



Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción
Facultad de Ciencias y Tecnología
Centro de Tecnología Apropriada

**Maestría en Gestión de Riesgo de Desastre y Adaptación al Cambio
Climático**

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO
SOBRE EL CAUDAL DEL RIO TEBICUARY**

MARY STELA GAONA VELÁZQUEZ

Asesor: Profesor Dr. NORMAN BREUER

Tesis de Maestría

Asunción, octubre de 2020



Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción
Facultad de Ciencias y Tecnología
Centro de Tecnología Apropriadada

**Maestría en Gestión de Riesgo de Desastre y Adaptación al Cambio
Climático**

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO
SOBRE EL CAUDAL DEL RIO TEBICUARY**

MARY STELA GAONA VELÁZQUEZ

Asesor: Profesor Dr. NORMAN BREUER

Tesis de Maestría

Asunción, octubre de 2020

“La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo del CONACYT. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso se debe considerar que refleja la opinión del CONACYT”.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), el financiamiento del programa de posgrado en Gestión del Riesgo de Desastres y Cambio Climático, lo que permitió la realización de este trabajo de investigación.

A la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Facultad de Ciencias y Tecnología, Centro de Tecnología Apropriada, a través de sus docentes y autoridades quienes hicieron posible la obtención de los conocimientos técnicos que contribuyen a mi formación profesional.

Al Dr. Norman Breuer, tutor de este trabajo, por la corrección del material, respuesta a las dudas surgidas y por su orientación permanente durante el desarrollo de esta investigación.

Reconocimiento

Agradezco a la Dirección de Meteorología e Hidrología dependiente de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil, la provisión de los datos meteorológicos utilizados en la investigación.

Índice.

Índice.....	i
Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tablas.....	iv
Listado de Siglas.....	v
Resumen.....	vi
Introducción.....	1
1.1. Marco Teórico.....	2
1.1.1. Cambio Climático.....	2
1.1.2. Índices de cambio climático.....	2
1.1.3. Tendencias climáticas e hidrológicas regionales.....	2
1.1.4. Caudales en cuencas hidrográficas.....	5
1.1.5. Cambio climático, recursos hídricos y sequía.....	5
1.1.6. Disponibilidad de los recursos hídricos.....	6
1.2. Características del área de estudio.....	6
1.3.1. Localización del área de estudio.....	6
1.3.2. Medición de Caudales del río Tebicuary.....	8
2. Objetivos.....	10
2.1. Objetivo general.....	10
2.2. Objetivos Específicos.....	10
2.3. Justificación.....	10
3. Metodología.....	11
3.1. Procedimiento metodológico referencial.....	11
3.2. Elaboración de la base de datos.....	11
3.2.1. Relleno de datos.....	12
3.3. Pruebas estadísticas utilizadas.....	12
3.3.1. Cálculo de tendencias.....	12
3.3.1.1. Test de Mann-Kendall.....	12
3.3.1.2. Pendiente Sen de la tendencia.....	14
3.3.1.3. Cálculo de índices climáticos del ETCCDI.....	14
3.2.1.4. Coeficiente de correlación.....	15

4. Resultados y Discusión.....	16
4.1. Distribución temporal del caudal, la precipitación y la temperatura.....	16
4.1.1. Comportamiento del caudal.....	16
4.1.2. Comportamiento de la precipitación.....	17
4.1.3. Comportamiento de la temperatura máxima.....	17
4.1.4. Comportamiento de la temperatura mínima.....	18
4.1.5. Comportamiento de la temperatura media.....	19
4.2. Resultados de la estimación de pendiente de Sen.....	19
4.3. Resultados del test de Mann- Kendall y de la estimación de pendiente Sen.....	20
4.4. Valores para los Índices de Cambio Climático.....	20
4.4.1. Tendencias en la temperatura.....	20
4.4.1.1. Temperaturas mínimas.....	20
4.4.2. Tendencias en la precipitación.....	23
4.5. Correlaciones entre las series hidroclimáticas.....	28
4.5.1. Correlación entre las series de caudal y precipitación.....	28
4.5.2. Correlación entre las series de caudal y temperatura.....	29
5. Conclusiones.....	30
5.1. Recomendaciones.....	31
Referencias Bibliográficas.....	32
Anexo.....	35

Índice de Figuras

iii

Figura 1.1. Localización geográfica de la estación hidrométrica.....	7
Figura 4.1. Gráfico del caudal inercial.....	16
Figura 4.2. Gráfico de precipitación.....	17
Figura 4.3. Gráfico de temperatura máxima.....	18
Figura 4.4. Gráfico de temperatura mínima.....	18
Figura 4.5. Grafico de temperatura media.....	19
Figura 4.6. Tendencia de las máximas de temperatura mínima diaria.....	21
Figura 4.7. Frecuencia de noches frías.....	21
Figura 4.8. Tendencia de los periodos fríos.....	22
Figura 4.9. Tendencia de la temperatura maxima extrema.....	22
Figura 4.10. Tendencia de días con lluvia mayor a 10mm	23
Figura 4.11. Tendencia de días con lluvia mayor a 20 mm.....	24
Figura 4.12. Tendencia de días de lluvia mayor a 25mm.....	24
Figura 4.13. Tendencia de la precipitación máxima en 1 día	25
Figura 4.14. Tendencia de la precipitación maxima en 5 días.....	25
Figura 4.15. Tendencia de la intencidad diaria de precipitación.....	26
Figura 4.16. Tendencia de la precipitación total anual.....	26
Figura.4.17. Tendencia de días muy húmedos.....	27
Figura.4.18. Relación entre el caudal y la precipitación.....	29
Figura 4.19. Tendencia dif. temp max y mín.....	29

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Datos de la estación meteorológica San Juan Bautista Misiones.....	14
Tabla 4.1. Resultados de tendencia para caudal inercial.....	16
Tabla 4.2. Resultados de tendencia para Precipitación.....	17
Tabla 4.3. Resultados de tendencia para Temperatura máxima.....	17
Tabla 4.4. Resultados de tendencia para Temperatura mínima.....	18
Tabla 4.5. Resultados de tendencia para la temperatura media.....	19
Tabla 4.6. Resultados de las tendencias según pendiente de Sen.....	19
Tabla 4.7. Resultados de las tendencias en los test Mann-Kendall y Sen.....	20
Tabla 4.8. Índices de cambio en la temperatura.....	23
Tabla 4.9. Índices de cambio en la precipitación.....	27
Tabla 4.10. Valor calculado del coeficiente de correlación entre caudal y precipitación.....	28
Tabla 4.11. Valor calculado del coeficiente de correlación entre caudal y temperatura.....	29

Listado de siglas

ANNP: Administración Nacional de Navegación y Puertos

CC: Cambio Climático

CO: Monóxido de Carbono

CTCN: Centro y red de Tecnología Climática

DINAC: Dirección Nacional de Aeronáutica Civil

DMH: Dirección de meteorología e Hidrología

EBY: Entidad Binacional Yacyretá

ETCCDI: Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices)

IPCC: Grupo Intergubernamental del Cambio Climático

MADES: Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible

OMM: Organización meteorológica Mundial

SST: Temperatura de la Superficie del Mar

Resumen

La identificación del cambio climático, mediante la cuantificación de la intensidad del cambio de las variables climáticas básicas, es de suma importancia ya que este cambio afecta a todas las actividades humanas. El ciclo hidrológico se ve afectado por el calentamiento global al modificarse los patrones de precipitaciones y temperaturas y por consiguiente esto puede afectar al caudal de los cauces hídricos. Las técnicas de la estadística permiten mediante la determinación de tendencias, la presencia o no de dichas propensiones. Dentro de este contexto, este trabajo de investigación buscó determinar la existencia de cambio estadísticamente significativo en el caudal del río Tebicuary, que se haya producido debido a variaciones en el patrón de temperatura y precipitación en el Departamento de Misiones.

Mediante el estadístico Mann-Kendall Trend, la pendiente de Sen y el Índice de Cambio Climático se realizaron análisis del caudal, temperatura y precipitación con datos de la estación hidrométrica en Villa Florida y la estación meteorológica de San Juan Bautista, ambas ubicadas en el Departamento de Misiones, Región Oriental del Paraguay. Se buscó establecer tendencias en la serie de datos y determinar la influencia de cambios en el clima sobre el caudal del río Tebicuary.

Se identificaron tendencias de aumento del caudal, la precipitación, la temperatura máxima, media y de la temperatura mínima.

Se encontró que la correlación entre caudal y precipitación es positiva y la correlación entre caudal y temperatura es negativa. Se concluyó que el caudal del río Tebicuary se ve afectado por el cambio climático.

Palabras clave: Tendencia, Caudal, Temperatura, Precipitación, Cambio Climático

Summary

The identification of climate change by quantifying the intensity of the change in basic climate variables is of utmost importance since this change affects all human activities. The hydrological cycle is affected by global warming as rainfall and temperature patterns change, and consequently this can affect the flow of water channels. Statistical techniques allow by determining trends, the presence or absence of such propensities. Within this context, this research work sought to determine the existence of a statistically significant change in the flow of the Tebicuary River, which has occurred due to variations in the temperature and precipitation pattern in the Department of Misiones.

Using the Mann-Kendall Trend statistic, the Sen slope and the Climate Change Index, flow, temperature and precipitation analyzes were performed with data from the hydrometric station in Villa Florida and the meteorological station of San Juan Bautista, both located in the Department of Misiones, Eastern Region of Paraguay. We sought to establish trends in the data series and determine the influence of changes in climate on the flow of the Tebicuary River.

Trends of increase in flow, precipitation, maximum, average and minimum temperature were identified.

It was found that the correlation between flow and precipitation is positive and the correlation between flow and temperature is negative. It was concluded that the flow of the Tebicuary River is affected by climate change.

Keywords: Trend, Flow, Temperature, Precipitation, Climate Change

CAPÍTULO 1

1. Introducción

El clima de la República del Paraguay podría estar sufriendo modificaciones que comprometerían el comportamiento de los ríos a consecuencia de eventuales cambios climáticos globales. Estos cambios han afectado los patrones meteorológicos en todo el planeta. El Grupo Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) sustenta que el calentamiento de la tierra es irreversible, que la temperatura ya subió $0,74^{\circ}\text{C}$ en el último siglo y que va a seguir subiendo entre $1,8^{\circ}\text{C}$ y 4°C , lo que acarrea diversos efectos climáticos extremos. Una de las consecuencias podría ser la variación del régimen de precipitaciones, que afecta a la gestión de los recursos hídricos (Molina, 2017), por lo que la investigación de los cambios en el tiempo, del clima y la hidrología es necesaria para este estudio.

Según Bates et al (2008), el aumento de energía en el sistema atmosférico, promovido por el calentamiento antrópico produce aumento de la variabilidad natural estacional o interanual de las precipitaciones en un contexto de cambio climático. Esto hace que se produzcan precipitaciones más intensas e irregulares provocando inundaciones o déficit de agua. Por lo tanto se puede deducir que el incremento de las temperaturas contrasta con la multidireccionalidad de las precipitaciones por lo que el estudio de su comportamiento es relevante.

En este trabajo se realizó un análisis temporal del caudal en un punto del río Tebicuary, cuya cuenca es la más grande de la región Oriental del Paraguay. En la zona, la actividad agrícola y ganadera es predominante. La investigación contempló el análisis de las variables meteorológicas precipitación y temperatura en el área de estudio a una escala temporal diaria, mensual y anual. Seguidamente se las asoció con el caudal a fin de determinar el grado de correlación temporal entre dichas variables para analizar la influencia del cambio climático sobre el caudal del río Tebicuary.

Para el desarrollo del trabajo se consideraron datos de caudal, precipitación y temperatura durante el período 1974 – 2017. Estos datos provienen de la estación hidrométrica de Villa Florida y la meteorológica ubicada en San Juan Bautista Misiones con el objeto de considerar las tendencias y los picos de caudal, precipitación y temperatura registrados en el período de estudio.

1.2. Marco Teórico

1.2.1. Cambio Climático

Según el informe del IPCC (2013), el cambio climático es una variación del estado del clima determinado por variaciones en la estructura de la atmósfera debido a la intervención humana o a procesos internos naturales. Como resultado de este cambio climático se producen alteraciones en el régimen de las precipitaciones y de la temperatura del aire como también en la cantidad de incendios forestales, campos agrícolas o ganaderos, por lo que causan incertidumbre y el pronóstico indica que irán en aumento.

La utilización de datos del clima se basa en el análisis estadístico de las series de sus elementos. Estos análisis se trataban estadísticamente como estacionarios pero actualmente se considera poco apropiada esta hipótesis porque existen mayores pruebas de que el planeta afronta un rápido cambio climático debido a actividades antrópicas y en consecuencia las series climáticas ya no son estacionarias. Por este motivo el enfoque actual es considerar las series climáticas como no estacionarias cuando se realizan estimaciones de las características del clima (Barros, 2006).

1.2.2. Índices de cambio climático

La detección del cambio climático involucra la demostración por medios estadísticos generalmente, del cambio del clima con algún nivel de significancia en un intervalo de tiempo determinado.

Los cambios en las condiciones de la tierra, por el uso de la misma o por el cambio climático, afectan el clima global y regional. A escala regional, las condiciones cambiantes de la tierra pueden disminuir o aumentar el calentamiento y afectar la intensidad, frecuencia y duración de eventos extremos. (IPCC, 2019)

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI por sus siglas en inglés), han formulado y definido un conjunto de 27 indicadores que pueden evidenciar el cambio del clima mediante estos elementos matemáticos. Sirven por tanto, para caracterizar el clima, presentar los patrones climáticos históricos y detectar los cambios en cuanto a dirección, magnitud y sentido de los mismos utilizando datos diarios a nivel local (Vázquez, 2010).

1.2.3. Tendencias climáticas e hidrológicas regionales

Se consultaron diversos estudios relacionados con las tendencias climáticas en la región sudamericana a fin de contar con un panorama sobre la situación del tema.

Un trabajo de investigación de Barros 2006, detecta que la Cuenca del Plata presenta manifestaciones claras de importantes tendencias climáticas e hidrológicas que probablemente pudieran estar relacionadas con el cambio climático global. Como el más directo indicativo en ese sentido señala el inicio simultáneo de estas tendencias con la última manifestación del calentamiento global que comenzó en la década de 1970 y que se atribuye al aumento de los gases de efecto invernadero.

El aumento de la precipitación anual en los últimos 40 años ha sido superior al 10% sobre la mayor parte de la región. Sin embargo en algunos lugares ha alcanzado el 30 % o más. Por ejemplo, en el oeste de la provincia de Buenos Aires y en parte de la frontera entre Argentina y Brasil, la precipitación media anual se ha incrementado en más de 200 mm (Castañeda et al., 2000).

Este aumento de la precipitación ha llevado al acrecentamiento de la descarga de los ríos que porcentualmente se ha amplificado cuando se lo compara con el correspondiente a la precipitación media de la cuenca del Plata (Barros, 2005).

Esta característica de la Cuenca del Plata podría atribuirse a la deforestación. Así mismo podría deberse a los cambios en el uso del suelo por la agricultura que pueden dar como resultado un mayor escurrimiento. Ello hace que las actividades dependientes de los recursos hídricos resulten muy vulnerables a los cambios en las precipitaciones, lo que debe ser tenido en cuenta en el actual contexto del Cambio Climático (Tucci et al., 1998).

En los valles de los ríos Paraná, Uruguay y Paraguay, se han vuelto mucho más frecuentes las inundaciones a partir de 1974. Durante el siglo pasado, 12 de las 16 mayores descargas mensuales del río Paraná en Corrientes se registraron en los últimos 25 años e igualmente 4 de las 5 mayores descargas mensuales (Camilloni et al., 2003). En el río Paraguay, 11 de las 15 mayores inundaciones del último siglo en Asunción también ocurrieron después de 1975, mientras que en el río Uruguay, ninguno de los mayores picos de crecida desde 1950 tuvo lugar antes de 1970. Estos ejemplos indican la severidad del impacto que han causado las tendencias climáticas regionales en la intensidad y frecuencia de las inundaciones (Barros, 2006).

Según un trabajo de investigación de tendencia en la precipitación de la parte central de Sudamérica realizada por Liebmann et al., 2004, se encontró que en el período 1976-1999, la mayor tendencia al sur del 20° S ocurre durante la temporada de enero a marzo, es positiva, y se centra en el sur de Brasil. De 1948 a 1975, la tendencia también es positiva, pero con menos de la mitad de la pendiente. La tendencia no se debe a un cambio sistemático en el

momento de la temporada de lluvias, que casi siempre comienza antes de enero y generalmente termina después de marzo, sino más bien resulta de un aumento en el porcentaje de días lluviosos, y un aumento en el promedio de días lluviosos.

Genta et al., (1998), usando un promedio de 30 años de flujo, encontraron que los flujos han aumentado desde la década de los 60 hasta el final del registro a mediados de la década de los 90 en los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay. Juntos, estos ríos drenan la mayor parte de la cuenca de La Plata del centro de América del Sur.

Robertson et al (2001), utilizando descargas promedio anuales, hallaron una marcada tendencia en los ríos Paraná y Paraguay, así como evidencia de variabilidad decadal. Igualmente, encontraron que esa descarga aumentó rápidamente desde aproximadamente 1960 a 1980, y luego se estabilizó hasta el final del registro en 1992. Ellos notaron que las tendencias parecen coincidir con las tendencias en la temperatura global de la superficie del mar (SST).

En otros lugares como en Chile, el cambio climático se ha posicionado como un fenómeno complejo, ya que la agricultura, la energía y la minería son actividades que actualmente ejercen una importante presión en los recursos naturales del país con zonas costeras bajas, zonas áridas y semiáridas. Estas zonas son susceptibles de deforestación, erosión, desastres naturales, sequía y desertificación, además de áreas urbanas altamente contaminadas y ecosistemas frágiles (Molina et al, 2017).

En el “Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XX”, (CONAMA, 2006), elaborado por el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, se materializó esta situación, ya que se elaboraron escenarios posibles a los que se enfrentaría Chile en términos de precipitaciones, aumento de temperaturas e impactos en los recursos hídricos. Dentro de los resultados más elocuentes de este estudio destaca el aumento en la temperatura (calentamiento) en todas las regiones del país, siendo más intenso en las regiones andinas. En lo que a precipitaciones refiere, en el sector altiplánico se estima una mayor precipitación en primavera y verano.

En el Paraguay se registró un aumento de las temperaturas máximas extremas comprendidas entre 1960 y 2004. Para escenarios climáticos futuros se obtuvo significativos aumentos de la temperatura media hasta el 2090 y un aumento en las precipitaciones sobre todo en el este del país (Vázquez et al., 2011).

1.2.4. Caudales en cuencas hidrográficas

El estudio de las cuencas hidrográficas a través de la hidrología superficial, permite conocer la variación de la escorrentía en función de la precipitación. Se sabe que la lluvia o precipitación es considerada como una variable hidrológica de entrada en un sistema denominado cuenca hidrográfica; se distribuye en la superficie terrestre de diferente manera. La intercepción, la detención superficial, la humedad del suelo, precipitación directa sobre la corriente de agua, flujo sub-superficial y escorrentía superficial son fenómenos que consumen la lluvia totalmente (Falkner et al., 2009).

El cálculo del caudal, entendido como volumen de agua por unidad de tiempo que pasa por una sección de un cauce que produce una cuenca sin aforar su cauce principal, puede ser obtenido mediante la estimación de la cantidad de agua que penetra la superficie (fenómeno de abstracción). Asimismo, mediante la estimación de la cantidad de líquido que se llega a escurrir ante la presencia de un evento lluvioso (Li et al., 2011).

1.2.5. Cambio climático, recursos hídricos y sequía

Los impactos del cambio climático sobre los sistemas de agua dulce se deben a los incrementos observados y proyectados en la temperatura, nivel del mar y variabilidad de precipitación. Según el (IPPC, 2014), el cambio climático afecta la función y operación de la infraestructura hídrica existente, así como las prácticas de gestión integral de los recursos hídricos.

De acuerdo con la estacionalidad del flujo de aquellas cuencas influenciadas por la precipitación se incrementará, es decir, los caudales máximos serán más pronunciados en épocas húmedas y los mínimos serán más bajos durante periodos secos. Por esto, y a su vez, por los impactos potenciales de esta condición sobre la economía, el medio ambiente y la sociedad, es fundamental poder enfrentar los extremos asociados con el cambio climático y la variabilidad que de él se derivan (Li et al., 2011).

Breuer et al. (2017), identificaron cambios en el clima del Paraguay, detectados en zonas de actividad productiva. Se verificaron aumentos en el volumen de las precipitaciones a través de los años de acuerdo a los resultados de análisis pluviométricos, los cuales afectaron el rendimiento de la producción. Estos aumentos se dan principalmente en primavera y otoño.

La vulnerabilidad no está definida únicamente en términos de amenazas o impactos, sino también por las vías de desarrollo de una sociedad, su grado de exposición física, la distribución de sus recursos, los desastres padecidos previamente y sus instituciones sociales

y gubernamentales (Engle et al., 2010). Al ser el recurso hídrico el eje articulador de todos estos componentes, la vulnerabilidad depende en gran medida de la forma en cómo éste se gestione.

1.2.6. Disponibilidad de los recursos hídricos

En relación a la disponibilidad del recurso hídrico, Wang et al. (2014) señalan que ésta depende de la capacidad del ecosistema para interceptar, recolectar y almacenar agua, del apropiado manejo de las tierras agrícolas, ganaderas y de bosques, así como de los tipos e intensidad de consumo de agua. La disponibilidad de agua en los ecosistemas permite el desarrollo o presencia de otros bienes y servicios útiles para la sociedad. En el caso de disminución de tales ecosistemas por causas naturales o provocadas, repercute directamente en la regulación de los recursos hídricos y afecta el desarrollo de las diversas actividades humanas que sustentan, sistemas productivos agropecuarios, industriales, turísticos, electricidad y suministro de agua potable para la población. Además, repercute sobre todos los ecosistemas relacionados con los recursos hídricos (Gosain et al., 2006).

1.3. Características del área de estudio

1.3.1. Localización del área de estudio

El caudal a ser analizado pertenece al río Tebicuary que está ubicado en la región oriental del Paraguay, tiene una longitud de curso de aproximadamente 500 km y desemboca en el río Paraguay a unos 40 km del puerto de Pilar.

Cuenta con numerosos afluentes siendo algunos de ellos el Río Tebicuary-mí, Río Pirapó, Río Negro, Arroyo Cavacua, Arroyo Mbuyapey, Arroyo Aguaray, Arroyo San Roque, Arroyo Gueyracay, Arroyo Tajy, y varios más. La figura 1 muestra la localización de la estación meteorológica seleccionada.

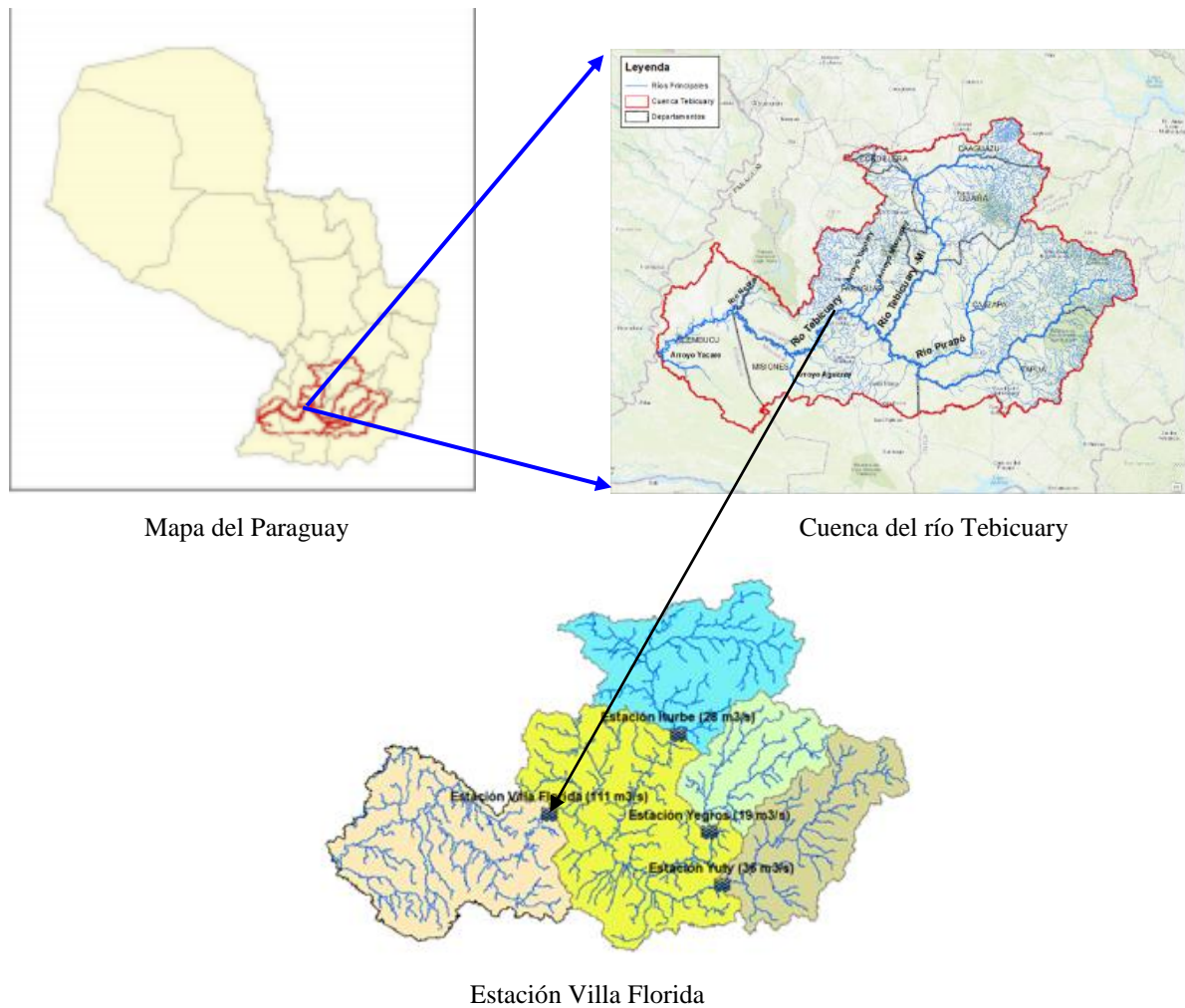


Figura 1.1: Localización geográfica de la estación hidrométrica de Villa Florida.
Fuente: CTCN Climate Technology Centre. IH cantabria

La cuenca del río Tebicuary es la más importante en la región oriental. Se extiende de este a oeste abarcando los Departamentos de Itapúa, Caazapá, Misiones, Ñeembucú, Paraguari, Caaguazú, Guairá y Cordillera; tiene una superficie de 27.324 km² y se divide para fines representativos en cuenca alta, media y baja.

La cuenca seleccionada para este estudio es la media debido a que en Villa Florida, Departamento de Misiones, se encuentra la única estación hidrométrica ubicada sobre el río Tebicuary.

Se caracteriza por tener terrenos planos rocosos con suelo limo-arcilloso cubierto por importantes humedales que retienen muy poco el agua y zonas más altas apropiadas para la ganadería y la agricultura. En líneas generales es una zona arrocera regada por canales que transportan agua desde tomas de agua a partir del río Tebicuary (Mongelós 2016).

El Departamento de Misiones está ubicado entre los paralelos 26° 25' y 27° 35' latitud sur y los meridianos 56° 30' y 57° 45' de longitud oeste y tiene una superficie de 9.556 km².

La temperatura media anual es de 21°C y su precipitación media anual de 1700 mm. Dentro de la cuenca existen estaciones climatológicas pero la mayoría tienen numerosos registros faltantes.

La región centrada en el este es subtropical húmeda. Los mínimos de precipitación son invernales, existiendo una transición hacia el sureste, con un régimen más constante durante el año. Se produce abundancia de precipitación en el extenso período estival que va de septiembre a abril. El máximo se produce en primavera y comienzos del verano (Mongelós, 2016).

Aunque en la región son frecuentes las invasiones de aire polar en invierno, es común la ocurrencia de inviernos sin heladas con excepción de las comarcas con topografía importante. Una característica propia de esta zona es la baja nubosidad al final del invierno, mes de agosto, lo cual hace que se produzca una rápida recuperación térmica al comienzo de la primavera (IHcantabria).

El lugar de medición del caudal en Villa Florida se encuentra 500 m aguas abajo del puente en un tramo relativamente recto y con un ancho entre 135 m y 200 m, las profundidades varían con el nivel del río y el punto de la sección transversal (Mongelós 2016).

La problemática por escasez de agua en ciertas épocas del año en la cuenca del río Tebicuary ha tenido trascendencia en diferentes estratos sociales. Los lugareños, en su mayoría pescadores reclaman que los grandes productores desvían el cauce del Tebicuary y los acusan de secarlo. En años anteriores, la regulación del bombeo se hacía sin criterios técnicos y los ceses de bombeos se definían por presiones sociales o políticas.

Actualmente se analiza la demanda de agua para la producción de arroz y el MADES fijó un caudal de 20 m³/s de regulación del bombeo.

1.3.2 Medición de Caudales del río Tebicuary

La Estación Villa Florida cuenta con datos de niveles históricos en el Anuario Hidrográfico de la ANNP desde el año 1974 hasta el año 1990. Otro anuario del año 1996 a 1998 de la ANNP contiene los datos correspondientes a ese periodo. Además se cuenta con datos de los periodos 1990-1995 y 1999-2002 que no se encuentran publicados en forma impresa. ITAIPU instaló un medidor automático de caudal en el año 2012. El MADES tiene

datos de caudal más recientes. Por otro lado en el Informe “Estudio de crecidas de los Ríos Paraguay y Paraná-EBY” se presentan mediciones de caudales.

CAPÍTULO 2

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la influencia del cambio climático sobre el caudal del río Tebicuary mediante la determinación de la variabilidad temporal del caudal, la precipitación y la temperatura en el Distrito de Villa Florida.

2.1.1. Objetivos Específicos

- Determinar la tendencia a través de series temporales, del caudal del río Tebicuary en Villa Florida
- Estimar la existencia de tendencias en la temperatura y el régimen de lluvia que hayan producido cambios en los mismos y que a su vez se puedan relacionar con el caudal del río Tebicuary.
- Correlacionar las variables caudal, temperatura y precipitación para establecer la relación entre ellas.

2.2 Justificación

Las características físicas de un lugar así como las actividades humanas que implican impacto negativo sobre la naturaleza y el clima influyen en el ciclo hidrológico. Es por ello que el análisis de la variabilidad climática, el cambio de uso del suelo, la utilización inadecuada del agua, son muy importantes a la hora de detectar variaciones de los recursos hídricos.

Numerosos son los problemas que se presentan actualmente relacionados con sequías, inundaciones, almacenamiento del agua; pero los impactos causados por el cambio climático sobre la hidrología de una determinada región son de carácter local y por lo tanto es menester investigarlos desde las características de dicho territorio.

Al ser el río Tebicuary uno de los ríos más importantes no solo del territorio que riega sino de toda la región oriental del país por la gran producción agrícola y ganadera, y por los múltiples problemas de abastecimiento que periódicamente presenta, se considera importante definir si el cambio climático está afectando el caudal del río.

Trabajos de investigación científica desde el análisis del cambio climático para el río Tebicuary por métodos estadísticos, no se han realizado anteriormente.

CAPÍTULO 3

3. Metodología

3.1. Procedimiento metodológico referencial

La investigación buscó detectar efectos del cambio climático en el caudal del río Tebicuary en el Departamento de Misiones y para ello se consideró conveniente analizar la temperatura y la precipitación del área de estudio pues lo que manifiesten estos registros serán evidencia de los efectos del cambio climático y ambos afectan el caudal del río.

El proceso se inició con la recopilación de antecedentes de series estadísticas, ordenación de la data y posteriormente el proceso de generalización inductiva, o sea, la determinación de tendencias estadísticas, y representación gráfica para finalmente efectuar la interpretación de las tendencias del caudal, la temperatura y la precipitación. Se determinó además, la correlación existente entre las variables.

3.2. Elaboración de la base de datos

Para la realización del análisis se utilizaron series diarias, mensuales y anuales de precipitaciones y temperaturas procedentes de la estación meteorológica de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) en San Juan Bautista de las Misiones, abarcando un período de 43 años que va desde 1974 hasta 2017. La selección del período de estudio respondió a las siguientes premisas:

- La serie de datos tiene una duración superior a 30 años, de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial para definir y estudiar la variabilidad de un clima concreto
- Las series recogen los últimos años del siglo XX y comienzos del siglo XXI, en principio los más sensibles a la ocurrencia de un hipotético cambio climático inducido por actividades antrópicas

Cabe destacar que la Estación de San Juan Bautista es la más cercana a Villa Florida que cuenta con un mínimo de faltante de datos.

Los datos del caudal utilizados son los elaborados por el Ing. Francisco Bock con la aplicación del modelo MGB-Inercial para el estudio de caso de la cuenca del río Tebicuary (Bock, 2018). Estos datos contienen la serie completa de caudal para los años analizados.

3.2.1. Relleno de datos

Los datos faltantes de temperatura se rellenaron mediante la interpolación lineal simple y diagrama de flujo de datos de la misma serie.

Para la precipitación, la serie se completó mediante valores no numéricos (non value).

3.3. Pruebas estadísticas utilizadas

Las pruebas estadísticas utilizadas fueron las que permiten determinar tendencias y existencia de algún tipo de relación entre dos o más variables para poder concluir sobre sus comportamientos y las implicancias sobre otras. Según Adeloye y Montaseri (2002), cuando se modifican las condiciones circundantes como el cambio de uso de suelo o debido al cambio climático, aparecen las tendencias.

3.3.1. Cálculo de tendencias

3.3.1.1. Test de Mann-Kendall

Para la detección de tendencias en la serie de variables climáticas e hidrológicas y su significación estadística, los test no paramétricos son los más utilizados porque se basan en rangos de los registros y no en sus valores. Por ello son independientes de sus valores y de la distribución de las variables que se analizan. Consiguientemente, no asume ninguna distribución de probabilidad de las muestras.

En este trabajo se ha empleado la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945, Kendall, 1975) cuya validez y robustez ha sido suficientemente contrastada con resultados similares (Yue et al., 2002). Este test determina previamente si existen tendencias o alteraciones de la varianza.

El procedimiento es el siguiente. Inicialmente se tabulan los valores de la variable de forma ordenada (x_1, x_2, \dots, x_n)

Se halla el signo de las diferencias de cada par de valores comparando sus magnitudes ($x_j - x_k$) con ($j > k$)

$$\text{Signo } (x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Su estadístico S representa la suma de los signos de las diferencias de todos los pares factibles de formar, a partir del siguiente algoritmo:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k) \quad (3.2)$$

Si S es positivo se infiere que la tendencia es creciente; si S es negativo se infiere que hay tendencia decreciente.

Para tamaños de muestra grandes, el estadístico S distribuye aproximadamente normal con media cero y varianza:

$$\text{Var}[S] = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{q=1}^g t_q(t_q-1)(2t_q+5) \right] \quad (3.3)$$

n: número de datos

t: grupos de lazos existentes en la serie.

A continuación se obtiene el estadístico Z_{MK} estandarizado:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Posteriormente, se evalúa la hipótesis a partir de Z, que puede ser:

H_0 : No hay tendencia

H_1 : La tendencia es creciente o H_1 : La tendencia es decreciente

La hipótesis nula de la prueba de Mann Kendall afirma que los datos de una serie de tiempo son independientes y están idénticamente distribuidos. Si el valor absoluto de Z es mayor que el valor crítico de la distribución Normal estándar, se rechaza la hipótesis de no tendencia y la serie presenta tendencia creciente o decreciente con un nivel de significancia α . (Hirsch *et al.*, 1994).

Para este trabajo se adoptó $\alpha = 0,05$.

El Test de Mann-Kendall proporciona también un valor de significancia, p-value; tal que si p-value es inferior a 0,05 certifica que la hipótesis adoptada tiene altas garantías de veracidad. A medida que este valor se hace más grande, las probabilidades van disminuyendo.

El cálculo del estadístico S y Var[S] se ha realizado con el software libre R (<http://www.r-project.org>) constituido por un conjunto integrado de algoritmos para gestión y análisis de datos, cálculos y gráficos.

3.3.1.2. Pendiente Sen de la tendencia

El test de Mann–Kendall descrito detecta la existencia de tendencia, pero no suministra una estimación de su magnitud. Para ello se usa el estadístico de la pendiente de la tendencia (m_s). Sen (1968) utiliza el criterio de análisis de la tendencia establecido en el test de Kendall para estimar su pendiente (m_s), definiéndola como el valor mediano (MED) de las pendientes parciales, por tanto es una medida de la pendiente resistente a valores dispersos en los datos porque evalúa a través de la mediana.

$$m_s = \text{MED} \left[\frac{X_j - X_i}{j - i} \right] \text{ para toda } j > i \quad (3.5)$$

X_j y X_i son los datos en los tiempos j e i ; y m_s es el valor de la pendiente.

Siendo n el número de datos, entonces habrán $n(n - 1)/2$ pendientes parciales. El signo positivo de m_s define tendencias ascendentes y el negativo las descendentes.

3.3.1.3. Cálculo de índices climáticos del ETCCDI

La identificación del cambio climático (CC) se apoya en las técnicas estadísticas para buscar en los registros largos tendencias que demuestren su presencia de manera significativa.

Con los datos diarios de temperatura y precipitación, se cargó el software RCLimDex que es un programa diseñado para el análisis de detección de cambios climáticos. El mismo calcula 27 índices recomendados por el Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI) (Zhang et al 2004). Con él se calcularon los índices para obtener desde otro procedimiento valores que se pudieran comparar con los del análisis de Mann-Kendall. Una tabla con el significado de estos índices se incluye en anexos.

El procedimiento implica la selección de los datos, el análisis de calidad de los mismos, el cálculo de los índices y finalmente el análisis de las tendencias. Las salidas RCLimDex proporcionan un conjunto de parámetros estadísticos que son los siguientes: el coeficiente de determinación R^2 , el nivel de significancia estadística de la tendencia, la tendencia lineal calculada por el método de los mínimos cuadrados y el error estándar de la estimación.

Se hicieron los análisis con un nivel de confianza de 90 % y desvío estándar igual a tres.

Los datos de la estación meteorológica de referencia se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Datos de la estación meteorológica San Juan Bautista, Misiones

Código	Estación	Institución	Latitud	Longitud	Tipo	Periodo
B6260	San Juan Bautista	DMH-DINAC	-26.670	-57.134	Meteorológica	01/01/1974 a 31/12/2017

3.3.1.4. Coeficiente de correlación

En la investigación correlacional se miden dos variables para entender y evaluar la relación estadística entre ellas sin influencia de ninguna variable extraña.

Por utilizar esta investigación métodos no paramétricos, para el análisis de correlación se empleó la correlación del orden de rangos o correlación por jerarquías de Spearman (Rho de Spearman) que mide la intensidad de la relación entre dos variables, utilizando los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos para comparar dichos rangos (Martínez et al., 2009).

Primero se ordenan los datos de menor a mayor y se sustituye cada elemento del registro por su rango. Posteriormente para cada dato de la serie original, se calculan las diferencias d_i , con i variando desde 1 hasta n .

El estadístico es el siguiente:

$$\rho = 1 - 6 \sum d^2 / n(n^2 - 1) \quad (3.6)$$

Siendo: n = la cantidad de sujetos que se clasifican

X_i = el rango de sujetos i con respecto a una variable

Y_i = el rango de sujetos i con respecto a una segunda variable

$d = X_i - Y_i$ Es decir que d , es la diferencia entre los rangos de X e Y

El valor de esta ecuación se compara con el intervalo que define $\pm Z_c$ tomado de la distribución Z a un nivel de significancia α para una prueba de dos colas para la siguiente ecuación:

$$Z = \rho (n - 2 / 1 - \rho^2)^{0.5} \quad (3.7)$$

Si Z excede a Z_c , existe tendencia.

El coeficiente de correlación de rangos de Spearman puede puntuar desde -1 hasta +1, y se interpreta así: los valores cercanos a +1, indican que existe una fuerte asociación entre las clasificaciones, o sea que a medida que aumenta un rango, el otro también aumenta; los valores cercanos a -1 señalan que hay una fuerte asociación negativa entre las clasificaciones, es decir que, al aumentar un rango, el otro decrece. Cuando el valor es 0, no hay correlación.

CAPITULO 4

4. Resultados y Discusión

4.1. Distribución temporal del caudal, la precipitación y la temperatura

Para analizar en el tiempo las variables hidrológicas y climáticas se utilizaron datos de caudal, temperatura máxima, media, mínima y precipitación de los últimos 43 años dentro del área de estudio; mediante ellas se obtuvieron las tendencias.

4.1.1. Comportamiento del caudal

En la figura 4.1 se muestra el comportamiento histórico mensual del caudal.

Los valores obtenidos mediante la prueba de Mann-Kendall indican tendencia al aumento del caudal definido por el valor positivo del estadístico S durante los 43 años examinados como se puede observar en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resultados de tendencia para caudal inercial

Estadísticos de Mann-Kendall Caudal Inercial						
Score	Var(S)	Tau	p-value	Z _{MK}	Pendiente	Tendencia
12936561.0	461239744584.33	0.100182	0.01	19.04826	0.005932	Creciente

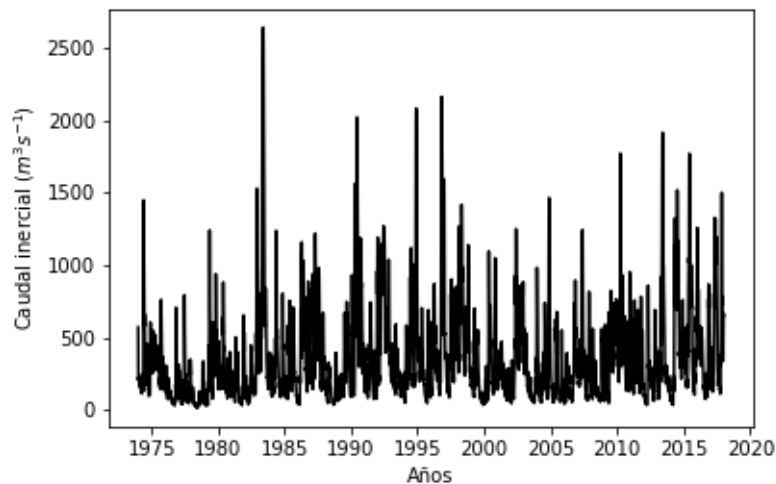


Figura 4.1: Gráfico del caudal inercial

4.1.2. Comportamiento de la precipitación

En la figura 4.2 se puede observar el comportamiento histórico mensual de la precipitación media en el tiempo de análisis considerado. La tabla 4.2 indica que la precipitación en el área de estudio considerada se muestra sin tendencia a la variabilidad. El valor de la pendiente es igual a cero.

Tabla 4.2: Resultados de tendencia para Precipitación

Estadísticos de Mann-Kendall precipitación						
Score	Var(S)	Tau	p-value	Z _{MK}	Pendiente	Tendencia
578347.0	283304029137.0	0.00447878	0.277222	1.0865791	0.0	Sin tendencia

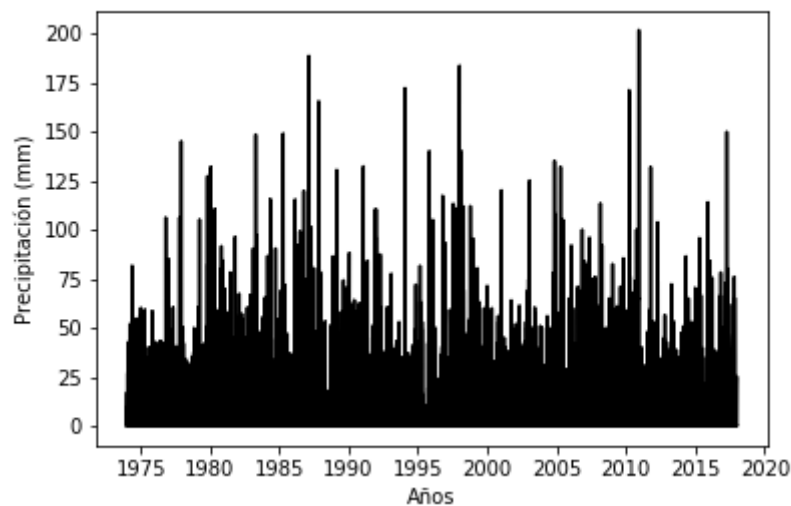


Fig. 4.2: Gráfico de precipitación

La literatura referente a la prueba Mann-Kendall recomienda el análisis de la tendencia con otros métodos cuando la pendiente es nula ya que un resultado de pendiente cero equivale a que Mann-Kendall no puede definir la tendencia. Debido a esto, posteriormente se analizó la tendencia de precipitación por medio de índices de cambio climático.

4.1.3. Comportamiento de la temperatura máxima

En la figura 4.3 se muestra el comportamiento de la temperatura máxima en el periodo estudiado. De acuerdo a los resultados anotados en la tabla 4.3, la pendiente es nula, por tanto la temperatura máxima no tiene tendencia.

Tabla 4.3: Resultados de tendencia para Temperatura máxima

Estadísticos de Mann-Kendall T máxima						
Score	Var(S)	Tau	p-value	Z _{MK}	Pendiente	Tendencia
1255773.0	461071056223.0	0,0097248	0.0644025	1.849383	0.0	Sin tendencia

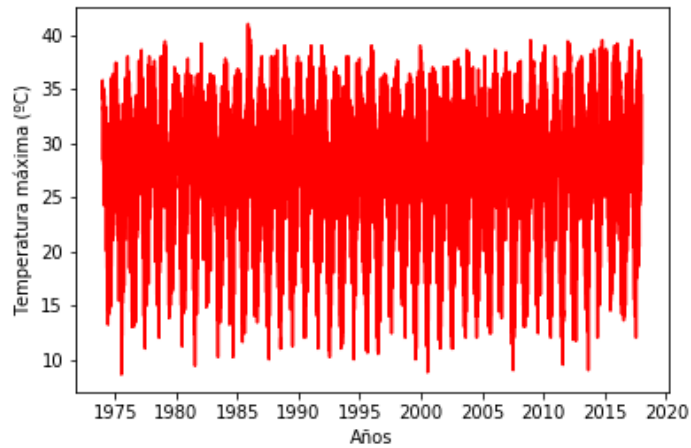


Figura 4.3: Gráfico de la temperatura máxima

Por lo mismo que lo expresado para la precipitación, se calculó posteriormente la tendencia de la temperatura máxima, por medio del índice de cambio climático.

4.1.4. Comportamiento de la temperatura mínima

La figura 4.4 muestra el comportamiento de la temperatura mínima entre los años 1974 y 2017. De acuerdo a la tabla 4.4, la temperatura mínima tiende a aumentar según lo indica el valor positivo del estadístico S.

Tabla 4.4: Resultados de tendencia para la temperatura mínima

Estadísticos de Mann-Kendall T mínima						
Score	Var(S)	Tau	p-value	Z _{MK}	Pendiente	Tendencia
5301489.0	460835398478.3	0.04105528	0.0731597	7.809529	5.6534438	Creciente

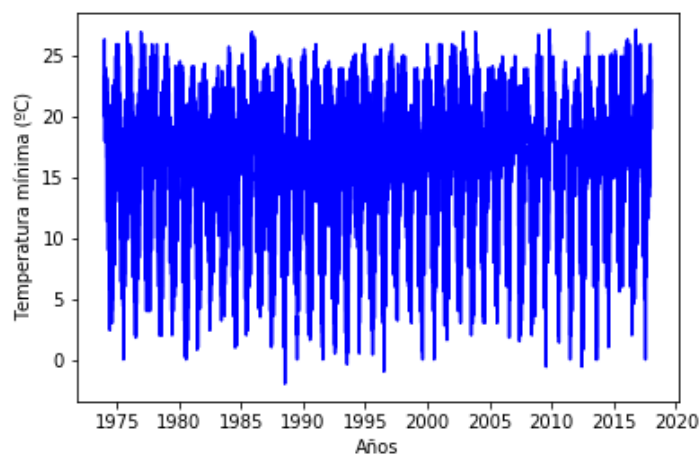


Figura 4.4: Gráfico de la temperatura mínima

4.1.5. Comportamiento de la temperatura media

La figura 4.5 muestra el comportamiento histórico de la temperatura media durante el periodo de estudio considerado. De acuerdo a los resultados del test Mann-Kendall que se muestran en la tabla 4.5, la tendencia de la temperatura media es de aumento.

Tabla 4.5: Resultados de tendencia para la temperatura media

Estadísticos de Mann-Kendall T media						
Score	Var (S)	Tau	p-value	Z _{MK}	Pendiente	Tendencia
3591720.0	461208967882.6	0.027814	0.231514	5.28875383	4.3144	Creciente

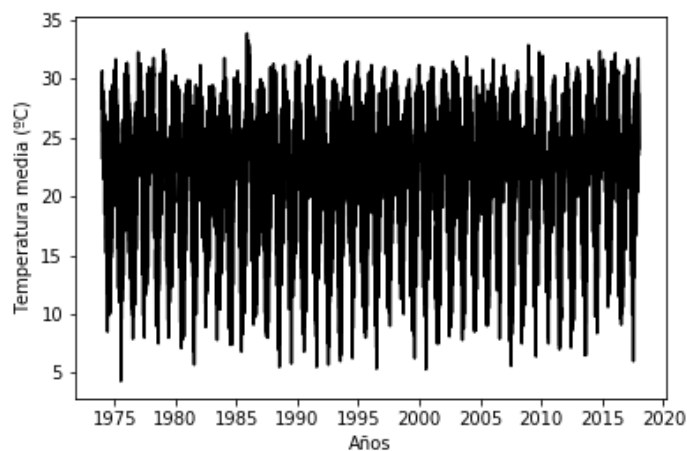


Figura 4.5: Gráfico de la temperatura media

4.2. Resultados de la estimación de pendiente de Sen

A fin de verificar las pendientes estimadas, cuantificarlas y para determinar si no fueron afectados los resultados por valores dispersos, se utilizó el criterio de la pendiente de Sen descrito en la metodología del trabajo. Los valores encontrados son similares a los obtenidos por la prueba anterior. El caudal tiende a aumentar, la precipitación se mantiene sin tendencia, la temperatura máxima no tiene tendencia y la temperatura mínima tiene tendencia positiva. Estos valores se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Resultados de tendencias según pendiente de Sen

Series	Inicio	Fin	Sen's slope			Tendencia
			Q	Q95	Valor p	
Caudal	1974	2017	0,56317	0,483795	0,12	↑
Precipitación	1974	2017	0	0	0,2773	0
Temperatura Max.	1974	2017	0	0	0,0048	0
Temperatura Min.	1974	2017	1,082	2,3741	0,167	↑

4.3. Resultados del test de Mann-Kendall y de la estimación de pendiente Sen

Al establecer una comparación entre los valores de tendencia encontrados por los test aplicados se puede observar que los resultados son análogos. Según ellos, el caudal del río Tebicuary no solo no disminuye sino que aumenta lo mismo que la temperatura mínima. La precipitación y la temperatura máxima no presentan tendencia. Estos resultados se pueden observar en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Resultados de las tendencias en los test Mann-Kendall y Sen

Pruebas Variables	Mann-Kendall	Sen's slope
Series	Tendencia	Tendencia
Caudal	↑	↑
Precipitación	0	0
Temperatura máxima	0	0
Temperatura mínima	↑	↑

4.4. Valores para los Índices de Cambio Climático

Los gráficos representativos de los índices muestran mediante líneas continuas la tendencia de la serie histórica para la variable analizada y por medio de líneas discontinuas el comportamiento temporal del cambio de la variabilidad climática. En la parte inferior están los valores de R^2 , el valor de p, el coeficiente de regresión y el error de la estimación.

Se han verificado tendencias estadísticas en 12 índices, 4 relacionados con temperatura y 8 relacionados con precipitación.

4.4.1. Tendencias en la temperatura

4.4.1.1. Temperaturas mínimas

-Temperatura mínima más alta

El valor máximo anual de la temperatura mínima diaria(TNX) presenta tendencia al aumento por ser positivo el valor de la pendiente.

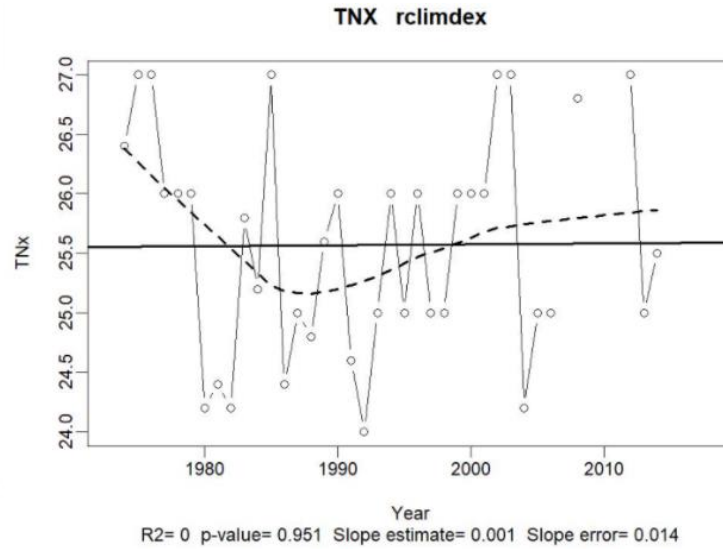


Fig.4.6: Tendencia de las máximas de temperatura mínima diaria

-Frecuencia de noches frías

El porcentaje de días en que la temperatura mínima es menor al percentil10 (TN10P) muestra tendencia a disminuir, por tanto disminuyen los días más fríos.

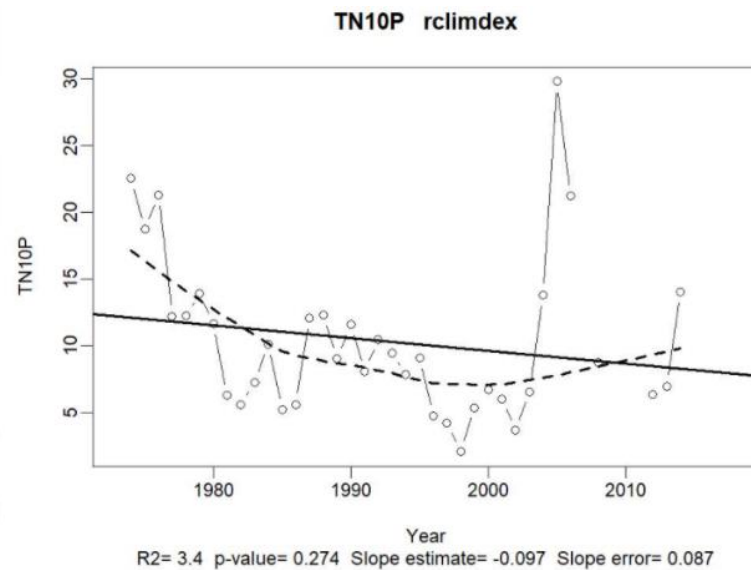


Fig. 4.7: Frecuencia de noches frías

-Períodos fríos

La duración de los periodos fríos CSDI tiene tendencia al descenso por lo que se puede concluir que la temperatura está aumentando.

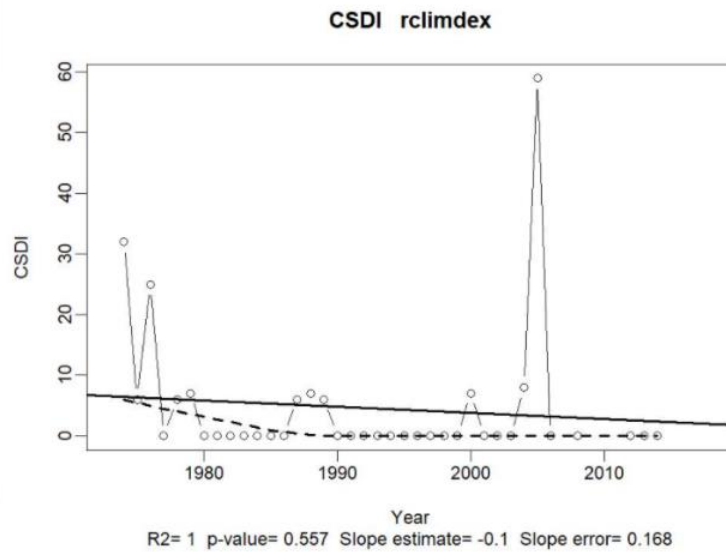


Fig. 4.8: Tendencia de los periodos fríos

Se concluye que estos resultados son consistentes con un aumento de la temperatura mínima. A este mismo valor se llegó con los test de Sen y Mann-Kendall.

-Temperatura máxima diaria

El máximo mensual de la temperatura máxima diaria (TXX) tiene un valor positivo para la pendiente, lo que indica que la temperatura máxima tiende a aumentar. Figura 4.9.

Este resultado no coincide con el de pendiente nula obtenido en la prueba de Mann-Kendall para temperatura máxima, por lo que luego de la verificación con el índice de cambio climático se afirma que la misma no se está manteniendo constante sino que está aumentando.

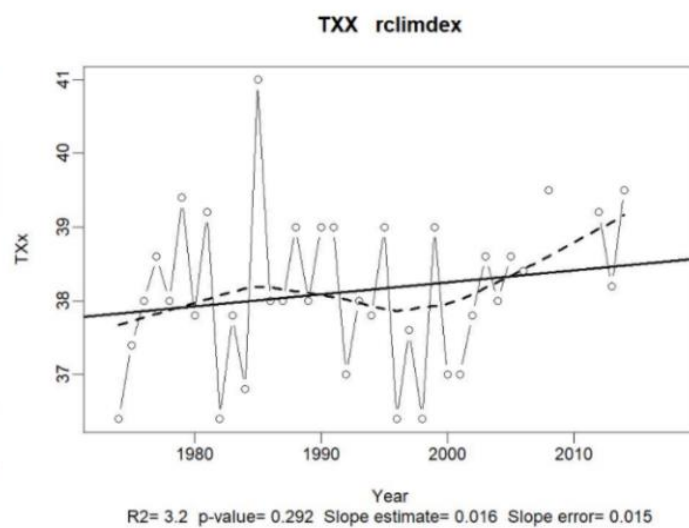


Fig. 4.9: Tendencia de la temperatura maxima extrema

Un resumen de los valores encontrados según los índices de detección de los cambios para la temperatura en el área analizada son los que se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Índices de cambio en la temperatura.

Código	Nombre	Tipo de Tendencia	Unidad
Temperatura mínima			
TNX	Temperatura mínima más alta	Aumento	°C
TN10p	Frecuencia de noches frías	Disminución	%
CSDI	Duración de los períodos fríos	Disminución	Días
Temperatura máxima			
TXx	Temperatura máxima extrema	Aumento	°C

Los resultados presentan aumento para las temperaturas máxima y mínima, disminución de la frecuencia de noches frías y de la duración de los periodos fríos. Estos valores son coherentes con resultados obtenidos en otros estudios similares tanto en el Paraguay como en la región tales como Vázquez 2011, Breuer 2017, Barros 2006, Castañeda 2000.

El aumento de temperatura implica un aumento del calor disponible en la atmósfera, lo que indica calentamiento global (IPCC, 2019). Esto demuestra que el cambio climático está influyendo en la variación de la temperatura en el área investigada y podría explicar la disminución del caudal del río Tebicuary en ciertas épocas del año debido a que la evaporación y el mayor uso del agua se producen cuando la temperatura es más elevada; pero solo lo justifica en mínima medida.

4.4.2. Tendencias en la precipitación -Fuerte precipitación

Los días con precipitación mayor a 10mm (R10), tienen tendencia a aumentar.

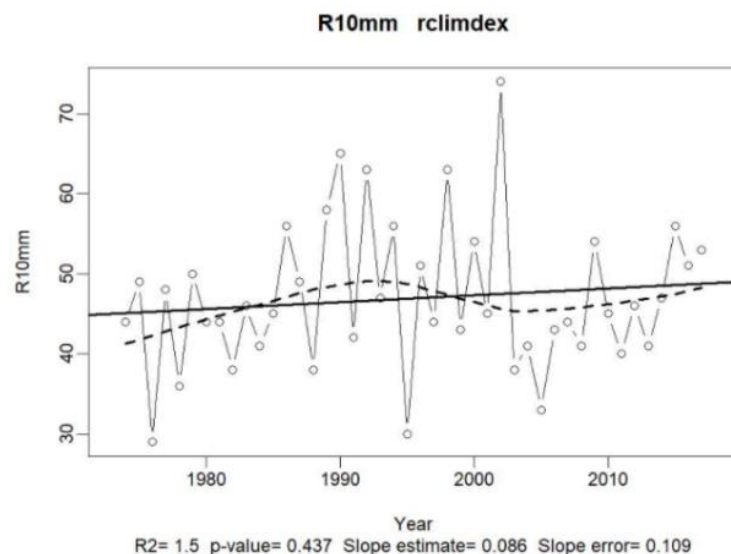


Fig. 4.10: Tendencia de días con lluvia mayor a 10 mm

-Días con precipitación muy intensa

Los días con lluvia mayor a 20 mm (R20), o sea días con precipitación muy intensa, se presentan con tendencia al aumento.

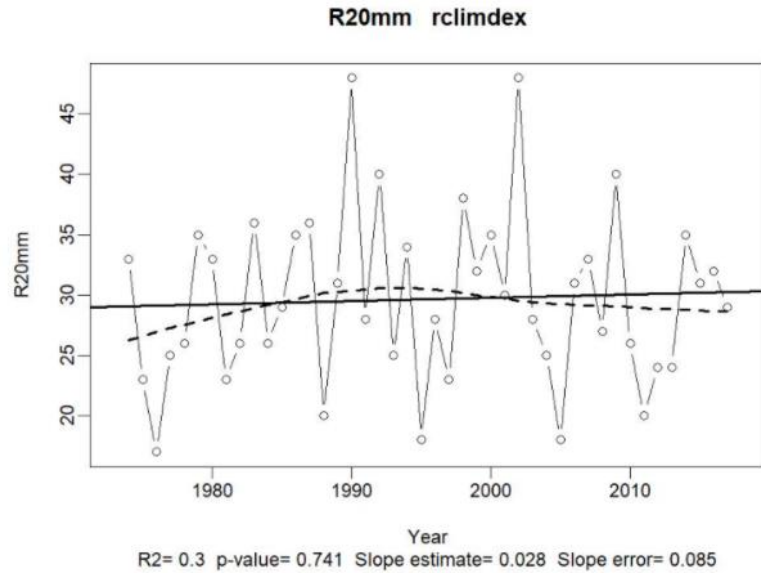


Fig. 4.11: Tendencia de días con lluvia mayor a 20 mm

-Días en que la precipitación es mayor a 25 mm

El recuento anual de días en que la precipitación es mayor a 25 mm (R25), presenta tendencia al aumento.

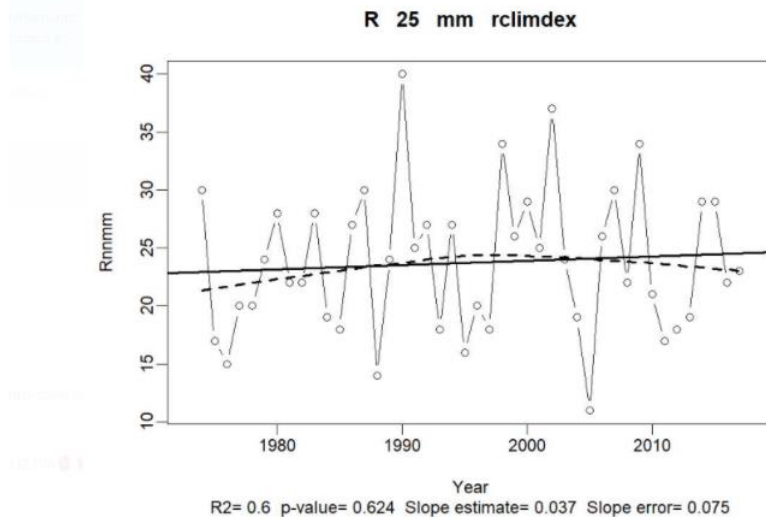


Fig. 4.12: Tendencia de días de lluvia mayor a 25mm

-Máxima precipitación en un día

La precipitación máxima en 1 día (RX1day) presenta tendencia al aumento.

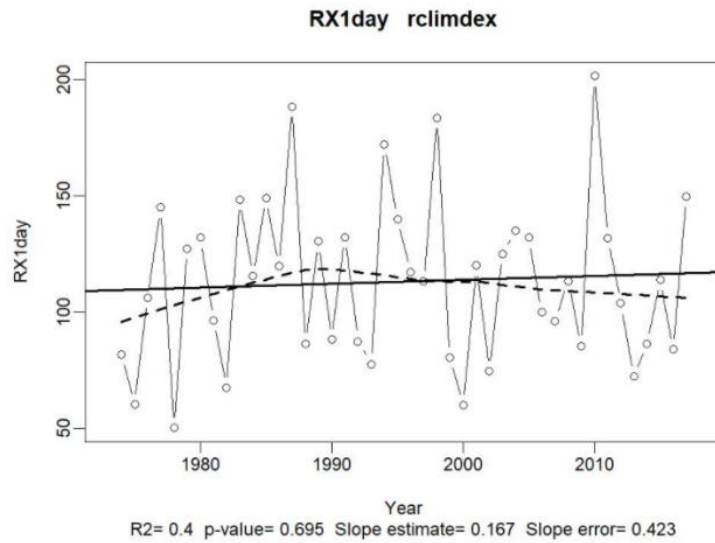


Fig. 4.13: Tendencia de la precipitación máxima en 1 día

-Precipitación máxima en cinco días

La precipitación máxima en 5 días (RX5day) tiene pendiente negativa.

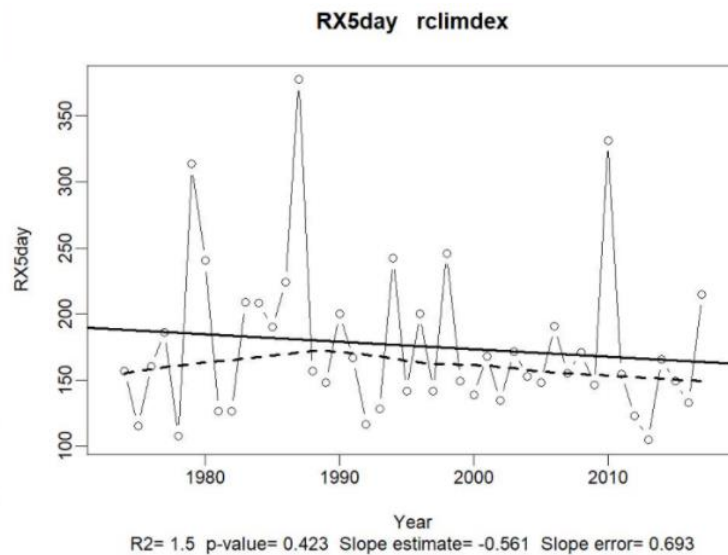


Fig. 4.14: Tendencia de la precipitación maxima en 5 días

-Intensidad diaria de la precipitación

El índice simple de intensidad diaria de la precipitación (SDII) presenta tendencia al aumento.

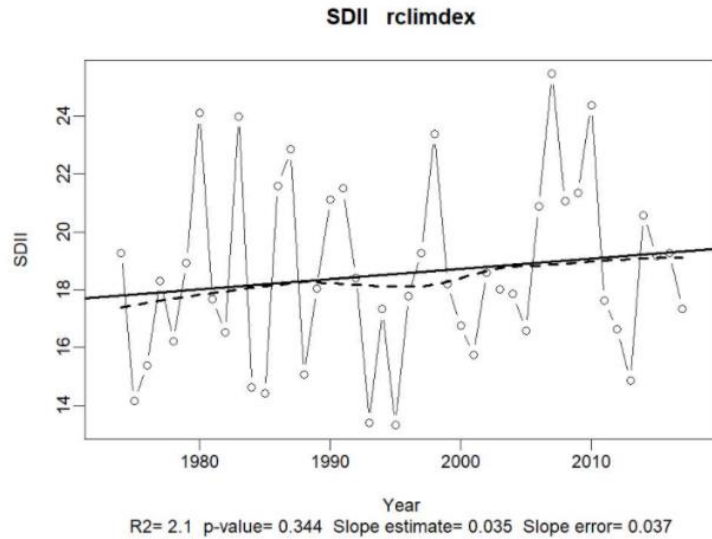


Fig. 4.15: Tendencia de la intensidad diaria de precipitación

-Precipitación total anual en días húmedos

La precipitación total anual en días húmedos (PRCPTOT), muestra tendencia al aumento.

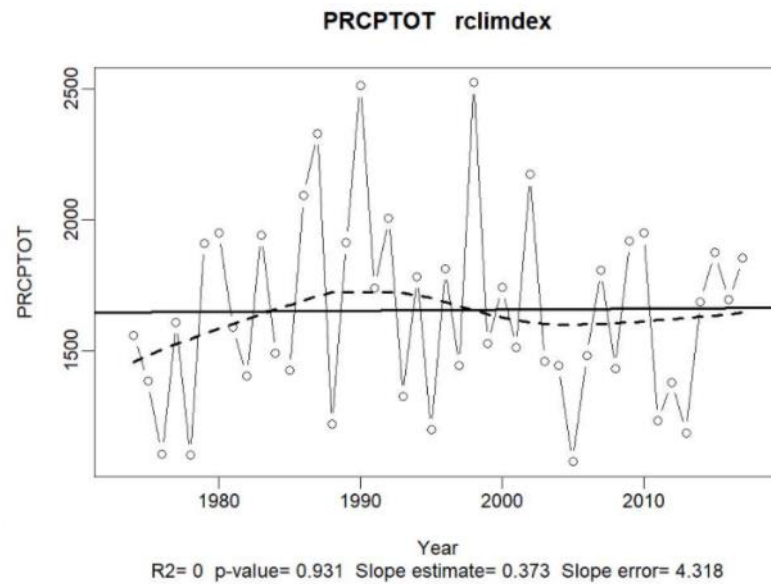


Fig 4.16: Tendencia de la precipitación total anual

-Días muy húmedos

Los días muy húmedos (R95p) tienen tendencia a aumentar.

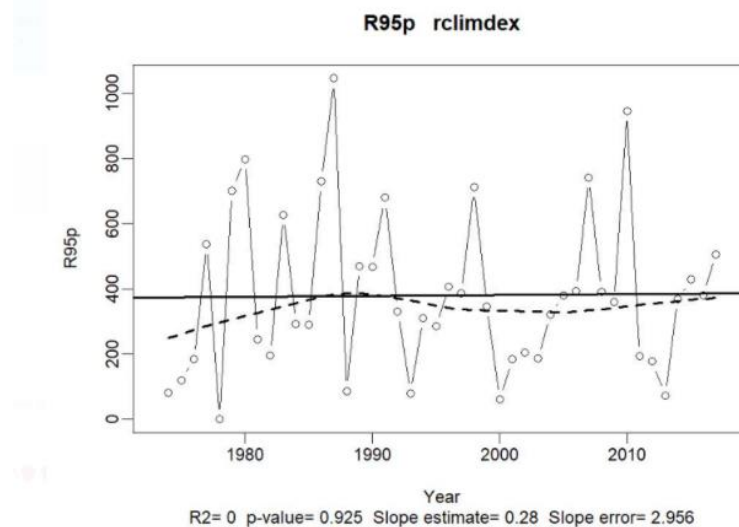


Fig. 4.17: Tendencia de días muy húmedos

Un resumen de los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Índices de cambio en la precipitación. Fuente: Elaboración propia

Código	Nombre	Tipo de Tendencia	Unidad
R10mm	Días con lluvia mayor a 10mm	Aumento	Días
R20mm	Días con lluvia mayor a 20mm	Aumento	Días
R25mm	Días con lluvia mayor a 25mm	Aumento	Días
RX1day	Precipitación máxima en 1 día	Aumento	mm
RX5day	Precipitación máxima en 5 días	Disminución	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria de precipitación	Aumento	mm
PRCPTOT	Precipitación total anual > 1mm	Aumento	mm
R95p	Días muy húmedos	Aumento	mm

Los índices para la precipitación indican que la misma está aumentando. Así lo muestran las tendencias positivas para los días con lluvia mayor a 10 mm, 20 mm y 25mm, el índice simple de intensidad diaria, la precipitación máxima en un día y la precipitación total anual. Esta conclusión en cierto modo se adecua a las previsiones publicadas en relación a la evolución de las precipitaciones durante el siglo XXI en un escenario de calentamiento global. En el caso de la Cuenca del Plata, las predicciones son de un aumento de las precipitaciones acompañado de una mayor frecuencia de eventos extremos (Tucci 1998, Liebmann 2004, Castañeda 2000)

La precipitación máxima en 5 días arroja tendencia negativa. Esto concuerda con los resultados de trabajos de investigación hechos para el este del país, sobre el aumento de la

intensidad de lluvia caída pero durante más corto periodo de tiempo. (Breuer 2017, Vázquez, 2011).

Los días muy húmedos tienden a aumentar; esto lleva al aumento de la humedad del aire, lo cual es un indicador del calentamiento global.

Según los resultados obtenidos, se produce aumento de la precipitación en la zona, las lluvias son más intensas y de menor duración. Es importante destacar que este comportamiento acrecienta el escurrimiento de agua sobre la superficie en la cuenca de drenaje y hace que se produzca el aumento del caudal; esto es aplicable cuando las precipitaciones son torrenciales.

El aumento de volumen del caudal del río Tebicuary entonces se puede asociar al aumento de las precipitaciones intensas en el área estudiada y a su vez estas precipitaciones se deben al cambio climático.

Se deriva de estos valores que los resultados del test Mann-Kendall para precipitación y temperatura máxima, cuyas pendientes dieron cero, se deben adecuar a los arrojados por los índices de CC ya que se procedió a analizar con otro método las variables climatológicas correspondientes tal como lo solicita la prueba Mann-Kendall.

4.5. Correlaciones entre las series hidroclimáticas

4.5.1. Correlación entre las series de caudal y precipitación

El coeficiente de correlación de Spearman establece que la relación entre la precipitación y el caudal es positiva y de muy fuerte intensidad, cercana a 1, como se puede observar en la tabla 4.10 de referencia. La nube de puntos indica la tendencia lineal de la relación como se muestra en la figura 4.18. Por consiguiente la variación de la precipitación está asociada de manera significativa a la variabilidad del caudal del río Tebicuary en Villa Florida. Esta relación positiva indica que un aumento de las precipitaciones hace que se produzca incremento en el caudal del río.

Tabla 4.10: Valor calculado del coeficiente de correlación de Spearman entre caudal y precipitación

$n = 529$
$\sum d^2 = 24.140.741$
$\rho = 1 - 6\sum d^2 / n(n^2 - 1) = 0,9984454161$

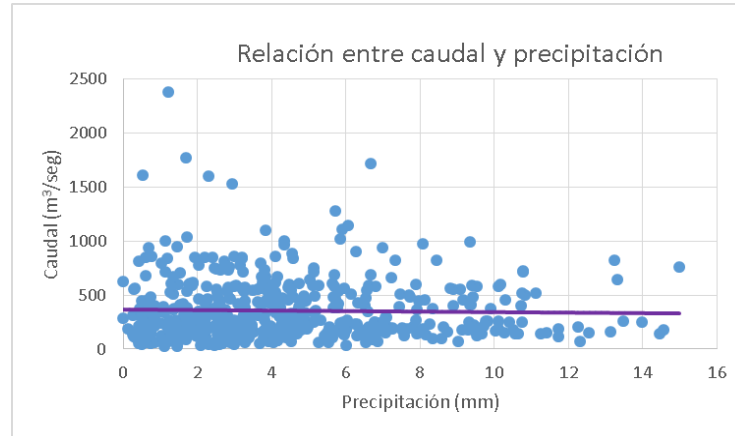


Figura 4.18: Relación entre el caudal y la precipitación

4.5.2. Correlación entre las series de caudal y temperatura

La relación entre el caudal y la temperatura es negativa y con buena significancia como indica el coeficiente de correlación obtenido $\rho = -0,68$ como se muestra en la tabla 4.11. La figura 4.19, muestra la aglomeración lineal de los puntos pertenecientes a las variables analizadas. La correlación inversa entre el caudal y la temperatura es previsible y se debe a que un aumento de la temperatura implica mayor evaporación del agua, mayor utilización de la misma y probablemente mayor almacenamiento en las piletas de depósito de agua que existen a lo largo del río.

Tabla 4.11: Valor calculado del coeficiente de correlación de Spearman, entre el caudal y temperatura

$n = 517$
$n^2 = 267.289$
$\sum d^2 = 24.600.580$
$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} = -0,68136$

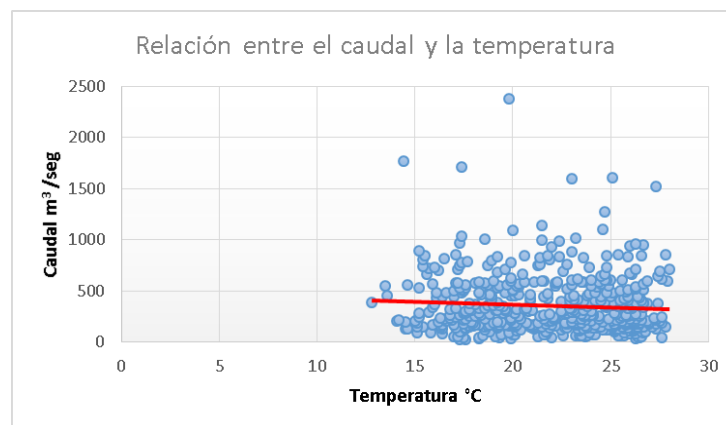


Figura 4.19: Relación entre el caudal y la temperatura

CAPÍTULO 5

6. Conclusiones

Estas conclusiones surgen del análisis de las tendencias, los índices de cambio climático, como sobre los coeficientes de correlación de las variables hidroclimatológicas analizadas.

La prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall y la pendiente de Sen permitieron determinar el aumento de la tendencia del caudal y la temperatura para la serie de tiempo establecida y en el área de estudio considerada.

Los resultados de precipitación y temperatura máxima mediante el cálculo de índices de cambio climático, indican incrementos en las lluvias para el área de estudio, lo cual favorece el aumento de caudal del río Tebicuary.

El test de Mann-Kendall arrojó aumento de tendencia en temperatura mínima y media. Al efectuar una comparación de los resultados en cuanto a temperatura, con los publicados por otros autores (Vázquez 2011, Breuer 2017), que han estudiado la evolución de las mismas en el país durante las últimas décadas, se observa similares conclusiones por más que los trabajos publicados comprenden diferentes períodos, áreas de estudio de extensión diversa y utilización de un número distinto de observatorios meteorológicos.

Los valores de las tendencias obtenidos por la investigación con métodos distintos son bastante similares, con lo cual las estimaciones obtenidas alcanzan confiabilidad pues proceden de orientaciones suficientemente diferentes.

El aumento de temperatura mínima junto con el aumento de temperatura máxima son coherentes con el proceso de calentamiento global.

Respecto a los coeficientes de correlación entre las series del caudal la precipitación y la temperatura, se puede afirmar que la variación de la precipitación en el área de estudio está asociada de manera significativa con el caudal del río Tebicuary de acuerdo al valor del coeficiente de correlación muy elevado que presenta. El aumento de precipitación comporta el aumento del caudal.

En cuanto a la temperatura y el caudal del río, presentan correlación inversa más moderada pero que de igual manera implican una relación importante entre la temperatura y el caudal del río; el aumento de temperatura conlleva la disminución del caudal.

Se puede deducir que el caudal del río Tebicuary aumenta debido al aumento de la variabilidad de las precipitaciones en el área de estudio en un contexto de cambio climático.

Los periódicos descensos del caudal se deberían a otras variables que requieren ser analizadas con otras investigaciones.

Los resultados han mostrado que el empleo de las variables utilizadas son de gran utilidad para caracterizar los cambios ocurridos en el régimen de lluvia y temperatura y su influencia sobre el cambio del caudal del río Tebicuary.

Por lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el caudal del río Tebicuary es sensible a la variabilidad climática de la región, lo que produce aumento en su caudal.

Como en la práctica, se presenta escasez de agua en la cuenca, sería muy importante analizar otras variables y en otros puntos para que en base a ellos se puedan realizar ajustes en las estrategias de uso del agua que se están adoptando actualmente. Estas disminuciones periódicas anuales del caudal se podrían deber a la mala utilización del recurso agua, cambio de uso del suelo, o a actividades antrópicas no adecuadas.

5.1. Recomendaciones

La investigación de los procesos atmosféricos que explican relaciones con extremos de precipitación y temperatura requieren de más trabajos en la zona estudiada. La presencia de mayor número de estaciones meteorológicas es de suma importancia para darle potencia a los resultados de trabajos de investigación sobre el tema expuesto.

Se sugiere la evaluación en siguientes estudios, de otros factores que influyen en el clima del lugar y que no fueron utilizados en esta investigación como el uso del suelo, la desaparición de bosques, las épocas del año donde se producen las disminuciones drásticas del caudal, la significancia de los hechos en los pobladores del lugar, la caracterización de las tendencias por estaciones para la determinación de una mejor estimación regional del caudal.

Debido a su robustez estadística, se recomienda la utilización de los análisis de tendencia en la investigación de temas hidroclimáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeloye, A., Montaseri, M., 2002: Preliminary Streamflow Data Analyses Prior to Water Resources Study. *Hydrological Sciences Journal*, 47(5), 679-692.
- Barros, V., 2005: El Cambio Climático Global. Ed Libros del Zorzal Buenos Aires 176 pp. ISBN 987-1081-88-X
- Barros, V., Clarke, R., Silva, P., Eds., 2006: El cambio climático en la Cuenca del Plata. - Buenos Aires: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET. 232 p.
- Bates, B., Kundzewicz, S., Wu P., Palutikof, F., Eds., 2008: El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224.
- Bayazit, M., 2015: No estacionariedad de los registros hidrológicos y tendencias recientes en el análisis de tendencias: una revisión del estado de la técnica. *Reinar. Proces.* 2, 527–542. doi: 10.1007 / s40710-015-0081-7
- Bock, F., 2018: Evaluación de la existencia de mejoras en la obtención de caudales a través de la aplicación del modelo MGB-Inercial. Estudio de caso: cuenca del río Tebicuary. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería UNA.
- Breuer N., Báez J., Oreggioni F., 2017: Percepción y observación de las variaciones en el régimen pluviométrico en Itapúa y Alto Paraná. *Paraquaria Nat.* 5(2): 37 – 44 ISSN 2309-5237. Recuperado el 10 de diciembre de 2019 desde <https://paraquaria.org.py/product/percepcion-y-observacion-de-las-variaciones-en-el-regimen-pluviometrico-en-itapua-y-alto-parana/>
- Camilloni, I., Barros V., 2003: Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. *J. of Hydrology*, 278, 94-106.
- Castañeda M., Doyle, M., 2000: Recent precipitation trends in Southern South America east of the Andes: an indication of climatic variability. *Southern Hemisphere paleo-and neoclimates*. Eds.: P. P. Smolka, W. Volkheimer. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, pp. 187-206.
- CONAMA. 2006: Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Engle, N., Lemos, M., 2010: Unpacking governance: building adaptive capacity to climate change of river basins in Brazil. *Global Environmental Change*, 20(1), 4-13.
- Genta, J., Perez I., Mechoso, C., 1998: A recent increasing trend in the streamflow of rivers in southeastern South America. *J. Climate*, 11, 2858–2862.
- González, M., Barros, V., 1998: The relation between tropical convection in South America and the end of the dry period in subtropical Argentina. *J. Climate*, 18, 1669-1685.
- Gosain, A., Rao, S., Basuray, D., 2006: Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current science*, 90(3), 346-353. . Recuperado el 6 de octubre de 2019 desde https://www.researchgate.net/profile/Ashvani_Gosain/publication/237268322_Climate_Change_Impact_Assessment_on_Hydrology_of_Indian_River_Basins/links/00b4953bd6fce3a881000000.pdf

- Hirsch, R., Slack, J., 1994: Una prueba de tendencia no paramétrica para datos estacionales con dependencia serial. *Recurso de agua. Res.* 20, 727–732. doi: 10.1029 / WR020i006p00727
- IHCantabria. Metodología para la determinación y evaluación de caudales ecológicos y planes de manejo de cuencas en Paraguay aplicación a la cuenca piloto del río Tebicuary.
- IPCC. 2013: Climate Change, bases físicas. Unidad de apoyo técnico del Grupo de trabajo I del IPCC. OMM, PNUMA
- IPCC. Nakicenovic, N., Swart, R., 2014: Emissions scenarios. Special report of the Intergovernmental panel on climate change. . Recuperado el 9 de septiembre de 2019 desde https://pure.mpg.de/rest/items/item_1977530/component/file_1977527/content
- IPCC. 2019: Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático y tierra: un informe especial del IPCC sobre cambio climático, desertificación, degradación de la tierra, gestión sostenible de la tierra, seguridad alimentaria y flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres [PR Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson -Delmotte, H.- O. Pörtner, DC Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. En prensa.
- Kendall, M. 1975: Métodos de correlación de rango. Nueva York, NY: Oxford University Press.
- Li, W., Zhang, P., Ye, J., Li, L., Baker, P., 2011: Impact of two different types of El Niño events on the Amazon climate and ecosystem productivity. *Journal of Plant Ecology*, 4(1-2), 91-99. . Recuperado el 29 de septiembre de 2019 desde <https://academic.oup.com/jpe/article/4/1-2/91/938353>.
- Liebmann, B., Vera, C., Carvalho, L., Camilloni, I., Hoerling, M., Allured D., Barros V., Báez J., Bidegain, M., 2004: An Observed Trend in Central South American Precipitation. *American*
- Martínez, R., Tuya, L., Pérez, A., Cánovas, A., 2009: El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8, 0 – 0.
- Molina, M., Sarukhan J., Carabias, J., 2017: El cambio climático. Causas, efectos y soluciones. México: FCE, SEP, CONACYT. 222p.
- Mongelós, S., 2016: Informe cuenca del río Tebicuary. Proyecto PMSAS 77/10-SEAM-MOPC. En línea <http://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2018/06/INFORME-FINAL-TEBICUARY-PMSAS-2016.pdf>
- Robertson, A., Mechoso, C., García, N., 2001: Interannual prediction of river flows in Sen, PK (1968). Estimaciones del coeficiente de regresión basadas en la Tau de Kendall. *Mermelada. Estadístico. Assoc.* 63,1379-1389. doi:10.1080/ 01621459.1968.10480934
- Tucci, C., Clarke, R., 1998: Environmental issues in the Rio de la Plata basin. *Water Resources Development*, 14,157-175
- Vázquez, M., Vázquez, B., 2017: El fenómeno El Niño/Oscilación Sur (ENOS) y su impacto en el régimen de lluvias en Paraguay en 2015. *Rev. Soc. cient. Parag.* 2017;22:(1):87-101.

- Vázquez, M., 2011: Variabilidad climática interanual de Paraguay asociada al fenómeno El Niño/Oscilación Sur (ENOS). *Rev. Soc. Cient. Parag.* 2011;16:(2):163-173.
- Vázquez, M., 2013: Variabilidad interanual de la lluvia asociada al fenómeno La Niña. *Rev. Soc. Cient. Parag.* 2013;18:(1):47-58.
- Vázquez, J., 2010: Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. México, DF.: SEMARNAT.
- Wang F., Wei S., Yu, J., Guangyuan K., Xiaoyan H., Zhang, D., Ren M., Wang, G., 2020: Reevaluación del poder de la prueba de Mann-Kendall para detectar tendencias monotónicas en series de tiempo hidrometeorológicas. Artículo de investigación original. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00014>
- Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002: Potencia de las pruebas de rho de Mann-Kendall y Spearman para detectar tendencias monótonas en series hidrológicas. *J. Hidrol* 259,254-271. Doi: 10.1016/S0022-1694 (01) 00594.
- Zhang, X., Yang, F.,2004: RClmDex User Guide. Ontario(s.n.). Recuperado el 3 de febrero de 2020 desde <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>.

ANEXO

Anexo: Índices climáticos definidos por el ETCCDI

Código	Nombre	Definición
SU25	Días de verano	Número de días en 1 año en que TX > 25°C
IDO	Días con hielo	Número de días en 1 año en que TX < 0°C
TR20	Noches Tropicales	Número de días en 1 año en que TN > 20°C
FD0	Días con helada	Número de días en 1 año en que TN < 0°C
GSL	Duración de la estación de Crecimiento	Número de días en 1 año entre la primera racha de, como mínimo, 6 días con TG>5°C y la primera racha después de 1 de julio con, como mínimo, 6 días con TG<5°C
TXx	Temperatura máxima extrema	Valor máximo anual de la temperatura máxima diaria
TXn	Temperatura máxima más baja	Valor mínimo anual de la temperatura máxima diaria
TNx	Temperatura mínima más alta	Valor máximo anual de la temperatura mínima diaria
TNn	Temperatura mínima extrema	Valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria
Tx10p	Frecuencia de días frescos	Porcentaje de días en que TX<percentil 10
Tx90p	Frecuencia de días calurosos	Porcentaje de días en que TX>percentil 90
Tn10p	Frecuencia de noches frías	Porcentaje de días en que TN<percentil 10
Tn90p	Frecuencia de noches cálidas	Porcentaje de días en que TN>percentil 90
WSDI	Duración de los períodos cálidos	Número de días en un año que, como mínimo, hay 6 días consecutivos con TX>percentil 90
CSDI	Duración de los períodos fríos	Número de días en un año que, como mínimo, hay 6 días consecutivos con TN<percentil 90
DTR	Rango diario de temperatura	Media anual de la diferencia entre TX y TN
RX1day	Precipitación máxima en un día	Valor máximo anual de la PPT diaria
RX5day	Precipitación máxima en cinco días	Máxima anual de la PPT registrada en 5 días consecutivos
SDII	Índice simple de intensidad diaria	PPT total anual dividida entre el número de días con PPT≥1mm
R10	Días con lluvia mayor a 10 mm	Número anual de días en que PPT≥10mm
R20	Días con lluvia mayor a 20 mm	Número anual de días en que PPT≥20mm
R25	Días con lluvia mayor a 25 mm	Número anual de días en que PPT ≥ 25 mm
CDD	Días secos consecutivos	Máximo número en 1 año de días consecutivos con PPT < 1 mm
CWD	Días húmedos consecutivos	Máximo número en 1 año de días consecutivos con PPT ≥ 1mm
R95p	Días muy húmedos	PPT total anual (en días en que PPT ≥ 1 mm) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 95
R99p	Días extremadamente húmedos	PPT total anual (en días en que PPT ≥ 1 mm) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 99
PRCPTOT	Precipitación total	PPT total anual en días en que PPT ≥ 1 mm

Fuente: Vázquez 2010

TN= temperatura mínima
 TX= temperatura máxima
 TG= temperatura media
 PPT= precipitación



Con el apoyo de:



La maestría “Gestión de Riesgo de Desastre y Adaptación al Cambio Climático” es cofinanciada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - CONACYT con recursos del FEEI.