



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**División de Estudios de Posgrado de la UMSNH
Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas
Facultad de Biología
Laboratorio de Percepción Remota y
Sistemas de Información Geográfica**

**Reconstrucción dendrocronológica de temperatura media y
precipitación dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano**

TESIS

**Como requisito para obtener el grado académico de:
Maestro en Ciencias Biológicas**

Presenta:

Ing. Ulises Manzanilla Quiñones

TUTOR:

Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez

Doctor en Ciencias Biológicas

CO-TUTOR:

Dr. Alfredo Amador García

Doctor en Ciencias Biológicas

**Morelia, Michoacán
Febrero del 2016**

U.M.S.N.H



**FACULTAD
DE
BIOLOGÍA**



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas

DR. HÉCTOR GUILLEN ANDRADE
COORDINADOR GENERAL DEL PROGRAMA INSTITUCIONAL DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
P R E S E N T E


Por este conducto nos permitimos comunicarle que después de haber revisado el manuscrito final de la Tesis Titulada: "Reconstrucción dendrocronológica de temperatura media y precipitación dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano" presentado por el Ing. Ulises Manzanilla Quiñones, consideramos que reúne los requisitos suficientes para ser publicado y defendido en Examen de Grado de Maestro en Ciencias.

Sin otro particular por el momento, reiteramos a usted un cordial saludo.

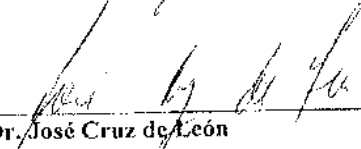
ATENTAMENTE

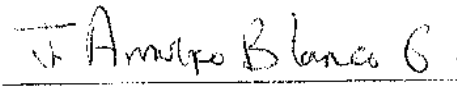
Morelia, Michoacán, a 11 de febrero de 2016

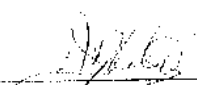
MIEMBROS DE LA COMISIÓN REVISORA


Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez
Director de Tesis


Dr. Alfredo Amador García
Co Asesor


Dr. José Cruz de León


Dr. José Arnulfo Blanco García


Dra. María Alcalá de Jesús

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN GENERAL.....	II
ABSTRACT	III
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	IV
ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	V
CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	2
2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	3
2.1 ESTIMACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS FALTANTES	4
2.1.1 MÉTODOS TRADICIONALES.....	4
2.1.2 ANÁLISIS CON PROMEDIOS MÓVILES	5
2.1.3 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN	5
2.1.4 PRUEBAS DE TENDENCIAS Y SERIES CLIMÁTICAS.....	6
2.2 TRABAJOS EFECTUADOS EN MÉXICO.....	6
2.3 JUSTIFICACIÓN.....	8
2.4 HIPÓTESIS.....	9
2.5 OBJETIVO GENERAL	9
2.6 OBJETIVOS PARTICULARES.....	9
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
3.1 ÁREA DE ESTUDIO	10
3.2 CLIMA.....	10
3.3 VEGETACIÓN	11
3.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA	12
3.5 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO	14
3.6 ANÁLISIS DE TENDENCIAS.....	15
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
4.1 ANÁLISIS DE CLIMOGRAMAS MENSUALES	16
4.2 ANÁLISIS DE SERIES ANUALES DE TIEMPO.....	17
4.3 ANÁLISIS DE TENDENCIAS.....	22
4.4 EFECTOS ENSO DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	24
5 CONCLUSIONES	25
6 BIBLIOGRAFÍA.....	26

CAPÍTULO II.....	30
1 INTRODUCCIÓN.....	31
2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	32
2.1 TRABAJOS EFECTUADOS EN MÉXICO.....	33
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	36
2.3 HIPÓTESIS.....	37
2.4 OBJETIVO GENERAL.....	37
2.5 OBJETIVOS PARTICULARES.....	37
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	38
3.2 SITIOS DE MUESTREO.....	39
3.2.1 SITIO 1.....	39
3.2.2 SITIO 2.....	40
3.2.3 SITIO 3.....	41
3.2.4 SITIO 4.....	42
3.2.5 SITIO 5.....	43
3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES EVALUADAS.....	44
3.3.1 <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.....	44
3.3.2 <i>Pinus herrerae</i> Martínez.....	44
3.3.3 <i>Pinus leiophylla</i> Schl. y Cham.....	45
3.3.4 <i>Abies religiosa</i> var. <i>Emarginata</i> (Kunth) Schtl. y Cham.....	45
3.4 OBTENCIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES.....	45
3.5 ANÁLISIS DE MUESTRAS.....	46
3.5.1 SKELETON PLOTS.....	47
3.5.2 FECHADO-CRUZADO.....	48
3.6 MEDICIÓN DE ANILLOS DE CRECIMIENTO.....	49
3.7 ANÁLISIS EN LOS PROGRAMAS DE LA DPL.....	51
3.7.1 COFECHA®.....	51
3.7.2 ARSTAN®.....	52
3.8 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA.....	53
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
4.1 COFECHA®.....	57
4.2 ARSTAN®.....	59

4.3 ANÁLISIS CLIMÁTICO DEL EJE NEOVOLCÁNICO TRANSMEXICANO	61
4.4 FUNCIÓN DE RESPUESTA CLIMÁTICA	68
4.5 RECONSTRUCCIÓN DE TEMPERATURA MEDIA Y PRECIPITACIÓN	73
4.5.1 RECONSTRUCCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA DE ENERO A MAYO	73
4.5.2 RECONSTRUCCIÓN DE PRECIPITACIÓN DE ENERO A MAYO	76
4.6 EFECTOS DEL ENSO DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO	81
4.6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN	86
5. CONCLUSIONES	87
6. BIBLIOGRAFÍA.....	89
7. ANEXOS.....	96
8. GLOSARIO.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área en donde se efectuó el estudio, la línea azul representa los límites de la Cuenca de Cuitzeo.....	10
Figura 2. Climas del área de estudio.....	11
Figura 3. Tipos de vegetación del área de estudio	12
Figura 4. Estaciones meteorológicas del área de estudio	13
Figura 5. Climogramas mensuales de las 10 estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de estudio	17
Figura 6. Análisis de series de tiempo para precipitación del área de estudio.....	18
Figura 7. Análisis de series de tiempo para temperatura máxima del área de estudio	19
Figura 8. Análisis de series de tiempo para temperatura media del área de estudio.....	20
Figura 9. Análisis de series de tiempo para temperatura mínima del área de estudio	21
Figura 10. Área del muestreo dendrocronológico, la línea azul representa lo límites de la Cuenca de Cuitzeo.....	38
Figura 11. Sitio 1 Ejido “Las Mesas”, Morelia, Michoacán	39
Figura 12. Sitio 2 Ejido “Las Mesas”, Morelia, Michoacán	40
Figura 13. Sitio 3 Ejido “San Miguel Coapa”, Morelia, Michoacán	41
Figura 14. Sitio 4 Ejido “La Cuadrilla”, Tzitizo, Michoacán	42
Figura 15. Sitio 5 Ejido “Las Cuevas”, Queréndaro, Michoacán	43
Figura 16. Proceso de obtención de las muestras	46
Figura 17. Secado de muestras a temperatura ambiente.....	47

Figura 18. Elaboración de los gráficos de crecimiento “Skeleton Plots”	48
Figura 19. Construcción del gráfico de crecimiento “Maestro” del área de estudio.....	48
Figura 20. Técnica del fechado-cruzado en muestras.....	49
Figura 21. Asignación de coordenadas a las muestras	49
Figura 22. Proceso de medición de anillos de crecimiento.....	51
Figura 23. Número de muestras fechadas por su año de nacimiento y de muerte	55
Figura 24. Curva polinómica Sitios 1 y 2 “Las Mesas”	55
Figura 25. Curva polinómica Sitio 3 “San Miguel Coapa”	56
Figura 26. Curva polinómica Sitio 4 “La Cuadrilla”	56
Figura 27. Curva polinómica Sitio 5 “Las Cuevas”	56
Figura 28. Curva polinómica del área de estudio	57
Figura 29. Cronologías para el Eje Neovolcánico Transmexicano	61
Figura 30. Clasificación de las zonas de precipitación del área de estudio	62
Figura 31. Análisis de <i>Mann-Kendall</i> de precipitación del área de estudio	63
Figura 32. Análisis de <i>Mann-Kendall</i> de temperatura máxima del área de estudio	64
Figura 33. Análisis de <i>Mann-Kendall</i> de temperatura media del área de estudio	65
Figura 34. Análisis de <i>Mann-Kendall</i> de temperatura mínima del área de estudio	66
Figura 35. Análisis de correlación de los Sitios 1 y 2 “Las Mesas”	68
Figura 36. Análisis de correlación del Sitio 3 “San Miguel Coapa”	69
Figura 37. Análisis de correlación del Sitio 4 “La Cuadrilla”	70
Figura 38. Análisis de correlación del Sitio 5 “Las Cuevas”	71
Figura 39. Análisis de correlación de toda el área de estudio	72
Figura 40. Calibración y verificación de los subperiodos de función de respuesta	74
Figura 41. Reconstrucción histórica de la temperatura media promedio de enero a mayo para el Eje Neovolcánico Transmexicano	76
Figura 42. Calibración y verificación de los subperiodos de función de respuesta	77
Figura 43. Reconstrucción histórica de precipitación acumulada de enero a mayo para el Eje Neovolcánico Transmexicano	79
Figura 44. Efectos de “El Niño/La Niña” dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano	81
Figura 45. Efectos del fenómeno ENSO para el periodo de 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano	82

ÍNDICE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de las 10 estaciones cercanas a los sitios de muestreo	14
Cuadro 2. Medias históricas de precipitación de las 10 estaciones meteorológicas.....	22
Cuadro 3. Prueba de <i>Mann-Kendall</i> de las 10 estaciones dentro del área de estudio.....	23
Cuadro 4. Resultados COFECHA de los Sitios 1 y 2 “Las Mesas”	58
Cuadro 5. Resultados COFECHA del Sitio 3 “San Miguel Coapa”	58
Cuadro 6. Resultados COFEHA del Sitio 4 “La Cuadrilla”	58
Cuadro 7. Resultados COFECHA del Sitio 5 “Las Cuevas”	59
Cuadro 8. Resultados COFECHA para el Eje Neovolcánico Transmexicano	59
Cuadro 9. Valores de desviación estándar y autocorrelación de los Sitios de estudio	60
Cuadro 10. Comparación de resultados de la prueba de <i>Mann-Kendall</i> de las 10 estaciones meteorológicas y el análisis de series de tiempo.....	67
Cuadro 11. Calibración y verificación de los subperiodos 1989 a 2001 y 2002 a 2014 para temperatura media promedio de enero a mayo	74
Cuadro 12. Modelo de <i>regresión lineal simple</i> para la variable dependiente temperatura media promedio de enero a mayo.....	75
Cuadro 13. Análisis de varianza del modelo de reconstrucción estacional de temperatura media promedio de enero a mayo.....	75
Cuadro 14. Pruebas de calibración y verificación de los subperiodos de 1983 a 1998 y de 1999 a 2014 de enero a mayo.....	77
Cuadro 15. Modelo de <i>regresión lineal simple</i> para la variable dependiente precipitación acumulada de enero a mayo.....	78
Cuadro 16. Análisis de varianza del modelo de reconstrucción estacional de precipitación mensual acumulada de enero a mayo	78
Cuadro 17. Cuadro comparativo del efecto de “El Niño” para distintas zonas geográficas de México	83
Cuadro 18. Cuadro comparativo del efecto de “La Niña” para distintas zonas geográficas de México	84

AGRADECIMIENTOS

Deseo manifestar mis más sinceros agradecimientos a las siguientes instituciones y personas:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de beca de posgrado.

Al Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Biología.

Al Ingeniero Forestal Mario Mendoza Anguiano por el apoyo logístico para contactar a los comisariados de los ejidos Las Cuevas, San Miguel Coapa, La Cuadrilla y Las Mesas.

A los comisarios de los ejidos Las Cuevas, San Miguel Coapa, La Cuadrilla y Las Mesas.

A mis sinodales: Dr. José Cruz de León, Dra. María Alcalá de Jesús, Dr. José Arnulfo Blanco García, Dr. Alfredo Amador García y en especial a mi Tutor Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez por su confianza y la oportunidad brindada de haber trabajado en equipo.

Al Doctor José Villanueva Díaz por su apoyo y comentarios durante la estancia de investigación en el Laboratorio de Dendrocronología de Gómez Palacio, Durango

A mis compañeros de Laboratorio: Nohemí Acosta, David Talavera, Iván Ochoa, Erick, Isabel Villicaña, Gabriel Pérez, Alfredo y Larissa Ortega, cuyos comentarios y observaciones fueron de ayuda para mejorar este trabajo.

A mis padres: Vicente Manzanilla Basulto (+), María Guadalupe Quiñones Bojórquez y a mis hermanos: Vicente Alejandro, Yazmin Guadalupe y Jesús Alexis.

A mis amigos y colegas de la Ingeniería en Bosques: Gildardo González, Jaime Bucio, Vicente Alejandro Manzanilla, Nicandro Sánchez, Gabino Gutiérrez, Raúl Irineo Sandoval y Adolfo Cárdenas por su sincera amistad y compañerismo leal a lo largo de los años.

A la Dra. Patricia Delgado Valerio por su confianza y amistad brindada desde el 2012 a la fecha.

A las Secretarías del Posgrado

RESUMEN GENERAL

La riqueza biológica de especies arbóreas en México es muy vasta, existen especies con potencial dendrocronológico para realizar estudios enfocados al entendimiento y reconstrucción del clima del pasado. La dendroclimatología se ha usado para explicar los cambios del clima. La mayoría de los trabajos relacionados con este tema se han realizado en el norte del país y pocos se han efectuado en el centro de México. Por otra parte los registros instrumentales de estaciones meteorológicas son limitados y de corta duración. De acuerdo con lo antes mencionado, se requiere ampliar la información climática mediante el estudio de los anillos de los árboles.

En el Capítulo 1, se trata acerca del análisis climático de estaciones meteorológicas dentro del área de estudio, para ello, se descargaron, analizaron, depuraron y reconstruyeron los registros de precipitación y temperatura de 34 estaciones meteorológicas mediante un análisis de *regresión lineal simple* con valor mínimo de R^2 de 0.56 y medias móviles de orden ($n=5$). A los datos de precipitación y temperatura de 10 estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de muestreo dendrocronológico, se les efectuaron análisis de series de tiempo y de tendencias con ayuda del programa MOCLIC. Dicho análisis permitió identificar las anomalías relacionadas a periodos húmedos y secos productos del efecto del fenómeno ENSO.

En el Capítulo 2, se trata sobre del análisis dendrocronológico con un total de 59 muestras dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano a los cuales se midieron con ayuda de programas de análisis espacial y se analizaron en los programas dendrocronológicos COFECHA y ARSTAN. Los valores de intercorrelación obtenidos fueron mayores a 0.328 y se generaron índices de ancho de anillo (IAA) con ayuda del programa ARSTAN. Se crearon 244 capas climáticas a partir de los valores climáticos anuales obtenidos mediante distancia inversa ponderada de 34 estaciones. Se realizó una prueba de *Mann-Kendall* a toda la zona de estudio, que indicó las tendencias de precipitación y temperatura. Se asociaron periodos de baja precipitación y aumento en la temperatura media al efecto de “El Niño”. Los periodos de alta precipitación y descenso de la temperatura media están asociados al efecto “La Niña”.

Palabras clave: Climatología, Dendrocronología, ENSO, IAA y Reconstrucciones.

ABSTRACT

Tree biological richness is large, so, species with dendrochronologic potential to carry studies to understand and reconstruct the climatic past. Dendrochronology has been used to explain changes of climate. Most works related with this item have been made for north Mexico and few of them have been carried out for the center of the country.

In general, meteorological data is limited in space and time. According with this above, it is necessary to increase climatic information. The study of tree rings might allow it.

Chapter 1 is on characterization of the study area with the analysis of meteorological data provided by 34 stations of the meteorological Mexican service. Information of temperature and precipitation was deputed, completed using mobile average ($n=5$) and analyzed until get lineal regression models with minimum value of $R^2=0.56$ relating time series of the same parameter. Data from 10 stations were selected to run a *Mann-Kendall* analysis using MOCLIC software, in order to identify anomalies related to wet and dry periods, especially those associated with ENSO.

Chapter 2 is about the dendrochronological analysis of data from 5 sites and 59 samples of wood trees in the study area: el eje neovolcánico transmexicano. Each sample consist in measures of tree rings. Those data were analyzed with *cofecha* and *arstan* dendrochronological software. The correlation values obtained between ring's width and estimations of precipitation and temperature were higher to 0.328. So, there were generated ring width indexes (IAA); also, using data from 34 stations and the *idw* (inverse distance weighted) interpolation method there were produced 244 climate layers. Finally it was conducted a *Mann-Kendall* test for the whole study area, finding precipitation and average temperature trends. This paths associates periods of low precipitations and high medium temperature due to ENSO "El Niño" effect. On the other hand, periods of high precipitations and low medium temperature are associated with "La Niña" effect.

Keywords: Climatology, Dendrochronology, ENSO, IAA and Reconstructions.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El conocimiento del clima presente y pasado es fundamental para determinar su variabilidad a través del tiempo, tendencias y posible comportamiento en el futuro.

El clima, se ha usado como fuente para explicar los cambios registrados en el ambiente. Los datos instrumentales sobre el clima, tienen la limitante de una corta duración de tiempo y una baja calidad de los datos. La información histórica de la variabilidad climática de alta y baja frecuencia, se pueden obtener a través de fuentes indirectas denominadas "Proxy", una de ellas la constituyen los anillos de crecimiento de especies arbóreas, que fechados de manera correcta a su año real de formación, hacen factible determinar la variación hidroclimática a nivel de siglos e inclusive milenios, y así analizar la influencia histórica de patrones atmosféricos circulatorios de escala global que afectan y modifican el clima a nivel regional y local de una provincia fisiográfica.

La diversidad de especies arbóreas en México es una de las más grandes del mundo, situación que brinda gran potencial para realizar estudios, en especial para la rama de la dendroclimatología. En México, y en especial en los ecosistemas de bosque de clima templado, existen especies de coníferas influenciadas por las condiciones dominantes del clima (Stahle, 1998), especies que permiten analizar la influencia y el grado de afectación e intensidad de fenómenos climáticos de circulación global, que determinan, modifican y alteran la variación histórica de la precipitación y la temperatura de ciertas regiones geográficas de México (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 2003). Su impacto no es el mismo año con año, y no siempre afecta con la misma intensidad a las diferentes regiones geográficas del país. Los anillos de los árboles se han utilizado de ciertas formas para revelar los diversos factores del clima del pasado.

Los fenómenos climáticos se registran en el grosor de cada uno de los anillos de crecimiento de los árboles, estos tienen escalas espaciales desde unas pocas hectáreas hasta toda una región geográfica.

En la actualidad, los estudios dendroclimáticos han surgido en México debido a la importancia científica de la necesidad de conocer el clima, su variabilidad a través del

tiempo, el impacto de fenómenos atmosféricos de circulación global y su efecto en la alteración del ciclo hidrológico en México (Villanueva *et al.*, 2007).

Las cronologías extraídas de los anillos de los árboles son en particular importantes para México debido a que la mayoría de ellas se correlacionan con la precipitación de invierno a primavera y se relacionan con el fenómeno de “El Niño” (Stahle *et al.*, 2000). La influencia climática del ENSO “El Niño Southern Oscillation” se refleja en las cronologías obtenidas del ancho total de anillo de las coníferas de México (Villanueva *et al.*, 2004). Las reconstrucciones del clima ayudan a definir el impacto histórico del mismo para ciertas regiones dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano, esto permite estimar la probabilidad del impacto de sequías para el futuro (Pohl *et al.*, 2003).

ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo de investigación realizado dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano se divide en dos capítulos:

En el Capítulo 1, se analizan la precipitación y la temperatura, mediante análisis de series anuales de tiempo y de tendencias de estaciones meteorológicas. Para ello, se identificaron y describieron las anomalías relacionadas con periodos húmedos y secos, producto del efecto del fenómeno ENSO. En el área de estudio existen modificaciones en las temperaturas y una tendencia a la disminución de la precipitación, lo que ocasiona un clima más extremo, con temperaturas más cálidas, inviernos más fríos y menor precipitación.

En el Capítulo 2, se hace referencia a la reconstrucción de series dendrocronológicas de temperatura media y precipitación para lo cual se midieron y analizaron 59 rodajas de cuatro especies de coníferas, con ayuda de herramientas de análisis espacial. Mediante un análisis de *regresión lineal simple* se lograron construir dos cronologías para el periodo de 1934 a 2014 para temperatura media y precipitación de invierno a primavera. Se identificaron los periodos del fenómeno ENSO relacionados a años húmedos y secos.

CAPÍTULO I

ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO Y DE TENDENCIAS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DENTRO DEL EJE NEOVOLCÁNICO TRANSMEXICANO

Ulises Manzanilla Quiñones, Juan Manuel Ortega Rodríguez, Alfredo Amador García, José Cruz de León, José Arnulfo Blanco García y María Alcalá de Jesús

RESUMEN

La climatología es la ciencia que estudia las condiciones meteorológicas promedio de un área durante un lapso determinado. Existen evidencias de que los patrones de precipitación y temperaturas están cambiando en el mundo a causa de distintos factores, principalmente el antropogénico. Las temperaturas y la precipitación de algunos años de los 90's han sido consideradas como las más cálidas y secas del siglo XX. El objetivo de este trabajo fue analizar y reconstruir series de precipitación y temperaturas, detectar tendencias e identificar los efectos climáticos de 1954 a 2012 dentro del "Eje Neovolcánico Transmexicano. Se obtuvieron los registros para precipitación y temperatura de 34 estaciones meteorológicas, los cuales fueron depurados y ordenados. Se utilizaron medias móviles para completar los datos faltantes de temperatura y mediante un análisis de *regresión lineal simple*, se obtuvo una R^2 de **0.56** como valor mínimo para completar los datos vacíos de precipitación. Se seleccionaron 10 estaciones meteorológicas, a las cuales se les realizó un análisis de series de tiempo y tendencias con el apoyo de la prueba no paramétrica de *Mann-Kendall* del programa MOCLIC®. Entre los resultados se destaca la observación de tendencias de aumento en las temperaturas máxima y media, y de disminución en la temperatura mínima lo que indica una propensión a que el clima se vuelva extremo dentro del área de estudio. El efecto de "El Niño" de **1993 a 1998** trajo una sequía de las más prolongadas para casi todo el país, sin embargo su efecto no fue tan marcado en la zona de estudio. Al terminar este período, en la región se han presentado años anormales en el área de estudio. En trabajos se han realizado análisis de series y tendencias para precipitación y temperatura sin asociarlos a los efectos del ENSO como se hizo en esta investigación.

1 INTRODUCCIÓN

La climatología es la ciencia que se encarga de estudiar las condiciones meteorológicas promedio que prevalecen en la atmósfera de una región, en particular del mundo durante un lapso mayor a 10 años (García, 1988).

Los elementos que conforman el clima son: 1) temperatura, 2) precipitación y humedad, 3) dirección y fuerza del viento, 4) radiación solar y nubosidad, y 5) presión atmosférica. Estos elementos del clima están en constante modificación por factores, como, 1) latitud, 2) altitud, 3) relieve, 4) distribución de tierras y aguas, y 5) corrientes marinas (García, 1988). El clima se determina por la geografía de una zona, su posición respecto al mar o por su latitud. Los factores preponderantes para una zonificación climática son la latitud, la altitud y su ubicación geográfica. Todos estos son factores intrínsecos de cada zona, por ejemplo puede variar la temporada de lluvias o cambiar el grado de humedad, pero no se puede variar la latitud.

La radiación solar controla los regímenes térmicos e incidencia de los rayos solares de un lugar, dependiendo de a que distancia esté una zona geográfica del ecuador, recibirá mayor o menor radiación del sol, y esta radiación variará con el transcurso de las estaciones del año.

La altitud influye en el calentamiento de las masas de aire. A nivel del mar, se tienen las temperaturas más cálidas, y a medida que asciende, la temperatura va disminuyendo. Otro factor importante para definir el clima de una región es la ubicación geográfica, entre más cercano se encuentre a las costas, las temperaturas serán más cálidas y entre más lejanía se tenga del mar, las temperaturas serán más frías. De la temperatura generalmente nos interesan el promedio y sus oscilaciones, es decir, por un lado se determina cual es la temperatura media de una zona durante un margen de tiempo determinado (diario, mensual, estacional, o anual) y por otro, el margen de temperaturas entre las que oscila, es la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas, llamada amplitud térmica, de ahí que la oscilación térmica sea casi más importante a la hora de determinar un tipo de clima, que la temperatura media de la zona. Otro parámetro indispensable para determinar el clima de un área geográfica es la **humedad**, la cual depende de la evaporación que a su vez es función de la

temperatura, de la abundancia y frecuencia de las precipitaciones, pero también de los vientos y la dirección de las masas de aire en movimiento.

Otro parámetro elemental para determinar el clima de un sitio es la **precipitación**, la cual es producto de la condensación del vapor de agua, y este fenómeno meteorológico se presenta cuando la atmósfera se satura con el vapor de agua, se enfría, condensa y cae a manera de lluvia. La precipitación pluvial es el principal factor que controla la hidrología de una región o cuenca. Constituye la principal aportación de agua a la superficie terrestre, el conocimiento de sus patrones de comportamiento en espacio y tiempo es fundamental para un entendimiento de su comportamiento hidrológico histórico de ciertas áreas, por lo que el estudio de la precipitación y las temperaturas es de vital importancia para la humanidad (Campos, 2007).

2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Existen evidencias de que los patrones o tendencias de precipitación y temperatura están cambiando en muchas partes del mundo (Watson *et al.*, 1997 ; Watson, 2001). A partir del inicio de la Revolución Industrial, y en especial en la segunda mitad del siglo pasado, la humanidad ha modificado de manera gradual el medio ambiente a escala global (Ludevid, 1997). Este calentamiento inducido ha modificado los elementos climatológicos, causando un cambio climático que afecta, entre otros, a los ecosistemas (Euscategui, 2002). Como consecuencia, un elemento importante de la investigación actual es el análisis de tendencias de variaciones climáticas de series de datos climáticos históricos (Molnár y Ramírez, 2001). Dichos datos han sido capturados, medidos y recopilados por diversas estaciones meteorológicas existentes en cada país. Estas estaciones meteorológicas se encargan de analizar la variabilidad del clima.

México dispone de una red de estaciones climatológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua (SMN-CNA) que operan desde el año 1904, y en la actualidad constan de 3817 estaciones oficiales reconocidas a nivel nacional.

Las estaciones meteorológicas se encargan de medir las variables climatológicas, la temperatura, precipitación pluvial, evaporación, velocidad y dirección del viento que se registran a lo largo del país (CONAGUA, 2015).

Cerca de 1064 son estaciones manuales, donde se obtienen datos del comportamiento normal del clima a nivel nacional.

Desafortunadamente, es bastante común enfrentarse a datos incompletos, por lo cual, para calcularlos es necesario utilizar algún método de estimación de datos ausentes, los cuales se describen a continuación:

2.1 ESTIMACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS FALTANTES

Es común al momento de realizar análisis climáticos enfrentarse a registros incompletos, faltando uno o varios meses continuos, en uno o más años. Por lo que es conveniente estimar los valores ausentes; sin embargo, el alcance del estudio y la disponibilidad de tiempo, son factores limitantes. Habiendo decidido los datos a estimar, los principales factores que influyeron en su deducción fueron los siguientes:

- 1) Número de datos faltantes y su distribución o concentración.
- 2) Disponibilidad de los datos faltantes en las estaciones circunvecinas (Campos, 2007).

2.1.1 MÉTODOS TRADICIONALES

Para deducir los datos anuales o mensuales, el procedimiento más conveniente es el análisis de *regresión lineal* o no *lineal* (Campos, 1998, 2003).

Cuando la técnica de *regresión* no es aplicable debido a la baja correlación existente entre los datos, el método de inferencia, es a través de ponderación según el inverso del cuadrado de la distancia entre estaciones (Sigh, 1992 ; Viessman *et al.*, 1997).

Los valores promedio se utilizan para suplir a los datos faltantes de precipitación mensual o anual.

2.1.2 ANÁLISIS CON PROMEDIOS MÓVILES

El método de promedios móviles emplea el promedio de los N valores más recientes de datos en la serie de tiempo analizada, en donde se reflejan los cambios paulatinos (tendencias) o abruptos (saltos) que ocurren en la serie cronológica. Con el propósito de aminorar o suavizar la dispersión de la serie y poder observar las tendencias en la media, los cambios abruptos o saltos en la media y las secuencias de años secos o húmedos, se calculan promedios móviles de orden 5.

Las series cronológicas de temperaturas generalmente se analizan con un orden de $N= 5$ (Schulz, 1976).

2.1.3 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

Los métodos de interpolación permiten determinar para cada una de las variables las formas en las que se pueden reproducir y cómo afectan al resultado. Se basan en su relación estadística y en su causalidad entre cada una de las variables.

A lo largo de la historia se han empleado distintos métodos, algunos de los cuales se describen a continuación:

- 1) Promedio aritmético. Consiste en obtener la media de las variables de cada estación meteorológica ubicada dentro de una región. Este procedimiento es eficaz para áreas planas.
- 2) Polígonos de Thiessen. Este método pondera cada medición de acuerdo al área que cada estación meteorológica representa dentro del área a evaluar, pudiéndose incorporar estaciones cercanas. Este método es apropiado para terrenos con relieve muy accidentado y las estaciones meteorológicas no son uniformes en su distribución.
- 3) Distancia inversa ponderada (IDW). Es un método determinístico en el que el algoritmo utilizado es de los más sencillos y eficientes, el valor de cada punto es determinado de acuerdo con el conjunto de datos vecinos determinados de acuerdo a algún método de búsqueda. Utiliza los puntos vecinos al nodo que se va a calcular y le asigna un valor de acuerdo a su proximidad o lejanía, utilizando la siguiente fórmula: $W^{ik} = 1/(d^{ik})^e$

W^{ik} = Peso asignado al i -ésimo dato al nodo x_k

$d_i^k = |x_i - x_k|$ distancia entre i -enésimo dato vecino y el nodo x_k

e^i = exponente entero asignado por el usuario

Para un mejor funcionamiento del método es importante tener cuidado en la selección de los parámetros a considerar (Díaz y Casar, 2010).

2.1.4 PRUEBAS DE TENDENCIAS Y SERIES CLIMÁTICAS

Son pruebas que indican algún componente determinístico (de tendencia o variación abrupta o gradual), se aplican para verificar la existencia de anomalías en las series analizadas, en caso de existir, explican su procedencia.

Estas pruebas incluyen los test de *Mann-Kendall* (Kendall, 1938), La prueba de Spearman (WMO, 1971) y la prueba de pendiente de la *regresión lineal* (Ostle y Mensing, 1975). En las últimas décadas se ha encontrado que gran parte de las fluctuaciones en la variación climática está relacionada con los efectos del “*El Niño Southern Oscillation*” (Díaz y Markgraf, 1992).

En México, la variabilidad del clima está presente año con año (Magaña *et al.*, 1999b). “*El Niño*” y “*La Niña*” son los ejemplos más evidentes de la variabilidad climática global (Trenberth, 1997).

2.2 TRABAJOS EFECTUADOS EN MÉXICO

En los trabajos sobre climatología y variabilidad climática se utilizan los registros de estaciones meteorológicas cercanas al sitio de interés a evaluar, para realizar dichos análisis se emplean el uso de series anuales de tiempo y la prueba no paramétrica de *Mann-Kendall* para identificar anomalías en las series analizadas.

A continuación se describen en breve algunos de los trabajos efectuados sobre el análisis de estaciones meteorológicas para México.

Méndez *et al.* (2007) analizaron 789 estaciones meteorológicas del periodo 1920 a 2004 distribuidas sobre la mayor parte del territorio mexicano en donde regionalizaron áreas similares en comportamiento hidrológico y encontraron cambios significativos en las tendencias de precipitación principalmente durante la estación de verano.

Martínez *et al.* (2014) analizaron los registros climáticos de cuatro estaciones meteorológicas del periodo 1949 a 2011 de la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México y encontraron claras tendencias de aumentos en la temperatura, más no así en la precipitación, en la que no se encontró tendencia estadística significativa.

Múzquiz y Antaramián (2001) analizaron los registros meteorológicos de dos estaciones climáticas de Morelia del periodo 1941 a 1999, en donde encontraron tendencias de aumento en la temperatura máxima y una tendencia de disminución en la temperatura mínima convirtiendo al clima de la región cada vez más extremo, en cuanto a la precipitación no encontraron tendencia estadística significativa, por lo que esta ha sido constante y regular, sin embargo observaron la presencia de ciclos de años secos y años húmedos alternados.

Carlón y Mendoza (2007) analizaron los registros climáticos de 11 estaciones meteorológicas del periodo 1923 a 2005 dentro de la Cuenca de Cuitzeo donde encontraron que la estación ubicada en el municipio de Morelia presentó tendencias estadísticas significativas en el aumento de la temperatura media, la estación de Jesús del Monte también del municipio de Morelia presentó un aumento significativo en la precipitación.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Desde hace algunos años se sabe que el fenómeno meteorológico de “El Niño” afecta el régimen de lluvias en México, este fenómeno tiene repercusiones directas en la cantidad de precipitación que cae al país. Estos episodios del “El Niño” y “La Niña” forman parte del fenómeno atmosférico del “El Niño Southern Oscillation” (ENSO, por sus siglas en inglés). “El Niño” y “La Niña” son ejemplos de variación climática global, formando parte de un vasto y complejo sistema de fluctuaciones climáticas de escala mundial. El fenómeno no siempre se presenta de manera periódica y con la misma intensidad sobre una misma región geográfica, sino más bien lo hace de manera irregular. En los últimos años, se ha encontrado que gran parte de estas oscilaciones climáticas están relacionados con los efectos del ENSO y este no siempre afecta de la misma manera a cada región geográfica del país. Al estudiar y analizar las series anuales de tiempo y de tendencias de estaciones meteorológicas se puede examinar, determinar y detectar el comportamiento histórico de la temperatura y la precipitación, y así como el comportamiento climático histórico dentro de un área de interés. La presencia y ocurrencia de los efectos climáticos del ENSO quedan almacenados en los registros de las estaciones meteorológicas dentro del área de estudio analizada.

2.4 HIPÓTESIS

Las anomalías en los registros climáticos de la zona de estudio forman parte del conjunto de evidencias asociadas al aumento de la temperatura y a la disminución de la precipitación anual, dichas anomalías se detectan mediante los análisis de series de tiempo y de tendencias de tales parámetros.

2.5 OBJETIVO GENERAL

- Realizar análisis de series anuales de tiempo y pruebas de tendencias de estaciones meteorológicas del periodo 1954 a 2012 dentro del área de estudio.

2.6 OBJETIVOS PARTICULARES

- Reconstruir los registros climáticos de estaciones meteorológicas localizadas dentro del área de estudio.
- Realizar análisis de tendencias y series anuales de tiempo de las estaciones meteorológicas seleccionadas cercanas a los sitios de muestreo.
- Detectar las anomalías en las estaciones meteorológicas y relacionarlas al efecto del fenómeno “ENSO” dentro del área de estudio.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

En la Figura 1 se muestra el área de estudio, ubicado dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano entre las coordenadas geográficas 19° 13' 23" y 20° 17' 11" N y 100° 27' 12" y 101° 44' 26" W. Comprende una superficie de 6840 km², abarca en su mayor parte el estado de Michoacán y en menor porción el estado de Guanajuato. Se localiza dentro de las subprovincias fisiográficas: Sierras y Bajíos Michoacanos, Mil Cumbres, Bajío, Depresión del Balsas y Neovolcánica Tarasca (INEGI, 1998).

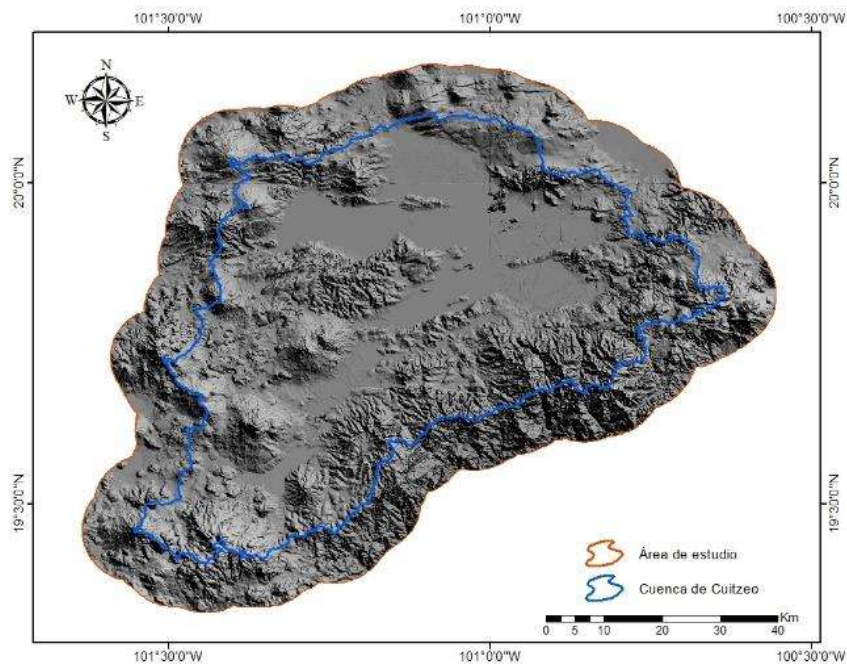


Figura 1. Área en donde se efectuó el estudio, la línea azul representa los límites de la Cuenca de Cuitzeo

3.2 CLIMA

Dentro del área de estudio existen cuatro diferentes tipos de clima con cuatro modificaciones (García, 1998). El clima dominante y que él ocupa la mayor porción del área de estudio es templado subhúmedo con lluvias en verano C (w), con sus modificaciones C (w₀), C (w₁) y C (w₂); se tiene presencia del clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano Cb' (w₂), clima cálido subhúmedo A (w₁) y el clima

semicálido subhúmedo AC (W) con lluvias en verano, con su modificación AC (W₂) (Figura 2).

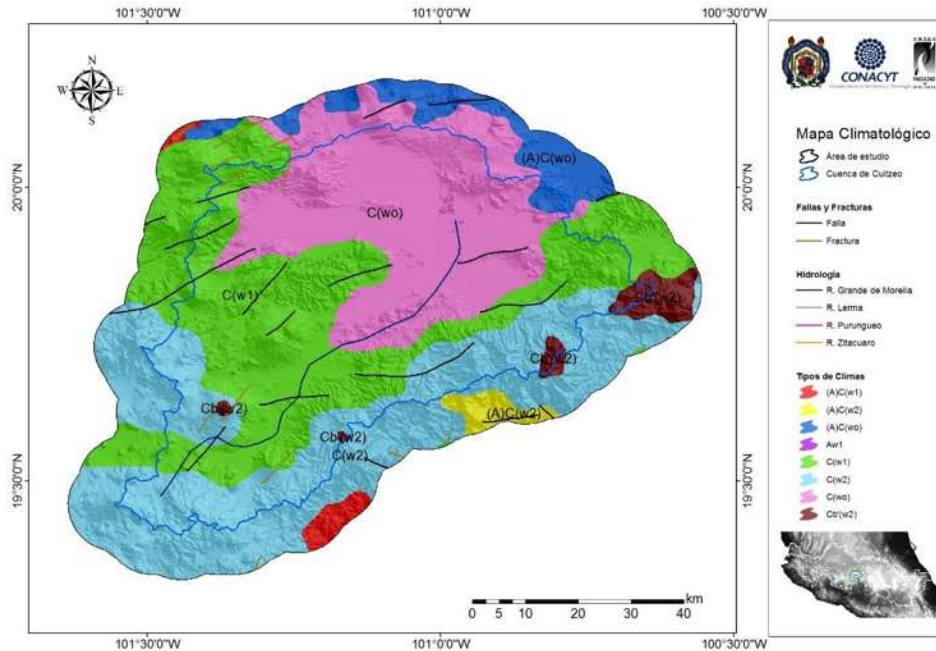


Figura 2. Climas del área de estudio

3.3 VEGETACIÓN

Los tipos de vegetación del área de estudio (Figura 3) han sido clasificados como: **uso no forestal** cubre la mayor parte del área de estudio, **bosque mixto** en la parte altitud de media altitud conformado por bosque de pino-encino y otras hojosas, **bosque de latifoliadas** en la parte de altitud media integrado por especies del género *Quercus* y en menor proporción *Pinus*, los **matorrales** en la parte de altitud baja, su principal tipo de vegetación lo conforman las *cactáceas* y *acacias*, **selva fragmentada** en la parte de altitud baja a media, lo conforman especies como *Cedrela dugesii* y *acacia sp*, **selva baja caducifolia** en la parte de altitud baja, lo forman especies como *Ceiba sp* y *acacia sp*, **bosque fragmentado** en la parte de media altitud, conformado por pino-encino y otras latifoliadas mezcladas y fragmentadas en parches, **áreas perturbadas** son áreas dañadas por acciones antropogénicas localizadas en zonas de altitud baja a media,

bosque de coníferas es el tipo de vegetación más escasa dentro del área de estudio y solo se localiza en áreas de alta altitud (Miranda y Hernández, 1963).

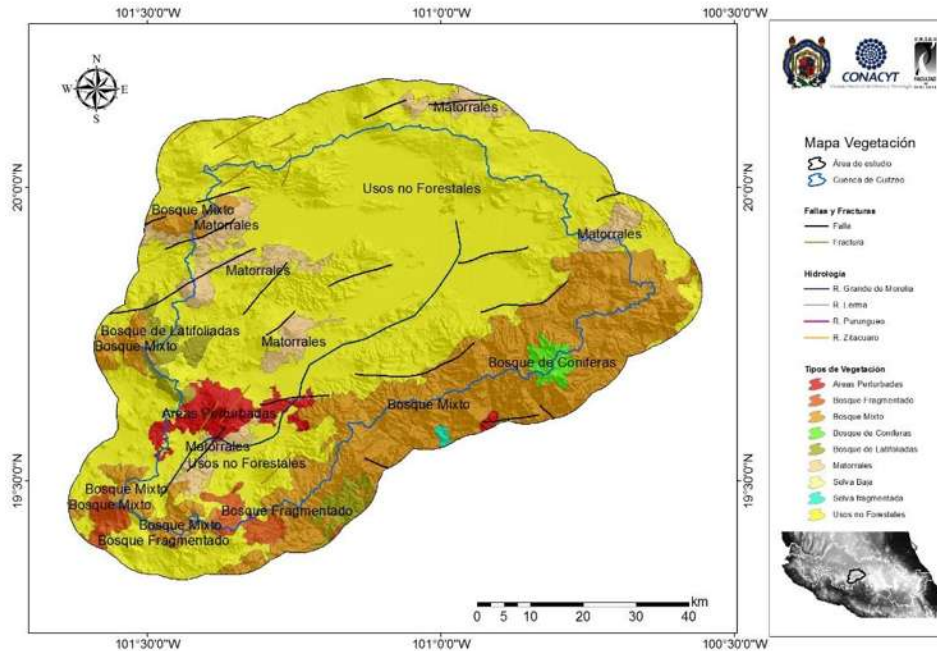


Figura 3. Tipos de vegetación del área de estudio

3.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA

Se seleccionaron estaciones meteorológicas localizadas dentro de la Cuenca de Cuitzeo y con un buffer de 20 km, dando un total de 34 estaciones meteorológicas analizadas (Figura 4). Se analizó un área de 6840 km², que abarcó toda la Cuenca de Cuitzeo con un radio de 8.5 km. Se trabajó con la información climática disponible de la plataforma CLICOM por sus siglas en inglés (Climatic Computing Project) (CLICOM, 2015). Se descargaron 2 978 400 registros climáticos de las variables precipitación y temperatura de 34 estaciones meteorológicas.

Se utilizaron tablas dinámicas de Excel para depurar y ordenar la información meteorológica.

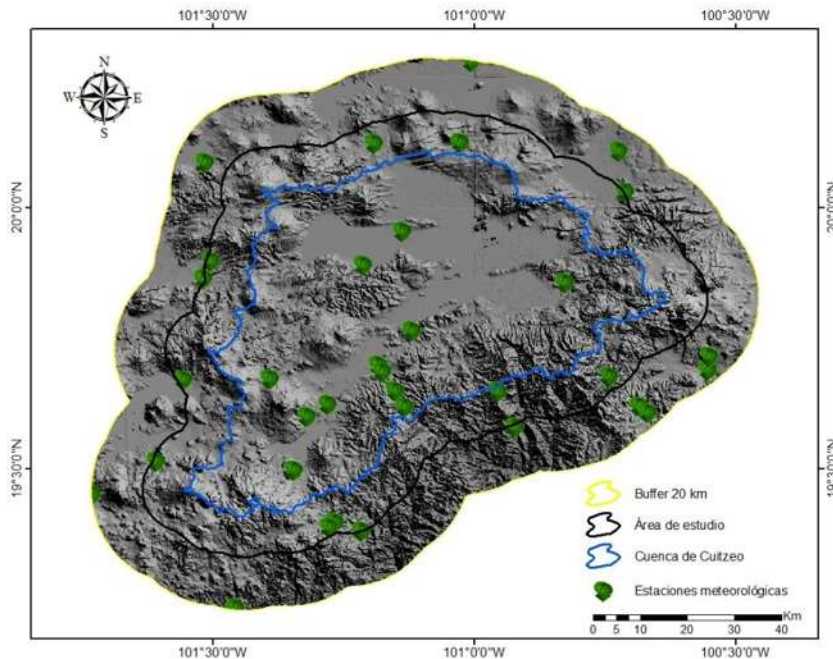


Figura 4. Estaciones meteorológicas del área de estudio

Se emplearon medias móviles para reconstruir los registros faltantes de temperatura, y un análisis de *regresión lineal simple* para completar los datos vacíos de precipitación de manera pareada entre estaciones meteorológicas, donde el valor mínimo de R^2 fue 0.56. De 34 estaciones meteorológicas analizadas y con las variables climáticas reconstruidas, se seleccionaron aquellas que estuvieran geográficamente cercanas a los sitios de muestreo dendrocronológico. De este análisis se definieron 10 estaciones meteorológicas (Cuadro 1), que cumplieron con el requisito de cercanía a los sitios de muestreo, a las cuales se les realizó un análisis de series anuales de tiempo en Excel 2013 y un análisis de tendencias en el software MOCLIC® (Monitoring Climate Change) (Bautista *et al.*, 2011) mediante la prueba no paramétrica de *Mann-Kendall*.

Cuadro 1. Descripción de las 10 estaciones cercanas a los sitios de muestreo

Estación	ID	Periodo de actividad	Coordenadas geográficas	Altitud m
Acuitzio del Canje	16001	1961-2008	N 19.4989 W 101.3447	2200
Cointzio	16022	1940-2007	N 19.6250 W 101.2811	2096
El Temazcal	16045	1965-2011	N 19.6506 W 100.9550	2220
Huajúmbaro	16247	1980-2011	N 19.6792 W 100.7417	2285
Jesús del Monte	16055	1935-2012	N 19.6517 W 101.1514	2180
Morelia	16081	1947-2012	N 19.6886 W 101.1761	1908
San Miguel del Monte	16114	1963-2007	N 19.6203 W 101.1342	2155
Santiago Undameo	16120	1953-2007	N 19.6028 W 101.3200	2130
Villa Madero	16139	1943-1984	N 19.4000 W 101.2667	2097
Zinapécuaro	16145	1923-2010	N 19.8586 W 100.8272	1880

ID: Número de identificación de la estación meteorológica asignado por CONAGUA.

El análisis de series de tiempo y tendencias se realizaron con ayuda del software MOCLIC® . En donde se trabajó con los datos climáticos de 10 estaciones y se obtuvieron los climogramas mensuales de temperaturas y precipitación, series de tiempo y tendencias del periodo 1954 a 2012.

3.5 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

Se seleccionaron valores con intervalos de tiempo regulares para las 10 estaciones meteorológicas; una de las características en las series de tiempo es la variabilidad climática que presenta (McCuen y Snyder, 1986), lo cual puede ser clasificado como tendencia climática en la serie. Las series anuales de tiempo se realizan para identificar posibles tendencias de las series climáticas analizadas y esto se corrobora mediante un análisis de tendencias con la prueba no paramétrica de *Mann-Kendall*.

3.6 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Se trabajó con los datos climáticos mensuales y anuales de las 10 estaciones meteorológicas del periodo 1954 a 2012. Los análisis de tendencia se realizaron mediante la prueba no paramétrica de *Mann-Kendall*. La prueba mide el valor del estadístico Z , donde los valores mayores de **1.96**, con un nivel de significancia de $p=0.05$ indican que se rechaza la hipótesis nula que afirmaría la no existencia de tendencia climática en la serie analizada (Kendall, 1938), por lo tanto se dice que existe una tendencia climática.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS DE CLIMOGRAMAS MENSUALES

Se obtuvieron los climogramas mensuales de las 10 estaciones meteorológicas con ayuda del software MOCLIC®. Se tuvo una temporada de lluvias de mayo a octubre, durante ese periodo se puede apreciar que la temperatura máxima va disminuyendo conforme llega el invierno. La variación de las temperaturas máximas fue de 29.7 a 36 °C registradas en verano. La temperatura media aumenta a mediados de mayo e inicia su descenso en octubre con una variación de 15 °C a 21 °C. El análisis de temperatura mínima indicó los meses de diciembre a enero como los más fríos, con una temperatura mínima de -5 °C a 3.1 °C.

El análisis de la precipitación señaló años anormalmente húmedos y secos para el periodo de 1954 a 2012.

Las estaciones meteorológicas Santiago Undameo, San Miguel del Monte, Cointzio y Morelia registraron una tendencia al aumento en la temperatura, y de acuerdo con lo reportado por Carlón y Mendoza en 2007, Múzquiz y Antaramián en 2001, la estación de Morelia en especial, la estaciones de Santiago Undameo, San Miguel del Monte y Cointzio registraron una serie de anomalías en las temperaturas y la precipitación, por lo cual existe concordancia con nuestro análisis, de existencia de tendencia de disminución en la precipitación todavía no significativa y el aumento de las temperaturas media y máxima para la Ciudad de Morelia.

En general, para el área de estudio se tiene registrado un aumento en la temperatura, más no así para la precipitación en donde la mayor parte el área de estudio no presentó tendencia, esto concuerda con lo mencionado por Martínez *et al.*, (2014), Carlón y Mendoza (2007) y Múzquiz y Antaramián (2001) sobre la existencia de claras tendencias en el aumento de la temperatura más no así en la precipitación de gran parte de México y el área de estudio.

El análisis mensual de los climogramas de las 10 estaciones meteorológicas del periodo 1954 a 2012 dentro del área de estudio se presenta en la Figura 5.

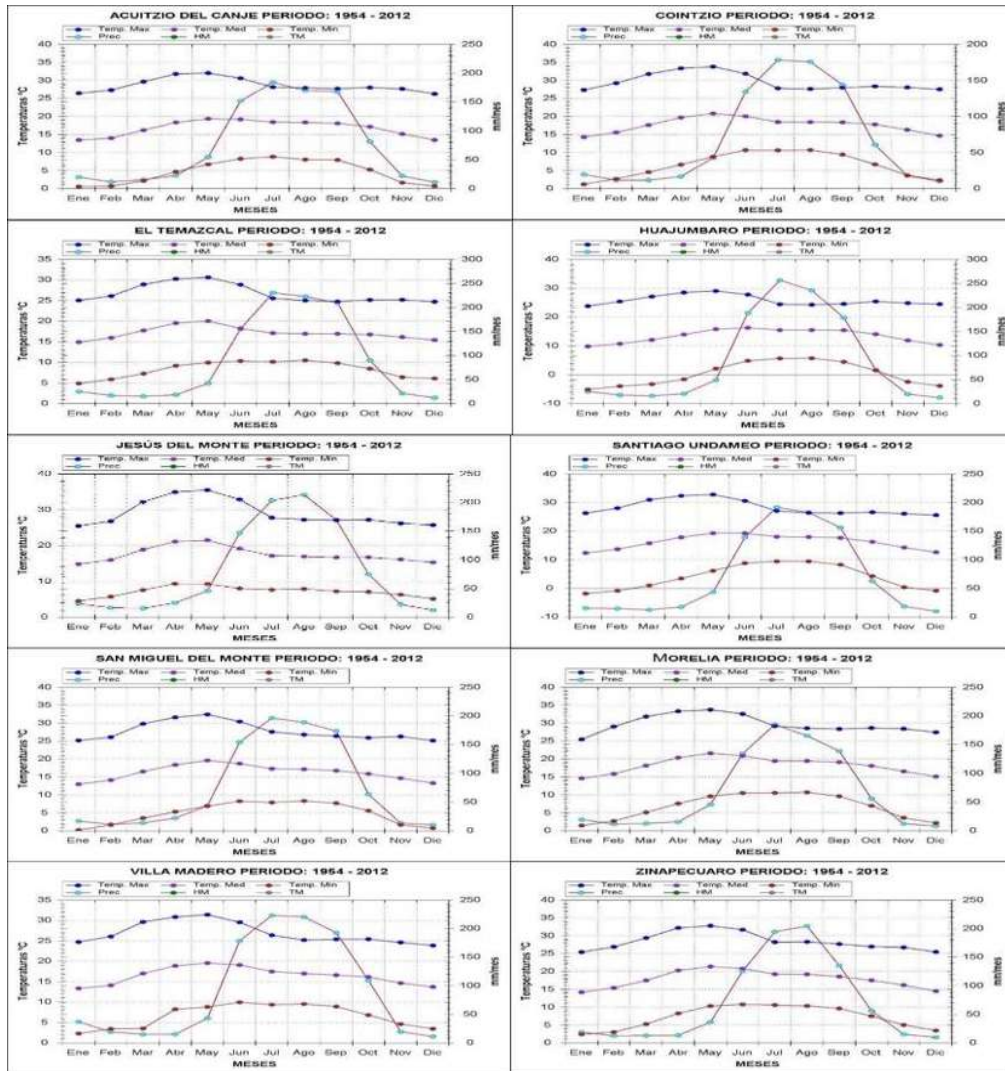


Figura 5. Climogramas mensuales de las 10 estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de estudio

4.2 ANÁLISIS DE SERIES ANUALES DE TIEMPO

Los meses de mayo y junio resultaron ser los más cálidos y el mes de enero el más frío. La temperatura media anual fue de 16.3 °C hasta 18.3 °C. Se presentaron aumentos en la temperatura máxima de 29.7 °C hasta 33.7 °C, siendo el mes más cálido junio. La temperatura mínima fue de -5.8 °C hasta 3.3 °C, siendo enero el mes más frío. Existe un comportamiento hidrológico y térmico similar de las 10 estaciones meteorológicas analizadas (Figuras. 6 a 9).



Figura 6. Análisis de series de tiempo para precipitación del área de estudio

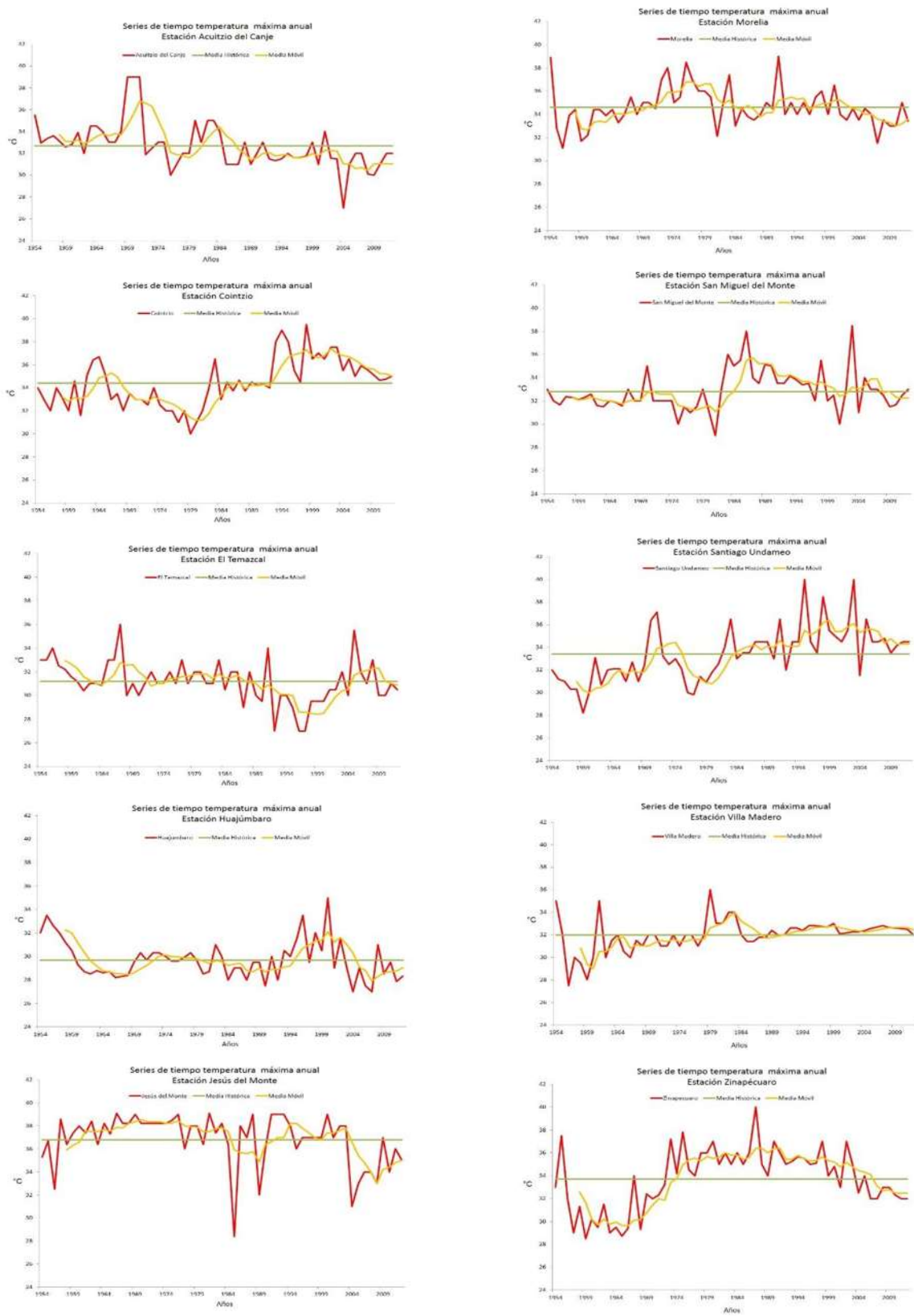


Figura 7. Análisis de series de tiempo para temperatura máxima del área de estudio

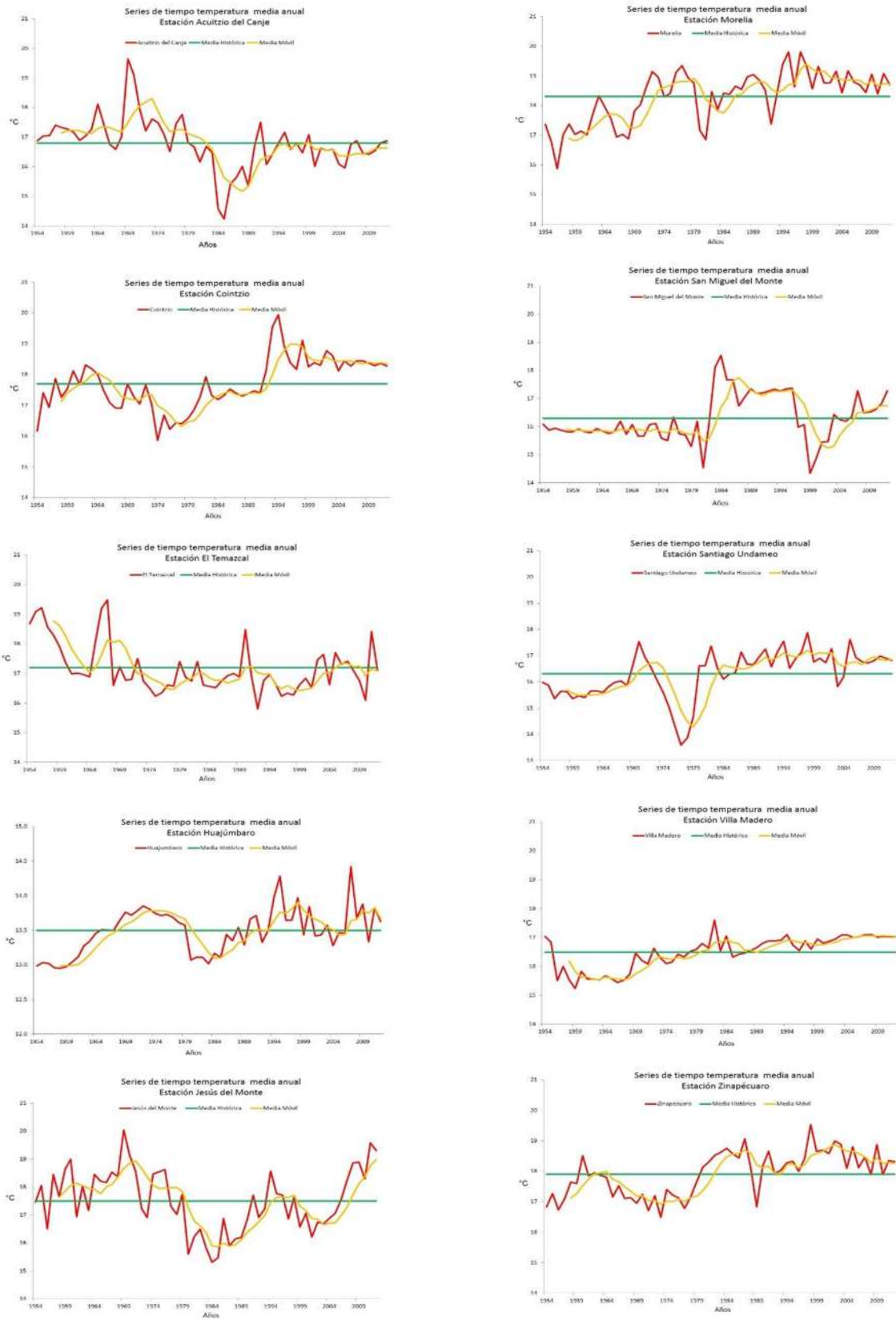


Figura 8. Análisis de series de tiempo para temperatura media del área de estudio

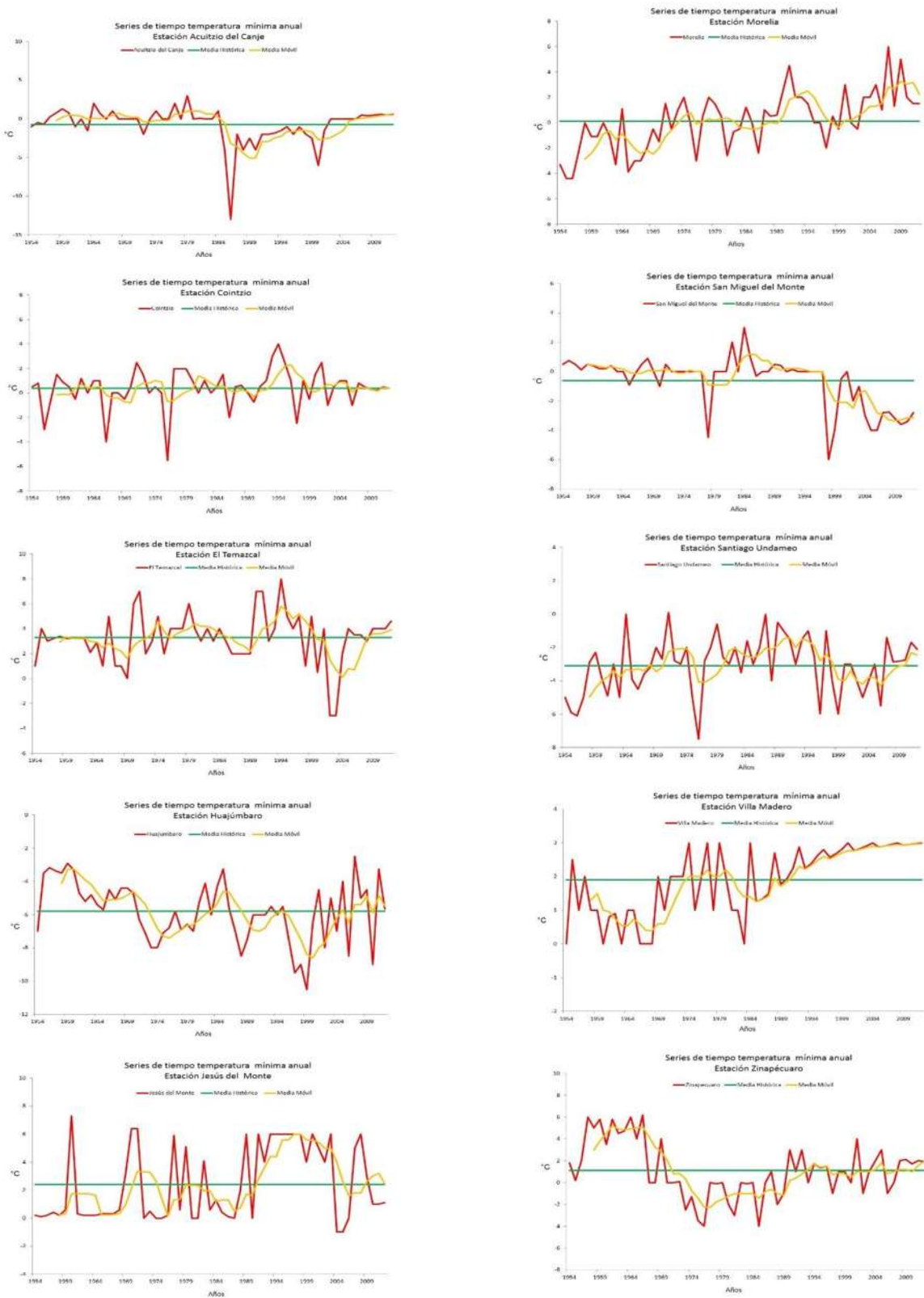


Figura 9. Análisis de series de tiempo para temperatura mínima del área de estudio

Se obtuvieron los valores de las medias históricas de precipitación para las 10 estaciones, los cuales oscilaron de 810 mm hasta 1095 mm anuales, siendo la estación de Morelia la que presentó el valor más bajo (810 mm anuales) (Cuadro 2), lo cual concuerda con lo mencionado por Carlón y Mendoza (2007), Múzquiz y Antaramián (2001) en donde la Ciudad de Morelia presentó una tendencia a disminuir (no significativa aún) en la precipitación y un aumento en la temperatura.

Cuadro 2. Medias históricas de precipitación de las 10 estaciones meteorológicas

Estación	ID	Periodo reconstruido	Media precipitación Histórica mm	Altitud m
Acuitzio del Canje	16001	1954 a 2012	910	2200
Cointzio	16022	1954 a 2012	845	2096
El Temazcal	16045	1954 a 2012	1060	2220
Huajúmbaro	16247	1954 a 2012	1095	2285
Jesús del Monte	16055	1954 a 2012	980	2180
Morelia	16081	1954 a 2012	810	1908
San Miguel del Monte	16114	1954 a 2012	910	2155
Santiago Undameo	16120	1954 a 2012	865	2130
Villa Madero	16139	1954 a 2012	1090	2097
Zinapécuaro	16145	1954 a 2012	845	1880

ID: Número de identificación de la estación meteorológica asignado por CONAGUA.

4.3 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

La prueba estadística no paramétrica de *Mann-Kendall* indicó la existencia de tendencias de aumento en la temperatura dentro del área de estudio y una disminución en la precipitación hacia la parte sureste. La estación “Morelia” mostró tendencias de aumentos en la temperatura y una tendencia hacia la disminución en la precipitación, lo cual coincide con lo reportado por Carlón y Mendoza (2007) y Múzquiz y Antaramián (2001). Las estaciones de Jesús del Monte y Morelia presentan una tendencia de aumento en la precipitación durante noviembre y diciembre, lo cual coincide con lo reportado por Mendoza *et al.* (2006) quienes mencionan que el aumento en la precipitación se debe a un ciclo de anomalías que inició en el año 2000.

La estación Villa Madero muestra tendencias de aumento en la temperatura y una disminución en la precipitación (Cuadro 3).

Además en el Cuadro 3 se describen las 10 estaciones meteorológicas analizadas con ayuda de la prueba no paramétrica de *Mann-Kendall* para temperaturas y precipitación. Los valores del estadístico S, positivos o negativos indican la existencia de tendencia en la serie analizada de acuerdo con los valores del estadístico Z mayores a 1.96; $p=0.05$, positivos o negativos. Los valores significativos del análisis de *Mann-Kendall* se encuentran en negritas e indican que existe tendencia climática en la serie analizada.

Cuadro 3. Prueba de *Mann-Kendall* de las 10 estaciones dentro del área de estudio

Estación	Temperatura máxima °C	Temperatura media °C	Temperatura mínima °C	Precipitación mm
Acuitzio del Canje	S= -258 Z= -1.68	S= -548 Z= -3.58	S= -448 Z= -2.92	S= -91 Z= -0.59
Cointzio	S= 509 Z= 3.32	S= 684 Z= 4.47	S= -425 Z= -2.77	S= -159 Z= -1.03
El Temazcal	S= -269 Z= -1.75	S= -369 Z= -2.40	S= -431 Z= -2.81	S= 238 Z= 1.55
Huajúbaro	S= 196 Z= 1.27	S= 486 Z= 3.17	S= 12 Z= 0.07	S= -7 Z= -0.04
Jesús del Monte	S= -48 Z= -0.83	S= -109 Z= -0.70	S= -128 Z= -0.83	S= 539 Z= 3.52
Morelia	S= 355 Z= 2.31	S= 789 Z= 5.15	S= 810 Z= 5.29	S= -200 Z= -1.30
San Miguel del Monte	S= 160 Z= 1.04	S= 405 Z= 2.64	S= 342 Z= 2.23	S= -427 Z= -2.79
Santiago Undameo	S= 935 Z= 6.10	S= 757 Z= 4.94	S= 90 Z= 0.58	S= 9 Z= 0.05
Villa Madero	S= 730 Z= 4.77	S= 1082 Z= 7.07	S= 997 Z= 6.51	S= -726 Z= -4.74
Zinapécuaro	S= 425 Z= 2.77	S= 729 Z= 4.76	S= -113 Z= -0.73	S= 83 Z= 0.54

4.4 EFECTOS ENSO DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el presente apartado se indican las anomalías de los periodos de humedad y de secas de las 10 estaciones meteorológicas dentro del área de estudio.

Dichos años en donde la cantidad de precipitación estuvo por abajo de la media histórica fueron 1954, 1957, 1959, 1960 a 1961, 1972, 1974, 1982 a 1983, 1986 a 1987, 1989, 1994 a 1997, 2000, 2002, 2005, 2009, y 2011 a 2012, todos efectos de “El Niño”.

Los años en donde la cantidad de precipitación estuvo por arriba de la media histórica fueron 1958, 1965 a 1967, 1970 a 1971, 1976 a 1978, 1985, 1990 a 1992, 1998, 2001, 2004, 2006, 2008 y 2010, todos efectos de “La Niña”.

Durante el período 1993 a 1996 se presentó una fuerte sequía en el norte de México (Magaña *et al.*, 1999), lo anterior a consecuencia de un efecto de “El Niño” de los años 1993 a 1994 para los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango, el efecto de este fenómeno quedó registrado en los años 1994 a 1997 dentro del área de estudio.

En la década de los 50’s se registraron cinco importantes efectos de “La Niña” (1951 a 1952, 1953, 1957 a 1958) y dos de “El Niño” (1950 a 1951, 1954 a 1956) (Trenberth, 1997; Magaña *et al.*, 1999a), en este trabajo los efectos del ENSO tuvieron presencia en los años 1954, 1957, 1959 efectos de “La Niña” y 1958 efecto de “El Niño”.

Durante el periodo de 1982 a 1983 se produjo un efecto de “El Niño” intenso, el cual provocó sequías para casi todo el país (Magaña *et al.*, 1999b), dicho periodo fue detectado en este trabajo.

En el periodo 1991 a 1995, se estableció un periodo de efectos de “El Niño”, no tan intenso, pero el cual se convirtió en una de las sequías más prolongadas hacia el norte del país.

La sequía de 1997, se asocia a un efecto de “El Niño” del 1997 a 1998, considerado por algunos autores como la más intensa del siglo XX (Magaña *et al.*, 1999b), sin embargo, el efecto de este fenómeno no fue tan severo en el área de estudio.

Al terminar la sequía del 1997 a 1998 se presentaron años anormales, los cuales comenzaron a partir del año 2000 hasta la fecha (Galván, 2011).

5 CONCLUSIONES

El análisis de series anuales de tiempo para temperaturas y precipitación de las 10 estaciones meteorológicas indican la existencia de un comportamiento hidrológico y térmico similar dentro del área de estudio.

Las estaciones meteorológicas de Cointzio, San Miguel del Monte, El Temazcal, Santiago Undameo, Huajúmbaro, Jesús del Monte y Villa Madero registran tendencias recientes de aumento en la temperatura máxima anual.

Las estaciones meteorológicas de Morelia, Cointzio, San Miguel del Monte, Santiago Undameo, Huajúmbaro, Villa Madero, Jesús del Monte y Zinapécuaro registran tendencias recientes de aumento en la temperatura media anual.

Las estaciones meteorológicas de Cointzio, San Miguel del Monte, El Temazcal, Santiago Undameo y Zinapécuaro registran tendencias recientes de disminución en la temperatura mínima anual.

De acuerdo con los otros autores, se concluye que los registros de temperatura y precipitación de las estaciones meteorológicas muestran un aumento en la temperatura máxima y media y una disminución en la temperatura mínima, respectivamente para la zona de estudio.

La prueba no paramétrica de *Mann-Kendall* indica la existencia de tendencias de aumento en la temperatura para las 10 estaciones meteorológicas analizadas, lo que para gran parte del área de estudio representa modificaciones en la temperatura y una ligera tendencia a la disminución de la precipitación, ocasionando un clima más extremo, con temperaturas más cálidas, inviernos más fríos y menor cantidad de precipitación.

Los efectos de “El Niño” y la “Niña” tienen una marcada influencia en las estaciones de Acuitzio del Canje, Morelia, San Miguel del Monte, Cointzio, Santiago Undameo y Villa Madero.

Las anomalías de los años húmedos y secos detectados en este estudio pudieran ser producto en gran medida de los disturbios de origen antropogénico, por lo que es necesario, entre otras cosas, reducir las tasas de deforestación, así como el uso de combustibles de origen fósil.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Bautista, F. D., Bautista, H. A., Álvarez, O., y De la Rosa, D. (2011). Sistema de análisis de datos para el monitoreo regional y local del cambio climático con índices agroclimáticos (MOCLIC). CONACYT, SNI-090315, 46.
- Campos, A. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. Anexo C: Regresión y correlación lineales. (U. Potosina Ed.).
- Campos, A. (2000). Variabilidad en la estimación de los coeficientes de escurrimiento mensuales. (Estudio de caso). 767-772.
- Campos, A. (2003). Introducción a los Métodos Numéricos. Software en Basic y aplicaciones en Hidrología Superficial. (L. U. Potosina Ed. Capítulo 5: Ajuste de Curvas. Pp 93-127 ed.). San Luis Potosí.
- Campos, A. (2007). Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. San Luis Potosí.
- Carlón, A. T., y Mendoza, M. E. (2007). Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, 63: 56-76.
- CLICOM. (2015). Registros climáticos disponibles para toda la República Mexicana. Valores anuales y mensuales de precipitación y temperatura. Disponible en: <http://clicom-mex.cicese.mx/>. Consultado el 08/04/15.
- CONAGUA. (2015). Red de estaciones climatológicas. Retrieved 08/03/15, 2015, from <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo10.html> Consultado el: 08/03/15
- Díaz, H. F., y Markgraf, V. (1992). El Niño. Historical and paleoclimatic Aspects of the souther Oscillation.
- Díaz, V. M., y Casar, G. R. (2010). Otros Métodos de Estimación Espacial. México, D.F.
- Euscategui, C. (2002). Estado de los glaciares en Colombia y análisis de la dinámica glaciar en el parque los nevados, asociada al cambio climático global. (Maestría en Meteorología), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. (85).
- Galván, O. L. (2011). Impacto de la sequía meteorológica en la vegetación en distintas regiones climáticas de México (1982-2006). (Maestría Posgrado en Geografía), Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

- García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana). México D.F.: Offset Larios S.A. .
- García, E. (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. México. Climas.
- INEGI. (1998). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. Subprovincias Fisiográficas de México. Retrieved 08/04/15, 2015, from http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/diccio/FIS_1000.PDF.Consultado el 08/04/15
- Kendall, M. G. (1938). "A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30, 81-93.
- Ludevid, M. (1997). El Cambio Global en el medio ambiente. (E. Alfaomega Ed.). Barcelona, España.
- Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrizosa, E., y Pérez, J. (1999a). El Niño y el Clima. *Climatología de México*, 23-68.
- Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrizosa, E., y Pérez, J. (1999b). Los impactos del Niño en México. México, D.F: Secretaria de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Magaña, V., Vázquez, J. L., y Pérez, J. B. (2003). Impact of the Niño on precipitation in Mexico (Vol. 42). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, A. P. F., Patiño, G. C., y Tamayo, E. J. E. (2014). Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6): 135-149.
- Méndez, G. J., Návar, C. J., y González, O. V. (2007). Análisis de tendencias de precipitación (1920-20049 en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 65(0188-4611), 38-55.
- Mendoza, M. E., Bocco, G., Bravo, M., López, E., y Osterkanp, R. (2006). "Predicting water-surface fluctuation of continental lakes: a RS and GIS based approach in Central Mexico" (Vol. 20).
- McCuen, R. H., y Snyder, W. M. (1986). *Hydrologic modeling: stastical methods and applications* (E. C. Prentice-Hall Ed.). New York.

- Miranda, F y E. Hernández-X (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Bol. Soc. Bot. Mex.* 29-179.
- Molnár, P., y Ramírez, J. (2001). "Recent trends in precipitation and streamflow in the Rio Puerco Basin". *Journal of climate*, 14(10), 2317-2328.
- Múzquiz, E., & Antaramián, E. (2001). Modificaciones del clima en el entorno urbano-rural. *INEGI notas, revistas de información y análisis*, 13: 23-32.
- Ostle, B., y Mensing, R. W. (1975). *Statistics in Research*. Chapter 7: Regression analysis. Ames, Iowa, U.S.A.: The Iowa State University Press.
- Pohl, K., Therrell, M. D., Blay, J. S., Ayotte, N., Cabrera, J. J., Diaz, S. C. y Stahle, D. W. (2003). A cool season precipitation reconstruction for Saltillo, México. *Tree Ring Research*, 59 (1), 11-19.
- Schulz, E. F. (1976). *Problems in Applied Hydrology*. Section two. Elementary statistical properties. CA, U.S.A: Water Resources Publications. For Collins.
- Sigh, V., P. (1992). *Elementary Hydrology*. Chapter 7: Measurement and analysis of precipitation data. Englewood Cliffs. N.J, U.S.A.: Prentice-Hall.
- Stahle, D. K., Darrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J. y Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation American Meteorological Society, 79 (10), 2137-2152.
- Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Cleaveland, M. K., Therrell, M. D., Paull, B. T., Burns, W. y Fulé, P. Z. (2000). Recent tree-ring research in Mexico. (E. d. I. U. N. d. C. (EDIUNC). Ed.). Mendoza, Argentina.
- Trenberth. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771-2777.
- Viessman, W., Knapp, J. W., Lewis, G., y Harbaugh, T. E. (1977). *Introduction to Hydrology*. Chapter 2: Precipitation. (Vol. 2). New York, U.S.A: Harper y Row.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, D. K., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K. y Sánchez, L. (2004). Elementos Básicos de la Dendrocronología y sus aplicaciones en México . Folleto Técnico no. 2. INIFAP, CENID-RASPA. 2, 37.

- Villanueva, D. J., Stahle, D. K., Luckman, B. H., Cerano, P. J., Therrell, M. D., Moran, R. y Cleaveland, M. K. (2007). Potencial dendrocronológico de *Taxodium mucronatum* Ten. y acciones para su conservación en México. *Ciencia Forestal en México*, 32 (101), 9-37.
- Watson, R. (2001). *Climate Change* Ginebra, Suiza: the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra.
- Watson, R., Zinyowera, M., y Moss, R. (1997). *Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad (Informe especial del Grupo de trabajo II del IPCC Ed.)*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- WMO. (1971). *Climatic Change. Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations*. 79: 58-71.

CAPÍTULO II

RECONSTRUCCIÓN DE SERIES DENDROCRONOLÓGICAS DE TEMPERATURA MEDIA Y PRECIPITACIÓN DENTRO DEL EJE NEOVOLCÁNICO TRANSMEXICANO

Ulises Manzanilla Quiñones, Juan Manuel Ortega Rodríguez, Alfredo Amador García, José Cruz de León, José Arnulfo Blanco García y María Alcalá de Jesús

RESUMEN

Los estudios dendrocronológicos permiten conocer los cambios en el clima y son útiles para evaluar la variación histórica del clima. Las reconstrucciones climáticas realizadas en México, han sido estimaciones de precipitación e índices de sequía para el norte de México. En los trabajos dendrocronológicos se reconstruye principalmente la precipitación, en ella se pueden identificar periodos de sequías y años húmedos. En este trabajo se planteó como objetivo reconstruir los datos sobre temperatura media y la precipitación dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano. Se utilizaron programas de análisis espacial y una cámara fotográfica para medir 72 muestras de cuatro especies de coníferas en cinco localidades. Los datos se analizaron con los programas COFECHA y ARSTAN. Se obtuvieron curvas polinómicas que describen las tendencias del crecimiento de los árboles. Los valores COFECHA varían desde $R=0.351$; $p < 0.01$ hasta $R=0.411$; $p < 0.01$ para los sitios muestreados. Con ayuda del programa ARSTAN se generaron tres cronologías con la señal climática maximizada. La prueba de *Mann-Kendall* indica una tendencia climática hacia valores más extremos. Se obtuvieron los periodos de función de respuesta climática que fueron 1989 a 2014 para temperatura media de enero a mayo y 1983 a 2014 para la precipitación de enero a mayo, los cuales fueron calibrados y verificados. Se construyeron modelos lineales los cuales reconstruyeron la temperatura media y precipitación de enero a mayo de 1934 a 2014. Los efectos de “El Niño” están asociados a baja precipitación y aumento en la temperatura y los efectos de “La Niña” se relacionan con los descensos en la temperatura y precipitaciones anormales. La sequía de 1946 a 1955 fue la más intensa registrada para México y la cual se tiene registro dentro del área de estudio. El periodo de 1957 a 1967 fue el más húmedo dentro del área de estudio.

1 INTRODUCCIÓN

La diversidad de especies arbóreas en México es una de las más grandes del mundo, situación que le brinda al país un potencial para el desarrollo de estudios dendrocronológicos. México se caracteriza por poseer una gran diversidad de ecosistemas, resultado de su compleja fisiografía y topografía, su amplia variedad de climas y sus diferentes tipos de vegetación. Sin embargo, a pesar de contar con una amplia gama de especies arbóreas, la mayoría de estas todavía no han sido estudiadas a fondo (Villanueva *et al.*, 2003). Los estudios basados en los anillos anuales de crecimiento de los árboles nos permiten conocer los cambios ocurridos en el clima, son útiles para evaluar la variabilidad del clima a lo largo del tiempo. Los anillos de los árboles son archivos históricos que determinan el clima del pasado, han sido utilizados por muchos autores, desde principios del siglo XX por el fundador de la dendrocronología, Andrew E. Douglas, hasta la actualidad. En México, los estudios dendrocronológicos, se iniciaron a partir del trabajo de Schulman en 1944, en el estado de Durango, trabajo realizado con fines de reconstrucción arqueológica (Villanueva *et al.*, 2000).

Los anillos de crecimiento constituyen una fuente valiosa de información para los campos de la ecología, hidrología, geología y paleoclimatología. Al aislar cada factor de interés y discriminar los restantes se constituye la técnica base para cuantificar por separado la influencia de cada uno (Cook, 1987; Delgado, 2000). Si se analiza desde esta perspectiva, queda claro la gran cantidad de información que se puede extraer de cada anillo anual de crecimiento, de ahí la importancia de fecharlo con exactitud al año de su formación y de medir su grosor lo más preciso posible. El potencial dendrocronológico de las especies se refiere a la capacidad que éstas tienen para desarrollar anillos anuales de crecimiento definidos, con una señal climática; esta variabilidad climática, se refleja a través de la variación en el grosor de sus anillos (Fritts, 1976). En los ecosistemas de bosques de clima templado, existen coníferas con potencial dendrocronológico, cuyo desarrollo de madera temprana como el de madera tardía están influenciados por las condiciones dominantes de la precipitación de invierno y primavera (Stahle, 1998) así mismo, estas especies permiten analizar la

influencia de fenómenos climáticos de circulación atmosférica global, los cuales influyen y determinan la variabilidad de la precipitación hacia ciertas regiones del país (Díaz *et al.*, 2002 y Magaña *et al.*, 2003). Los estudios dendrocronológicos permiten analizar y determinar la variabilidad climática ocurrida a lo largo de siglos o milenios, y determina la influencia de patrones atmosféricos de circulación general que afectan al clima a nivel regional. La investigación dendrocronológica, ha contribuido a la solución de problemas de índole ecológico, hidrológico, climático y arqueológico (Villanueva *et al.*, 2000), he aquí la importancia de desarrollar estudios dendrocronológicos en México (Villanueva *et al.*, 2000).

Las reconstrucciones climáticas realizadas a partir del ancho de anillos de los árboles para México, son estimaciones de precipitación acumulada y de índices de sequías (Villanueva y Mcpherson, 1996). Actualmente en México han sido pocas las especies analizadas desde el punto de vista dendrocronológico, y con las se han generado cerca de 100 cronologías, la mayoría realizadas para el norte y noreste del país, y las cuales han permitido determinar la variabilidad climática histórica de ciertas regiones geográficas de México (Villanueva *et al.*, 2007, Stahle *et al.*, 2008; Constante *et al.*, 2009). Es importante ampliar la información dendroclimática para nuestro país, ya que este constituye una base elemental para el entendimiento y comprensión del comportamiento histórico del clima de ciertas zonas.

2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

La dendrocronología es la ciencia que analiza y fecha los anillos anuales de crecimiento de los árboles, analizando su estructura e investigando la información registrada en ella.

La dendrocronología consiste en el fechado de eventos a través de la medición y el estudio de los anillos de crecimiento de árboles (Grissino, 1996).

La dendrocronología es una disciplina reciente, se inició de manera formal a principios del siglo XX con los trabajos de Douglass, quien a partir de 1901, estableció los principios básicos de la dendrocronología, y en 1937 fundó el Laboratory of Tree-Ring Research en Tucson, Arizona (Fritts y Swetnam, 1989).

Douglass observó en un corte de madera de pino, variaciones en el ancho de sus anillos de crecimiento, lo cual parecía estar influenciado por las deficiencias de humedad, supuso que si lo anterior era verídico, los años secos quedarían registrados como anillos angostos y por lo tanto, podrían ser utilizados para realizar reconstrucciones climáticas (Villanueva *et al.*, 2000).

La Dendrocronología se rige por un conjunto de reglas científicas, las cuales tienen sus orígenes en el año de 1785, y más reciente en el año 1987 (Grissino, 1996; Tomazello *et al.*, 2001).

Los principios que rigen a la dendrocronología son: principio de uniformidad, factores limitantes, amplitud ecológica, crecimiento agregado, fechado cruzado, selección de sitio, replicación, sensibilidad y estandarización.

Las variables de los anillos de crecimiento, como la madera temprana y tardía, son medidas y registradas como series de tiempo. Aunque el patrón de crecimiento en los árboles puede estar afectado por factores externos e internos, la variabilidad climática deja huellas distintivas en los anillos de crecimiento de los árboles (León y Espinoza, 2001; Tomazello *et al.*, 2001).

La dendrocronología es útil para conocer el clima del pasado de ciertas regiones mediante reconstrucciones históricas de precipitación y temperatura, entre otras aplicaciones que se le puede emplear dependiendo de los objetivos del estudio.

2.1 TRABAJOS EFECTUADOS EN MÉXICO

Las primeras reconstrucciones realizadas en México fueron estimaciones de precipitación acumulada e índices de severidad de sequía para el área fronteriza.

Con la creación del primer Laboratorio de Dendrocronología en México, se han podido generar cerca de 100 cronologías, distribuidas hacia la parte norte de México (Villanueva *et al.*, 2004). En México destaca el trabajo efectuado por Constante *et al.* (2009), en donde realizaron una reconstrucción histórica de 410 años (1595 a 2004) de la precipitación de invierno a primavera para el sureste de Coahuila, cuyo objetivo fue determinar el potencial dendrocronológico de la especie *Pinus cembroides* y su relación con fenómenos atmosféricos circulatorios globales ENSO.

En un trabajo con la especie *Pseudotsuga menziesii*, en donde se concluyó de que el abeto de Douglas es la conífera más longeva registrada en México, con individuos vivos de 600 años, la especie registra el potencial dendroclimático más alto para México, con un valor de sensibilidad de 0.650, y sus anillos de crecimiento pueden ser utilizados para generar series dendrocronológicas longevas (Villanueva *et al.*, 2008). Para la zona centro del país los trabajos efectuados son pocos, de los cuales destacan los realizados en los Parques Nacionales Iztaccihualt, Popocatepetl y Zoquiapan en donde se evaluó la especie *Pinus hartwegii*, y se demostró que el crecimiento radial anual está influenciado por oscilaciones de precipitación y temperatura (Cruz, 2007). En otro trabajo con la misma especie (*Pinus hartwegii*) para la Cuenca del Rio Magdalena, se encontró que las variaciones en el ancho de los anillos están controladas por los estímulos climáticos que ocurren durante las estaciones de crecimiento de primavera a verano, aunque se menciona la posibilidad de que la contaminación sea el factor que este influyendo más en el crecimiento de los árboles (Ferreyra, 2010). Un estudio realizado con la especie *Pinus patula* demostró que los anillos anuales de crecimiento se pueden usar como indicadores climáticos, ya que estos registran en su grosor la información climática de cierto año (Martínez, 2008).

Se determinaron los índices de crecimientos para las especies *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* ubicados en las montañas de Nevado de Colima, Pico de Tancítaro, Nevado de Toluca, Cerro Tláloc, La Malinche y Pico de Orizaba dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano donde encontró que los árboles más longevos fueron los oyameles y determinó las tendencias del cambio climático (Martínez, 2011).

En otro trabajo efectuado en el Parque Nacional Pico de Tancítaro se realizó una reconstrucción de precipitación de invierno-primavera de 127 años con anillos anuales de la especie *Abies religiosa* (Cerano *et al.*, 2013).

En un estudio realizado en la Reserva de la Biosfera Sierra Manantlán en el estado de Jalisco, se logró reconstruir la precipitación de invierno a primavera de 219 años (1792 a 2010) con el uso de anillos anuales de *Pinus douglasiana*, donde se determinó el efecto del fenómeno ENSO, cuyos efectos de “El Niño” están asociados con

precipitaciones mayores al promedio histórico, mientras que los efectos de “*La Niña*” muestran una tendencia opuesta (Cerano *et al.*, 2013).

Carlón (2015) realizó un análisis espacial del paisaje mediante el uso de técnicas de Percepción Remota y herramientas de Sistemas de Información Geográfica en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, donde encontró que 18% de la Reserva presenta características idóneas para realizar estudios dendroclimáticos, propuso un protocolo de muestreo dendrocronológico con base en las características topográficas del terreno, y encontró que las áreas con pendientes y laderas pronunciadas contienen árboles sensibles a la respuesta del clima.

De acuerdo con lo antes comentado y analizado sobre el estado de arte actual de los estudios dendrocronológicos en México, se tiene claro que el proceso para generar series dendrocronológicas y reconstrucciones climáticas históricas involucran una serie de acciones entre las que se encuentran, la selección de especímenes sensibles al clima en sitios con el menor disturbio posible, ubicación del arbolado viejo, obtención y procesamiento de muestras, medición, fechado y estandarización de series dendrocronológicas para la generación de índices de ancho de anillo (IAA) con la señal de interés resaltada y con el ruido minimizado mediante programas de la librería dendrocronológica (COFECHA y ARSTAN), para después buscar una correlación estadística entre el IAA (índices de ancho de anillos) y los valores mensuales instrumentales de precipitación y temperaturas, y mediante un *análisis de regresión lineal simple* obtener una ecuación que sirva como modelo matemático lineal para reconstruir la precipitación y temperatura histórica dentro del área de estudio.

2.2 JUSTIFICACIÓN

La mayoría de los trabajos en el área de la dendrocronología se han realizado para las regiones norte y noreste de México, dichos trabajos han sido reconstrucciones climáticas de precipitación y estimaciones de índices de severidad de sequías. Los trabajos efectuados para la zona centro, en especial la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano son pocos. Las reconstrucciones climáticas de precipitación y temperatura generadas a partir de la medición y estandarización de series de anillos anuales de crecimiento sirven y nos permiten ampliar la información climática no instrumental para comprender y entender como ha sido el comportamiento histórico de fenómenos circulatorios atmosféricos de escala global como lo es el ENSO. Por consiguiente en este trabajo nos propusimos analizar y medir anillos anuales de crecimiento de cuatro especies de coníferas de la familia *Pinaceae* ubicadas dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano, con el fin de determinar el comportamiento histórico del clima de la región e identificar los efectos climáticos producidos por el ENSO, tales como: sequías y años anormalmente húmedos, los cuales quedan registrados en ancho de cada anillo de crecimiento.

2.3 HIPÓTESIS

- *El estudio de los anillos de crecimiento de los árboles permitirá el desarrollo de un modelo matemático predictivo, que nos ayude a conocer la relación de estos con los registros de temperatura y precipitación, con el cual será posible reconstruir escenarios climáticos, tales como los relacionados a la influencia del fenómeno ENSO.*

2.4 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar cronologías con anillos anuales de crecimiento, con el fin de reconstruir la precipitación y temperatura media históricas del Eje Neovolcánico Transmexicano.

2.5 OBJETIVOS PARTICULARES

- Desarrollar series dendrocronológicas de precipitación y temperatura.
- Realizar la reconstrucción histórica de precipitación y temperatura.
- Identificar los efectos del fenómeno ENSO en sus distintas fases.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

La zona del Eje Neovolcánico Transmexicano, este está constituida por materiales de origen volcánico (Figura 10). La mayor parte lo cubren suelos profundos y ácidos. El clima predominante es templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw), y con escasas lluvias en invierno. La precipitación anual se concentra en los meses de verano de mayo a agosto. El área de estudio se ubica entre las coordenadas 19° 13' 23" y 20° 17' 11" N y 100° 27' 12" y 101° 44' 26" W, y comprende una superficie de 6840 km², la mayor superficie está en el estado de Michoacán y una pequeña parte en el estado de Guanajuato. Los sitios en donde se realizó el estudio dendrocronológico se localizan en los municipios de Morelia, Tzitzio y Queréndaro dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano.

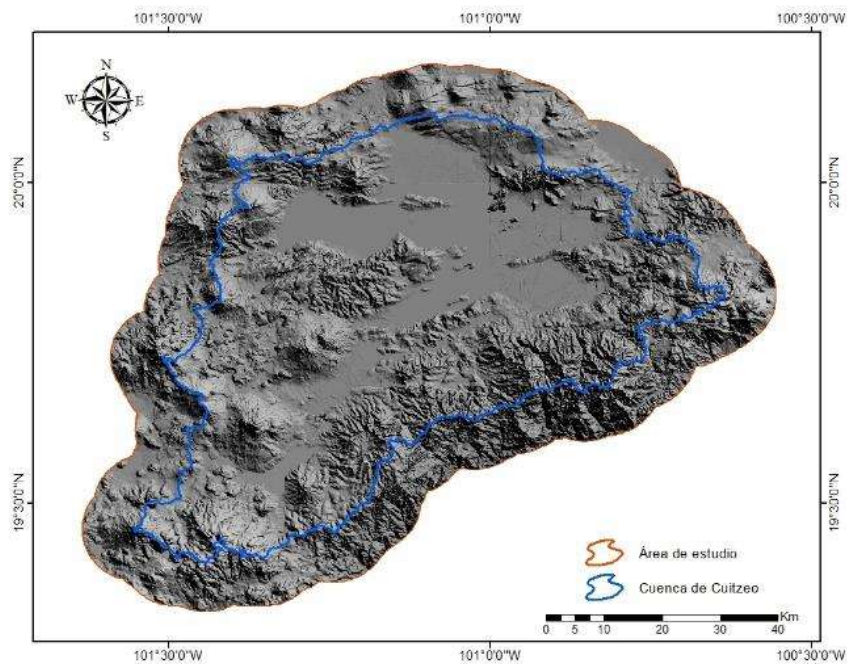


Figura 10. Área del muestreo dendrocronológico, la línea azul representa lo límites de la Cuenca de Cuitzeo

3.2 SITIOS DE MUESTREO

3.2.1 SITIO 1

Descripción: el Sitio 1 pertenece al Ejido “Las Mesas” ubicado entre las coordenadas geográficas 19° 38´ 40.7” N y 101° 05´ 16.2” W del municipio de Morelia y presenta una exposición noroeste (NW), una altitud de 2303 m. La pendiente promedio del sitio es de 20°. El clima es templado subhúmedo C (w₂) con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C y una precipitación del mes más seco del año menor a 40 mm y un régimen de lluvias en verano (García, 1998). El tipo de suelo es Andosol, compuesto por cenizas volcánicas, se encuentra en ambientes húmedos y en bosques de pino-encino (Cabrera *et al.*, 2010). La vegetación del sitio corresponde a bosque de pino-encino con presencia de las especies *Pinus pseudostrobus*, *Pinus leiophylla* y *Quercus* sp (Miranda y Hernández, 1963). El sitio se encuentra bajo manejo forestal maderable y de extracción de resina (Figura 11).



Figura 11. Sitio 1 Ejido “Las Mesas”, Morelia, Michoacán

3.2.2 SITIO 2

Descripción: el Sitio 2 pertenece al Ejido “Las Mesas” ubicado entre las coordenadas geográficas 19° 37´ 57.9” N y 101° 04´ 49.3” W del municipio de Morelia y presenta una exposición noroeste (NW), con una altitud de 2406 m. La pendiente promedio del sitio es de 10°. El clima es templado subhúmedo C (w₂) con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C y una precipitación del mes más seco menor de 40 mm y un régimen de lluvias en verano (García, 1998). El tipo de suelo es Andosol (Cabrera *et al.*, 2010). El tipo de vegetación corresponde a bosque de pino con presencia de las especies *Pinus pseudostrobus*, *Pinus Michoacana* y *Pinus leiophylla* (Miranda y Hernández, 1963). El sitio se encuentra bajo manejo forestal maderable y de extracción de resina (Figura 12).



Figura 12. Sitio 2 Ejido “Las Mesas”, Morelia, Michoacán

3.2.3 SITIO 3

Descripción: el Sitio 3 pertenece al Ejido “San Miguel Coapa” ubicado entre las coordenadas geográficas 19° 28´ 11.4” N y 101 °23´ 21.7” W del municipio de Morelia y presenta una exposición suroeste (SW), con una altitud de 2423 m. La pendiente promedio oscila desde los 15° hasta los 20°. El clima es templado subhúmedo C (w₂) con una temperatura media anual de 12 °C y 18 °C y una precipitación del mes más seco menor de 40 mm y un régimen de lluvias en verano (García, 1998). El tipo de suelo es Andosol (Cabrera *et al.*, 2010). La vegetación del sitio está conformada por las especies *Pinus leiophylla* y *Pinus michoacana* dentro de un ecosistema de bosque de pino (Miranda y Hernández, 1963). El sitio está bajo manejo forestal maderable (Figura 13).



Figura 13. Sitio 3 Ejido “San Miguel Coapa”, Morelia, Michoacán

3.2.4 SITIO 4

Descripción: el Sitio 4 pertenece al Ejido “La Cuadrilla” ubicado entre las coordenadas geográficas 19° 33´ 40.3” N y 101° 07´ 22” W del municipio de Tzitzio y presenta una exposición sureste (SE), con una altitud de 2358 m. La pendiente promedio es de 15°. El clima es templado subhúmedo C (w₂), temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C y una precipitación del mes más seco del año menor a 40 mm y un régimen de lluvias en verano (García, 1988). El tipo de suelo es Andosol (Cabrera *et al.*, 2010). La vegetación está constituida por bosque de pino y conformada por las especies *Pinus herrerae*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote* y *Pinus michoacana* (Miranda y Hernández, 1963). El sitio se encuentra bajo manejo forestal maderable, no presenta problemas fitosanitarios (Figura 14).



Figura 14. Sitio 4 Ejido “La Cuadrilla”, Tzitzio, Michoacán

3.2.5 SITIO 5

Descripción: el Sitio 5 pertenece al Ejido “Las Cuevas” ubicado en las coordenadas geográficas 19° 43´ 58.5” N y 100° 48´ 59.6” W del municipio de Queréndaro y presenta una exposición suroeste (SW), con una altitud de 2730 m. La pendiente promedio oscila desde los 25° hasta los 30°. El clima, el sitio se encuentra en una zona de transición entre templado subhúmedo C (w₂) y el semifrío subhúmedo Cb (w₂), con una temperatura media anual de 12 °C a 18 °C y una precipitación del mes más seco del año menor a 40 mm y un régimen de lluvias en verano (García, 1988). El tipo de suelo es Andosol (Cabrera *et al.*, 2010). La vegetación está compuesta por bosque de coníferas cuyas especies dominantes son *Callitropsis lusitánica*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus lawsonii* y *Abies religiosa* var. *emarginata* (Miranda y Hernández, 1963). El lugar se encuentra bajo manejo forestal maderable, en donde se realicen cortas anuales de aprovechamiento del arbolado (Figura 15).



Figura 15. Sitio 5 Ejido “Las Cuevas”, Queréndaro, Michoacán

3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES EVALUADAS

Dentro del área de estudio se encuentran especies de la familia *Pinaceae* con potencial con fines de reconstrucción de precipitación y temperatura, dichas reconstrucciones históricas del clima se realizan con el fin de detectar la presencia de periodos de sequías, de incendios, años anormales húmedos u otro evento relacionado a los efectos del ENSO. Siendo las especies evaluadas en este estudio las siguientes:

3.3.1 *Pinus pseudostrobus* Lindl

Nombre común: Pino ortiguillo, Pino canís, Pino blanco, Pino real. En México, su distribución está comprendida en las coordenadas geográficas 17° 15' a 19° 25' N y 92° 05' a 108° 35' W. La especie se registra en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Estado de México, Hidalgo, Distrito Federal, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Chiapas, Puebla, Veracruz y Tlaxcala; en altitudes de 2000 a 2800 m (CATIE, 1997). La especie se ha registrado en laderas de montañas con elevaciones que varían desde 1600 hasta 3200 m (Perry, 1991).

3.3.2 *Pinus herrerae* Martínez

Nombre común: Ocote, Pino chino, Pino llanero, Pino. La especie es endémica a nuestro país, se localiza en los estados de Durango, Sinaloa, Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero. En un gradiente altitudinal de 1200 a 2400 m en lugares donde la pendiente es muy pronunciada. La precipitación anual oscila entre los 900 hasta 1200 mm anuales. La especie forma bosques uniformes en donde se asocia con *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. maximinoi*, *P. teocote* y *P. michoacana* (Perry, 1991).

3.3.3 *Pinus leiophylla* Schl. y Cham

Nombre común: Pino, Ocote, Pino chino. La especie tiene una amplia distribución en México, se localiza en los estados de Chihuahua, Sinaloa, Durango, Nayarit, Colima, Zacatecas, Jalisco, Michoacán, estado de México, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Morelos, Veracruz y Oaxaca en un rango altitudinal de 1600 a 3000 m, en laderas y pendientes pronunciadas cercanas a volcanes (Perry, 1991).

3.3.4 *Abies religiosa* var. *emarginata* (Kunth) Schldl. y Cham

Sinonimia *Abies guatemalensis* var. *jaliscana* (Farjon).

Nombre común: Oyamel, Oyamel negro, Pinabete, Abeto. La especie se localiza en un rango altitudinal desde 2400 hasta 3500 m, en zonas donde la vegetación está conformada por bosque mesófilo de montaña y bosque húmedo, con temperaturas que oscilan desde 3 hasta 10 °C. La especie se asocia principalmente con *Callitropsis lusitanica*, *Pinus ayacahuite* y *Pinus hartwegii* (Perry, 1991). Se localiza en los estados de Jalisco, Michoacán, Nayarit y a lo mejor en el estado de Sinaloa (Rushforth, 1989).

3.4 OBTENCIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES

Se obtuvieron 72 secciones transversales de cinco sitios de muestreo ubicados dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano. Las muestras se obtuvieron con la ayuda de un motosierrista, cortadas a 30 cm de altura del suelo (Figura 16).

Se elaboró un formato para la toma de datos de campo. Donde a cada muestra se le asignaron sus coordenadas geográficas, año de corta, número de muestra, nombre del ejido, nombre del lugar y observaciones generales del sitio (ver Anexo 1).

Se trabajaron 15 muestras por cada sitio, las cuales fueron analizadas y medidas en el laboratorio de Percepción Remota y SIG de la facultad de Biología con ayuda de programas de análisis espacial (CartaLinx 1.2® y Global Mapper 16®).



Figura 16. Proceso de obtención de las muestras

3.5 ANÁLISIS DE MUESTRAS

Las rodajas fueron puestas a secar durante tres días a temperatura ambiente y a la sombra (Figura 17). Después de concluir el proceso de secado, a las muestras se les llevó al Laboratorio de Preservación y Conservación de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, en donde se recortaron a un tamaño más compacto, para después ser trasladadas a la carpintería para lijarlas con ayuda de una lijadora de banda manual marca Porter Cable®. Durante el proceso de lijado se usaron distintos tipos de grano de lija (120, 220, 320 y 640) los cuales corresponden a un grano fino, y de (60 y 80) correspondiente a grano grueso. Fue importante tener un buen lijado para poder distinguir entre los límites de los anillos de crecimiento (Villanueva *et al.*, 2009), esto fue la clave para la identificación y fechado de los anillos. Después de haber concluido el proceso de lijado, a cada muestra se le aplicó sellador para madera, que sirvió para conservar y evitar la pudrición de la madera, y resaltar los límites entre cada uno de los anillos de crecimiento.



Figura 17. Secado de muestras a temperatura ambiente

3.5.1 SKELETON PLOTS

El método consiste en trazar líneas en papel milimétrico para resaltar anillos angostos y anchos, lo cual permite resaltar las variaciones evidentes en el patrón de crecimiento entre anillos. Se utilizó papel milimétrico, en donde se graficó el ancho de cada uno de los anillos, en el lado de los anillos estrechos se graficaron con una línea corta y los anchos con una línea larga, los anillos de tamaño uniforme no se graficaron, pero se respetó su lugar en el papel milimétrico (Figura 18).

Se construyó el esqueleto “maestro” o “compuesto” utilizando los esqueletos de todas las muestras del área de estudio (Figura 19).

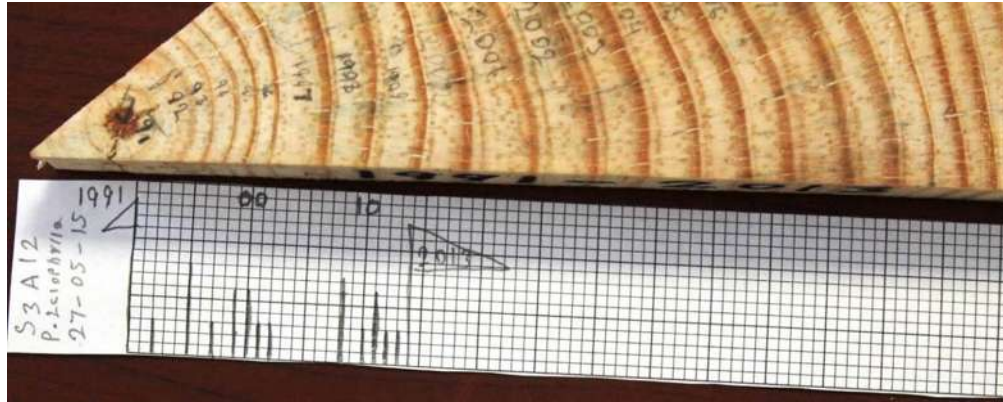


Figura 18. Elaboración de los gráficos de crecimiento “Skeleton plots”

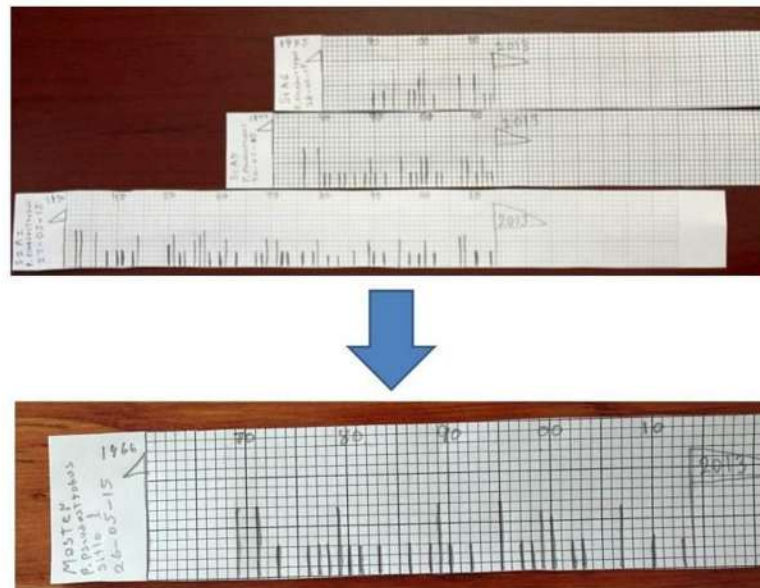


Figura 19. Construcción del gráfico de crecimiento “maestro” del área de estudio

3.5.2 FECHADO-CRUZADO

Se realizó el fechado-cruzado “crossdating” en inglés, con el fin de corroborar y asignar a las muestras los años exactos a su formación, y sobreponerlas para extender la serie cronológica el mayor tiempo posible, este procedimiento sirve para detectar años clave presentes en las muestras (Figura 20).



Figura 20. Técnica del fechado-cruzado en muestras

3.6 MEDICIÓN DE ANILLOS DE CRECIMIENTO

Una vez concluido el fechado y ya construidos los gráficos de crecimiento, se midieron los anillos anuales de crecimiento con apoyo de los software's de análisis espacial (Cartalinx 1.2® y Global Mapper 16®) y una cámara fotográfica semiprofesional (Canon EOS Rebel T3®), con resolución de 12.2 megapíxeles.

Las muestras fueron colocadas sobre un pintarrón, se nivelaron con un nivel de burbuja, se les colocó un acetato transparente el cual tiene un sistema de coordenadas planas (X, Y) con puntos de control para rectificar la imagen (Figura 21), y se fotografiaron las muestras.

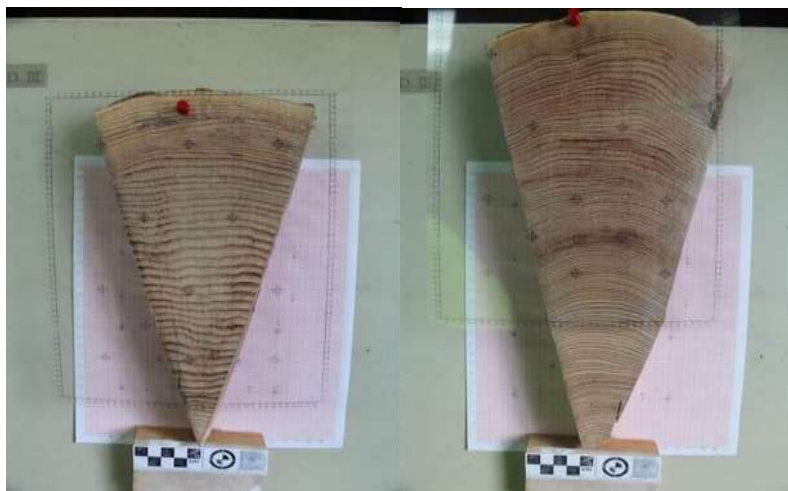


Figura 21. Asignación de coordenadas a las muestras

Se trabajó en el software Global Mapper 16®, donde se cargaron las imágenes en formato (JPG) al programa, en donde a cada muestra se le colocaron puntos de control definidos con anterioridad en un acetato, los puntos de control sirvieron para rectificar las imágenes y poder asignarles un sistema de coordenadas planas (X, Y) para llevar a cabo las mediciones y una vez que se tuvieran las imágenes rectificadas, se exportaron a formato raster (.rst). Las imágenes rectificadas en formato raster (.rst), fueron cargadas al software de análisis espacial CartaLinx 1.2®, en donde para abrirlas se seleccionó la opción archivo, image conversions y se cargó el raster (.rst), después se guardó como imagen (.bmp) y a esa nueva imagen con sistema de coordenadas definidas, se cargó y guardó con las iniciales del sitio al que pertenece y el número de árbol de dónde proviene como un proyecto de trabajo de CartaLinx 1.2®.

Con ayuda del programa CartaLinx 1.2®, a cada muestra se le trazó una línea principal de medición, en donde se realizaron las mediciones de ancho total de cada anillo de crecimiento de las 72 muestras de los cinco sitios de estudio evaluados. Las mediciones de los anillos de crecimiento se realizaron al ir rompiendo arco por arco la línea principal trazada desde la medula hasta la corteza interna (líber), donde la rotura de cada arco arrojó un valor de medición en milímetros de cada anillo (Figura 22). Al finalizar el proceso de medición, se creó una matriz con valores de medición, la cual fue exportada como archivo de texto delimitado por comas (.txt) con ayuda de la paquetería Oficce 2013. Se utilizó el programa Excel 2013 para convertir los valores de medición de milímetros a micras y se exportó como archivo (.dat). Esa matriz de datos fue analizada, verificada y corregida en los software's de la Librería Dendrocronológica (COFECHA® y ARSTAN®).

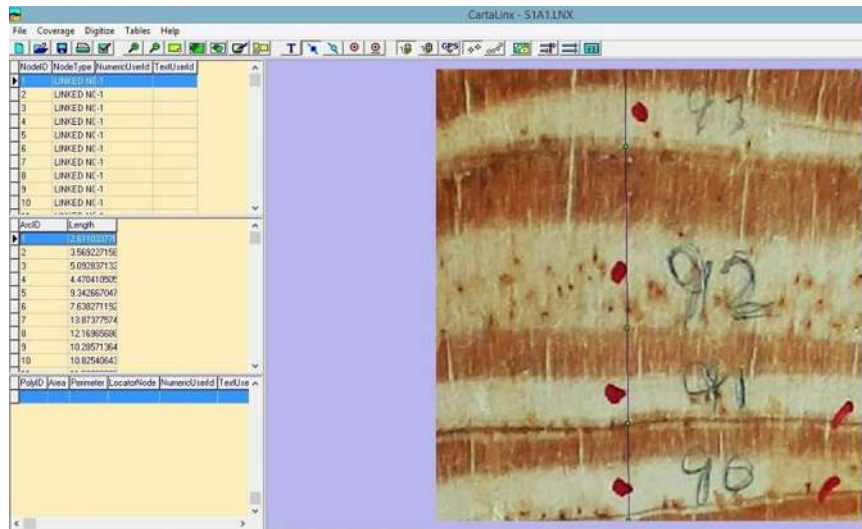


Figura 22. Proceso de medición de anillos de crecimiento

3.7 ANÁLISIS EN LOS PROGRAMAS DE LA DPL

A cada muestra se le colocó una etiqueta de identificación, ejemplo S2A5 y fueron ordenadas por el año de inicio y finalización de la medición de manera horizontal.

Se construyó una matriz de mediciones de ancho de anillo (.dat), en la cual están las mediciones de los cinco sitios de muestreo del área de estudio. Dicha matriz fue cargada, corrida, analizada y corregida en los programas dendrocronológicos COFECHA y ARSTAN.

3.7.1 COFECHA®

Es un programa desarrollado por Holmes (1983), herramienta para identificar las series de anillos que contienen errores de fechado o medición. Para proceder a los análisis COFECHA, a cada anillo se fechó a su año real de formación. El software analizó las mediciones de las 72 muestras de los cinco sitios de estudio, las ordenó, comparó estadísticamente el fechado de cada una de las muestras al correlacionarlas en segmentos de 50 años con traslapes de 25 años e identificó los errores de medición, además señaló las muestras con baja correlación (Constante *et al.*, 2009), quedando 59 muestras fechadas y sin problemas de correlación. El programa creó una serie maestra, que fue la media de todas las series analizadas, las comparó con las demás series de medición y determinó la existencia de intercorrelación.

Las intercorrelaciones entre series fueron una medida de influencia de la señal común de interés en todas las muestras y estas representan la confiabilidad de la cronología. Para que una cronología sea confiable y significativa, los valores deben tener una R mayor a 0.328 a un nivel de significancia de $p=0.01$ (Holmes, 1983), lo que indica que las intercorrelaciones entre series son estadísticamente significativas y confiables, y ya se puede proceder a continuar con los análisis del ARSTAN.

3.7.2 ARSTAN®

ARSTAN fue desarrollado por Cook (1985), el software trabaja con los datos corregidos y verificados por el programa COFECHA. ARSTAN es un programa estadístico que trabaja con los intervalos de tiempo para caracterizar el conjunto de datos de mediciones del ancho de anillo de los árboles.

En estudios dendrocronológicos, el principal objetivo es reconstruir la variabilidad climática con base en el crecimiento anual de los anillos, por tal motivo es importante: eliminar el ruido producido por factores biológicos y maximizar la señal climática, mediante un proceso de estandarización de todas las muestras analizadas.

El programa estandarizó las series de medición de 59 muestras por medio de la eliminación de la varianza generada por la diferencia entre la amplitud de anillos de árboles jóvenes y viejos. El proceso de estandarización eliminó las tendencias biológicas y transformó las series de ancho de anillo en índices de crecimiento con una media de uno y una varianza igual para todas las muestras (Fritts, 1976).

El software eliminó la autocorrelación entre series (Villanueva *et al.*, 2010) y transformó los valores de medición de micras a escala logarítmica, mediante un proceso llamado “detrending” o tendencia, el cual implicó la eliminación de tendencias biológicas en las series de crecimiento mediante la fijación de un modelo matemático. La función principal del software es generar cronologías o índices de ancho de anillo (IAA), los cuales tienen la señal de interés maximizada y el ruido minimizado (Fritts, 1976; Swetnam *et al.*, 1985).

3.8 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA

La información climática instrumental disponible de estaciones meteorológicas para el país, es reducida, lo cual limita el conocimiento del comportamiento histórico del clima para determinadas zonas del país. Con ayuda de la herramienta geostatistical wizard del software Arcmap 9.3®, se crearon 244 capas climáticas anuales a partir de las interpolaciones hechas para la precipitación y la temperatura de las 34 estaciones meteorológicas del área de estudio.

Se obtuvieron los valores puntuales anuales de los cinco sitios de estudio del periodo 1954 a 2014, los valores de IDW (Distancia Inversa Ponderada) fueron capturados en una base de datos de Excel 2013, en donde se realizó un análisis de correlación de Pearson entre el valor IDW y el IAA (índice de ancho de anillo) de la cronología residual. Se trabajó en el software IDRISI SELVA 17® donde se transformaron las capas climáticas creadas en Arcmap 9.3® a archivo raster (.rst) y de raster se convirtieron a archivo ASCII (.asc). Los archivos ASCII de precipitación y temperaturas se integraron en archivos de imágenes raster en grupo (.rgf), se crearon cuatro archivos de imágenes raster en grupo, uno para cada variable climática. Los archivos de imágenes raster en grupo (.rgf) se transformaron a archivos de series de tiempo (tsf), a los cuales se le realizó un análisis no paramétrico de *Mann-Kendall*, el cual sirvió para conocer el comportamiento histórico de tendencias climáticas de la precipitación y las temperaturas del periodo 1954 a 2014 dentro del área de estudio.

Los valores del estadístico Z de la prueba no paramétrica de *Mann-Kendall* fueron reclasificados. Con la reclasificación de valores de Z, se crearon categorías las cuales fueron: no tendencia cuyos valores de Z oscilaron de 1.49 a -1.49, tendencia de aumento valores de Z de 1.49 a 1.96, aumento valores de Z mayores 1.96, tendencia de disminución valores de Z de -1.49 a -1.96 y disminución valores de Z mayores a -1.96. Se descargaron imágenes satelitales Landsat 8 del año 2014. Mediante el programa IDRISI en donde se creó un mosaico de las tres escenas descargadas, las cuales fueron recortadas al tamaño del área de estudio mediante el uso de una máscara. Con el apoyo de las bandas 3, 4 y 5 (azul, verde y rojo) de las tres escenas

para crear un compuesto en falso color rojo, el cual sirvió para evaluar la cobertura forestal dentro del área de estudio. Con ayuda del programa Arcmap 10.3® en donde se editaron los archivos reclasificados de precipitación y temperaturas a mapas temáticos de precipitación y temperaturas. Se realizaron análisis de correlación de Pearson entre los valores mensuales instrumentales de precipitación y temperatura y los índices de ancho de anillo de la cronología residual de los cinco sitios de muestreo y un análisis para toda el área de estudio.

Después de encontrar la correlación entre las variables climáticas y los índices de ancho de anillo, se reconstruyó la precipitación histórica de invierno-primavera y la temperatura media histórica de invierno a primavera del área de estudio.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron 72 muestras y se fecharon 59 de cinco sitios de muestreo dentro del área de estudio (Figura 23). Se utilizaron curvas polinómicas de sexto grado para explicar las tendencias del crecimiento de los árboles de los sitios muestreados y para toda el área de estudio (Figuras 24 a 28).

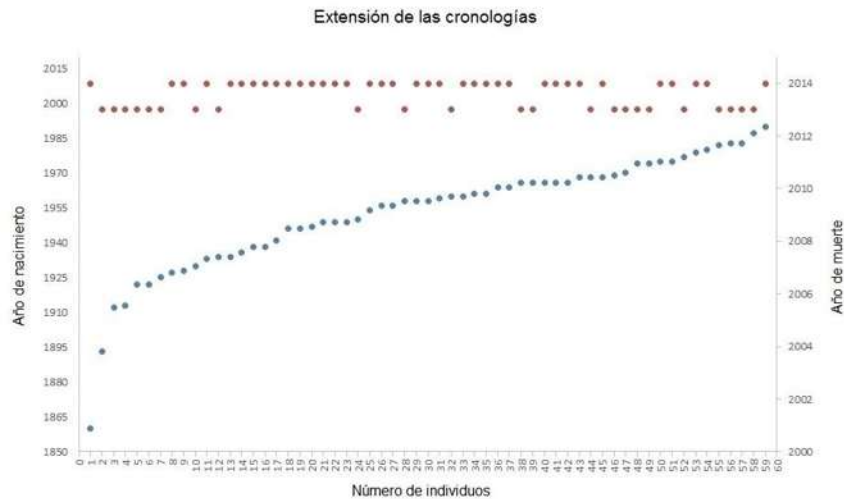


Figura 23. Número de muestras fechadas por su año de nacimiento y de muerte

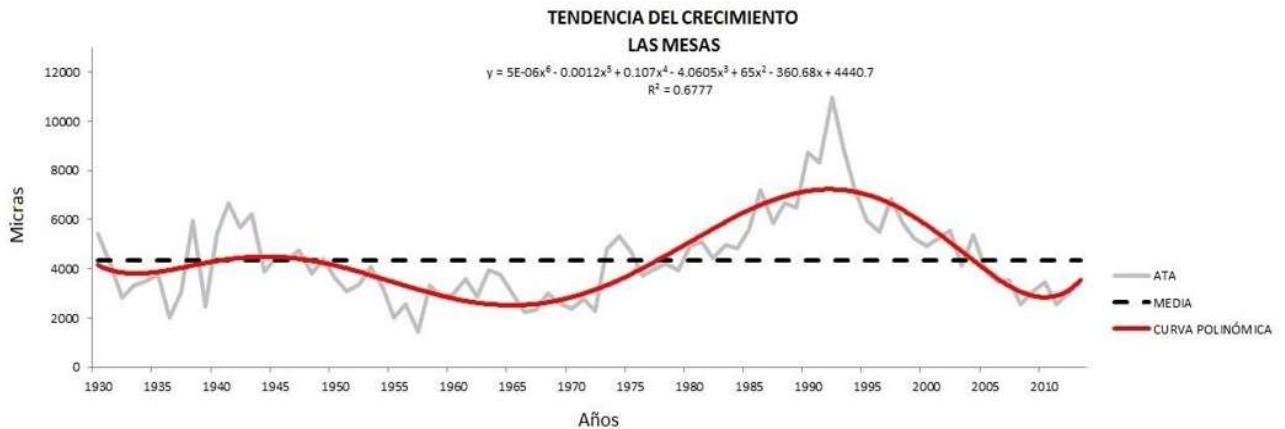


Figura 24. Curva polinómica Sitios 1 y 2 “Las Mesas”

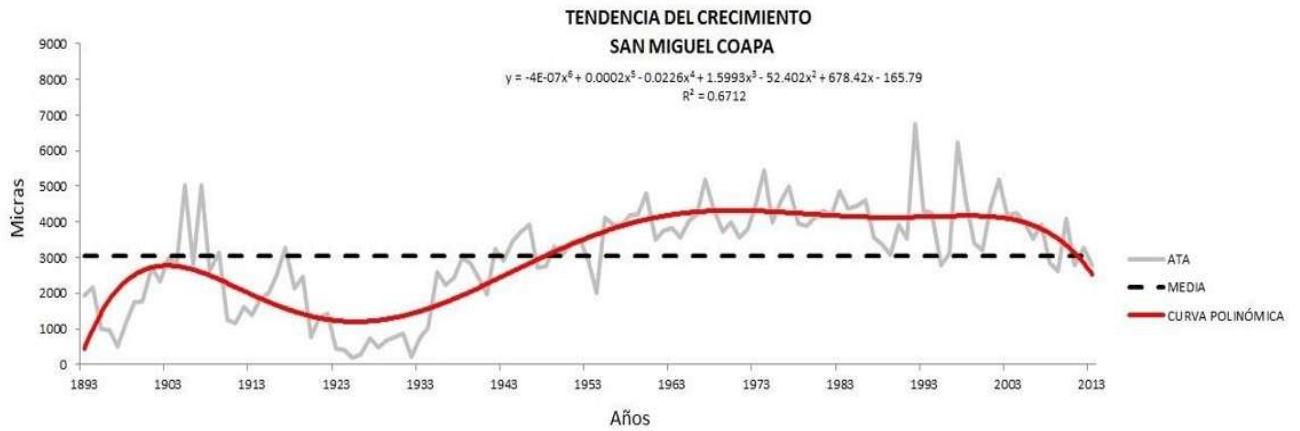


Figura 25. Curva polinómica Sitio 3 “San Miguel Coapa”

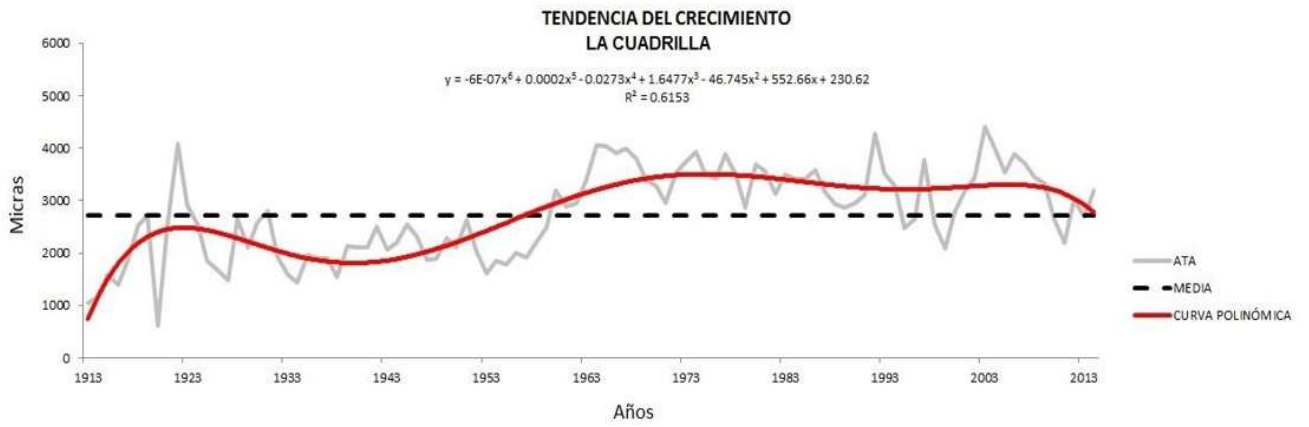


Figura 26. Curva polinómica Sitio 4 “La Cuadrilla”

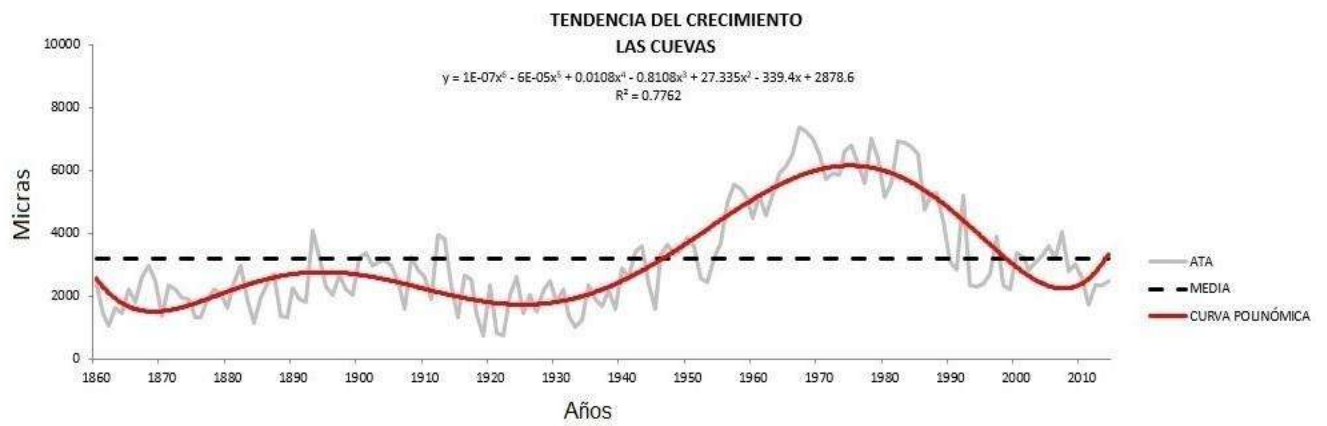


Figura 27. Curva polinómica Sitio 5 “Las Cuevas”

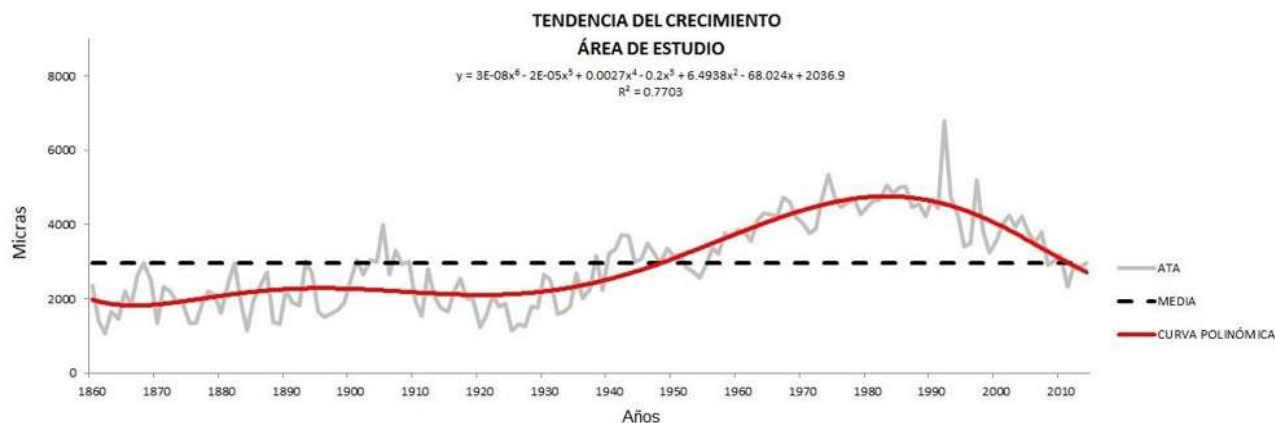


Figura 28. Curva polinómica del área de estudio

4.1 COFECHA®

El software considera como buen fechado cuando el valor mínimo de intercorrelación entre series es mayor a $R = 0.328$; $p < 0.01$, (Holmes, 1983). Los resultados COFECHA indicaron una intercorrelación entre series significativa para cada sitio evaluado.

Los resultados de los sitios fueron Sitios 1 y 2 “Las Mesas” $R = 0.351$; $p < 0.01$ (Cuadro 4), Sitio 3 “San Miguel Coapa” $R = 0.380$; $p < 0.01$ (Cuadro 5), Sitio 4 “La Cuadrilla” $R = 0.411$; $p < 0.01$ (Cuadro 6), y el Sitio 5 “Las Cuevas” $R = 0.385$; $p < 0.01$ (Cuadro 7).

Se obtuvo un valor de intercorrelación entre series de $R = 0.342$; $p < 0.01$ para toda el área de estudio (Cuadro 8).

Los valores de sensibilidad media climática fueron “Las Mesas” 0.316; $p < 0.01$, “San Miguel Coapa” 0.333; $p < 0.01$, “La Cuadrilla” 0.294; $p < 0.01$, “Las Cuevas” 0.294; $p < 0.01$ y de toda el área de estudio 0.308; $p < 0.01$. Comparado los resultados obtenidos con los parámetros de sensibilidad climática definidos por Constante *et al.* (2009), se tienen valores de baja o nula respuesta climática cuando el valor es de 0.150 (especies poco sensibles) y una sensibilidad alta a los cambios del clima cuando el valor es de 0.650 (especies altamente sensibles), otras especies de coníferas como *Pinus pinceana* han registrado valores de sensibilidad media de 0.530 (Santillán *et al.*, 2010), *Pinus cembroides* ha registrado valores de sensibilidad media de 0.360 (Constante *et al.*, 2009), *Taxodium mucronatum* ha registrado valores de sensibilidad media de 0.150 a 0.300 (Villanueva *et al.*, 2007) y El Abeto de Douglass (*Pseudotsuga menziesii*) que

es la especie más sensible a los cambios que ocurren en el clima reportado para México, con valores de sensibilidad media de 0.650 (Villanueva *et al.*, 2008). Los valores de sensibilidad climática corresponden a la capacidad que tienen las especies arbóreas para registrar los cambios en cuanto a cantidad de precipitación estacional acumulada o los incrementos o descensos de temperatura. Comparando los valores de sensibilidad obtenidos de este estudio, se afirma que existe una sensibilidad climática media para las cuatro especies evaluadas, siendo la especie más sensible a la respuesta del clima de este estudio *Pinus leiophylla* del sitio tres “San Miguel Coapa”, ubicado en el municipio de Morelia, Michoacán.

Cuadro 4. Resultados COFECHA de los Sitios 1 y 2 “Las Mesas”

Número de muestras fechadas	17
Serie Maestra 1930 a 2014	85 años
Total de anillos fechados	730
Intercorrelación entre series	0.351
Sensibilidad media promedio	0.316
Longitud media de series	44.1 años

Cuadro 5. Resultados COFECHA del Sitio 3 “San Miguel Coapa”

Número de muestras fechadas	15
Serie Maestra 1893 a 2014	122 años
Total de anillos fechados	915
Intercorrelación entre series	0.380
Sensibilidad media promedio	0.333
Longitud media de series	62.3 años

Cuadro 6. Resultados COFECHA del Sitio 4 “La Cuadrilla”

Número de muestras fechadas	15
Serie Maestra 1913 a 2014	102 años
Total de anillos fechados	1116
Intercorrelación entre series	0.411
Sensibilidad media promedio	0.294
Longitud media de series	74.9 años

Cuadro 7. Resultados COFECHA del Sitio 5 “Las Cuevas”

Número de muestras fechadas	12
Serie Maestra 1860 a 2014	155 años
Total de anillos fechados	798
Intercorrelación entre series	0.385
Sensibilidad media promedio	0.294
Longitud media de series	72.7 años

Cuadro 8. Resultados COFECHA para el Eje Neovolcánico Transmexicano

Número de muestras fechadas	59
Serie Maestra 1860 a 2014	155 años
Total de anillos fechados	3647
Intercorrelación entre series	0.342
Sensibilidad media promedio	0.308
Longitud media de series	62.4 años

4.2 ARSTAN®

Los resultados de desviación estándar fueron: “Las Mesas” (0.444), “San Miguel Coapa” (0.437), “La Cuadrilla” (0.178), “Las Cuevas” (0.460) y para toda el área de estudio (0.430), todos los sitios exceptuando el sitio “La Cuadrilla” presentaron valores de desviación estándar dentro del intervalo de valores ordinarios de (0.300 a 0.800) definido por Constante *et al.* (2009). Los resultados de autocorrelación fueron: “Las Mesas” (0.650), “San Miguel Coapa” (0.580), “La Cuadrilla” (0.490), “Las Cuevas” (0.690) y para toda el área de estudio (0.620). Los valores bajos se encuentran en un intervalo de 0.300 a 0.500, estos valores se presentan en especies con una alta sensibilidad climática; los valores comunes oscilan entre 0.600 y 0.800, y los más altos mayores de 0.900 (Constante *et al.*, 2009). Los resultados indican una autocorrelación dentro del intervalo normal para los sitios “Las Mesas”, “San Miguel Coapa” y “Las Cuevas” y valores de alta sensibilidad para el sitio “La Cuadrilla” de acuerdo con Constante *et al.* (2009) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Valores de desviación estándar y autocorrelación de los sitios de estudio

Sitio	Desviación estándar	Autocorrelación 1 ^{er} orden
Las Mesas	0.444	0.650
San Miguel Coapa	0.437	0.580
La Cuadrilla	0.178	0.490
Las Cuevas	0.460	0.690
Toda el área de estudio	0.430	0.620

El programa ARSTAN generó tres cronologías (estándar, residual y arstan) para cada sitio de estudio y una para toda el Eje Neovolcánico Transmexicano. Las cronologías contienen la señal de interés (sensibilidad climática) maximizada y el ruido o disturbio minimizado mediante una transformación a escala logarítmica e igualdad de varianzas y medias de las muestras analizadas.

En la Figura 29 se observan las tres cronologías generadas por el programa ARSTAN, las cuales contienen la señal climática resaltada, en la Figura se hace alusión al análisis de los sitios integrados en una sola corrida ARSTAN.

Se hace la observación de que se generaron tres cronologías para cada sitio de estudio, pero para efectos de reconstrucción climática de regiones geográficas se integraron todos los sitios en un solo análisis ARSTAN.

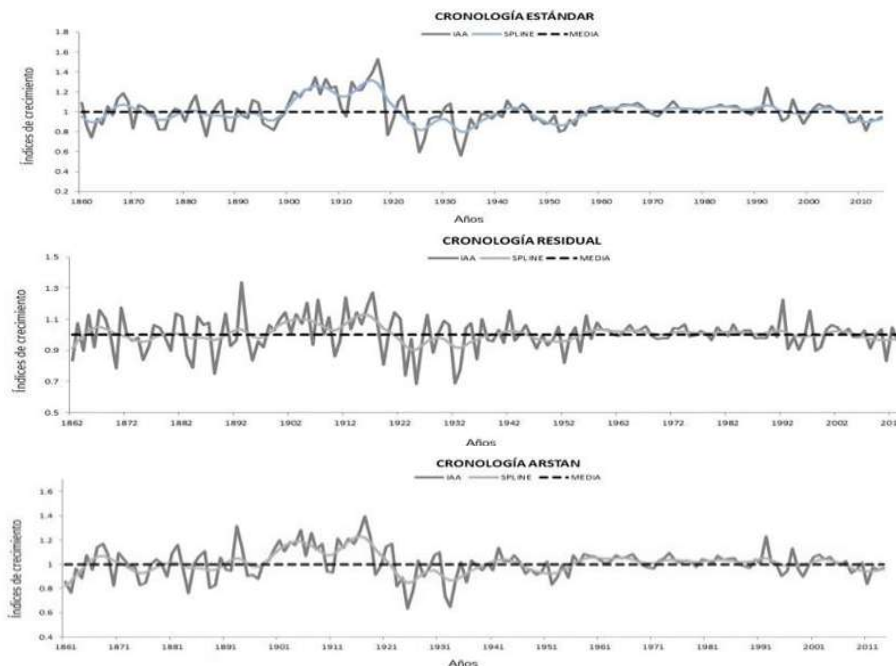


Figura 29. Cronologías para el Eje Neovolcánico Transmexicano

Dado que el tamaño de muestra del periodo 1862 a 2014 fue de una muestra alcanzó esa fecha, se reajustó la cronología al periodo de 1934 a 2014, en donde el tamaño de muestra fue más confiable y robusto.

4.3 ANÁLISIS CLIMÁTICO DEL EJE NEOVOLCÁNICO TRANSMEXICANO

De acuerdo con la cantidad de precipitación histórica recibida durante el periodo 1954 a 2014, se clasificaron a criterio del autor con ayuda del programa IDRISI las zonas de la precipitación del área de estudio en: seco 550 a 650 mm anuales, semiseco 650 a 800 mm anuales, normal 800 a 1000 mm anuales, alto 1000 a 1100 mm anuales y muy alto 1100 a 1250 mm anuales.

En la Figura 30 se presenta la clasificación de las zonas de precipitación de acuerdo con la cantidad de precipitación histórica recibida de 1954 a 2014, la ubicación de las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo dendrocronológico dentro del área de estudio.

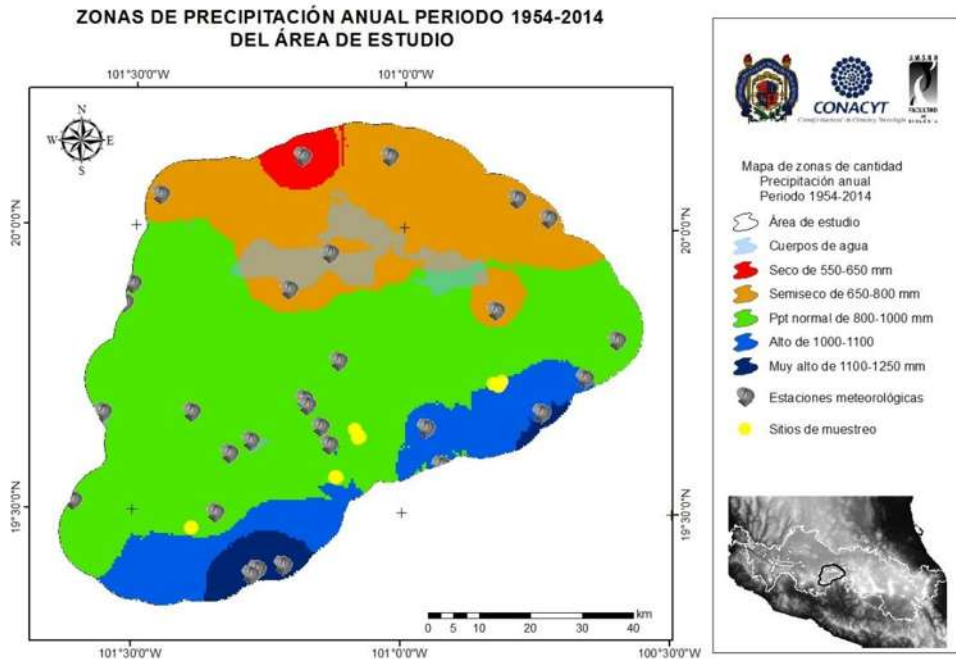


Figura 30. Clasificación de las zonas de precipitación del área de estudio

Los resultados indicaron que la mayor parte del área de estudio presenta un comportamiento hidrológico normal de precipitación anual con valores que oscilan entre 800 y 1000 mm. Una pequeña parte hacia el norte tiene un comportamiento hidrológico seco con valores que oscilan de 550 a 650 mm. La parte norte y la zona del lago de Cuitzeo muestran un comportamiento hidrológico semiseco con valores de 650 a 800 mm. La parte sur y oriente del área de estudio presenta un comportamiento de precipitación alto con valores de 1000 a 1100 mm, dentro de ésta área se presentan pequeños manchones donde la precipitación es mayor a los 1100 mm anuales.

Los resultados del análisis de *Mann-Kendall* para precipitación de 1954 a 2014 indicaron tendencias de aumento, tendencias de disminución, aumento notorio, disminución notoria y áreas sin tendencia para el área de estudio.

En la Figura 31 se presentan las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo dendrocronológico, se observa como gran parte del área de estudio, no presenta tendencia en la precipitación, siendo esta regular. Las zonas donde se observaron tendencias de aumento y aumento notorio de la precipitación se encuentran hacia el centro, oriente cercano a los límites del área de estudio, cerca del lago de Cuitzeo y al

el noroeste del área de estudio. Las tendencias de disminución y disminución notoria en la precipitación se presentan al el sureste.

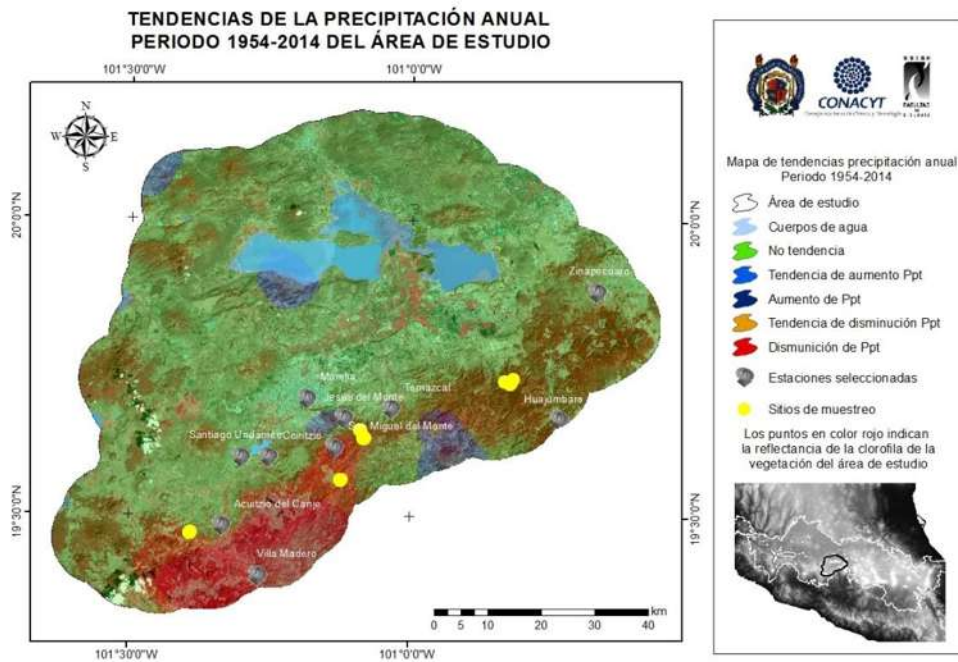


Figura 31. Análisis de *Mann-Kendall* de precipitación del área de estudio

Los resultados *Mann-Kendall* para temperatura máxima de 1954 a 2014 indicaron tendencias de aumento, tendencias de disminución, aumento notorio, disminución notoria y áreas sin tendencia para el área de estudio.

En la Figura 32 se presentan las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo dendrocronológico, en donde se observa que gran parte del área de estudio, presenta tendencias de aumento y aumento notorio de la temperatura máxima.

La zona norte, una parte hacia el oriente, una parte en el centro, pequeñas zonas en el sur y una parte en el occidente, no presentan tendencia alguna. Hacia la zona norte, una parte hacia el occidente y una pequeña área en el centro registran tendencias de disminución y disminución notoria en la temperatura máxima del área de estudio.

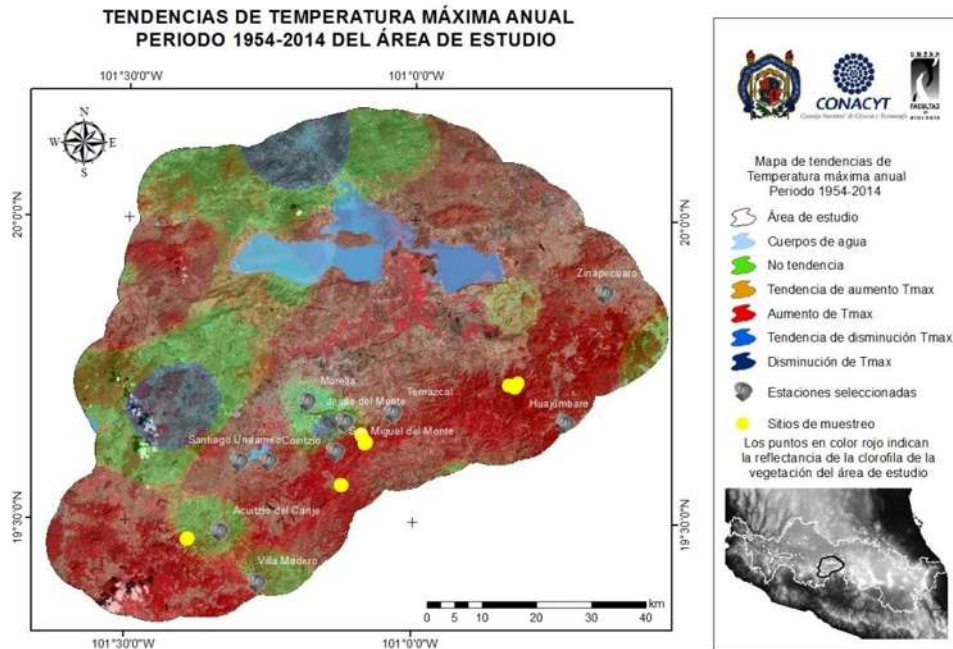


Figura 32. Análisis de *Mann-Kendall* de temperatura máxima del área de estudio

Los resultados del análisis de *Mann-Kendall* para temperatura media de 1954 a 2014 indicaron tendencias de aumento, tendencias de disminución, aumento notorio, disminución notoria y áreas sin tendencia del área de estudio.

En la Figura 33 se muestran las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo dendrocronológico, en donde se observa como gran parte del área de estudio presenta tendencias de aumento y aumento notorio en la temperatura media anual.

En una pequeña área ubicada al norte, otra en el oriente y una en el centro-occidente no presentan tendencia en la temperatura media. En pequeñas áreas al norte, una en el occidente, una al sur, al centro y una parte de la zona de montaña en el oriente, registran tendencias de disminución y disminución notoria en la temperatura media del área de estudio.

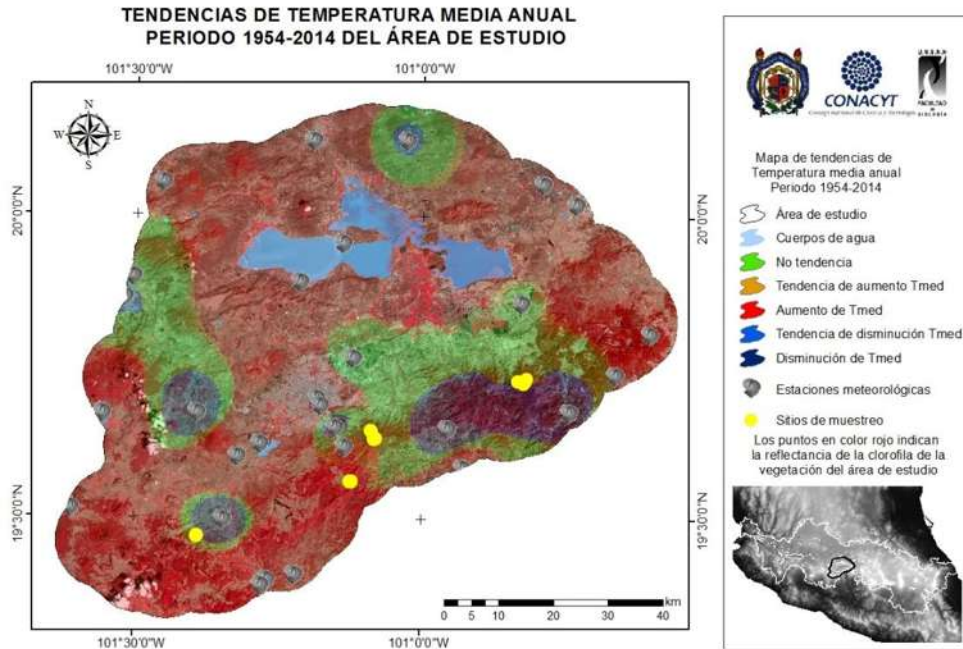


Figura 33. Análisis de *Mann-Kendall* de temperatura media del área de estudio

Los resultados del análisis de *Mann-Kendall* para temperatura mínima de 1954 a 2014 indicaron tendencias de aumento, tendencias de disminución, aumento notorio, disminución notoria y zonas sin tendencia del área de estudio.

En la Figura 34 se muestran las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo dendrocronológico, en donde se aprecia como gran parte del área de estudio tiende a la disminución y disminución notoria de la temperatura mínima. Las zonas donde no se registra tendencia en la temperatura mínima se encuentran en pequeñas áreas hacia la parte norte, occidente, oriente, centro y sur. Al noreste, occidente, centro y una pequeñísima área al sur registraron tendencias de aumento y aumento notorio en la temperatura mínima.

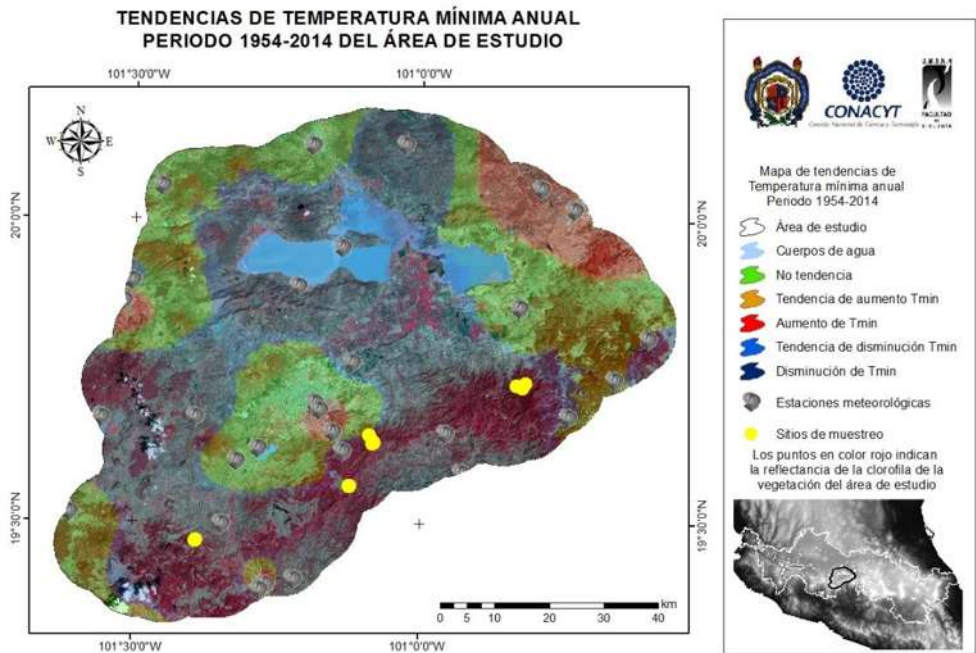


Figura 34. Análisis de *Mann-Kendall* de temperatura mínima del área de estudio

En el Cuadro 10 se indican los resultados de las pruebas de *Mann-Kendall* de las 10 estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de muestreo y el análisis de series de tiempo de toda el área de estudio. Un asterisco indica que ambos análisis de *Mann-Kendall* concuerdan con la predicción climática, dos asteriscos indican que existe discrepancia en predicción climática entre ambos análisis.

Para la precipitación la estación El Temazcal difiere en los resultados de tendencias. Las otras nueve estaciones meteorológicas concuerdan en los resultados de tendencias del análisis de series de tiempo. Para la temperatura máxima cinco estaciones meteorológicas concuerdan con los resultados del análisis de tendencias de series de tiempo, las estaciones que difieren son Acuitzio del Canje, El Temazcal, Huajúmbaro, San Miguel del Monte y Villa Madero. Para la temperatura media ocho estaciones meteorológicas concuerdan con los resultados de tendencias del análisis de series de tiempo, siendo las dos estaciones que difieren en resultados de tendencias Huajúmbaro y El Temazcal.

Para la temperatura mínima siete estaciones meteorológicas concuerdan con los resultados de tendencias del análisis de series de tiempo, las estaciones Cointzio, El Temazcal y Huajumbaro difieren en los resultados de tendencias.

Cuadro 10. Comparación de resultados de la prueba de *Mann-Kendall* de las 10 estaciones meteorológicas y el análisis de series de tiempo

Estación	Temperatura máxima °C	Temperatura media °C	Temperatura mínima °C	Precipitación mm
Acuitzio del Canje	**Tendencia aumento	*Disminución	*Disminución	*No tendencia
Cointzio	*Aumento	*Aumento	**Disminución	*No tendencia
El Temazcal	**Tendencia disminución	**Disminución	**Disminución	**Tendencia aumento
Huajúmbaro	**No tendencia	**Aumento	**No tendencia	*No tendencia
Jesús del Monte	*No tendencia	*No tendencia	*No tendencia	*Aumento
Morelia	*Aumento	*Aumento	*Aumento	*No tendencia
San Miguel del Monte	**No tendencia	*Aumento	*Aumento	*Disminución
Santiago Undameo	*Aumento	*Aumento	*No tendencia	*No tendencia
Villa Madero	**Aumento	*Aumento	*Aumento	*Disminución
Zinapécuaro	*Aumento	*Aumento	*No tendencia	*No tendencia

*Existe concordancia entre los valores del análisis de *Mann-Kendall* de las 10 estaciones meteorológicas y los valores del análisis de *Mann-Kendall* de series de tiempo de las 34 estaciones meteorológicas del área de estudio.

**No existe concordancia entre los valores del análisis de *Mann-Kendall* de las 10 estaciones meteorológicas y los valores del análisis de *Mann-Kendall* de series de tiempo de las 34 estaciones meteorológicas del área de estudio.

4.4 FUNCIÓN DE RESPUESTA CLIMÁTICA

Los resultados del análisis de correlación entre las variables precipitación y temperaturas y el índice de ancho de anillo (IAA) fueron:

Sitios 1 y 2 Ejido “Las Mesas”

Para la temperatura máxima y mínima presentan valores de correlación bajos y negativos, no se presentó ningún periodo de función de respuesta climática para esta variable de estos sitios. La temperatura media presenta valores de correlación negativos para todos los meses del año, excepto octubre, se detectó un periodo de respuesta climática de $R = -0.692$ de temperatura media promedio de enero a junio del periodo 1992 a 2011. La precipitación presenta valores de correlación positivos de $R = 0.294$ de enero-mayo del periodo 1954 a 2014 y negativos para los demás meses, se detectó un periodo de respuesta climática de $R = 0.688$ de enero a mayo del periodo 1993 a 2013.

En la Figura 35 se aprecia el análisis de correlación entre los valores climáticos mensuales promedio de las 10 estaciones meteorológicas y el IAA de los Sitios 1 y 2 “Las Mesas”.

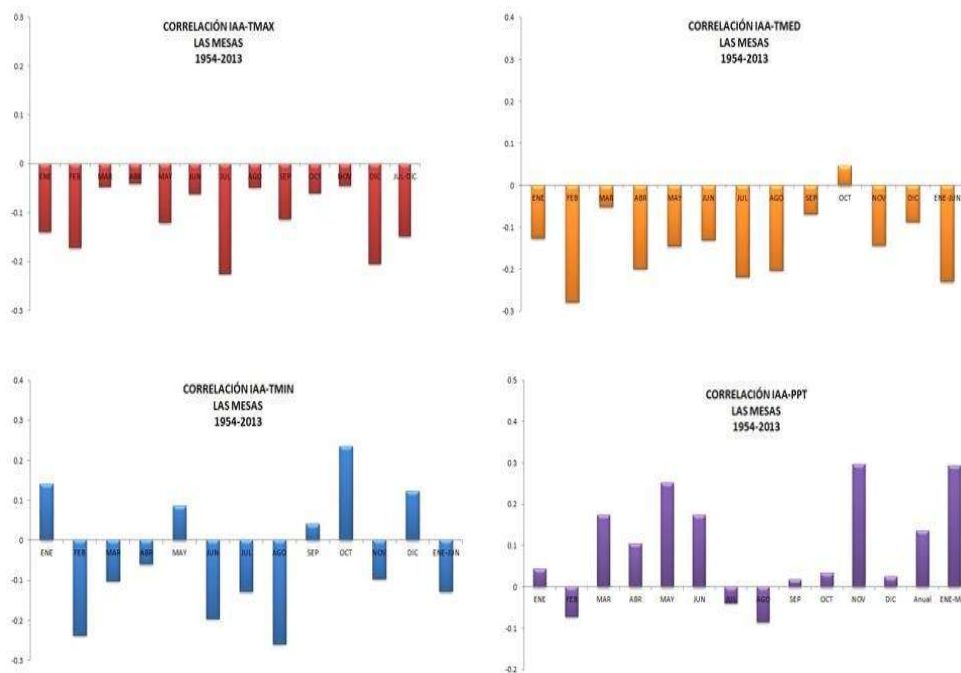


Figura 35. Análisis de correlación de los Sitios 1 y 2 “Las Mesas”

Sitio 3 Ejido “San Miguel Coapa”

Se presentaron valores de correlación bajos y negativos para temperatura máxima y temperatura mínima, no se detectó ningún periodo de función de respuesta.

La temperatura media presenta valores de correlación negativos de $R = -0.437$ del periodo 1954 a 2014, excepto diciembre, se detectó un periodo de respuesta climática $R = -0.661$ de enero a mayo del periodo 1991 a 2012. La precipitación muestra valores de correlación de $R = 0.535$ para los meses enero a mayo del periodo 1954 a 2014, el periodo de función de respuesta climática de $R = 0.637$ para enero a mayo de 1983 a 2014.

En la Figura 36 se aprecia el análisis de correlación entre los valores climáticos mensuales promedio de las 10 estaciones meteorológicas y la cronología residual del Sitio 3 “San Miguel Coapa”.

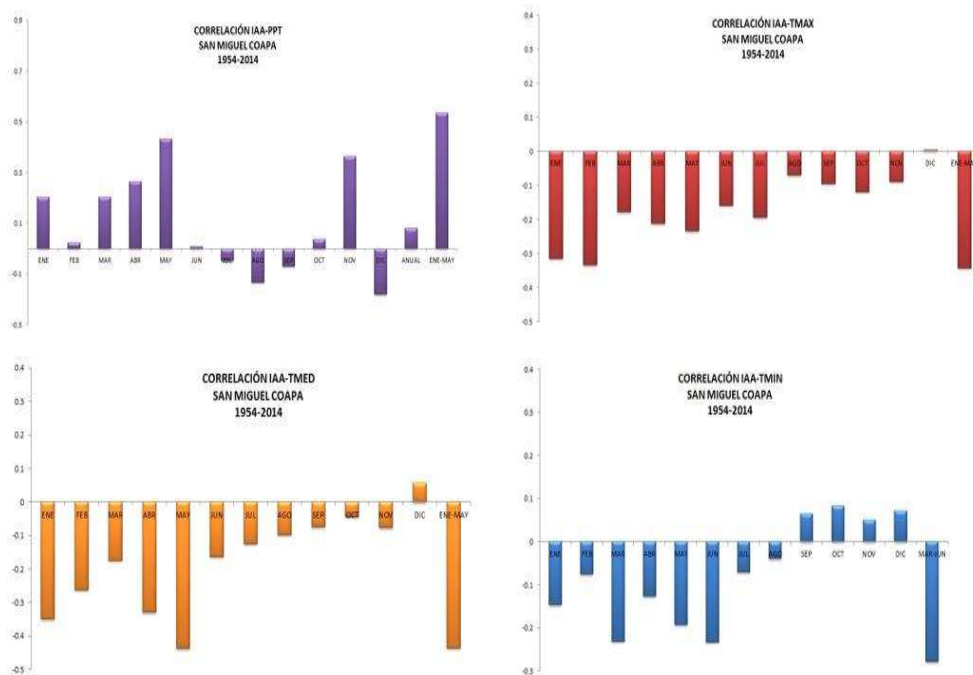


Figura 36. Análisis de correlación del Sitio 3 “San Miguel Coapa”

Sitio 4 Ejido “La Cuadrilla”

Se presentaron valores de correlación bajos y negativos para la temperatura máxima, excepto el mes de diciembre y no se detectaron periodos de respuesta climática.

La temperatura mínima presenta valores de correlación positivos para los seis primeros meses del año y negativos para los últimos seis meses, no se detectó ningún periodo de respuesta climática para la variable. La temperatura media presenta valores de correlación negativos, excepto para los meses de septiembre, noviembre y diciembre, se obtuvo un valor de correlación negativo de $R = -0.359$ para los meses enero a junio del periodo 1954 a 2014 y una respuesta climática de $R = -0.604$ para enero a junio del periodo 1992 a 2011. La precipitación muestra un valor de correlación de $R = 0.365$ para los meses enero a mayo del periodo 1954 a 2014 y un periodo de función de respuesta de $R = 0.545$ de enero a mayo del periodo 1973 a 1994.

En la Figura 37 se aprecia el análisis de correlación entre los valores climáticos mensuales promedio de las 10 estaciones meteorológicas y la cronología residual del Sitio 4 “La Cuadrilla”.

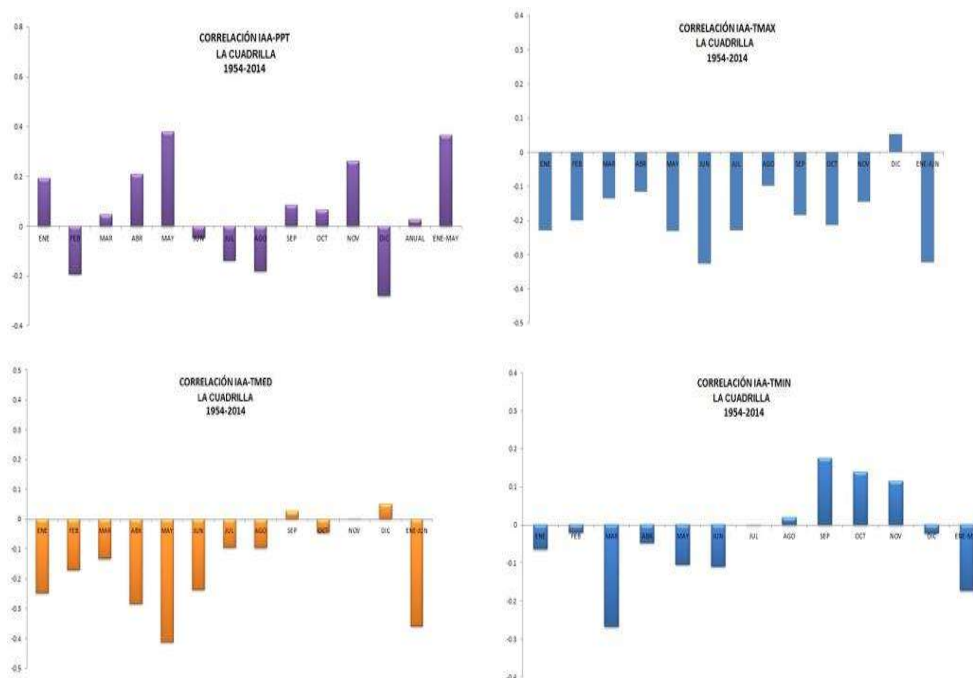


Figura 37. Análisis de correlación del Sitio 4 “La Cuadrilla”

Sitio 5 Ejido “Las Cuevas”

La temperatura máxima presenta valores de correlación negativos para los meses de enero a junio del periodo 1954 a 2014 con un valor de correlación de $R = -0.447$ y un periodo de función de respuesta $R = -0.627$ de enero a junio de 1983 a 2005.

La temperatura mínima presenta valores de correlación bajos y negativos para abril a junio $R = -0.274$ del periodo 1954 a 2014 y no presenta periodo de función de respuesta climática. La temperatura media presenta valores de correlación negativos de $R = -0.473$ para todos los meses del año de 1954 a 2014, excepto el mes de diciembre, se presentó un periodo de función de respuesta climática de $R = -0.603$ de enero a junio de 1990 a 2014. La precipitación muestra un valor de correlación de $R = 0.347$ de enero a mayo del periodo 1954 a 2014, se presentó un periodo de respuesta climática de $R = 0.624$ de enero a mayo del periodo 1981 a 2004.

En la figura 38 se aprecia el análisis de correlación entre los valores climáticos mensuales promedio de las 10 estaciones meteorológicas y la cronología residual del Sitio 5 “Las Cuevas”.

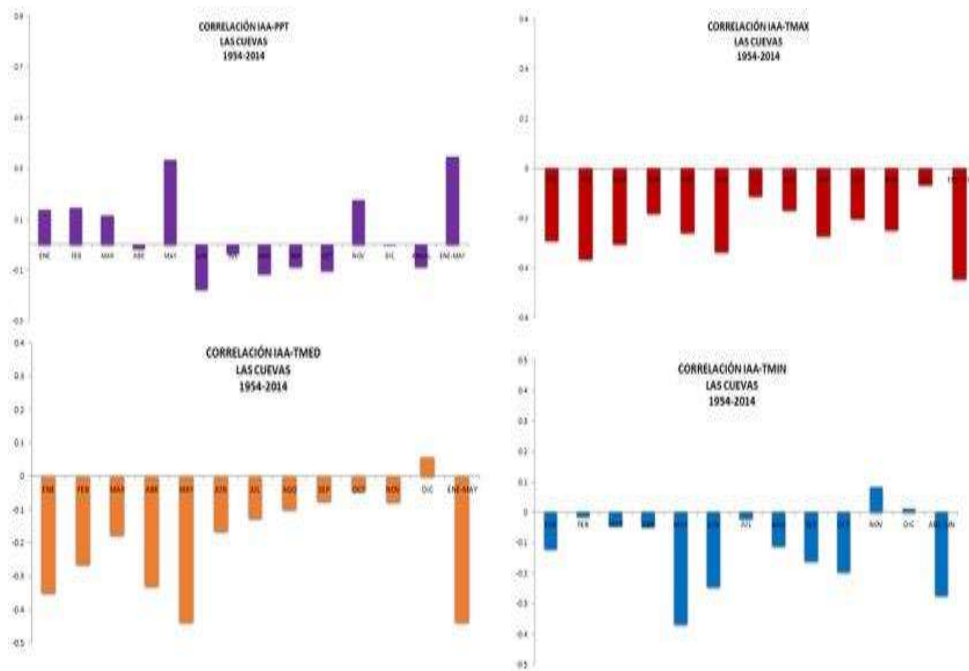


Figura 38. Análisis de correlación del Sitio 5 “Las Cuevas”

Los resultados del análisis de correlación de Pearson para el Eje Neovolcánico Transmexicano fueron para la temperatura máxima valores de correlación negativos para todos los meses del año, el valor de correlación de enero a mayo de 1954 a 2014 fue de $R = -0.389$ y no se presentó periodo alguno de función de respuesta climática para esta variable. La temperatura mínima se tienen valores de correlación negativos, excepto septiembre, octubre, noviembre y diciembre, el valor de correlación de marzo a junio de 1954 a 2014 fue de $R = -0.201$ y no se detectó periodo de función de respuesta climática. La temperatura media se presentaron valores de correlación negativos, excepto diciembre, la correlación de enero a mayo del periodo 1954 a 2014 fue de $R = -0.471$, se presentó un periodo de función de respuesta de enero a mayo $R = -0.641$ del periodo 1989 a 2014. La precipitación presenta valores de correlación de $R = 0.532$ para enero a mayo del periodo 1954 a 2014 y un periodo de función de respuesta de enero a mayo de $R = 0.681$ de 1983 a 2014.

En la figura 39 se aprecia el análisis de correlación entre los valores climáticos mensuales promedio de las 10 estaciones meteorológicas y la cronología residual del área de estudio.

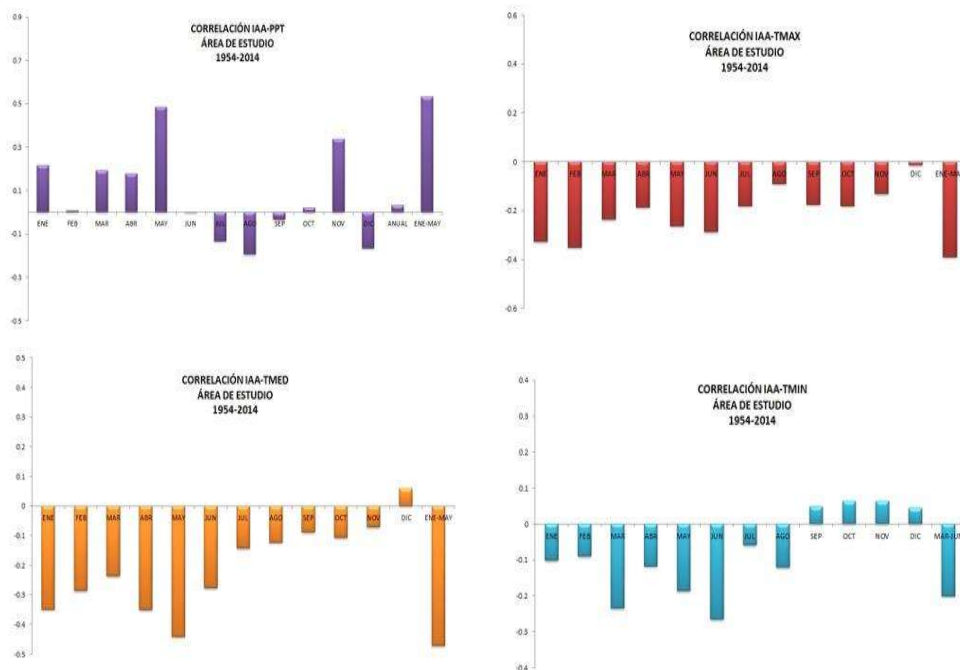


Figura 39. Análisis de correlación de toda el área de estudio

El análisis de función de respuesta de este estudio señaló que el crecimiento de los árboles responde de manera significativa a la precipitación estacional de invierno-primavera (enero a mayo) y a la temperatura media promedio de enero a mayo. Esto se atribuye a que el crecimiento de las coníferas se encuentra influenciado por la precipitación estacional del periodo invierno a primavera, al ser las lluvias de este periodo de baja intensidad, no logran sobrepasar la capacidad de infiltración, por lo que gran parte de ella se almacena en el suelo y esta puede ser aprovechada durante el inicio de la estación de crecimiento (Villanueva *et al.*, 2005).

Lo anterior queda corroborado a través de los estudios dendrocronológicos generados para diversas coníferas en el norte de México, en donde se demuestra que especies como *Pinus cembroides* y *Pseudotsuga menziesii* responden de manera significativa a la precipitación invierno a primavera (Stahle *et al.*, 2000; Pohl *et al.*, 2003; Cerano, 2004; González *et al.*, 2005; Constante, 2007). La respuesta del crecimiento de las coníferas a la precipitación invernal en México y suroeste de los Estados Unidos de América, ha sido corroborada por diversos autores en sus distintos estudios históricos del clima (Stahle *et al.*, 1999; Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Constante *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2009 y 2011). La función de respuesta para la zona centro de México está influenciada por la precipitación invierno a primavera y los trabajos de Cortés *et al.* (2010), Cerano *et al.* (2013) y Cerano *et al.* (2013) lo respaldan.

4.5 RECONSTRUCCIÓN DE TEMPERATURA MEDIA Y PRECIPITACIÓN

Se usaron ecuaciones obtenidas mediante análisis *de regresión lineal simple*, se construyeron modelos matemáticos lineales ($p < 0.01$), los cuales reconstruyeron la temperatura media promedio de enero a mayo y la precipitación de enero a mayo de 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano.

4.5.1 RECONSTRUCCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA DE ENERO A MAYO

Se calibraron y verificaron los periodos de 2002 a 2014 y de 1989 a 2001, los cuales sirvieron para reconstruir la temperatura media promedio histórica de enero a mayo dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano (Figura 40).

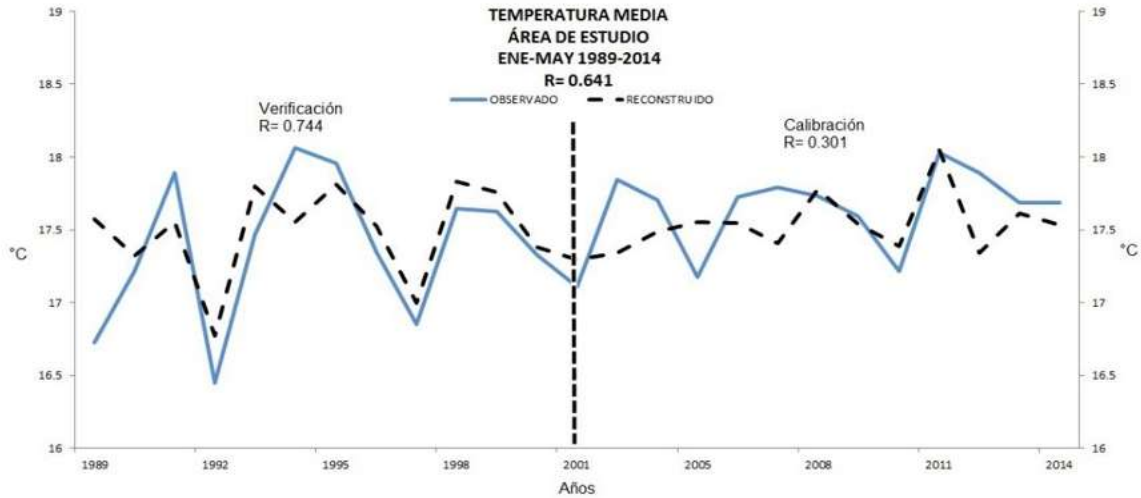


Figura 40. Calibración y verificación de los subperiodos de función de respuesta

En el Cuadro 11 se observan los análisis de calibración y verificación de los subperiodos 1989 a 2001 y 2002 a 2014 del periodo de función de respuesta de 1989 a 2014 para temperatura media promedio de enero a mayo.

Cuadro 11. Calibración y verificación de los subperiodos 1989 a 2001 y 2002 a 2014 para temperatura media promedio de enero a mayo

Periodo	R	R ²	Error estándar	Coefficientes	Prueba (T)	Prueba signos	p
Verificación 1989 a 2001	0.743	0.555	0.341	a. 21.060 b. -3.668	2.178*	3.180*	0.00355**
Calibración 2002 a 2014	0.301	0.090	0.249	a. 18.869 b. -1.214	2.200*	3.059*	0.342547

*Significativo ($p= < 0.05$)

** Significativo ($p= < 0.01$)

Una vez pasado las pruebas estadísticas de calibración y verificación, se realizó un *análisis de regresión lineal simple* ($p= 0.01$) al periodo de función de respuesta 1989 a 2014, el cual arrojó una ecuación que permitió construir un modelo matemático lineal que reconstruyó la temperatura media promedio de enero a mayo (Cuadro 12).

Cuadro 12. Modelo de *regresión lineal simple* para la variable dependiente temperatura media promedio de enero a mayo

Periodo	R	R ²	Error estándar	Coefficientes	Prueba (T)	Prueba signos	<i>p</i>
1989 a 2014	0.641	0.410	0.326	a. 20.738 b. -3.235	2.063*	4.372*	0.00056**

*Significativo ($p = < 0.05$)

** Significativo ($p = < 0.01$)

El análisis de varianza del periodo de función de respuesta climática de 1989 a 2014, resultó significativo, en donde los valores de *f* y el valor crítico de *f* fueron mayores a los de las tablas ($p = < 0.01$) (Cuadro 13).

Cuadro 13. Análisis de varianza del modelo de reconstrucción estacional de temperatura media promedio de enero a mayo

Variabes	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	<i>f</i>	Valor crítico de <i>f</i>
Regresión	1	1.709	1.709	16.0005592*	0.0005616*
Residual	23	2.456	0.106		
Total	24	4.166			

*Significativo ($p = < 0.01$)

Se construyó el modelo matemático lineal para fines de reconstrucción de temperatura media promedio de enero a mayo el cual fue:

$$Y_t = 20.738 - 3.235 * X_t$$

Donde:

Y_t= Valor reconstruido de temperatura media enero-mayo para un año determinado

X_t= índice de ancho de anillo (valor anual obtenido de la cronología residual)

Se aplicaron varias pruebas estadísticas de control como una T de *Student* y Prueba de los signos de *Wilcoxon*, por lo que la correlación obtenida entre los datos instrumentales de temperatura media enero a mayo y los datos reconstruidos indicaron un valor de correlación de $R= 0.641$; $p < 0.01$, válido para fines de reconstrucción histórica. Aplicando el modelo matemático lineal de reconstrucción, se logró reconstruir la temperatura media promedio de enero a mayo de 1934 a 2014 para el Eje Neovolcánico Transmexicano (Figura 41).

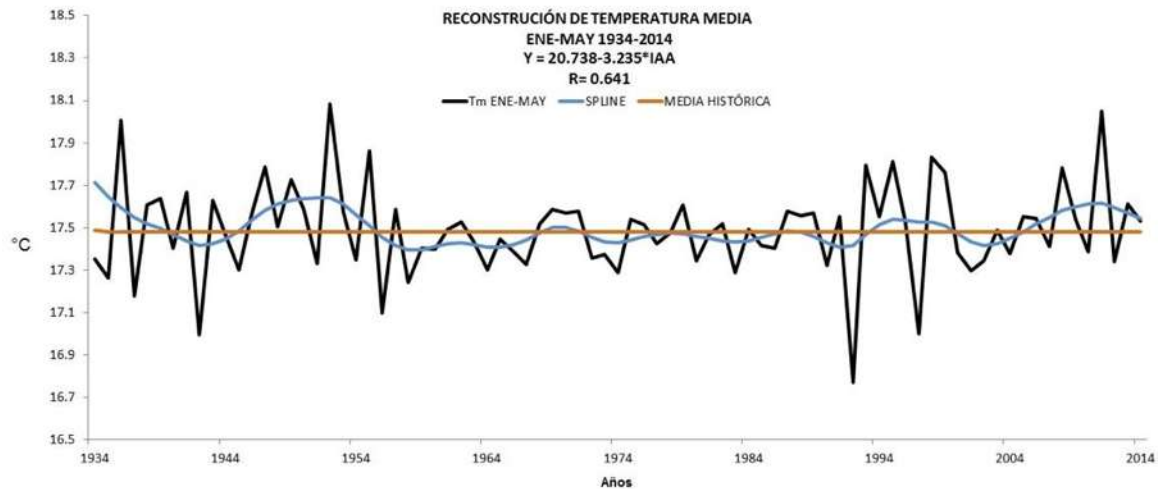


Figura 41. Reconstrucción histórica de la temperatura media promedio de enero a mayo para el Eje Neovolcánico Transmexicano

4.5.2 RECONSTRUCCIÓN DE PRECIPITACIÓN DE ENERO A MAYO

Se verificaron y calibraron los subperiodos 1983 a 1998 y 1999 a 2014 del periodo de función de respuesta climática de 1983 a 2014 (Figura 42), esto permitió construir un modelo matemático lineal, el cual permitió reconstruir la precipitación histórica de enero a mayo dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano.

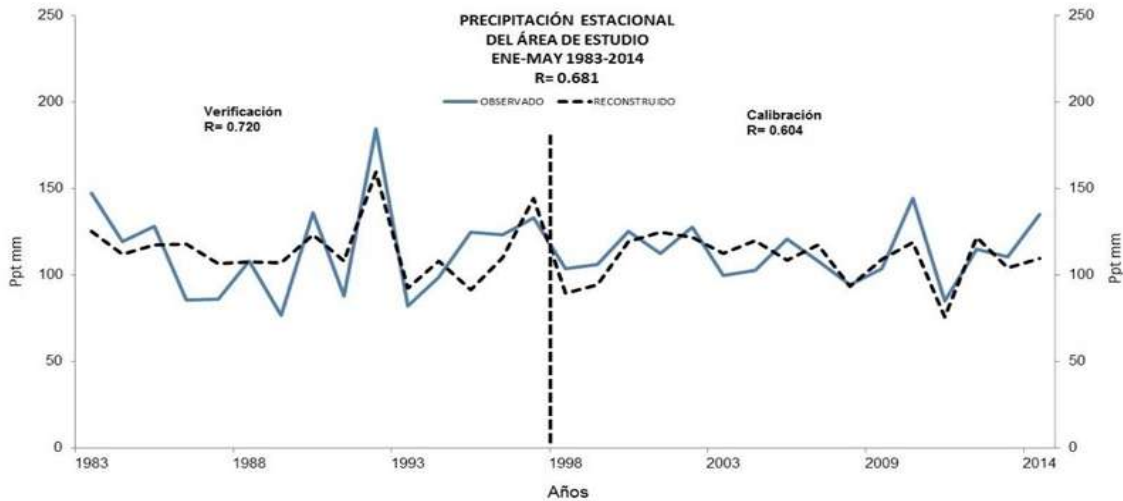


Figura 42. Calibración y verificación de los subperiodos de función de respuesta

En el Cuadro 14 se muestran los análisis de Calibración y Verificación del periodo de función de respuesta climática de precipitación de enero a mayo

Cuadro 14. Pruebas de calibración y verificación de los subperiodos de 1983 a 1998 y de 1999 a 2014 de enero a mayo

Periodo	R	R ²	Error estándar	Coefficientes	Prueba (T)	Prueba signos	p
Verificación 1983 a 1998	0.720	0.519	20.730	a. -129.377 b. 240.827	2.131*	3.516*	0.00164**
Calibración 1999 a 2014	0.604	0.365	12.970	a. -34.956 b. 148.583	2.144*	3.408*	0.01702**

*Significativo ($p= < 0.05$)

** Significativo ($p= < 0.01$)

Habiendo superado las pruebas de calibración y verificación, se realizó un *análisis de regresión lineal simple* del periodo de función de respuesta 1989 a 2014, el cual arrojó una ecuación que permitió construir un modelo matemático lineal de reconstrucción de la precipitación mensual acumulada de enero a mayo (Cuadro 15).

Cuadro 15. Modelo de *regresión lineal simple* para la variable dependiente precipitación acumulada de enero a mayo

Periodo	R	R ²	Error estándar	Coefficientes	Prueba (T)	Prueba signos	<i>p</i>
1983 a 2014	0.681	0.463	17.182	a. -95.106 b. 207.976	2.042*	4.860*	0.000024**

*Significativo ($p = < 0.05$)

** Significativo ($p = < 0.01$)

El análisis de varianza del periodo de función de respuesta climática de 1983 a 2014 resultó significativo, en donde los valores de *f* y el valor crítico de *f* fueron mayores a los de las tablas ($p = < 0.01$) (Cuadro 16).

Cuadro 16. Análisis de varianza del modelo de reconstrucción estacional de precipitación mensual acumulada de enero a mayo

Variables	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	<i>f</i>	Valor crítico de <i>f</i>
Regresión	1	7407.794	7407.794	25.091046*	0.000024*
Residual	29	8561.860	295.236		
Total	30	15969.654			

*Significativo ($p = < 0.01$)

Habiendo superado las pruebas estadísticas y que éstas fueran significativas, el modelo matemático lineal para fines de reconstrucción de precipitación mensual estacional de enero a mayo fue el siguiente:

$$Y_t = -95.106 + 207.976 \cdot X_t$$

Donde:

Y_t = Valor reconstruido de precipitación enero-mayo para un año determinado

X_t = índice de ancho de anillo (valor anual obtenido de la cronología residual)

Se aplicaron varias pruebas estadísticas de control como una T de *Student* y Prueba de los signos de *Wilcoxon*, por lo que correlación obtenida entre los datos instrumentales de precipitación de invierno-primavera y los datos reconstruidos

indicaron un valor de correlación de $R= 0.681$; $p < 0.01$, válido para fines de reconstrucción. Aplicando el modelo matemático lineal de reconstrucción, se reconstruyó la precipitación mensual estacional de invierno-primavera de 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano (Figura 43).



Figura 43. Reconstrucción histórica de precipitación acumulada de enero a mayo para el Eje Neovolcánico Transmexicano

En comparación de resultados de este estudio con los obtenidos en otros trabajos, se sabe que existen meses que más influyen en el crecimiento de los árboles.

Huante *et al.* (1991) reportan una correlación significativa de $R^2 = 0.346$; $p < 0.05$ para temperatura media de los meses enero y febrero sobre el crecimiento anual de *Abies religiosa* hacia el oriente del estado de Michoacán. Al comparar los resultados de Huante con los del presente estudio, se observa que los meses de invierno (enero y febrero) y de primavera (marzo a mayo) de temperatura media influyen de manera directa en el crecimiento de las coníferas del centro-occidente de México.

La temperatura media invernal influye de manera significativa en el crecimiento de las coníferas como *Abies religiosa* y de las especies evaluadas en este estudio, aunque la precipitación fue la principal variable que limita su crecimiento, y la lluvia de invierno a primavera representa el periodo más importante en cuanto a la función de respuesta climática en el crecimiento de las coníferas.

Villanueva *et al.* (2010) reportan una correlación significativa de $R^2= 0.82$, $p < 0.01$, en donde se explica en 82% el comportamiento de la lluvia que ocurre en los meses de enero a septiembre de 1890 a 2008 para la región de “La Malinche”, en el estado de Tlaxcala utilizando anillos de crecimiento de *P. hartwegii*.

Cerano *et al.* (2013) reportan una correlación significativa de $R^2= 0.59$, $p < 0.01$, en la cual se explica el comportamiento de la precipitación de invierno a primavera en un 45% a 60% para la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán del estado de Jalisco para 1792 a 2010. Además Cerano *et al.* (2013) reportan una correlación de $R^2= 0.66$, $p < 0.01$, en la cual explican en 66% el comportamiento de la precipitación de invierno-primavera de enero a mayo para el Parque Nacional Pico de Tancítaro en Michoacán para el periodo 1884 a 2010. Cortés *et al.* (2010) reportan una correlación significativa de $R^2= 0.56$, $p < 0.05$, en donde explican en 56% el comportamiento de la precipitación de enero a mayo para la región centro-sur de Guanajuato del periodo 1700 a 2007.

En el presente trabajo la correlación entre IAA y la temperatura media promedio de invierno-primavera de enero a mayo fue de $R^2= 0.410$; $p < 0.01$, en la cual se explica en 41% la oscilación de la temperatura media ocurrida en enero a mayo del periodo 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano.

Para la precipitación la correlación entre IAA y los valores mensuales acumulados de invierno a primavera de enero a mayo fue de $R^2= 0.463$; $p < 0.01$, en la cual se explica en 46% el comportamiento de la precipitación ocurrida en enero a mayo del periodo 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano.

Se logró construir una cronología maestra para la temperatura media promedio de enero a mayo de las estaciones de (invierno-primavera) $R^2= 0.410$; $p < 0.01$ en la cual se explica en un 41% la variación registrada en la temperatura media por los árboles del periodo 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano.

Se logró construir una cronología maestra para la precipitación de enero a mayo de las estaciones de (invierno-primavera) $R^2= 0.463$; $p < 0.01$ del periodo de 1934 a 2014. El IAA explica en un 46% el comportamiento de la precipitación de los meses de enero a mayo.

4.6 EFECTOS DEL ENSO DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El fenómeno de “El Niño” Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es uno de los patrones atmosféricos circulatorios de mayor importancia a nivel mundial y que determina en gran medida la variabilidad hidroclimática en el norte y centro de México (Stahle *et al.*, 1998; Seager *et al.*, 2009). Estos fenómenos modulan en gran medida el clima de muchas regiones geográficas del mundo. Se han observado y detectado anomalías en la temperatura media y la precipitación de invierno a primavera (enero a mayo) dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano.

Se utilizó el programa ARSTAN para insertar una curva suavizada “Spline” de los valores mensuales acumulados de enero a mayo para temperatura media y precipitación, la cual sirvió para identificar periodos correspondientes a los efectos climáticos del ENSO. Dichos efectos identificados fueron los años de 1934 a 1937, 1946 a 1955, 1994 a 1998 y 2008 a 2014.

Los años correspondientes a efectos de “La Niña” identificados en este trabajo fueron 1941 a 1943, 1957 a 1967, 1973 a 1975, 1981 a 1985, 1990 a 1992 y 2001 a 2004.

En la Figura 44 se aprecian los periodos cálidos producto del efecto de “El Niño” y los periodos de temperaturas frías derivadas del efecto de “La Niña” para el periodo de 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano.

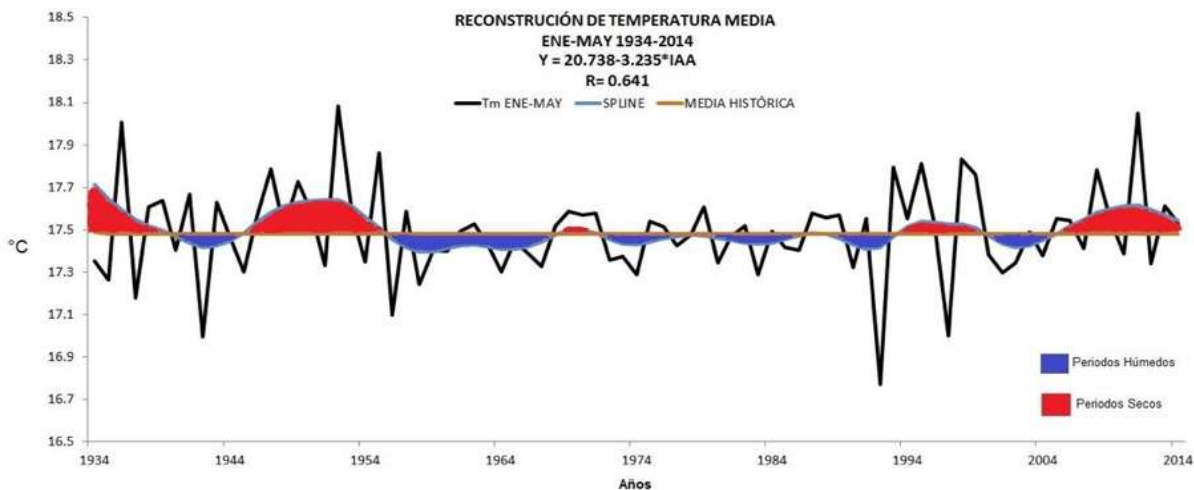


Figura 44. Efectos de “El Niño/La Niña” dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano

Se detectaron los periodos de secas, los cuales corresponden a los años 1934 a 1937, 1946 a 1955, 1993 a 1998 y 2008 a 2014, correspondientes al efecto de “El Niño”.

Los periodos anormales por arriba de la media histórica de precipitación fueron los años 1941 a 1943, 1957 a 1967, 1973 a 1975, 1981 a 1985, 1990 a 1992, y 2001 a 2004, correspondientes al efecto de “La Niña”.

Los efectos de “El Niño” dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano están asociados a una disminución en la precipitación de los meses de enero a mayo y un aumento en la temperatura media de enero a mayo. Los efectos de “La Niña” se asocian a periodos fríos y anomalías en la cantidad de la precipitación, haciendo que la lluvia aumente por encima de la media histórica.

En la Figura 45 se muestra el efecto del fenómeno ENSO en sus fases de “El Niño” y de “La Niña” para el periodo de 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano.



Figura 45. Efectos del fenómeno ENSO para el periodo de 1934 a 2014 dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano

El efecto de “El Niño” del año 2015 es similar al del 1997, por lo que se sabe en materia de incendios forestales, después de un efecto del tipo de “El Niño” intenso como el del 1997, el siguiente año se presentaron grandes incendios forestales de escala nacional, esto se debió a la gran acumulación de combustible en el piso forestal del año anterior que combinado con las altas temperaturas del mes de marzo del 1998 ocasionaron

grandes incendios forestales. Por lo cual se deben tomar medidas preventivas con respecto al año 2016 para evitar incendios forestales de gran magnitud.

A continuación se describen los resultados obtenidos en el presente trabajo con los de otros autores en relación con los efectos del ENSO para las zonas geográficas noreste y centro de México (Cuadro 17 y 18).

Cuadro 17. Cuadro comparativo del efecto de “El Niño” para distintas zonas geográficas de México

Autor	Periodos del efecto de “El Niño”	Zona Geográfica del país
Constante <i>et al.</i> (2009)	1784 a 1794, 1807 a 1812, 1819 a 1832, 1850 a 1857, 1860 a 1884, 1891 a 1896 y 1945 a 1965	Noreste
Cortés <i>et al.</i> (2010)	1778 a 1789, 1798 a 1811, 1817 a 1839, 1862 a 1905, 1944 a 1961, 1977 a 1985 y 1995 a 2002	Centro
Cerano <i>et al.</i> (2013)	1890 a 1896, 1948 a 1957, 1968 a 1971, 1982 a 1989 y 1998 a 2010	Centro
Cortés <i>et al.</i> (2012)	1796 a 1797, 1803 a 1805, 1807 a 1808, 1812 a 1817, 1835, 1837, 1919, 1928, 1953, 1959, 1982, 1989, 1999 y 2006	Centro
Cerano <i>et al.</i> (2013)	1880, 1888, 1899, 1905, 1913, 1918, 1929 a 1930, 1940, 1963, 1970, 1972, 1976, 1983, 1991 y 1997	Centro
Manzanilla (2016)	1934 a 1937, 1946 a 1955, 1994 a 1998 y 2008 a 2014	Centro
Periodos de concordancia	1945 a 1955, 1993 a 1998 y 2008 a 2010	Centro-noreste

Dichos periodos del efecto de “El Niño” fueron registrados en el noreste y centro de México en los años de 1945 a 1955, 1993 a 1998 y 2008 a 2010.

En reconstrucciones históricas de la precipitación generadas para el centro de México, se reportan intensas sequías en periodos de tiempo similares para las décadas de

1950, 1970, 1980 y 1990, los cuales concuerdan con los periodos de 1946 a 1955 y 1994 a 1998 de este trabajo. La sequía de mediados del siglo XX, se considera como una de las sequías más intensas registrada desde el sur de Estados Unidos (Stahle y Cleaveland, 1988), en el norte de México (Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano *et al.*, 2011) y centro de México (Therrell *et al.*, 2006; Cardoza, 2010; Stahle *et al.*, 2011), para el área de estudio esta quedo registrada en el periodo de 1946 a 1955.

Cuadro 18. Cuadro comparativo del efecto de “La Niña” para distintas zonas geográficas de México

Autor	Periodos del efecto de “La Niña”	Zona Geográfica del país
Constante <i>et al.</i> (2009)	1620 a 1639, 1647 a 1641, 1672 a 1685, 1766 a 1780, 1900-1916 y de 1966 a 1994	Noreste
Cortés <i>et al.</i> (2010)	1789 a 1797, 1839 a 1860, 1906 a 1927, 1963 a 1970, 1987 a 1995 y 2003 a 2007	Centro
Cerano <i>et al.</i> (2013)	1960 a 1966	Centro
Cortés <i>et al.</i> (2012)	1785 a 1788, 1822, 1849, 1879, 1905, 1907, 1917, 1949 a 1950, 1960 a 1961, 1968 a 1970, 1981, 2002 a 2004 y 2007	Centro
Cerano <i>et al.</i> (2013)	1869 a 1974, 1886 a 1887, 1915 a 1917, 1955 a 1956, 1970 a 1975 y 1998 a 1999	Centro
Manzanilla (2016)	1941 a 1943, 1957 a 1967, 1973 a 1975, 1981 a 1985, 1990 a 1992, y 2001 a 2004	Centro
Periodos de concordancia	1957 a 1967, 1973 a 1975, 1981, 1990 a 1992 y 2001 a 2004	Centro-noreste

Dichos periodos del efecto de “La Niña” registrados para el noreste y centro de México fueron los años de 1957 a 1967, 1973 a 1975, 1981, 1990 a 1992 y 2001 a 2004 (Constante *et al.*, 2009; Cortés *et al.*, 2010; Cortés *et al.*, 2012; Cerano *et al.*, 2013 y

Cerano *et al.*, 2013). Se ha observado que la variabilidad climática suele ser similar en algunas regiones geográficas, lo cual se debe a que los fenómenos climáticos como el ENSO modulan y determinan en gran medida las condiciones climáticas de ciertas áreas geográficas del país. Existen eventos climáticos muy marcados, como lo son las sequías de 1936, 1947, 1949, 1952, 1955, 1993, 1995, 1998, 2008 y 2011. Estas presentan un comportamiento errático y difícil de predecir, comportándose según la mayoría de los expertos en ciclos de retorno de cada 50 años para sequías intensas. Los eventos marcados de alta precipitación fueron 1937, 1942, 1956, 1958, 1964, 1967, 1974, 1980, 1983, 1990, 1992, 1997, 2001 y 2004, esto es importante para el manejo y acumulación de agua en presas, tener un óptimo manejo del recurso hídrico. El evento del deslizamiento de tierras registrado en 2010 en Angangueo, Michoacán, está relacionado a un año lluvioso efecto de “La Niña”, el cual ocasionó que las áreas desprovistas de vegetación al recibir mucha cantidad de precipitación colapsarán y causaran un desastre. Para el futuro se considera que estos fenómenos atmosféricos pudieran impactar de manera drástica la agricultura de la zona de estudio y reducir su área de siembra y producción.

En la mayoría de los trabajos relacionados a la dendrocronología se analiza de manera somera el suelo y hasta ahora no se le ha dado la importancia que merece. La relación suelo-árbol es muy compleja y requiere de muchos análisis detallados de sus características microscópicas para explicar su influencia en el crecimiento de los árboles, por lo que resulta difícil y costoso determinar el grado de influencia de cada unidad de suelo en el crecimiento de los árboles de diferentes regiones geográficas. En el manejo forestal la estimación de las edades de los árboles nos permite realizar programas de aprovechamiento forestal maderable mediante el cálculo del tiempo de paso que son los años que se requieren para que un árbol cambie de una categoría diamétrica a otra, esto permite calcular la producción de madera de un árbol a una determinada edad. En los aprovechamientos forestales la madera juvenil no tiene mucha importancia debido a que presenta poca resistencia mecánica y tiene poco valor comercial, ésta utiliza para la producción de celulosa para papel, triplays, aglomerados y tableros contrachapados por su fácil manipulación y baja densidad.

En estudios dendrocronológicos la madera juvenil está influenciada por la tendencia biológica del rápido crecimiento arbóreo, esta tendencia se suprime con ayuda de ecuaciones diseñadas e integradas al programa COFECHA por Holmes en 1983.

4.6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN

Las herramientas de análisis espacial de los Sistemas de Información Geográfica son una buena alternativa para medir anillos de crecimiento cuando no se cuenta con el recurso y el acceso a equipos de medición costosos y sofisticados como el Velmex.

El método es menos costoso que el equipo Velmex, solo requiere de una cámara fotográfica, un sistema de coordenadas, rodajas y programas de análisis espacial para efectuar las mediciones.

La clave de la medición radica en tener muestras bien pulidas y asignarle de manera correcta un sistema de coordenadas a la fotografía de la muestra.

Tiene sus limitantes tales como que los valores de medición de ancho total de anillo tienen que ser transformados a micras para los programas COFECHA y ARSTAN pueden ejecutar sus respectivos análisis.

Necesita complementarse mediante el uso de técnicas dendrocronológicas tradicionales como los Skeleton Plots y el Fechado-Cruzado.

En la gran mayoría de los trabajos dendrocronológicos se utiliza el equipo Velmex para realizar mediciones de anillos de crecimiento, siendo una herramienta casi universal en este tipo de estudios.

Las técnicas de Percepción Remota y SIG para medir anillos de crecimiento de árboles han sido poco o nulamente usadas.

5. CONCLUSIONES

Las cronologías sirven para hacer reconstrucciones de la temperatura media y precipitación estacional de enero a mayo para el área de estudio.

La creación de cronologías a partir de anillos anuales es una fuente indirecta del conocimiento para el entendimiento de la variabilidad del clima, la cual permite comprender el comportamiento del clima a lo largo de siglos, incluso milenios, más allá del periodo de los registros instrumentales de las estaciones meteorológicas.

El desarrollo de cronologías regionales es fundamental para entender las relaciones climáticas de fenómenos circulatorios de escala global que impactan en México.

Por otro lado, el calentamiento global y el cambio climático constituyen una fuerte amenaza para la permanencia de los bosques de clima templado.

Los árboles, en especial las coníferas poseen un buen potencial para la realización de estudios enfocados al entendimiento, análisis y comprensión del clima del pasado.

Se logró reconstruir dos cronologías de 81 años (1934 a 2014), una para temperatura media promedio de enero a mayo y una para precipitación mensual acumulada de invierno-primavera para el Eje Neovolcánico Transmexicano.

El análisis no paramétrico de *Mann-kendall* de la superficie de estudio indica una clara existencia de tendencias climáticas, haciendo del clima de la región cada vez más extremo, con tendencias de aumentos y aumentos notorios en la temperatura máxima y media, principalmente para zona urbana de Morelia y sus alrededores, tendencias de disminución y disminución notoria de la temperatura mínima en las zonas urbanas y en las áreas deforestadas, tendencias de disminución y una disminución notoria de la precipitación en las áreas forestales hacia el sureste del área de estudio.

Los períodos de sequías reconstruidos fueron de 1934 a 1938, 1946 a 1955, 1993 a 1998 y 2008 a 2014, siendo la sequía de 1946 a 1955 la más intensa para el área de estudio y reportada por otros autores para las distintas zonas geográficas de México.

Los periodos húmedos reconstruidos fueron 1941 a 1943, 1957 a 1967, 1973 a 1975, 1981 a 1985, 1990 a 1992, y 2001 a 2004, siendo el periodo de 1957 a 1967 uno de los más húmedos registrados por diversos autores en México y la zona de estudio.

Los efectos de “El Niño” para el área de estudio están asociados a bajas precipitaciones y aumentos en la temperatura media, tienen una duración promedio de siete años y los efectos de “La Niña” se asocian a periodos de temperaturas frescas y precipitaciones por encima de la media histórica, sus efectos tienen una duración promedio de cinco años. Su impacto varía de acuerdo a la región geográfica donde se presenten.

Se concluye que los fenómenos atmosféricos de escala global tienen una influencia directa en el crecimiento de los árboles, estos tienen la capacidad de registrar en su grosor los cambios ocurridos en la temperatura y precipitación para ciertos años.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera, G. A., Medina, O. L. E., Sánchez, E. F., Alcalá, J. M., & Ayala, G. J. (2010). Los suelos de la Cuenca de Cuitzeo. In: Atlas de la Cuenca del lago de Cuitzeo: un análisis de la geografía del lago y su entorno socioambiental. (I. I. S. Cram, M. Mendoza, I. Sommer y L. Galicia. Ed.). México: UNAM-UMSNH.
- Cardoza, M. G. F. (2010). Reconstrucción de precipitación anual empleando métodos dendrocronológicos, para Santa María de las Cuevas, Tlaxcala, México. (Tesis de Maestría), Facultad de Agricultura y Zootecnia, Tlaxcala, México.
- Carlón, A. T., Mendoza M. E., Villanueva, D. J, Perez, S. D. R. 2015. Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Madera y Bosques* 21:11-22.
- CATIE. (1997). Notas técnicas sobre manejo de semillas forestales *Pinus pseudostrubus* Lindl. Turrialba, Costa Rica.
- Cerano, P. J. (2004). Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. (Tesis de Licenciatura), Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Arreola, A. J., Sánchez, C. I., y Valdéz, C. R. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15: 27-35.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdéz, C. R., Méndez, G. L., & Constante, G. V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2: 235-249.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdéz, R. D., Cepeda, E. H., Cornejo, O. E., Sánchez, C. I., y Constante, G. V. (2011). Variabilidad histórica de la precipitación recostruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4: 33-46.
- Cerano, P. J., Mendez, G. J., Amaro, S. A., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., y Rubio, C. E. (2013). Reconstrucción de precipitación Invierno-Primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, 413-423.

- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Vázquez, S. L., Trucios, C. R., y Guerra, C. V. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 14.
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. K., Therrell, M. D., Villanueva, D. J., y Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, México. *Climatic Change*, 59: 369-388.
- Constante, G. V. (2007). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera para los últimos cuatro siglos en el Ejido Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. (Tesis de Licenciatura), Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- Constante, G. V., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Cornejo, O. E., y Valencia, M. S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34: 17-39.
- Constante, G. V., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., y Estrada, A. J. (2009). Parámetros para definir el potencial dendrocronológico (Vol. 19). Gómez Palacio, Durango, México. INIFAP.
- Constante, G. V., Villanueva, D. J., y Estrada, J. (2009). Fechado, control de calidad y medición de series de anillos de crecimiento con fines ecológicos y paleoclimáticos (Vol. 14). Gómez Palacio, Durango, México.
- Cook, E. R. (1987). The composition or tree ring for enviromental studies. *Tree Ring*, 43: 37-59.
- Cortés, B. N. E., Villanueva, D. J., Estrada, A. J., Nieto, P. C., Guerra, C. V., y Vázquez, C. O. (2010). Utilización de *Taxodium mucronatum* Ten. para determinar la variación estacional de la precipitación en Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1: 114-121.
- Cruz, A. R. (2007). Dendrocronología y PIXE para la Evaluación del Crecimiento de pino influenciado por el Cambio del Régimen Climático y la Contaminación Atmosférica en el Iztapopo. (Tesis de Licenciatura), UNAM.

- Dallimore, W., Jackson, B. A., y Harrison, S. G. (1967). A handbook of Coniferae and Ginkgaceae (Vol. 4). New York: St. Martin's Press.
- Delgado, S. C. (2000). Aplicaciones estadísticas en estudios dendrocronológicos Mendoza, Argentina: Dendrocronología en América Latina.
- Díaz, H. F., y Markgraf, V. (1992). El Niño. Historical and paleoclimatic Aspects of the souther Oscillation.
- Díaz, C. S., Therrell, M. D., Stahle, D. W., y Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research*, 22: 237-244.
- Díaz, V. M., y Casar, G. R. (2010). Otros Métodos de Estimación Espacial. México, D.F.
- Donahue, J. K., Dvorak, W., Gutiérrez, E., y Kane, M. (1985). *Abies guatemalensis*: a two-year status report. Raleigh, N.C: North Carolina State University, School of Forest Resources.
- Ferreya, S. (2010). Dendrocronología y estructura de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México D.F. (Tesis de Licenciatura), UNAM, México, D.F.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. (N. Y. A. Press. Ed.). London.
- Fritts, H. C., y Swetnam, T. W. (1989). Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research.*, 19: 111-188.
- Galván, O. L. (2011). Impacto de la sequía meteorológica en la vegetación en distintas regiones climáticas de México (1982-2006). (Maestría en Geografía), Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana). México D.F. Offset Larios S.A.
- García, E. (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. México. Climas.

- González, E. M., Jurado, E., Nívar, J., González, E. M. S., Villanueva, D. J., Aguirre, O., y Jiménez, J. (2005). Tree ring and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, México: a 1981 a 2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213: 39-53.
- Grissino, M. H. 1996. Dendrochronology. Disponible en <http://www.sonic.net/bristlecone/dendro.html>. Consultado el 28/06/14.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree dating and measurement. *Tree Ring*, 43: 69-78.
- Huante, P., Rincón, E., y Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, México. *Tree Ring Bulletin*, 51: 15-27.
- INEGI. (1998). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. Subprovincias Fisiográficas de México. Retrieved 08/04/15, 2015, from http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/diccio/FIS_100_0.PDF. Consultado el 08/04/15
- Kendall, M. G. (1938). "A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30: 81-93.
- León, W., y Espinoza, P. (2001). Anatomía de la madera. (C. d. P. M. Venezuela. Ed. Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México. ed.). Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrizosa, E., y Pérez, J. (1999a). El Niño y el Clima. *Climatología de México*, 23-68.
- Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrizosa, E., y Pérez, J. (1999a). Los impactos del Niño en México. México, D.F: Secretaria de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Magaña, V., Vázquez, J. L., y Pérez, J. B. (2003). Impact of the Niño on precipitation in Mexico (Vol. 42). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, I. L. (2008). Variaciones climáticas registradas en los anillos de crecimiento de *Pinus patula* como indicadores del calentamiento global en el Parque Nacional desierto de los Leones. (Tesis de Licenciatura), UNAM, México, D.F.

- Martínez, M. G. (2011). Índices de anillos de crecimiento en coníferas del Eje Neovolcánico Transversal de México. (Tesis de Maestría), Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, México.
- Miranda, F y E. Hernández-X (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Bol. Soc. Bot. Mex. 29-179.
- Perry, J. P. (1991). The Pines of México and Central América. Portland, Oregon. U.S.A.
- Pohl, K., Therrell, M. D., Blay, J. S., Ayotte, N., Cabrera, J. J., Diaz, S. C. y Stahle, D. W. (2003). A cool season precipitation reconstruction for Saltillo, México. Tree Ring Research, 59: 11-19.
- Rushforth, K. D. (1989). Two new species of *Abies* (*Pinaceae*) from western Mexico. Notes RBG Edinb, 46: 101-109.
- Rzedowski. (1981). Vegetación de México. (E. Limusa Ed. Vol. 1).
- Santillán, H. M., Cornejo, O. E., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Valencia, M. S., y Capo, M. A. (2010). Potencial dendroclimático de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. Madera y Bosques, 16: 17-29.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Nike, N., Nakumara, J. y Stahle, D. K. (2009). Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. Atmosfera, 22: 1-3.
- Stahle, D. K., & Cleaveland, M. K. (1988). Texas drought history reconstructed and analyzed from 1698 to 1980. Climate, 1: 59-74.
- Stahle, D. K., Darrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J. y Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation American Meteorological Society, 79: 2137-2152.
- Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Cleaveland, M. K., Therrell, M. D., Paull, B. T., Burns, W. y Fulé, P. Z. (2000). Recent tree-ring research in Mexico. (E. d. I. U. N. d. C. (EDIUNC). Ed.). Mendoza, Argentina.
- Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Burnette, D. J., Cerano, P. J., Heim, F. K., Fye, F. K. y Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium Geophysical Research Letters, 38: 1-4.

- Swetnam, T. W., Thompson, M. A., y Sutherland, E. K. (1985). Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. US DEP AGRIC HANDB, 639, 1-39.
- Therrell, M. D., Stahle, D. K., Villanueva, D. J., Cornejo, O. E., y Cleaveland, M. K. (2006). Tree-ring reconstructed maize yield in central México: 1474-2001. *Climatic Change*, 74: 493-504.
- Tomazello, F., Botosso, M., y Lisi, C. (2001). Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. Sao Paulo, Brasil. Pp 117-143.
- Trenberth. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 271-277.
- Villanueva, D. J. y Mcpherson, G. R. (1996). Reconstruction of precipitation and PSDI from tree-ring chronologies developed in mountains of New Mexico, USA and Sonora, Mexico. *Academy of Science*. 26: 45-54.
- Villanueva, D. J., Stahle, D. K., Cleaveland, M. K. y Therrell, M. D. (2000). Estado Actual de la dendrocronología en México. *Revista Ciencia Forestal en México*, 25: 88-108.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, D. K., Therrell, M. D., y Cleaveland, M. K. (2003). Cronologías de anillos de árboles del norte de México y su potencial hidroclimático. Paper presented at the XII Congreso Nacional de Irrigación (ANEI). Zacatecas, México.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, D. K., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K. y Sánchez, L. (2004). Elementos Básicos de la Dendrocronología y sus aplicaciones en México. Folleto Técnico no. 2. INIFAP, CENID-RASPA. 2, 37.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, D. K., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K. y Luckman, B. H. (2005). Estudios paleoclimáticos en México utilizando anillos de crecimiento de especies arbóreas Libro Técnico No. 1 (pp. 7-32). Sagarpa, INIFAP.

- Villanueva, D. J., Stahle, D. K., Luckman, B. H., Cerano, P. J., Therrell, M. D., Moran, R. y Cleaveland, M. K. (2007). Potencial dendrocronológico de *Taxodium mucronatum* Ten. y acciones para su conservación en México. *Ciencia Forestal en México*, 32: 9-37.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, D. K., Estrada, J., y Constante, G. V. (2008). Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mill) B.S.P. Franco y reconstrucción de la precipitación y Flujo en México (Vol. 23). Gómez Palacio, Durango.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Constante, G. V., Montes, L. E., y Vázquez, J. G. (2009). Muestreo dendrocronológico: colecta, preparación y procesamiento de núcleos de crecimiento y secciones transversales (Vol. 13). Gómez Palacio, Durango.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Estrada, A. J., Guerra, C. V., Stahle, D. K., Constante, G. V. y Palacios, V. O. (2010). Análisis de la variabilidad hidroclimática en el estado de Tlaxcala. Gómez Palacio, Durango: INIFAP CENID-RASPA.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, D. K., Constante, G. V., y Estrada, J. (2010). Estandarización y desarrollo de series dendrocronológicas en México (Vol. 16). Gómez Palacio, Durango.
- Viveros, V. H., Sáenz, L. J. y Vargas, J. J. (2005). Genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en campo. *Agrociencia*, 39: 575-587.

8. GLOSARIO

1. Amplitud Térmica: También llamada oscilación térmica, es la diferencia entre la temperatura más alta y la más baja registrada en un lugar, durante un determinado periodo de tiempo.

2. Análisis de Tendencias Climáticas: Es un análisis de los datos climáticos que se realiza para detectar tendencias del clima de una cierta región o área.

3. Anillos de crecimiento: Constan de dos zonas claramente diferenciadas, una formada en primavera en la que predominan vasos gruesos que conducen la savia bruta hasta las hojas, formada por los tejidos vasculares de color claro, pared delgada, fibras huecas y blandas; y otra formada en otoño de vasos más pequeños y apretados, sus fibras forman el tejido de sostén, son de color más oscuro y de paredes delgadas.

4. ARSTAN: Es un programa dendrocronológico matemático diseñado para producir cronologías a partir de las mediciones de los anillos de crecimiento de los árboles.

5. Archivo ASCII: Se refiere a un archivo en formato de texto reconocido universalmente (.asc).

6. Atmósfera: Capa gaseosa que envuelve a la tierra.

7. Buffer: Polígono que enmarca el área de influencia que resulta al tomar una determinada distancia desde un punto, línea u otro polígono.

8. COFECHA: Programa dendrocronológico que sirve para determinar si existe o no alguna relación estadística significativa entre series de medición de ancho de anillo de los árboles.

9. Curva Polinómica: Es una línea curva que se utiliza cuando los datos fluctúan. Es útil, por ejemplo para analizar pérdidas y ganancias de un conjunto de datos grandes.

10. Dendroclimatología: Sub-rama de la Dendrocronología. Ciencia que se encarga de estudiar los climas del pasado, fundada en las características que presentan los anillos de crecimiento de los árboles.

11. Dendrocronología: Ciencia que se ocupa de la datación de los anillos de crecimiento de los árboles, la dendrocronología analiza patrones espaciales y temporales de procesos biológicos de los árboles.

12. Eje Neovolcánico Transmexicano: Es una cadena montañas compuesta principalmente por volcanes ubicada en el centro de México.

- 13. El Niño:** Es un fenómeno climático relacionado con el calentamiento del pacífico oriental ecuatorial, el cual se manifiesta de manera errática.
- 14. ENSO:** Fenómeno climático que afecta a toda la superficie terrestre, produce sequías o años anormales húmedos.
- 15. Fechado-Cruzado:** Técnica en dendrocronología que se usa para identificar patrones de crecimiento y para extender las series cronológicas el mayor tiempo posible.
- 16. IAA:** Índice de ancho de anillo, este se obtiene al estandarizar la series dendrocronológicas con ayuda del programa ARSTAN.
- 17. IDW:** Método de interpolación que se usa para conocer datos faltantes de un área en particular a partir de los datos existentes de puntos cercanos al dato faltante.
- 18. Interpolación:** Obtención de nuevos datos a partir del conocimiento de un conjunto discreto de puntos.
- 19. La Niña:** Fenómeno climático que se caracteriza por el enfriamiento de la temperatura de la superficie del mar sobre el pacífico ecuatorial.
- 20. Landsat 8:** Satélite Norteamericano encargado de tomar imágenes satelitales de la tierra durante cierto periodo de tiempo.
- 21. Media Móvil:** Es un método utilizado para analizar un conjunto de datos en modo de puntos para crear series de promedios.
- 22. Patrón Climático:** Elementos constantes en la variabilidad y estudio del clima.
- 23. Polígonos de Thiessen:** Método de interpolación de los más simples, basados en la distancia euclidiana.
- 24. Potencial Dendrocronológico:** Capacidad de ciertas especies arbóreas, en especial las coníferas para registrar los cambios en el clima mediante la formación de anillos de crecimiento.
- 25. Prueba no Paramétrica:** Forma parte de la estadística no paramétrica, es una rama de la estadística que estudia las pruebas y modelos estadísticos cuya distribución no se ajusta a los supuestos paramétricos dentro de una curva con distribución normal.
- 26. Raster:** Imagen en mapa de bits, también conocida como imagen matricial.
- 27. SIG:** Sistema de gestión de bases de datos espaciales con herramientas específicas para el manejo de información espacial y sus propiedades geográficas.