



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
HIDRÁULICA – MANEJO INTEGRAL DEL AGUA**

**IDENTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS EN LA PRECIPITACIÓN Y LA TEMPERATURA
CAUSADOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO COLORADO.**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:
ALANIZ CEJA LEOPOLDO ISAAC**

**TUTOR PRINCIPAL:
FERNANDO JORGE, GONZÁLEZ, VILLARREAL, II, UNAM**

COMITÉ TUTOR	
RAMÓN, DOMÍNGUEZ, MORA,	II, UNAM.
AGUSTÍN, BREÑA, NARANJO,	II, UNAM
RAFAEL BERNARDO, CARMONA, PAREDES,	II, UNAM
VICTOR, FRANCO,	II, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón
Secretario: M.I. Franco Víctor
Vocal: Dr. González Villarreal Fernando J.
1^{er}. Suplente: Dr. Carmona Paredes Rafear Bernardo
2^{do}. Suplente: Dr. Breña Naranjo José Agustín

Lugar donde se realizó la tesis: **INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

TUTOR DE TESIS:

Dr. Fernando J. González Villarreal

FIRMA

DEDICATORIA:

A mi familia:

Por siempre acompañarme en el camino y apoyarme cuando más lo necesitaba. A mi abuelita Gloria Alanis Barrera, por siempre estar ahí en mis desvelos, procurándome y ser como mi madre. A mi padre Leopoldo Alaniz Barrera, por siempre saberme guiar con tus consejos y opiniones acertadas, por ser un amigo cuando es necesario y un padre ejemplar, mi modelo a seguir.

*“El mayor placer en la vida es hacer lo que
la gente dice que no se puede hacer”
Walter Bagehot*

AGRADECIMIENTOS:

Al Instituto de Ingeniería:

Por darme tanto conocimientos, como experiencias profesionales y de vida.

Al Dr. Fernando J. González Villarreal

Por brindarme el apoyo y estímulos necesarios para dar lo mejor de mí y crecer profesionalmente, por medio de retos para poder medir mis capacidades. Gracias por la oportunidad.

A mis amigos:

Por compartir momentos increíbles, darme consejos y ser oídos a mis problemas. Gracias al M.I Jonathan G. Bolaños, M.I. Irving García Reyes y al M.I. Jorge Iván Juárez Dehesa, al Lic. Jorge Arriaga por ser grandes compañeros y amigos. Gracias al Ing. Filadelfo Eugenio González, al M.I Diego Cruz Merino y a todos mis demás amigos que compartieron el camino y que, a pesar de las diferencias, seguimos estando juntos.

A José Luis Palacios y Daniel Mauricio Cervantes:

Más que mis amigos, han sido como mis hermanos, gracias por compartir tantos años de amistad y por ser mi apoyo cuando lo necesito.

Al CONACyT:

Por hacer posible que pudiera realizar mis estudios con el apoyo que me brindó.

*“Amor y deseo son dos cosas diferentes; que no todo lo que se ama se desea,
ni todo lo que se desea se ama.”*
Miguel de Cervantes Saavedra

ÍNDICE:

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ANTECEDENTES	3
2.1.	ESTADOS UNIDOS DE NORTE AMÉRICA	6
2.2.	MANEJO TRANSFRONTERIZO CON MÉXICO	8
2.2.1.	Tratados para el establecimiento de la frontera entre México y Estados Unidos	9
2.2.2.	Delimitación de la frontera y Asignación de volúmenes	13
3.	ESTADO DEL ARTE	23
3.1.	PRUEBAS DE CAMBIO EN LA MEDIA	23
3.2.	PRUEBAS DE TENDENCIA EN LA MEDIA	24
3.3.	DIFERENCIAS ENTRE PRUEBAS PARAMÉTRICAS Y NO PARAMÉTRICAS	24
4.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MEDIO FÍSICO	27
4.1.	LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN TERRITORIAL DE LA CUENCA	27
4.2.	OROGRAFÍA Y USOS DE SUELO	28
5.	METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR EL CAMBIO CLIMÁTICO	35
5.1.	DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	35
5.2.	RECOPIACIÓN DE DATOS	36
5.3.	BASE DE DATOS POR REGIÓN	36
5.3.1.	Selección de estaciones	36
5.3.2.	Polígonos de Thiessen	36
5.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	38
5.4.1.	Mann-Kendall	38

5.4.2.	Prueba PETTITT.....	40
6.	RESULTADOS	41
6.1.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
6.1.1.	Cuenca Alta.....	41
6.1.2.	Cuenca Baja.....	51
7.	CONCLUSIONES	62
8.	REFERENCIAS.....	63

Índice de figuras:

Figura 1. Variación de temperatura observada, nivel del mar y cubierta de nieve en el hemisferio norte (IPCC, 2007)	4
Figura 2. Anomalías en la temperaturas anuales a nivel mundial. (NOAA, 2015)	5
Figura 3. Anomalías en la temperatura media de la superficie terrestre en el mes de Febrero. (NOAA, 2015).	5
Figura 4. Regiones de Estados Unidos con alertas climatológicas. (NOAA, 2016).....	6
Figura 5. Monitoreo de Sequias en Estados Unidos (NOAA/NESDIS/NCEI, 2016)	7
Figura 6. Cuenca del río Colorado en territorio mexicano.	28
Figura 7. Regiones fisiográficas en la cuenca del río colorado.....	29
Figura 8: Mapa de elevaciones en la cuenca del río Colorado.....	30
Figura 9. Distribución de los usos de suelo en la cuenca del río Colorado.	31
Figura 10. Mapa geológico del valle de Mexicali.	33
Figura 11. Distribución de los usos de suelo de la cuenca del río Colorado en México	34
Figura 12. Localización de la cuenca transfronteriza del Río Colorado.....	35
Figura 13: Polígonos de Thiessen Cuenca del río Colorado. Elaboración propia	37

Índice de gráficas:

Gráfica 1: Tendencias en la precipitación Cuenca Alta	41
Gráfica 2: Prueba PETTITT en precipitación. Cuenca Alta	42
Gráfica 3: Temperaturas máximas (máximas). Cuenca Alta.	43
Gráfica 4: Prueba PETTITT – Temperaturas máximas (max) Cuenca Alta	43
Gráfica 5: Temperaturas máximas (medias). Cuenca Alta.	44
Gráfica 6: Prueba PETTITT - Temperaturas máximas (media) Cuenca Alta.	45
Gráfica 7: Temperaturas máximas (mínimas). Cuenca Alta.	45
Gráfica 8: Prueba PETTITT en Tmax (min). Cuenca Alta	46
Gráfica 9: Temperaturas mínimas (máximas). Cuenca Alta	47
Gráfica 10: Prueba PETTITT - Temperaturas mínimas (max) Cuenca Alta.	47
Gráfica 11: Temperaturas mínimas (medias). Cuenca Alta.....	48
Gráfica 12: Prueba PETTITT - Temperaturas mínimas (medias). Cuenca Alta.	49
Gráfica 13: Temperaturas mínimas (mínimas). Cuenca Alta.....	50
Gráfica 14: Prueba PETTITT - Temperaturas mínimas (min). Cuenca Alta.....	50
Gráfica 15:Tendencias en la precipitación Cuenca Baja.....	52

Gráfica 16: Prueba PETTITT en precipitación. Cuenca Baja	52
Gráfica 17: Temperaturas máximas (máximas). Cuenca Baja.....	53
Gráfica 18: Prueba PETTITT - Temperaturas máximas (máximas). Cuenca Baja.....	54
Gráfica 19: Temperaturas máximas (media). Cuenca Baja.	55
Gráfica 20: Prueba PETTITT - Temperaturas máximas (media). Cuenca Baja.....	55
Gráfica 21: Temperaturas máximas (mínima). Cuenca Baja.	56
Gráfica 22: Prueba PETTITT - Temperaturas máximas (mínima). Cuenca Baja.....	57
Gráfica 23: Temperaturas mínimas (máximas). Cuenca Baja.	58
Gráfica 24: Prueba PETTITT - Temperaturas mínima (máxima). Cuenca Baja	58
Gráfica 25: Temperaturas mínimas (media). Cuenca Baja.....	59
Gráfica 26: Prueba PETTITT - Temperaturas mínima (media). Cuenca Baja	59
Gráfica 27: Temperaturas mínimas (mínimas). Cuenca Baja.	60
Gráfica 28: Prueba PETTITT - Temperaturas mínima (mínima). Cuenca Baja.....	61

Índice de tablas:

Tabla 1. Tratado de Aguas 1944- Volúmenes asignados a México de las aguas del río Colorado....	15
Tabla 2. Tratado de Aguas 1944- Volúmenes del río Colorado según sitios de entregas.....	16
Tabla 3. Tratado de Aguas 1944. Obras asignadas a cada parte.....	17
Tabla 4. Tratado de Aguas 1944. Responsabilidades sobre obras.....	18
Tabla 5. Tratado de Aguas 1944. Pagos de México por el uso del canal All-American.....	19
Tabla 6. Tratado de Aguas, 1944. Volúmenes asignados y tablas de entrega.....	22
Tabla 8. Pruebas paramétricas y sus equivalentes no paramétricas.	25
Tabla 9. Distribución de los usos de suelo en la cuenca del río Colorado.	32
Tabla 10. Resumen estadístico de las variables climatológicas. Cuenca Alta	51
Tabla 11. Resumen estadístico de las variables climatológicas. Cuenca Baja.....	61

RESUMEN

En la actualidad el cambio climático es uno de los problemas de mayor importancia para la humanidad, dicho efecto se ha acelerado por influencia antropogénica, como las emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación de cuerpos de agua, entre muchos otros.

El trabajo presentado propone una metodología para identificar la existencia de cambio climático en la cuenca del río Colorado, Estados Unidos, ya que a lo largo de los años ha presentado cambios en la precipitación, temperatura, así como también en su geomorfología. Dicha metodología se auxilia de análisis estadísticos como pruebas de homogeneidad y de tendencias con respecto a la media.

OBJETIVO

El objetivo del trabajo es identificar mediante un análisis de datos climatológicos y la aplicación de una metodología, si los cambios que se han presentado dentro de la cuenca del río son ocasionados por el cambio climático o si son fenómenos causados por la variabilidad climática.

1. INTRODUCCIÓN

A mediados del siglo XX, comenzó a ser evidente que se habían incrementado de manera considerable los gases de efecto invernadero y de esta forma, la intensificación de los fenómenos naturales y la aceleración del proceso de calentamiento global. En la actualidad, casi la totalidad de los científicos está de acuerdo en que debemos frenar e invertir éste proceso, o enfrentarnos a un proceso de desastres naturales que alterarán la vida tal y como la conocemos hoy en día.

El último informe del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), conocido en español como Convención Marco sobre el Cambio Climático, (CMCC) de Naciones Unidas, publicado en febrero de 2007, es el mejor documento hasta la fecha relacionado con el calentamiento global. Éste afirma que la temperatura global se ha elevado 0.76°C en los últimos 100 años; también predice una elevación de la temperatura promedio de la superficie del planeta entre 1.4 y 5.8 grados para el año 2100, lo cual podría ser devastador. Los glaciares de los Andes, que suministran agua potable en ríos que son fuente de riego, están desapareciendo. El deshielo de las masas polares provocará el aumento del nivel del mar, lo cual podría poner en riesgo a países enteros, como Holanda y Bangladés. No son suposiciones sin fundamento. Se predice que para 2080 habrá una grave escasez de agua en China y Australia. La corriente del Golfo, que calienta el norte de Europa, podría ser interrumpida si cambia la salinidad del agua del Atlántico. Éstas son sólo algunas de las predicciones a futuro, existen otras más que no serían menos graves.

- ¿Qué es el cambio climático?

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), define el cambio climático como:

"Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables" (Artículo 1, párrafo 2 de la CMNUCC).

De igual manera, la misma convención define claramente que son los efectos adversos del cambio climático como se muestra a continuación:

Se entiende por "Efectos adversos del cambio climático" a los cambios en el medio ambiente físico o en la biota que tienen efectos nocivos significativos en la composición, la capacidad de recuperación o la productividad de los ecosistemas naturales o sujetos a ordenación, o en el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos, o en la salud y el bienestar humanos.

El Panel Intergubernamental de cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés) nos dice en su informe del 2007 que:

"El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar".

A escala global se prevé que los efectos del cambio climático en los recursos hídricos serán extensos, pero de diferente signo de una región a otra, conforme a la latitud, altitud y condiciones orográficas. En algunas regiones del planeta ya se registran los primeros síntomas de afectación en los recursos hídricos. En general, en las latitudes altas se espera un incremento de la precipitación y el escurrimiento, lo que podría incrementar la oferta de agua en esas regiones. En latitudes medias y zonas subtropicales, al contrario, se prevén importantes disminuciones en la precipitación y el escurrimiento, lo que ocasionará un incremento en las condiciones de escasez y mayor presión sobre los recursos hídricos en esas regiones. De hecho, ya se han observado disminuciones en la precipitación y en el escurrimiento en latitudes entre 10° S y 30° N, así como, a nivel global, incrementos en el vapor de agua en la atmósfera y cambios de régimen en las precipitaciones, que han producido lluvias locales de mayor magnitud e intensidad (IPCC, 2008), y en ocasiones fuera de temporada.

Un efecto casi seguro del cambio climático será la variación del escurrimiento en cuencas que dependen del deshielo, pudiendo éste disminuir en los periodos requeridos por los usuarios del recurso hídrico. En efecto, está bien documentada una disminución en las capas de hielo continentales, con un incremento en el derretimiento de glaciares en la mayoría de las regiones del planeta (IPCC, 2008).

2. ANTECEDENTES

Los efectos del calentamiento global se están observando ya con mayor o menor intensidad en distintas regiones del mundo y han sido registrados con rigor científico. En los últimos años, el cambio climático se ha convertido en un asunto político internacional de importancia, implicando el Protocolo de Kioto y discusiones a alto nivel en reuniones como las cumbres del G-8. El reciente informe de evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) afirma que el calentamiento global registrado durante las últimas décadas ha sido mayormente causado por la actividad del hombre (con una altísima probabilidad).

Sociedades científicas internacionales han abogado por acciones para atenuar el calentamiento global causado por las emisiones de gases invernadero tales como el CO₂; el IPCC y el anterior Vicepresidente de EE.UU., Al Gore, compartieron el Premio Nobel de la Paz 2007 por difundir el conocimiento sobre el cambio climático provocado por el hombre; hubo un Premio de la Academia para el documental de Gore titulado Una verdad incómoda; y el Informe de Revisión de Stern concibe el cambio climático como un reto trascendental para el mundo.

Al mismo tiempo, los medios de comunicación han proporcionado informes que transmiten la impresión de que la ciencia que defiende el calentamiento global antropogénico (provocado por el hombre) es polémica, y el debate actualmente va desde los asuntos científicos que conciernen al cambio climático hasta las preguntas sobre cómo afrontar el cambio climático. Entonces, ¿qué es lo que realmente sabemos sobre el clima? Aquí examinamos la evidencia y argumentos que conciernen al clima y el cambio climático.

En la figura 1 se muestran las variaciones de temperatura, nivel del mar y deshielo en el hemisferio norte. Como puede observarse, el incremento de temperatura es especialmente importante a partir de la década de los setenta.

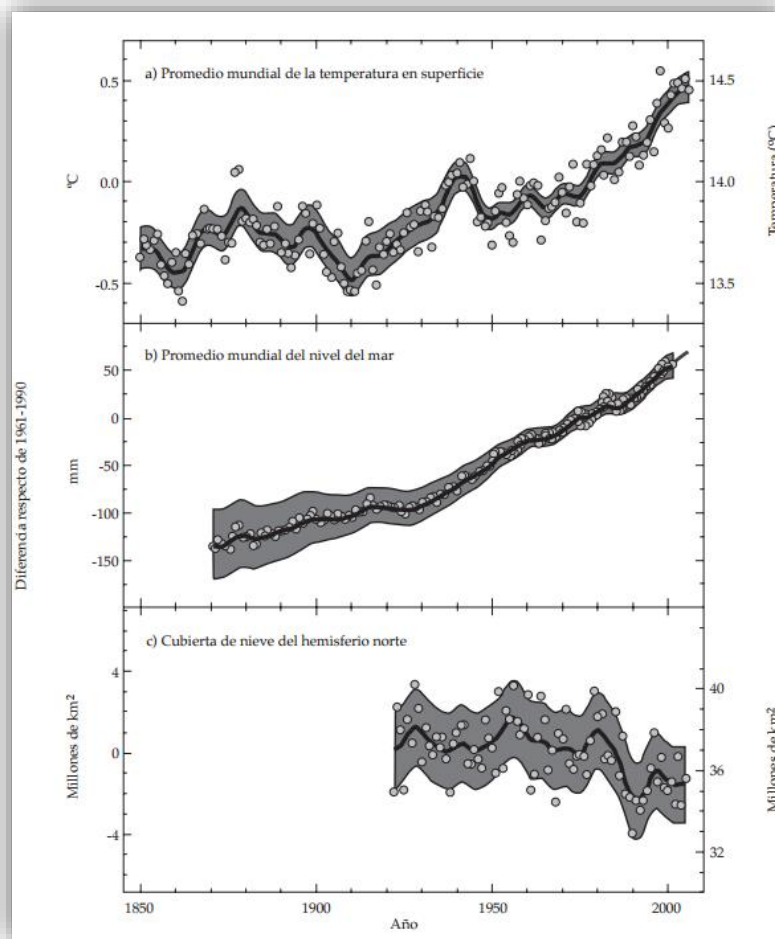


Figura 1. Variación de temperatura observada, nivel del mar y cubierta de nieve en el hemisferio norte (IPCC, 2007)

Según el centro de datos climáticos (National Climatic Data Center), llevamos 30 años de calentamiento global, ya que ha calculado las temperaturas promedio de la superficie terrestre por cada mes del año durante el siglo pasado, figura 2. Si se resta a la temperatura promedio de un mes y año en concreto; por ejemplo, febrero del 2015, la temperatura promedio del siglo pasado para el mismo mes del año, entonces se puede saber cómo de anómalo es el mes. El último mes de febrero cuya temperatura promedio estuvo por debajo de la del siglo pasado fue febrero de 1985. Y el febrero pasado ha sido un nuevo record mundial en este sentido.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

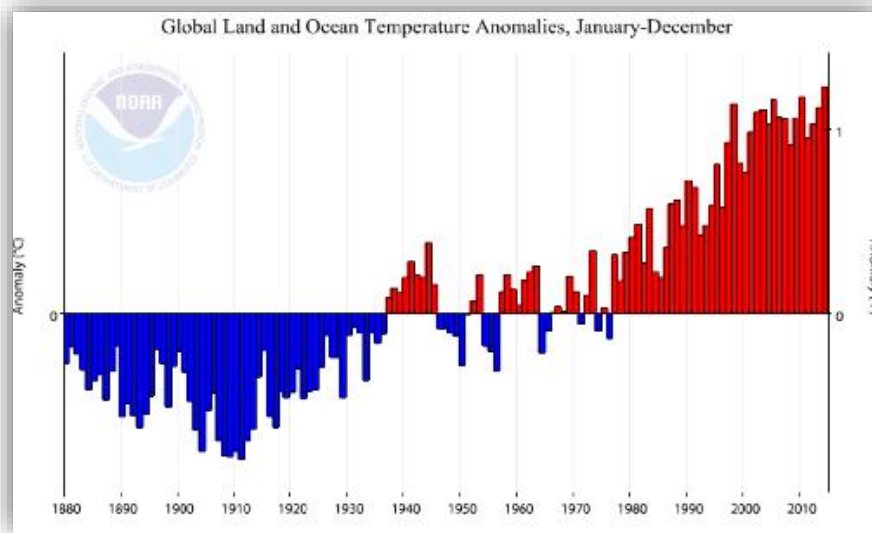


Figura 2. Anomalías en la temperaturas anuales a nivel mundial. (NOAA, 2015)

En el caso de la temperatura oceánica se repite el mismo patrón. El fenómeno se puede apreciar bien en la figura 3.

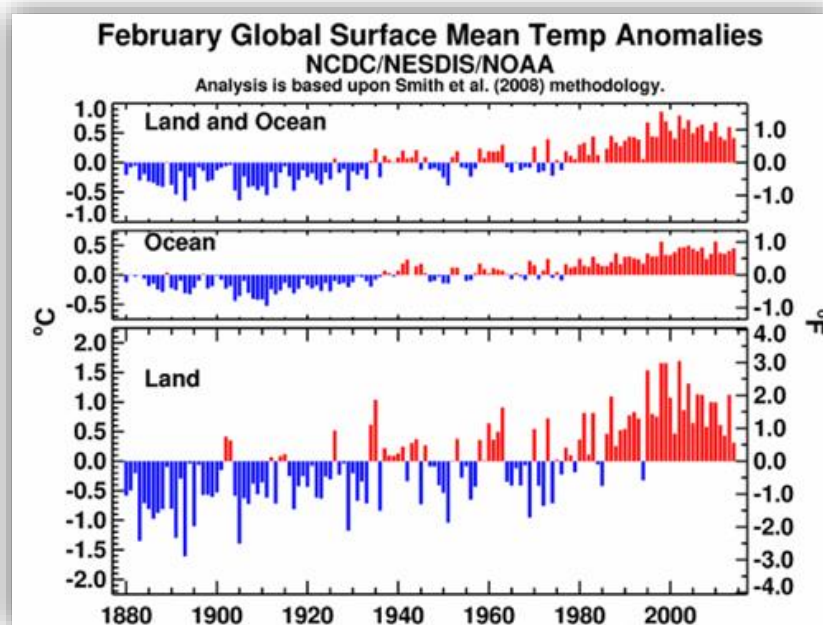


Figura 3. Anomalías en la temperatura media de la superficie terrestre en el mes de Febrero. (NOAA, 2015).

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Esto hace que llevemos 30 años de cambio climático claro. Algo obtenido de medidas puras sin usar modelos climáticos. Si se tienen en cuenta los promedios anuales año a año la situación no mejora respecto a considerar un mes en concreto. En este caso, para obtener una temperatura promedio por debajo de la del siglo XX, hay que remontarse a 1976. Las variaciones u oscilaciones que se pueden apreciar se deben principalmente al fenómeno de El Niño, que consiste en un calentamiento periódico del Pacífico Sur (fenómeno que empeora por culpa del cambio climático).

Con lo anterior, está claro que existe una tendencia hacia el calentamiento independientemente de las fluctuaciones: los tiempos pasados fueron menos cálidos que los más recientes. Si no cambiamos nuestros hábitos, en los próximos 30 años la temperatura subirá aún más y las futuras generaciones experimentarán un clima distinto al que había cuando nosotros nacimos.

2.1. ESTADOS UNIDOS DE NORTE AMÉRICA

Para el caso de Estados Unidos, el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) han tenido registros de un incremento de temperatura en varios estados, como se podemos observar en la figura 4, los estados que se encuentran en la cuenca del río Colorado tiene de calor excesivo, así como también en otros estados existe advertencias de olas de calor.

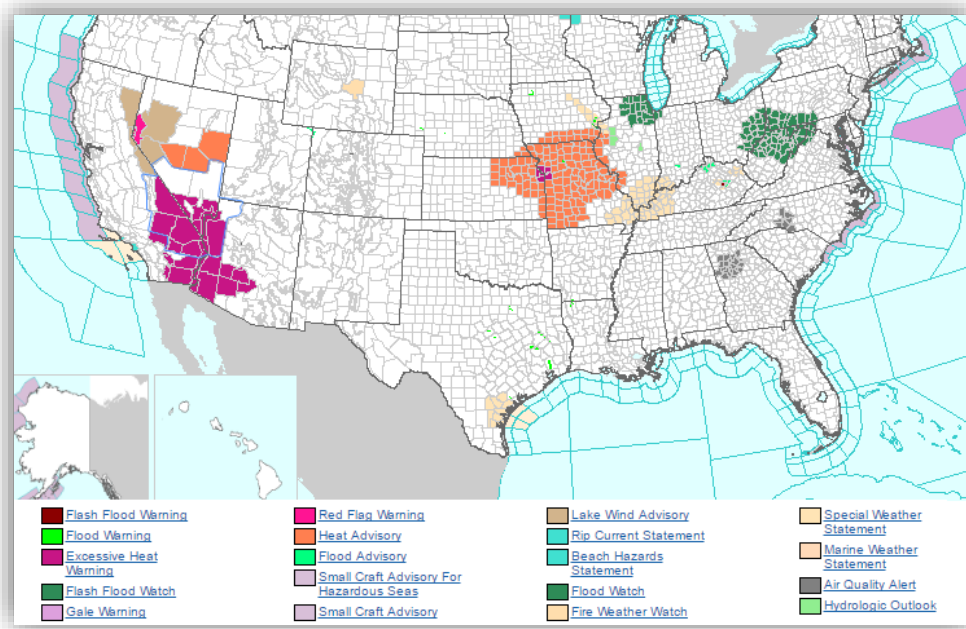


Figura 4. Regiones de Estados Unidos con alertas climatológicas. (NOAA, 2016)

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

En cuanto a sequías, Estados Unidos, tiene un sistema de Monitoreo (NOAA/NESDIS/NCEI, 2016) el cual, ha registrado que, con el paso de los años, los fenómenos de sequía se han incrementado en la mayor parte de oeste del país, presentando en algunas regiones la existencia de sequía extrema.

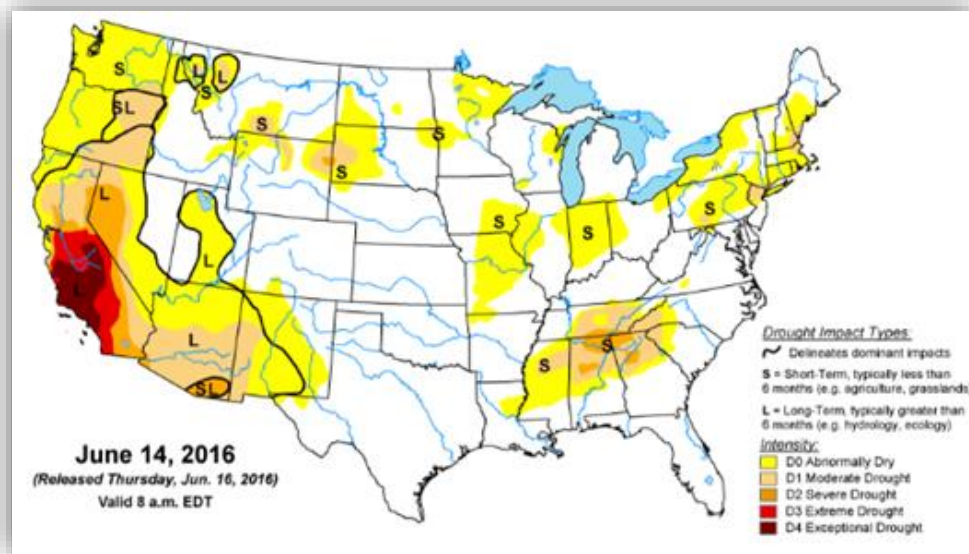


Figura 5. Monitoreo de Sequías en Estados Unidos (NOAA/NESDIS/NCEI, 2016)

Como se observa en la figura 5, las regiones del suroeste de Estados Unidos son las más afectadas por las sequías extremas por periodos de tiempo prolongados, lo que hace un tema complicado el manejo adecuado de los recursos hídricos.

La USBR con base a sus estadísticas y datos recopilados, en el año del 2011 publicó un reporte acerca de los posibles cambios dentro de la cuenca del río Colorado los cuales se mencionan a continuación:

Cambios futuros en clima e hidrología

El Informe de la Ley de Seguridad hídrica (2011), identifica los desafíos climáticos que la Cuenca del Río Colorado podría enfrentar:

- En promedio, se proyecta que la temperatura de la Cuenca del Río Colorado aumentará en 0.5 °C aproximadamente durante el siglo XXI, con aumentos levemente mayores proyectados en la Cuenca superior de Colorado.

- Se prevé que las precipitaciones aumentarán en un 2,1% en la cuenca alta, mientras que disminuirán en un 1,6% en la cuenca inferior para 2050.
- Se proyecta que la escorrentía anual media disminuirá en un 8.5% para 2050.
- Las condiciones más cálidas probablemente harán que la nieve caiga en nevada, produciendo más escurrimientos de diciembre a marzo y menos durante los meses de abril a julio.

Impactos futuros para el agua y los recursos ambientales

Los cambios climáticos históricos y proyectados tienen impactos potenciales para la cuenca:

- Las reducciones de escurrimiento de primavera y principios de verano podrían traducirse en una caída en el suministro de agua para cumplir con las demandas de riego y un impacto adverso en las operaciones hidroeléctricas en los embalses más pequeños. Lake Mead y Lake Powell son lo suficientemente grandes como para amortiguar las fluctuaciones de entrada reduciendo los impactos a las operaciones hidroeléctricas.
- El aumento de la escorrentía invernal puede requerir modificaciones en la infraestructura o cambios en las reglas de control de inundaciones para preservar la protección contra inundaciones, lo que podría reducir aún más el suministro de agua en la estación cálida.
- Las condiciones más cálidas pueden provocar un aumento de la presión sobre la pesca, cambios en los rangos geográficos de las especies, mayor demanda de agua para ecosistemas y producción de energía termoeléctrica, mayores demandas de energía para usos municipales -incluido el enfriamiento- y una mayor probabilidad de infestaciones de especies invasoras. Las especies en peligro de extinción podrían verse exacerbadas.

2.2. MANEJO TRANSFRONTERIZO CON MÉXICO

Como se ha mencionado con anterioridad, la cuenca del río Colorado es una cuenca transfronteriza que involucra a los países de México y Estados Unidos, es por ello que se han dictado varios tratados y cartas que ayuden al correcto manejo de los volúmenes y la delimitación de las fronteras para cada una de las partes involucradas.

2.2.1. Tratados para el establecimiento de la frontera entre México y Estados Unidos

Los primeros tratados de límites entre México y Estados Unidos tuvieron como objetivo definir las fronteras entre ambos territorios. En ellos, los ríos internacionales fueron utilizados para marcar esas divisiones. A su vez, los primeros tratados incluían disposiciones sobre el uso de los afluentes con fines de navegación. El establecimiento de fronteras con ayuda de los ríos tuvo, no obstante, consecuencias importantes, pues los cambios en su cauce generaron una inestabilidad recurrente en la línea divisoria, a lo que se sumaron problemas políticos e invasiones de grupos indígenas tanto de México como Estados Unidos. Para el tema de este estudio es importante destacar que los propios cambios en la frontera dieron como resultado el uso de ríos distintos para demarcarla. El río Colorado, por ejemplo, no tuvo esta función sino hasta 1853. De igual manera, el río ocupó se encontraba territorio mexicano previo a la firma del Tratado de Guadalupe Hidalgo, en 1848. Para entender estos cambios, se revisan en este espacio el Tratado de Guadalupe Hidalgo, de la Mesilla, y de Remonumentación.

2.2.1.1. Tratado de Guadalupe Hidalgo

Como consecuencia de la Guerra entre México y Estados Unidos ocurrida entre 1846 y 1848, el 2 de febrero de 1848 se firmó el Tratado de paz, límites y arreglo definitivo entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, conocido como Tratado de Guadalupe Hidalgo. Al ceder México los territorios de Alta California, Nuevo México y Texas, los ríos Gila y Bravo del Norte pasaron a ser limítrofes, como lo describe el artículo quinto:

“La línea divisoria entre las dos Repúblicas comenzará en el golfo de México, tres leguas fuera de tierra **frente a la desembocadura del río Grande, llamado por otro nombre río Bravo del Norte, o del más profundo de sus brazos, si en la desembocadura tuviere varios brazos: correrá por mitad de dicho río, siguiendo el canal más profundo donde tenga más de un canal, hasta el punto en que dicho río corta el lindero meridional de Nuevo México:** continuará luego hacia Occidente, por todo este lindero meridional (que corre al norte del pueblo llamado Paso) hasta su término por el lado de Occidente: desde allí **subirá la línea divisoria hacia el Norte, por el lindero occidental de Nuevo México, hasta donde este lindero esté cortado por el primer brazo del río Gila** (y si eso no está cortado por ningún brazo del río Gila, entonces hasta el punto del mismo lindero occidental más cercano al tal brazo, y de allí en una línea recta al mismo brazo);

continuará después por mitad de este brazo y del río Gila hasta su confluencia con el río Colorado; y desde la confluencia de ambos ríos la línea divisoria, cortando el Colorado, seguirá el límite que separa la Alta de la Baja California hasta el mar Pacífico...” (Tratado de Guadalupe Hidalgo, artículo 5, primer párrafo)

Como describe el artículo, la Alta California fue dividida por una línea que el mismo párrafo precisa más adelante:

“...Y para evitar toda dificultad al trazar sobre la tierra el límite que separa la Alta de la Baja California, queda convenido que dicho límite consistirá en una línea recta, tirada desde la mitad del río Gila en el punto donde se une con el Colorado, hasta un punto en la costa del mar Pacífico...” (Tratado de Guadalupe Hidalgo, artículo 5, primer párrafo)

Pese a que se deja una parte del río Colorado en territorio mexicano, y que el afluente, tal como lo describe el artículo, se une con el río Gila; el río Colorado no se reconoció como río limítrofe, y así lo muestran los derechos de navegación especificados en el propio tratado. En primer lugar, el artículo sexto concede a los estadounidenses el derecho de libre navegación a través del río Colorado hasta el golfo de California, en los términos siguientes:

“Los buques y ciudadanos de los Estados Unidos tendrán en todo tiempo un libre y no interrumpido tránsito por el golfo de California y por el río Colorado desde su confluencia con el Gila, para sus posesiones, y desde sus posesiones sitas al Norte de la línea divisoria que queda marcada en el artículo precedente; entendiéndose que este tránsito se ha de hacer navegando por el golfo de California y por el río Colorado, y no por tierra, sin expreso consentimiento del Gobierno mexicano” (Tratado de Guadalupe Hidalgo, artículo 6, primer párrafo).

Por su parte, el séptimo artículo reconoce la libre navegación a ambos países en los ríos Bravo y Gila, que quedan como ríos fronterizos:

“Como el río Gila y la parte del río Bravo del Norte que corre bajo el lindero meridional de Nuevo México, se dividen por mitad entre las dos Repúblicas, según lo establecido en el artículo quinto; la navegación en el Gila y en la parte que queda indicada del Bravo, será libre y común a los buques y ciudadanos de ambos países, sin que por alguno de ellos pueda hacerse (sin consentimiento del otro) ninguna obra que impida o interrumpa en todo o en parte el ejercicio de este derecho, ni aun con motivo de favorecer nuevos métodos de navegación. Tampoco se podrá cobrar (sino en el caso

de desembarco en alguna de sus riberas) ningún impuesto o contribución, bajo ninguna denominación o título, a los buques, efectos, mercancías o personas que naveguen en dichos ríos. Si para hacerlos o mantenerlos navegables, fuere necesario o conveniente establecer alguna contribución o impuesto, no podrá esto hacerse sin el consentimiento de los dos Gobiernos” (Tratado de Guadalupe Hidalgo, artículo 7).

De esta forma, este tratado fue el antecedente a una serie de conflictos que se darían más adelante, pues ríos que anteriormente estuvieron por completo en territorio mexicano, ahora serían compartidos con Estados Unidos. A pesar de ello no se previó disposición alguna sobre el derecho a los recursos hídricos de los afluentes, así como la facultad de cada una de las partes de desviar el cauce de alguno de ellos.

2.2.1.2. Tratado de la Mesilla

El 30 de diciembre de 1853 fue firmado el Tratado de Límites entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, conocido como Tratado de la Mesilla o Tratado de Gadsden. El nuevo convenio reajustó la frontera entre México y Estados Unidos como resultado de la venta del entonces territorio mexicano de la Mesilla a Estados Unidos. Con los cambios en los límites, también hubo cambios en los ríos fronterizos, como señala el primer artículo:

“La República Mejicana conviene en señalar para lo sucesivo como verdaderos límites con los Estados-Unidos los siguientes: [...] comenzando en el golfo de Méjico á tres leguas de distancia de la costa, frente á la desembocadura del rio Grande (sic), como se estipuló en el artículo quinto del tratado de Guadalupe Hidalgo; de allí, según se fija en dicho artículo, hasta la .mitad de aquel rio al punto donde la paralela del 31°47' de latitud Norte atraviesa el mismo rio; de allí, cien millas en línea recta al Oeste; de allí, al Sur á la paralela del 31°20' de latitud Norte (sic); de allí, siguiendo la dicha paralela de 31°20', hasta el 111 del meridiano de longitud. Oeste de Greenwich; de allí, en línea recta á un punto en el rio Colorado (sic), veinte millas, inglesas abajo de la union, de-los ríos Gila y Colorado; de allí, por la mitad del dicho rio Colorado, rio arriba, hasta donde encuentra la actual línea divisoria entre los Estados-Unidos y Méjico”(sic) (Tratado de la Mesilla, artículo 1)

A diferencia del límite especificado en el convenio anterior, éste deja de contemplar al río Gila como río limítrofe, y en cambio concede ese carácter al tramo del río Colorado, desde el punto que está veinte millas bajo su unión con el río Gila hasta la línea que divide a California de Alta California.

En cuanto a los derechos de la navegación a través de los ríos fronterizos, se reiteraron los derechos de Estados Unidos en el río Colorado y su derecho a navegar desde el Golfo de México sin dar algún derecho a la parte mexicana sobre el tramo del río Colorado que no corre a través de su territorio. En contraste, en este tratado ya no fueron contempladas las disposiciones hechas en el artículo séptimo del tratado de 1848, que daban derecho al Estado mexicano a navegar a través del río Gila.

“...Los buques y ciudadanos de los Estados-Unidos tendrán en todo tiempo libre y no interrumpido tránsito por el Golfo de California para sus, posesiones y desde sus' posesiones sitas al Norte de la línea divisoria de los dos países; entendiéndose que ese tránsito se ha de hacer navegando por el Golfo 'de California y' por el Rio-Colorado, y no por tierra, sin expreso consentimiento del Gobierno Mejicano. [...] Las diversas disposiciones; estipulaciones y restricciones contenidas en el artículo sétimo del tratado de Guadalupe Hidalgo, solo permanecerán en vigor en lo relativo al Rio-Bravo del Norte abajo `del punto 'inicial de dicho límite estipulado en el artículo primero de este tratadores...” (sic) (Tratado de la Mesilla, artículo 4)

Por lo tanto, con el tratado se redujo el tramo del río Colorado bajo jurisdicción total de México, mientras que se estableció como fronterizo un tramo de 35 kilómetros (Enríquez Coyro) y México perdió la libre navegación por el río Gila. Por otro lado, continúan sin considerarse criterios sobre el reparto de agua.

2.2.1.3. Tratado de Remonumentación

La Convención para reponer los monumentos que marcan la línea divisoria entre el Paso del Norte y el Océano Pacífico también llamada Tratado de Remonumentación, fue firmada en Washington el 29 de julio de 1882. En ella se contempló que tanto México como Estados Unidos nombrarían secciones—formadas por oficiales de sus ejércitos—para realizar el reconocimiento del estado en el que se encontraran los monumentos edificados para señalar la línea fronteriza. Se previó que, al término de esos reconocimientos previos, cada país formara una sección de reconocimiento compuesta por un ingeniero en jefe, dos asociados y los ingenieros auxiliares necesarios. Las secciones se reunirían seis meses después de ratificar el tratado, para formar la “Comisión Internacional de Límites”. La Comisión se encargaría de colocar en su lugar los monumentos que hubieran sido desplazados o colocar otros nuevos, conforme lo acordaran sus integrantes (artículos 1, 2 y 3, Tratado de Remonumentación). Además de dar los criterios para la restauración de estos monumentos, esta convención marca el primer antecedente de lo que posteriormente sería la

Comisión Internacional de Límites, y más tarde la CILA. Con ello, era la primera ocasión en la que se formaba una delegación en cada país para la negociación de asuntos sobre la frontera compartida con su contraparte.

De acuerdo con Ernesto Enríquez Coyro, el 14 de agosto de 1896 terminaron los trabajos para reponer algunos monumentos fronterizos que habían sido destruidos por rebeldes tras la guerra de secesión. No obstante, los problemas no terminaron debido al cambio de cauce de los dos ríos fronterizos, que hacía al límite internacional inestable y difícil de identificar claramente. A ello se sumaron disputas privadas y públicas sobre propiedad y jurisdicción (Enriquez Coyro). Estos problemas pronto hicieron evidente la necesidad de mayores acuerdos.

2.2.2. Delimitación de la frontera y Asignación de volúmenes.

El principal tratado para regular la distribución y uso de las aguas superficiales de los ríos que delimitan los territorios de México y Estados Unidos fue firmado el 3 de febrero de 1944, casi un siglo después del primer tratado que demarcara la frontera entre el México independiente y la Unión Americana, y que también servía como instrumento para establecer la paz una vez terminado un conflicto bélico entre ambas naciones. El tratado fue nombrado oficialmente Tratado entre el gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el gobierno de los Estados Unidos de América de la distribución de las aguas Internacionales de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo, desde Fort Quitman, Texas, hasta el golfo de México.

El acuerdo fue establecido para que México tuviera acceso al agua del río Colorado, que había sido afectado por la construcción del All American Canal iniciada por Estados Unidos en 1930. En cuanto al río Bravo, el TAF era una solución a la unilateralidad con que el gobierno estadounidense buscaba controlar totalmente ese cuerpo de agua, argumentando que su uso correspondía a su territorio por encontrarse cuenca arriba. Por medio de este tratado se creó la Comisión Internacional de Límites y Aguas, México Estados Unidos. También se asignó a cada país cierto volumen de líquido del río Bravo, y se fijó un monto garantizado para México de las aguas del Colorado. Asimismo, se dictaminó la forma en la que cada país construiría y daría mantenimiento a las obras necesarias para garantizar el cumplimiento de las disposiciones del acuerdo. Sobre el río Tijuana el tratado dispuso que tanto la CILA como los gobiernos llevarán a cabo estudios y construirán la infraestructura pertinente para la mejor distribución su cauce.

2.2.2.1. Disposiciones sobre la cuenca del río Colorado en el Tratado de Aguas de 1944

Las disposiciones, relativas al río Colorado se encuentran en el tercer capítulo del tratado, entre los artículos 10 al 16, además del artículo 27, distribuidos de la siguiente manera:

Artículo 10: Asignación de volúmenes del río Colorado a México

Artículo 11: Entrega de los volúmenes asignados a México

Artículo 12: Obras asignadas a cada parte

Artículo 13: Compromisos de los dos gobiernos

Artículo 14: Pagos de la parte Mexicana por el uso del Canal todo Americano

Artículo 15: Tablas anuales de entregas mensuales

Artículo 27: Derivación complementaria hacia el canal del Álamo

De los anteriores, los más significativos para la cuenca del Río Colorado son los artículos 10, 11 y el 15, de los cuales se puede resumir lo siguiente:

a. Asignación de volúmenes del río Colorado a México

El décimo artículo del convenio asigna a México un volumen garantizado de 1,850.234, 000 metros cúbicos (1.500,000 acres pies) anualmente. El mismo artículo da la posibilidad de que tenga acceso a volúmenes adicionales si a juicio de la sección estadounidense existe en el río Colorado un volumen que exceda del necesario para abastecer tanto el consumo en Estados Unidos como el volumen garantizado a México. Esas asignaciones extraordinarias no podrán superar en ningún caso un volumen total de 2,096.931, 000 metros cúbicos (1,700,000 acres pies) anuales. Finalmente, establece que en caso de extraordinaria sequía o de serio accidente al sistema de irrigación de los Estados Unidos, que haga difícil a éstos entregar el volumen garantizado a México, éste podría reducirse en la misma proporción en que se reduzcan los consumos estadounidenses. En todo caso, se establece que México no adquiere ningún derecho para el uso de aguas del río Colorado además de los 1,850,234,000 metros cúbicos garantizados (Tratado de Aguas 1944, art. 10).

Tabla 1. Tratado de Aguas 1944- Volúmenes asignados a México de las aguas del río Colorado.

Concepto	Volumen (m³)	Volumen (acres-pie)
Volumen anual garantizado	1,850,234,000	1,500,000
Volumen máximo si hay entregas adicionales	2,096,931,000	1,700,000

Fuente: Artículo 10, Tratado de Aguas de 1944

b. Entrega de los volúmenes del río Colorado asignados a México

El artículo 11 del convenio hace referencia a las formas de entrega de los volúmenes asignados a México, todas ellas sujetas a la reglamentación que se da en el artículo 15. El artículo 11, en primer lugar, establece que, salvo lo dispuesto en el propio tratado, Estados Unidos entregará las aguas garantizadas a México en cualquier lugar al que lleguen en el lecho del tramo limítrofe del río Colorado.

En segundo lugar, dispone que del volumen de aguas garantizado a México en el artículo 10, Estados Unidos entregaría en cualquier lugar a que lleguen del tramo limítrofe del río, 1,233.489,000 metros cúbicos (1.000,000 de acres pies) de agua anualmente, a partir de la fecha en que se pusiera en operación la presa Davis [1950], y hasta el primero de enero de 1980. Posterior a esa fecha esta cantidad cambiaría a 1,387.675,000 metros cúbicos (1.125,000 acres pies) de agua cada año. No obstante, se prevé que en caso de que la estructura principal de derivación a que se refiere el primer inciso del artículo 12 del Tratado de Aguas quedara localizada totalmente en México, Estados Unidos entregarían, a solicitud de México, en un lugar mutuamente determinado de la línea terrestre limítrofe cerca de San Luis, Sonora, un volumen de agua que no exceda de 30.837,000 metros cúbicos (25,000 acres pies) anualmente, a menos que se convenga en un volumen mayor. En este caso, a la cantidad de 1,233.489,000 metros cúbicos (1.125,000 acres pies) que deberán entregarse en el tramo limítrofe del río, se le descontarán los volúmenes que se entregados cerca de San Luis Sonora.

En tercer lugar, se dispone que en período comprendido entre la fecha en que la presa Davis se iniciara la operación y el primero de enero de 1980, Estados Unidos entregarían anualmente a México, un volumen de 616.745,000 metros cúbicos (500,000 acres pies) y al término de dicho periodo, 462.558,000 metros cúbicos (375,000 acres pies) anuales, en la línea limítrofe

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

internacional, por conducto del Canal Todo Americano y de un Canal que una al extremo inferior de la descarga de Pilot Knob con el Canal del Álamo o algún otro canal mexicano. Se prevé que esas entregas se harían a una elevación de la superficie del agua no mayor que aquélla con la que operaba el Canal del Álamo, en el punto en que cruzaba la línea divisoria en el año de 1943 (Tratado de Aguas 1944, art. 11).

Tabla 2. Tratado de Aguas 1944- Volúmenes del río Colorado según sitios de entregas.

Lugar de entrega	Volumen (m3)	Volumen (acres-pie)
Cualquiera en el lecho del tramo limítrofe del río Colorado	1,850,234,000	1,500,000
Cualquiera del tramo limítrofe del río Colorado entre 1950 y 1980	1,233,489,000	1,000,000
Cualquiera del tramo limítrofe del río Colorado después de 1980	1,387,675,000	1,125,000
Línea limítrofe cerca de San Luis Sonora (volumen máximo a petición de México)	30,837,000	25,000
En la línea limítrofe vía Canal Todo Americano y otro que una la descarga del Pilot Knob con el Canal del álamo u otro (1950-1980)	616,745,000	500,000
En la línea limítrofe internacional vía Canal Todo Americano y otro que una la descarga del Pilot Knob con el Canal del álamo (1980-)	462,558,000	375,000

Fuente: Artículo 11, Tratado de Aguas de 1944

c. Obras asignadas a cada parte

Las obras necesarias que cada gobierno debería construir para dar cumplimiento al tratado son descritas en el artículo 12. De acuerdo a éste, México se comprometía a construir, en un lapso no mayor a cinco años a partir de la entrada en vigor del TDAI, una estructura de derivación aguas abajo del punto más al norte de la línea divisoria que se encuentra con el río. El país también haría las inversiones y labores de mantenimiento necesarias (inciso a art. 12 Tratado de Aguas, 1944).

A Estados Unidos correspondía, también en un lapso máximo de cinco años la construcción, operación y mantenimiento de la presa de almacenamiento Davis que serviría para regularizar las

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

entregas correspondientes a México. En este sentido, también quedó establecido que se construyeran otras obras necesarias para el cumplimiento de ese propósito, tales como un canal que conectara la descarga del Pilot Knobb con la frontera, así como un canal que conectara la estructura de derivación construida por México, con el sistema de canales de ese país, cerca de San Luis Sonora, en caso de que la estructura se encontrase en el tramo limítrofe del río (incisos b y c art. 12 Tratado de Aguas 1944).

Por último, se encomienda a cada sección de la CILA construir, mantener y operar “en su territorio, en el río Colorado, aguas debajo de la Presa Imperial, y en todas las otras obras usadas para entregar agua a México, las estaciones hidrométricas y dispositivos necesarios para llevar un registro completo del caudal que se entregue a México y del escurrimiento del río”. En el tramo limítrofe del río esto correría por cuenta de la CILA. Asimismo, cada sección se compromete también a recopilar e intercambiar datos periódicamente con su contraparte (inciso d Tratado de Aguas 1944, art. 12).

Tabla 3. Tratado de Aguas 1944. Obras asignadas a cada parte.

México	Estados Unidos	CILA
Presa Morelos, 23/09/1950 Estructura de derivación aguas abajo del punto más al norte de la línea divisoria que se encuentra con el río.	Presa Davis, Ayudaría a regularizar entregas a México.	Cada sección de la CILA En su territorio, otras obras para entregar agua, estaciones hidrométricas y dispositivos para su registro.
	Canal que conecte la descarga del Pilot Knobb y el límite internacional.	La CILA En el tramo limítrofe del río, otras obras para entregar agua, estaciones hidrométricas y dispositivos para su registro.
	Canal que conecte la presa Morelos con el sistema de canales mexicano.	

Fuente: Artículo 12, Tratado de Aguas de 1944

d. Compromisos de los dos gobiernos

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

El artículo 13 también asigna obras a ambos países, ya sea en conjunto o a través de la CILA. A los gobiernos corresponde construir las obras necesarias, a consideración de la CILA, para el control de las avenidas del bajo Río Colorado, entre la Presa Imperial y el Golfo de California. También se les encomienda construir y solventar los gastos para las obras que la CILA apruebe. Ésta última recomendaría la proporción en que las obras serían operadas y mantenidas por ella misma o por cada sección. En todo caso, se dispone que los gobiernos paguen en partes iguales la operación y mantenimiento conjuntos, además de que cada uno será responsable de los gastos generados por las obras que se le asignen (art. 13 Tratado de Aguas, 1944).

Tabla 4. Tratado de Aguas 1944. Responsabilidades sobre obras.

Gobiernos	CILA
Construcción de obras necesarias, para el control de las avenidas del bajo Río Colorado, entre la Presa Imperial y el Golfo de California	Informar a los gobiernos las obras que deberán construir para el control de las avenidas del bajo río colorado, entre la Presa Imperial y el Golfo de California.
Construcción y gastos para las obras que la CILA apruebe	Recomendar la proporción en que las obras serían operadas y mantenidas por ella misma o por cada sección.
Pago por operación y mantenimiento conjuntos o individuales.	

Fuente: Artículo 13, Tratado de Aguas de 1944

e. Pagos de la parte mexicana por el uso del Canal Todo Americano (All-American)

En el artículo 14 se detallan los pagos a los que se obliga México por concepto de utilización del Canal Todo Americano para la entrega del agua que le es asignada por medio del Tratado de Aguas de 1944. En primer término, se le asigna una parte de los costos reales de la construcción de la presa Imperial y del tramo Imperial-Pilot Knob del Canal todo Americano, la cual sería determinada una vez que iniciara operaciones la presa Davis, en proporción a los usos por cada parte. En segundo lugar, la parte mexicana también debía pagar una porción por los costos totales de mantenimiento y operación de dichas obras. Esos montos dependerían de la cantidad de agua entregada anualmente a cada país para su uso por medio de esas obras (incisos a y b art. 14, Tratado de Aguas, 1944).

Además, se precisa que en el caso de que los ingresos por la venta de energía hidroeléctrica generada en Pilot Knob puedan usarse para compensar una parte o la totalidad de los costos de las obras ya enumeradas, la parte que México deberá pagar del costo de dichas obras sería reducida o reembolsada en la misma proporción en que se reduzca o reembolse el saldo insoluto de los costos totales. No obstante, esos dividendos sólo podrían tener ese fin una vez que hubieran sido compensados los costos de las obras construidas para generar energía eléctrica.

Tabla 5. Tratado de Aguas 1944. Pagos de México por el uso del canal All-American.

Concepto	Monto
Una parte de los costos reales de la construcción de la presa Imperial y del tramo Imperial-Pilot Knob del Canal todo Americano	Dependiente de la proporción en que cada parte use esas obras y se fijaría una vez que iniciara operaciones la presa Davis.
Una parte de los costos totales de mantenimiento y operación de la presa Imperial y del tramo Imperial-Pilot Knob del Canal Todo Americano	Dependiente de la cantidad de agua entregada anualmente a cada país para su uso por medio de esas obras

Fuente: Artículo 14, Tratado de Aguas de 1944

f. Tablas anuales de entregas mensuales

En el artículo 15 quedan especificados los límites máximos y mínimos de gastos en las entregas a México de acuerdo con el momento del año en que se realicen. Estos lineamientos se establecen en “Tablas de entrega” (tabla 1 y tabla 2), cuyos montos se muestran en la tabla 6.

El artículo también destaca algunas disposiciones especiales relativas a las entregas. En primer término, señala que Estados Unidos no estará obligado a entregar por el Canal Todo Americano más de 616.745,000 metros cúbicos (500,000 acres pies) anuales entre la puesta en marcha de la Presa Davis hasta 1980, ni más de 462.558,000 metros cúbicos (375,000 acres pies) anuales después de esa fecha. Se dispone que en caso de que por acuerdo mutuo se entregare a México cualquier parte de los volúmenes de esos volúmenes en puntos de la línea terrestre internacional distintos del lugar en que se haga la entrega por el Canal Todo Americano, los gastos de entrega y los volúmenes de agua arriba mencionados y determinados en la tabla 2 de este artículo, serían disminuidos en las cantidades correspondientes (inciso B art. 15 Tratado de Aguas, 1944).

Otro elemento es que, durante los meses de enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre de cada año, Estados Unidos tendrá la opción de entregar, en el lugar de la línea divisoria internacional determinado en el del artículo 11, de cualquier fuente que sea, una parte o la totalidad del volumen de agua que deberá ser entregada en ese lugar de acuerdo con la Tabla II del artículo 15. Esta opción no produciría la reducción de los volúmenes totales anuales especificados para ser entregados por el Canal Todo Americano, a menos que dicha reducción fuera solicitada por la Sección Mexicana, y no implicara el aumento del volumen total de agua tabulada que deba entregarse a México (inciso C art. 15 Tratado de Aguas, 1944).

Se prevé además que en cualquier año en que haya agua en el río en exceso de la necesaria para satisfacer las demandas en los Estados Unidos y el volumen garantizado de 1,850.234,000 metros cúbicos (1.500,000 acres pies) asignado a México, EUA declara su intención de cooperar con México procurando abastecer, por el Canal Todo Americano, los volúmenes adicionales de agua que México desee, si ese uso del Canal y de las obras respectivas no resultare perjudicial a Estados Unidos. Por su parte, México se compromete a intentar reducir las entregas de agua por el Canal Todo Americano si dicha reducción pudiere llevarse a efecto sin perjuicio para México y si fuere necesaria para hacer posible el aprovechamiento total del agua disponible sin disminuir el total de entregas de agua tabulado para México (inciso D art. 15 Tratado de Aguas, 1944).

Además, en cualquier año en que haya agua en el río en exceso de la cantidad necesaria para satisfacer las demandas en los Estados Unidos y el volumen garantizado de 1,850.234,000 metros cúbicos (1.500,000 acres pies) asignado a México, la Sección de los Estados Unidos lo informará así a la Sección Mexicana para que esta pueda tabular las aguas excedentes hasta completar un volumen máximo de 2,096.931,000 metros cúbicos (1,700,000 acres pies). En este caso los volúmenes totales que se entregarán de acuerdo con las Tablas números I y II serán aumentados en proporción a sus respectivos volúmenes totales y las dos tablas así incrementadas quedarán sujetas a las mismas limitaciones establecidas, para cada una de ellas, en el párrafo A de este artículo (inciso E art. 15 Tratado de Aguas, 1944). Se dispone también, que México tendrá el derecho de aumentar o disminuir, mediante avisos dados a la Sección de los Estados Unidos con 30 días de anticipación, cada uno de los volúmenes mensuales establecidos en esas tablas, en una cantidad que no exceda de 20% de su respectivo monto (inciso F art. 15 Tratado de Aguas, 1944).

Finalmente, queda establecido que, en cualquier año, el volumen total de agua que deberá entregarse de acuerdo con la tabla 1 a que se refiere el párrafo A del artículo 15, podrá ser aumentado, si el volumen de agua que se entregue de acuerdo con la tabla 2 se redujere en el mismo volumen y si las limitaciones en cuanto a gastos de entrega estipulados para cada tabla se aumentan y se reducen correspondientemente (inciso G artículo 15 Tratado de Aguas, 1944).

g. Derivación complementaria hacia el canal del Álamo

El artículo 27 prevé que no se aplicarán los artículos 10, 11 y 15 durante los primeros cinco años de vigencia del tratado o hasta que inicie operaciones la Presa Davis y la presa mexicana (Presa Morelos) si esto ocurre primero. En ese lapso se consideraba que México podría construir y operar, a sus expensas y en territorio estadounidense, “una estructura de derivación provisional en el lecho del río Colorado, destinada a derivar agua hacia el canal del Álamo” sometiendo a la Sección estadounidense el plan de construcción y operación de la misma. De igual forma, durante ese periodo Estados Unidos entregarían a México, en el mismo río, volúmenes no requeridos en su territorio; y cooperarían con el país para que pudiera cubrir sus necesidades de riego con base en lo requerido en 1943 (artículo 27, Tratado de Aguas, 1944).

*Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la
cuenca del río Colorado.*

Tabla 6. Tratado de Aguas, 1944. Volúmenes asignados y tablas de entrega.

VOLÚMENES DEL RÍO COLORADO CORRESPONDIENTES A MÉXICO					
TABLAS DE ENTREGA ARTÍCULO 15		NOMBRE DEL VOLUMEN	VOLUMEN ASIGNADO EN M3	LÍMITES DE GASTO DE ENTREGA (M3/S)	
				DE OCTUBRE A FEBRERO	RESTO DE LOS MESES
TABLA 1	1	GARANTIZADO	1,850.234,000		
	2	MÁXIMO EN CASO DE EXCEDENTES	2,096.931,000	VOLÚMENES AUMENTADOS PROPORCIONALMENTE	
	2	MÁXIMO EN CASO DE EXCEDENTES	2,096.931,000	VOLÚMENES AUMENTADOS PROPORCIONALMENTE	
	3	A ENTREGAR EN CUALQUIER LUGAR 1950 (PRESA DAVIS)-1980	1,233.489,000	17-99.1	28.3- 99.1
	4	DESPUÉS DE 1980	1,387.675,000	19.1 - 113.3	31.9-113.3
	5	A ENTREGAR EN LUGAR CERCA DE SAN LUIS SONORA, SI LA ESTRUCTURA DE DERIVACIÓN QUEDARA EN MÉXICO (deducibles del volumen 3)	30.837,000	SUJETAS A LA SUBTABLA QUE PROPORCIONARÁ LA SECCIÓN MEXICANA	
TABLA 2		A ENTREGAR ADEMÁS DEL VOLUMEN ASIGNADO EN LÍNEA LIMÍTROFE, POR MEDIO DE CANAL TODO AMERICANO			
	6	DE 1950 (PRESA DAVIS) A 1980	616.745,000	8.5-56.6*	14.2-56.6*
	7	A PARTIR DE 1980	462.558,000	6.4- 42.5*	10.5-42.5*

*LÍMITES MÁXIMOS, LAS ENTREGAS HECHAS EN UN LUGAR DISTINTO, LOS VOLÚMENES DE LA TABLA 2 SERÁN DISMINUÍDOS EN CANTIDADES CORRESPONDIENTES (ART. 15)

3. ESTADO DEL ARTE

Al utilizar series históricas con fines de análisis y modelamiento, se asume generalmente que las series disponibles son estacionarias en la media (estacionariedad de primer orden) y en la varianza (estacionariedad de segundo orden). Sin embargo, si hay cambios o tendencias en los datos, la suposición de estacionariedad en las series es equivocada. Por lo tanto, los cambios o tendencias necesitan ser identificados, calculados, modelados y, en algunos casos, removidos de la serie original antes de desarrollar cualquier otro tipo de análisis, ya que al trabajar con series que presenten este tipo de anomalías se pueden tomar decisiones completamente inadecuadas. Es por esto que antes de realizar un análisis con información existente, se debe verificar si ésta cumple o no con las condiciones de homogeneidad.

3.1. PRUEBAS DE CAMBIO EN LA MEDIA

Se dice que una serie de tiempo presenta salto en la media, cuando se observa un cambio abrupto en el nivel o la magnitud de la media de determinada variable, estos cambios pueden ser negativos o positivos. Cuando ocurre un cambio positivo, el nivel de la media de la variable en estudio se incrementa después del punto de cambio, si ocurre lo contrario se dice que el cambio es negativo.

Las pruebas estadísticas utilizadas para detección de cambios en la media son:

- Prueba de Mann-Whitney (MW).
- Prueba T simple (TS).
- Prueba T Modificada (TM).
- Prueba del Signo (SI).
- Prueba de Sumas Acumuladas (SA).
- Prueba de Homogeneidad de Abbe (AB).
- Prueba de Pettitt (PE)

3.2. PRUEBAS DE TENDENCIA EN LA MEDIA

Se dice que una serie presenta tendencia en la media, cuando se presenta un cambio progresivo y gradual en la magnitud o el nivel de la media. Esta tendencia puede ser positiva si hay un incremento gradual de la magnitud de la media o negativa si ocurre lo contrario. En algunos casos se puede confundir un cambio en la media con una tendencia o viceversa, ya que una tendencia se puede aproximar a una sucesión de saltos en la media, por esto se debe tener bastante cuidado en el momento de concluir cuál de las dos no homogeneidades es la que tiene la serie en estudio, para hacer el análisis correcto. En este sentido, las pruebas de cambio en la media pueden ser utilizadas para detectar tendencias en la serie analizada, de manera que, si la hipótesis de cambio no puede ser rechazada, puede ser un indicativo de que la serie tiene una tendencia.

Las pruebas estadísticas utilizadas para la detección de tendencias en la media son:

- Prueba T Simple para detección de tendencias lineales, (TE)
- Prueba de Hotelling – Pabst, (HP)
- Prueba de Mann – Kendall, (MK)
- Prueba Sen, (SE)

La prueba de tendencia de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) es una de las pruebas no paramétricas ampliamente utilizadas para detectar tendencias significativas en series de tiempo. La prueba Mann-Kendall de tendencia, está en función de los rangos de las observaciones en lugar de sus valores reales, por lo que no se ve afectado por la distribución real de los datos y es menos sensible a los valores atípicos. La prueba de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), como otras pruebas de tendencias no paramétricas, es más adecuada para detectar tendencias en series de tiempo hidrológicas, donde las muestras generalmente están sesgadas y pueden estar contaminados con valores atípicos.

3.3. DIFERENCIAS ENTRE PRUEBAS PARAMÉTRICAS Y NO PARAMÉTRICAS.

Las pruebas paramétricas asumen distribuciones estadísticas subyacentes a los datos. Por tanto, deben cumplirse algunas condiciones de validez, de modo que el resultado de la prueba paramétrica

*Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la
cuenca del río Colorado.*

sea fiable. Por ejemplo, la prueba t de Student para dos muestras independientes será fiable solo si cada muestra se ajusta a una distribución normal y si las varianzas son homogéneas.

Las pruebas no paramétricas no deben ajustarse a ninguna distribución. Pueden por tanto aplicarse incluso aunque no se cumplan las condiciones de validez paramétricas.

Las pruebas paramétricas tienen muchas veces sus equivalentes no paramétricas. Encontrará las diferentes pruebas paramétricas junto con sus equivalentes (en el caso de que existan) en esta tabla.

Tabla 7. Pruebas paramétricas y sus equivalentes no paramétricas.

Familia	Pregunta	Datos	Hipótesis Nula	Pruebas paramétricas	Equivalentes no paramétricas
Comparar ubicaciones*	Comparar una media observada con una teórica	Medidas en una muestra y 1 media teórica (1 número)	Media observada = media teórica	Prueba t para una muestra	
	Comparar dos ubicaciones* observadas (muestras independientes)	Medidas sobre dos muestras	Las ubicaciones* son diferentes	Prueba t dos muestras independientes	Prueba de Mann-Whitney
	Probar la equivalencia entre dos muestras	Medidas sobre dos muestras	Las ubicaciones* son diferentes	Prueba de equivalencia (TOST)	
	Comparar varias ubicaciones* observadas (muestras independientes)	Medidas en varias muestras	Las ubicaciones* son idénticas	ANOVA	Prueba de Kruskal-Wallis; Prueba de Mood
	Comparar dos ubicaciones* observadas (muestras dependientes)	Dos series de medidas cuantitativas sobre las mismas unidades (antes-después...)	Las ubicaciones* son idénticas	Prueba t para dos muestras relacionadas	Prueba de Wilcoxon
	Comparar varias ubicaciones observadas* (muestras dependientes)	Several series of quantitative measurements on the same units	Las ubicaciones* son idénticas	ANOVA de medidas repetidas, modelos mixtos	Prueba de Durbin, Skillings-Mack, Prueba de Page
Comparar series de datos binarios	Comparar series de datos binarios (muestras dependientes)	Varias series de medidas binarias sobre las mismas unidades	Las ubicaciones* son idénticas		Prueba de McNemar (para 2 series); Prueba Q de Cochran (para más de 2 series)
Comparar varianzas	Comparar 2 varianzas (podría usarse para comprobar la asunción 3)	Medidas en dos muestras	varianza(1) = varianza(2)	Prueba de Fisher	
	Comparar varias varianzas (podría usarse para comprobar la asunción 3)	Medidas en varias muestras	varianza (1) = varianza (2) = varianza (n)	Prueba de Levene	
Comparar proporciones	Comparar una proporción observada con una teórica	1 proporción observada con su tamaño de muestra asociado, una proporción teórica	proporción observada = proporción teórica	Pruebas para una proporción (chi-cuadrado)	
	Comparar entre sí proporciones observadas	Tamaño de la muestra asociado a cada categoría	proporción(1) = proporción (2) = proporción (n)	Chi-cuadrado	
	Comparar proporciones observadas con proporciones teóricas	Tamaño de la muestra y proporción teórica asociada a cada categoría	proporciones observadas = proporciones teóricas	Prueba de Bondad del Ajuste Multinomial	
Pruebas de asociación	Probar la asociación entre dos variables cualitativas	Tabla de contingencia o dos variables cualitativas	variable 1 & variable 2 son independientes	Chi-cuadrado sobre tabla de contingencia	Prueba Exacta de Fisher; método Monte Carlo
	Pruebas de asociación entre dos variables cualitativas a través de varios estratos	Varias tablas de contingencia o dos variables cualitativas con un identificador de estrato	variable 1 & variable 2 son independientes		Prueba de Cochran-Mantel-Haenszel (CMH)

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

	Probar la asociación entre dos variables cuantitativas	Medidas de dos variables cuantitativas en la misma muestra	variable 1 & variable 2 son independientes	Correlación de Pearson	Correlación de Spearman
	Probar la asociación entre una variable binaria y otra cuantitativa	Medidas de una variable binaria y otra cuantitativa	Las dos variables son independientes	Correlación Biserial	
	Probar la asociación entre una serie de proporciones y una variable ordinal	Tabla de contingencia o de proporciones y tamaños de las muestras	Las proporciones no cambian de acuerdo con la variable ordinal		Prueba de tendencias de Cochran-Armitage
	Probar la asociación entre dos tablas de variables cuantitativas	Dos tablas de variables cuantitativas	Las tablas son independientes	Prueba de coeficiente RV	
	Probar la asociación entre dos matrices de proximidad	Dos matrices de proximidad	Las matrices de proximidad son independientes		Prueba de Mantel
Pruebas de series temporales	Probar la presencia de una tendencia a lo largo del tiempo	Una serie de datos clasificada por fecha (serie temporal)	No existe tendencia a lo largo del tiempo en la variable evaluada		Prueba de tendencias de Mann-Kendall
Pruebas sobre distribuciones	Comparar una distribución observada con una teórica	Medidas de una variable cuantitativa en una muestra; parámetros de la distribución teórica	Las distribuciones observadas y teóricas son iguales		Kolmogorov-Smirnov
	Comparar dos distribuciones observadas	Medidas de una variable cuantitativa en dos muestras	Las dos muestras siguen la misma distribución		Kolmogorov-Smirnov
	Comprobar la normalidad de una serie de medidas (podría usarse para comprobar las asunciones 2, 4 y 7)	Medidas sobre una muestra	La muestra sigue una distribución normal	Pruebas de Normalidad	
Prueba de valores atípicos	Comprobar la existencia de valores atípicos (outliers)	Medidas sobre una muestra	La muestra no contiene valores atípicos (siguiendo la distribución normal)	Prueba de Dixon / Prueba de Grubbs	Gráfico de cajas (boxplot) (no es una prueba estadística)

Fuente: xlstat

- Ventajas de las pruebas no paramétricas contra las paramétricas.

Las pruebas de tendencia paramétricas, aunque más poderosas, requieren que los datos se distribuyan normalmente y son más sensible a los valores atípicos. Es decir, Las pruebas no paramétricas son más robustas que las paramétricas. En otras palabras, son válidas en un rango más amplio de situaciones (exigen menos condiciones de validez).

- Ventajas de las pruebas paramétricas contra las no paramétricas.

Por otro lado, La ventaja de usar una prueba paramétrica en lugar de una no paramétrica consiste en que la primera tiene más potencia estadística que la segunda. En otras palabras, una prueba paramétrica tiene mayor capacidad para conducir a un rechazo de H₀. La mayoría de las veces, el valor p asociado a una prueba paramétrica es menor que el valor p asociado a su equivalente no paramétrica ejecutada sobre los mismos datos.

4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MEDIO FÍSICO

4.1. LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN TERRITORIAL DE LA CUENCA

La cuenca trasfronteriza del río Colorado de finida por el U.S. Bureau of Reclamation (USBR) se localiza en el suroeste de los estados Unidos y el noreste de México entre las coordenadas geográficas extremas de latitud 43°27' N y 110°20'N, y de longitud 105°38' O y 116°57' O, drenando un área aproximada de 637 137.08 km², que es equivalente al 7% de la superficie de Estados Unidos por lo que es considerado uno de los sistemas hídricos más importantes de Norteamérica.

Desde su nacimiento, producto del deshielo que ocurre en las montañas Rocallosas, en Estados Unidos, el río Colorado recorre aproximadamente 2 334 km. El río fluye hacia el suroeste en dirección del Golfo de California, cruzando diversos ecosistemas y siete estados en los Estados Unidos, los cuales comprenden los estados de Wyoming y Colorado hacia Utah, Nevada, Nuevo México, Arizona y finalmente California. Adicionalmente, los últimos 160 km del cauce del río Colorado se encuentran al sur de la frontera internacional México-Estados Unidos, entre los estados de Baja California y Sonora.

Con relación a la porción de la cuenca del río Colorado que se encuentra en territorio mexicano, esta comprende una extensión aproximada de 5 923.16 km², teniendo como subcuencas la cuenca propia del río Colorado, el río Las Abejas, Canal El Álamo, Canal Cerro Prieto, río Nuevo, río Hardy, río Pescadores y Bajo río Colorado. De entre estos destacan el río Hardy, con una longitud de 26 km, formado por aguas de retorno agrícola del Valle de Mexicali y el río Nuevo, formado por aguas de retorno agrícola y residuales domesticas e industriales de Mexicali (figura 6).

La parte de la cuenca del río Colorado que se encuentra en México, se ubica dentro de la región hidrológica 7 denominada "río Colorado", la cual tiene una extensión de 6 911 km² (CONAGUA, Atlas del Agua. Comisión Nacional del Agua, 2015), constituida exclusivamente por el territorio situado hacia los márgenes izquierdo en el Estado de Sonora y derecho en Baja California, así como el tramo final del río Colorado. Adicionalmente la región hidrológica está compuesta por una cuenca más denominada "Bacanora-Mejorada", localizada casi en su totalidad en el Estado de Sonora, abarcando de norte a sur desde el cruce del ferrocarril Sonora - Baja California hasta su desembocadura en el Golfo de California, y de Este a Oeste, desde el límite estatal hasta el cauce del río Colorado.

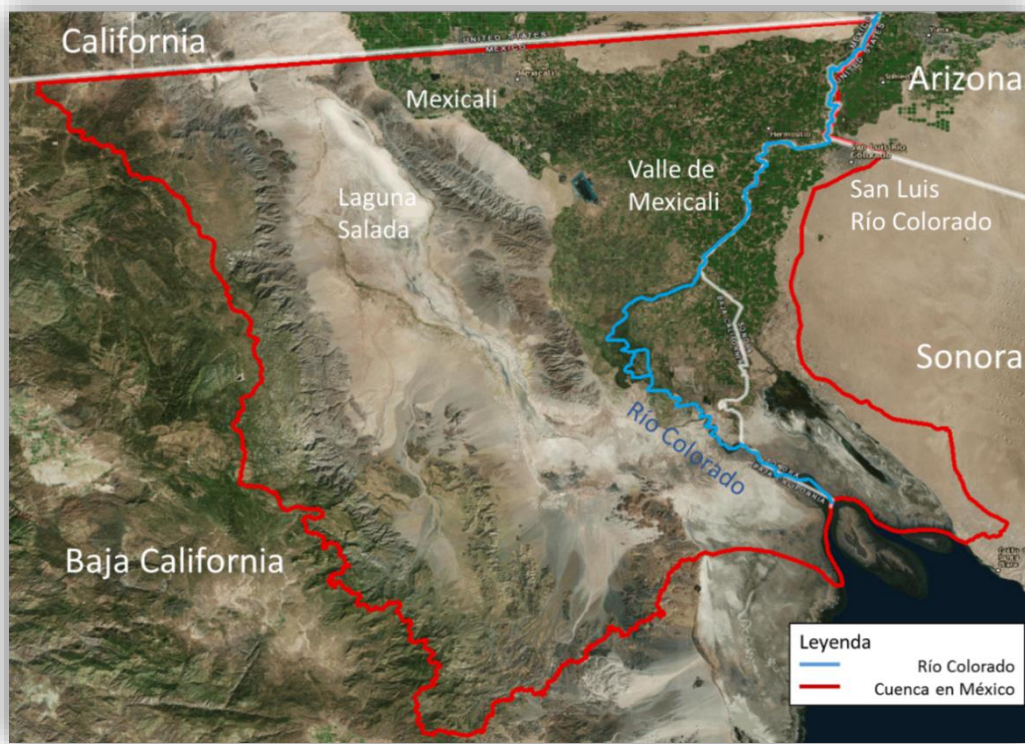


Figura 6. Cuenca del río Colorado en territorio mexicano.

(Elaboración propia)

4.2. OROGRAFÍA Y USOS DE SUELO

La cuenca del río Colorado se encuentra compuesta por una orografía muy compleja y altamente diferenciada a lo largo del mismo producto de su extensión, compuesta por altas elevaciones, acantilados, valles estrechos, planicies, etc.

Fisiográficamente la cuenca del río Colorado se divide en 5 regiones que son: la cuenca y rango en la parte sur de la cuenca; la meseta del Colorado, en la parte central; la cuenca de Wyoming, en el norte; las montañas rocosas del sur, en el este; y las montañas medias rocosas, en el norte y la región norte-central (Kumar & Duffy, 2009) (figura 7).

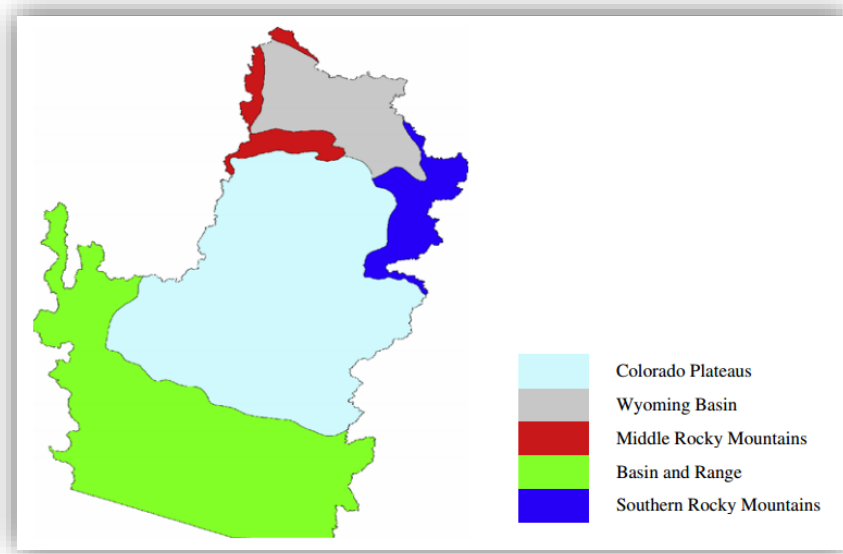


Figura 7. Regiones fisiográficas en la cuenca del río Colorado.

Fuente. <http://usgs.gov/>

Como se observa en la figura 8, existe una amplia gama de elevaciones que van en la cuenca rango de los 24 a 1200 msnm; en la meseta central de los 1200 a 2300 msnm y en las montañas orientales donde se alcanza una elevación de hasta los 4300 msnm.

En la cuenca del río Colorado hay extensos afloramientos de rocas sedimentarias y volcánicas de distintas edades, en donde las altas temperaturas conducen a la apertura de fisuras provocadas por la expansión y construcción de la misma. Además de grandes áreas de relleno cubiertas por depósitos aluviales de rocas sedimentarias como la arenisca, que se encuentran principalmente hacia la parte sur de la cuenca.

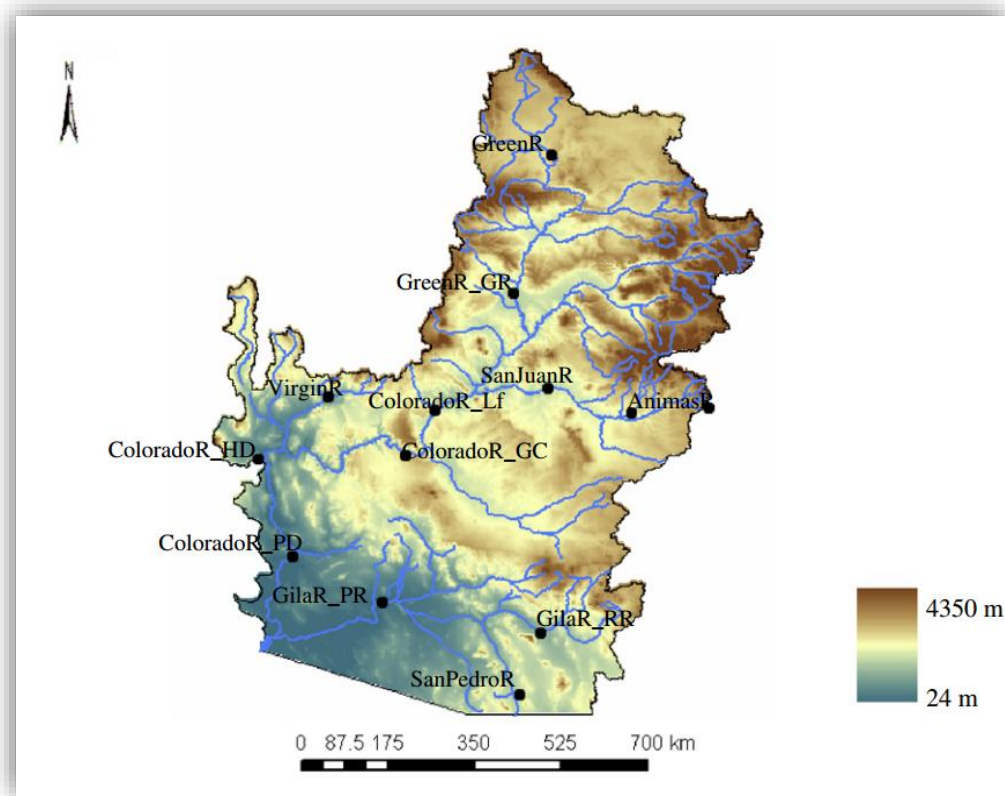


Figura 8: Mapa de elevaciones en la cuenca del río Colorado.

Fuente. (Kumar & Duffy, 2009)

El tipo de suelo predominante en la cuenca es árido y desértico de color rojo, el cual es incapaz de soportar vegetación, sin embargo, hidrológicamente, región de las montañas rocosas (cuenca alta) tienen la característica de tener una alta permeabilidad que brindan las rocas metamórficas superficiales, mientras que en la región de la meseta del Colorado y cuenca y rango (cuenca baja) se tiene una baja a moderada permeabilidad característica del lecho de roca superficial.

En cuanto a los usos de suelo en la cuenca del río Colorado, teniendo en cuenta la base de datos de la cubierta Nacional de Tierras (Fry, y otros, 2011). En la figura 9 se observa que las zonas de arbustos (61%) es la cobertura de la tierra más dominante en la cuenca en general, seguido de bosque siempre verde (19%) (tabla 8). Por otra parte, la mayoría de los pastos se localiza en la cuenca alta,

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

mientras que la mayor parte de las tierras de cultivo se localizan en la cuenca baja, y por su parte los matorrales se distribuyen en toda la cuenca.

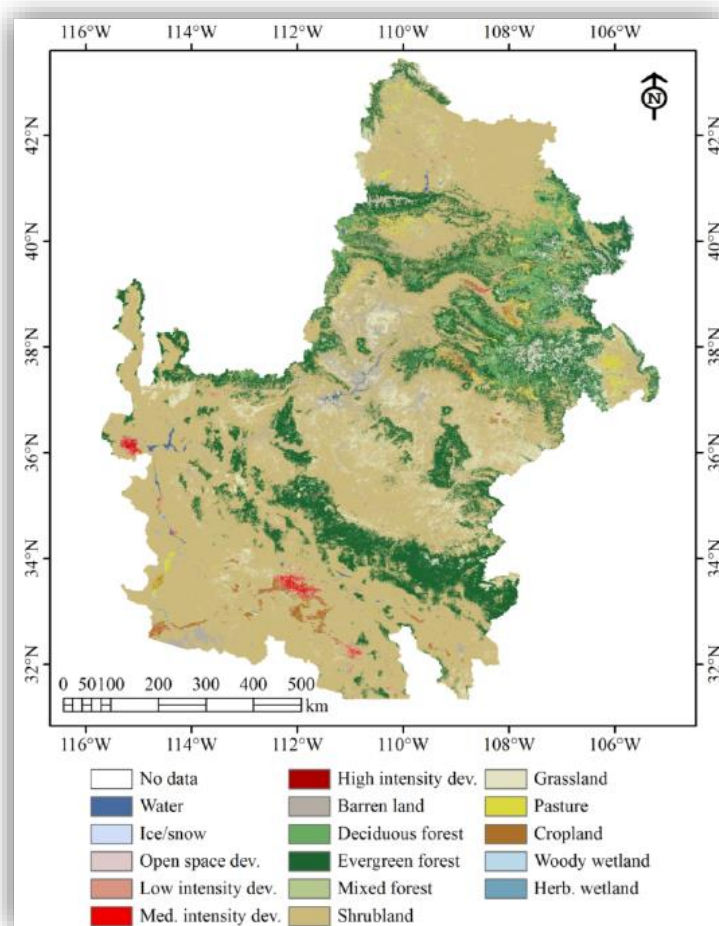


Figura 9. Distribución de los usos de suelo en la cuenca del río Colorado.

Fuente: (Singh R.K., 2014).

Teniendo en cuenta la parte de la cuenca del río Colorado que se encuentra en territorio mexicano, las rocas más antiguas son rocas del Paleozoico Superior de origen sedimentario, representadas por calizas con fósiles de crinoides y corales; subiendo estratigráficamente, continúan rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con diversos grados de metamorfismo, asignadas al sistema Triásico Inferior. Las rocas Triásicas afloran desde la Alta California "Riverside", continuando a la Sierra Juárez, este conjunto estrato-tectónico se distingue porque en los afloramientos se observan rocas graníticas y tonalitas bordeadas por gneisses y esquistos. El Cenozoico se caracteriza en

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

general por unidades de rocas sedimentarias continentales. En el Paleoceno y Eoceno, se presentan principalmente sedimentos terrígenos originados por el delta del Colorado. Finalmente, en la cima de la columna estratigráfica y dominando el Valle de Mexicali, se encuentran sedimentos fluvio-deltáicos, terrazas aluviales y depósitos eólicos.

Tabla 8. Distribución de los usos de suelo en la cuenca del río Colorado.

Land Use/Land Cover	NLCD Code	%
Water	11	0.40
Ice/snow	12	0.05
Open space development	21	0.79
Low intensity development	22	0.51
Med. intensity development	23	0.24
High intensity development	24	0.05
Barren land	31	3.34
Deciduous forest	41	3.51
Evergreen forest	42	19.35
Mixed forest	43	0.38
Shrubland	52	60.56
Grassland	71	7.73
Pasture/Hay	81	1.44
Cropland	82	0.83
Woody Wetland	90	0.58
Herbaceous Wetland	95	0.22

Fuente: (Singh R.K., 2014)

Los sedimentos deltaicos están constituidos básicamente por arcillas, limos, arenas y gravas, con coloraciones de café claro y tintes anaranjados, presentan una estratificación gruesa (3 m) y estructuras laminares en los sedimentos finos. Esta litología se observa al oriente de la presa Morelos y al sur de Cerro Prieto.

Las terrazas aluviales están conformadas por arenas y gravas de fragmentos ígneos, poco consolidados, distribuidos en la parte superior; en la porción media, se encuentran arena y grava no consolidadas de color rojizo; la base, se forma por limo y arena color rojizo de estratificación laminar. Se distribuyen principalmente al occidente del valle de Mexicali rodeando las partes bajas de las Sierras de Cucapás.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Por último, los depósitos eólicos conformados por arenas finas cuarcíferas, de estratificación delgada, con estructuras oblicuas, de color gris amarillento a gris claro y conforman estructuralmente dunas y barchanes, se localizan en la porción norte y oriental del valle de Mexicali.

La topografía de esta zona es muy regular, caracterizada por amplias planicies de pendientes suaves que se extienden del mar hacia el continente, con elevaciones que van de los 0 hasta los 100 msnm.

(Guzman, 2004)

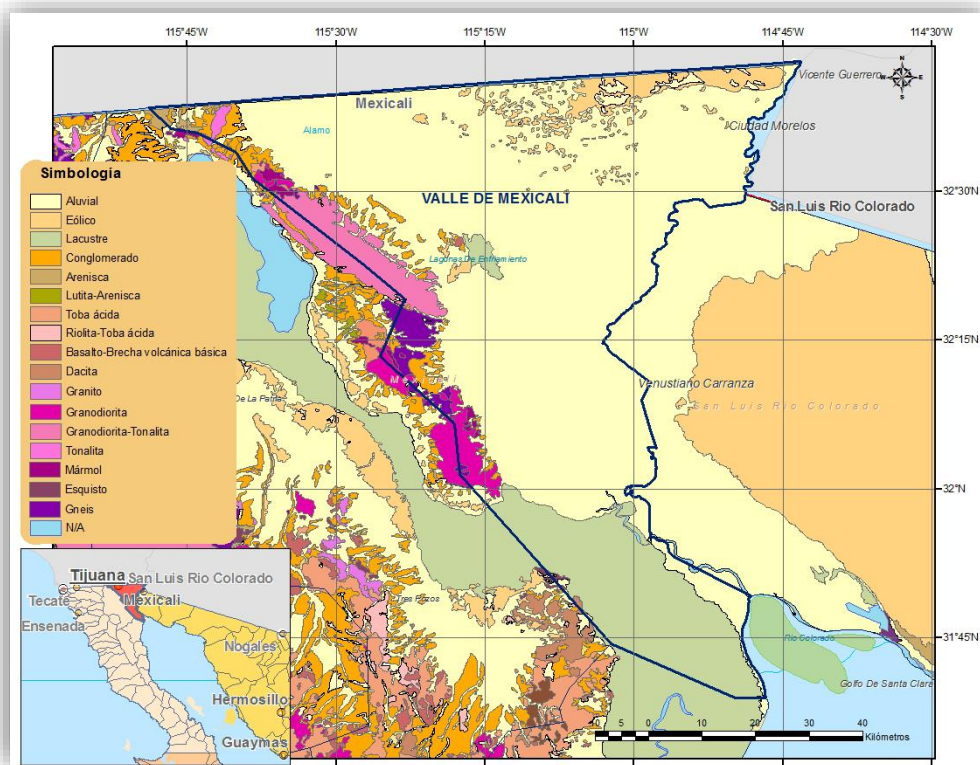


Figura 10. Mapa geológico del valle de Mexicali.

Fuente: (CONAGUA, Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Valle de Mexicali (0210), Estados de Baja California. Comisión Nacional del Agua, 2015)

Por su parte, podemos observar que predomina el matorral desértico micrófilo, las zonas destinadas al manejo agrícola, pecuario y forestal, seguido de bosque de pino, vegetación de suelos arenosos y zonas sin vegetación aparente (figura 10).

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

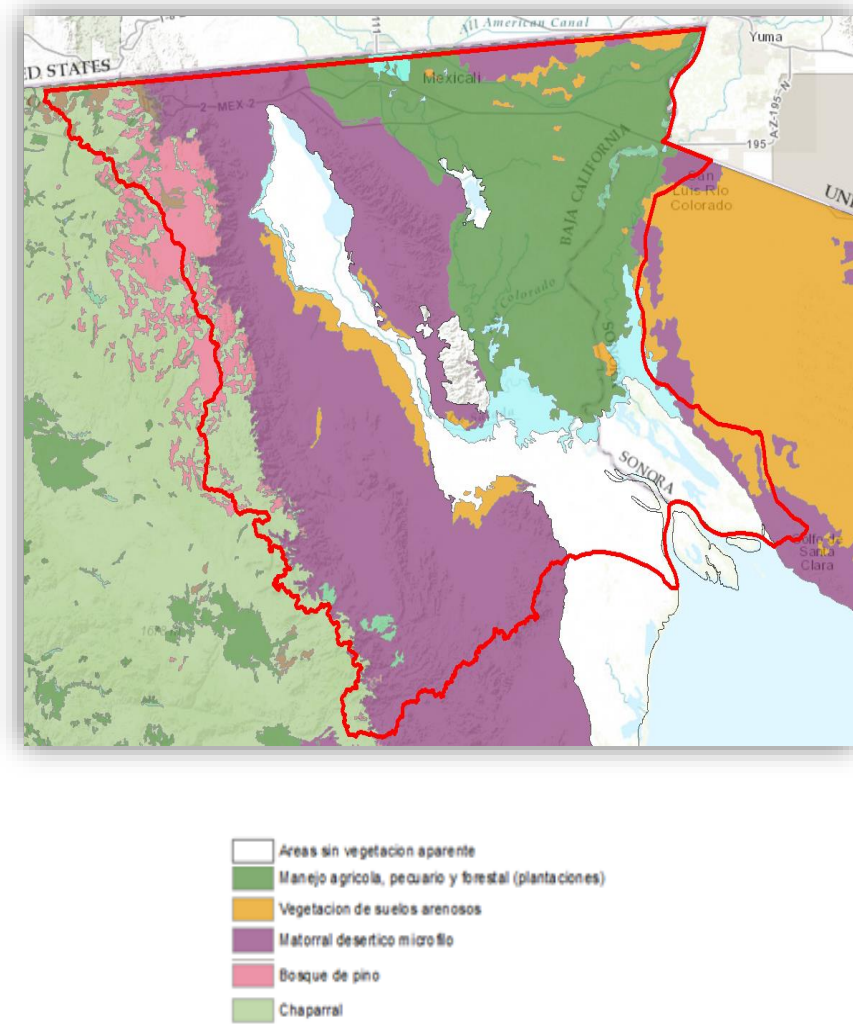


Figura 11. Distribución de los usos de suelo de la cuenca del río Colorado en México

Fuente: (CONABIO, 2016). Elaboración propia

5. METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR EL CAMBIO CLIMÁTICO

5.1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Colorado está dividida política y administrativamente en Cuenca Alta y Cuenca Baja, tomando como referencia la estación de Lee's Ferry en el estado de Arizona, localizado aproximadamente a 48.27 km al sur de la frontera entre los estados de Arizona y Utah. Esta división fue uno de los resultados y puntos de acuerdo establecidos en el "Colorado River Compact" de 1922 (figura 12)

Los estados federales de la Cuenca Alta incluyen: Wyoming, Utah, Colorado y Nuevo México; mientras que en la Cuenca Baja se encuentran comprendidos los estados de: California, Arizona, Nevada, y por parte de México: Sonora y Baja California.



Figura 12. Localización de la cuenca transfronteriza del Río Colorado.

Fuente: <https://www.coloradocollege.edu/dotAsset/e57e7c73-2983-477b-a05d-de0ba0b87a00.pdf>

Dentro de esta zona de estudio, se localizan 86 presas, 67 localizadas en el alto colorado y 19 en el bajo colorado.

5.2. RECOPIACIÓN DE DATOS

Los datos se obtuvieron de la base de datos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Ésta base de datos contiene información diversa como son los datos de precipitación, los datos de temperatura, evaporación, así como datos más recientes como la temperatura del suelo.

Para el caso del análisis estadístico, se decidió tomar como variables de los datos de precipitación y temperaturas, ya que las otras variables no cumplían con un registro extenso.

5.3. BASE DE DATOS POR REGIÓN.

5.3.1. Selección de estaciones.

Se seleccionaron las estaciones con los siguientes criterios:

- Se encuentren dentro, o sean colindantes, a la cuenca del río Colorado.
- Tengan un registro continuo de por los menos 50 años.
- Que las estaciones colindantes tengan correlación con las de la cuenca.
- Que las estaciones no hayan dejado de operar antes del 2010.

Con base en los criterios anteriores se seleccionaron 197 estaciones para la variable de precipitación y 188 estaciones para las variables de temperatura.

5.3.2. Polígonos de Thiessen.

Para realizar los análisis estadísticos, se requiere tener una muestra característica de la región alta y baja de la cuenca del río Colorado, es por ello, la necesidad de realizar los polígonos de Thiessen, ya que éste método pondera el área de influencia de cada estación. Para lo anterior, se utilizó el software ArcMap.

El primer paso a seguir, era ingresar localización de las estaciones en el software ArcMap, posterior a esto, se corroboró que la georeferenciación y las proyecciones fueran las indicadas. Teniendo lo

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

anterior, se descargó el mapa de fondo para poder apreciar la localización de las estaciones dentro de la cuenca.

Con base a la localización de las estaciones y el módulo de ArcMap “Create Thiessen Polygons”, se realizaron los polígonos de Thiessen para toda la cuenca del río Colorado. Con ayuda de la delimitación de la cuenca Alta y Baja, se obtuvieron las áreas de influencia de cada estación, para cada región, a lo largo de la cuenca (figura 13).



Figura 13: Polígonos de Thiessen Cuenca del río Colorado. Elaboración propia

5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

El objetivo del análisis estadístico, es encontrar evidencia de una posible tendencia significativa que nos indique que la región de la cuenca de río Colorado se presente un cambio climático, o de lo contrario nos muestre que los cambios en las series de tiempo, se deban a la variabilidad climática de la región.

Tomando en cuenta lo anterior, se recopilaron los datos de las estaciones climatológicas, se evaluó la factibilidad de los datos de las estaciones mediante una valoración de las mismas para que de esta manera se tuvieran estaciones con un registro continuo igual o mayor a 50 años, como se mencionó con anterioridad. Así también, se mejoraron algunos registros incompletos de las estaciones, mediante funciones de correlación espacial utilizando registros de estaciones cercanas.

Para un análisis más evidente de los resultados, se regionalizó la cuenca en dos: cuenca alta y cuenca baja. Esto se realizó tomando en cuenta que la cuenca alta tiene características diferentes a las que se presentan en la cuenca baja, por lo cual ocasionarían resultados erróneos en los análisis.

Para tener una base sólida de análisis, se tomaron en cuenta 197 estaciones con registros continuos, se obtuvo una precipitación media por medio de polígonos de Thiessen y se hicieron los análisis de tendencias para cada una de las regiones así mismo, se analizaron los fenómenos dentro de la serie mediante la prueba de Pettitt tratando de encontrar saltos bruscos en la media de los registros.

5.4.1. Mann-Kendall

La prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Kendall, 1975) es una de las principales pruebas que se realizan para el análisis de tendencias en series de tiempo climatológicas ya que, a diferencia de las pruebas paramétricas, es menos sensible a los valores atípicos. Esto se debe a que como es una prueba que analiza los rangos de los datos registrados, no se ve afectada por la distribución de los mismos.

La hipótesis nula de dicha prueba es que los datos son independientes y aleatoriamente ordenados, es decir que no hay tendencia o estructura de correlación alrededor de las observaciones. Su desarrollo se resume como:

1. Se listan los valores de las variables (precipitación por ejemplo), de forma ordenada (x_1, x_2, \dots, x_n)

2. Se obtiene el signo de la diferencia de cada par de valores al comparar sus magnitudes ($x_j - x_k$) con ($j > k$) de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{signo}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots[1]$$

3. Obtención del estadístico S de Mann Kendall, mediante la ecuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k) \dots\dots\dots [2]$$

Si S es positivo se infiere de forma subjetiva que la tendencia es creciente, cuando S es negativo se infiere que hay tendencia decreciente.

4. Con base en los indicadores, se estima una varianza para el estadístico S de Mann Kendall que considera el caso de los empates $\text{signo}(x_j - x_k) = 0$ obtenidos en el paso 2, mediante la ecuación:

$$\text{Var}[S] = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{q=1}^g t_q(t_q-1)(2t_q+5)] \dots\dots [3]$$

5. Cálculo del estadístico Z_{MK} mediante:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \dots\dots\dots[4]$$

6. A partir del estadístico Z se evalúa la hipótesis de interés, que puede ser:

- a). H0: No hay tendencia vs. H1: Hay tendencia decreciente
- b). H0: No hay tendencia vs. H1: Hay tendencia creciente

Para obtener la magnitud del cambio en la serie, se utilizó la prueba de pendiente Sen.

5.4.2. Prueba PETTITT

La prueba PETTITT es una prueba no paramétrica que se basa en los rangos y hace caso omiso de la normalidad de la serie. Se basa en el orden de rangos de los valores y_i . El estadístico que se emplea se define como:

$$X_d = 2 \sum_{i=1}^d r_i - d(n+1) \quad \text{para } d = 1, 2, 3, \dots, n$$

Y un valor en el año m que cumple la condición:

$$X_m = \max_{1 \leq d \leq n} |X_d|$$

Es una variación fuerte en la serie (Pettitt, 1979).

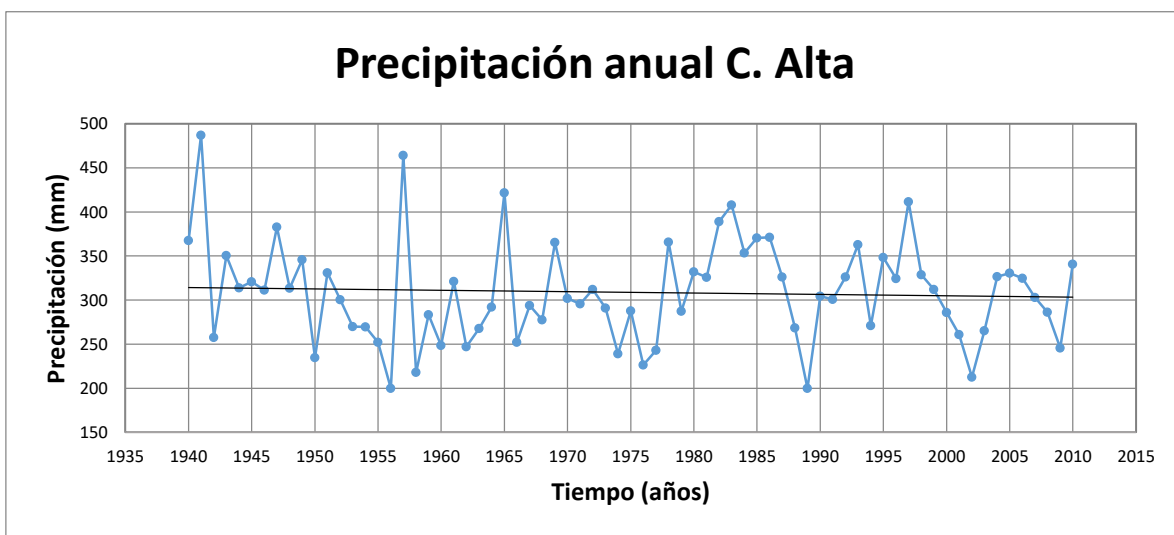
6. RESULTADOS

6.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

6.1.1. Cuenca Alta

Precipitación:

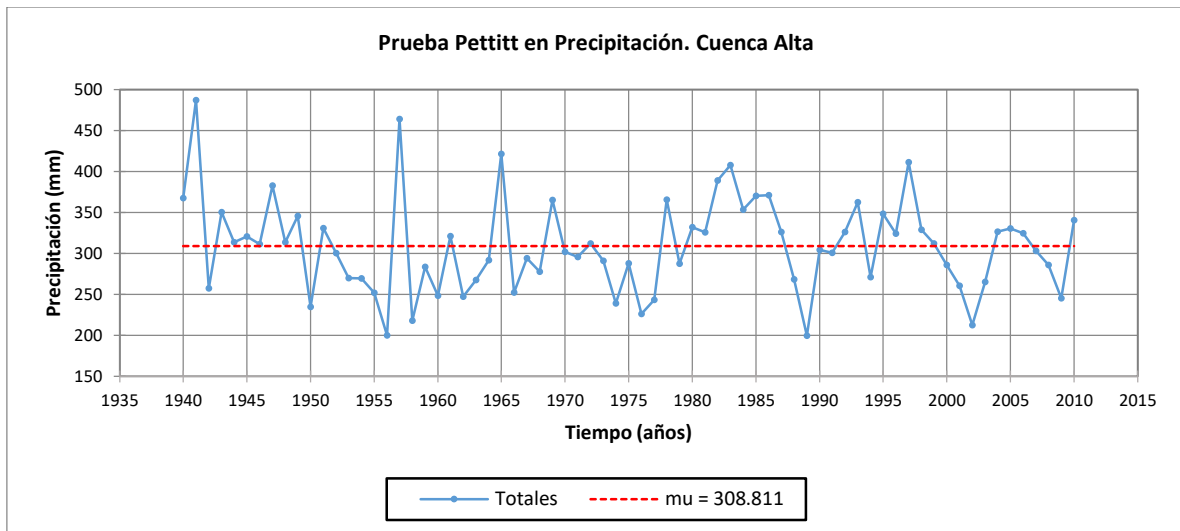
La precipitación en la cuenca alta cuenta con una media de 308 mm al año, la cual ha presentado una variabilidad a lo largo de los años, mostrando una leve disminución.



Gráfica 1: Tendencias en la precipitación Cuenca Alta

La prueba de tendencia Mann-Kendall que se realizó para la precipitación, no mostró ninguna tendencia significativa dentro de la serie temporal. Cabe destacar que, a partir del año de 1975, se observa una serie de años consecutivos por encima de la media. Otro aspecto importante es que antes de esa fecha, los datos muestran un comportamiento regular, es decir, se intercalaba la media anual y se presentaban precipitaciones cercanas a la media.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.



Gráfica 2: Prueba PETTITT en precipitación. Cuenca Alta

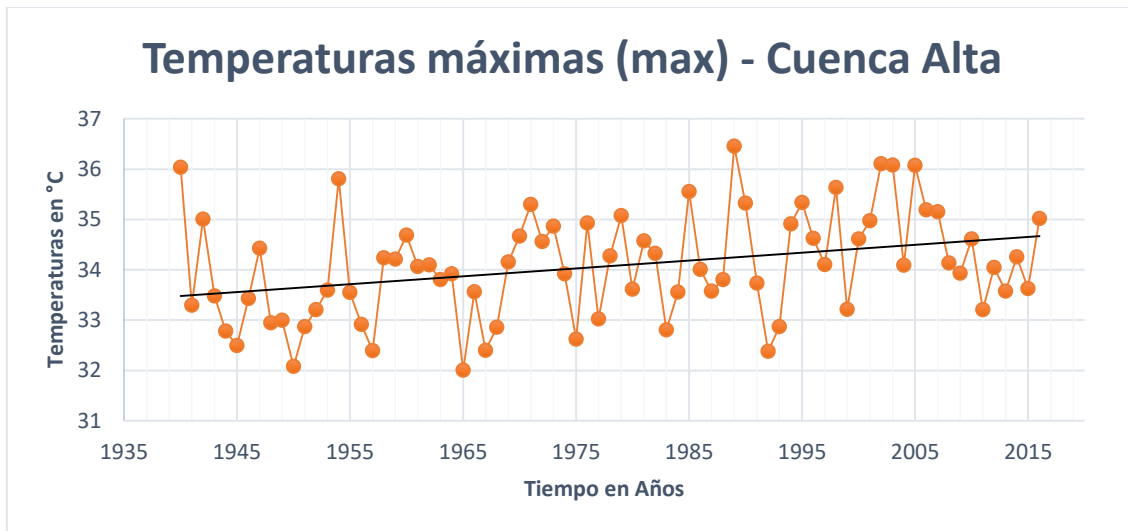
Como se observa en la gráfica 2, no se muestran variaciones significativas dentro de la muestra, es decir, presenta una homogeneidad de los datos analizados, lo cual resulta lógico si se compara con los resultados de la prueba Mann-Kendall.

Temperaturas Máximas:

- Temperaturas máximas (max).

La temperatura máxima –máxima-, se refiere a la temperatura máxima registrada durante el año, en la gráfica 3 se pueden observar los registros anuales y la línea de tendencia de los mismos.

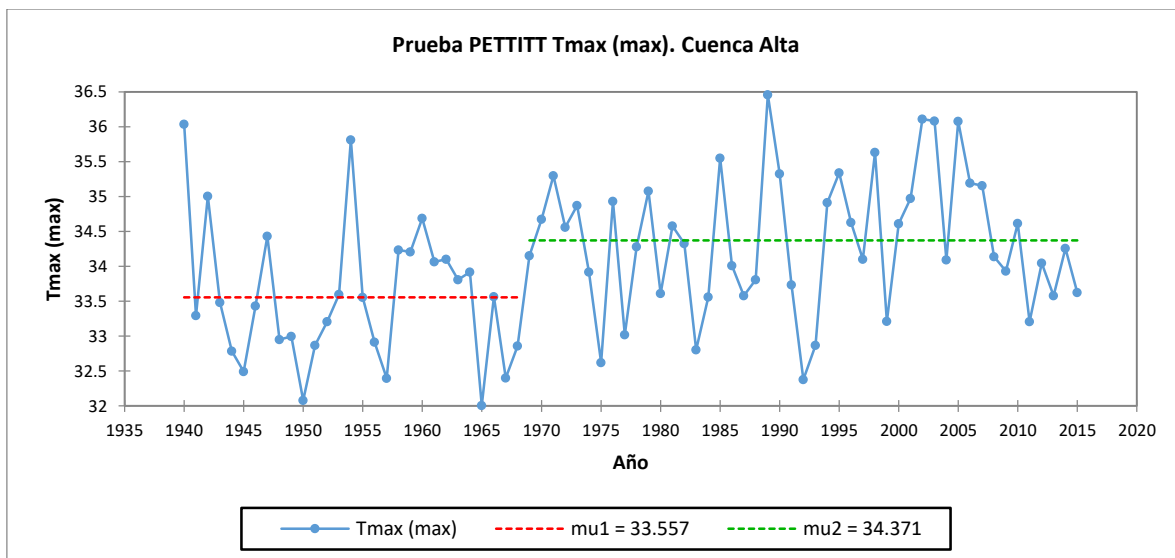
La media anual de las Tmax es de 34.06 °C con una variación aproximada de 1.05 °C.



Gráfica 3: Temperaturas máximas (máximas). Cuenca Alta.

Con base en la prueba Mann-Kendall, la tendencia que presentan las temperaturas máxima es significativa, y tiene un incremento del 0.017 de °C por año.

Por otra parte, analizando la serie temporal, se encontró un cambio brusco en el año de 1968 como se puede observar en la gráfica 4.



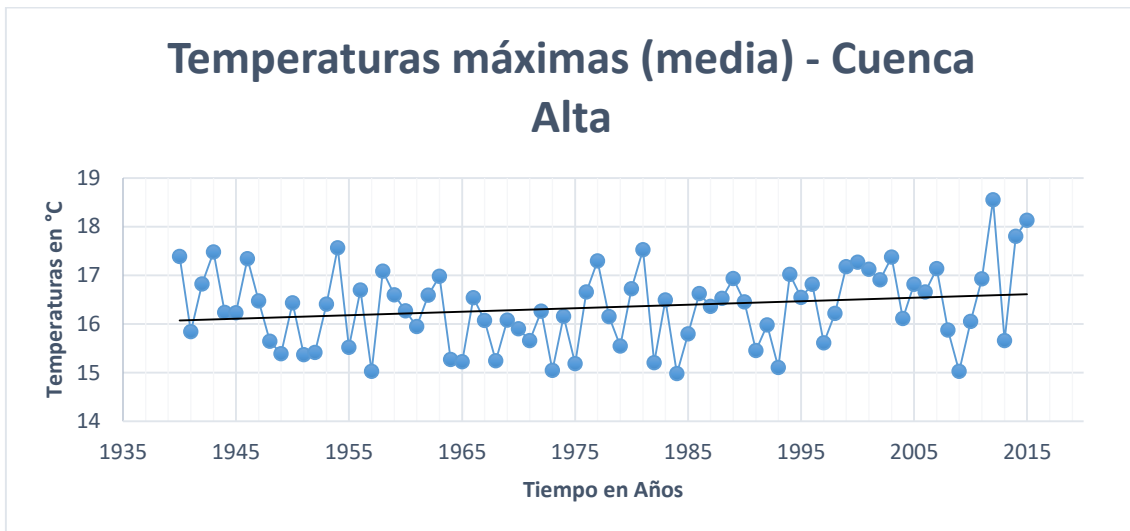
Gráfica 4: Prueba PETTITT – Temperaturas máximas (max) Cuenca Alta

Este incremento en la serie temporal fue de 33.56 °C a 34.37 °C, teniendo como diferencia +0.81 °C.

- Temperaturas máximas (media)

La temperatura máxima –media-, se refiere a la temperatura promedio de las máximas registradas durante el año. En la gráfica 5 se pueden observar los registros anuales y la línea de tendencia de los mismos.

La temperatura media de la cuenca baja es de 16.34 °C

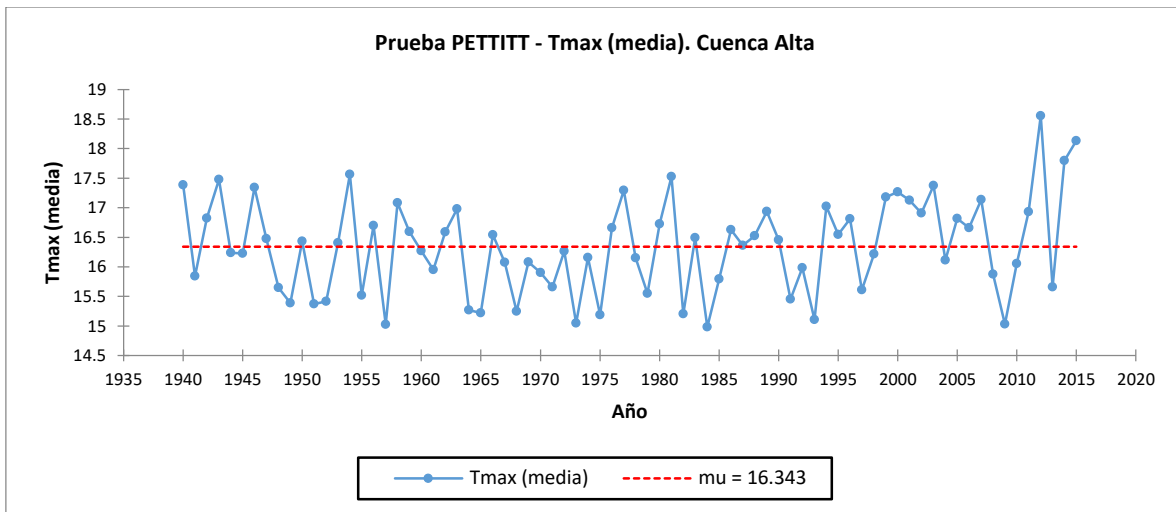


Gráfica 5: Temperaturas máximas (medias). Cuenca Alta.

La prueba Mann-Kendall no mostró una tendencia significativa; sin embargo, cabe destacar que se observan ligeros incrementos dentro de la serie temporal (0.007 °C/año), pero sin ser los suficientemente grandes para afectar a la muestra.

Realizando la prueba PETTITT, se puede observar que los datos se mantienen con la misma media (gráfica 6), es decir, no existen cambios bruscos dentro de la serie.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

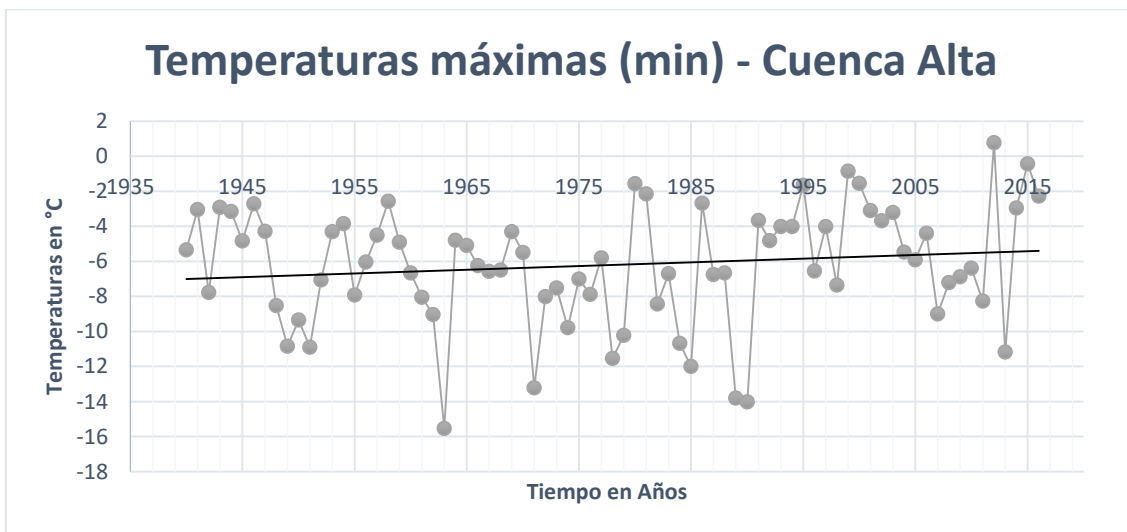


Gráfica 6: Prueba PETTITT - Temperaturas máximas (media) Cuenca Alta.

- Temperatuaras máximas (min)

La temperatura máxima –mínima-, se refiere al mínimo valor de las temperaturas máximas registradas durante el año, en la gráfica 7 se pueden observar los registros anuales y la línea de tendencia de los mismos.

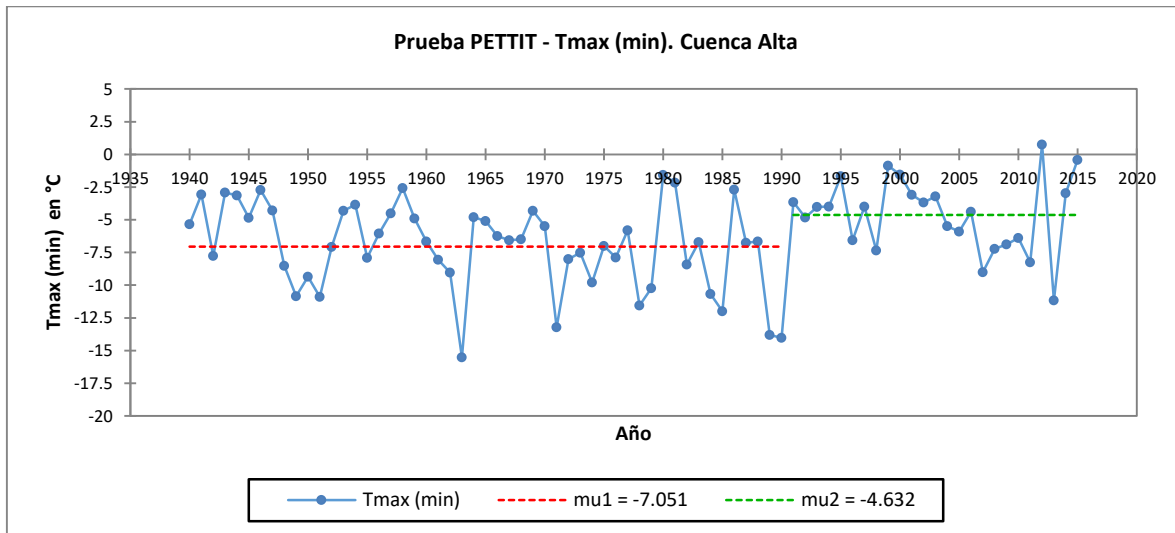
La temperatura media de la región de la cuenca alta en temperaturas máximas –mínimas- es de -6.26 °C



Gráfica 7: Temperaturas máximas (mínimas). Cuenca Alta.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

La prueba Mann-Kendall no obtuvo resultados hacia una tendencia significativa. Cabe mencionar que también la serie presenta una ligera variación hacia incrementos (0.013 °C/año), lo cual podría indicar que los cambios de temperaturas significativos, podrían presentarse en los últimos años, lo cual dificulta la comprobación de la tendencia.



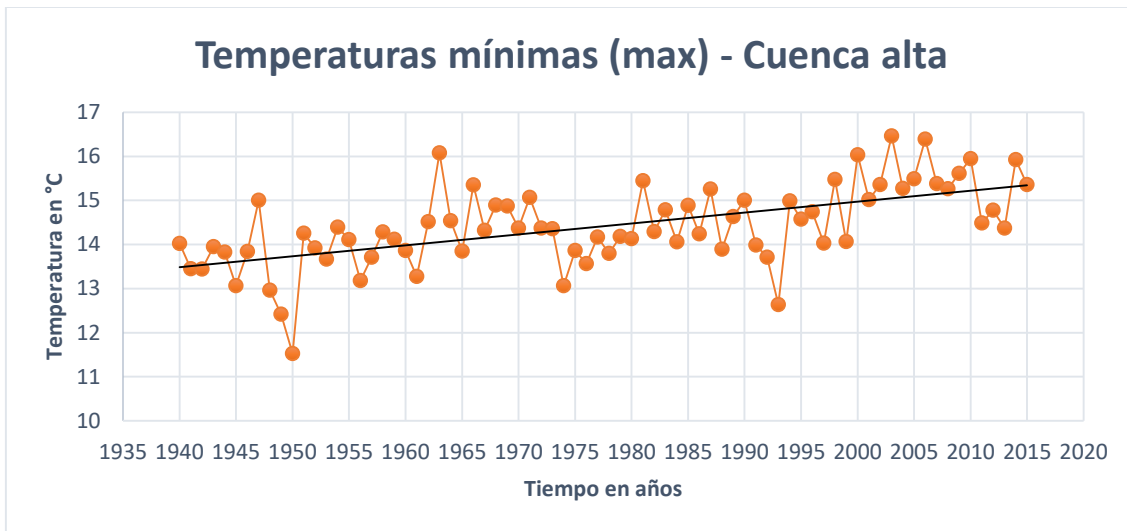
Gráfica 8: Prueba P Pettitt en Tmax (min). Cuenca Alta

Con la prueba de P Pettitt se puede confirmar lo antes mencionado, se observa un cambio dentro de la serie de 2.42 °C a partir del año de 1990; esto podría ser lo que ocasiona que no se pueda validar en la muestra una tendencia significativa.

Temperaturas Mínimas:

- Temperaturas mínimas (max).

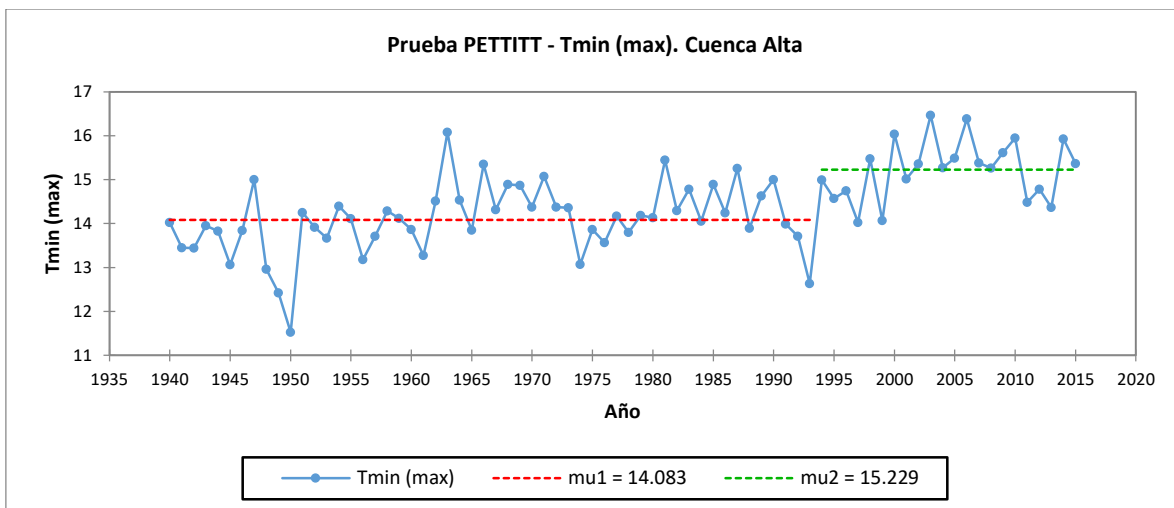
La temperatura mínima –máxima-, es aquella que se presenta a lo largo del año con el valor máximo registrado. La media de los registros máximos de las temperaturas mínimas es de 14.42 °C



Gráfica 9: Temperaturas mínimas (máximas). Cuenca Alta.

Utilizando la prueba Mann-Kendall, se obtuvo que la serie presenta tendencia significativa, con un incremento de $0.024\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año.

Utilizando la prueba PETTITT, como se muestra en la gráfica 10, se encontró que existe un cambio brusco en el año de 1993, con un incremento de $1.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la media.



Gráfica 10: Prueba PETTITT - Temperaturas mínimas (max) Cuenca Alta.

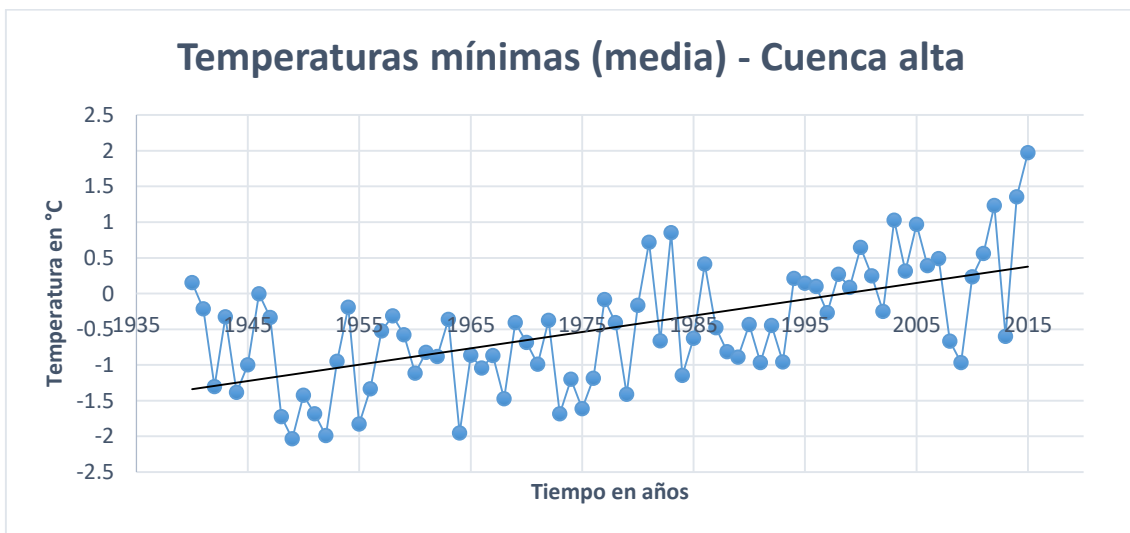
Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Relacionando los resultados de la prueba PETTITT y la prueba Mann-Kendall. Se puede decir que el incremento en las temperaturas mínimas -máximas- se ha presentado a lo largo de los años, pero en el año de 1993, se presentó un cambio brusco que modificó la media en 1.15 °C

- Temperaturas mínimas (media).

La temperatura mínima –media-, se refiere a la temperatura promedio de las mínimas registradas durante el año. En la gráfica 11 se pueden observar los registros anuales y la línea de tendencia de los mismos.

La temperatura mínima media de la cuenca baja es de 1.98 °C.

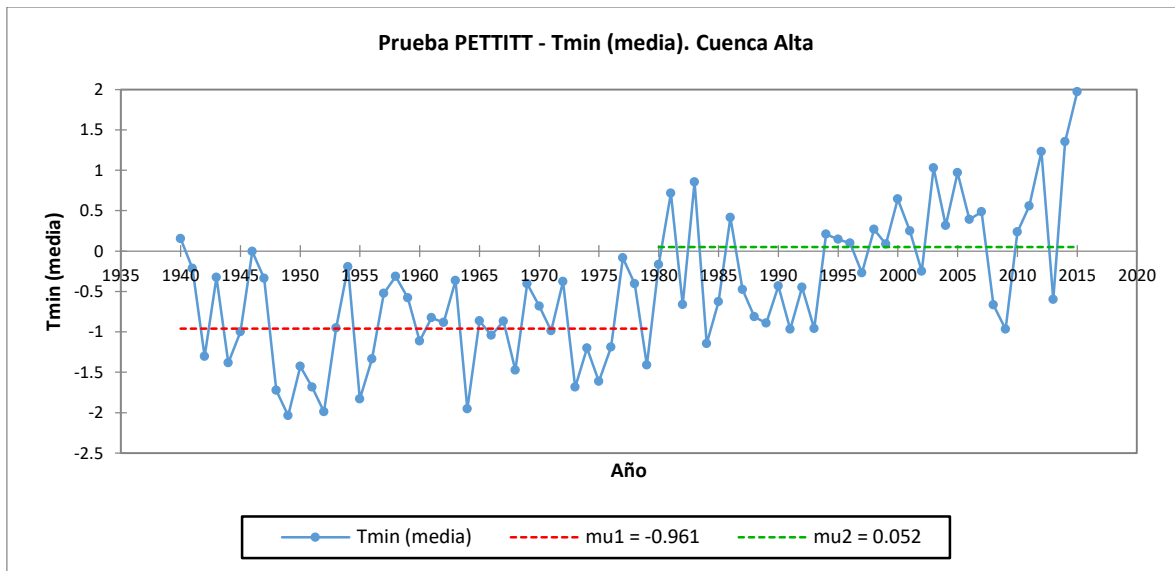


Gráfica 11: Temperaturas mínimas (medias). Cuenca Alta.

La prueba Mann-Kendall mostró que en la serie temporal se presenta una tendencia significativa, la cual cuenta con un incremento de 0.02 °C/año.

Por otra parte, la prueba PETTITT nos muestra que en el año de 1979 existe un cambio brusco dentro de la serie.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.



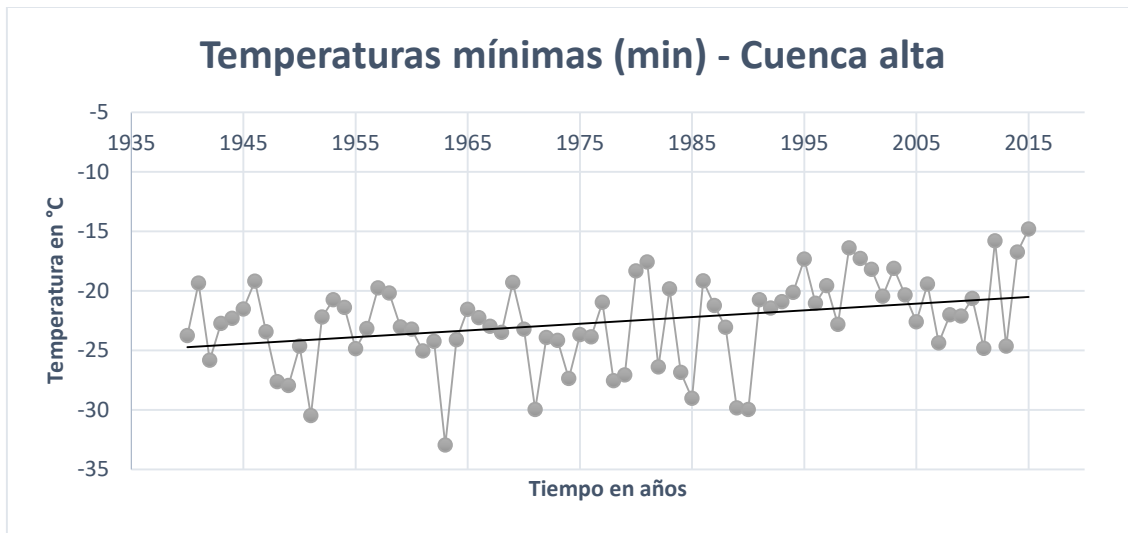
Gráfica 12: Prueba PETTITT - Temperaturas mínimas (medias). Cuenca Alta.

Como se puede observar en la gráfica 12, el cambio en la media va de -0.96 a 0.05, es decir, presenta un cambio de 1.01 °C.

- Temperaturas mínimas (min).

La temperatura mínima –mínima-, es aquella que se presenta a lo largo del año con el valor mínimo registrado. La media de los registros mínimos de las temperaturas mínimas es de -22.63 °C.

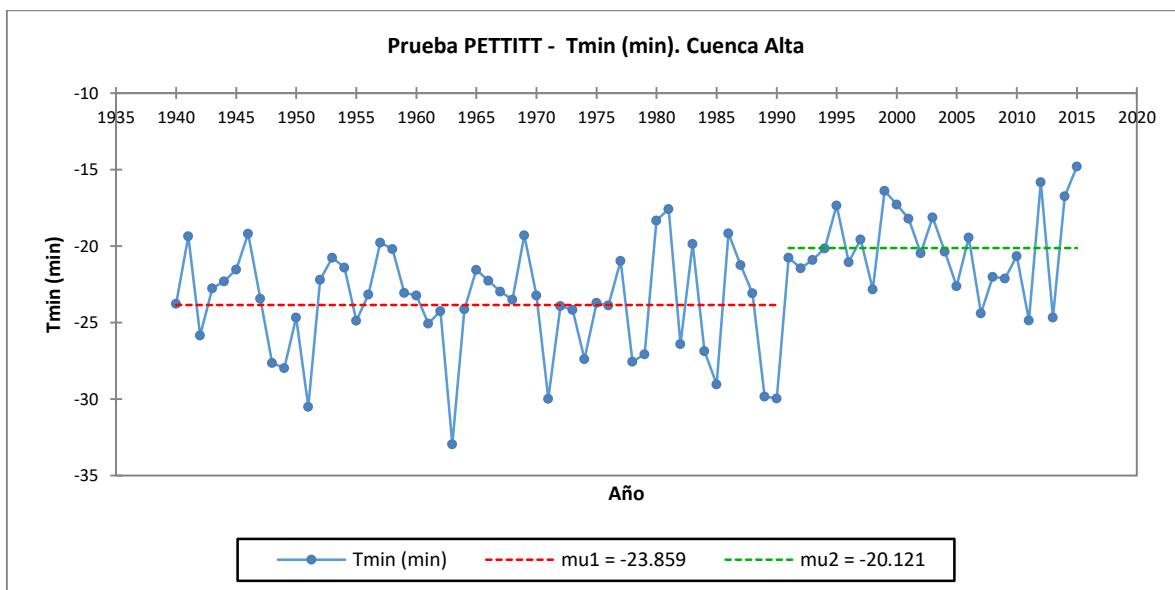
Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.



Gráfica 13: Temperaturas mínimas (mínimas). Cuenca Alta.

Analizando la serie temporal con la prueba Mann-Kendall, se obtuvo como resultado que la muestra presenta una tendencia significativa, teniendo como incremento $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/año}$.

Así también, realizando la prueba PETTITT, se observó un cambio en la serie en el año de 1990.



Gráfica 14: Prueba PETTITT - Temperaturas mínimas (min). Cuenca Alta.

Se observa en la gráfica 14, que el salto brusco se presenta de la media -23.86 hasta -20.12 , teniendo un incremento de $3.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la media.

Resumen estadístico para la Cuenca Alta:

En la tabla 9 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra una tabla resumen de las pruebas Mann-Kendall y PETTITT en la cuenca Alta:

Tabla 9. Resumen estadístico de las variables climáticas. Cuenca Alta

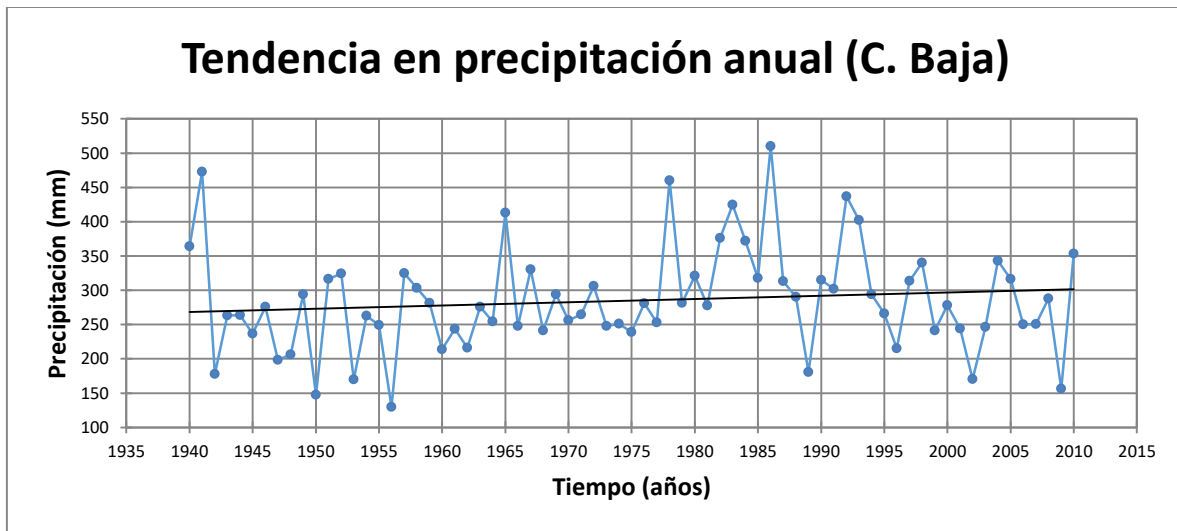
CUENCA ALTA				
	Tendencia	Magnitud de cambio	Salto brusco	Año
Precipitación				
Media	No	No aplica	No	No aplica
TMAX				
Máxima	Si	0.017	Si	1968
Media	No	No aplica	No	No aplica
Mínima	No	No aplica	Si	1990
TMIN				
Máxima	Si	0.024	Si	1993
Media	Si	0.02	Si	1979
Mínima	Si	0.05	Si	1990

6.1.2. Cuenca Baja.

Precipitación:

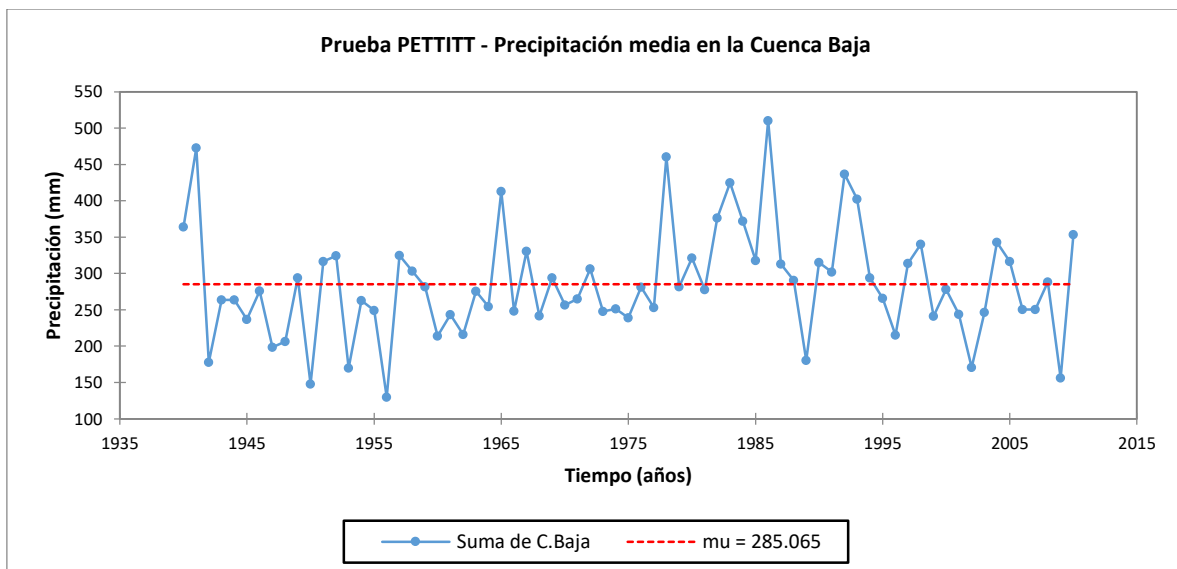
La precipitación en la cuenca baja cuenta con una media de 285 mm al año, la cual ha presentado una variabilidad a lo largo de los años, mostrando una leve disminución.

En la gráfica 15 se presenta la precipitación media de la cuenca baja desde 1940 al 2015, así también se muestra la línea de tendencia que presenta la serie.



Gráfica 15: Tendencias en la precipitación Cuenca Baja.

Se realizó la prueba Mann-Kendall para la precipitación en la cuenca baja, la cual no pudo rechazar la hipótesis nula, es decir, que no presenta tendencia significativa dentro de la serie temporal. Por otro lado, se observa una variabilidad en la precipitación tendiendo hacia un incremento.



Gráfica 16: Prueba PETTITT en precipitación. Cuenca Baja

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

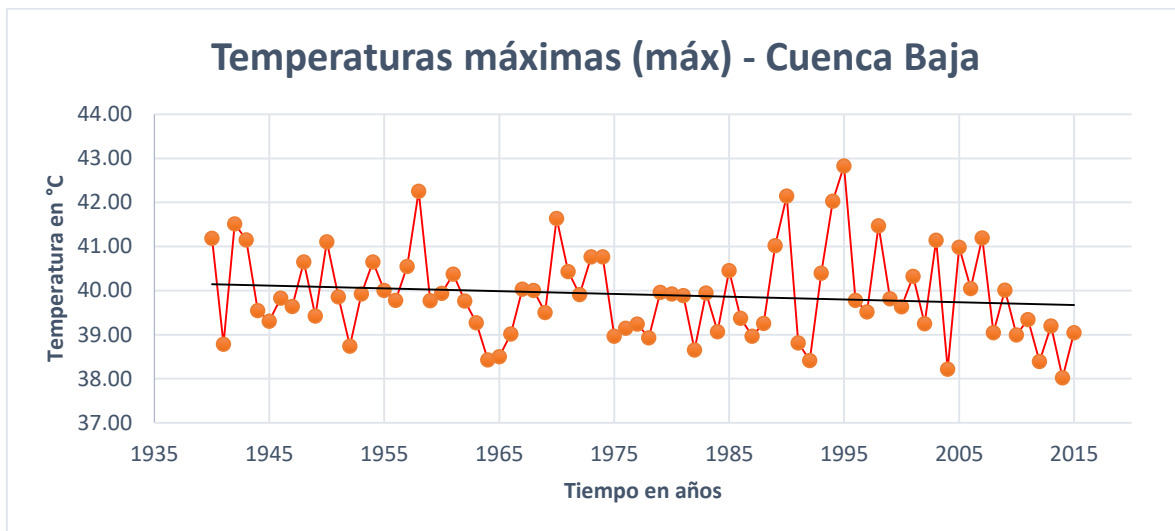
Los resultados de la prueba PETTITT nos muestran que la serie se mantiene sin cambios bruscos, es decir, no cambia la media significativamente.

Temperaturas Máximas:

- Temperaturas máximas (max).

Para la cuenca baja, la media de temperaturas máximas es de 39.93 °C.

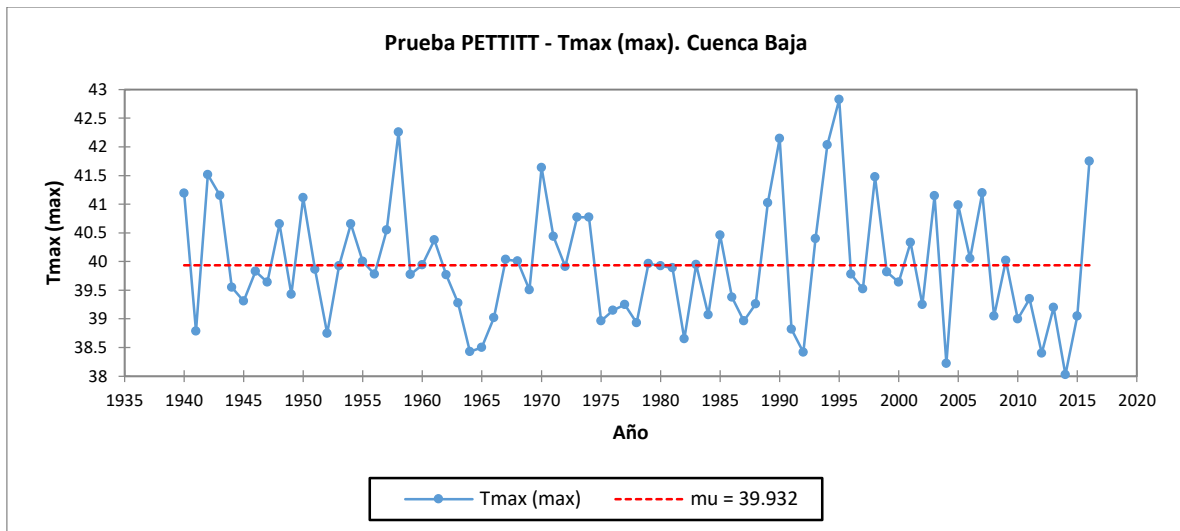
En la gráfica 17 se puede observar, la serie temporal de las mediciones de temperaturas máximas.



Gráfica 17: Temperaturas máximas (máximas). Cuenca Baja.

La prueba Mann-Kendall que se realizó para los registros, obtuvo que no se presenta ninguna tendencia significativa dentro de la serie temporal, sin embargo, los datos presentan una tendencia a la baja a lo largo de los años.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.



Gráfica 18: Prueba PETTITT - Temperaturas máximas (máximas). Cuenca Baja.

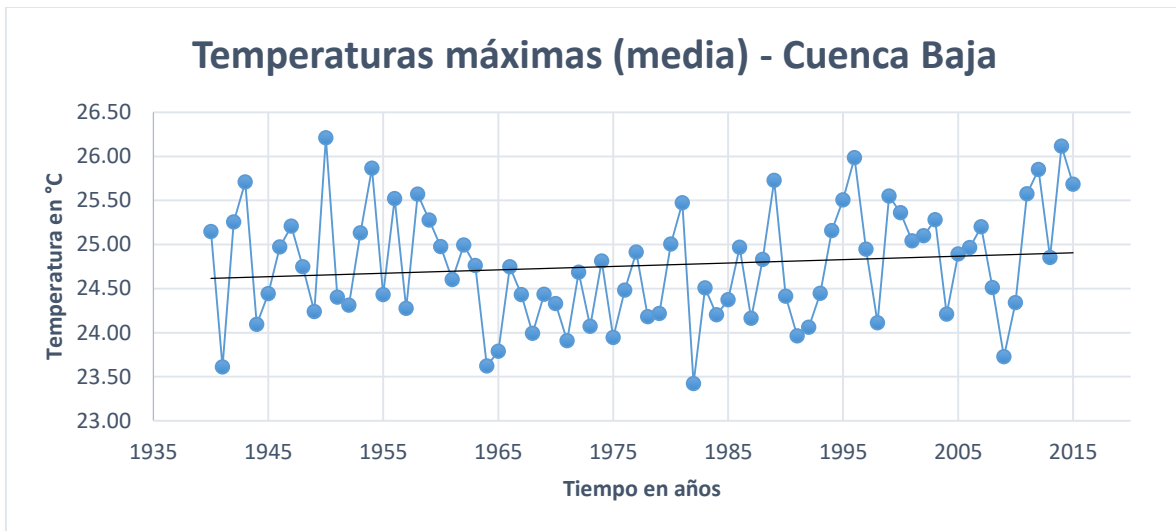
Con base en la prueba PETTITT, la cual nos muestra en la gráfica 18, que no existe presencia de cambios bruscos dentro de la serie temporal. Lo anterior, nos indica que la serie de datos se ha mantenido sin cambios bruscos en los registros de temperaturas máximas.

- Temperaturas máximas (media).

La temperatura máxima media de la cuenca baja es de 24.81 °C.

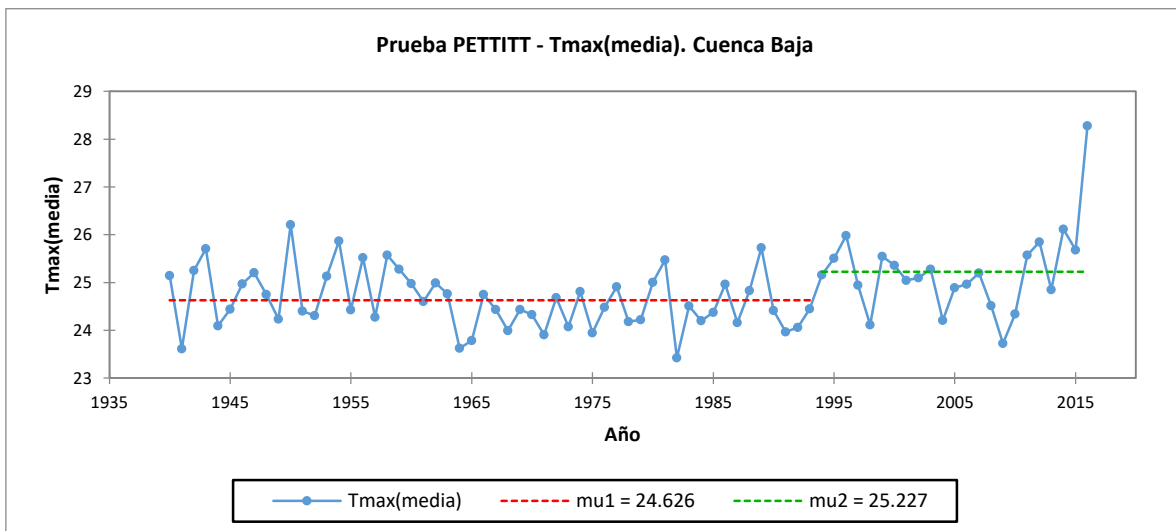
En la gráfica 19 se observan los registros de temperatura máxima media de la cuenca baja del río Colorado y su línea de tendencia.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.



Gráfica 19: Temperaturas máximas (media). Cuenca Baja.

Con base en la prueba del Mann-Kendall, se evaluó la tendencia en la serie de tiempo y resultó que no es significativa, ya que no se rechazó la hipótesis nula. Por otro lado, se observa una variabilidad en la serie que tiende hacia un incremento de temperaturas.



Gráfica 20: Prueba PETTITT - Temperaturas máximas (media). Cuenca Baja.

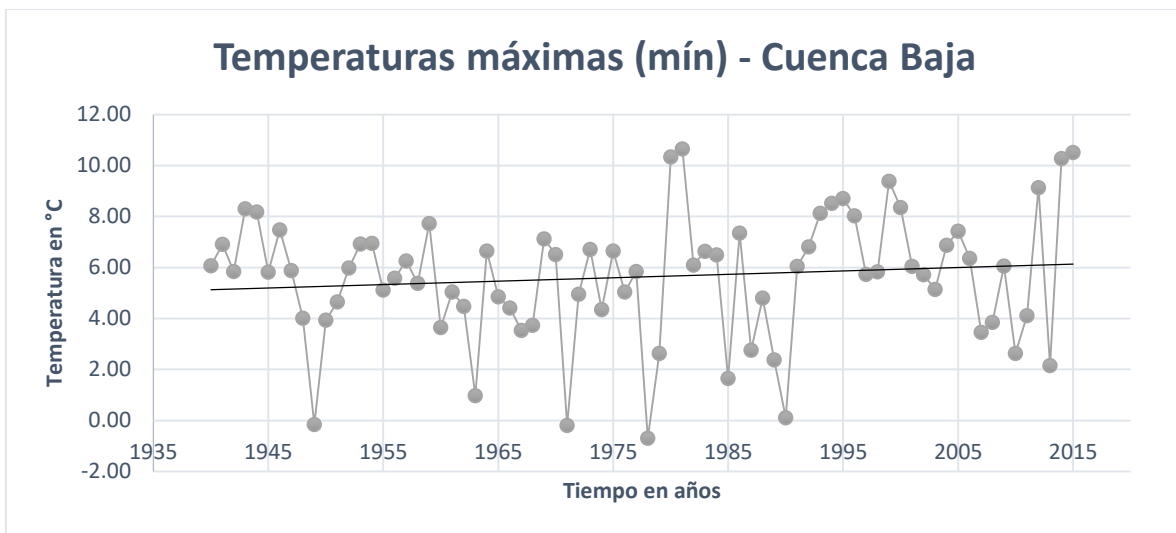
Realizando la prueba PETTITT se observa en la gráfica 20 un cambio brusco en la serie de tiempo, el cual se presenta en el año de 1993 y va de la media 24.63 °C y terminando en 25.23 °C, es decir, el cambio brusco fue de 0.6 °C.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

- Temperaturas máximas (mín).

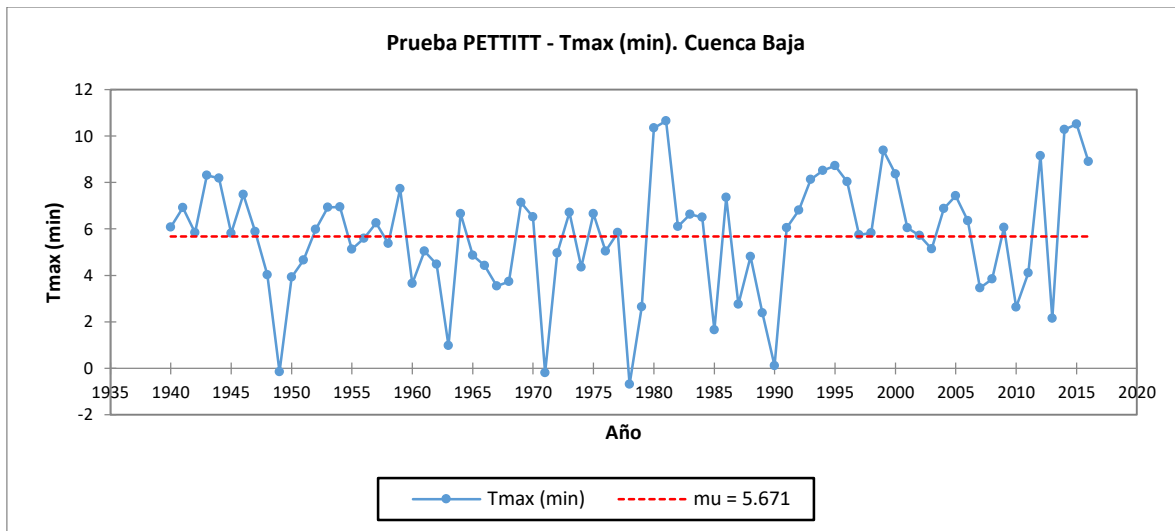
La temperatura máxima –mínima- de la cuenca baja tiene como media 5.67 °C

En la gráfica 21 se observan los registros de temperatura máxima media de la cuenca baja del río Colorado y su línea de tendencia.



Gráfica 21: Temperaturas máximas (mínima). Cuenca Baja.

Con la prueba Mann-Kendall se obtuvo que la tendencia que presenta la serie temporal de temperaturas máximas –mínimas-, no es significativa.



Gráfica 22: Prueba PETTITT - Temperaturas máximas (mínima). Cuenca Baja.

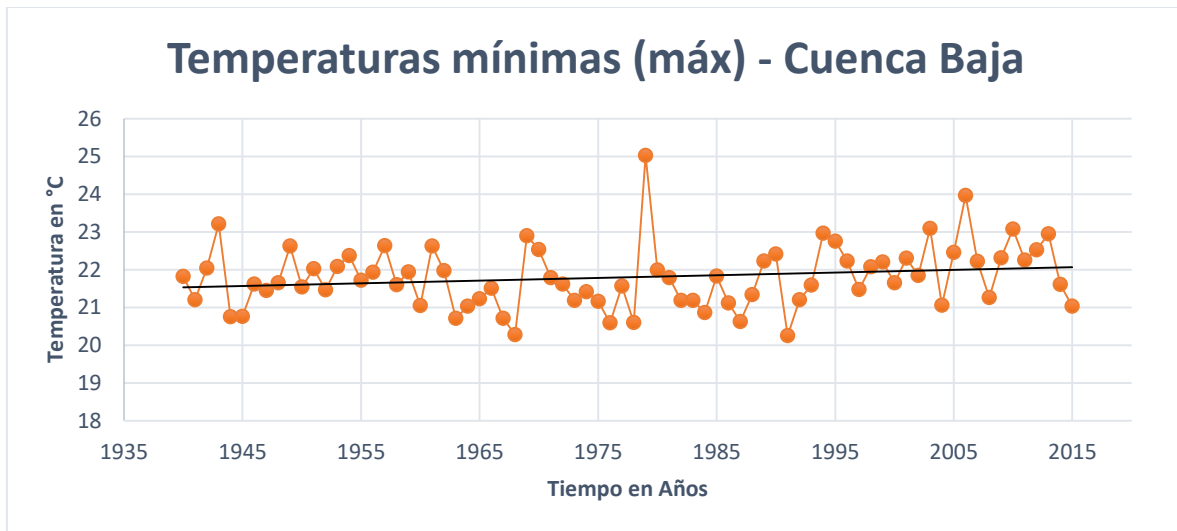
Con respecto a los cambios bruscos, se realizó la prueba de PETTITT la cual mostró que no se presentan cambios bruscos significativos en la serie. En la gráfica 22 se observa un ligero cambio en a partir del año de 1990 pero no fue significativo para la media de la serie.

Temperaturas Mínimas:

- Temperaturas mínimas (máximas).

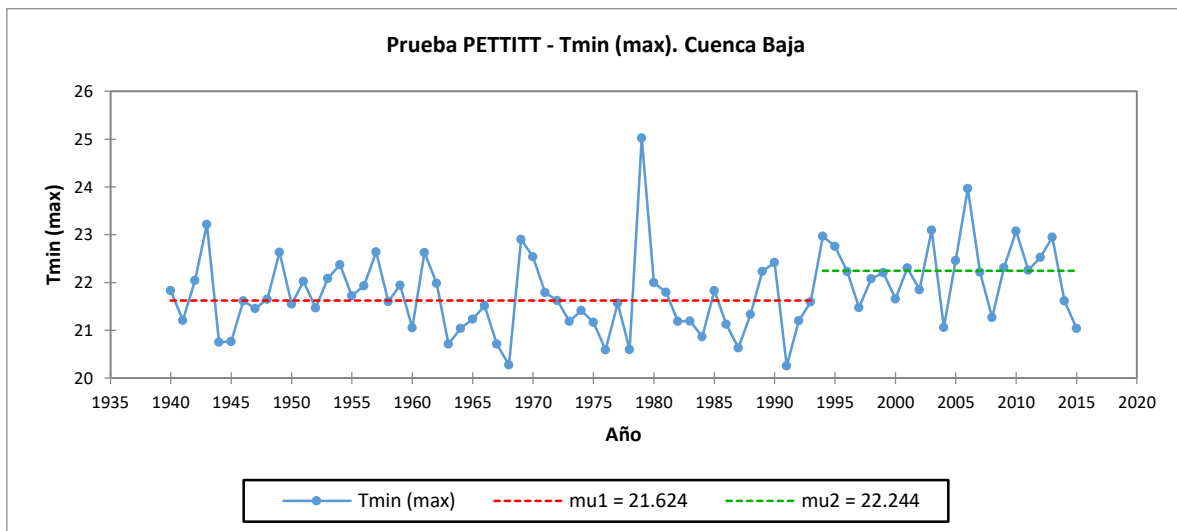
En la cuenca Baja, la temperatura mínima –máxima- promedio es de 21.80 °C.

En la gráfica 23, se pueden observar los registros de temperaturas mínimas –máximas- que se reportaron desde el año de 1940 al 2015, así como también su línea de tendencia, la cual representa ligeros incrementos en la serie.



Gráfica 23: Temperaturas mínimas (máximas). Cuenca Baja.

Realizando la prueba de Mann-Kendall para la serie temporal, se evaluó la tendencia para saber si es significativa, teniendo como resultado que la hipótesis nula se mantiene, es decir, que no existe tendencia significativa.



Gráfica 24: Prueba PETTITT - Temperaturas mínima (máxima). Cuenca Baja

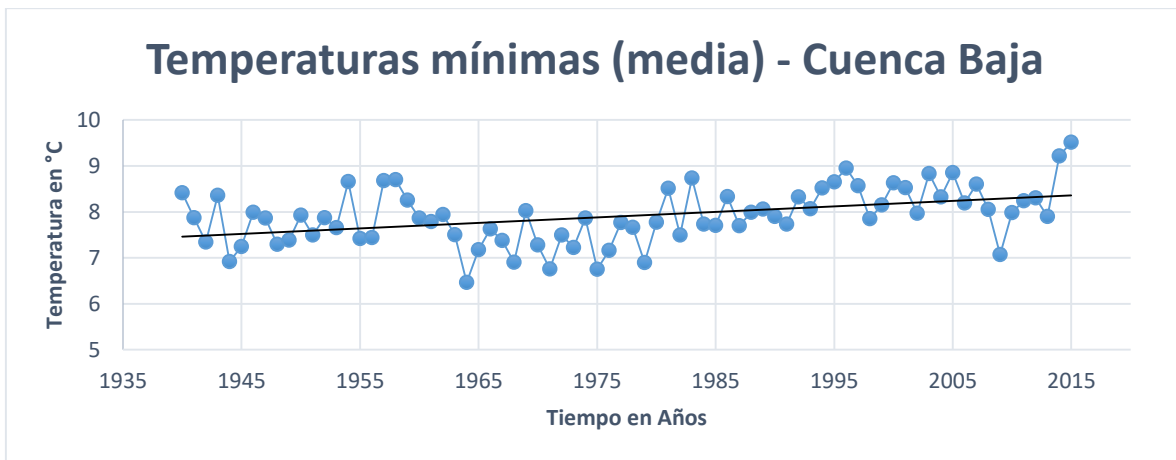
Asimismo, se realizó la prueba PETTITT, la cual encontró un cambio brusco en la serie temporal en el año de 1993 y un incremento en la media de 0.62 °C.

- Temperaturas mínimas (media).

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

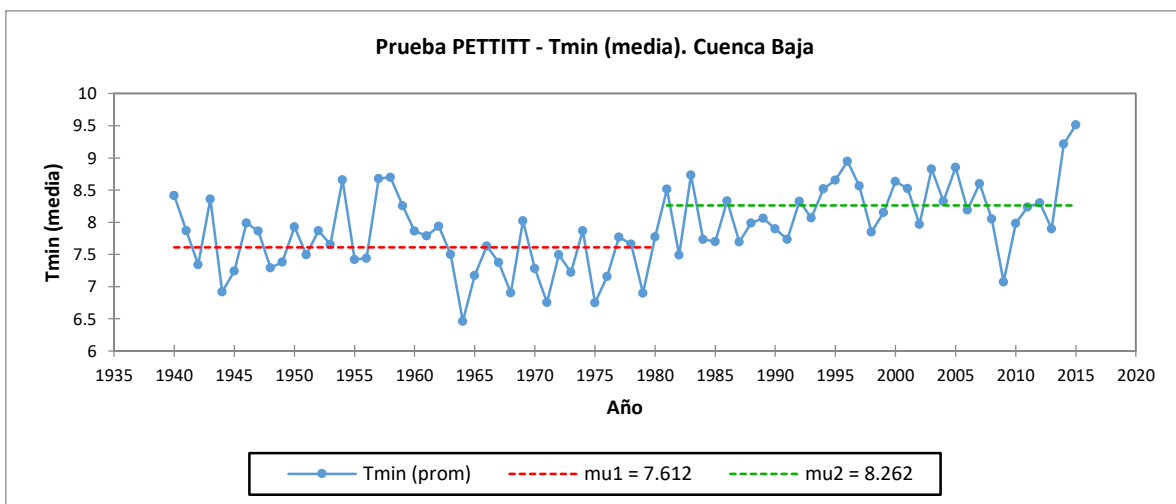
En la cuenca Baja, la temperatura mínima –media- promedio es de 7.91°C.

En la gráfica 25, se pueden observar los registros de temperaturas mínimas –máximas- que se reportaron desde el año de 1940 al 2015, así como también su línea de tendencia, la cual representa incrementos en la serie.



Gráfica 25: Temperaturas mínimas (media). Cuenca Baja

Realizando la prueba de Mann-Kendall para la serie temporal, se evaluó la tendencia para saber si es significativa, teniendo como resultado que la hipótesis nula se rechaza, es decir, que se presenta una tendencia significativa con un incremento de 0.13°C/año.



Gráfica 26: Prueba PETTITT - Temperaturas mínima (media). Cuenca Baja

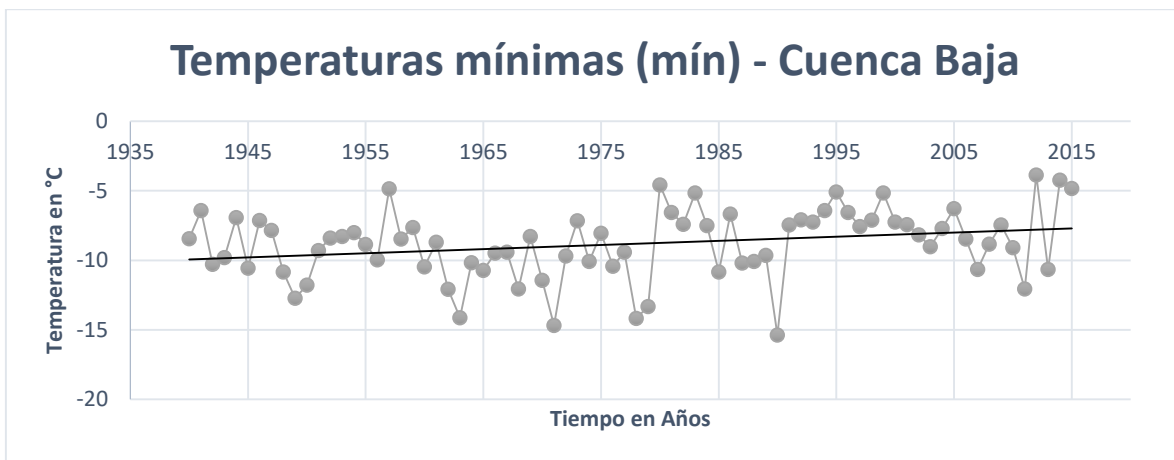
Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Por otro parte, se realizó la prueba PETTITT, la cual encontró un cambio brusco en la serie temporal en el año de 1980 y un incremento en la media de 0.65 °C (gráfica 26).

- Temperaturas mínimas (mínimas):

En la cuenca Baja, la temperatura mínima –mínima- promedio es de -8.82°C.

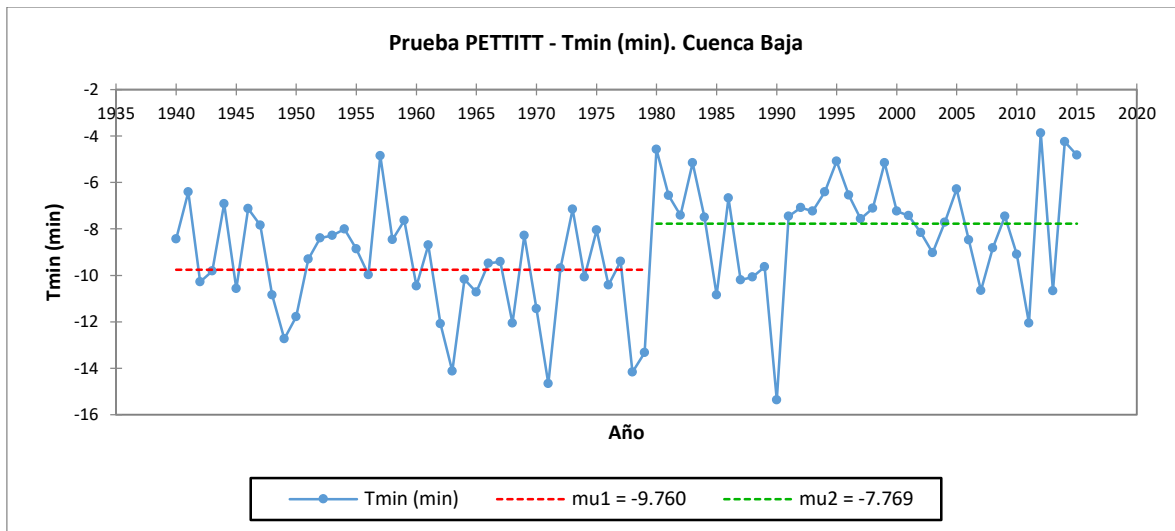
En la gráfica 27, se pueden observar los registros de temperaturas mínimas –máximas- que se reportaron desde el año de 1940 al 2015, así como también su línea de tendencia, en la cual se observan incrementos en la serie.



Gráfica 27: Temperaturas mínimas (mínimas). Cuenca Baja.

Realizando la prueba de Mann-Kendall para la serie temporal, se evaluó la tendencia para saber si es significativa, teniendo como resultado que la hipótesis nula se rechaza, es decir, que se presenta una tendencia significativa con un incremento de 0.03°C/año.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.



Gráfica 28: Prueba PETTITT - Temperaturas mínima (mínima). Cuenca Baja.

Así también, se realizó la prueba PETTITT, la cual encontró un cambio brusco en la serie temporal en el año de 1979 y un incremento en la media de 1.99 °C (gráfica 28).

Resumen estadístico para la Cuenca Baja:

En la tabla 10 se muestra un resumen de las pruebas Mann-Kendall y PETTITT en la cuenca Alta:

Tabla 10. Resumen estadístico de las variables climatológicas. Cuenca Baja.

CUENCA BAJA				
	Tendencia	Magnitud de cambio	Salto brusco	Año
Precipitación				
Media	No	No aplica	No	No aplica
TMAX				
Máxima	No	No aplica	No	No aplica
Media	No	No aplica	Si	1993
Mínima	No	No aplica	No	No aplica
TMIN				
Máxima	No	No aplica	Si	1993
Media	Si	0.13	Si	1980
Mínima	Si	0.03	Si	1979

7. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de las pruebas estadísticas, la inspección visual de las muestras y el criterio del investigador, se puede concluir lo siguiente:

- La prueba Mann-Kendall en la variable de precipitación, no obtuvo tendencias significativas en ambas regiones de la cuenca, por lo tanto, se concluye que no existe evidencia de un cambio climático.
- En la cuenca Alta, se comprobó la existencia de una tendencia significativa hacia un incremento de temperaturas máximas (máximas) anuales. Por otro lado, los análisis de las temperaturas máximas media y mínima, no presentaron tendencias significativas, pero se observan incrementos a lo largo de los años.
- En la cuenca Baja, no se presentaron tendencias significativas en la serie temporal de las temperaturas máximas, pero se presentan incrementos en las series, lo que podría resultar efecto de la variabilidad climática.
- Con respecto a las temperaturas mínimas, cabe resaltar que, a excepción de las temperaturas mínimas máximas de la cuenca baja, todos los demás análisis resultaron con tendencias significativas, lo cual infiere que se presenta un cambio climático.

8. REFERENCIAS

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, Organización de Naciones Unidas, Río de Janeiro, 1992.

Hamed, Khaled & Ramachandra Rao, A. "A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data". Journal of Hydrology, 1998.

Henry B. Mann, "Nonparametric Tests Against Trend". The Econometric Society, 1945.

IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen [et al.] (eds.). "Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge (Reino Unido); Nueva York (Estados Unidos): Cambridge University Press, 2007.

Kendall, M.G., "Rank Correlation Methods. Griffin", London. 1975.

Khaled H. Hamed "Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis". Journal of hydrologic, 2007.

Mann, H.B., 1945. "Nonparametric tests against trend". Econometrica 13, 245–259.

Microsoft Office Excel – XLSTAT. 2010

Miranda-Sala, Marcelo, R. Condal, Alfonso , "Importance of the exploratory statistics analysis on spacial interpolation process: Study case of Valdivian Forest Reserve", 2003.

Mukesh Kumar, Christopher J. Duffy, "Detecting hydroclimatic change using spatio-temporal analysis of time series in Colorado River Basin", Journal of Hydrology, Volume 374, Issues 1–2, 2009.

Patiño-Gómez, Carlos, Martínez-Austria, Polioptro F., "Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México Tecnología y Ciencias del Agua", 2012.

Secretaría de Relaciones Exteriores. "El Tratado de Aguas Internacionales celebrado entre México y los Estados Unidos el 3 de febrero de 1944". Ciudad Juárez: Oficina de Límites y Aguas Internacionales. 1947.

*Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la
cuenca del río Colorado.*

SMC (Servei Meteorològic de Catalunya) Boletín anual de indicadores climáticos, 2007 – 2008.

USBR, “Reclamation Climate Change and Water Section 2. Basin Report: Colorado”, 2011

ANEXOS

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Anexo 1: Pruebas de tendencia - Mann-Kendall (XLSTAT)

CUENCA ALTA:

- *Precipitación.*

Mann-Kendall trend test / Two-tailed test (Totales):

Kendall's tau	0.000
S	-1.000
Var(S)	40588.333
p-value (Two-	1.000
alpha	0.05

An approximation has been used to compute the p-value.

Test interpretation:

H0: There is no trend in the series

Ha: There is a trend in the series

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis H0.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is 100.00%.

The continuity correction has been applied.

The autocorrelation has been taken into account using the Hamed and Rao method. The value of Sen's slope that has been used is: -0.002

Confidence interval: (-16.499, 13.866)

- *Temperaturas máximas.*

Mann-Kendall trend test / Two-tailed test (Tmax (media)):

Kendall's tau	0.114
S	324.000
Var(S)	49716.667
p-value (Two-	0.147
alpha	0.05

An approximation has been used to compute the p-value.

Test interpretation:

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

H0: There is no trend in the series

Ha: There is a trend in the series

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis H0.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is 14.74%.

The continuity correction has been applied.

The autocorrelation has been taken into account using the Hamed and Rao method. The value of Sen 's slope that has been used is: 0.007

Confidence interval: (-0.200 , 0.196)

Mann-Kendall trend test / Two-tailed test (Tmax (max)):

Kendall's tau	0.222
S	634.000
Var(S)	49716.667
p-value (Two-	0.005
alpha	0.05

An approximation has been used to compute the p-value.

Test interpretation:

H0: There is no trend in the series

Ha: There is a trend in the series

As the computed p-value is lower than the significance level $\alpha=0.05$, one should reject the null hypothesis H0, and accept the alternative hypothesis Ha.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is lower than 0.45%.

The continuity correction has been applied.

The autocorrelation has been taken into account using the Hamed and Rao method. The value of Sen 's slope that has been used is: 0.017

Confidence interval: (-0.269 , 0.248)

Mann-Kendall trend test / Two-tailed test (Tmax (min)):

Kendall's tau	0.058
S	166.000
Var(S)	49716.667

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

p-value (Two-	0.459
alpha	0.05

An approximation has been used to compute the p-value.

Test interpretation:

H0: There is no trend in the series

Ha: There is a trend in the series

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis H0.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is 45.93%.

The continuity correction has been applied.

The autocorrelation has been taken into account using the Hamed and Rao method. The value of Sen 's slope that has been used is: 0.013

Confidence interval: (-0.797 , 0.832)

- *Temperaturas mínimas.*

Kendall's tau	0.40144
S	1144.00
Var(S)	49716.667
p-value (Two-	< 0.0001
alpha	0.05

El p-valor exacto no podía ser calculada. Se ha utilizado una aproximación para calcular el p-valor.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

Como el p-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es menor que 0.01%.

La corrección de continuidad fue aplicada.

Pendiente de Sen: 0.0233

Intervalo de confianza: (-0.1527 , 0.1748)

Prueba de Mann-Kendall / Prueba bilateral (Tmin (max)):

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Kendall's tau	0.4323
S	1232.00
Var(S)	49716.667
p-value (Two-alpha)	< 0.0001
	0.05

El p-valor exacto no podía ser calculada. Se ha utilizado una aproximación para calcular el p-valor.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

Como el p-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es menor que 0.01%.

La corrección de continuidad fue aplicada.

Pendiente de Sen: 0.0238
Intervalo de confianza: (-0.1785 , 0.2140)

Prueba de Mann-Kendall / Prueba bilateral (Tmin (min)):

Kendall's tau	0.4323
S	1232.00
Var(S)	49716.667
p-value (Two-alpha)	< 0.0001
	0.05

El p-valor exacto no podía ser calculada. Se ha utilizado una aproximación para calcular el p-valor.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

Como el p-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es menor que 0.43%.

La corrección de continuidad fue

aplicada. Pendiente de Sen: 0.0529
Intervalo de confianza: (-0.7819 , 0.9202)

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

CUENCA BAJA:

- *Precipitación.*

Prueba de Mann-Kendall / Prueba bilateral (Suma de C.Baja):

Tau de Kendal	0.1107
S	275.0000
Var(S)	40588.3333
p-valor (bilate	0.1738
alfa	0.05

El p-valor exacto no podía ser calculada. Se ha utilizado una aproximación para calcular el p-valor.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

Como el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es de 17.38%.

La corrección de continuidad fue

aplicada. Pendiente de Sen: 0.5855
Intervalo de confianza: (-20.3386, 18.0504)

- *Temperaturas máximas.*

Mann-Kendall trend test / Two-tailed test (Tmax(media)):

Kendall's tau	0.087
S	248.000
Var(S)	49716.667
p-value (Two-	0.268
alpha	0.05

An approximation has been used to compute the p-value.

Test interpretation:

H0: There is no trend in the series

Ha: There is a trend in the series

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis H0.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

The risk to reject the null hypothesis H_0 while it is true is 26.80%.

The continuity correction has been applied.

The autocorrelation has been taken into account using the Hamed and Rao method. The value of Sen's slope that has been used is: 0.004
Confidence interval: (-0.145 , 0.163)

Mann-Kendall trend test / Two-tailed test (Tmax (max)):

Kendall's tau	0.116
S	-
Var(S)	49716.667
p-value (Two-	0.138
alpha	0.05

An approximation has been used to compute the p-value.

Test interpretation:

H_0 : There is no trend in the series

H_a : There is a trend in the series

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis H_0 .

The risk to reject the null hypothesis H_0 while it is true is 13.77%.

The continuity correction has been applied.

The autocorrelation has been taken into account using the Hamed and Rao method. The value of Sen's slope that has been used is: -0.008
Confidence interval: (-0.266 , 0.228)

Mann-Kendall trend test / Two-tailed test (Tmax (min)):

Kendall's tau	0.053
S	150.000
Var(S)	49716.667
p-value (Two-	0.504
alpha	0.05

An approximation has been used to compute the p-value.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Test interpretation:

H0: There is no trend in the series

Ha: There is a trend in the series

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis

H0.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is 50.40%.

The continuity correction has been applied.

The autocorrelation has been taken into account using the Hamed and Rao method. The value of Sen's slope that has been used is: 0.009

Confidence interval: (-0.600 , 0.592)

- *Temperaturas mínimas.*

Prueba de Mann-Kendall / Prueba bilateral (Tmin (prom)):

Tau de Kendal	0.2975
S	848.0000
Var(S)	49716.6667
p-valor (bilate	0.0001
alfa	0.05

El p-valor exacto no podía ser calculada. Se ha utilizado una aproximación para calcular el p-valor.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

Como el p-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es menor que 0.01%.

La corrección de continuidad fue aplicada. Pendiente de Sen: 0.0125

Intervalo de confianza: (-0.1222 , 0.1377)

Prueba de Mann-Kendall / Prueba bilateral (Tmin (max)):

Tau de Kendal	0.1221
S	348.0000

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Var(S)	49716.6667
p-valor (bilate	0.1196
alfa	0.05

El p-valor exacto no podía ser calculada. Se ha utilizado una aproximación para calcular el p-valor.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

Como el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es de 11.96%.

La corrección de continuidad fue aplicada. Pendiente de Sen: 0.0069

Intervalo de confianza: (-0.2008 , 0.2030)

Prueba de Mann-Kendall / Prueba bilateral (Tmin (min)):

Tau de Kendal	0.1719
S	490.0000
Var(S)	49716.6667
p-valor (bilate	0.0283
alfa	0.05

El p-valor exacto no podía ser calculada. Se ha utilizado una aproximación para calcular el p-valor.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

Como el p-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es menor que 2.83%.

La corrección de continuidad fue aplicada. Pendiente de Sen: 0.0284

Intervalo de confianza: (-0.5441 , 0.5952)

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Anexo 2: Pruebas de Homogeneidad - PETTITT (XLSTAT)

CUENCA ALTA:

- *Precipitación.*

Pettitt's test (Media anual):

K	344.000
t	1977
p-value (Two-alpha)	0.210
	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the p-value: (0.199, 0.220)

Test interpretation:

H0: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis H0.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is 20.95%.

- *Temperaturas máximas.*

Pettitt's test (Tmax (media)):

K	476.000
t	1993
p-value (Two-alpha)	0.067
	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the p-value: (0.060, 0.073)

Test interpretation:

H0: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis

H0.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

The risk to reject the null hypothesis H_0 while it is true is 6.67%.

Pettitt's test (Tmax (max)):

K	641.000
t	1968
p-value (Two-alpha)	0.005
	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the
p-value: (0.003, 0.007)

Test interpretation:

H_0 : Data are homogeneous

H_a : There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is lower than the significance level $\alpha=0.05$, one should reject the null hypothesis H_0 , and accept the alternative hypothesis H_a .

The risk to reject the null hypothesis H_0 while it is true is lower than 0.49%.

Pettitt's test (Tmax (min)):

K	513.000
t	1990
p-value (Two-alpha)	0.035
	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the
p-value: (0.030, 0.040)

Test interpretation:

H_0 : Data are homogeneous

H_a : There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is lower than the significance level $\alpha=0.05$, one should reject the null hypothesis H_0 , and accept the alternative hypothesis H_a .

The risk to reject the null hypothesis H_0 while it is true is lower than 3.50%

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

- *Temperaturas mínimas.*

Pettitt's test (Tmin (media)):

K	988.000
t	1979
p-value	< 0.0001
alpha	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the p-value: (0.000, 0.000)

Test interpretation:

H0: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is lower than the significance level $\alpha=0.05$, one should reject the null hypothesis H0, and accept the alternative hypothesis Ha.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is lower than 0.01%.

Pettitt's test (Tmin (max)):

K	884.000
t	1993
p-value	< 0.0001
alpha	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the p-value: (0.000, 0.000)

Test interpretation:

H0: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is lower than the significance level $\alpha=0.05$, one should reject the null hypothesis H0, and accept the alternative hypothesis Ha.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is lower than 0.01%.

Pettitt's test (Tmin (min)):

K	747.000
t	1990
p-value (Two-	0.000
alpha	0.05

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the p-value: (-0.000 , 0.000)

Test interpretation:

HO: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is lower than the significance level $\alpha=0.05$, one should reject the null hypothesis HO, and accept the alternative hypothesis Ha.

The risk to reject the null hypothesis HO while it is true is lower than 0.01%.

CUENCA BAJA:

- *Precipitación.*

Pettitt's test (Suma de C.Baja):

K	426.000
t	1977
p-value (Two-alpha)	0.068
	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the p-value: (0.061, 0.074)

Test interpretation:

HO: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis HO.

The risk to reject the null hypothesis HO while it is true is 6.76%.

- *Temperaturas máximas.*

Pettitt's test (Tmax(media)):

K	552.000
t	1993
p-value (Two-alpha)	0.026
	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

99% confidence interval on the p-value: (0.022, 0.030)

Test interpretation:

H0: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is lower than the significance level $\alpha=0.05$, one should reject the null hypothesis H0, and accept the alternative hypothesis Ha.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is lower than 2.58%.

Pettitt's test (Tmax (max)):

K	284.000
t	1961
p-value (Two-alpha)	0.567
	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.

99% confidence interval on the p-value: (0.554, 0.579)

Test interpretation:

H0: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis H0.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is 56.66%.

Pettitt's test (Tmax (min)):

K	454.000
t	1990
p-value (Two-alpha)	0.100
	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.

99% confidence interval on the p-value: (0.092, 0.107)

Test interpretation:

H0: Data are homogeneous

Ha: There is a date at which there is a change in the data

As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0.05$, one cannot reject the null hypothesis H0.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is 9.96%.

- *Temperaturas mínimas.*

Prueba de Pettitt (Tmin (prom)):

K	903.0000
t	1980
alfa	0.05
p-valor	< 0.0001

Se han utilizado 10000 simulaciones Monte Carlo para calcular el p-valor. Tiempo transcurrido: 0s.
Intervalo de confianza para el p-valor al 99%:
(0.0000, 0.0000)

Interpretación de la prueba: H0: Los datos son homogéneos
Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos
Como el p-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.
El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es menor que 0.01%.

Prueba de Pettitt (Tmin (max)):

K	572.0000
t	1993
p-valor (bilate	0.0175
alfa	0.05

Se han utilizado 10000 simulaciones Monte Carlo para calcular el p-valor. Tiempo transcurrido: 0s.
Intervalo de confianza para el p-valor al 99%:
(0.0141, 0.0209)

Interpretación de la prueba: H0: Los datos son homogéneos
Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos
Como el p-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.
El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es menor que 1.75%.

Identificación de la existencia de cambio climático mediante una metodología en la región de la cuenca del río Colorado.

Prueba de Pettitt (Tmin (min)):

K	712.0000
t	1979
p-valor (bilate	0.0010
alfa	0.05

Se han utilizado 10000 simulaciones Monte Carlo para calcular el p-valor. Tiempo transcurrido: 0s.

Intervalo de confianza para el p-valor al 99%:

(0.0002, 0.0018)

Interpretación de la prueba: H0: Los datos son homogéneos

Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos

Como el p-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es menor que 0.10%.