

**EFFECTOS SOBRE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LA CUENCA
DEL RÍO GUAVIO ASOCIADOS A UN EMBALSE**



PAOLA ANDREA PINZÓN GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.**

2021

**EFFECTOS SOBRE LA PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA DE LA CUENCA
DEL RÍO GUAVIO ASOCIADOS A UN EMBALSE**

PAOLA ANDREA PINZÓN GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Ambiental

Director

DAVID ANDRÉS ZAMORA ÁVILA

DOCENTE DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2021

Dedicatoria

Es para mí un orgullo dedicar con todo mi amor y felicidad este trabajo de grado a mis padres por haber estado a lo largo de mi proceso de formación como persona y profesional, porque muchos de mis logros se los debo a su esfuerzo, dedicación y amor.

A mi abuela Lilia Imelda Beltrán Beltrán, mi segunda madre, por su amor, apoyo incondicional y por siempre tenerme en sus oraciones.

A mi tía Martha Yolanda González Beltrán por su cariño, consejos, comprensión y apoyo constante. Por motivarme siempre a salir adelante y a crecer tanto personal como profesionalmente.

A mis amigos y amigas por su apoyo incondicional en momentos en los que sentí desfallecer, por las risas, los consejos y el amor que siempre me han brindado.

A ellos por enseñarme que aquel que persevera alcanza, por ser ese motivo constate para alcanzar mis logros y por estar presente en todas las etapas de mi vida.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mis agradecimientos a mi director de trabajo de grado David Andrés Zamora Ávila, por la dedicación, esfuerzo, paciencia y apoyo que ha brindado a este trabajo y por darme la oportunidad de recurrir a sus conocimientos y guiarme durante todo el desarrollo de este proyecto de grado.

A los docentes de la facultad de ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomás quienes en el transcurso de la carrera me aportaron valiosos conocimientos los cuales hoy me forman como una profesional integra.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos, y a todas las personas que directa o indirectamente me ayudaron, aconsejaron y apoyaron a lo largo de este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. ANTECEDENTES.....	18
3. MARCO TEÓRICO	21
3.1 CUENCA HIDROGRÁFICA.....	21
3.2 PRECIPITACIÓN	21
3.3 COBERTURA VEGETAL.....	22
3.4 USO DEL SUELO.....	22
3.5 ÁREA DE ESTUDIO.....	22
3.5.1 Cuenca hidrográfica del río Guavio.....	22
3.5.2 Climatología del área de estudio.	24
3.5.3 Cobertura vegetal y uso del suelo.....	24
3.5.4 Aspectos socioeconómicos.	25
3.6 HIDROELÉCTRICA.....	26
3.6.1 Represa.....	27
3.6.2 Represa y central hidroeléctrica del Guavio.	27
3.7 ANÁLISIS DE TENDENCIAS.....	28
3.7.1 Mann-Kendall.....	28
3.7.2 Pettitt test.	30
3.8 WILCOXON TEST	31
3.9 TEST DE CORRELACIÓN.....	32
3.9.1 Coeficiente de correlación de Pearson.....	33
3.10 FENÓMENO DEL NIÑO Y LA NIÑA - OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO)....	34
3.11 INTERPOLACIÓN DISTANCIA INVERSA PONDERADA (IDW)	35

3.12 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI).....	36
4. METODOLOGÍA.....	39
4.1 FASE 1: RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	39
4.2 FASE 2: DELIMITACIÓN DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO GUAVIO Y SELECCIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS	39
4.3 FASE 3: INTERPOLACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN IDW Y OBTENCIÓN DE DATOS DEL NDVI.....	40
4.4 FASE 4: ANÁLISIS DE TENDENCIAS A ESCALAS MENSUALES Y ANUALES.....	40
4.5 FASE 5: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE EL NDVI, LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA.....	43
5. RESULTADOS	44
5.1 OBTENCIÓN DE DATOS.....	44
5.1.1 Selección de estaciones hidrometereológicas.	44
5.2 INTERPOLACIÓN DISTANCIA INVERSA PONDERADA (IDW)	46
5.3 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA, LA PRECIPITACIÓN Y EL NDVI.....	49
5.4 APLICACIÓN DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS	60
5.4.1 Pettit test: puntos de inflexión en las series de tiempo de la precipitación y temperatura.	60
5.4.2 Prueba de tendencias Mann-Kendall.....	62
5.5 PRUEBA DE TENDENCIAS WILCOXON	66
5.6 TEST DE CORRELACIÓN.....	70
6. IMPACTO SOCIAL	73
9. RECOMENDACIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización de la subzona hidrográfica del río Guavio.....	23
Figura 2. Cobertura vegetal de la sub zona hidrográfica del río Guavio.....	25
Figura 3. Localización del embalse del Guavio a nivel nacional, municipal y en la cuenca.....	28
Figura 4. Condiciones océano atmosféricas del Pacífico tropical, durante los períodos normales y de ocurrencia de los fenómenos El Niño.	34
Figura 5. Radiación reflejada en las longitudes de onda del infrarrojo y longitudes de onda visibles en vegetación sana y enferma.	37
Figura 6. Distribución espacial de estaciones seleccionadas para el estudio a nivel de cuenca y subcuencas objeto de análisis.....	46
Figura 7. Resultados de la interpolación IDW para los meses de enero y junio de 1977.....	47
Figura 8. Resultados de la interpolación IDW para los meses de enero y junio de 1992.....	48
Figura 9. Resultados de la interpolación IDW para los meses de enero y junio de 2017.....	49
Figura 10. Variación de la precipitación de 1977 a 2017 en la cuenca del río Guavio.	50
Figura 11. Variación de la precipitación de 1977 a 2017 en la subcuenca del río Sueva.	51
Figura 12. Variación de la precipitación de 1977 a 2017 en la subcuenca del río Batatas.	52
Figura 13. Variación de la precipitación de 1977 a 2017 en la subcuenca del río Chivor.	53
Figura 14. Variación de la precipitación desde 1977 a 2017 en la subcuenca del río Negro.....	54
Figura 15. Variación de la temperatura desde 1977 a 2017 en la cuenca y subcuencas.	55
Figura 16. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la cuenca del río Guavio...	56

Figura 17. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la subcuenca del río Sueva.	57
Figura 18. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la subcuenca del río Batatas.	58
Figura 19. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la subcuenca del río Chivor.	59
Figura 20. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la subcuenca del río Negro.	60
Figura 21. Probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula de los resultados de la prueba de Pettitt aplicada a los valores anuales de precipitación.....	61
Figura 22. Probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula de la prueba Mann Kendall para los valores de precipitación mensual multianual.....	63
Figura 23. Probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula de la prueba Mann Kendall para los valores de precipitación anual de 1977 a 2017.	64
Figura 24. Probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula de la prueba Mann Kendall para los valores de temperatura mensual multianual.	65
Figura 25. Resultados de la prueba de Wilcoxon para la precipitación mensual multianual antes y después de entrar en operación el embalse.....	67
Figura 26. Resultados de la prueba de Wilcoxon para la precipitación anual antes y después de entrar en operación el embalse.....	68
Figura 27. Diagrama de cajas de la temperatura antes y después de la construcción del embalse.....	68
Figura 28. Resultados de la prueba de Wilcoxon para cambios en la temperatura mensual antes y después de entrar en operación el embalse.....	69
Figura 29. Comparación de los reportes de las precipitaciones anuales de las estaciones próximas de Claraval y Tembladares para el periodo de 1977 a 2017.	91
Figura 30. Comparación de los reportes de las precipitaciones anuales de las estaciones próximas de San Juanito y Medina para el periodo de 1977 a 2017. ...	92
Figura 31. Comparación de los reportes de las precipitaciones anuales de las estaciones próximas de la Gloria y Santa Rosa de Ubalá para el periodo de 1977 a 2017.....	93

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Episodios históricos de El Niño / La Niña (1977 - 2017).....	41
Tabla 2. Resultados del análisis de consistencia y completitud de las estaciones de precipitación	45
Tabla 3. Resultados de la prueba Pettit aplicada para la detección de puntos de inflexión de los valores anuales de precipitación en el periodo de 1977 a 2017.	61
Tabla 4. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para la detección de tendencias de los valores anuales de temperatura en el periodo de 1977 a 2017.	65
Tabla 5. Resultados de la prueba de correlación entre el NDVI y la precipitación mensual en el periodo de 1982 a 2017.	70
Tabla 6. Resultados del test de correlación entre el NDVI y la precipitación anual en el periodo de 1982 a 2017.	71
Tabla 7. Resultados del test de correlación entre el NDVI y la temperatura mensual en el periodo de 1982 a 2017.	71
Tabla 8. Resultados del test de correlación entre el NDVI y la temperatura anual en el periodo de 1982 a 2017.	72
Tabla 9. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para la detección de tendencias en las precipitaciones mensuales multianuales y anuales.	93
Tabla 10. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para la detección de tendencias en la temperatura promedio mensual multianual.	95

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Resultados de la prueba de la prueba de inspección visual de los reportes de precipitación anual de las estaciones del IDEAM descartadas.	91
Anexo B. Resultados de la prueba Mann Kendal para los valores de precipitación y temperatura promedio mensual multianual y anual.	93

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolos

Símbolo	Término
mm	Milímetros
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje
m	Metros
MW	Megavatio
<i>Km</i>	Kilómetros
<i>Km²</i>	Kilómetro cuadrado
Ha	Hectárea
<i>m³</i>	Metros cúbicos
s	Segundos
α	Nivel de confianza
μm	Micrómetros

Abreviaturas

Abreviatura	Término
PG	Pluviográficas.
PM	Pluviométricas.
CO	Climatológica Ordinaria.
NDVI	Índice de vegetación de Diferencia Normalizada.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
ENSO	El Niño-Oscilación del Sur.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
DHIME	Sistema de Información para la Gestión de Datos de Hidrología y Meteorología.
CRU	Climate Research Unit
POMCA	Plan de Manejo y Ordenamiento de la cuenca

RESUMEN

En los últimos años la importancia de los embalses para el aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales, la producción de energía hidroeléctrica, el control de inundaciones y el abastecimiento de agua potable; ha generado un incremento en su desarrollo y construcción a lo largo de las cuencas hidrográficas colombianas. Sin embargo, los beneficios generados por los embalses han venido ocasionando una serie de impactos ambientales que han contribuido a la afectación del recurso hídrico y la variabilidad climática, debido a que la gran cantidad de agua concentrada de forma artificial para la construcción de embalses dentro de los cauces de los ríos incide en las variables hidrometeorológicas.

Teniendo en cuenta lo expuesto con anterioridad la determinación de la influencia de los embalses sobre las variables del ciclo hidrológico de las cuencas colombianas es un tema de suma importancia e interés en la actualidad. Por consiguiente, este trabajo de grado tuvo el propósito de determinar los efectos de un embalse sobre la precipitación y la temperatura de la cuenca del río Guavio y sus subcuencas a escala mensual y anual, mediante la aplicación de pruebas para el análisis de tendencias como la prueba Mann Kendall y Pettit, además del test de Wilcoxon y de correlación de Pearson aplicados para el periodo comprendido entre enero de 1977 a diciembre de 2017. El proyecto de grado fue llevado a cabo en cinco fases las cuales abarcaron: (i) la recolección de la información; (ii) la delimitación de la cuenca y subcuencas objeto de análisis y determinación de las estaciones a usar por medio de un análisis de consistencia; (iii) la interpolación de la precipitación y obtención de datos del Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI); (iv) la aplicación del análisis de tendencias y el (v) test de correlación entre el NDVI, la precipitación y la temperatura a escalas mensuales y anuales.

Los resultados arrojados por las pruebas de Mann Kendall y Wilcoxon indicaron que a escala anual y mensual en solo ciertos meses del año existieron tendencias estadísticamente significativas en las cuales hubo una reducción de las precipitaciones y un incremento de las temperaturas, además de existir diferencias significativas de las variables objeto de análisis en el periodo antes y después de entrar en operación el embalse; dichos resultados se replicaron en tres subcuencas en general (Subcuenca del río Sueva, Batatas y Chivor). Sin embargo, para la cuenca y subcuenca del río Sueva se concluyó que las fluctuaciones en las variables hidrológicas estudiadas estuvieron asociadas en mayor medida a la transformación de coberturas, debido a que presentaron una correlación estadísticamente significativa entre la precipitación, temperatura y el NDVI.

Por otro lado, se evidenció que el embalse está ocasionando alteraciones sobre las precipitaciones y temperaturas a una escala anual y mensual, provocando los efectos más significativos en las subcuencas del río Batatas y Chivor, las cuales, se encuentran más cercanas al embalse. Sin embargo, no es posible aseverar en que proporción el embalse ha contribuido a generar cambios sobre las variables climatológicas analizadas, debido a que estas también se ven influenciadas por factores como las dinámicas de uso del suelo y fenómenos climatológicos como el del niño y la niña

Finalmente, estos resultados permitieron llegar a la conclusión de que las condiciones sobre las precipitaciones y temperaturas que ha generado el embalse pueden llegar a afectar la operación de la misma hidroeléctrica y otros servicios ecosistémicos de la cuenca.

Palabras claves: Cuenca, embalse, precipitación, temperatura, tendencia, NDVI.

ABSTRACT

In recent years the importance of reservoirs for the use of surface water resources, hydroelectric power production, flood control and drinking water supply; has generated an increase in their development and construction along the Colombian river basins. However, the benefits generated by the reservoirs have been causing a series of environmental impacts that have contributed to the affectation of water resources and climatic variability, due to the fact that the large amount of artificially concentrated water for the construction of reservoirs within riverbeds has an impact on hydrometeorological variables.

Taking into account what has been previously exposed, the determination of the influence of reservoirs on the variables of the hydrological cycle of the Colombian basins is a topic of great importance and interest at present. Therefore, this degree work had the purpose of determining the effects of a reservoir on the precipitation and temperature of the Guavio River basin and its sub-basins on a monthly and annual scale, through the application of tests for trend analysis such as the Mann Kendall and Pettit test, in addition to the Wilcoxon and Pearson correlation tests applied for the period from January 1977 to December 2017. The degree project was carried out in five phases which included (i) the collection of the information; (ii) the delimitation of the basin and sub-basins object of analysis and determination of the stations to use by means of a consistency analysis; (iii) the interpolation of the precipitation and obtaining data of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); (iv) the application of the analysis of tendencies and the (v) test of correlation between the NDVI, the precipitation and the temperature at monthly and annual scales.

The results of the Mann Kendall and Wilcoxon tests indicated that on an annual and monthly scale in only certain months of the year there were statistically significant trends in which there was a reduction in precipitation and an increase in temperature, in addition to significant differences in the variables analyzed in the period before and after the reservoir began operating; these results were replicated in three sub-basins in general (Sueva, Batatas and Chivor River sub-basins). However, for the Sueva River basin and sub-basin it was concluded that the fluctuations in the hydrological variables studied were associated to a greater extent to the transformation of coverages, because they presented a statistically significant correlation between precipitation, temperature and the NDVI.

On the other hand, it was evidenced that the reservoir is causing alterations on the precipitation and temperatures on an annual and monthly scale, causing the most significant effects on the sub-basins of the Batatas and Chivor rivers, which are closer to the reservoir. However, it is not possible to assert in what proportion the

reservoir has contributed to generate changes on the analyzed climatological variables, because these are also influenced by factors such as the dynamics of soil use and climatological phenomena like the one of the boy and the girl.

Finally, these results allowed us to reach the conclusion that the conditions on rainfalls and temperatures generated by the reservoir can affect the operation of the hydroelectric plant and other ecosystem services in the basin.

Keywords: Basin, reservoir, precipitation, temperature, trend, NDVI.

INTRODUCCIÓN

La construcción de embalses en la actualidad además de contribuir al desarrollo económico ha satisfecho un sinnúmero de necesidades como el control de inundaciones, el abastecimiento de agua para consumo humano o riego y la producción de energía hidroeléctrica, permitiendo de esta manera mejorar la calidad de vida de las personas a nivel mundial [1]. A nivel regional Colombia es uno de los países sudamericanos con mayor potencial para la producción de energía hidroeléctrica, ocupando la tercera posición conforme a su capacidad instalada. Dentro de la matriz energética de Colombia el sector hidroeléctrico representa el 70 % de la producción de energía eléctrica instalada [2]. En consecuencia, la importancia y desarrollo de este tipo de energía renovable ha generado un incremento en la planeación de proyectos de centrales hidroeléctricas y de embalses en las cuencas hidrográficas colombianas, convirtiéndose en una problemática ambiental y social actual de gran relevancia.

Dentro de las principales problemáticas ambientales derivadas de la construcción de embalses artificiales, se encuentra la alteración de los caudales y curso natural de las diferentes corrientes fluviales, provocando numerosos impactos en los ecosistemas acuáticos y terrestres [3]. Además, se ha demostrado ampliamente que la gran cantidad de agua concentrada de forma artificial para la construcción de embalses dentro de los cauces de los ríos incide en la variación hidroclimática, es decir, genera cambios en las tendencias de variables tales como la temperatura, evapotranspiración, escorrentía y precipitación [4]. Por otro lado, se ha comprobado que los grandes embalses generan un microclima que altera los patrones de lluvia pues producen un incremento en la cantidad de agua que se evapora, generando efectos más significativos en zonas con escasa vegetación o climas más secos [5].

Las fluctuaciones en variables hidroclimáticas como la precipitación, temperatura y escorrentía, producto de la construcción de embalses puede generar efectos directos e indirectos sobre el sector agrícola de las zonas aledañas a las represas, el cual es extremadamente vulnerable a la variabilidad climática, puesto que los cambios en los regímenes de lluvia aumentan las probabilidades de fracaso de las cosechas, reduce el rendimiento y producción de los cultivos amenazados por la disponibilidad de agua para riego [6]. No obstante, las alteraciones en dichas variables no solo afectan sectores como el agrícola, sino que también genera repercusiones sobre las poblaciones aledañas económicamente activas cuyo sustento depende de actividades económicas como la ganadería o piscicultura.

Sin embargo, a pesar de que se han venido identificando las alteraciones sobre las variables hidrometeorológicas que generan los embalses, en general, la mayoría de los impactos analizados al momento de su planeación y construcción se enfocan

primordialmente en las afectaciones sobre factores como la geomorfología y los ecosistemas, sin anticipar las posibles modificaciones que pueden generar la construcción de embalses sobre la hidroclimatología de las áreas próximas a los proyectos. Teniendo en cuenta lo expuesto con anterioridad establecer la magnitud y dirección de los cambios en las variables hidroclimáticas puede contribuir a llenar un vacío en la información que aporte bases para que en los proyectos futuros sean consideradas las afectaciones sobre variables climatológicas como la precipitación y temperatura, que permitan una planificación acertada que anticipe la construcción de medidas de mitigación de los impactos de dichas fluctuaciones sobre los servicios ecosistémicos y las poblaciones en las zonas de influencia directa e indirecta de los proyectos. Por ello, ha nacido el interés por determinar los efectos de un embalse sobre la precipitación y la temperatura de la cuenca hidrográfica del río Guavio, mediante la aplicación de pruebas de contraste las cuales permitieron determinar las fluctuaciones en las variables objeto de análisis, antes y después de la construcción del embalse, a escala mensual y anual y en unidades de cuenca y subcuenca.

Finalmente, los resultados obtenidos del trabajo de grado realizado se muestran en el siguiente informe cuya estructura se enmarca en la presentación de los objetivos establecidos para llevar a cabo el proyecto, posteriormente se exponen los estudios previos que hacen referencia a los efectos que han tenido los embalses sobre las variables hidroclimatológicas tanto a nivel local como regional; seguido a esto se definen el marco teórico en el cual se recopilan los conceptos básicos que fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto; más adelante se exponen las fases metodológicas llevadas a cabo para dar cumplimiento a los objetivos propuestos; en seguida se dan a conocer los resultados obtenidos y se realiza una discusión de los mismos; luego se plantean los impactos sociales obtenidos de la realización del proyecto; se plantean las conclusiones derivadas de los resultados y por último, se realizan una serie de recomendaciones respecto a la experiencia adquirida con el trabajo realizado.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los efectos de un embalse sobre la precipitación y la temperatura en la cuenca hidrográfica del río Guavio a escala mensual y anual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar análisis de tendencia a las series de tiempo de precipitación y temperatura tanto a escala mensual como anual y a escala de cuenca y subcuenca.
- Determinar la variación histórica y espacial en la precipitación y temperatura a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos para el análisis de tendencias.
- Establecer las zonas de influencia donde se presenta la mayor variación de la precipitación y temperatura luego de la construcción del embalse.
- Analizar la relación entre índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la temperatura y la precipitación del área de estudio.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad la energía hidroeléctrica es la forma de energía renovable más usada en todo el mundo, representando así la quinta parte de la producción de la energía eléctrica a nivel mundial [7]; sin embargo, su desarrollo y construcción, característico por modificar el caudal y curso natural de las diferentes corrientes fluviales han provocado numerosos impactos sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres [8]. Dentro de otros efectos asociados a la construcción de embalses se encuentra las fluctuaciones en las variables hidroclimáticas como la precipitación y escorrentía y la variación en el clima local de las zonas intervenidas; por ejemplo, Degu, et al. (2011) realizaron una evaluación de la influencia de grandes represas de EE.UU en el clima y los patrones de precipitación, encontrando que la variación es baja sobre el clima local en regiones húmedas y con presencia de bosques, debido principalmente a que la evaporación que producen los cuerpos de agua artificiales es comparable a la producida por la cobertura vegetal extraída para su construcción; sin embargo, en regiones semiáridas y mediterráneas con cobertura vegetal más baja se presenta un incremento en la humedad del entorno circundante de los embalse estudiados por los autores [9].

Posteriormente Degu y Hossain (2012) realizaron una investigación del impacto a mesoescala de 92 grandes reservorios artificiales de EE.UU en la frecuencia de lluvia durante la temporada de crecidas; obteniendo como resultado que los climas subtropicales, mediterráneos y húmedos experimentan un cambio más alto y estadísticamente significativo en las tendencias de las frecuencias de precipitación, también se logró determinar que las represas pueden aumentar entre un 5% y un 15% la humedad de la masa de aire [10]. Por otro lado estudios realizados por Zhao y Liu (2012) sobre los efectos de la construcción de una presa en la alteración hidrológica de la cuenca del río Lancang en China, haciendo uso de regresiones lineales y la aplicación de las pruebas Mann Kendall, determinaron que existen variaciones considerables en el promedio mensual de la precipitación lo cual tiene una incidencia directa sobre la magnitud de la escorrentía mensual, registrándose una variación anual ascendente y descendente en las estaciones hidrometeorológicas evaluadas luego de la construcción de la presa [11].

Un estudio realizado en Chile por Pizarro, Sanguesa y Aravena (2006), evaluaron la influencia de los embalses y lagos en las intensidades máximas de precipitación en diferentes regiones del país y obtuvieron como resultado que en la mayoría de las regiones estudiadas las estaciones ubicadas cercanas a los cuerpos de agua analizados, registraron un mayor incremento en la magnitud de las intensidades de la precipitación [12]. En Colombia, Bernal y Sandoval (2017) estudiaron la alteración del mesoclima en zonas de influencia de los embalses Miel I y Porce II, los resultados obtenidos de esta investigación muestran un aumento en la precipitación anual en la zona más próxima a los embalses, donde los eventos lluviosos se hicieron más frecuentes, alcanzando para el embalse Miel I un incremento máximo

de precipitación de 24% en el área más próxima al sitio de presa y para el embalse Porce II un incremento de precipitación del 1% coincidiendo también con el área más próxima al sitio de presa [13].

Por otra parte, estudios realizados sobre la variación en la escorrentía a causa del embalsamiento de agua por Angarita et al. (2018) los cuales evaluaron los impactos a escala de cuenca del desarrollo hidroeléctrico en los humedales de la depresión de Mompós, Colombia; encontrando que existe una alteración hidrológica en los caudales y la escorrentía debido a la existencia de gran cantidad de proyectos hidroeléctricos que retienen y controlan los flujos de caudales de la cuenca [14]. Por último, Boodoo et al. (2014) establecieron los impactos de la implementación de metodologías para el cálculo del caudal ambiental en el régimen de flujo y la producción de energía hidroeléctrica del río Chinchiná, Colombia; mediante la aplicación de los indicadores de alteración hidrológica (IHA). Como resultado Boodoo et al. (2014) determinaron que particularmente durante los meses de estación seca los regímenes de flujo se ven gravemente afectados debido a la existencia de flujos bajos e invariables que se encuentran por debajo del flujo natural más bajo reportado por el río antes de la construcción del proyecto [15].

Los investigadores colombianos María Avellaneda y Ricardo Álvarez (2015) realizaron una investigación titulada “identificación de impactos en el sector agrícola y en la energía disponible de central hidroeléctrica AES Chivor, asociados a la variación en el mesoclima producto de la formación antrópica de la lámina de agua del embalse la Esmeralda” el cual tuvo como objetivo identificar los impactos al sector agrícola en los municipios colindantes al embalse y en el volumen de agua disponible para la generación de energía en la central hidroeléctrica AES Chivor, asociados a la variación en el mesoclima en la zona aledaña al embalse. De los registros históricos de las estaciones meteorológicas se obtuvo como resultado que se presentó un cambio en el mesoclima asociado a la conformación del embalse La Esmeralda el cual produjo un aumento de la precipitación media multianual en un 4,2%, con incrementos de hasta un 20% en la región localizada hacia la cola del embalse, misma región que presenta una elevación en la frecuencia de las lluvias superior al 30%, además que hubo un incremento en la humedad y un descenso de la temperatura media anual durante el día de hasta 0.5 °C, lo cual origina una disminución de la evapotranspiración potencial del 5% [16].

Otro estudio relacionado con la influencia de la formación de embalses superficiales sobre las variables hidrometeorológicas realizado por Leila Limberger y Sandra Contri (2008) las cuales investigaron sobre la participación de grandes centrales hidroeléctricas en el cambio climático global, citan una serie de casos como el estudio realizado en el embalse de Itaipú, localizado entre Paraguay y Brasil, donde mediante una comparación de los reportes de estaciones meteorológicas ubicadas respectivamente a 75 Km y 35 Km del embalse se llegó a la conclusión de que después de construido el reservorio hubo un aumento de la temperatura mínima y una disminución de la temperatura máxima, además, se detectó un incremento en

la evaporación, sin embargo, a pesar del gran tamaño del embalse en los estudios no se obtuvieron resultados significativos en cuanto a la variación de la precipitación total mensual y máxima mensual [17].

Finalmente, un estudio realizado por Zhifang, et al. (2011) en Mongolia, China (2019), en el cual se evaluó la relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y los factores climáticos en diferentes escalas de tiempo mensuales, logró determinar que existe una correlación significativa entre el NDVI-clima y que las transformaciones de las coberturas vegetales (NDVI) se vieron afectadas por la temperatura y la precipitación del área. Teniendo en cuenta la influencia de los cambios de las coberturas vegetales sobre las variables climáticas se establece que para este estudio es importante determinar si existe más de una actividad (además de los embalses) que han podido afectar al clima local, análisis que se realizó teniendo en cuenta los fenómenos del niño y la niña que se presentan a lo largo del periodo de estudio y la correlación entre el NDVI y las variables objeto de estudio [18].

3. MARCO TEÓRICO

El marco teórico aborda conceptos básicos para el desarrollo de este proyecto. Partiendo de la definición de cuenca hidrográfica y la descripción del área de estudio, con el fin de contextualizar al lector sobre las limitaciones geográficas en las que fue realizado el proyecto. Posteriormente se definirán las variables objeto de análisis y finalmente se describirán los métodos de análisis aplicados a los datos de las variables analizadas.

3.1 CUENCA HIDROGRÁFICA

Es una superficie del terreno o especie de embudo natural donde existe un patrón de escurrimiento de agua definido la cual se drena o desemboca en un punto en común, que puede corresponder a diversas corrientes fluviales como: quebradas, ríos principales, lagos, el mar o en algún otro tipo de acuífero subterráneo; por otro lado, las cuencas hidrográficas se encuentra delimitadas por los vértices de las montañas y por la cota de altura máxima que divide dos cuencas contiguas, cota entendida como la línea de divorcio de las aguas [19]. El Código Nacional de Recursos Naturales (Decreto-Ley 2811 de 1974) define cuenca hidrográfica como: “el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar” [20]. También es definida como una unidad territorial independiente o interconectada, que sirve para el desarrollo de procesos de planificación, gestión, manejo y administración del recurso hídrico y de los recursos naturales [21].

3.2 PRECIPITACIÓN

La precipitación se refiere a cualquier tipo de condensación del agua atmosférica recogida de la superficie terrestre, que cae sobre la superficie terrestre de forma líquida y sólida, se divide en varios tipos como: la llovizna (0.1 - 0.5 mm D), lluvia (D>0.5 mm), rocío, escarcha, nieve y granizo [22].

La precipitación se logra al ascender las masas de aire por medio de sistemas convectivos, frontales u orográficos resultado de las radiaciones desiguales y el calentamiento o enfriamiento de la superficie de la tierra o de la atmósfera, se forma debido al enfriamiento de estas hasta llegar al punto de saturación, que, mediante la presencia de núcleos de condensación, forman gotas de agua o cristales de agua que por acción del peso y la gravedad se precipitan [23]. Existen diferentes tipos de precipitación como:

- Precipitaciones ciclónicas: se produce por el levantamiento de aire que converge en un área de baja presión, presentándose precipitación no frontal donde hay convergencia de las masas de aire estas ascienden y tienden a

rellenar zonas de baja presión y la precipitación frontal que ocurre al elevarse el aire cálido sobre el aire más denso y frío a consecuencia de frentes fríos o cálidos [23].

- Precipitaciones convectivas: se genera por la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes, esta temperatura elevada produce que sea más liviana y ascienda superando el nivel de equilibrio y formando una nubosidad característica que generan precipitaciones puntuales en forma de tormenta [23].
- Precipitaciones orográficas: se presenta por el ascenso de una masa de aire húmedo de manera forzada a causa de una barrera montañosa, produciendo la mayor precipitación a barlovento (ascendiendo la montaña) y disminuyendo rápidamente a sotavento (descendiendo) [23].

3.3 COBERTURA VEGETAL

La cobertura vegetal es una unidad delimitable y biofísica que se observa sobre la superficie de la tierra, incluye la capa de vegetación natural y un gran número de biomasa con diferentes características fisonómicas que van desde áreas cubiertas por bosques, pastizales hasta áreas de cultivo, además de describir otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua [24].

3.4 USO DEL SUELO

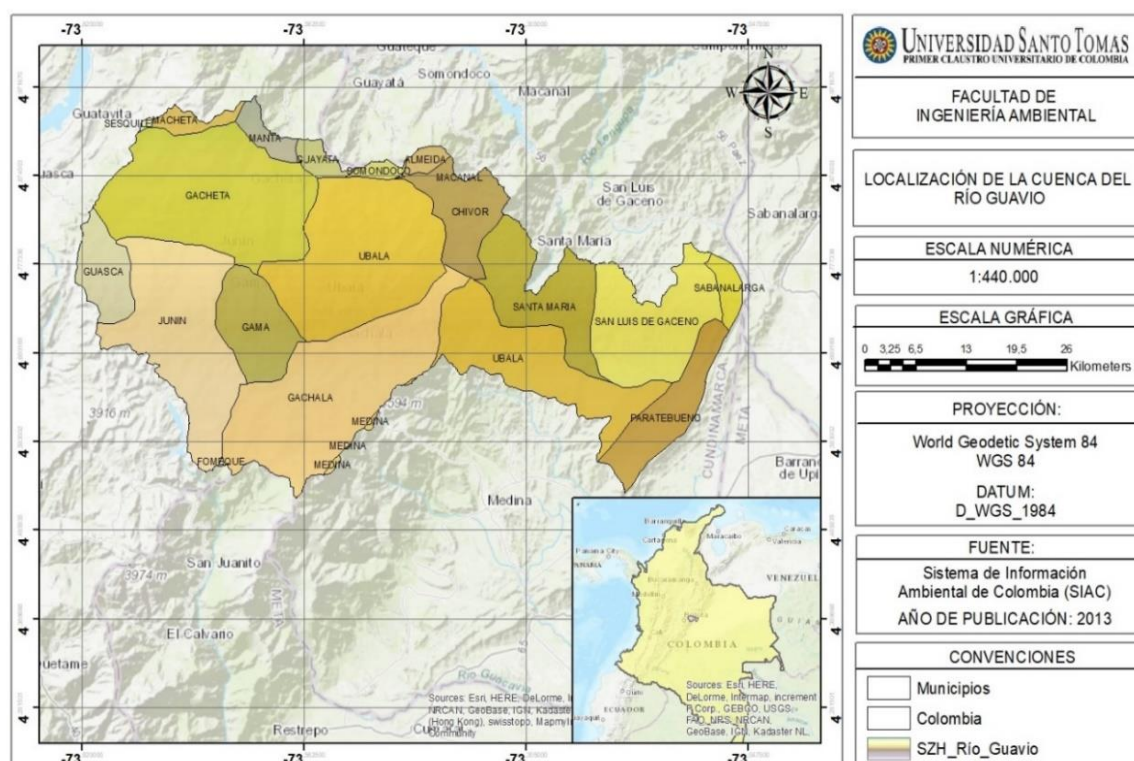
El uso del suelo hace referencia a las acciones, actividades e intervenciones que se realicen en alguna parte de la superficie de suelo y de las cuales se obtengan productos o beneficios. Este uso puede ser agrícola, referente a la siembra y producción de alimentos; residencial, en el caso que ese uso se esté dando para la conformación de asentamientos humanos; industrial, el cual corresponde al desarrollo de actividades manufactureras que impliquen procesos de transformación de materias primas; comercial, orientado a la compra y venta de diferentes productos y servicios con el objetivo de obtener un beneficio económico; entre otros [25].

3.5 ÁREA DE ESTUDIO

3.5.1 Cuenca hidrográfica del río Guavio. La cuenca del río Guavio se encuentra ubicada en el área hidrográfica del Orinoco, en el sector centro oriental del país en las zonas montañosas del pie de monte llanero y la cordillera oriental. El 87 % del área de la subzona hidrográfica del río Guavio se encuentra en el departamento de Cundinamarca y 13 % restante se encuentra en el departamento de Boyacá [26]. La cuenca limita al norte con los municipios de Guatavita, Machetá, Manta, Somondoco

y Almeida (Departamento de Boyacá), al oriente con el municipio de Paratebuena, al sur con el municipio de Medina y el municipio de San Juanito (Departamento de Meta) y al occidente con el municipio de Fómeque (Departamento de Cundinamarca). El área de la cuenca comprende un total de 12 municipios los cuales se encuentran en las jurisdicciones de la Corporación Autónoma Regional Del Guavio (CORPOGUAVIO) como Gachalá, Gachetá, Gama, Ubalá A, Ubalá B, Junín y Guasca; parcialmente los municipios de Guayatá, Almeidas, Chivor y Santa María correspondientes a la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor (CORPOCHIVOR) y parte del municipio de Guatavita correspondiente a la jurisdicción de la CAR [27].

Figura 1. Localización de la subzona hidrográfica del río Guavio.



Fuente. Autora.

La cuenca está integrada por zonas predominantemente montañosas que hacen parte de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos y zonas intramontanas con franjas onduladas y valles aluviales estrechos. Tiene un área total de 2288.39 Km^2 y se divide en 16 áreas de drenaje (Sueva, Chorreras, Chivor, Batatas, etc.) que se caracterizan por tener gran variabilidad climática, variedad de ecosistemas estratégicos y recursos naturales que prestan una serie de servicios ecosistémicos como la producción de agua, además, la cobertura vegetal que la integra la identifica como una gran reserva forestal [27].

3.5.2 Climatología del área de estudio. A partir del análisis climatológico realizado en el Plan de Manejo y Ordenamiento de la cuenca hidrográfica del río Guavio (POMCA); la caracterización espacial climatológica a nivel mensual de las estaciones del IDEAM arroja como resultados que la subzona hidrográfica se caracteriza por presentar las precipitaciones más altas en los meses de mayo, junio y julio, donde la máxima precipitación se registra en el mes de julio con 646 milímetros (mm), mientras que las precipitaciones más bajas se presentan para los meses de enero de la serie de tiempo analizada, siendo el valor más bajo de 53 milímetros (mm) [28](A.G.S. Ltda, 2019).

La cuenca presenta temperaturas medias máximas superiores a los 20 grados Celsius las cuales van hasta los 33°C en el mes de febrero, a nivel anual las temperaturas máximas llegan hasta los 31°C. Por otro lado, las temperaturas más bajas se registran en la cuenca río Amarillo y Guavio bajo las cuales van desde los 0°C hasta los 23°C [28](A.G.S. Ltda, 2019).

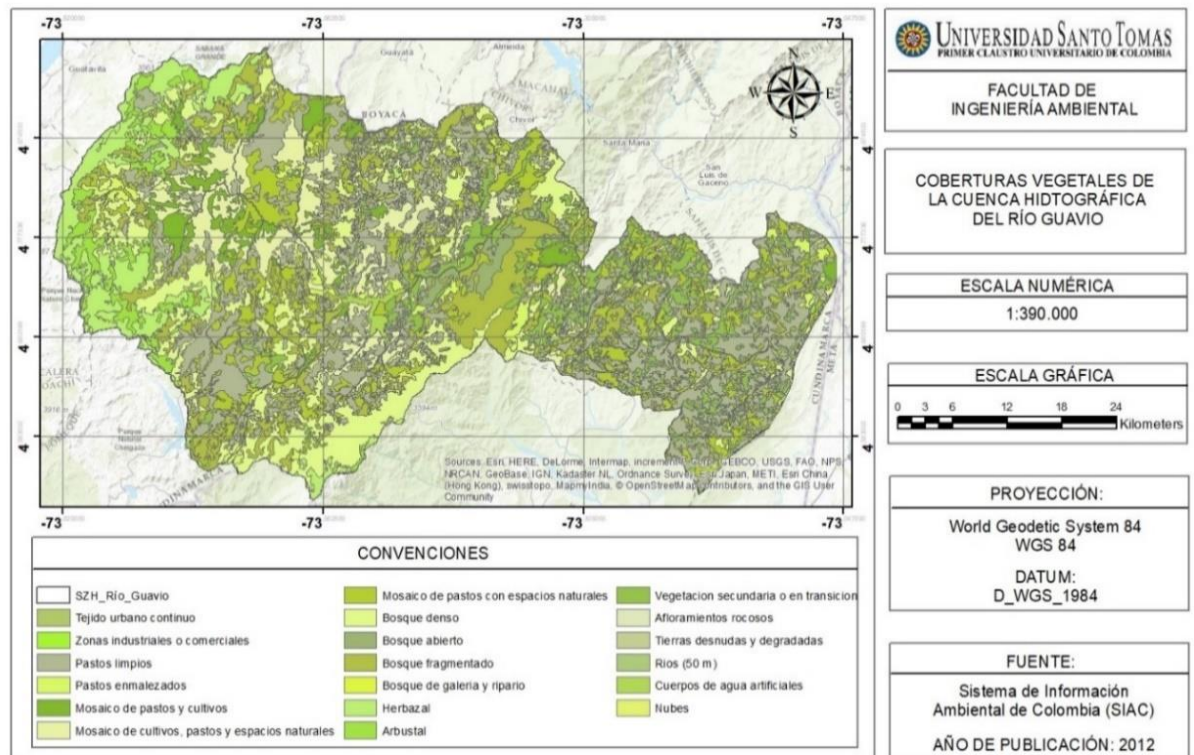
La evaporación del área de estudio presenta los mayores valores en los meses de enero con un valor de 165 mm y febrero con 155 mm, siendo estos los meses más secos del año. Mientras que los valores de evaporación más bajos se presentan en los meses de junio y julio con un valor de 70 mm, siendo estos los meses más lluviosos del año [28].

Finalmente, el brillo solar presenta los valores más bajos en los meses de más alta precipitación y su consecuente nubosidad, mientras que los valores más altos se presentan en los meses más secos o de menor precipitación en la cuenca. El valor máximo de brillo solar se presenta en el mes de enero con 210 horas/mes y el valor más bajo con 86 horas/mes en el mes de junio [28].

3.5.3 Cobertura vegetal y uso del suelo. La cuenca hidrográfica del río Guavio se caracteriza por tener una gran extensión de áreas protegidas, alrededor del 52.23 % equivalente a 119.488,35 Ha del área total de la cuenca corresponden a zonas de interés ambiental (Figura 2). Esta unidad de uso del suelo que se observa en la Figura 2 se caracteriza por tener vegetación arbórea con dosel irregular, arbustos, palmas y enredaderas; además de la presencia de especies arbóreas de tallo y tronco leñoso, así como bosques de galería o riparios establecidos de forma natural en la ribera de los ríos presentes en la zona [29].

Por otro lado, el uso del suelo destinado a la producción agropecuaria ocupa el 42,11 % del área total de la cuenca. El 0.14 % (328.86 Ha) del área agropecuaria de la cuenca corresponde a territorio destinado a cultivos transitorios y el 32.93 % restante corresponde a cultivos transitorios extensivos con pastoreo, mientras que el uso del suelo destinado a la ganadería representa el 9.04 % (Figura 2) [29].

Figura 2. Cobertura vegetal de la sub zona hidrográfica del río Guavio.



Fuente. *Autora.*

Los cuerpos de agua ocupan una extensión de 2.693,09 Ha las cuales corresponden al 1,18 % del área total de la cuenca; esta unidad de uso está conformada principalmente por aguas estancadas en áreas inundables, aguas corrientes, ríos, lagunas, quebradas, el embalse del Guavio; entre otros cauces naturales [29]. El área urbana dentro de la cuenca cuenta con una extensión de 192.18 Ha, las cuales corresponden al 0,08 % del área total de la cuenca (Figura 2) [29].

3.5.4 Aspectos socioeconómicos. Dentro de las actividades económicas desarrolladas en la cuenca se encuentran en el sector primario actividades como la minería, agricultura y la ganadería; en el sector secundario se encuentran actividades industriales y agroindustriales y finalmente dentro del sector terciario actividades comerciales y de servicios. Dentro de la actividad minera se destaca la extracción de esmeraldas, cobre, plomo, cinc, hierro, manganeso, yeso, roca fosfórica, calcita y carbón. La cuenca del río Guavio se destaca por su potencial agrícola, dentro de los cultivos más característicos de la región se encuentran: el plátano con presencia en todos los municipios que integran la cuenca; el café el cual tiene mayor presencia en el municipio de Gacheta; cultivos de yuca, papa, maíz, arveja, caña panelera, entre otros; así como algunos cultivos frutales como fresa, tomate de árbol, mora, piña y aguacate [30].

La ganadería dentro de la cuenca es desarrollada de forma intensiva, siendo está un factor importante dentro de la economía campesina de la cuenca. La explotación de ganadería bovina se da con el fin de producir leche y productos lácteos derivados de la misma como queso, cuajada, yogurt, entre otros; y la producción de carne [30]. Las razas de bovinos que predominan en la región son cruce de cebús con criollos y el normando. En promedio dentro de la cuenca 5,5 Ha corresponden a predios dedicados a la ganadería. En general esta actividad se lleva a cabo con niveles bajos de tecnificación y por rotación de potreros [30].

Por otro lado, se usan recursos maderables para la obtención de leña o en la agroindustria para la producción de muebles, tablas, vigas, entre otros productos. En general, los recursos forestales presentes dentro de la cuenca son utilizados como combustible para la cocción de alimentos y actividades de cercado [30].

Finalmente, los municipios que integran la cuenca prestan servicios de paisajísticos y culturales, dentro de los cuales se encuentran festivales como: el festival náutico en Gachalá y el festival de la arepa en Gama; además de las tradicionales ferias y fiestas celebradas cada año en los municipios. La cuenca también cuenta con un gran potencial ambiental y turístico el cual aún no se ha explotado de forma extensiva debido al mal estado de las vías y la falta de planificación, organización y formación de las comunidades [30].

3.6 HIDROELÉCTRICA

La central hidroeléctrica es una instalación que aprovecha el movimiento de las masas de agua que transitan por fuentes de aguas superficiales para la transformación de la energía potencial a energía cinética mediante la caída de agua, la cual pasa a través de unas turbinas las cuales se encuentran unidas a un generador que mediante el movimiento de las turbinas transforma la energía mecánica en energía eléctrica y posteriormente el agua es devuelta al cauce del río [31]. Las centrales hidroeléctricas se clasifican según su capacidad de producción en: centrales hidroeléctricas de gran potencia, que son aquellas que tienen más de 10MW; las minicentrales hidroeléctricas que producen entre 1MW a 10MW y por último, la micro centrales hidroeléctricas que tienen menos de 1MW de potencia eléctrica [31].

Dentro de los componentes principales que integran una central hidroeléctrica se encuentran: la presa, mediante la cual se almacena el agua captada del río; el rebosadero, el cual permite que el agua pueda ser liberada sin necesidad de que pase por el cuarto de máquinas; las conducciones, que son las canalizaciones que desvían el flujo; la sala de máquinas, en la cual se encuentran los equipos o maquinaria y el cuarto de control; las turbinas, las cuales transforman mediante el

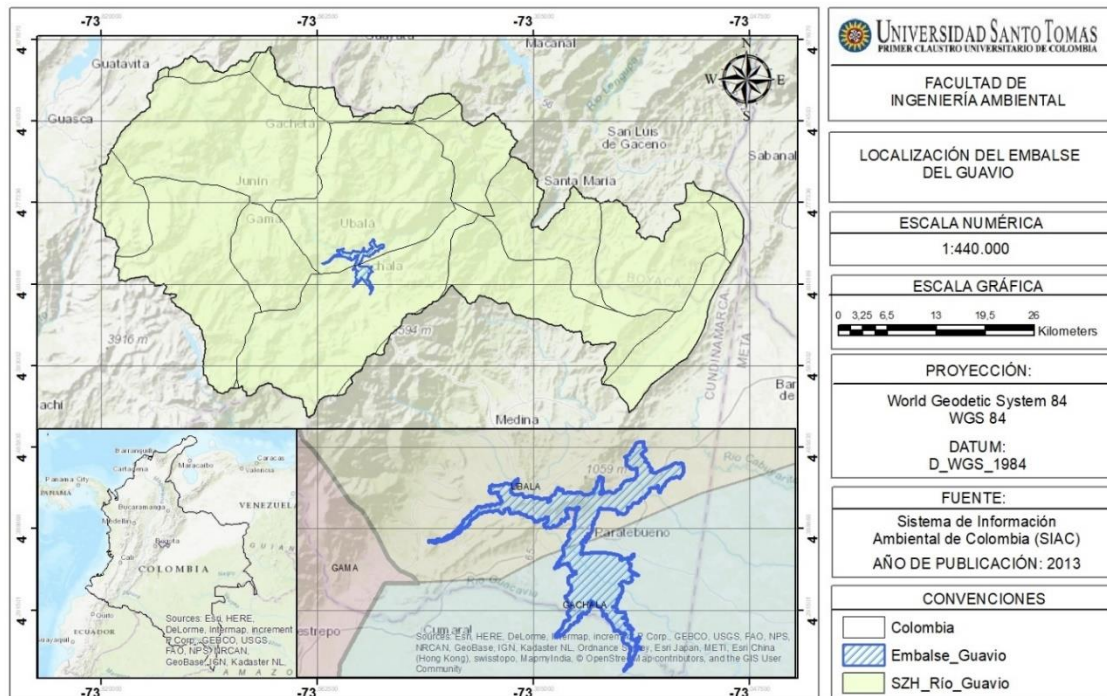
movimiento la energía cinética del agua en mecánica y por último el alternador, que el encargado de transformar y producir energía eléctrica a partir de mecánica [32].

3.6.1 Represa. Son masas de agua artificiales creadas mediante la derivación de agua por canales o lechos artificiales que atraviesa el cauce de un río aguas abajo con el objetivo de obstruir su paso, consiste en una barrera o muralla fabricada en piedra, hormigón, materiales sueltos (scollera, núcleo de arcilla, con pantalla asfáltica, con pantalla de hormigón, homogénea), etc.; diseñadas para prevenir y controlar inundaciones, generar energía eléctrica, almacenar agua para sistemas de acueducto y consumo humano, entre otras [33].

3.6.2 Represa y central hidroeléctrica del Guavio. La presa y central hidroeléctrica del Guavio fue construida entre los años 1980 - 1992 y se encuentra ubicada al oriente del departamento de Cundinamarca, en los municipios de Gachalá, Ubalá y Gama, debido a su distribución geográfica presenta dos frentes; Ubalá A donde se ubica la presa y el embalse (Figura 3). En Ubalá B se localiza el centro de control, el patio de conexiones y la central subterránea es una caverna excavada en roca que se encuentra a 550 m de profundidad y está conformada por el cuarto de máquinas y de transformadores, el túnel de paso, las galerías de descarga y el túnel colector. Los principales afluentes del embalse son los ríos Guavio, Farallones, Muchindote, Batatas y Chivor [34].

El embalse se encuentra localizado en la cuenca media-baja del río Guavio, entre los municipios de Gachalá y Ubalá (Figura 3). Tiene un área total de $13,44 \text{ Km}^2$ y una longitud de 14 Km de occidente a oriente, tiene una profundidad máxima de 230 m y cuenta con una capacidad total de almacenamiento de agua de $829.210.000 \text{ m}^3$, el volumen útil del embalse es de $775.400.000 \text{ m}^3$, con un volumen muerto de $35.000.000 \text{ m}^3$ [35].

Figura 3. Localización del embalse del Guavio a nivel nacional, municipal y en la cuenca.



Fuente. Autora.

La capacidad efectiva neta instalada es actualmente de 1250 MW y la generación media anual es de 6.250 millones de kilovatios hora. La central hidroeléctrica ocupa un área total de la cuenca de 1350 Km², incluyendo el área de transvase; cuenta con un caudal medio de abastecimiento de 72 m³/s [35].

3.7 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

El análisis de tendencias es una técnica estadística que permite determinar o predecir eventos mediante el estudio de tendencias de una serie de tiempo o de datos históricos; este análisis generalmente se basa en la aplicación de algunas pruebas de significancia de hipótesis nulas para cambios abruptos o de variación lenta [36]. La tendencia es entendida como la no estacionariedad y el cambio determinista que implica una varianza dependiente del tiempo y previsible en las propiedades de un proceso. Estas variaciones se caracterizan por un suave y monótono ascenso o descenso de los valores medios, dentro de un período de registro. Sin embargo, no necesariamente es un cambio lineal, habiendo un sólo máximo y mínimo en los extremos del registro [37].

3.7.1 Mann-Kendall. La prueba Mann-Kendall (MK) es una estadística no paramétrica que permite verificar la presencia y el momento donde se hallan

cambios abruptos y de variación lenta en la media de variables hidrometeorológicas (precipitación, escorrentía, temperatura, etc.), con el objetivo de verificar si estos cambios son ascendentes o descendentes, teniendo en cuenta la hipótesis nula o alternativa que propone el método [38]. La hipótesis nula (H_0), sugiere que la serie de datos es independiente y se distribuye de forma idéntica con la tendencia insignificante, y se prueba contra la hipótesis alternativa (H_1), la cual afirma que la distribución secuencial de los datos (x_i y x_j) no es idéntica en las posiciones i y j menores o iguales al tamaño de la muestra ($i, j \leq n$) con $i \neq j$. Si la hipótesis nula es rechazada, indica que la serie de tiempo tiene una tendencia significativa hacia arriba o hacia abajo [38].

Las tendencias usadas en las pruebas MK se basan en cambios no lineales de una serie de datos en iguales intervalos de tiempo, sin asumir ningún tipo de distribución específica, lo que implica la ausencia de una correlación en serie entre las observaciones [39]. El estadístico del test es la llamada S de Kendall, cuya expresión se observa en la siguiente ecuación.

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

Donde: n : tamaño de la muestra.

x_j y x_i : valores de datos secuenciales (donde $j > i$)

La función $sgn(x)$ es la función signo, cuyo valor oscila entre -1, 0 y 1; dependiendo si el argumento es positivo, nulo o negativo [39](Cantor, 2011). Como se muestra en la siguiente expresión.

$$sgn(x) = \begin{cases} Si(x_j - x_i) > 0 & sgn(x_j - x_i) = 1 \\ Si(x_j - x_i) = 0 & sgn(x_j - x_i) = 0 \\ Si(x_j - x_i) < 0 & sgn(x_j - x_i) = -1 \end{cases}$$

Cuando se cuente con una muestra de datos independiente sin valores vinculados, la media y la varianza de S vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$Var(S) = \frac{(n(n-1)(2n+5))}{18}$$

Si por el contrario los valores vinculados están presentes en la muestra, la variación se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Var(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)]/18$$

Finalmente, se evalúa la variable estandarizada para la prueba MK la cual se calcula teniendo en cuenta las siguientes premisas y ecuaciones:

$$\begin{aligned} & \left\{ Si S > 0 \quad Z = \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} \right\} \\ Z_s &= \{ Si S = 0 \quad Z = 0 \} \\ & \left\{ Si S < 0 \quad Z = \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} \right\} \end{aligned}$$

Donde la variable estandarizada Z permite evaluar la importancia de las tendencias y a partir de ella obtener valores de probabilidad de aceptación de la hipótesis nula. Un valor de Z positivo indica una tendencia creciente y negativo decreciente. Dicho valor estadístico se puede evaluar de acuerdo con el nivel de confianza (α). Si el valor de Z absoluto calculado es mayor a $Z_{\alpha/2}$ entonces se rechaza la hipótesis nula (H_0), de no ser así se acepta H_0 , lo cual indica que la tendencia es estadísticamente significativa [39].

3.7.2 Pettitt test. La prueba de Pettitt es una prueba no paramétrica basada en rangos, que permite detectar cambios bruscos y significativos en la media de la distribución de la variable de interés o serie temporal de valores aleatorios, permitiendo la detección de un solo punto de cambio en un momento desconocido t . Esta prueba se usa a menudo para detectar cambios en los extremos debido a la falta de supuestos de distribución [40]. La hipótesis nula en este caso asume que hay ausencia de un punto de cambio en las distribuciones secuenciales de las variables, esta es comparada con una hipótesis alternativa que asume que se producen cambios en las funciones de distribución de las variables ($1 \leq t \leq T$) usando la estadística no paramétrica [41]. Para la aplicación de la prueba de Pettitt se hace uso de la siguiente ecuación.

$$U_{T,t} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j)$$

La determinación del $\text{sgn}(x_i - x_j)$ se realiza a partir de las premisas establecidas en la siguiente expresión.

$$\{-1 \quad (x_i - x_j) < 0$$

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_i - x_j) &= \begin{cases} 0 & (x_i - x_j) = 0 \\ 1 & (x_i - x_j) > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

El estadístico de prueba $U_{T,t}$ se evalúa para todas las variables aleatorias de 1 a T; para luego seleccionar el punto de cambio más significativo, donde el valor de $|U_{t,T}|$ es el más grande. Como se muestra continuación:

$$K_T = \text{Max } |U_{t,T}|, \quad 1 \leq t \leq T$$

El punto de cambio ocurre en el tiempo t cuando la estadística K_T es significativamente diferente de cero en un nivel dado, la probabilidad de detectar el punto de cambio se obtiene haciendo uso de la expresión que se muestra a continuación:

$$P \cong 2 \times \exp \left[\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2} \right]$$

Si el valor de P es menor al valor de significancia asignado, se rechaza la hipótesis nula y se dividen los datos en dos subseries antes y después del punto de inflexión o cambio determinado, asignando dos funciones de distribución diferentes [41].

3.8 WILCOXON TEST

La prueba de Wilcoxon es un procedimiento de prueba no paramétrica que compara las diferencias entre pares de datos para comprobar si la tendencia central o mediana de las dos muestras comparadas es la misma [42]. Lo anterior con el objetivo de determinar que la diferencia entre las muestras no se deba al azar [43].

La prueba de Wilcoxon permite probar la aleatoriedad de una secuencia de datos y la simetría de una distribución, además de comparar la distribución de una serie de datos con un valor especificado [44]. Para llevar a cabo la prueba se debe llevar a cabo el siguiente procedimiento:

- Calcular las diferencias de cada uno de los elementos de la muestra de las dos variables analizadas y se eliminan los elementos que tengan diferencias nulas [44].
- Calcular los valores absolutos de las diferencias.
- Ordenar de mayor a menor los valores absolutos de las diferencias, en el caso de que las diferencias absolutas estén empatadas para los mismos

rangos, se debe calcular un rango medio y se asigna a los valores empatados [44].

- Posteriormente se calculan los estadísticos de la prueba de rangos, sumando los rangos de las diferencias positivas (T_+) y de las diferencias negativas (T_-). Como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T_- = \left\{ \frac{[n * (n + 1)]}{2} \right\} - T_+$$

Donde:

T_+ : rangos de diferencias positivas.

T_- : rangos de diferencias negativas.

n : número total de datos.

En el caso de que se esté trabajando con muestras grandes, se usa la distribución normal estándar (Z) como una aproximación para probar la hipótesis, para esta situación se establece una región de rechazo de dos colas para la hipótesis nula basada en T_+ y se usan las siguientes ecuaciones [44](Woolson, 2008):

$$Z_+ = \frac{\left\{ \frac{[T_+ - n * (n + 1)]}{4} \right\}}{\left\{ \frac{[n * (n + 1) * (n + 1)]}{24} \right\}^{1/2}} > Z_{1-\alpha/2}$$

o

$$Z_- = \frac{\left\{ \frac{[T_- - n * (n + 1)]}{4} \right\}}{\left\{ \frac{[n * (n + 1) * (n + 1)]}{24} \right\}^{1/2}} > Z_{1-\alpha/2}$$

3.9 TEST DE CORRELACIÓN

La correlación hace referencia al grado de asociación lineal que existe entre dos variables cuantitativas; para tener una medida precisa de esta relación se realiza el cálculo del coeficiente de correlación, mediante el cual se puede determinar el grado de asociación existente entre dos o más variables aleatorias comparadas. El coeficiente de correlación toma valores que oscilan entre $-1 \leq \rho \leq 1$, donde 0 indica que no hay asociación entre las variables objeto de análisis. Existen tres métodos mediante los cuales se pueden aplicar el coeficiente de correlación los cuales son: (i) Pearson, (ii) Tan-b de Kendall y (iii) Spearman [45].

3.9.1 Coeficiente de correlación de Pearson. El coeficiente de correlación de Pearson tiene el objetivo de medir el grado de asociación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, las cuales poseen una distribución normal bivariada conjunta. Este coeficiente suele ser apropiado cuando las variables que se quieren comparar son de escala de intervalo y toman en cuenta la magnitud relativa de las observaciones [46]. Este coeficiente es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$R_{xy} = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x * \sigma_y} \quad \text{ó} \quad R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde:

R_{xy} : coeficiente de correlación de Pearson.

$cov(x, y)$: covarianza.

σ_x : desviación estándar de la variable x.

σ_y : desviación estándar de la variable y.

La covarianza entre x y y del coeficiente de correlación de Pearson indica si la posible relación entre las variables objeto de estudio es inversa o directa, buscando definir la variabilidad conjunta entre las dos variables cuantitativas comparadas. La covarianza es calculada a partir de la siguiente formula:

$$cov(x, y) = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Donde:

n : tamaño de la muestra.

x_i : valor de la variable x en la posición i. y_i : valor de la variable y en la posición i.

$\bar{x}$: media de los valores de la variable x. $\bar{y}$: Media de los valores de la variable y.

El signo que tome la covarianza indica la dirección que toman las variables estudiadas, sin embargo, no indica el grado de correlación entre las mismas [46]. De tal modo que la covarianza puede asumir los siguientes valores:

- Si $cov(x, y) > 0$ las dos variables comparadas crecen o decrecen a la vez.
- Si $cov(x, y) < 0$ cuando una variable crece, la otra tiende a decrecer.
- Si $cov(x, y) = 0$ no hay relación lineal.

Finalmente, el coeficiente de correlación de Pearson toma valores que oscilan entre -1 y 1; los valores positivos indican que existe una relación directa entre las variables, mientras que los valores negativos indican una relación inversa y si el valor del coeficiente es igual a cero las variables son independientes e indica que

existe una relación nula. Si el coeficiente arroja un valor igual a 1 indica una relación lineal perfectamente positiva; un valor de -1 una relación lineal perfectamente negativa [47].

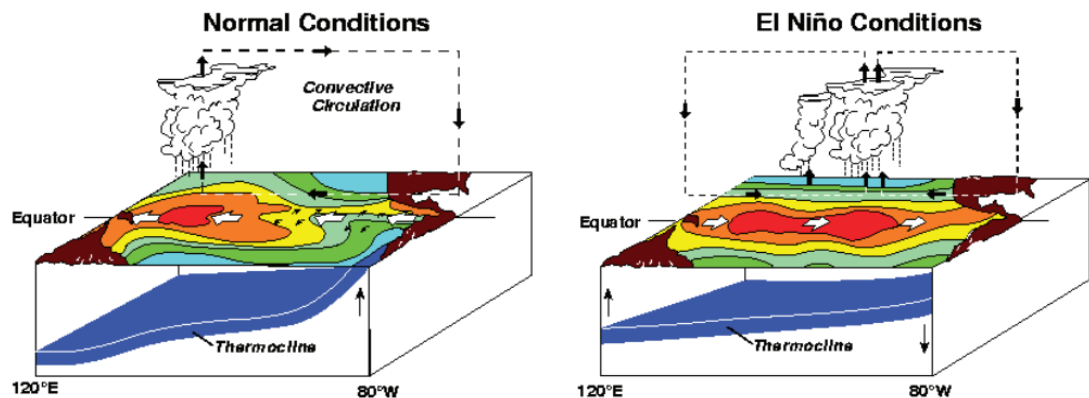
3.10 FENÓMENO DEL NIÑO Y LA NIÑA - OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO)

Dentro de la variabilidad interanual que se presenta en el océano Pacífico tropical existen tres fenómenos principales: el niño que hace referencia a un calentamiento extremo; su fase opuesta denominada la niña que hace referencia a un enfriamiento extremo y las condiciones normales. Dichas condiciones generan un ciclo conocido como: El niño – la niña – oscilación del sur (ENSO); un fenómeno que causa la mayor variabilidad climática en el océano pacífico [48].

El ENSO hace referencia a la aparición de fluctuaciones anormales de las temperaturas de la superficie del mar y la presión superficial del aire en el océano pacífico tropical central y oriental. Este fenómeno corresponde a la aparición, de aguas superficiales más calientes correspondientes al fenómeno del niño, el cual genera una disminución en las precipitaciones y aumento en la temperatura y la aparición de aguas superficiales más frías correspondientes al fenómeno de la niña, el cual genera un aumento considerable de las precipitaciones y por ende una disminución en las temperaturas [49].

Las alteraciones ocasionadas en la estructura térmica superficial y subsuperficial del océano se asocian al fortalecimiento de la fase fría o el debilitamiento de la fase cálida de los vientos alisios provenientes del este y el desplazamiento del núcleo de convección profunda del Oeste al centro del océano Pacífico (condiciones fenómeno del Niño) que se observa en la Figura 4, o su intensificación o permanencia (condiciones fenómeno de la niña) [49].

Figura 4. Condiciones océano atmosféricas del Pacífico tropical, durante los períodos normales y de ocurrencia de los fenómenos El Niño.



Fuente. [49].

Los procesos que producen o inducen este tipo de variaciones en los vientos alisios de la zona tropical son: las ondas de Madden & Julián, la oscilación cuasibienal del viento zonal en la estratósfera inferior y la oscilación cuasibienal en la troposfera [50]. El ENSO, corresponde a una variación del campo de presión atmosférica cerca de la superficie en la región del Pacífico centro occidental, donde en algunos años la presión del Pacífico occidental es mayor que en el central y en otros años la presión del Pacífico central tiende a ser mayor que la del occidental [50].

3.11 INTERPOLACIÓN DISTANCIA INVERSA PONDERADA (IDW)

La interpolación distancia inversa ponderada por sus siglas en inglés IDW es un modelo que estima los valores desconocidos de una variable o propiedad a analizar, asumiendo que los mismos dependen de su localización [50]. Este método supone que la variable o punto medido que se representa cartográficamente tiene una influencia local la cual disminuye con la distancia. De esta manera los puntos más cercanos al centroide tienen una influencia más relevante la cual disminuye con la distancia, y conforme a esto se asigna una ponderación mayor a los puntos más cercanos y un valor menor a los valores más alejados al centroide. La ponderación es realizada a partir de una función de distancia a la inversa y la superficie que se interpola es una variable dependiente de su ubicación [51]. La interpolación IDW se lleva a cabo a partir de la siguiente fórmula:

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i * \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

Donde:

n : número de puntos muestrales.

Z_j : valor de la variable en un punto no muestral.

Z_i : valor de la variable en la posición i .

λ_i : función de ponderación de los puntos muestrales.

La función de ponderación λ_i de los puntos muestrales n se encarga de determinar la forma en que el valor desconocido disminuye con la distancia, a partir de los puntos muestrales con valor conocido. Los valores de la función de ponderación oscilan entre 0 y 1 y se calcula mediante la siguiente fórmula [52]:

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i^k} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Donde:

d_i : distancia horizontal entre los puntos los puntos a interpolar.

k : rapidez con que decrece los valores de un punto dado.

El cálculo de la distancia horizontal d_i entre el punto de interpolación no muestral (x_0, y_0) y los puntos de muestréales de referencia (x_i, y_i) , se obtiene a partir de la distancia euclídea, la cual hace uso de coordenadas geográficas de latitud y longitud. La distancia horizontal es calculada a partir de la siguiente ecuación [52]:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$

Donde:

x_i : longitud del punto de referencia. y_i : latitud del punto de referencia.

x_0 : longitud del punto no muestral. y_0 : latitud del punto no muestral.

Los datos requeridos en el proceso de interpolación IDW tienen la siguiente forma (x_i, y_i, Z_i) donde Z representa la observación de la variable de interés en los puntos i con localización espacial. Finalmente, para la elección de los valores de k y n durante el proceso de interpolación se hace uso del método de validación cruzada, el cual está en función del error cuadrático medio (ECM), entre menor sea el valor obtenido del ECM los valores obtenidos de la interpolación serán más exactos. El cálculo del ECM se realiza a partir de la siguiente expresión [52].

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z(i) - \hat{Z}(i))^2}{n}}$$

Donde:

$\hat{Z}(i)$: valor predicho o esperado en el punto i .

$Z(i)$: valor real de la variable medida.

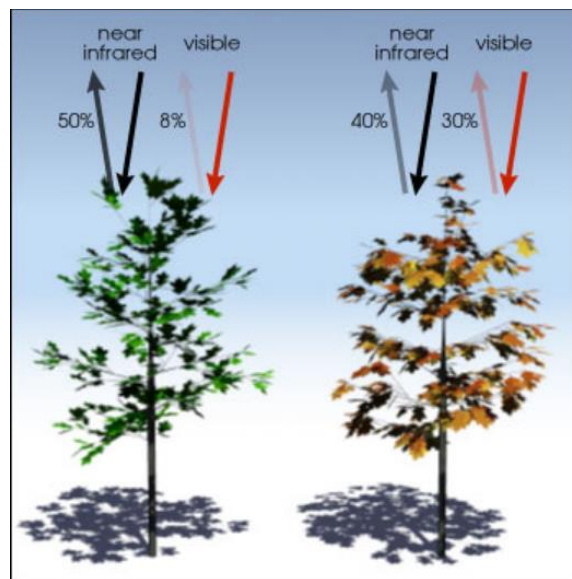
3.12 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada por sus siglas en ingles NDVI, es un índice normalizado adimensional el cual indica la densidad de la vegetación presente en una superficie y su estado. El NDVI es calculado a partir de los datos de reflectancia de la luz visible, que representa las absorciones del pigmento de clorofila en la banda roja y la reflectividad de la vegetación en la banda cercana al infrarrojo (NIR) [53]. Por un lado, el pigmento de las hojas de las plantas compuesto por clorofila absorbe la luz visible en longitudes de onda que oscilan entre 0,4 a 0.7 micrómetros (μm), usándola para el proceso de fotosíntesis; mientras que la

estructura celular de las hojas refleja la luz del infrarrojo cercano en longitudes de onda que oscilan entre 0,7 a 1,1 micrómetros (μm) [53].

En general, la vegetación sana que presenta gran cantidad de hojas verdes tiende a absorber la mayor parte de la luz visible y refleja en mayor medida las longitudes de onda cercanas al infrarrojo en comparación con las longitudes de onda visible; como se observa en la parte izquierda de la Figura 5. Mientras que cuando la superficie terrestre presenta vegetación escasa o poco saludable reflejan más la luz visible y en menor medida las longitudes de onda cercanas al infrarrojo [54]. Los cuerpos de agua, la nieve y las nubes presentan baja reflexión de las longitudes de onda cercanas al infrarrojo y una alta reflexión en el rango de onda visible. En el caso de las rocas y el terreno vacío o desértico las diferencias entre la reflexión de las longitudes de onda son casi nulas [55].

Figura 5. Radiación reflejada en las longitudes de onda del infrarrojo y longitudes de onda visibles en vegetación sana y enferma.



Fuente. [54].

Para cuantificar la densidad de vegetación presente en la superficie terrestre que reportan los satélites de teledetección mediante el NDVI, se aplica la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada.

NIR: valor del pixel de la radiación del infrarrojo cercano.

VIS: valor del pixel de la radiación visible.

El NDVI genera valores que oscilan entre 1 y -1. Los valores del índice muy bajos o cercanos a cero (0,1 o menos) suelen corresponder a rocas estériles, arena o terreno desnudo. Mientras que los valores negativos pueden representar la presencia de agua, nieve o nubes. En el caso de que exista vegetación escasa como arbustos, praderas o cultivos senescentes, el índice puede arrojar valores moderados (entre 0,2 a 0,5). Los valores del NDVI altos o cercanos a 1 (entre 0,6 a 0,9) indican la presencia de una vegetación densa como bosques templados, tropicales y cultivos en su etapa de crecimiento [56].

4. METODOLOGÍA

El proceso metodológico que se presenta a continuación fue llevado a cabo para dar cumplimiento a los objetivos propuestos. Cinco fueron las etapas principales en las que se desarrolló la metodología van desde la recolección de datos e información hasta la aplicación de diferentes test estadísticos los cuales permitieron determinar la influencia del embalse sobre la temperatura y precipitación de la cuenca objeto de estudio.

4.1 FASE 1: RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En esta fase se realizó una revisión del Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca del Río Guavio (POMCA), con el objetivo de recopilar información de las características principales de la cuenca. Posteriormente, para obtener los datos hidrometeorológicos de las estaciones presentes dentro de la cuenca se hizo uso de la plataforma de consulta y descarga de Datos Hidrometeorológicos (DHIME) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Teniendo en cuenta que la información de temperatura media requerida para el desarrollo del trabajo de grado es escasa y que la disponible contaba con una cantidad considerable de datos faltantes para el periodo de análisis, se optó por usar los datos distribuidos (grilla) de alta resolución de la variación mensual de la temperatura pertenecientes a la Unidad de Investigación Climática, por sus siglas en inglés (CRU). Debido a que el reporte la información se encontraba en formato netCDF se extrajeron los datos para la cuenca y subcuencas por medio del software "R".

Finalmente, los datos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) fueron obtenidos del registro de datos climáticos de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) dispuestos en la guía de datos climáticos del centro nacional de investigación atmosférico por siglas en inglés NCAR, los cuales se derivan de los reportes diarios del sensor de radiométrico avanzado de muy alta resolución (AVHRR), que proyecta en una cuadrícula global de 0,05 grados x 0,05 grados.

4.2 FASE 2: DELIMITACIÓN DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO GUAVIO Y SELECCIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS

En la fase dos se realizó la delimitación de las subcuencas objeto de análisis de la sub zona hidrográfica del río Guavio, a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) del satélite ALOS PALSAR con una resolución de 12.5 m, por medio del software ArcGIS y haciendo uso de la herramienta de

hidrología “Watershed”. Las subcuencas fueron seleccionadas en ubicaciones estratégicas procurando que se localizaran aguas arriba, aguas abajo y en inmediaciones al embalse.

Posteriormente se identificaron y seleccionaron las estaciones hidrometereológicas que harían parte del estudio teniendo en cuenta los siguientes criterios: (i) su ubicación dentro y alrededor de la cuenca, (ii) la longitud de la serie de datos reportados por cada estación no debía ser menor a 41 años, con el objetivo de tener reportes de por lo menos quince años antes y después de entrar en operación el embalse, (iii) el porcentaje de datos faltantes no debía ser mayor al 10% del total de los datos, (iv) la consistencia de las estaciones, en la cual era indispensable que se cumpliera simultáneamente con los criterios ii y iii, y finalmente, (v) los resultados de la inspección visual realizado mediante la evaluación de gráficas de las series de datos de precipitación de cada estación, en la cual, se compararon los registros entre estaciones próximas y se tuvo en cuenta el comportamiento histórico de las precipitaciones de la cuenca presentados en estudios de referencia como el POMCA del río Guavio y de esta forma se descartaron aquellas estaciones que reportaban valores atípicos o anómalos.

4.3 FASE 3: INTERPOLACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN IDW Y OBTENCIÓN DE DATOS DEL NDVI

Luego de seleccionar las estaciones meteorológicas que cumplieran con los criterios nombrados con anterioridad, en la fase 3 se procede a realizar la interpolación por el método de distancia inversa ponderada (IDW), mediante el cual se obtuvieron los valores de precipitación mensual para toda la superficie de la cuenca y subcuencas objeto de estudio. La interpolación se realiza a partir de un código elaborado en el software RStudio, mediante el cual se visualizó la interpolación y se exportaron los resultados obtenidos en una plantilla de Excel.

Por otra parte, los valores diarios del NDVI obtenidos de la plataforma de la NCAR que se encuentran en formato netCDF fueron tratados (es decir, recorte y promedio de las celdas para cuenca y subcuencas) y exportados a partir de un código elaborado en el software R para el periodo comprendido entre enero de 1982 a diciembre de 2017.

4.4 FASE 4: ANÁLISIS DE TENDENCIAS A ESCALAS MENSUALES Y ANUALES

En la fase cuatro se aplicaron los métodos para el análisis de tendencias de los datos de precipitación y temperatura en el periodo comprendido entre enero de 1977 a diciembre de 2017. La aplicación de los métodos para el análisis de tendencias

se realizó mediante en el software R. Por un lado, la prueba Mann Kendall, Wilcoxon y la prueba de correlación se aplicó para la serie de datos anuales y mensuales, mientras que la prueba de Pettitt solo fue aplicada para la serie de datos anuales de temperatura y precipitación. Para la estimación del contraste de las hipótesis establecidas para cada prueba se seleccionó un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$), cuya probabilidad llevó a asumir un nivel de confianza del 95%.

A partir de los resultados arrojados por los métodos aplicados para el análisis de tendencias y de correlación se procedió a realizar una comparación entre los años y meses en los que presentaron las fluctuaciones más significativas en las variables objeto de estudio y los reportes de los episodios históricos donde hubo fenómenos del niño o la niña - Oscilación del Sur (ENSO), con el objetivo de determinar si las fluctuaciones se debían o no a este fenómeno.

Para establecer los eventos históricos de fenómenos del niño y la niña que se presentaron a lo largo del periodo de estudio se consultaron los reportes realizados por el Centro de Predicción Climática (Climate Prediction Center CPC) y los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (National Centers for Environmental Prediction NCEP). En la tabla 1 se muestran los episodios fríos y cálidos de 1977 a 2017, donde los valores en color azul representan los fenómenos de la niña y los rojos los fenómenos del niño definidos cuando la anomalía se encuentra por arriba o por debajo de un valor umbral de ± 0.5 °C para el Índice de Niño Oceánico (ONI).

Tabla 1. Episodios históricos de El Niño / La Niña (1977 - 2017)

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1977	0.7	0.6	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8
1978	0.7	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.0
1979	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
1980	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0
1981	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1
1982	0.0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.6	2.0	2.2	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.0	-0.9
1984	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.0

Fuente. [56].

4.5 FASE 5: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE EL NDVI, LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA.

Finalmente, se realiza el análisis de correlación para evaluar si existe una relación entre la precipitación, temperatura y el NDVI. La prueba de correlación se realizó aplicando el método de Pearson para los datos mensuales del periodo comprendido entre enero de 1982 a diciembre de 2017. Así como las pruebas para el análisis de tendencias, el test de correlación se realizó mediante el software R y teniendo en cuenta los resultados arrojados se realizó su posterior análisis, el cual estuvo basado en lo expuesto en el marco teórico.

5. RESULTADOS

5.1 OBTENCIÓN DE DATOS

Los resultados obtenidos del proceso llevado a cabo para la selección de las estaciones meteorológicas, la obtención de los registros de precipitación para el periodo de análisis y la interpolación distancia inversa ponderada (IDW) se muestran a continuación.

5.1.1 Selección de estaciones hidrometeorológicas. Las estaciones meteorológicas que hacen parte del estudio se seleccionaron a partir de un análisis de consistencia y completitud de datos, aplicado para un total de 25 estaciones del IDEAM, dentro de las cuales se encontraban 5 estaciones pluviográficas (PG), 2 climatológicas ordinarias (CO) y 18 pluviométricas (PM) localizadas dentro y en inmediaciones de la cuenca hidrográfica del río Guavio.

Los resultados del análisis de completitud y consistencia de los reportes de precipitación media diaria en el periodo comprendido entre el año de 1977 hasta el 2017 se muestran en la tabla 2. El porcentaje de datos faltantes fue determinado considerando una longitud esperada de 16436 reportes, los cuales se compararon con la longitud de datos observada de la serie, obteniendo como resultado que todas las estaciones puestas a prueba presentaron un porcentaje de datos faltantes inferior al 10 % (tabla 2). Teniendo en cuenta que las estaciones cumplían simultáneamente con la longitud de registro y la cantidad de datos faltantes, se establece que existe consistencia en todos los casos y homogeneidad en la información.

Sin embargo, a pesar de que se cumplieron los criterios de consistencia en todos los casos, los resultados del examen visual realizado a los reportes de las series de precipitación de cada estación permitieron identificar y excluir las estaciones que se subrayan en color amarillo en la tabla 2, debido a que en comparación con estaciones próximas los reportes de estas presentaban valores atípicos en más de la mitad de la serie de tiempo llegando a reportar precipitaciones que en algunos casos sobrepasaban hasta los 7500 mm/año mientras que estaciones cercanas reportaban máximo 4500 mm/año. Este análisis se puede observar en el Anexo A del presente documento.

Finalmente, se seleccionaron un total de 22 estaciones las cuales presentaban un porcentaje de datos faltantes menor al 10 %, cumplían con la longitud de registros requerida y no presentaban comportamientos anómalos (tabla 2).

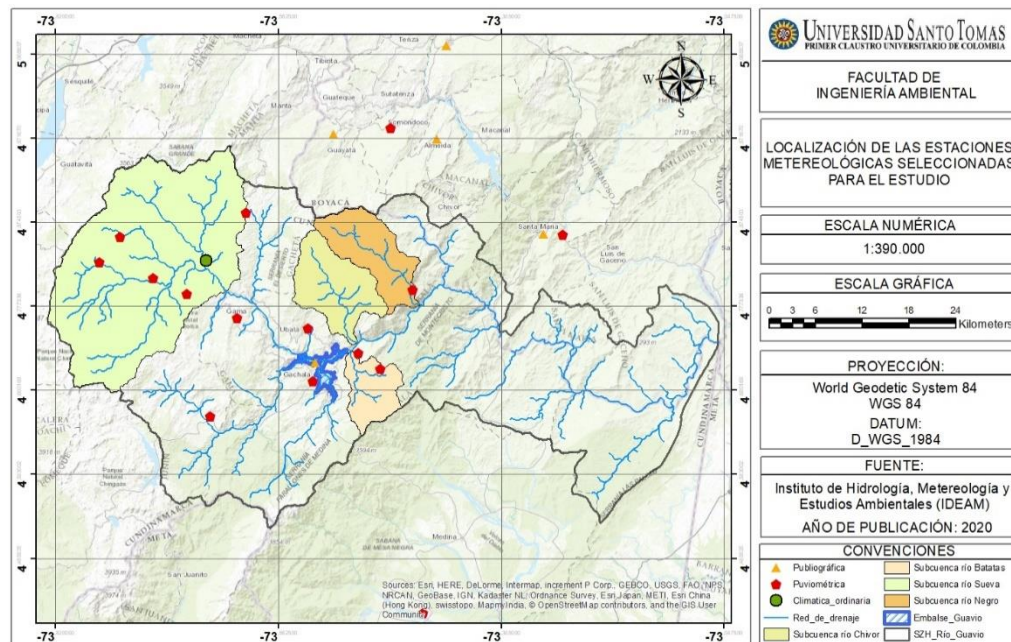
Tabla 2. Resultados del análisis de consistencia y completitud de las estaciones de precipitación.

Código	Nombre de la estación	Tipo	Localización			Datos faltantes	% datos faltantes
			Latitud	Longitud	Altitud		
35060210	Claraval	PM	4.6503	-73.6414	2100	371	2.26
35060050	Junín	PM	4.7922	-73.6687	2323	140	0.85
35060020	Sueva	PM	4.8100	-73.7072	1965	1257	7.65
35060100	Escuela tena	PM	4.7127	-73.5207	1650	1285	7.82
35060090	Gachalá	PM	4.6905	-73.5229	1733	673	4.09
35060140	Las palomas	PM	4.7049	-73.4449	23	339	2.06
35060120	La vega san juan	PM	4.7233	-73.4706	1791	728	4.43
35060240	Gama	PM	4.7643	-73.6099	2210	1277	7.77
35065010	Gachetá	CO	4.8304	-73.6465	1752	1381	8.40
35050010	Medina	PM	4.5065	-73.3470	480	395	2.40
35060170	Tasajeras	PM	4.8857	-73.6004	2502	732	4.45
35060250	Santa rosa de Ubalá	PM	4.7968	-73.4072	1649	318	1.93
35060220	La gloria	PM	4.8157	-73.4197	1845	338	2.05
35060180	Ubalá	PM	4.7524	-73.5286	1929	372	2.26
35060200	El amoladero	PM	4.8580	-73.7454	2963	64	0.39
35060160	Potreritos	PM	4.8288	-73.7693	2802	847	5.15
35050020	San Juanito	PM	4.4232	-73.3960	426	166	1.01
35070180	Santa maría	PG	4.8608	-73.2568	850	166	1.01
35080080	Piedra campana	PM	4.8604	-73.2341	450	218	1.33
35055010	El Japón	CO	4.3770	-73.3013	280	491	2.99
35070110	La granja guayatá	PG	4.9761	-73.4993	1580	66	0.40
35070100	Somondoco	PM	4.9835	-73.4331	1600	682	4.15
35070260	Almeida	PG	4.9708	-73.3799	1954	675	4.11
35070080	Garagoa	PG	5.0789	-73.3685	1700	240	1.46
35060150	Tembladares	PM	4.7048	-73.6652	2878	710	4.32

Fuente. Autora.

En la Figura 6, se presenta la localización de las estaciones seleccionadas de las cuales: quince (15) son pluviométricas, cinco (5) pluviográficas y dos (2) climatológicas ordinarias.

Figura 6. Distribución espacial de estaciones seleccionadas para el estudio a nivel de cuenca y subcuencas objeto de análisis.



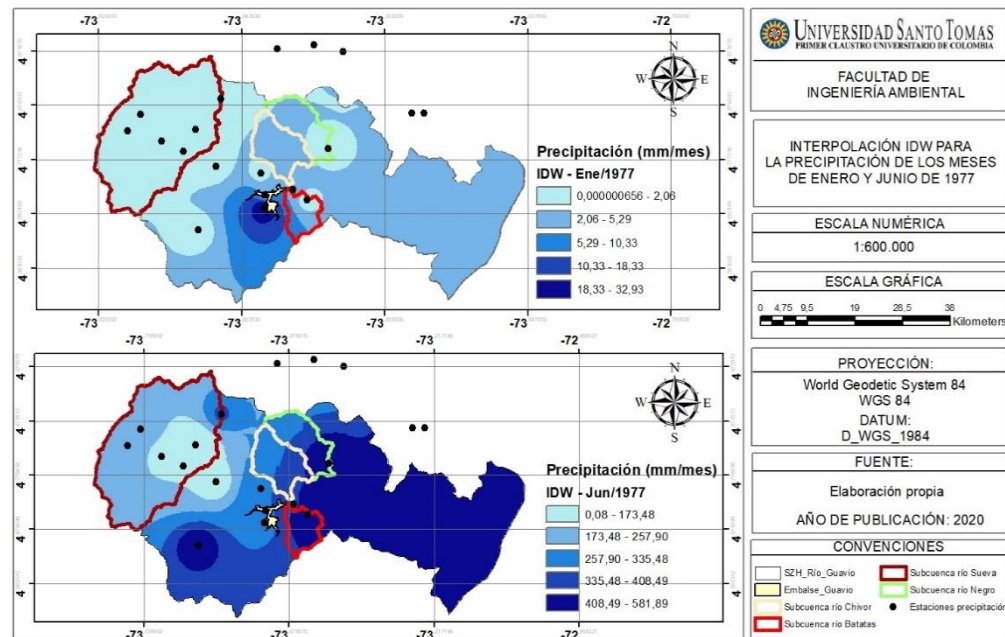
Fuente. Autora.

5.2 INTERPOLACIÓN DISTANCIA INVERSA PONDERADA (IDW)

La interpolación IDW fue aplicada para los registros de precipitación mensual del periodo de análisis. De este procedimiento se extrajeron y agregaron los valores de precipitación mensual a nivel de cuenca y subcuenca en el periodo comprendido entre enero de 1977 a diciembre de 2017. Algunos de los resultados obtenidos de la interpolación se pueden observar en las siguientes figuras donde se muestra las distribuciones espaciales mensuales de precipitaciones más altas (junio) y bajas (enero) a lo largo del periodo de estudio.

Para el año de 1977 la distribución espacial de las precipitaciones para los meses de enero y junio se pueden observar en la Figura 7; donde la subcuenca del río Sueva presenta las precipitaciones más bajas, mientras que para las subcuencas del río Negro, Batatas y Chivor las precipitaciones incrementaron, presentándose los valores más altos en zonas aledañas a la subcuenca del río Batatas, lo mismo sucede en el mes de junio en donde las precipitaciones más altas se presentan en la parte baja de la cuenca. Cabe resaltar que para este año se presentaron episodios del fenómeno de El Niño en el mes de enero que se ve reflejado en las bajas precipitaciones registradas en la cuenca.

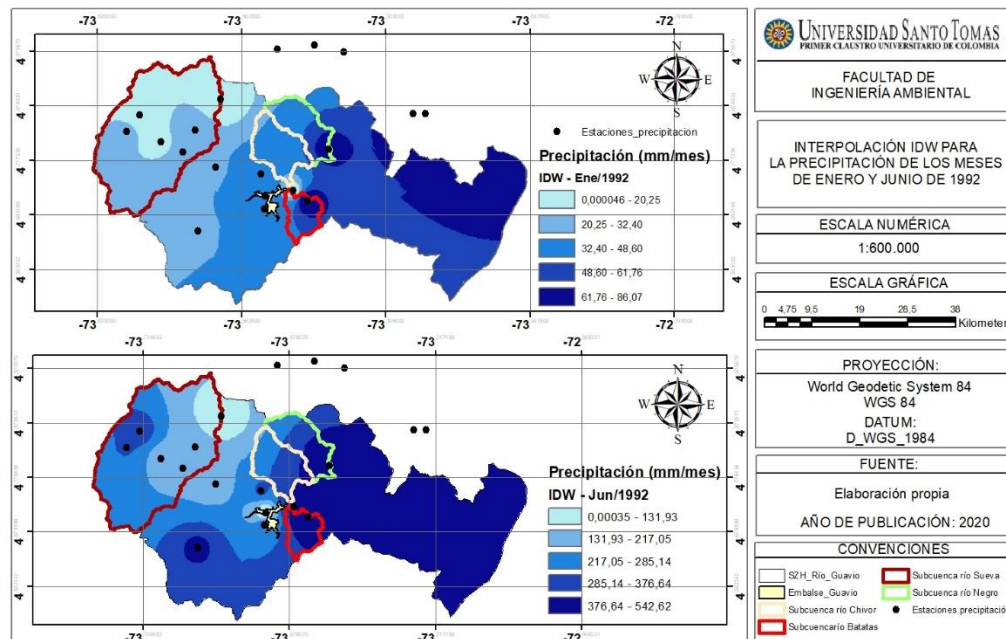
Figura 7. Resultados de la interpolación IDW para los meses de enero y junio de 1977.



Fuente. Autora.

En el año de 1992 se observa que hay un incremento notorio en las precipitaciones de toda la cuenca en el mes de enero en comparación con enero de 1977, mientras que para el mes de junio las precipitaciones presentan valores y un comportamiento similar a las registradas en el mismo mes del año de 1977. Tanto en el mes de enero como en junio en las zonas aledañas y aguas abajo del embalse las precipitaciones tienden a aumentar. Mientras que los valores más bajos se presentan en la subcuenca del río Sueva localizada aguas arriba del embalse tanto para el mes de enero como junio; para la subcuenca del río Chivor localizada aguas abajo del embalse las precipitaciones fueron más altas (Figura 8). Por otro lado, en el año de 1992 se presentó un fenómeno de El Niño el cual tuvo una duración de seis meses (enero-junio), sin embargo, no tuvo un efecto tan notorio sobre las precipitaciones como el que se presentó en el mes de enero de 1977 antes de la construcción del embalse.

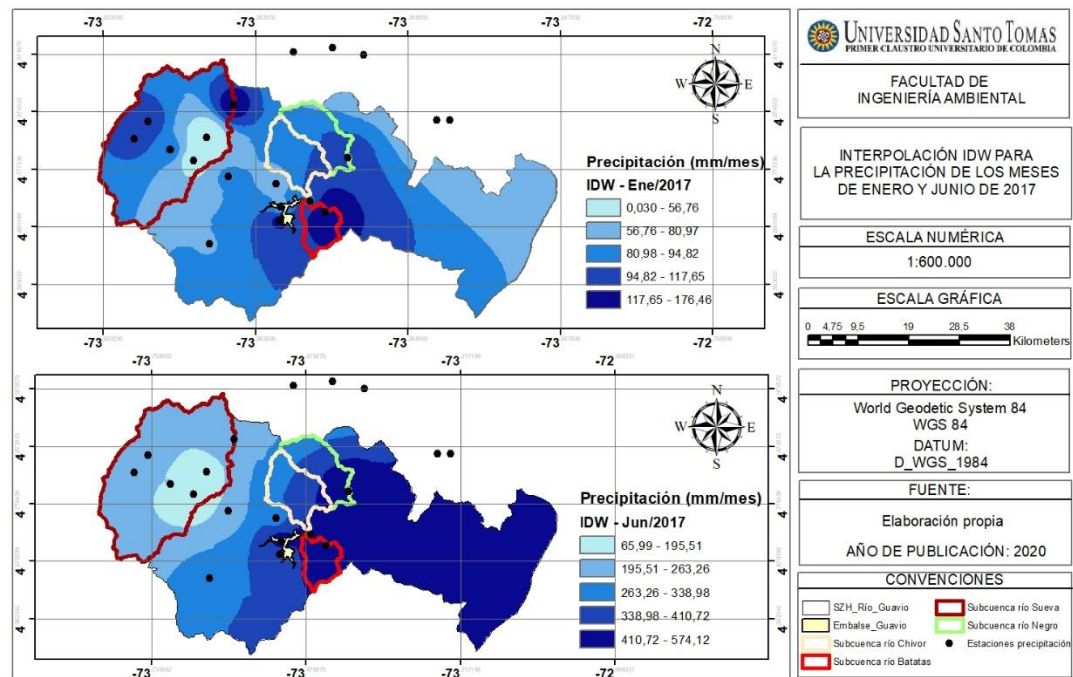
Figura 8. Resultados de la interpolación IDW para los meses de enero y junio de 1992.



Fuente. Autora.

Finalmente, para el año de 2017 en promedio las precipitaciones del mes de enero a nivel de cuenca fueron de 97.07 mm/mes, lo que evidencia que se presenta un incremento notorio en comparación con las precipitaciones de enero del año de 1977 las cuales en promedio fueron de 2.32 mm/mes y en 1992 de 40.77 mm/mes. Al igual que en los casos anteriores las precipitaciones tienen a acrecentarse en zonas aledañas al embalse y aguas abajo del mismo, donde nuevamente las precipitaciones más bajas del mes de junio se presentan en la subcuenca del río Sueva y las más altas en las subcuencas restantes (Figura 9). Cabe resaltar que para los meses de enero y junio no se presentaron fenómenos del niño ni de la niña en el año 2017.

Figura 9. Resultados de la interpolación IDW para los meses de enero y junio de 2017.



Fuente. Autora.

5.3 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA, LA PRECIPITACIÓN Y EL NDVI

Para el análisis de la variación temporal de las variables objeto de estudio se incluye el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), mediante el cual se obtuvieron las características del cambio de vegetación a nivel de cuenca y subcuenca. Teniendo en cuenta que las transformaciones de las coberturas vegetales tienen una incidencia sobre los factores climáticos, se realiza un análisis de la variación temporal del NDVI en el periodo de estudio, con el objetivo de determinar sus implicaciones sobre las variaciones de las precipitaciones y temperaturas de la cuenca.

Finalmente, Los resultados obtenidos del análisis de los cambios temporales de la temperatura, precipitación y el NDVI, antes (años 1977-1991) y después (1992-2017) de entrar en operación el embalse del Guavio se muestran a continuación:

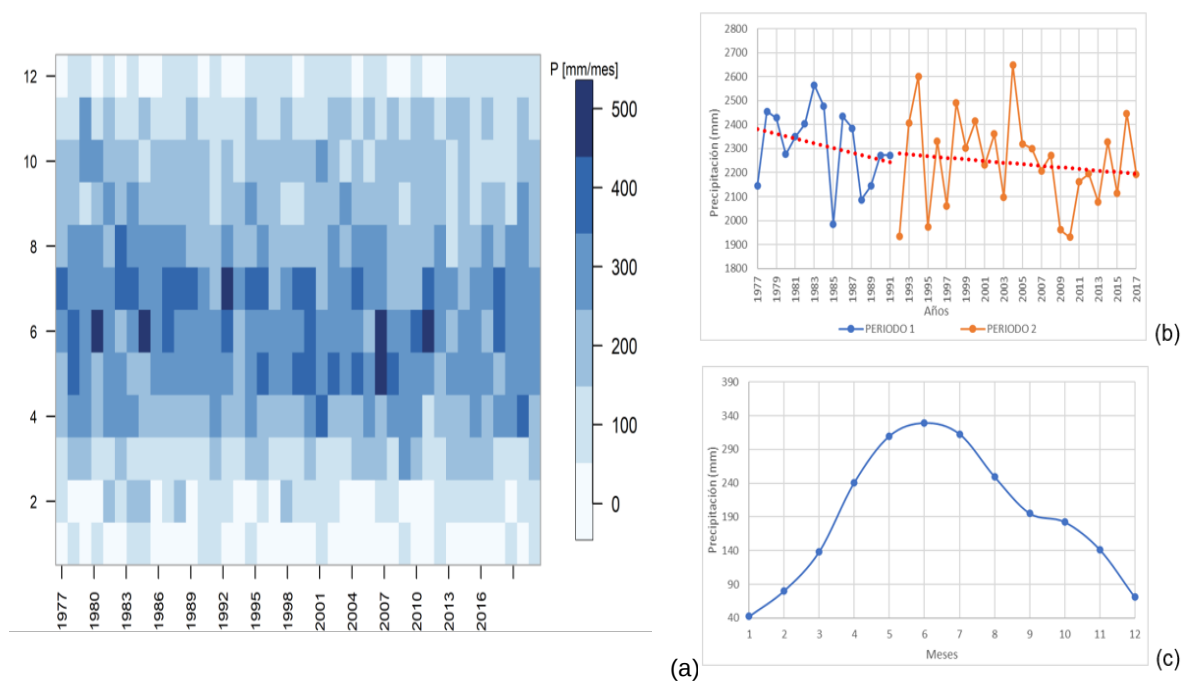
❖ Precipitación

Para la cuenca del río Guavio se encontró que el valor promedio multianual de la precipitación fue de 2269.39 mm, el valor más alto fue de 2649.21 mm en 2004 y el

más bajo de 1931.18 mm en 2010 (Figura 11a). En cuanto a la precipitación mensual multianual los valores más altos se presentan en los meses de abril a agosto, siendo junio el mes con mayor precipitación con un valor de 329.32 mm; mientras que la precipitación más baja fue de 42.45 mm el mes de enero, seguida de 71.08 mm en el mes de diciembre (Figura 10b).

En la Figura 10c se observa que para el primer y el segundo periodo de análisis la precipitación multianual tuvo una tendencia decreciente, la cual, es más pronunciada antes de entrar en operación el embalse. La precipitación promedio multianual antes del embalse fue de 2244.84 mm, la precipitación más alta fue de 2564.88 mm en 1983 y la más baja de 1985.47 mm en 1985; después de entrar en operación el embalse la precipitación promedio multianual fue de 2244.84 mm, la precipitación más alta registrada fue de 2649.20 mm en 2004 y la más baja fue de 1931.17 mm en el 2010 (Figura 10c).

Figura 10. Variación de la precipitación de 1977 a 2017 en la cuenca del río Guavio.



(a) Precipitación mensual. (b) Precipitación promedio multianual. (c) Precipitación promedio mensual multianual.

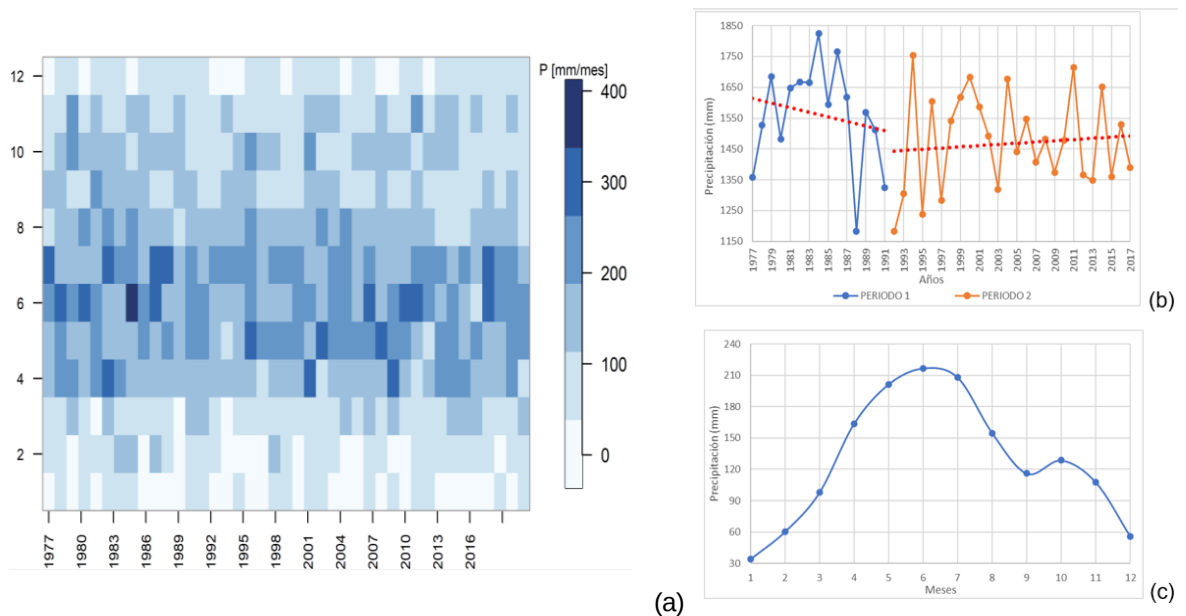
Fuente. Autora.

La subcuenca del río Sueva presenta una precipitación promedio multianual de 1182.89 mm, con el valor más bajo de 1182.31 mm en 1988 y el más alta de 1823.82 mm en 1984 (Figura 11a). La precipitación promedio mensual multianual presento los valores más altos en los meses de abril a agosto, siendo junio el mes con mayor

precipitación con un valor de 216.80 mm; los valores más bajos se registraron en los meses de enero con un valor de 33.91 mm, febrero con 60.17 mm y diciembre con 55.54 mm (Figura 11c).

Antes de la construcción y de entrar en operación el embalse la precipitación multianual tuvo una tendencia decreciente, mientras que posteriormente tuvo una tendencia creciente. En el primer periodo la precipitación promedio multianual fue de 1521.24 mm, la más alta fue de 1823.82 mm en 1984 y la más baja fue de 1182.89 mm en 1988; luego de entrar en operación la precipitación promedio multianual fue de 1475.90 mm, el valor más alto fue de 1754.18 mm en 1994 y el valor más bajo fue de 1182.31 mm en 1992. Además, se observa una disminución considerable de las precipitaciones de la subcuenca del río Sueva entre 2005 y 2017 (Figura 11b).

Figura 11. Variación de la precipitación de 1977 a 2017 en la subcuenca del río Sueva.



(a) Precipitación mensual. (b) Precipitación promedio multianual. (c) Precipitación promedio mensual multianual.

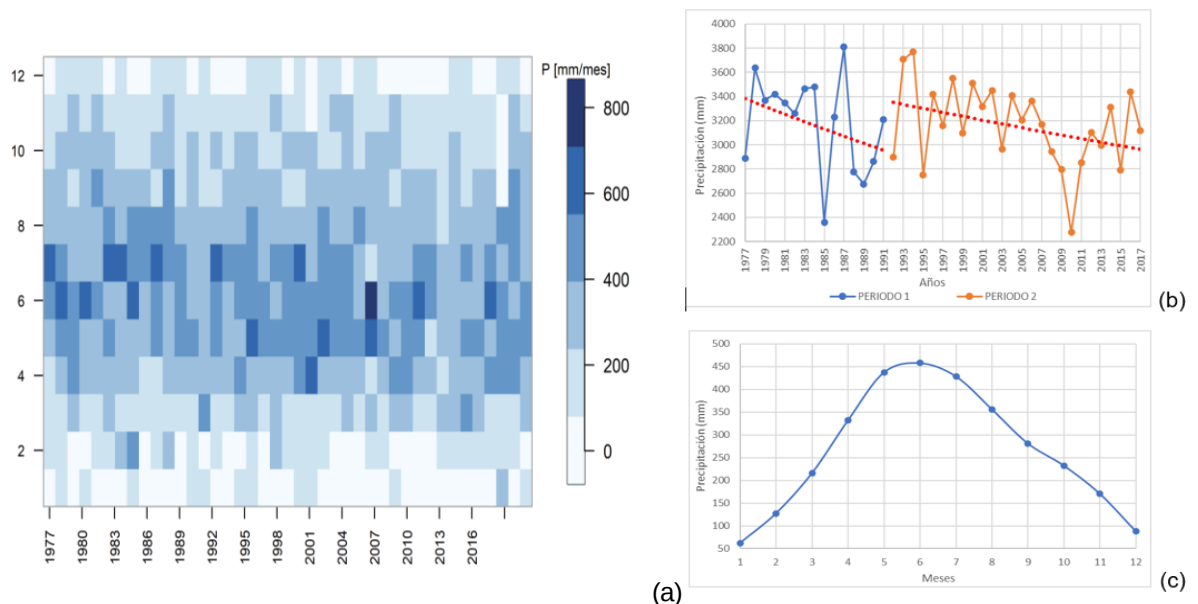
Fuente. Autora.

Los registros de precipitación anual de la subcuenca del río Batatas a lo largo del periodo de análisis tuvieron una leve tendencia decreciente, la precipitación promedio multianual fue de 3174.18 mm, el valor máximo fue de 3808.95 mm en 1987 y el valor mínimo fue de 2274.68 mm en 2010 (Figura 12a). La precipitación promedio mensual multianual más alta se presentó en los meses de abril a agosto, donde junio es el mes con mayor precipitación con un valor de 437.57 mm, mientras

que las precipitaciones más bajas se registraron en el mes de enero con un valor de 62.22 mm y diciembre con un valor de 87.88 mm (Figura 12c).

En la Figura 12b se observa que existe una tendencia decreciente en ambos periodos de análisis. Antes de entrar en operación el embalse la precipitación promedio multianual fue de 3205.70 mm, con un valor máximo 3808.94 mm en 1987 y un valor mínimo de 2360.45 mm en 1985; al entrar en operación el embalse la precipitación promedio multianual fue de 3167.76 mm, la máxima fue de 3770.52 mm en 1994 y la mínima fue de 2274.67 mm en 2010 (Figura 12b). Se observa que las fluctuaciones de las precipitaciones anuales antes de iniciar la construcción y entrar en operación del embalse fueron más grandes que las que se presentaron luego de iniciar operaciones.

Figura 12. Variación de la precipitación de 1977 a 2017 en la subcuenca del río Batatas.



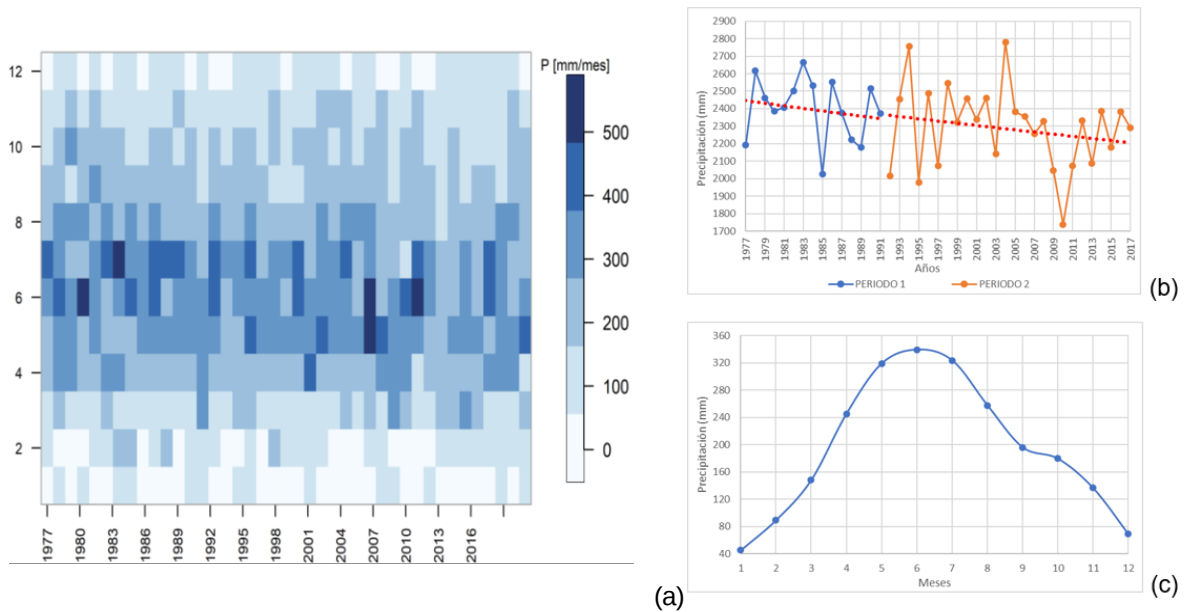
(a) Precipitación mensual. (b) Precipitación promedio multianual. (c) Precipitación promedio mensual multianual.

Fuente. Autora.

La subcuenca del río Chivor presentó una precipitación promedio multianual de 2332.95 mm, con un valor máximo de 2781.15 mm en 2004 y un valor mínimo de 1737.24 mm en 2010 (Figura 13a). Las precipitaciones promedio mensuales multianuales más altas se presentaron en los meses de abril a agosto, siendo junio el mes con la precipitación más alta con 339.41 mm, las precipitaciones más bajas se presentaron en el mes de enero con 45.17 mm, febrero con 89.29 mm y diciembre con 69.21 mm (Figura 13c).

Las variaciones de las precipitaciones multianuales en los dos periodos de análisis tuvieron una tendencia decreciente. Por un lado, la precipitación promedio multianual antes de la construcción del embalse fue de 2379.57 mm, con un valor mínimo de 2024.57 mm en 1985 y máximo de 2665.60 mm en 1983; mientras que luego de entrar en operación el embalse la precipitación promedio multianual fue de 2294.03 mm, el valor más alto fue de 2781.14 mm en 2004 y el valor más bajo fue de 1737.24 mm en 2010 (Figura 13b).

Figura 13. Variación de la precipitación de 1977 a 2017 en la subcuenca del río Chivor.



(a) Precipitación mensual. (b) Precipitación promedio multianual. (c) Precipitación promedio mensual multianual

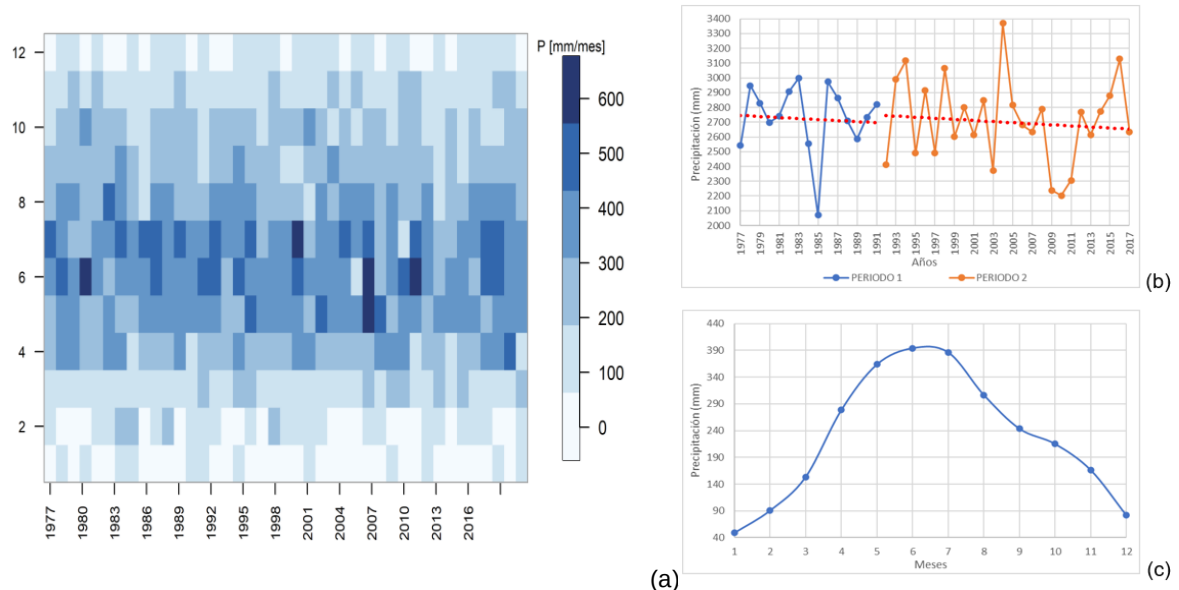
Fuente. Autora.

Las precipitaciones anuales de la subcuenca del río Negro presentaron una tendencia decreciente leve tanto antes como después de entrar en operación el embalse. La precipitación promedio multianual fue de 2720.14 mm, con un valor máximo de 3369.02 mm en 2004 y mínimo de 2070.60 mm en 1985 (Figura 14a). Las precipitaciones promedio mensuales multianuales presentan los mayores valores en los meses de abril a agosto, siendo junio el mes que registra la precipitación más alta con un valor de 394.14 mm; mientras que las precipitaciones más bajas se presentaron en los meses de enero con un valor de 49.20 mm, febrero con 90.82 mm y diciembre con 81.75 mm (Figura 14c).

Antes de entrar en operación el embalse la precipitación promedio multianual fue de 2735.87 mm, con un valor máximo de 2997.82 mm en 1983 y mínimo de 2070.59

mm en 1985; luego de entrar en operación el embalse la precipitación promedio multianual fue de 2713.61 mm, la mínima fue de 2203.57 mm en 2010 y la máxima de 3369.02 mm en 2004 (Figura 14b).

Figura 14. Variación de la precipitación desde 1977 a 2017 en la subcuenca del río Negro.



(a) Precipitación mensual. (b) Precipitación promedio multianual. (c) Precipitación promedio mensual multianual.

Fuente. Autora.

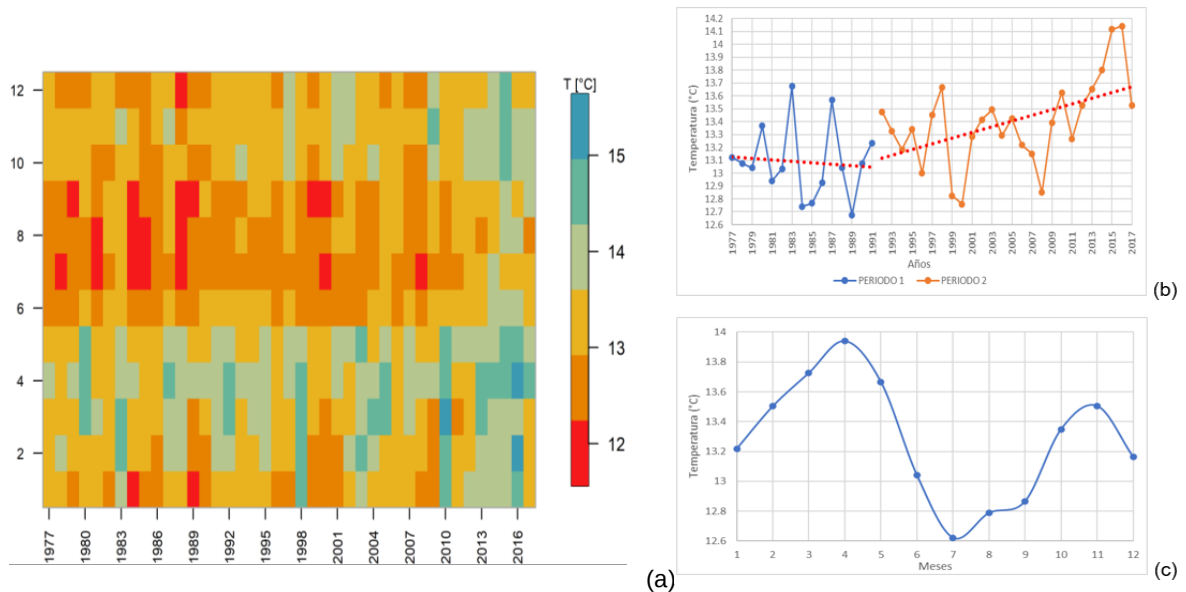
❖ Temperatura

El análisis de la variación de la temperatura para la cuenca del río Guavio y subcuencas objeto de análisis se realizó para el periodo comprendido entre enero de 1977 a diciembre de 2017 y a partir de los registros de la CRU. Los resultados obtenidos muestran que la temperatura anual tiene una tendencia descendente antes de la operación del embalse y después presenta una tendencia ascendente (Figura 15b).

El valor promedio multianual de la temperatura fue de 13.28 °C, con un valor máximo de 14.14 °C en 2016 y mínimo de 12.67 °C en 1989 (Figura 15a). A nivel mensual la temperatura promedio mensual multianual presenta los valores más altos en los meses de febrero a mayo, siendo abril el mes con la temperatura más alta registrada con un valor de 13.9 °C y las temperaturas más bajas se registran en los meses de junio con un valor de 13.04 °C, julio con 12.62 °C, agosto con 12.78 °C y septiembre 12.86 °C (Figura 15c).

Antes de entrar en operación el embalse la temperatura promedio multianual fue de 13.08 °C, con un valor mínimo de 12.67 °C en 1989 y máximo de 13.67 °C en 1983; luego de entrar en funcionamiento, la temperatura promedio fue de 13.39 °C, la máxima de 14.14 °C en 2016 y la mínima de 12.75 en el 2000 (Figura 15b). Las temperaturas promedio multianuales tuvieron fluctuaciones pequeñas de máximo 0.93 °C y mínimo de 0.02 °C.

Figura 15. Variación de la temperatura desde 1977 a 2017 en la cuenca y subcuencas.



(a) Temperatura mensual. (b) Temperatura promedio multianual. (c) Temperatura promedio mensual multianual.

Fuente. Autora.

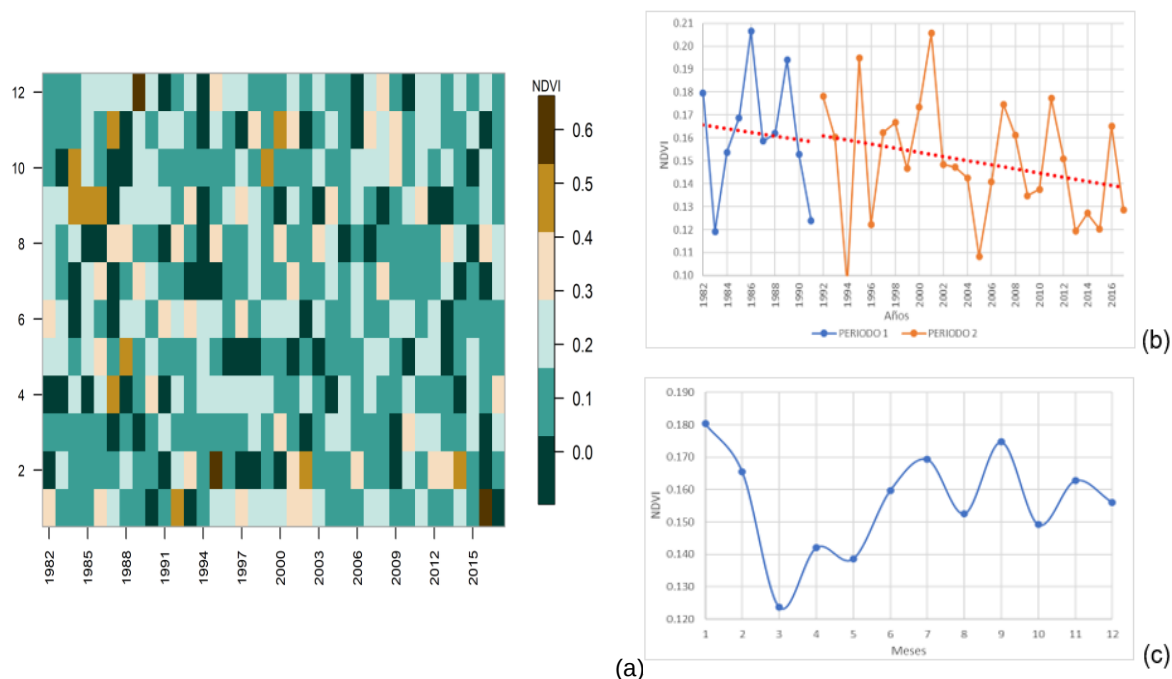
❖ Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En cuanto a la variación temporal del NDVI se encontró que el valor promedio multianual para la cuenca del río Guavio fue de 0.15, con un valor máximo de 0.21 en el año de 2001 y mínimo de 0.10 en el año de 1994 (Figura 16). A escala mensual el NDVI registra los valores más altos en los meses de enero (0.18), febrero (0.17) y octubre (0.15), mientras que en los meses de marzo (0.12), abril (0.14) y mayo (0.13) el índice presentó los valores más bajos (Figura 16c).

A nivel anual los valores del NDVI tuvieron una tendencia decreciente tanto antes como después de entrar en operación el embalse, comportamiento que puede estar asociado a que las labores de construcción del mismo iniciaron en el año de 1981, lo cual implicó la edificación de nueva infraestructura, la remoción de coberturas vegetales y generó un cambio en las actividades económicas que se llevaban a

cabo en la cuenca (Figura 16b). Por un lado, en el primer periodo los valores anuales del NDVI oscilaron entre 0.12 a 0.21 y en el segundo periodo los valores oscilaron entre 0.10 y 0.21; lo cual indica que posiblemente en ambos casos hay presencia de suelos desnudos con rocas estériles, praderas, zonas con vegetación escasa y cultivos senescentes (Figura 16b).

Figura 16. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la cuenca del río Guavio.



(a) NDVI mensural. (b) NDVI promedio multianual. (c) NDVI promedio mensual multianual.

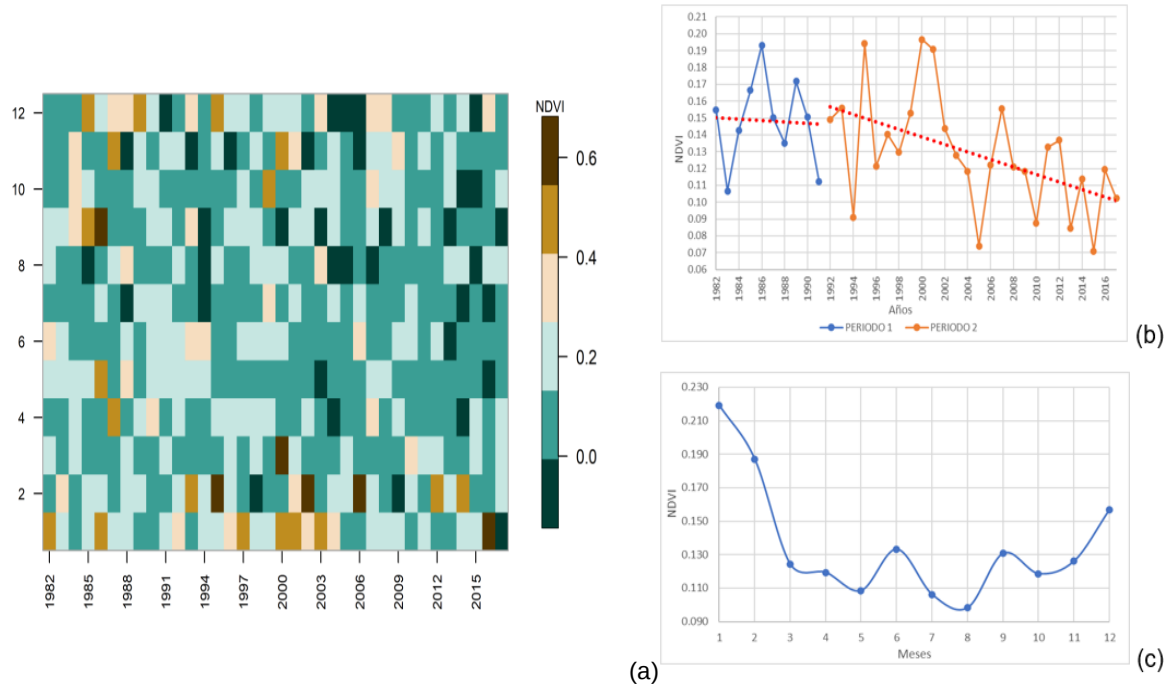
Fuente. Autora.

Para la subcuenca del río Sueva localizada aguas arriba del embalse el valor promedio multianual del NDVI fue de 0.13, con un valor mínimo de 0.07 en el año 2005 y máximo 0.20 en el 2000 (Figura 17a). A escala mensual los valores más altos del NDVI se presentaron en los meses de enero (0.22) y febrero (0.19); mientras que los más bajos se presentaron de marzo (0.12) a octubre (0.11), en noviembre y diciembre los valores tendieron a incrementarse de nuevo (Figura 17c).

A nivel anual el NDVI tuvo una tendencia decreciente en los dos periodos de análisis, sin embargo, luego de la construcción del embalse se refleja un mayor decrecimiento del índice; esto debido a como se mencionó con anterioridad la construcción del embalse inicia en 1981 produciendo una disminución en las coberturas vegetales de es. Antes de entrar en operación el embalse los valores anuales del NDVI oscilaron entre 0.11 y 0.19; posteriormente, los valores oscilaron entre 0.07 y 0.20, lo cual indica que puede haber presencia de vegetación poco

densa o terrenos desnudos y mosaicos entre cultivos, praderas y arbustos, predominando luego de la construcción del embalse (Figura 17b).

Figura 17. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la subcuenca del río Sueva.



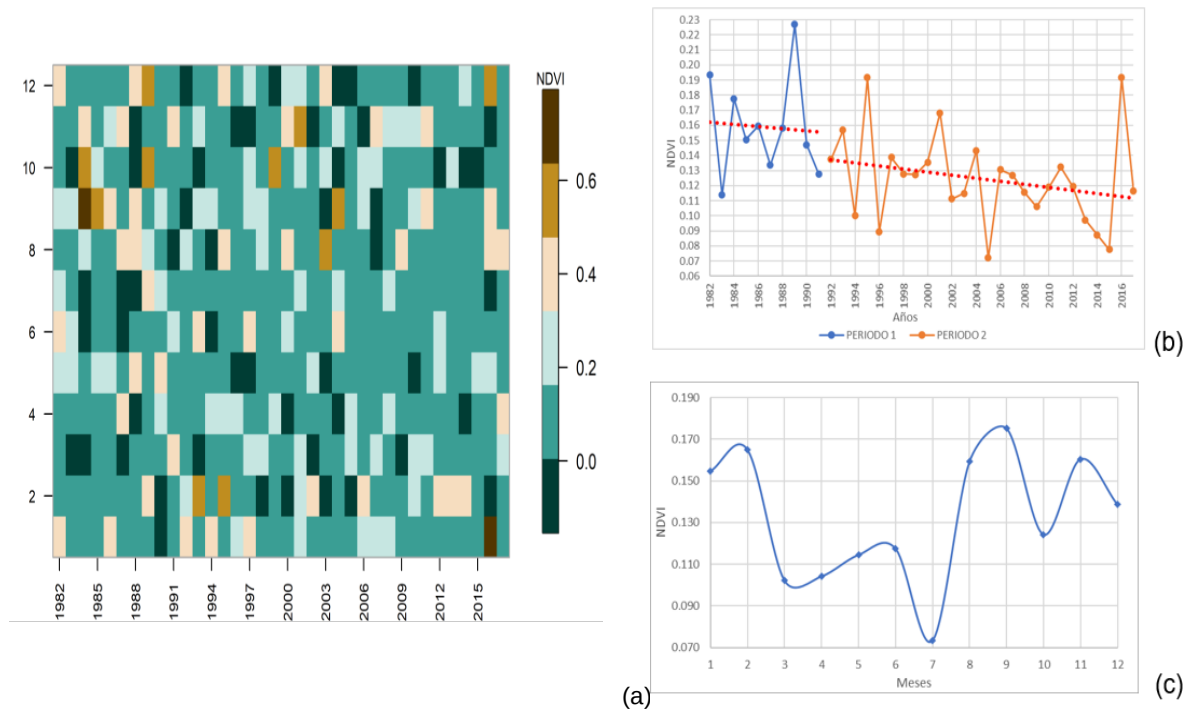
(a) NDVI mensual. (b) NDVI promedio multianual. (c) NDVI promedio mensual multianual.

Fuente. Autora.

En cuanto a la subcuenca del río Batatas localizada en el municipio de Gachalá en inmediaciones al embalse, el valor promedio multianual del NDVI fue de 0.13, con un valor mínimo de 0.07 en el 2005 y máximo de 0.23 en 1989 (Figura 18a). A nivel mensual los valores más altos se presentaron en los meses de enero (0.16), febrero (0.17) y septiembre (0.18); mientras que en los meses de marzo (0.10) y julio (0.07) hubo un decrecimiento en el NDVI y posteriormente volvió a incrementarse (Figura 18c).

A nivel anual la tendencia del NDVI a lo largo del periodo de estudio fue decreciente en ambos periodos, sin embargo, se observa en la Figura 18b que en el periodo dos hay un decrecimiento más pronunciado del índice, presentando los valores más bajos entre el 2006 (0.07) y 2015 (0.08) (Figura 18b). Teniendo en cuenta que los valores del NDVI son bajos se asume que posiblemente hay presencias de terrenos con baja vegetación, pastizales, cultivos o rocas estériles que son más predominante luego de la construcción del embalse. Cabe mencionar que la presencia del embalse.

Figura 18. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la subcuenca del río Batatas.



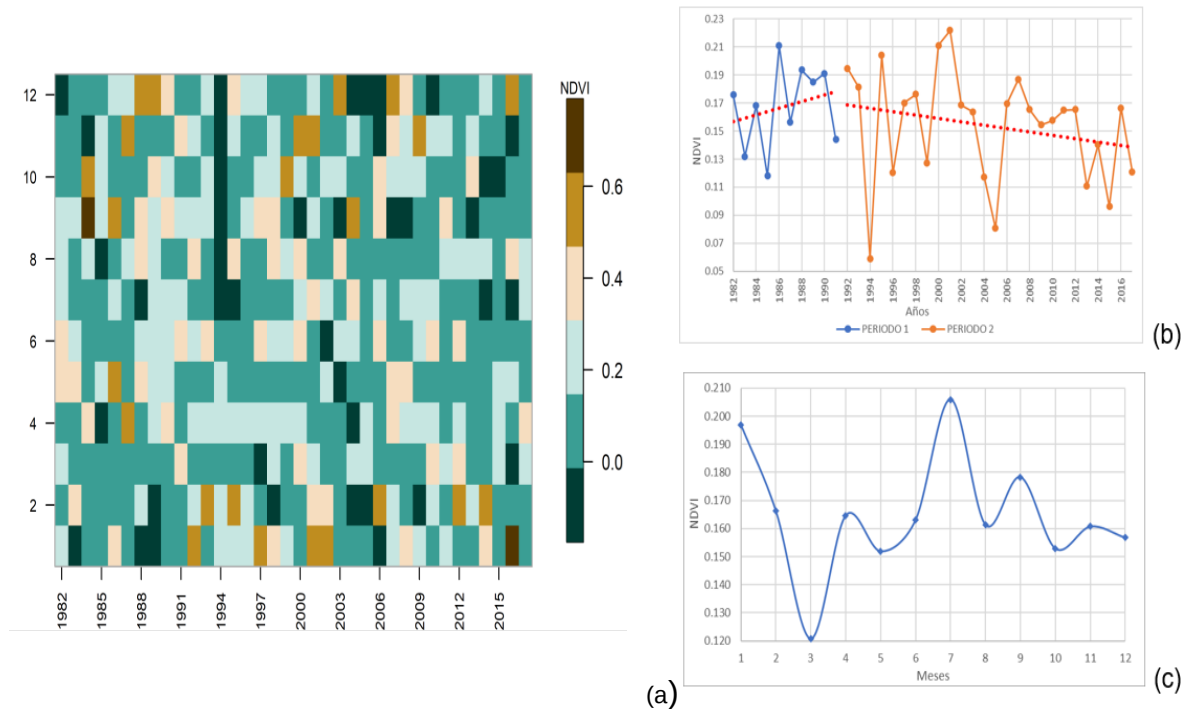
(a) NDVI mensural. (b) NDVI promedio multianual. (c) NDVI promedio mensual multianual.

Fuente. Autora.

La subcuenca del río Chivor localizada en el municipio de Ubalá en inmediaciones al embalse presentó un valor promedio multianual del NDVI de 0.16, con un valor mínimo de 0.06 en 1994 y máximo de 0.22 en 2001 (Figura 19a). A nivel mensual los valores del NDVI más altos se registraron en los meses de enero (0.19), julio (0.21) y septiembre (0.18); mientras que los valores más bajos se presentaron en el mes de marzo (0.12) y mayo (0.15), posteriormente el valor del NDVI volvió incrementarse en julio y a decrecer en agosto (Figura 19c).

Por otro lado, se observa una tendencia creciente en los valores anuales del NDVI antes de entrar en operación el embalse, mientras que luego de entrar en operación se observa una tendencia decreciente pronunciada. Los valores del NDVI en el primer periodo oscilaron entre 0.12 a 0.21 y en el segundo periodo oscilaron entre 0.06 a 0.22, presentando pequeñas fluctuaciones año a año (Figura 19b). Debido a que los valores del NDVI son bajos en ambos periodos se asume que posiblemente la cobertura vegetal de la subcuenca del río Chivor se ha caracterizado por la presencia de rocas estériles, pastizales, terrenos desnudos o con escasa vegetación a lo largo del periodo de estudio.

Figura 19. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la subcuenca del río Chivor.



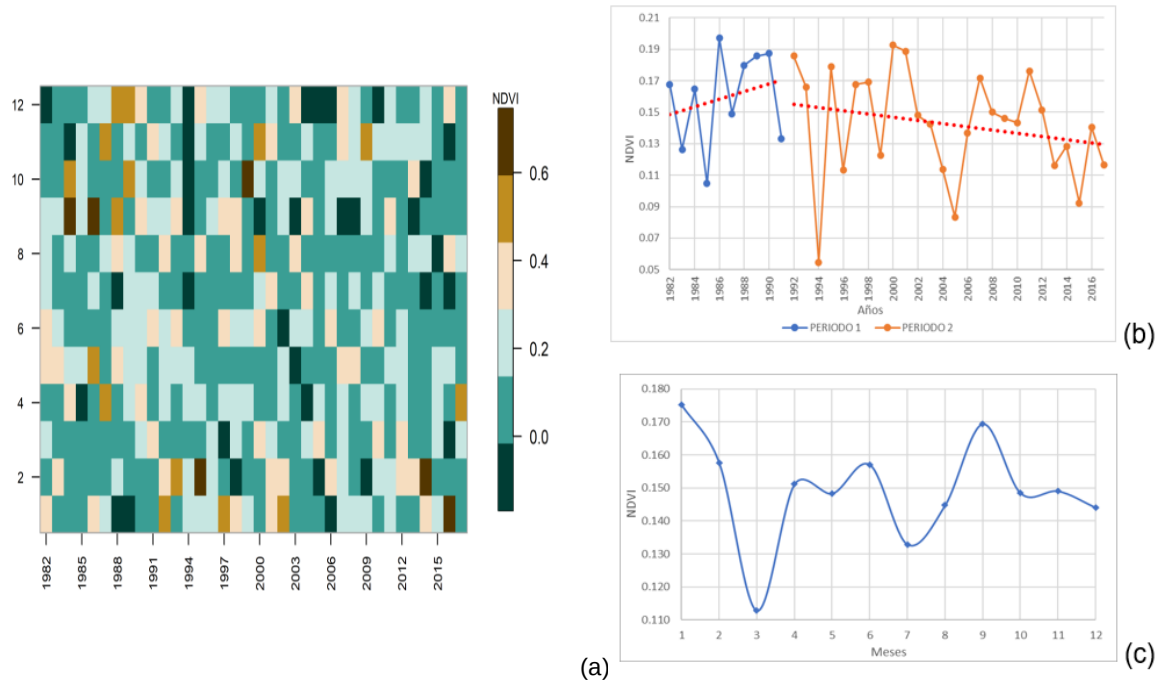
(a) NDVI mensural. (b) NDVI promedio multianual. (c) NDVI promedio mensual multianual.

Fuente. Autora.

La subcuenca del río Negro que se encuentra localizada aguas abajo del embalse entre los municipios de Somondoco, Ubalá y Chivor, presenta un valor promedio multianual del NDVI de 0.15, con un valor mínimo de 0.05 en 1994 y máximo de 0.20 en 1986 (Figura 20a). Los valores mensuales del NDVI más altos de presentaron en los meses de enero (0.18), febrero (0.16) y septiembre (0.17) y lo valores más bajos se registraron en los meses de marzo (0.11) y julio (0.13) (Figura 20c).

En cuanto a los valores anuales del NDVI se observa que existe una tendencia creciente en el primer periodo de análisis, mientras que en el segundo periodo presenta una tendencia decreciente. Antes de entrar en operación el embalse los valores anuales del NDVI oscilan entre 0.10 a 0.20; mientras que después los valores oscilan entre 0.05 a 0.19 (Figura 20b). Teniendo en cuenta que los datos obtenidos del NDVI son pequeños y no mayores a 0.2 se asume que posiblemente en la subcuenca del río Negro predomina una vegetación ligera con presencia de rocas estériles, pastizales, cultivos, cuerpos de agua y terrenos desnudos en ambos periodos de estudio.

Figura 20. Variación del NDVI desde 1982 a 2017 en la subcuenca del río Negro.



(a) NDVI mensual. (b) NDVI promedio multianual. (c) NDVI promedio mensual multianual.

Fuente. Autora.

5.4 APLICACIÓN DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Para el análisis de tendencias se aplicaron dos pruebas no paramétricas, por un lado, la prueba Mann-Kendall la cual permitió determinar si existía una tendencia al crecimiento o decrecimiento estadísticamente significativa en la media de la serie de datos y la prueba Pettit mediante la cual se logró determinar el punto de inflexión del periodo de análisis para los valores anuales y mensuales de temperatura y precipitación. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

5.4.1 Pettit test: puntos de inflexión en las series de tiempo de la precipitación y temperatura. La prueba de Pettit aplicada para detectar los cambios en la tendencia central de la serie de tiempo se llevó a cabo para los valores anuales de precipitación y temperatura en el periodo comprendido entre 1977 a 2017. Asumiendo como hipótesis nula (H_0) que no existe un punto de cambio en la tendencia central y como hipótesis alternativa (H_1) que existe un punto de cambio. Esta prueba se realizó con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y los resultados obtenidos se muestran a continuación.

❖ Precipitación.

La prueba de Pettit arroja como resultados los puntos probables de inflexión para los valores de precipitación anual que se muestran en la siguiente tabla:

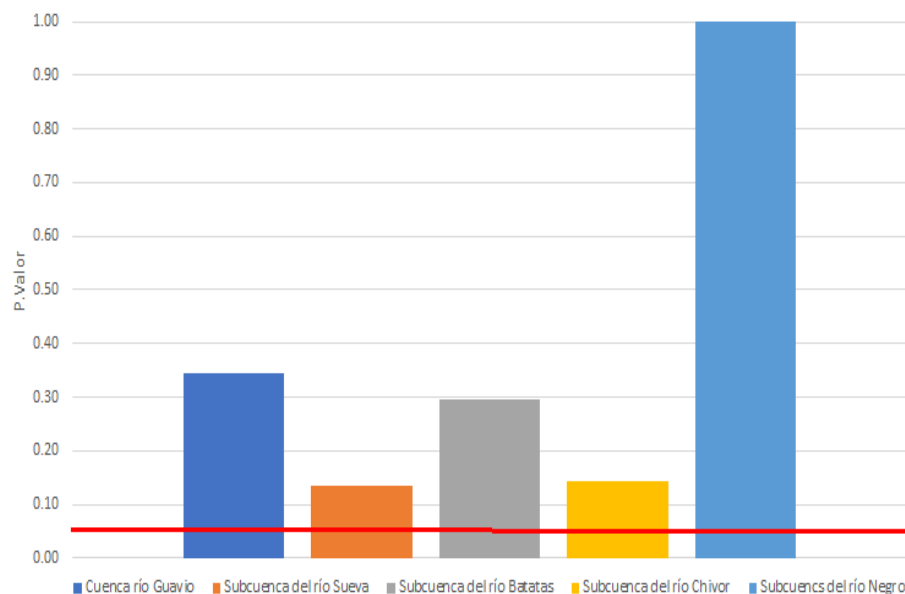
Tabla 3. Resultados de la prueba Pettit aplicada para la detección de puntos de inflexión de los valores anuales de precipitación en el periodo de 1977 a 2017.

<i>Test de Pettit</i>	<i>Cuenca Río Guavio</i>	<i>Subcuenca del río Sueva</i>	<i>Subcuenca del río Batatas</i>	<i>Subcuenca del río Chivor</i>	<i>Subcuenca del río negro</i>
Punto de cambio	2007	1988	2007	2006	2006
Precipitación (mm/ año)	2207.32	1182.89	3169.91	2355.70	2680.74

Fuente. Autora.

Sin embargo, a pesar de que el test indica que existen puntos de inflexión los valores obtenidos de la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula que se muestran en la Figura 21, muestran que en todos los casos el “*P. Valor*” se encuentra por encima de la significancia, por ello, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula, asumiendo que no existe un punto de cambio estadísticamente significativo en la serie de datos de precipitación anual relacionado con la presencia del embalse.

Figura 21. Probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula de los resultados de la prueba de Pettitt aplicada a los valores anuales de precipitación.



Fuente. Autora.

❖ **Temperatura.**

Para los valores anuales de temperatura en el periodo comprendido entre 1977 a 2017 a nivel de cuenca y subcuencas el test arrojó un punto de cambio en el año 2001 en el cual se presentó una temperatura de 13.28 °C. En cuanto a la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula en este caso se obtuvo un valor de $P.Valor = 0.024$, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa, asumiendo que si existe un punto de inflexión en la tendencia central de la serie de datos anuales de temperatura. Sin embargo, aunque hubo significancia en el cambio esta no estuvo cerca al año en que entro en funcionamiento el embalse.

5.4.2 Prueba de tendencias Mann-Kendall. Con el objetivo de determinar si la construcción del embalse del Guavio está relacionada con las variaciones en la precipitación y temperatura de la cuenca hidrográfica del río Guavio se llevó a cabo la prueba de Mann-Kendall para el periodo de análisis comprendido entre 1977 a 2017 a escala mensual y anual. Para esta prueba se adoptó una hipótesis nula (H_0) en la cual se asume que los datos se encuentran aleatoriamente ordenados y son independientes, es decir, que no existe una tendencia en la serie de datos analizados y la hipótesis alternativa (H_1) que asume que existe una tendencia creciente o decreciente en las observaciones. Este análisis es realizado con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ y los resultados obtenidos se muestran a continuación.

❖ **Precipitación.**

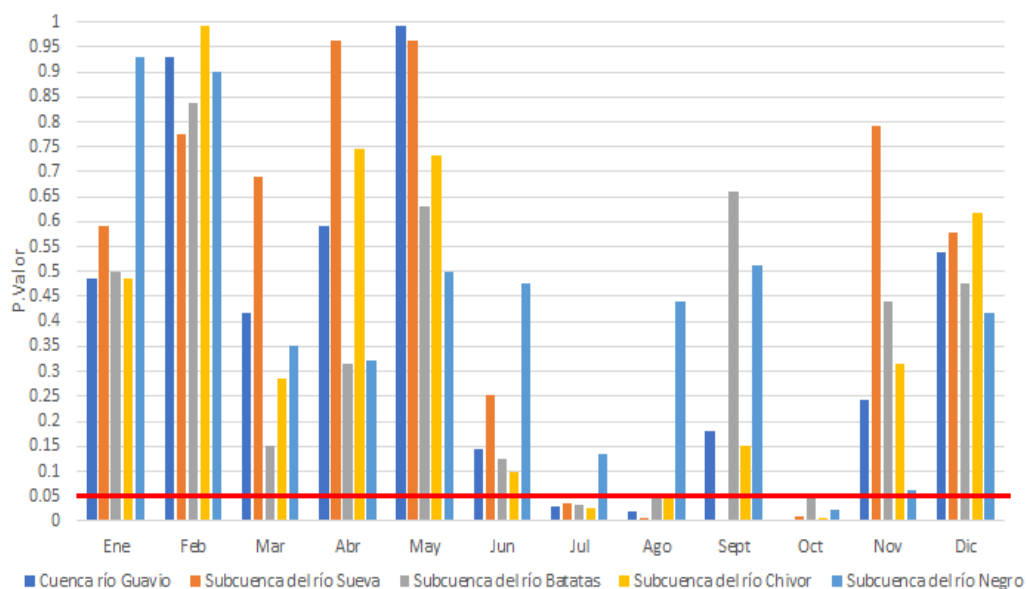
Los resultados de la prueba Mann Kendall para el estadístico " Z_s " y la magnitud de la pendiente de la tendencia " S " de las precipitaciones mensuales multianuales, se pueden observar en la tabla 9 del Anexo B. Para los meses de enero, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, se obtuvieron valores negativos para las subcuencas y la cuenca, indicando que existe una tendencia decreciente y que hubo una disminución en las precipitaciones mensuales multianuales de estos meses. En cuanto a los meses de marzo, abril y noviembre, se obtuvieron valores positivos a nivel de cuenca y subcuenca, lo cual indicaría que existe una tendencia creciente y que hubo un incremento en las precipitaciones mensuales multianuales a lo largo del periodo de estudio.

En cuanto al mes de febrero hubo tendencia decreciente en la precipitación de la subcuenca del río Sueva localizada aguas arriba del embalse, para el caso de la cuenca y subcuencas restantes las cuales se encuentran localizadas en zonas aledañas al embalse hay una tendencia de aumento de las precipitaciones. En el mes de mayo los resultados de la prueba para las subcuencas indican que hay una tendencia de incremento de la precipitación, sin embargo, a nivel de cuenca hay una tendencia a la disminución de la precipitación. Finalmente, en el mes de diciembre el comportamiento de la precipitación tuvo una tendencia al decrecimiento en la subcuenca del río Batatas, ubicada en inmediaciones al embalse; mientras que para la cuenca y subcuencas restantes la tendencia fue positiva indicando que

las precipitaciones de la serie multitemporal del mes de diciembre fueron en aumento.

A pesar de que los resultados del test indican que hubo tendencias crecientes y decrecientes a lo largo del periodo de análisis, los resultados obtenidos para la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula que se observan en la Figura 22, señalan que en solo doce casos el “*P.Valor*” es inferior a la significancia establecida. Esto sucedió en los meses de julio y agosto en la cuenca y subcuencas del río Sueva, Batatas y Chivor, y en el caso del mes de septiembre la subcuenca del río Sueva arrojó un valor de 0.001 y en el mes de octubre la probabilidad osciló entre 0.005 y 0.04 para la cuenca y subcuencas. Estos resultados indican que se debe aceptar la hipótesis alternativa, es decir, que existe una tendencia estadísticamente significativa creciente o decreciente según sea el caso en las precipitaciones mensuales multianuales de estos meses. Mientras que para el resto de los casos los valores se encuentran por encima del nivel de significancia, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se asume que para estos casos no existen tendencias estadísticamente significativas para estas precipitaciones mensuales multianuales.

Figura 22. Probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula de la prueba Mann Kendall para los valores de precipitación mensual multianual.

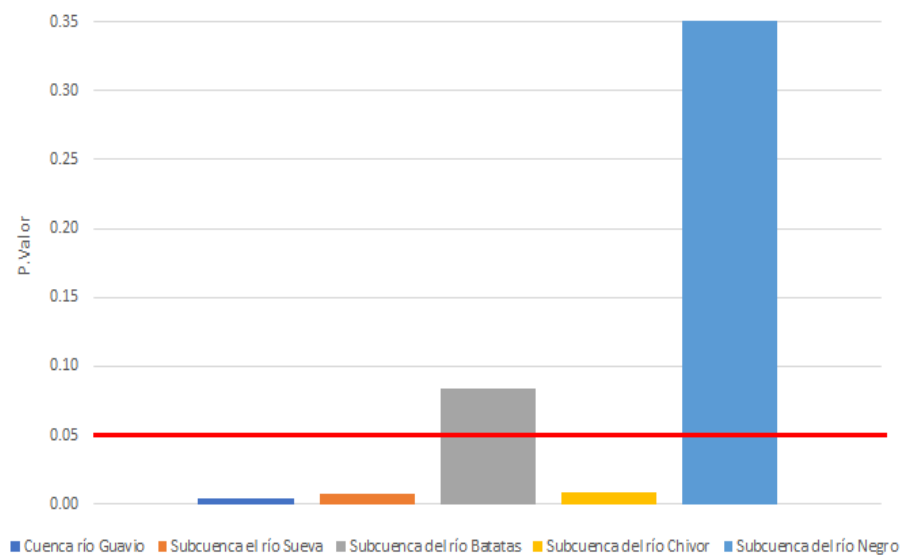


Fuente. Autora.

Para los valores anuales de precipitación la prueba Mann Kendall arrojó como resultado para “ Z_s ” y “ S ” valores negativos que indicarían que hubo una disminución en las precipitaciones multianuales, es decir, hay una tendencia decreciente a nivel de cuenca y subcuencas. Sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis

nula que se muestra en la Figura 23, indicaría que para las subcuencas del río Batatas y del río Negro que presentaron valores por encima del nivel de significancia, se acepta la hipótesis nula asumiendo que no existe una tendencia estadísticamente significativa de las precipitaciones multianuales para estas subcuencas. En cuanto a la cuenca y las subcuencas del río Sueva localizada aguas arriba del embalse y del río Chivor localizada aguas abajo, los valores fueron inferiores al nivel de significancia, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa asumiendo que la tendencia decreciente es estadísticamente significativa en estos casos.

Figura 23. Probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula de la prueba Mann Kendall para los valores de precipitación anual de 1977 a 2017.



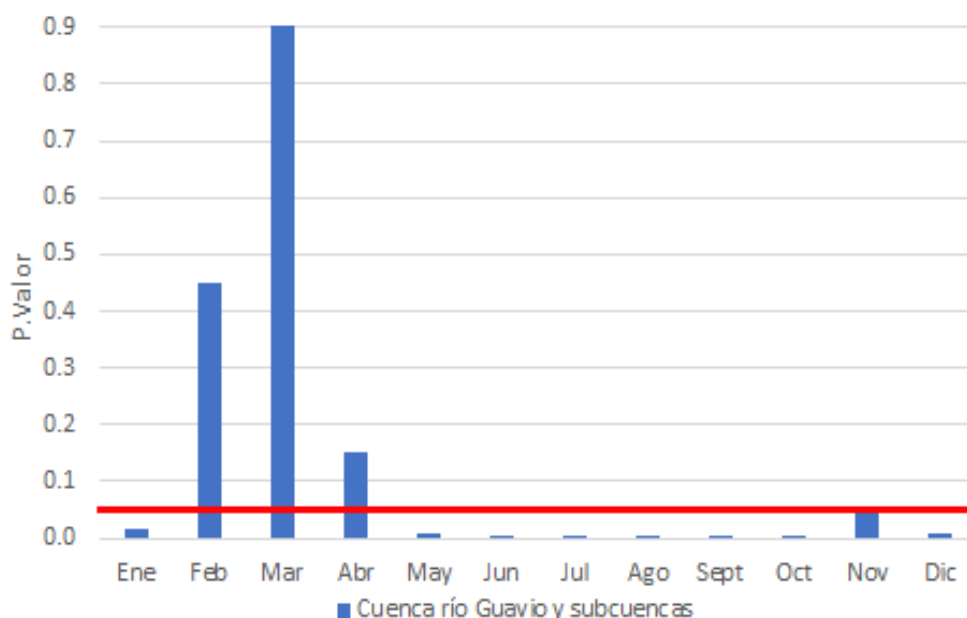
Fuente. Autora.

❖ **Temperatura.**

Según los resultados obtenidos del estadístico del test " Z_s " existe una tendencia creciente en la temperatura mensual, lo que indica que a lo largo del periodo de análisis hubo un incremento de las temperaturas a nivel de cuenca y subcuenca. Sin embargo, a pesar de los resultados del test indicaron que hubo una tendencia creciente de las temperaturas del área de estudio la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula " $P. Valor$ " (Figura 24), muestra que en los meses de febrero, marzo y abril el " $P. Valor$ " estuvo por encima del nivel de significancia (línea horizontal de color rojo), lo cual indica que, aunque para estos meses existe una tendencia creciente esta no es estadísticamente significativa. Para los meses restantes la probabilidad estuvo por debajo del nivel de significancia establecido, en este caso se asume que si existe una tendencia creciente estadísticamente significativa para las temperaturas mensuales multianuales. Los resultados detallados de la prueba

Mann-Kendall para las temperaturas mensuales del periodo de evaluación se muestran en el la tabla 10 del Anexo B.

Figura 24. Probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula de la prueba Mann Kendall para los valores de temperatura mensual multianual.



Fuente. Autora.

Para la temperatura anual a nivel de cuenca y subcuenca, la prueba Mann-Kendall arrojó los valores que se muestran en la tabla 4; según los resultados obtenidos se infiere del estadístico del test " Z_s " que existe una tendencia creciente de la temperatura a lo largo de los 41 años de evaluación. Por otra parte, el " $P.Valor$ " obtenido fue de 0.001 que es muy inferior al nivel de significancia ($\alpha=0.05$), lo cual indica que la hipótesis nula solo ocurre una de cada 1000 veces, en este caso debido a que la probabilidad de ocurrencia de la misma es muy baja se rechaza la hipótesis de que existe una tendencia en la serie de datos analizados y se acepta la hipótesis de que si existe una tendencia creciente estadísticamente significativa de los valores anuales de temperatura del periodo de estudio.

Tabla 4. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para la detección de tendencias de los valores anuales de temperatura en el periodo de 1977 a 2017.

<i>Prueba Mann Kendall</i>	<i>Cuenca y subcuencas</i>
<i>P.Valor</i>	0.001
<i>Z_s</i>	3.358
<i>S</i>	3.00

Fuente. Autora.

5.5 PRUEBA DE TENDENCIAS WILCOXON

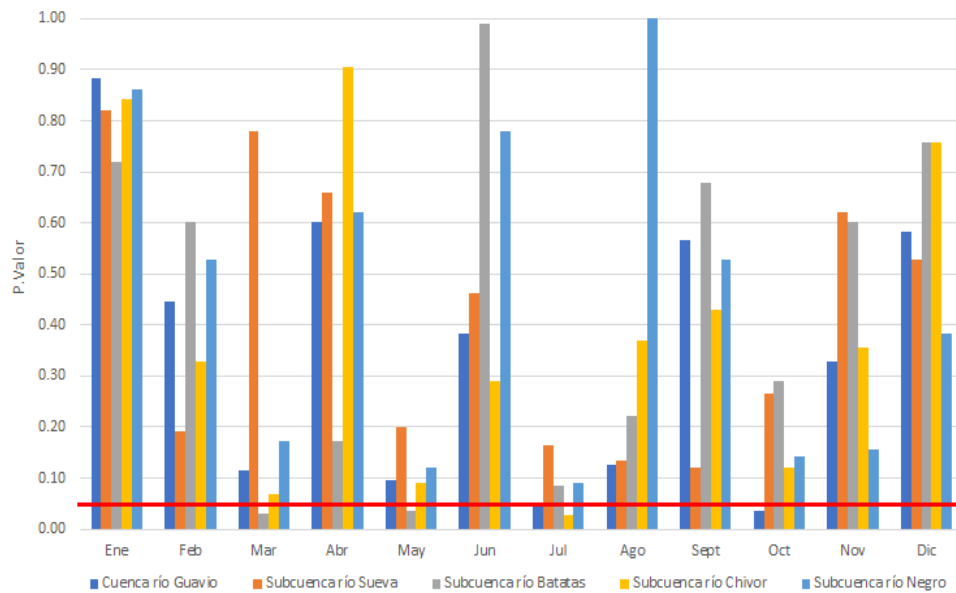
Para estudiar la relación existente entre la precipitación y temperatura antes y después de entrar en operación el embalse se realiza la prueba de suma de rangos de Wilcoxon a escala mensual y anual, comparando dos periodos 1977 a 1991 (periodo 1) y 1992 a de 2017 (periodo 2). Como hipótesis nula (H_0) se asume que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las precipitaciones y temperaturas antes y después de entrar en operación el embalse y como hipótesis alternativa (H_1) que si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las precipitaciones y temperaturas anuales en los periodos puestos a prueba. Esta prueba fue realizada con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ y los resultados obtenidos se muestran a continuación.

❖ Precipitación

Los resultados de la prueba de Wilcoxon aplicada para los valores de precipitación mensual multianual se muestran en la Figura 25, en la cual se encuentra demarcado con una línea horizontal roja el nivel de significancia.

Los resultados obtenidos con la prueba demostraron que el “*P. Valor*” se encuentra por debajo del nivel de significancia en los siguientes casos: a nivel de cuenca se presenta un valor inferior en el mes de octubre ($0.03 < \alpha$); para la subcuenca del río Batatas localizada en cercanías al embalse se presentan valores inferiores en los meses de marzo ($0.030 < \alpha$) y mayo ($0.034 < \alpha$); mientras que la subcuenca del río Chivor la cual también se encuentra localizada en inmediaciones al embalse presenta valores inferiores en los meses de julio ($0.02 < \alpha$) y octubre ($0.03 < \alpha$); dichos valores indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las precipitaciones antes y después del embalse. En cuanto resultados obtenidos para la cuenca y subcuencas en los meses restantes los cambios de las medianas entre el periodo 1 y 2 no son significativos estadísticamente (Figura 25).

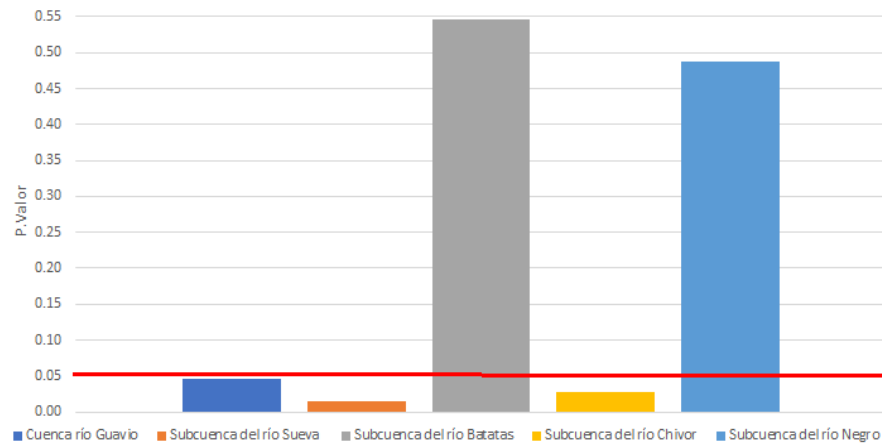
Figura 25. Resultados de la prueba de Wilcoxon para la precipitación mensual multianual antes y después de entrar en operación el embalse.



Fuente. Autora.

Los resultados de la prueba de Wilcoxon para los datos de precipitación anual entre los periodos 1 y 2 se muestran en la Figura 26. En cuanto a la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula “*P. Valor*” para la cuenca, subcuencas del río Sueva y Chivor, se obtuvieron valores inferiores al nivel de significancia establecido. Indicando que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de la precipitación anual de los periodos comparados. Para las subcuenca del río Batatas localizada en inmediaciones al embalse y la subcuenca del río Negro ubicada aguas abajo del mismo los valores se encuentran por encima de 0.05, indicando que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las precipitaciones de los periodos comparados.

Figura 26. Resultados de la prueba de Wilcoxon para la precipitación anual antes y después de entrar en operación el embalse.

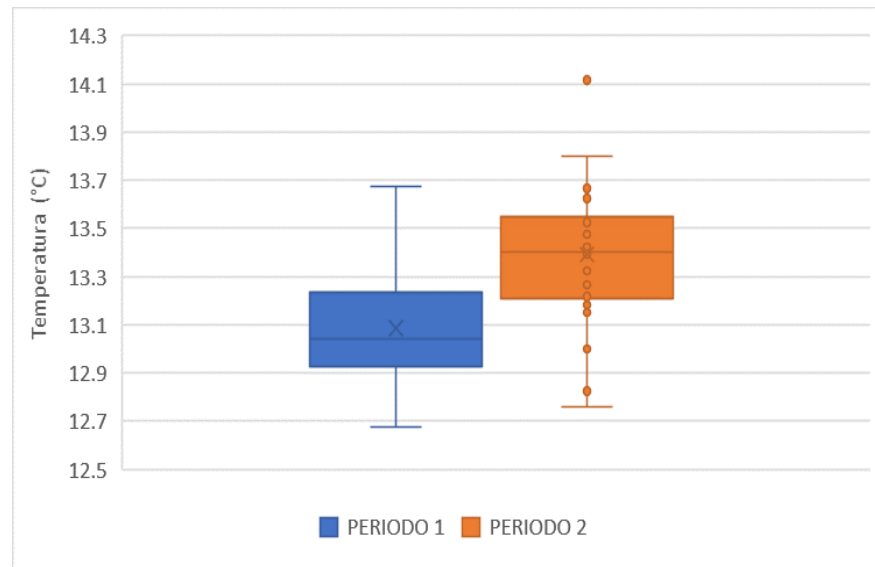


Fuente. Autora.

❖ Temperatura

Las temperaturas mensuales a nivel del cuenca y subcuencas para los dos periodos de análisis se observan en la Figura 27, en el diagrama de cajas se evidencia que las temperaturas presentan valores más bajos en el primer periodo de análisis, mientras que para el segundo periodo son más altas.

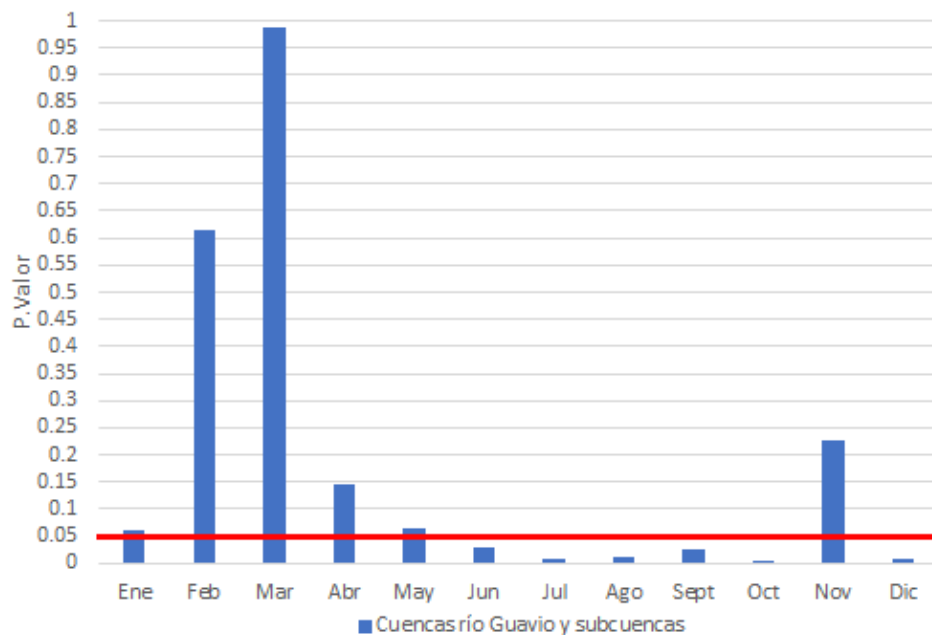
Figura 27. Diagrama de cajas de la temperatura antes y después de la construcción del embalse.



Fuente. Autora.

Los resultados obtenidos de la prueba de Wilcoxon para la temperatura mensual multianual se observan en la Figura 28, por un lado, la prueba arroja valores por debajo del nivel de significancia en los meses de junio, julio, agosto, septiembre, octubre y diciembre, los cuales oscilaron entre 0.001 y 0.029, este resultado indica que existe una muy baja probabilidad de que la hipótesis nula sea veraz, por lo tanto, se rechaza y se asume que para estos meses las diferencias entre las medianas de las temperaturas son estadísticamente significativas, además de indicar que la presencia del embalse en la cuenca ha generado cambios sobre las temperatura de estos meses. En cuanto a los meses restantes los resultados del “*P.Valor*” se encuentran por encima de 0.05, por ello, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula, es decir que las diferencias entre las medianas de las temperaturas no son estadísticamente significativas.

Figura 28. Resultados de la prueba de Wilcoxon para cambios en la temperatura mensual antes y después de entrar en operación el embalse.



Fuente. Autora.

El resultado de la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula para la temperatura anual fue de $P.Valor = 0.005$, valor que indica que la probabilidad de que la hipótesis nula ocurra es de cinco por cada 1000 veces. Teniendo en cuenta la baja probabilidad de ocurrencia y que presenta un valor inferior al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, asumiendo de esta manera que existen diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas anuales, las cuales pueden estar asociadas a la presencia del embalse en la cuenca.

5.6 TEST DE CORRELACIÓN

Para establecer si existe más de una actividad (además del embalse) que haya podido afectar o alterar a la precipitación y temperatura del área de estudio, se realizó una prueba de correlación de Pearson entre la transformación de coberturas y las variables climatológicas estudiadas. Para esta prueba estadística se asumió como hipótesis nula (H_0) que no hay una correlación entre las variables objeto de análisis y como hipótesis alternativa (H_1) que si existe una correlación entre las variables puestas a prueba.

❖ *Precipitación.*

Para el periodo de análisis comprendido entre enero de 1982 y diciembre de 2017, el coeficiente de correlación de Pearson " R_{xy} " entre el NDVI y la precipitación mensual arrojaron como resultados valores negativos que oscilan entre -0.07 y -0.2 para la cuenca y subcuencas respectivamente, lo cual indica que existe una correlación inversa débil entre la precipitación y el NDVI (Tabla 5).

Sin embargo, a pesar de que el estadístico del test indica que existe una correlación negativa entre las variables puestas a prueba para la cuenca y subcuencas, los valores de la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula "*P. Valor*" en la cuenca y subcuencas del río Batatas, Chivor y Negro, superan el nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), por lo tanto, se rechaza la hipótesis alternativa y se asume que no hay una relación estadísticamente significativa entre el NDVI y la precipitación mensual para la cuenca y estas subcuencas, estos resultados además indican que las transformaciones temporales que han tenido las coberturas vegetales en la cuenca y subcuencas nombradas con anterioridad no tienen una relación con los variaciones de las precipitaciones mensuales.

En cuanto a la subcuenca del río Sueva ubicada aguas arriba del embalse el "*P. Valor*" arroja un valor muy cercano a cero e inferior al nivel de significancia, por lo tanto, en este caso se acepta la hipótesis alternativa, asumiendo que existe una relación estadísticamente significativa entre estas variables puestas a prueba, es decir que los variaciones de las precipitaciones mensuales de la subcuenca del río Sueva se han visto influenciadas por las transformaciones de las coberturas vegetales que se han presentado a lo largo del periodo de estudio (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados de la prueba de correlación entre el NDVI y la precipitación mensual en el periodo de 1982 a 2017.

<i>Test de correlación</i>	<i>Cuenca Río Guavio</i>	<i>Subcuenca del río Sueva</i>	<i>Subcuenca del río Batatas</i>	<i>Subcuenca del río Chivor</i>	<i>Subcuenca del río negro</i>
<i>P. Valor</i>	0.0680	0.000023	0.0679	0.1389	0.1624
<i>R_{xy}</i>	-0.0878	-0.2023	-0.0879	-0.0713	-0.0673

Fuente. Autora.

Los resultados del test de correlación de Pearson " R_{xy} " para los valores anuales de NDVI y precipitación se presentan en

la tabla 6, el estadístico de la prueba arroja correlaciones positivas y negativas cercanas a cero en todos los casos, sin embargo, estas correlaciones presentan probabilidades de ocurrencia de la hipótesis nula " $P.Valor$ " superiores al nivel de significancia establecido, lo cual indica que las correlaciones no son estadísticamente significativas en ninguno de los casos, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se asume que no hay una correlación entre el NDVI y la precipitación, es decir que las transformaciones temporales que han tenido las coberturas vegetales en la cuenca y subcuencas objeto de estudio no tienen una relación estadísticamente significativa con las variaciones temporales de las precipitaciones anuales.

Tabla 6. Resultados del test de correlación entre el NDVI y la precipitación anual en el periodo de 1982 a 2017.

Test de correlación	Cuenca Río Guavio	Subcuenca del río Sueva	Subcuenca del río Batatas	Subcuenca del río Chivor	Subcuenca del río negro
$P.Valor$	0.30351	0.41995	0.63350	0.33046	0.23942
R_{xy}	-0.17636	0.13866	-0.08223	-0.16695	-0.20116

Fuente. Autora.

❖ **Temperatura.**

El coeficiente de correlación de Pearson " R_{xy} " obtenido para los datos de NDVI y temperatura mensual, arrojaron como resultados valores que oscilan entre -0.07 y -0.0008 a nivel de cuenca y subcuencas, por ello, se asume que existe una relación inversa débil entre la precipitación y el NDVI, donde a medida que una de las dos variables aumenta la otra tiende a disminuir (Tabla 7).

Sin embargo, los valores obtenidos de la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula " $P.Valor$ " en todos los casos son superiores al nivel de significancia, por lo tanto, se infiere que la correlación no es estadísticamente significativa y que no existe una correlación entre estas variables, aceptando así la hipótesis nula (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados del test de correlación entre el NDVI y la temperatura mensual en el periodo de 1982 a 2017.

Test de correlación	Cuenca Río Guavio	Subcuenca del río Sueva	Subcuenca del río Batatas	Subcuenca del río Chivor	Subcuenca del río negro
$P.Valor$	0.47697	0.40398	0.13915	0.90117	0.98574
R_{xy}	-0.03431	-0.04025	-0.07127	-0.00599	-0.00086

Fuente. Autora.

En cuanto a la correlación entre los valores anuales de NDVI y temperatura, se obtuvo que a nivel de cuenca y subcuenca los valores del estadístico son negativos

y oscilan entre -0.24 y -0.55, lo cual indica que existe una correlación inversa entre el NDVI y temperatura anual que en el caso de la cuenca y subcuencas río Batatas, Chivor y Negro es débil y en la subcuenca del río Sueva es moderada (Tabla 8).

Por otro lado, los resultados obtenidos del “*P. Valor*” para la cuenca y subcuencas del río Sueva y Batatas son inferiores al nivel de significancia, por lo tanto, en este caso se acepta la hipótesis alternativa y se infiere que existe una correlación estadísticamente significativa entre las variables puestas a prueba. En cuanto a las subcuencas del río Chivor y Negro el “*P. Valor*” arroja valores superiores a 0.05, por lo tanto, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula asumiendo que no existe una correlación estadísticamente significativa entre el NDVI y la temperatura anual en estas áreas (Tabla 8).

Tabla 8. Resultados del test de correlación entre el NDVI y la temperatura anual en el periodo de 1982 a 2017.

<i>Test de correlación</i>	<i>Cuenca Río Guavio</i>	<i>Subcuenca del río Sueva</i>	<i>Subcuenca del río Batatas</i>	<i>Subcuenca del río Chivor</i>	<i>Subcuenca del río negro</i>
<i>P. Valor</i>	0.03413	0.00046	0.02289	0.14285	0.08767
<i>R_{xy}</i>	-0.35406	-0.55394	-0.37833	-0.24914	-0.28872

Fuente. Autora.

6. IMPACTO SOCIAL

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado reflejan la influencia que ha tenido la construcción del embalse sobre la precipitación y temperatura de la cuenca del río Guavio, permitiendo establecer algunos impactos ambientales y sociales que en general no son previstos al momento de construir un embalse y los cuales han contribuido a la variabilidad climática de la zona.

Por lo tanto, se considera que los impactos socioambientales que pueden tener los resultados obtenidos en el presente estudio son el aporte de información para que en los proyectos hidroeléctricos futuros sean consideradas las afectaciones sobre las variables del ciclo hidrológico como la precipitación y temperatura y de este modo se realice una planificación más acertada que anticipe la incorporación de medidas de mitigación de los impactos que dichas fluctuaciones puedan tener sobre los servicios ecosistémicos, la disponibilidad de agua, las dinámicas de los cultivos, la seguridad alimentaria y la economía de las poblaciones que habitan en las zonas de influencia directa e indirecta de los embalses, debido a que su sustento económico depende en su gran mayoría de la agricultura y ganadería.

Finalmente, el informe final será entregado a la alcaldía del municipio de Gachalá y a la Corporación Autónoma Regional del Guavio (CORPOGUAVIO), con el objetivo de que estas entidades tengan conocimiento de los impactos no previstos que se han generado en el componente abiótico, en este caso en la climatología a causa del embalse a una escala anual y mensual y en unidades de cuenca y de subcuenca.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos permitieron verificar si el espejo de agua ocasionado por la presencia del embalse del Guavio está generando efectos sobre las precipitaciones y temperaturas a una escala anual y mensual y en unidades de cuenca y subcuenca. Por un lado, la prueba de Pettit determinó la existencia de puntos de inflexión en las precipitaciones a lo largo del periodo de análisis, sin embargo, estos puntos de inflexión no son estadísticamente significativos. Para el caso de la temperatura el test permitió determinar que para el año 2001 existe un punto de inflexión estadísticamente significativo a nivel de cuenca y subcuencas, el cual podría estar asociado a factores climáticos como el fenómeno de la niña teniendo en cuenta que este se presentó a lo largo del 2000 prolongándose hasta los meses de enero y febrero del 2001.

Por otro lado, verificando los resultados obtenidos para la prueba de tendencias Mann Kendall, la cual permitió determinar la existencia de tendencias en las precipitaciones y temperaturas del área de estudio a lo largo del periodo de análisis, se encontró que en solo ciertos meses del año existieron tendencias estadísticamente significativas en las cuales hubo una reducción de las precipitaciones de los meses de julio a octubre a nivel de cuenca y en las subcuencas objeto de análisis. A escala de cuenca las magnitudes de cambio oscilaron entre 226 mm/mes a 334 mm/mes; en la subcuenca del río Sueva hubo reducciones de entre 216 mm/mes a 336 mm/mes; para la subcuenca del río Batatas hubo una disminución de 206 mm/mes a 218 mm/mes; en la subcuenca del río Chivor la magnitud del cambio fue de 202 mm/mes a 284 mm/mes y por último para la subcuenca del río negro solo en el mes de octubre hubo una reducción de 234 mm/mes que fue estadísticamente significativa.

En cuanto a los valores anuales de precipitación la prueba indica que existe una tendencia decreciente estadísticamente significativa en las precipitaciones a nivel de cuenca con una magnitud de cambio de 290 mm/año; en la subcuenca del río Sueva, la cual, se encuentra localizada aguas arriba del embalse la magnitud de cambio fue de 274 mm/año y en la subcuenca del río Chivor que está ubicada en la parte baja del embalse en inmediaciones a la presa hubo una reducción de 270 mm/año. En el caso de las temperaturas para los meses de enero y de mayo a diciembre se presenta un incremento estadísticamente significativo con magnitudes que oscilaron entre 3.2 °C/mes y 1.7 °C/mes, ocurriendo lo mismo con los valores de temperatura a escala anual a nivel de cuenca y subcuencas con un cambio de aproximadamente 3 °C/año.

Este incremento en las temperaturas se relaciona con los resultados obtenidos en la investigación realizada en el embalse El Peñol-Guatapé en la cual se evidencio

que la temperatura muestra incremento de hasta 1.3 °C a lo largo del periodo de análisis, el cual, ha contribuido al aporte de humedad generada por el embalse y a la intensificación de las precipitaciones de la estación húmeda en las zonas aledañas al mismo [57].

Por otra parte, a pesar de no ser significativas la mayoría de la tendencias mensuales arrojadas por la prueba Mann Kendall, los resultados de Wilcoxon apoyan el supuesto de que el espejo de agua del embalse generó una variación en las variables objeto de análisis, en el caso de las precipitaciones mensuales el test indica que existen diferencias significativas entre las precipitaciones de los periodos de análisis comparados en la cuenca y subcuencas del río Batatas y Chivor, las cuales se encuentran junto al embalse; para los valores anuales vuelve a indicar una variación significativa en la subcuenca del río Sueva y Chivor. Para las temperaturas multianuales y mensuales en los meses de junio a octubre y diciembre el test indica que hubo diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los periodos comparados dando fuerza a la hipótesis del cambio generado sobre esta variable debido a la presencia del embalse. Estos resultados coinciden con estudios previos realizados en Colombia en los cuales se llegó a la conclusión de que al momento de la construcción y luego de entrar en operación los embalses Miel I y Porce II, estos tuvieron cierta influencia en la variación del mesoclima que predominaron en las zonas aledañas a los mismos ocasionando un incremento en las temperaturas y las precipitaciones [58].

Además, contrastando los resultados de la prueba de Wilcoxon y Mann Kendall se puede determinar que en ambos casos se denotaron variaciones y tendencias significativas en las precipitaciones de tres subcuencas en particular (subcuenca del río Sueva, Batatas y Chivor), lo cual indicaría que existe una disminución en las precipitaciones relevante en estas áreas que podrían relacionarse con el embalse; lo mismo sucede con el incremento de las temperaturas las cuales presentan para ambos test resultados significativos de las fluctuaciones a escala mensual y anual y a nivel de cuenca y subcuenca.

Por otra parte, se ha comprobado que los cambios en el uso del suelo y en las coberturas vegetales pueden incidir sobre la variabilidad climática, llegando a modificar los comportamientos de los fenómenos meteorológicos a escala local y las variables climatológicas como la temperatura y la precipitación [59]. Además, la Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal (IUFRO) reveló que los procesos de evaporación y transpiración de las plantas contribuyen hasta en un 63% de las precipitaciones y demuestra que la reducción de las coberturas vegetales ocasiona una disminución en la liberación de vapor de agua generando un clima más seco y evidenciando de esta manera una estrecha relación entre la vegetación y el clima [60].

En vista de la relación existente entre los cambios de las coberturas vegetales estimados mediante el NDVI y su influencia sobre los factores climáticos, el test de correlación aplicado permitió corroborar si existía una relación entre las fluctuaciones de las precipitaciones y temperaturas del área de estudio para de esta manera descartar que las dinámicas del uso del suelo sean las que estén ocasionando una variación en la precipitaciones y temperaturas de la zona. Los resultados obtenidos de la prueba de correlación de Pearson aplicada entre las variables climáticas objeto de análisis y el NDVI permitió comprobar que en algunos casos las fluctuaciones de las variables estudiadas se encuentran asociadas en mayor medida a la presencia del embalse y no ha factores como el cambio en las coberturas vegetales de la zona.

En los registros históricos del NDVI analizados en el capítulo anterior se pudo observar que hubo una disminución en la cobertura vegetal de la zona a que fue más pronunciada en el periodo posterior a la construcción del embalse en las subcuencas estudiadas, mientras que a nivel de cuenca tuvo una tendencia decreciente en ambos periodos. Los resultados de la prueba de correlación indican que entre la precipitación y el NDVI existen una serie de correlaciones inversas débiles a escala mensual y anual de las cuales solo es estadísticamente significativa la relación entre los valores mensuales de NDVI y la precipitación de la subcuenca del río Sueva. En el caso de las temperaturas mensuales los resultados indican que existe una correlación inversa de débil a moderada, que no es estadísticamente significativa en ninguno de los casos; sin embargo, para la temperatura anual existe una correlación inversa que, aunque es débil es estadísticamente significativa para la cuenca y subcuencas del río Sueva y Batatas.

Estos resultados indican que las variaciones sobre las coberturas vegetales no tienen una relación considerable sobre las fluctuaciones de las temperaturas mensuales y las precipitaciones tanto anuales como mensuales que se han presentado a lo largo del periodo de análisis; no obstante, en el caso de las temperaturas anuales existe una correlación inversa considerable donde a medida de que una de las variables disminuye la otra tiende a aumentar; por ello, se considera que en este caso es posible que las fluctuaciones sobre las temperaturas de la cuenca y subcuenca del río Sueva se deban a las variaciones sobre la cobertura vegetal.

De acuerdo con los resultados obtenidos las variaciones sobre las precipitaciones y la temperatura se pueden relacionar al comportamiento de las variables del ciclo hidrológico en el entorno de las represas como lo explica González (1994), se ha observado que la lámina de agua producida por los embalses ocasiona que en las mañanas se presente un incremento en la evaporación como consecuencia del calor absorbido por el espejo de agua, lo que implica que a nivel local exista un descenso en la temperatura; sin embargo, en la noche debido a que predominan los procesos

de condensación producto de la saturación del aire, se libera el calor absorbido por el agua provocando que se tienda a incrementar la temperatura, este proceso en conjunto ocasiona que la oscilación térmica se reduzca [61]. Además, dentro de otros cambios asociados a los embalses se encuentra el incremento de la nubosidad, la cual, actúa como una barrera que impide que penetre a la radiación solar y contribuye al calentamiento atmosférico debido a que esta impide que la irradiación de onda larga se escape ocasionando un efecto invernadero que produciría un incremento de las temperaturas promedio anuales [61].

Además, otra de las posibles causas que atribuiría a la construcción de embalses las variaciones sobre el clima local es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que estos producen, según estudios realizados las grandes represas del mundo pueden llegar a emitir anualmente hasta 104 millones de toneladas métricas de metano, lo cual las cataloga como las responsables de casi una cuarta parte del total de emisiones antropogénicas de metano donde la principal fuente de emisión es la descomposición de la materia orgánica inundada [62].

Finalmente, es importante tener en cuenta que el embalse solo abarca el 0.57 % del área total de la cuenca, por lo tanto, se podría afirmar que este no ha tenido una influencia significativa sobre las variaciones de las precipitaciones y temperaturas de la misma. Además, la magnitud de las fluctuaciones de las precipitaciones y temperaturas de la zona han estado influenciadas por fenómenos climatológicos como el del niño y de la niña, los cuales se han presentado en la mayoría de los años que conforman el periodo de análisis; no obstante, es importante tener en cuenta que el embalse también ha influido sobre los fenómenos del ciclo hidrológico no solo por el espejo de agua generado si no por los cambios de cobertura vegetal producidos por la construcción del mismo, sin embargo, no es posible afirmar en qué medida este ha contribuido al cambio de las precipitaciones y temperaturas, los cuales, han sido más significativos a una escala local, generando los mayores efectos sobre las subcuencas aledañas al embalse.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Las precipitaciones anuales luego de entrar en operación el embalse tuvieron un incremento del 3% a nivel de cuenca, un 4% para la subcuenca del río Chivor y un 12% en la subcuenca del río Negro, las cuales se encuentran localizadas aguas abajo del embalse. Además, hubo un decrecimiento del 4% en las precipitaciones de las subcuencas del río Sueva, ubicada aguas arriba del embalse y Batatas localizada en la parte baja del mismo.
- Las correlaciones entre las precipitaciones, temperaturas y el NDVI fueron inversas y débiles en la mayoría de los casos y solo tuvieron significancia en las precipitaciones y NDVI a nivel mensual en la subcuenca del río Sueva y en la correlación de las temperaturas y NDVI a escala anual tanto para la cuenca como para la subcuenca del río Sueva y Batatas.
- Las tendencias crecientes y decrecientes que presento la prueba de Mann Kendall en ciertos meses del año se vieron influenciadas por la presencia del embalse ya que como se observó en la prueba de Wilcoxon las diferencias entre los dos periodos análisis fueron significativas apoyando la hipótesis de que el embalse ha generado cambios en las variables del ciclo hidrológico, repercutiendo en los fenómenos de precipitación y temperatura a escala mensual y anual, los cuales se reflejaron en mayor medida a nivel de subcuenca. En el caso de la subcuenca del río Sueva la cual tiene mayor extensión y se encuentra más alejada del embalse se concluye que las fluctuaciones de las variables del ciclo hidrológico estudiadas pueden estar más asociadas a la transformación de coberturas vegetales y fenómenos climáticos, considerando que es la subcuenca más alejada del embalse y que es la única que presenta una correlación significativa entre las precipitaciones-NDVI, y las temperaturas y el NDVI.

Con respecto a la subcuenca del río Batatas se puede concluir que al presentar una correlación significativa entre NDVI y la temperatura anual los cambios relevantes a lo largo del periodo de estudio sobre esta variable pueden estar relacionados con la disminución en la cobertura vegetal producida por la construcción del embalse, mientras que en el caso de la precipitaciones mensuales y anuales las variaciones no se relacionan con los cambios sobre las coberturas vegetales, así que las fluctuaciones en las precipitaciones de esta subcuenca podrían estar relacionadas con el espejo de agua generado por el embalse. Finalmente, para la subcuenca del río Chivor localizada justo después de la presa la correlación no fue significativa

en ninguno de los casos, por ende, se concluye que posiblemente las variaciones en la precipitación y temperatura a escala mensual y anual se asocian en mayor medida a la presencia del embalse y a fenómenos climatológicos como el ENSO.

- El espejo de agua generado por el embalse está ocasionando efectos sobre las precipitaciones y temperaturas a una escala anual y mensual y en unidades de cuenca y subcuenca, provocando las mayores alteraciones tanto al iniciar su construcción como al entrar en funcionamiento en las subcuencas del río Batatas y Chivor las cuales se encuentran en inmediaciones al embalse; sin embargo, no es posible aseverar en que proporción el espejo de agua generado ha contribuido en las fluctuaciones de estas variables del ciclo hidrológico, debido a que estas se pueden ver influenciadas por diversos factores como los fenómenos climatológicos y los cambios en el uso del suelo, posibles causas que se tuvieron en cuenta a lo largo del estudio.
- Las tendencias y fluctuaciones sobre las variables objeto de análisis que hemos podido apreciar a lo largo del desarrollo del proyecto tanto en las series de precipitaciones, como en las de temperaturas son posibles resultados de cambios ocasionados por el hombre asociados a la construcción del embalse, urbanización, extracción de agua, cambios de uso de suelo, variabilidad del clima y los constantes episodios de los fenómenos del niño y de la niña que se presentaron a lo largo del periodo de estudio.
- La determinación de la dinámica de variables climatológicas como la precipitación y temperatura en inmediaciones al embalse del Guavio puede ser una herramienta que contribuya a generar bases sobre los posibles escenarios de variabilidad climática a nivel local que permitan considerar, anticipar e incorporar a los estudios de impacto ambiental y planes de manejo ambiental, los efectos que la variabilidad climática puede tener sobre la disminución o incremento del volumen de agua almacenada y sus implicaciones en la producción de energía hidroeléctrica.

9. RECOMENDACIONES

De la experiencia obtenida en la elaboración del presente trabajo de grado y de estudios previos relacionados con la caracterización climatológica de la cuenca del río Guavio se observó que la información disponible en la base de datos hidrometereológicos del IDEAM es escasa, debido a las pocas estaciones localizadas dentro de la zona que reportan información de variables como: caudal y temperatura, además que los reportes disponibles tienen una gran cantidad de datos faltantes para el periodo de análisis, por lo tanto, se recomienda para futuros estudios obtener la información de temperatura de alguna otra base de datos que generen reportes de más alta resolución.

Por otro lado, debido a que en este estudio no fue posible evaluar las variaciones de los caudales aguas arriba y abajo del embalse, por falta de información, se recomienda que se incluya el análisis de esta variable, considerando la opción de realizar una modelación mediante softwares como HEC-RAS que permitan obtener una estimación y cuantificar la variación de los caudales antes y después de entrar en operación el embalse.

Además, se recomienda incluir en el estudio la evaluación de los posibles efectos del embalse sobre otras variables climatológicas como la evaporación e incorporar los embalses aledaños a la zona de estudio, para de este modo evaluar si existe un efecto en conjunto o acumulativo sobre las variables climatológicas por la cantidad de reservorios presentes a nivel regional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Castaño, J. Díaz, F. Navarrete, "Impactos ambientales y sociales de la construcción de embalses en Colombia: aproximación al estado del arte," 2016. [Online]. Available: https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5165/Impactos_ambientales_construcci%C3%B3n_embalses.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed: 24 Agosto 2020].
- [2] International Hydropower Association (iha), "Colombia," 2018. [Online]. Available: <https://www.hydropower.org/country-profiles/colombia>. [Accessed: 25 Agosto 2020].
- [3] Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC), "La tecnología hidroeléctrica," 2016. [Online]. Available: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/hidroelectricidad.pdf>. [Accessed: 25 diciembre 2020].
- [4] Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua, "Hidroelectricidad, embalses y cambio climático," Diciembre 2009. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/10785/Palau.pdf>. [Último acceso: 27 Agosto 2020].
- [5] BBC - News mundo, "Represas, un riesgo climático," 2012. [En línea]. Available: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/12/121214_ciencia_agua_reservorios_efectos_clima_lluvia_jmp. [Último acceso: 29 agosto 2020].
- [6] International Food Policy Research Institute, "Cambio climático: el impacto en la agricultura y los costos de adaptación," Octubre 2009. [Online]. Available: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/costo%20adaptacion.pdf. [Accessed: 26 Agosto 2020].
- [7] Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, "Atlas potencial hidroenergético de Colombia," 2015. [Online]. Available:

http://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p25-36.pdf. [Accessed: 2 Septiembre 2020].

[8] Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC). “La tecnología hidroeléctrica,” 2016. [Online]. Available: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/hidroelectricidad.pdf> [Accessed: 2 Septiembre 2020].

[9] A. Degu, F. Hossain, D. Niyogi, R. Pielke, M. Shepherd, N. Voisin y T. Choris, “The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns,” 2011. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010GL046482> [Accessed: 2 Septiembre 2020].

[10] A. Degu y F. Hossain, “Investigating the mesoscale impact of artificial reservoirs on frequency of rain during growing season,” 2012. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011WR010966> [Accessed: 4 Septiembre 2020].

[11] Q. Zhao, S. Liu, J. Yang y C. Wang, “The effects of dam construction and precipitation variability on hydrologic alteration in the Lancang River Basin of southwest China,” 2012. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/257431814_The_effects_of_dam_construction_and_precipitation_variability_on_hydrologic_alteration_in_the_Lancang_River_Basin_of_southwest_China. [Accessed: 4 Septiembre 2020].

[12] R. Pizarro, C. Sanguesa y D. Aravena, D, “Influencia de los embalses y lagos en las intensidades máximas de precipitación,” 2006. [Online]. Available: <https://iahs.info/uploads/dms/13672.52-270-274-28-308-ROBERTO-PIZARRO.pdf>. [Accessed: 6 Septiembre 2020].

[13] C. Bernal y D. Sandoval, “Evaluación de la precipitación como indicador de la alteración del mesoclima en zonas de influencia del embalse Miel I y Porce II,” 2017. [Online]. Available:

https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1114&context=ing_civil.
[Accessed: 6 Septiembre 2020].

[14] A. Angarita, C. Wickel, J. Sieber, F. Chavarro, H. Maldonado, O. Delgado y G. Herrera, "Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression 20 wetlands, Colombia," 2018. [Online]. Available: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/22/2839/2018/hess-22-2839-2018.html>. [Accessed: 6 Septiembre 2020].

[15] K. Boodoo, J. Veléz, M. McClain y O. Ocampo, "Impacts of implementation of Colombian environmental flow methodologies on the flow regime and hydropower production of the Chinchiná River, Colombia," 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/264287319_Impacts_of_implementation_of_Colombian_environmental_flow_methodologies_on_the_flow_regime_and_hydropower_production_of_the_Chinchina_River_Colombia. [Accessed: 7 Septiembre 2020].

[16] M. Avellaneda y R. Álvarez, "Identificación de impactos en el sector agrícola y en la energía disponible de central hidroeléctrica AES Chivor, asociados a la variación en el mesoclima producto de la formación antrópica de la lámina de agua del embalse la Esmeralda," 2015. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1039&context=ing_civil [Accessed: 28 Diciembre 2020].

[17] L. Limberger y S. Contri, "Mudanças climáticas globais e alterações climáticas: a participação dos grandes reservatórios de usinas hidrelétricas," 2008. [Online]. Available: https://scholar.google.com.br/citations?user=e83FNWMAAAAJ&hl=pt-BR#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dpt-BR%26user%3De83FNWMAAAAJ%26citation_for_view%3De83FNWMAAAAJ%3AqjMakFHDy7sC%26tzm%3D300. [Accessed: 8 Septiembre 2020].

[18] H. Wai , F. Shibo, P. Zhifang, Y. Wunian, W. Lei, W. Mingyan, Z. Qifei, N. Dao, "The Relationship between NDVI and Climate Factors at Different Monthly Time Scales: A Case Study of Grasslands in Inner Mongolia, China (1982–2015)," 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su11247243> [Accessed: 8 Septiembre 2020].

[19] W. G. Charria, "El sistema complejo de la cuenca hidrográfica," 2011. [Online]. Available: [http://www.medellin.unal.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documento Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/Sistema%20CuencaHidrogr%E1fica.pdf](http://www.medellin.unal.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documento%20Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/Sistema%20CuencaHidrogr%E1fica.pdf). [Accessed: 27 junio de 2020]

[20] V. M. Patiño Rodríguez, "Decreto 2811 de 1974; Código Nacional de Recursos Naturales Renovables," 1974. [Online]. Available: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_2811_1974.html. [Accessed: 27 de junio 2020].

[21] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), "Cuenca hidrográfica", 2016. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1937-cuencas-hidrograficas>. [Accessed: 27 junio de 2020].

[22] Universidad de Almería, "Hidrología" 2002. [Online]. Available: <https://w3.ual.es/Depar/IngenRural/documentos/hidrologia2002d.pdf>. [Accessed: 29 junio 2020].

[23] Universidad Nacional de Cuyo, "Hidrología I - Unidad 5: Precipitaciones" 2006. [Online]. Available: <http://www.conosur-rirh.net/ADVF/documentos/hidro1.pdf>. [Accessed: 29 junio 2020].

[24] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). "Coberturas de la tierra". 2012. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>. [Accessed: 29 junio 2020].

[25] Corporación promotora para el desarrollo integral de Cisneros. "Formulación clasificación y uso generales del suelo". 2004. [Online]. Available: http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/capitulo2_formulaci%C3%B3n.pdf. [Accessed: 29 junio 2020].

[26] A. G. S. Ltda, "POMCA GUAVIO – CARACTERIZACIÓN BASICA DEL GUAVIO" 2019. [Online]. Available:

ftp://rioguavio%7Canonymous@200.21.21.36/2_Diagnostico_Guavio/Informe%20final%20Diagnostico/02%20Caracterizaci%F3n%20b%E1sica%20Guavio.pdf.
[Accessed: 3 julio 2020].

[27] Coropoguavio; Ecoforest Ltda, “Diagnostico y plan de ordenamiento y manejo de la cuenca aportante del río Guavio, fases diagnóstico, prospectiva y formulación” 2013. [Online]. Available: <https://isfcolombia.uniandes.edu.co/images/documentos/plancuencaguavio.pdf>.
[Accessed: 3 julio 2020].

[28] A. G. S. Ltda, “POMCA GUAVIDO - CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO BIÓTICO: CLIMA,” 2019. [Online]. Available: ftp://rioguavio%7Canonymous@200.21.21.36/2_Diagnostico_Guavio/Informe_final_Diagnostico/03.1_Clima_Guavio.pdf. [Accessed: 24 septiembre 2020].

[29] A. G. S. Ltda, “POMCA GUAVIDO – RESUMEN EJECUTIVO” 2019. [Online]. Available: ftp://rioguavio%7Canonymous@200.21.21.36/2_Diagnostico_Guavio/Resumen%20ejecutivo/Resumen%20ejecutivo%20Guavio.pdf. [Accessed: 24 septiembre 2020].

[30] A. G. S. Ltda, “POMCA GUAVIDO – ASPECTOS ECONÓMICOS GUAVIDO” 2019. [Online]. Available: ftp://rioguavio%7Canonymous@200.21.21.36/2_Diagnostico_Guavio/Informe%20final%20Diagnostico/04.2%20Aspectos%20econ%F3micos%20Guavio.pdf. [Accessed: 24 septiembre 2020].

[31] Unidad de Planeación Minero Energética (upme).. “Atlas de potencial hidroeléctrico de Colombia,” 7 octubre, 2015. [Online]. Available: http://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p25-36.pdf [Accessed: 24 septiembre 2020].

[32] Empresa Nacional de Electricidad Sociedad Anónima (endesa). “Central hidroeléctrica”. 2019. [Online]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-hidroelectrica.html>. [Accessed: 28 septiembre 2020].

[33] Ministerio de vivienda, ordenamiento territorial y medio ambiente (MVOTMA). "Manual de diseño y construcción de presas". 2011. [Online] Available: http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Manual%20Pequeñas%20Presas%20V1-v1_01.pdf [Accessed: 28 septiembre 2020].

[34] Autoridad Nacional de Licencias AMBIENTALES (ANLA), "Resolución 00091 de 2017," 23 enero 2017. [Online]. Available: http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/res_0091_23012017_ct_6795.pdf. [Accessed: 1 octubre 2020].

[35] C. Hernández, "Análisis ambiental de las grandes centrales hidroeléctricas de Colombia aplicando la metodología de multiobjetivo," 2011. [Online]. Available: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14037/T41.11%20H430a.pdf>. [Accessed: 1 octubre 2020].

[36] F. Serinaldi, C. Kilsby y F. Lombardo, "Untenable nonstationarity: An assessment of the fitness for purpose of trend tests in hydrology," Junio 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170817305845#sec0014>. [Accessed: 1 octubre 2020].

[37] C. Yuzhuang, G. Yiqing, S. Guangwen y Z. Danrong, "Investigating Trends in Streamflow and Precipitation in Huangfuchuan Basin with Wavelet Analysis and the Mann-Kendall Test," 2 Marzo 2016. [Online]. Available: <https://res.mdpi.com/water/water-08.../water-08-00077.pdf?>. [Accessed: 1 octubre 2020].

[38] F. Bautista, D. Bautista, O. Álvarez y D. Rosa, "Sistema de análisis de datos para el monitoreo regional y local del cambio climático con índices hidroclimáticos" 2011. [Online]. Available: https://www.actswithscience.com/Descargas/manual_moclic.pdf. [Accessed: 1 octubre 2020].

[39] D. Cantor, "evaluación y análisis espacio temporal de tendencias de largo plazo en la hidroclimatología colombiana," 2011. [Online]. Available: http://bdigital.unal.edu.co/9375/1/Informe_TDG_DC_v15%5B1%5D.pdf. [Accessed: 1 octubre 2020].

[40] X. Huantian, L. Dingfang y X. Lihua, "Exploring the ability of the Pettitt method for detecting change point by Monte Carlo simulation," 12 Octubre 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/271738217_Exploring_the_ability_of_the_Pettitt_method_for_detecting_change_point_by_Monte_Carlo_simulation. [Accessed: 1 octubre 2020].

[41] S. Abeer, I. Mona, M. Wael y F. Manabu, "Statistical Assessment of Rainfall Characteristics in Upper Blue Nile Basin over the Period from 1953 to 2014," 5 Marzo 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/3/468>. [Accessed: 4 octubre 2020].

[42] A. Martinez, J. Serna, "Validación de las estimaciones de precipitación con CHIRPS e IRE/IDEAM," Noviembre 2018. [Online]. Available: http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/DOCUMENTOS/2018/NT_IDEAM-002-2018.pdf [Accessed: 28 diciembre 2020].

[43] J. Amat, "Test de Wilcoxon-Mann-Whitney como alternativa al t-test," Julio 2017. [Online]. Available https://www.cienciadedatos.net/documentos/17_mann%E2%80%93whitney_u_test. [Accessed: 4 octubre 2020].

[44] R.F. Woolson, "Wilcoxon Signed-Rank Test," 19 septiembre 2008. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780471462422.eoct979>. [Accessed: 4 octubre 2020].

[45] R.F. Woolson, "Wilcoxon Signed-Rank Test," 19 septiembre 2008. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780471462422.eoct979>. [Accessed: 4 octubre 2020].

[46] D. Nguyen, P. Zhifang, F. Shibo, Y. Wunian, W. Lei, W. Mingyan, Wei Han and Z. Qifei, "The Relationship between NDVI and Climate Factors at Different Monthly Time Scales: A Case Study of Grasslands in Inner Mongolia, China (1982–2015)," diciembre 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/338072030_The_Relationship_between_

NDVI_and_Climate_Factors_at_Different_Monthly_Time_Scales_A_Case_Study_of_Grasslands_in_Inner_Mongolia_China_1982-2015. [Accessed: 6 octubre 2020].

[47] Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud, C. Laguna, “CORRELACIÓN Y REGRESIÓN LINEAL,” 2014. [Online]. Available: <http://www.ics-aragon.com/cursos/salud-publica/2014/pdf/M2T04.pdf>. [Accessed: 4 octubre 2020].

[48] Sistema de Información Ambiental en Colombia (Siac). “Fenómenos del Niño y la Niña”. 2010. [Online]. Available: <http://www.siac.gov.co/ninoynina>. [Accessed: 6 octubre 2020].

[49] Ministerio de Ambiente, E. Montealegre, “Análisis de la variabilidad climática inter-anual (El Niño y La Niña) en la Región Capital, Bogotá Cundinamarca (PRICC),” 2012. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosMarinosCosterosyRecursosAcuatico/CUNDINAMARCA.pdf>. [Accessed: 6 octubre 2020].

[50] E. Montealegre, “ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ASOCIADA A PROCESOS OCEANICOS Y ATMOSFÉRICOS DE MESO Y GRAN ESCALA,” 10 de diciembre de 2009. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio+de+la+variabilidad+clim%C3%A1tica+de+la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3>. [Accessed: 6 octubre 2020].

[51] D. A. -. QGis, «Análisis Espacial (Interpolación),» 2013. [Online]. Available: https://docs.qgis.org/2.14/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html. [Accessed: 6 octubre 2020].

[52] M. Navarrete, M. López, “IMPORTANCIA DE LOS ESPACIOS COMUNES: UNA ADAPTACIÓN DE LA TÉCNICA DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL INVERSE DISTANCE WEIGHTED (IDW) EN LA PREDICCIÓN DE DATOS SOCIOECONÓMICOS AUSENTES,” [Online]. Available: <http://ru.iiec.unam.mx/4646/1/4-114-Navarrete-Lopez.pdf>. [Accessed: 6 octubre 2020].

[53] M. Tovar, "El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque,". 2009. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/i2560s/i2560s07.pdf>. [Accessed: 7 octubre 2020].

[54] NASA. "Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)," 30 de agosto del 2000. [Online]. Available: https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php. [Accessed: 7 octubre 2020].

[55] National Center for Atmospheric (NCAR). "NDVI: NORMALIZED-DIFFERENCE-VEGETATION-INDEX: NOAA AVHRR," 2018. [Online]. Available: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ndvi-normalized-difference-vegetation-index-noaa-avhrr?qt-climatedatasetmaintabs=2#qt-climatedatasetmaintabs>. [Accessed: 7 octubre 2020].

[56] Climate Prediction Center (CPC). "Cold & Warm Episodes by Season". 2020 [Online]. Available: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. [Accessed: 14 octubre 2020].

[57] D. Marín, "La influencia del embalse el Peñol-Guatapé, Antioquia en los patrones climáticos y meteorológicos a escala local y regional," 2018. [Online]. Available: https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/3258/Mar%C3%A9n_Mart%C3%ADnez_Diego_Alejandro_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed: 9 enero 2021].

[58] C. Bernal y D. Sandoval, "Evaluación de la precipitación como indicador de la alteración del mesoclima en zonas de influencia del embalse Miel I y Porce II," 2017. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1114&context=ing_civil. [Accessed: 9 Enero 2021].

[59] J. Matinez,, J. Pabón, N. Bernal, N. Rodríguez, "Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos," Mayo 2010. [Online]. Available:

<http://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/pdf/cambio-climatico-y-su-relacion-con-el-uso-del-suelo-en-los-andes-colombianos.pdf> [Accessed: 10 Enero 2021].

[60] El Espectador, “La deforestación interrumpe el patrón de lluvias,” Julio 2018. [Online]. Available: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/la-deforestacion-interrumpe-el-patron-de-lluvias/> [Accessed: 10 Enero 2021].

[61] M. Avellaneda, R. Álvarez, “Identificación de impactos en el sector agrícola y en la energía disponible de central hidroeléctrica AES Chivor, asociados a la variación en el mesoclima producto de la formación antrópica de la lámina de agua del embalse la Esmeralda,” Enero 2015. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/40/ [Accessed: 10 Enero 2021].

[62] International Rivers, “Represas sucias,” 2011. [Online]. Available: https://www.internationalrivers.org/wp-content/uploads/sites/86/2020/06/represassuciasrevisada_2.pdf [Accessed: 10 Enero 2021].

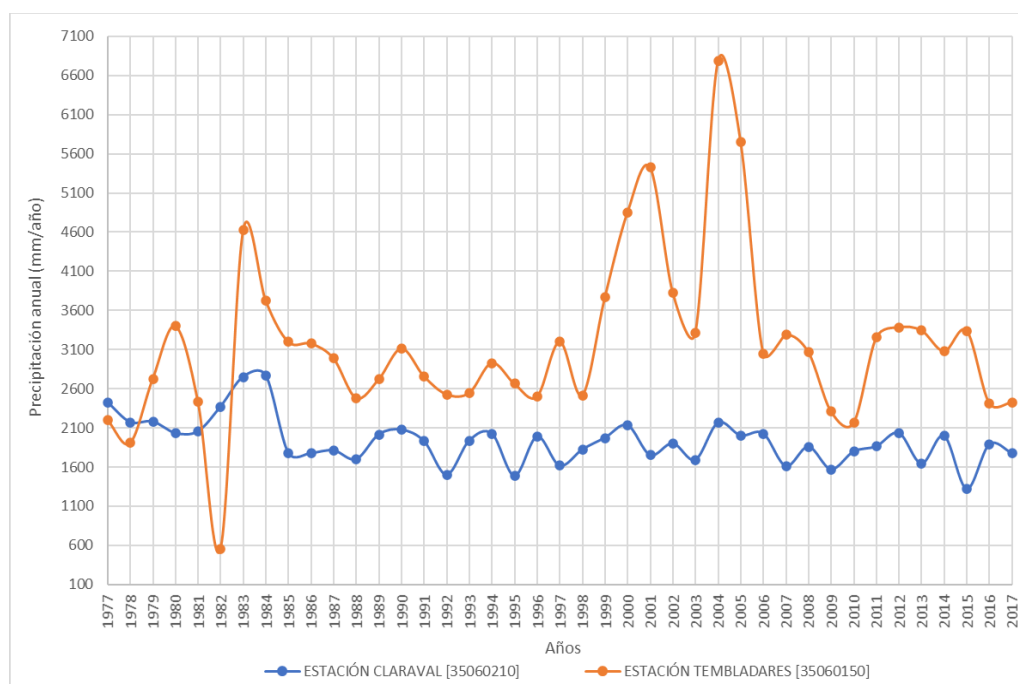
ANEXOS

En los anexos que se presentan a continuación se realiza una recopilación de tablas y gráficos que permiten aclarar al lector algunos de los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del trabajo de grado.

Anexo A. Resultados de la prueba de la prueba de inspección visual de los reportes de precipitación anual de las estaciones del IDEAM descartadas.

En la Figura 29 se observan los reportes de precipitación anual de las estaciones de Claraval y Tembladares, teniendo en cuenta que los registros de precipitación de la estación Tembladares presentan comportamientos anómalos a lo largo del periodo de análisis, donde las precipitaciones llegan hasta 6700 mm/año y que en comparación con la estación más próxima llamada Claraval las precipitaciones no superan los 2650 mm/año, se descarta la estación Tembladares identificada con el código 35060150.

Figura 29. Comparación de los reportes de las precipitaciones anuales de las estaciones próximas de Claraval y Tembladares para el periodo de 1977 a 2017.

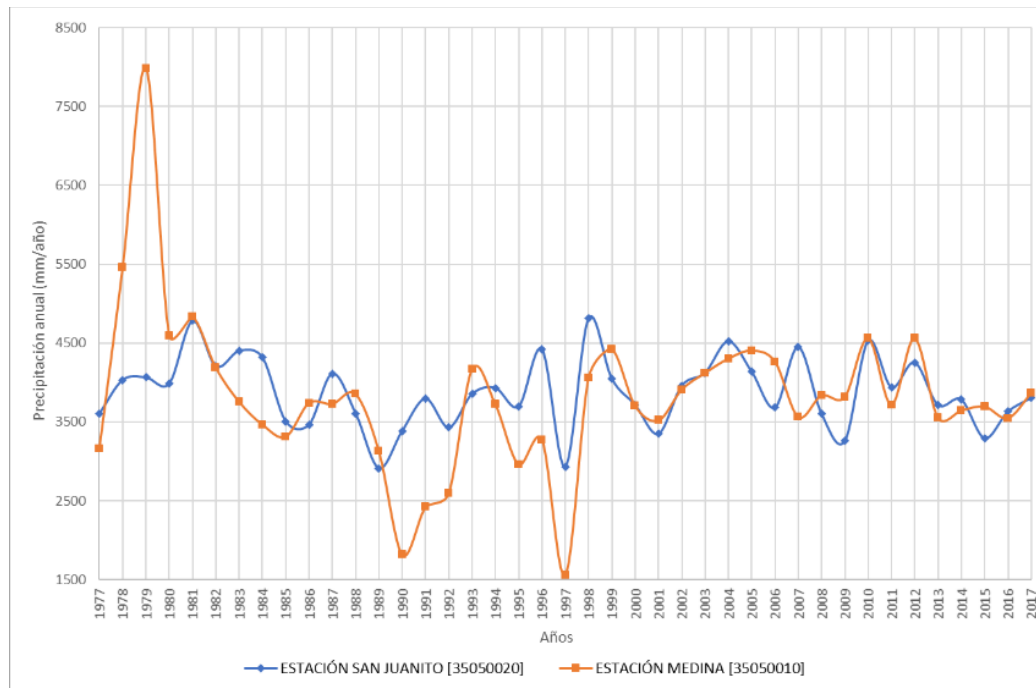


Fuente. Autora.

Los reportes de las precipitaciones anuales de las estaciones de San Juanito y Medina se presentan en la Figura 30, teniendo en cuenta que el comportamiento de las precipitaciones de la estación Medina presenta valores anómalos a lo largo del

periodo de registro, reportando precipitaciones de hasta 8000 mm/año y que en comparación a la estación más próxima que registra precipitaciones que no superan los 4600 mm/año, se descarta la estación Medina identificada con el código 35050010.

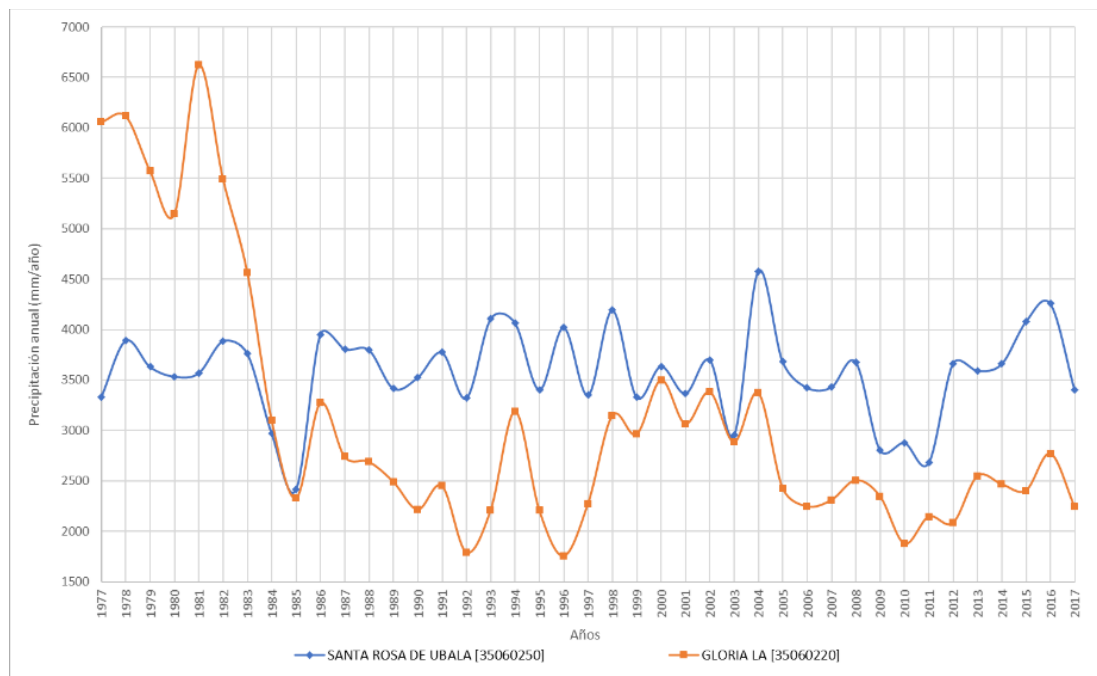
Figura 30. Comparación de los reportes de las precipitaciones anuales de las estaciones próximas de San Juanito y Medina para el periodo de 1977 a 2017.



Fuente. Autora.

En la figura 31 se observan la comparación de los reportes de precipitación anual de las estaciones de la Gloria y Santa Rosa de Ubalá, teniendo en cuenta que la estación de la gloria presento valores anómalos donde las precipitaciones llegaron hasta los 6600 mm/año y que en comparación con la estación más próxima llamada Santa Rosa de Ubalá donde la precipitación más alta fue de 4600 mm/año, se descarta la estación la gloria debido al comportamiento anómalo de las precipitaciones reportadas a lo largo del periodo de estudio.

Figura 31. Comparación de los reportes de las precipitaciones anuales de las estaciones próximas de la Gloria y Santa Rosa de Ubalá para el periodo de 1977 a 2017.



Fuente. Autora.

Anexo B. Resultados de la prueba Mann Kendal para los valores de precipitación y temperatura promedio mensual multianual y anual.

En la tabla 9 se presentan los resultados de los estadísticos de la prueba Mann-Kendall para las precipitaciones a escala mensual y anual y en unidades de cuenca y subcuenca.

Tabla 9. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para la detección de tendencias en las precipitaciones mensuales multianuales y anuales.

<i>Prueba Mann Kendall</i>	<i>Meses</i>	<i>Cuenca Río Guavio</i>	<i>Subcuenca del río Sueva</i>	<i>Subcuenca del río Batatas</i>	<i>Subcuenca del río Chivor</i>	<i>Subcuenca del río negro</i>
<i>P.Valor</i>	<i>Ene</i>	0.4873	0.5905	0.4996	0.4873	0.9298
<i>Z_s</i>		-0.6945	-0.5380	-0.6749	-0.6945	-0.0880
<i>S</i>		-72	-56	-70	-72	-10
<i>P.Valor</i>	<i>Feb</i>	0.9298	0.77665	0.8372	0.9921	0.8988
<i>Z_s</i>		0.0880	-0.28369	0.2054	0.0097	0.1271
<i>S</i>		10	-30	22	2	14

Prueba Mann Kendall	Meses	Cuenca Río Guavio	Subcuenca del río Sueva	Subcuenca del río Batatas	Subcuenca del río Chivor	Subcuenca del río negro
P.Valor		0.4168	0.6883	0.1504	0.2863	0.3527
Z_s	Mar	0.8119	0.4010	1.4380	1.0662	0.9293
S		84	42	148	110	96
P.Valor		0.59056	0.9609	0.3136	0.7468	0.3231
Z_s	Abr	0.53803	0.0489	1.0075	0.3228	0.9880
S		56	6	104	34	102
P.Valor		0.9921	0.9609	0.6317	0.7320	0.4996
Z_s	May	-0.0097	0.0489	0.4793	0.3423	0.6749
S		-2	6	50	36	70
P.Valor		0.1449	0.2524	0.1245	0.0983	0.4751
Z_s	Jun	-1.4575	-1.1445	-1.5358	-1.6532	-0.7141
S		-150	-118	-158	-170	-74
P.Valor		0.0277	0.0354	0.0337	0.0263	0.1344
Z_s	Jul	-2.2010	-2.1032	-2.1227	-2.2205	-1.4966
S		-226	-216	-218	-228	-154
P.Valor		0.0204	0.0071	0.0493	0.0493	0.4396
Z_s	Ago	-2.3184	-2.6901	-1.9662	-1.9662	-0.7728
S		-238	-276	-202	-202	-80
P.Valor		0.1801	0.0011	0.6598	0.1504	0.5122
Z_s	Sept	-1.3401	-3.2771	-0.4402	-1.4380	-0.655
S		-138	-336	-46	-148	-68
P.Valor		0.0011	0.0095	0.0449	0.0056	0.0226
Z_s	Oct	-3.2575	-2.5923	-2.0054	-2.7684	-2.2793
S		-334	-266	-206	-284	-234
P.Valor		0.2443	0.7916	0.4396	0.3136	0.0617
Z_s	Nov	1.1641	0.2641	0.7728	1.0076	1.8684
S		120	28	80	104	192
P.Valor		0.5377	0.5771	0.4751	0.6178	0.4168
Z_s	Dic	0.6163	0.5576	-0.7141	0.4989	0.8119
S		64	58	-74	52	84
P.Valor		0.0047	0.0076	0.0834	0.0085	0.3527
Z_s	Anual	-2.8271	-2.6706	-1.7315	-2.6314	-0.9293
S		-290	-274	-178	-270	-96

Fuente. Autora.

En la tabla 10 se presentan los resultados de los estadísticos de la prueba Mann-Kendall de la temperatura a escala mensual y anual y en unidades de cuenca y subcuenca.

Tabla 10. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para la detección de tendencias en la temperatura promedio mensual multianual.

<i>Prueba Mann Kendall</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
<i>P.Valor</i>	0.015	0.448	0.907	0.153	0.010	0.001	0.000	0.002	0.000	0.002	0.055	0.007
<i>Z_s</i>	2.433	0.759	0.117	1.428	2.591	3.378	3.656	3.106	3.573	3.136	1.921	2.693
<i>S</i>	2.1	6.6	1.1	1.2	2.2	2.9	3.2	2.7	3.2	2.8	1.7	2.4

Fuente. Autora.