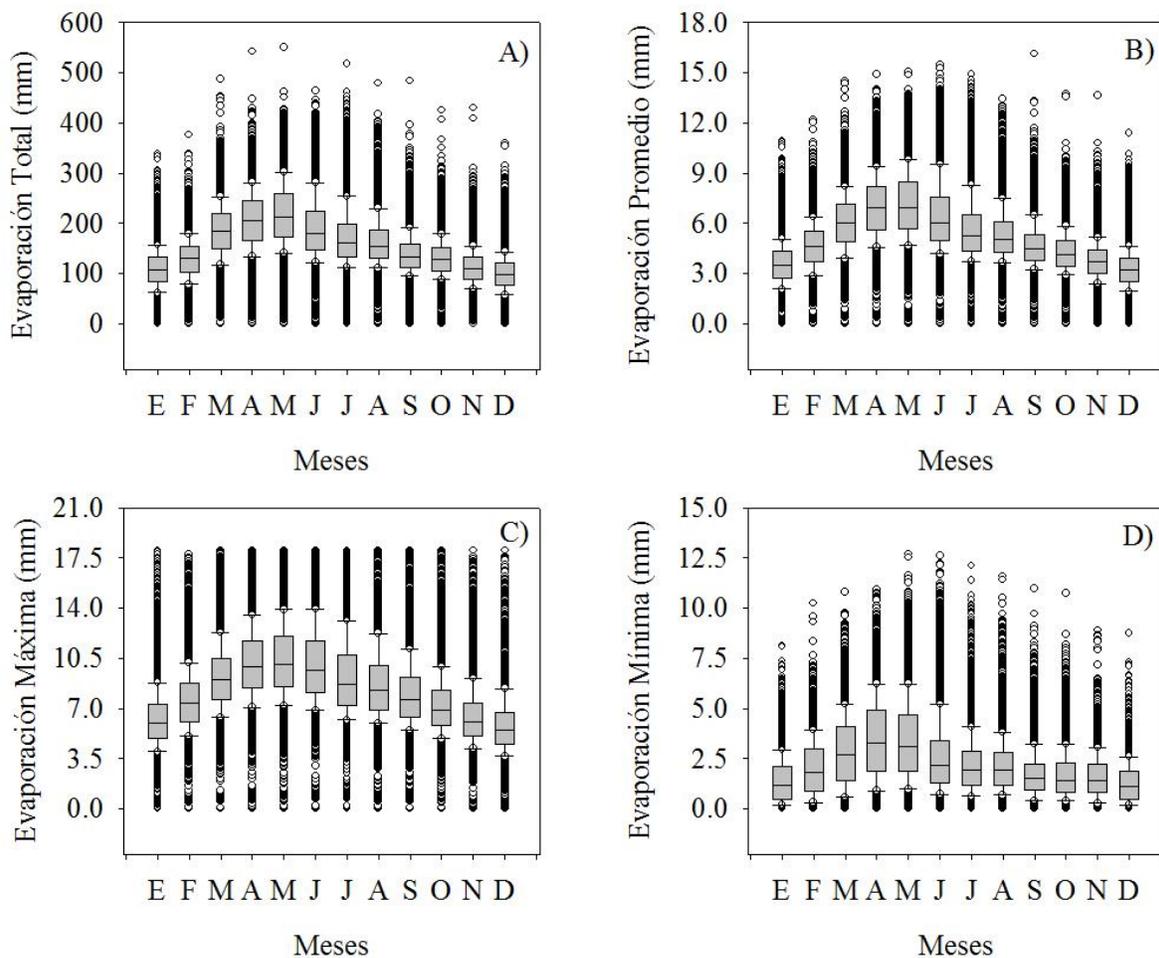
Para los datos de la pendiente de la evaporación máxima y mínima (Figura 7C -7D) su rango de distribución es aún mayor cercano al cero con valores de -0.02 a 0 y de -0.01 a 0 respectivamente, donde los datos de los meses de la evaporación máxima se distribuye entre los valores de 100 y 120 datos y únicamente para los meses de febrero y noviembre presentan una cantidad de datos que se distribuyen entre 80 y 90 datos de evaporación, como se mencionó anteriormente tanto para la uniformidad del rango distribución de los datos de evaporación como para el número de datos mensuales de evaporación son de mayor uniformidad para la evaporación mínima (Figura 7D) ya que estas se distribuyen de entre 100 y 130 datos de evaporación mensual.



**Figura 7.** Histogramas de frecuencia de datos mensuales de la evaporación total A), evaporación media B), evaporación máxima C) y evaporación mínima D).

## 7. Valores de la evaporación total, promedio, máxima y mínima

La cantidad de agua evaporada se mide en mm y es de suma importancia conocer el valor para determinar el balance hidrológico de un área, la evaporación total, evaporación promedio, evaporación máxima y evaporación mínima (Figura 8) que son los estadísticos evaluados en este investigación presentan una tendencia donde los incrementos y disminuciones de los valores de evaporación no son de manera uniforme.



**Figura 8.** Evaporación Total A), Evaporación Promedio B), Evaporación Máxima C) y Evaporación Mínima D) en México.

Para la evaporación total (Figura 8A) se observa que en los meses de enero y febrero presentan una evaporación de 109 a 129 mm/mes respectivamente, llegando a los meses de abril y mayo se presenta los punto más altos con valores de 206 y 217 mm/mes, a partir de estos meses la tendencia comienza a decaer hasta llegara u una evaporación de 100 mm/mes que se presenta en el mes de diciembre.

En la evaporación promedio mensual se observa que en el mes de enero (Figura 8B) la evaporación tiene un promedio de 3.5 mm/mes, presentando aumentos mensuales de manera uniforme con valores de 1 mm, llegando así a un punto donde la evaporación es mayor con valor de 7 mm/mes que se registra en el mes de mayo (Figura 8B) y comienza el descenso de los valores de la evaporación llegando al último mes del año con un valor de 3 mm/mes muy parecido al valor del mes de enero. No obstante se puede registrar hasta más de 15 mm de evaporación en un solo día (Figura 8B).

Para la evaporación máxima la tendencia se manifiesta de la misma manera que en las variables anteriores (total y media) con valores de 6.2, 7.5 mm/día de evaporación en los meses de enero y febrero (Figura 8C), llegando a un punto máximo en los meses de abril, mayo y junio con un valor promedio de 10.2 mm/día de evaporación llegando al mes de diciembre con 1 mm menos que el mes de enero con un valor de 5 mm/día.

Para la evaporación mínima se encuentran datos de 0.01 mm/día hasta valores de 12 mm/día en donde el mes de enero tiene un valor de 1.4 mm/día con un aumento gradual de 1 mm llegando hasta una evaporación mayor de 3.4 mm /día en los meses de abril y mayo (Figura 8D). Como se mencionó anteriormente se manifiesta un patrón similar en la evaporación total,

media, máxima y mínima comenzando con un valor mínimo en el mes de enero y alcanza el punto más alto en los meses de abril y mayo.

Los cambios en la tendencia de la evaporación en México son similares a los reportados en diferentes países, donde las estaciones climatológicas presentan una tendencia decreciente en la evaporación, Roderick y Farquhar (2005) en Nueva Zelanda encontraron que 6 de los 19 sitios evaluados mostraron disminuciones estadísticamente significativas en la evaporación con un promedio aproximado de  $-2.1$  mm/año y no hubo sitios que muestran aumentos estadísticamente significativos en la evaporación.

Liu et al. (2000) realizaron un estudio en ocho regiones climáticas de China y encontraron que la tendencia de la evaporación es decreciente en el último medio siglo, con una disminución de evaporación de  $2.9$  mm/año a un nivel de confiabilidad del 99 %, la Evaporación de bandeja disminuyó en la mayoría en el noroeste de China, con tasas cada vez más pequeñas en la disminución al sur de China.

Blanco-Macías et al. (2011) obtuvieron que 40 bandejas de series de tiempo de evaporación en la región centro de México, en las cuales encontraron que 27 de 40 bandejas presentan tendencias decrecientes a un nivel de significancia de  $p < 0.05$ , con una media de evaporación  $-0.79$  mm/año<sup>-1</sup>.

Harmsen et al. (2004) analizaron 7 subestaciones experimentales de la Universidad de Puerto Rico con una base de datos de evaporación de 40 años, donde 4 de las 7 estaciones muestran tendencias decrecientes y de las cuales 2 de estas 4 estaciones son significativas a un nivel de confiabilidad de 5 %, con valores de  $1.17$  mm/año.

## 8. CONCLUSIONES

El 50 % de las estaciones climatológicas evaluadas presentan una tendencia y más del 75 % de estas estaciones presentan una tendencia decreciente en la evaporación, y se ven reflejadas en todo el territorio mexicano pero con mayor presencia en el norte y centro de la república mexicana. Un 20 % de las estaciones climatológicas presentan un incrementando en la evaporación principalmente en el sur del territorio mexicano.

De los estadísticos evaluados de evaporación el total, media y máxima obtuvieron el mayor número de estaciones climatológicas con tendencias decrecientes con un 76 %, mientras que la mínima obtuvo el 63 % de las estaciones climatológicas que presentaron una tendencia decreciente. La evaporación total fue la que presento la mayor disminución en la evaporación con una valor de -0.2 a -0.8 mm/año, mientras que la evaporación mínima presenta una disminución de -0.005 a -0.015 mm/año, cabe destacar que en la evaporación mínima es la que presenta las regiones más amplias donde la evaporación no presenta ningún tendencia.

El análisis realizado en este estudio contribuye a la generalización de la tendencia decreciente en la evaporación como se reporta en otras partes del mundo. De acuerdo con lo anterior se tiene suficientes elementos para aceptar la hipótesis planteada donde se establecen que existen cambios en la evaporación, los resultados proporcionan información para poder hacer predicciones sobre el comportamiento del clima en México y contribuir a la planificación de la gestión de los recursos hídricos.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Burn, D. H., & Hesch, N. M. (2007). Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, 336(1), 61-73.
- BCAS (2013). *Bulletin of the Chinese Academy of Science*. Xinjiang Institute of Ecology and Geography. Chen Yaning. 27(3) 168 – 169.
- Blanco-Macias, F. Valdez-Cepeda, R. D. Magallanes-Quintanar, R. (2011). Pan Evaporation Analysis in Central México: Trends Self-Affinity and Important Frequencies. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(3): 540-549.
- Calbó, J., Sánchez-Lorenzo, A., Martín-Vide, J., Vicente-Cerrano, S.M., Wild, M. (2013). Tendencias Recientes Observadas en la Evaporación en España y su Posible Relación con las Variaciones de la Radiación Solar en la Superficie (1985-2010). Grupo de Física Ambiental Universidad de Girona, Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zúrich, Grupo de Climatología Universidad de Barcelona, Instituto Pirenaico de Ecología Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 291-300.
- Elnesr, M., & Alazba, A. (2013). Effect of climate change on spatio-temporal variability and trends of evapotranspiration, and its impact on water resources management in the Kingdom of Saudi Arabia. *Climate change—realities, impacts over ice cap, sea level and risks*, In Tech, doi. 273 - 296
- Harmsen, E. W. González-Pérez, A. & Winter, A. (2004). Re-evaluation of Pan Evaporation Coefficients at Seven Locations in Puerto Rico. *J. Agric. Univ. P.R.* 88(3-4):109-122

- Hossmand, A., Salarijazi, M., Bahrami, M., Zahiri, J., and Soleimani, S. (2013). Assessment of Pan Evaporation Changes in South Western Iran. *African Journal of Agricultural Research*, 8(16): 1449-1456.
- INEGI, (2005). Aspectos generales del territorio mexicano. INEGI México, D.F.
- Liu Q., Z. Yang, X. Xia, 2010. Trends for pan evaporation during 1959-2000 in China. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 1934–1941.
- Lawrimore, J. H., & Peterson, T. C. (2000). Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States. *Journal of Hydrometeorology*, 1(6).
- Liu, B. Xu, M. Henderson, M. and Gong, W. (2004), A Spatial Analysis of Pan Evaporation Trends in China, 1955–2000, *Journal of Geophysical Research*.
- Mann HB (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometric*. 13:245-259.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO 2006). Evapotranspiración del cultivo, Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos, Roma. 277 pp.
- Roderick, M. L., & Farquhar, G. D. (2005). Changes in New Zealand Pan Evaporation Since the 1970s. *International Journal of Climatology*, 25: 2031-2039.
- Rzedowski, J. (1983). *La Vegetación de México*, Segunda edición. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad. México Pp.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.

Zhao, F., Xu, Z., & Huang, J. (2007). Long-term trend and abrupt change for major climate variables in the upper Yellow River Basin. *acta meteorológica sínica - English edition*, 21(2), 204.