

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA
DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TAHUANDO, PROVINCIA DE IMBABURA

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA EN
RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTORA:

Sara Stefany Manzano Orbe

DIRECTOR:

MSc. Jorge Luis Ramírez López

2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**“EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA
DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TAHUANDO, PROVINCIA DE IMBABURA”**

Trabajo de titulación revisada por el Comité Asesor, previa a la obtención del Título de:
INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

APROBADA:

MSc. Jorge Ramírez
DIRECTOR



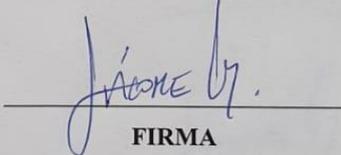
FIRMA

MSc. Oscar Rosales
ASESOR



FIRMA

MSc. Gabriel Jácome
ASESOR



FIRMA

Ibarra-Ecuador

Octubre 2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hacemos la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual ponemos a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD	0401483540	
APELLIDOS Y NOMBRES	Manzano Orbe Sara Stefany	
DIRECCIÓN:	Ibarra – Imbabura	
EMAIL:	ssmanzanoo@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0964115229

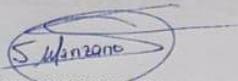
DATOS DE LA OBRA		
TÍTULO:	EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TAHUANDO, PROVINCIA DE IMBABURA	
AUTOR:	SARA STEFANY MANZANO ORBE	
FECHA:	18/10/2022	
SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN		
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO	<input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
DIRECTOR:	MSc. Jorge Ramírez	

2. CONSTANCIAS

La autora manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y son titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumimos la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldremos en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 18 días del mes de octubre del 2022

LA AUTORA:



Manzano Orbe Sara Stefany

CI.: 0401483540

Agradecimiento

Mi agradecimiento más profundo es a Dios, por haberme permitido vivir esta experiencia en esta hermosa carrera y por haberme dado la fortaleza en momentos de dificultad.

A mi director de tesis y amigo Msc. Jorge Ramírez por su entrega, dedicación y consejos para el bien de esta investigación. A mis asesores MSc. Óscar Rosales y MSc. Gabriel Jácome que con sus palabras sabias y sus conocimientos precisos ayudaron a dejar el mejor trabajo posible, además de haber sido mis guías durante toda la carrera. A mis profesores Ing. Paúl Arias e Ing. Juan Guamán por haber aportado su grano de arena en este trabajo de titulación.

De igual manera, agradezco al motor de mis sueños y esperanza, mis padres Sara y Luis, quienes me apoyaron en toda mi formación académica y me dieron los mejores valores para afrontarla y cumplirla. A mis hermanos Jennifer y André por todos sus consejos de vida.

Agradezco a mis amigos y compañeros de viaje que nunca dejaron de creer en mi: Ing. Katherine Guzmán, Ing. Jhommará Bautista, Ing. Gabriel Chimbo, Ruth Corrales, Mauricio Rosero, Biol. Ronald Bravo, Ing. Erick Morales, Lcda. Melany Montenegro y Alen Pereira. Y finalmente a mi persona importante Paquito, por ser mi mejor amigo y estar presente en los momentos malos y buenos de mi vida.

Gracias infinitas a ustedes.

Sara Stefany Manzano Orbe

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico a:

Al creador de todas las cosas, que me dio la fuerza necesaria para levantarme y continuar, por ser mi guía principal y por su amor incondicional demostrado en el más mínimo detalle de la naturaleza.

A mis padres quienes con amor, paciencia, esfuerzo y sacrificio me han permitido lograr mis metas y también por inculcar en mi el ejemplo de la responsabilidad y valentía.

*A mis hermanos porque con sus consejos y oraciones hicieron de mí una mejor persona.
A mis sobrinos, ya que ellos son mi inspiración en dejarles un lugar y futuro mejor.*

A todos mis amigos y personas cercanas que me apoyaron y extendieron su mano en momentos difíciles.

Y a mi mejor amigo Paquito, quién con su paciencia, cariño y consejos me ayudó a crecer como persona y como profesional.

Sara Stefany Manzano Orbe

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Páginas
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte.....	15
1.2. Problema de investigación y justificación.....	16
1.3. Objetivos.....	18
<i>1.3.1. Objetivo general</i>	18
<i>1.3.2. Objetivos específicos</i>	18
1.4. Preguntas directrices de la investigación.....	18
1.5. Hipótesis	18
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	19
2.1. Marco teórico.....	19
<i>2.1.1. Ciclo hidrológico</i>	19
<i>2.1.2. Balance hídrico</i>	20
<i>2.1.4. Oferta hídrica en el Ecuador y efectos del cambio climático</i>	21
<i>2.1.5. Teledetección y datos climáticos satelitales</i>	22
<i>2.1.6. Modelos hidrológicos</i>	24
<i>2.1.8. Modelo Presión-Estado-Respuesta (PER)</i>	28
2.2. Marco legal.....	29
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	31
3.1. Descripción del área de estudio	31
<i>3.1.1. Área de estudio</i>	31
<i>3.1.2. Factores climáticos</i>	32
<i>3.1.3. Factores topográficos</i>	33
3.2. Métodos	34
<i>3.2.1. Análisis de datos climáticos y disponibilidad hídrica superficial</i>	34
<i>3.2.2. Modelos climáticos y proyección hídrica</i>	44
<i>3.2.3. Lineamientos técnicos de protección de la subcuenca del río Tahuando frente a escenarios de cambio climático</i>	48

3.3. Materiales y equipos	49
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1. Análisis de datos climáticos y disponibilidad hídrica superficial.....	50
4.1.1. Datos de precipitación.....	50
4.1.2. Validación de datos de precipitación	51
4.1.3. Modelamiento hidrológico HEC-HMS	54
4.1.4. Modelo de pérdidas de la precipitación total.....	56
4.1.5. Modelo de transformación SCS Unit Hydrograph	60
4.1.6. Modelo de Tránsito de avenida	61
4.1.7. Modelo meteorológico	62
4.1.8. Series de tiempo.....	62
4.1.9. Control del Modelo y Validación	63
4.1.10. Disponibilidad hídrica 2000-2021	64
4.2. Proyección hídrica	66
4.2.2. Calibración de datos climáticos	67
4.2.3. Proyecciones hídricas a un futuro cercano y lejano en diferentes escenarios de cambio climático.....	68
4.2.3. Efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica	74
4.3. Lineamientos técnicos de protección para el manejo de la subcuenca frente a escenarios de cambio climático	80
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
REFERENCIAS	89
ANEXOS	106

Índice de tablas

Tabla 1. Escenarios de datos de cambio climático	27
Tabla 2. Pruebas estadísticas para validación de datos de cambio climático	28
Tabla 3. Rangos del área de la cuenca	35
Tabla 4. Colores de píxeles para cada cobertura vegetal dentro de la subcuenca del río Tahuando	36
Tabla 5. Grupo hidrológico según la textura del suelo.....	37
Tabla 6. Valores reclasificados para generar el número de curva de una cuenca	38
Tabla 7. Reclasificación según la cobertura vegetal de la subcuenca del río Tahuando	38
Tabla 8. Valores reclasificados según el grupo hidrológico.....	39
Tabla 9. Materiales y Equipos	49
Tabla 10. Áreas y porcentajes de superficies de cada subdivisión de la subcuenca.....	55
Tabla 11. Área y porcentaje de superficie de la cobertura vegetal de la subcuenca del río Tahuando	57
Tabla 12. Porcentaje de impermeabilidad de cada subdivisión.....	59
Tabla 13. Longitud de río de cada subdivisión de la subcuenca	60
Tabla 14. Tiempo de concentración y tiempo de retraso de cada subdivisión	60
Tabla 15. Método de depósito lineal para el modelo de transformación del HEC-HMS61	
Tabla 16. Resultados del método Muskingun Cunge	61
Tabla 17. Intervalos de confianza de los caudales aforados y simulados.....	63
Tabla 18. Pruebas estadísticas para downscaling de datos de cambio climático	67
Tabla 19. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks para caudales y precipitaciones predichas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp45	74
Tabla 20. Prueba de Homocedasticidad Levene para precipitaciones absolutas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp45	74
Tabla 21. Prueba de Homocedasticidad Levene para caudales absolutos del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp45	75
Tabla 22. Prueba de Kruskal Wallis para un periodo actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp45	75
Tabla 23. Comparativa de diferencias entre los periodos actual, cercano y lejano de caudales del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp45	76
Tabla 24. Prueba de Kruskal Wallis para un periodo actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp45	76

Tabla 25. Comparativa de diferencias entre los periodos actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp45	77
Tabla 26. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks para caudales y precipitaciones predichas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp85	77
Tabla 27. Prueba de Homocedasticidad Levene para precipitaciones absolutas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp85	78
Tabla 28. Prueba de Homocedasticidad Levene para precipitaciones absolutas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp85	78
Tabla 29. Prueba de Kruskal Wallis para un periodo actual, cercano y lejano de caudal del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp85	79
Tabla 30. Comparativa de diferencias de caudales entre los periodos actual, cercano y lejano de caudales del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp85	79
Tabla 31. Prueba de Kruskal Wallis para un periodo actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp85	79
Tabla 32. Comparativa de diferencias entre los periodos actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp85	80
Tabla 33. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para el lineamiento técnico de conservación de páramos	83
Tabla 34. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para el lineamiento técnico de conservación de los bosques	84
Tabla 35. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para el lineamiento técnico de Actividades para la participación de comunidades, autoridades y academia	86

Índice de figuras

Figura 1. Esquema del ciclo del agua	20
Figura 2. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la naturaleza de los algoritmos básicos	24
Figura 3. Sistema legal investigativo referente al cambio climático en el Ecuador	29
Figura 4. Ubicación de la subcuenca del río Tahuando.....	31
Figura 5. Tipos de clima de la subcuenca del río Tahuando según Pourrut	32
Figura 6. Tipo de suelo de la subcuenca del río Tahuando	33
Figura 7. Punto de aforo en la subcuenca del río Tahuando.....	42
Figura 8. Molinete electromagnético (OTT MF Pro)	42
Figura 9. Secciones de control del cauce.....	43
Figura 10. Árbol de problemas	48
Figura 11. Sistema Presión- Estado- Respuesta	49
Figura 12. Serie temporal de precipitación de la estación meteorológica Otavalo (M0105).....	50
Figura 13. Serie temporal de precipitación de los datos satelitales CHIRPS	51
Figura 14. Comparativa mensual de información de precipitación de la estación Otavalo y el satélite CHIRPS	52
Figura 15. Relación de los datos mensuales de precipitación estación Otavalo y satélite CHIRPS	52
Figura 16. Comparativa anual de información de precipitación de la estación Otavalo y el satélite CHIRPS	53
Figura 17. Relación de los datos anuales de precipitación de la estación Otavalo y el satélite CHIRPS.....	54
Figura 18. Subdivisiones de la subcuenca del río Tahuando generadas en el HEC-HMS	55
Figura 19. Uso del suelo de la subcuenca del río Tahuando	56
Figura 20. Textura del suelo y grupo hidrológico de la subcuenca del río Tahuando....	58
Figura 21. Número de curva de las subdivisiones de la subcuenca del río Tahuando ...	59
Figura 22. Método Muskingum Cunge 8 puntos.....	62
Figura 23. Series temporales del satélite CHIRPS para cada subdivisión.....	63
Figura 24. Relación entre caudal simulado y caudal aforado.....	64

Figura 25. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2000-2021.....	65
Figura 26. Relación de los promedios de precipitación y caudal en el periodo 2000-2021	65
Figura 27. Serie temporal del modelo climático CMIP5_GISS_E2-R para los escenarios A) RCP 4.5 y B) RCP 8.5.....	67
Figura 28. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2022-2045 escenario RCP 4.5	68
Figura 29. Relación de los promedios de precipitación y de caudal generado en el periodo 2022-2046 del modelo CMIP5_GISS_E2-R_RCP45	69
Figura 30. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2046-2070 escenario RCP 4.5	70
Figura 31. Relación de los promedios de precipitación y de caudal generado en el periodo 2046-2070 del modelo CMIP5_GISS_E2-R_RCP 4.5	70
Figura 32. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2022-2045 escenario RCP 8.5	71
Figura 33. Relación de los promedios de precipitación y de caudal generado en el periodo 2022-2045 del modelo CMIP5_GISS_E2-R_RCP85	72
Figura 34. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2046-2070 escenario RCP 8.5	73
Figura 35. Relación de los promedios de precipitación y de caudal generado en el periodo 2046-2070 del modelo CMIP5_GISS_E2-R_RCP85	73
Figura 36. Árbol de problemas de los efectos del cambio climático en la subcuenca del río Tahuando.....	81

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES
EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA
DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TAHUANDO, PROVINCIA DE IMBABURA

Stefany Manzano

RESUMEN

El recurso hídrico es fundamental para el desarrollo de la vida, sin embargo, se ve afectado por el cambio climático. La subcuenca del río Tahuando ofrece servicios ecosistémicos a los habitantes de su entorno. El presente estudio evaluó el efecto de cambio climático en la disponibilidad hídrica empleando el software HEC-HMS. Los datos de precipitación satelital CHIRPS fueron validados con la estación meteorológica Otavalo, ya que en términos generales tiene características aproximadas a la subcuenca. Las proyecciones hídricas se realizaron en dos periodos: cercano (2022-2045) y lejano (2046-2070) con el modelo GISS-E2-R del CMIP5 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los datos satelitales CHIRPS mostraron un R^2 en la validación mensual y anual de 0.87 y 0.72, respectivamente. El modelo hidrológico fue calibrado y validado dentro del periodo 2000-2021 con datos aforados, presentando un R^2 de 0.97. Los resultados del *downscaling* dinámico en datos de cambio climático mostraron una relación de mediana intensidad (R^2 0.51), un BIAS de 0.40 y un RMSE igual a 88.4. Se obtuvo un incremento de caudales en los diferentes periodos y escenarios, el mayor caudal se daría en 2070 (escenario RCP 8.5) con 8.71 m³/s. El cambio climático modificaría significativamente ($p < 0.0001$) a la precipitación y el caudal de la subcuenca del río Tahuando en escenarios de moderado a crítico. Finalmente, existen tendencias al aumento y salida acelerada del agua de la subcuenca, situación que afectaría a la capacidad de recarga de acuíferos y disponibilidad hídrica en épocas de estiaje.

Palabras clave: Modelamiento hidrológico, HEC-HMS, Hidrología, Modelamiento climático, Proyecciones climáticas.

ABSTRACT

Water resources are fundamental for the development of life; however, they are currently affected by climate change. The Tahuando river sub basin offers ecosystem services to the populations living around this hydrographic unit. For this reason, the effect of climate change on water availability was evaluated using the HEC-HMS software. The CHIRPS satellite precipitation data were validated with the Otavalo meteorological station, because it has similar characteristics to the sub-basin. Water projections were estimated for two periods: near (2022-2045) and far (2046-2070) using the CMIP5 GISS-E2-R model under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The CHIRPS satellite data showed an R^2 in the monthly and annual validation of 0.87 and 0.72, respectively. The hydrological model was calibrated and validated within the period 2000-2021 with gauged data, presenting an R^2 of 0.97. The results of the dynamic downscaling on climate change data showed a correlation of R^2 0.51, BIAS 0.40 and RMSE 88.4. An increase in flow was obtained in the different periods and scenarios, the highest flow would occur in 2070 in the RCP 8.5 with 8.71 m³/s. Climate change would significantly affect ($p < 0.0001$) precipitation (mm) and flow (m³/s) in the Tahuando river sub-basin in moderate to critical scenarios. Finally, there are flooding and accelerated water outflow trends in the sub-basin, a situation that would affect the aquifer recharge capacity, affecting water availability in times of low water levels.

Key words: Hydrologic modeling, HEC-HMS, Hydrology, Climate modeling, Climate projections.

Capítulo I

Introducción

1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte

La necesidad de conservar el recurso hídrico frente al cambio climático es parte de la declaratoria sobre la Visión Mundial del Agua, desde el inicio del siglo XXI (Bergkamp et al., 2003). El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), emitió un informe en 2014, que muestra las afectaciones en los sistemas hidrológicos de distintas regiones (Ontaneda, 2020). En la actualidad, evaluar los impactos causados por este fenómeno en las cuencas hidrológicas es necesario para su manejo; sin embargo, el desafío es obtener información válida y sustentada en modelamientos que permitan predecir diferentes escenarios de los componentes del balance hídrico (Orozco et al., 2018).

El mal manejo del suelo y el incremento de la cantidad de heliofanía reflejado generan efectos significativos en el ciclo hidrológico (García et al., 2007). Los países latinoamericanos albergan el 33% del capital hídrico mundial (Banco de Desarrollo de América Latina, 2015); sin embargo, esta riqueza tiene diferentes amenazas que influyen en la disponibilidad del agua (Linck y Weemaels, 2010). La región es vulnerable a los efectos climáticos, debido a la variación del fenómeno El Niño (Oscilación del Sur ENOS); el cual generalmente causa sequías en Colombia, mientras que en Ecuador, Perú y Bolivia produce fuertes precipitaciones (Corporación Andina de Fomento, 2014).

El cambio climático afecta a la población latinoamericana, aumentando desigualdades socioeconómicas e impactando a quienes necesitan fuentes hídricas para el regadío de sus cultivos (Murillo et al., 2018). El Ecuador, por sus características biofísicas y socioeconómicas, tiene una alta vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático (Ministerio del Ambiente, 2018), la debilidad que existe en los espacios locales profundiza en cambios de niveles de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa de las poblaciones (Arias-Muñoz et al., 2022). Según Mena y Alquina (2019), este país pertenece al grupo con mayor disponibilidad de agua per-cápita a nivel mundial, recurso proveniente de la vertiente amazónica y del Pacífico. La oferta natural de los recursos hídricos en el país depende de una compleja relación entre múltiples agentes climáticos, provenientes de los cuatro puntos cardinales, así como de las peculiaridades locales,

especialmente los relacionados con la existencia de la Cordillera Andina (Muñoz et al., 2014). En los años de 1993 y 1994 iniciaron estudios sobre el Cambio Climático, los objetivos principales fueron analizar los posibles impactos en áreas estratégicas siendo una de estas los recursos hídricos, de esta manera se firmó el Convenio de ejecución técnica entre el Ministerio del Ambiente y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2000).

En los últimos tiempos, el Ecuador registró una serie de eventos naturales como sequías, incendios forestales, deslizamientos e inundaciones producto de los efectos del cambio climático (Ministerio del Ambiente, 2018). Según la Estrategia Nacional de Cambio Climático, los sistemas hidrológicos son particularmente vulnerables a la ocurrencia de cambios en las precipitaciones; en el caso de la Sierra, las afectaciones serían deslizamientos y erosión (León et al., 2021). Por tal motivo, es necesario generar diversos escenarios de cambio climático, en donde se pueda observar diferentes variaciones que se presenten en el clima de Ecuador (Armenta et al., 2016).

Las áreas fluviales son uno de los espacios naturales relevantes en una ciudad, el río Tahuando es considerado como uno de los recursos hídricos con mayor importancia en la provincia de Imbabura por ser una fuente de captación para el agua potable de la localidad (Chiriboga, 2010); sin embargo, esta cuenca tiene características hidrológicas variables y su caudal es afectado por el ciclo del agua, por tal motivo en la época seca los caudales que circulan por el cauce del río son pequeños o en algunos tramos nulos, mientras que en épocas de lluvias, los caudales alcanzan valores altos con características de tormentadas (Yáñez, 2019). De esta manera, se convierte en una necesidad hacer un estudio sobre el efecto climático en la disponibilidad hídrica de la subcuenca de este río en donde se evalúe el pasado, presente y futuro del recurso (Tobar, 2019).

1.2. Problema de investigación y justificación

El agua es un recurso vital por lo que cada día se agranda más la brecha entre las exigencias del agua dulce y de las cantidades concretas que se dispone, en consecuencia, son más las personas que se colocan en una situación de riesgo. El mal manejo del agua se convierte rápidamente en una fuerza desestabilizadora (Ministerio del Ambiente, 2012). Además, el tema del cambio climático es un análisis para la conservación de los

ecosistemas, biodiversidad y la repercusión en la disponibilidad de agua en las diversas regiones del mundo (Cuaspud, 2017).

El río Tahuando es una de las 19 unidades hidrográficas en Imbabura que tiene un área de influencia de riego de 4477.38 ha y tiene 80 captaciones de agua, lo que convierte a esta subcuenca en una zona importante de estudio de los efectos del cambio climático (SENAGUA, 2016). En Angochagua uno de los enfoques principales es el cuidado del agua debido a los diferentes usos que se le da (Terán, 2021). La subcuenca es uno de los principales aportes dentro de la demarcación Mira y corresponde a una fuente de agua para uso doméstico, riego, abrevaderos, piscícolas, agua potable dentro de la parroquia (Almeida, 2014). Imbabura está dentro del listado de Geoparques reconocidos por la UNESCO por tener una amplia diversidad geológica, fauna y flora, por lo que esto es un impulso para la investigación y búsqueda de soluciones a problemas ambientales (Jácome et al., 2020). Este tipo de investigaciones ofrece información necesaria para conocer el pasado, presente y futuro de la subcuenca y de esta manera poder dar un manejo adecuado al recurso.

A pesar de tener leyes que protejan los recursos hídricos, no se garantiza la seguridad hídrica en un contexto de escenarios de escasez como consecuencia del cambio climático. Ante esto se convierte en una necesidad entender el comportamiento de la oferta hídrica superficial del cuerpo hídrico en condiciones de cambio climático para poder realizar una gestión sostenible de acuerdo a lo mencionado en el Plan Creando Oportunidades en el cual se establece cuidar al patrimonio hídrico como factor fundamental para el desarrollo económico y social tomando las distintas problemáticas como cambios demográficos, uso irresponsable del agua, contaminación de las fuentes y entre ellas el cambio climático (Secretaría Nacional de Planificación, 2021). Además, esta investigación cumple con el objetivo 13 (Acción por el clima) de las Naciones Unidas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio climático en la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar los datos climáticos y disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando.
- Establecer una proyección futura del efecto del cambio climático en la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando para el periodo del 2022-2070.
- Definir lineamientos técnicos de protección para el manejo de la subcuenca del río Tahuando frente a escenarios de cambio climático.

1.4. Preguntas directrices de la investigación

- ¿Cómo afecta el cambio climático a la oferta hídrica del río Tahuando?
- ¿Cuál es el comportamiento de las variables climáticas en el periodo 2022-2070 en un contexto de cambio climático?
- ¿Qué lineamientos técnicos se deben tomar en cuenta para proteger y manejar las fuentes de agua?

1.5. Hipótesis

- **Ho:** El efecto del cambio climático en la precipitación no afecta significativamente a la oferta hídrica de la subcuenca del río Tahuando.
- **Ha:** El efecto del cambio climático en la precipitación afecta significativamente a la oferta hídrica de la subcuenca del río Tahuando.

Capítulo II

Revisión de literatura

2.1. Marco teórico

2.1.1. *Ciclo hidrológico*

La definición del ciclo hidrológico puede presentar leves variaciones en la literatura científica; sin embargo, Fattorelli y Fernández (2011) definen que, es una consecuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida (Laura, 2019).

En este ciclo también se resalta la importancia de la gravedad, ya que esta permite que el agua condensada descienda como precipitación o escurrimiento (Ordoñez, 2011). Una vez que el agua se evapora, mediante el movimiento del aire se dirige a capas superiores a la atmósfera donde la temperatura es menor y se produce una condensación que transforma las nubes para luego dar paso a la precipitación (De la Vega, 2014). Otro de los procesos implicados en el ciclo del agua son la infiltración, escorrentía y evapotranspiración (Valle y Méndez, 2015). La infiltración es el proceso en donde el agua de la superficie de la tierra entra en el suelo y está determinada por la gravedad y la acción capilar (Úbeda y Delgado, 2018). Por otro lado, la escorrentía es la cantidad de agua que drena o escurre sobre la superficie del suelo y hace que incremente el volumen de los cauces (Gaspari et al., 2007).

El ciclo del agua representa el principio fundamental de la ciencia hidrológica ya que describe el movimiento continuo del agua a través de la atmósfera y la tierra, en un espacio llamado hidrosfera, este ciclo se mantiene por los rayos solares que proveen de la energía necesaria para el proceso (Córdova y Iturbe, 2015). Este ciclo comienza con la evaporación del agua desde la superficie del océano, en cuánto se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua (condensación), luego las gotas se juntan y forman una nube que posterior cae por su propio peso como precipitación; en la tierra, una parte será aprovechada por los seres vivos, otra escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, lago u océano y otro porcentaje se filtrará a través del suelo lo que forma acuíferos o capas de agua subterránea (Figura 1) (Valle y Méndez, 2015).

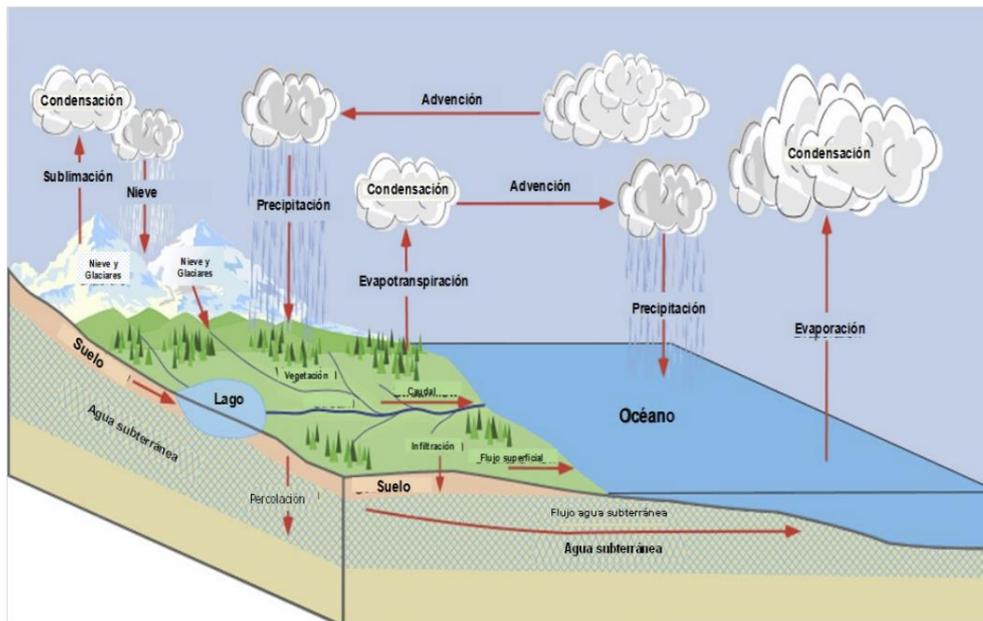


Figura 1. Esquema del ciclo del agua

Fuente: Ordoñez (2011).

2.1.2. Balance hídrico

El balance hídrico se aplica con totalidad al ciclo hidrológico y está determinado por la cuantificación de entradas y salidas de agua que se producen a lo largo de un período (Gobierno Vasco y Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial, 2015). Al tener escasa información de la cuenca de estudio generalmente solo se utiliza datos de precipitación y temperatura, con lo que se puede estimar la cantidad de agua existente en la cuenca ya sea que se encuentre en déficit o superávit (Cajamarca, 2017).

A escala global se prevé que los efectos del cambio climático aumenten las precipitaciones y escurrimiento, por lo tanto, incrementaría la oferta hídrica en regiones con latitudes altas (Martínez y Patiño, 2012). Para el análisis del balance hídrico se requiere contar con información de precipitación, caudales y temperatura en un lapso de tiempo de al menos 8 a 10 años (Banco de Desarrollo de América Latina, 2014). El balance hídrico se basa fundamentalmente en la ecuación de balance hidrológico (ecuación 1), ya que permite conocer características de la cuenca mediante la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad (Suescún & Africano, 2018).

$$P = ES + ETR + I + \Delta - (1)$$

Donde:

P = Precipitación (mm);

ETR = Evapotranspiración (mm/día);

I = Infiltración (mm);

Δ = Almacenamiento en el suelo (mm)

La precipitación es la caída de partículas de agua que puede estar en estado sólido o líquida y se originan en una nube, atraviesan la atmósfera y llegan al suelo por gravedad (Leal y Portes, 2020), según Guamán (2020) las precipitaciones varían según la temperatura y estos eventos ayudan a realizar investigaciones de predicción hidrológicas para eventos extremos como inundaciones o sequías. Otra de las variables en el balance hídrico es la evapotranspiración donde el agua se evapora desde los tejidos internos de las hojas de las plantas (Unión Europea, 2018) y es importante en el estudio del uso del agua en ecología y otras actividades de planeación (Segura-Castruita y Ortiz-Solorio, 2016). La infiltración y el almacenamiento en el suelo también son importantes en el balance hidrológico puesto a que el agua entra al suelo (Úbeda y Delgado, 2018) y se almacena según la capacidad de retención que este tenga (Castro et al., 2021).

2.1.4. Oferta hídrica en el Ecuador y efectos del cambio climático

El Ecuador considera la gestión integral del recurso hídrico por lo que se ha llevado a cabo la identificación de acuíferos como base para una política de sustentabilidad y gestión del recurso hídrico (Amendaño, 2018). La República del Ecuador con sus límites definitivos tiene un área total de 256.370 km², posee 72 cuencas hidrográficas de la vertiente del pacífico y 7 cuencas hidrográficas de la vertiente del amazonas (Ministerio del Ambiente, 2002).

El recurso hídrico, a nivel nacional, está siendo altamente afectada por el cambio climático, por lo que se agrava cada vez más su disponibilidad (López et al., 2019). En Ecuador se intensifican los fenómenos climáticos extremos como los que ocurrieron como resultado del fenómeno de ENSO, también produce sequías en la Cordillera de los Andes y la inundación de la zona costera (Ministerio del Ambiente, 2017). Históricamente, Ecuador presenta los “meganiños” en los años de 1981-1983 y 1997-

1998, siendo los más intensos del siglo XX y posterior a esto en el 2016-2017 presentó el “Niño Costero” con lluvias tempestuosas (INDECI, 2017).

La investigación relacionada con el cambio climático en el Ecuador ha aumentado en los últimos años, en las cuáles se evidencia el continuo y creciente interés por conocer los impactos en los sistemas hídricos, además, se busca mejorar el conocimiento y proponer lineamientos para diseñar estrategias y lograr una adaptación al cambio climático (Aguirre et al., 2010). Según lo expuesto anteriormente, la adaptación del cambio climático en los recursos hídricos se vuelve indispensable y urgente, Ecuador es un país que puede sufrir las consecuencias de cambio climático en el aumento de un costo económico y social (Benítez, 2018).

2.1.5. Teledetección y datos climáticos satelitales

La teledetección es la técnica que permite adquirir información de los diferentes objetos a través de sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvioco, 1995). Las aplicaciones de la teledetección y los recursos hídricos se orientan en la calidad del agua, estimaciones de precipitación, mediciones de la humedad del suelo para el riego, evaluación de la extensión de la capa de nieve relacionada al cambio climático, entre otros (Ortega, Quito).

Hasta los años 60 del siglo pasado, los datos climáticos solo eran tomados in situ, es decir con estaciones meteorológicas en la superficie terrestre, sin embargo, esta información no está exenta de inconvenientes (Álvarez, 2016). Por esta razón se desarrollaron los satélites, los cuales están ubicados en órbitas heliosincrónicas y geoestacionarias para observar la atmósfera, en consecuencia las medidas de estos son muy útiles en diferentes ámbitos de la meteorología (Marcos, 2017).

Los modelos de pronóstico del tiempo requieren la información de todo el globo terráqueo, dado que los datos satelitales suministran información sobre extensos sectores oceánicos y son incorporados en modelos meteorológicos como condiciones iniciales para zonas que no tienen suficiente información (González, 2009). Los primeros satélites meteorológicos fueron posicionados en las órbitas terrestres bajas (LEO), actualmente existen los experimentales enviados por la NASA (los TIROS) en los que se aprecian

ventajas de la órbita polar con una inclinación cercana a los 90° por lo que proporcionan buena cobertura (González, 2010).

En la actualidad se manejan diferentes plataformas de descarga de datos climáticos, entre ellas esta *Google Climate Engine*, la misma que permite a los usuarios procesar y visualizar rápidamente observaciones terrestres satelitales y datos meteorológicos cuadrículados para el monitoreo ambiental, mejorando la alerta temprana de sequía, incendios forestales y riesgo de pérdida de cultivos (Albano, 2021). *Google Earth Engine* (GEE) es una plataforma que procesa y analiza una amplia gama de imágenes satelitales y conjunto de datos geoespaciales, es gratuita para todos los usuarios confines de investigación (Crego et al., 2022). El repositorio de GEE contiene hasta la fecha un catálogo de 600 conjuntos de datos de 50 fuentes diferentes (dispositivos y organizaciones); los datos de teledetección se obtienen de 30 satélites o constelaciones de satélites (Reis et al., 2020).

Uno de los productos existentes en GEE es *Terra Climate*, la cual es una base de datos climáticos mensuales y de balance hídrico para superficies terrestres globales que utiliza interpolación asistida por el clima, combinadas con las normales climatológicas de alta resolución espacial más gruesa, pero variables en el tiempo del CRU Ts4.0 y del Reanálisis japonés de 55 años (JRA55) (Abatzoglou et al., 2018). La colección se compone de 14 bandas temáticas con una cobertura mundial y a una resolución temporal mensual, ofrecen datos climáticos históricos de hace más de 60 años de al menos 14 variables (Filgueiras et al., 2022).

Los datos satelitales de CHIRPS también están dentro del catálogo de *Google Earth Engine* y son estimaciones de precipitaciones y observaciones en terrestres, tienen un periodo de tiempo desde el año 1981 hasta la actualidad y una resolución de 0.05° en varios formatos (NetCDF, TIFF, BIL, PNG), esta data de información está disponible en esta plataforma (Funk et al., 2014).

Las fuentes que fueron usadas en la creación de CHIRPS son: CHPCLim (*Climate Hazards Precipitation Climatology*), Infrarrojo (IR) térmico geoestacionario, TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), Modelo atmosférico de campos de precipitación del sistema de predicción climático de la NOAA (CFSv2) y Observaciones in situ de

precipitación obtenidas de varias fuentes de servicios meteorológicos estadounidenses y regionales (Urrea et al., 2016).

La resolución alta temporal/espacial y el control de calidad de estos datos permiten que sean utilizados para el análisis de disponibilidad de agua, simulación y calibración de modelos hidrológicos e hidráulicos, estudios de patrones de precipitación y variabilidad a escala nacional y regional (Rodríguez, 2021).

2.1.6. Modelos hidrológicos

La modelación hidrológica tiene como referencia a los componentes del ciclo hidrológico junto con relaciones matemáticas para una evaluación de la dinámica del agua superficial (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018). En hidrología se dispone numerosos modelos que son susceptibles a distintas clasificaciones (Figura 2), y constituye una herramienta fundamental en el análisis de numerosos problemas medioambientales relacionados con la disponibilidad del agua como inundaciones, sequías, erosión, contaminación difusa o puntual, degradación de suelos, usos del agua, cambio climático, entre otros (Cabezas, 2015).

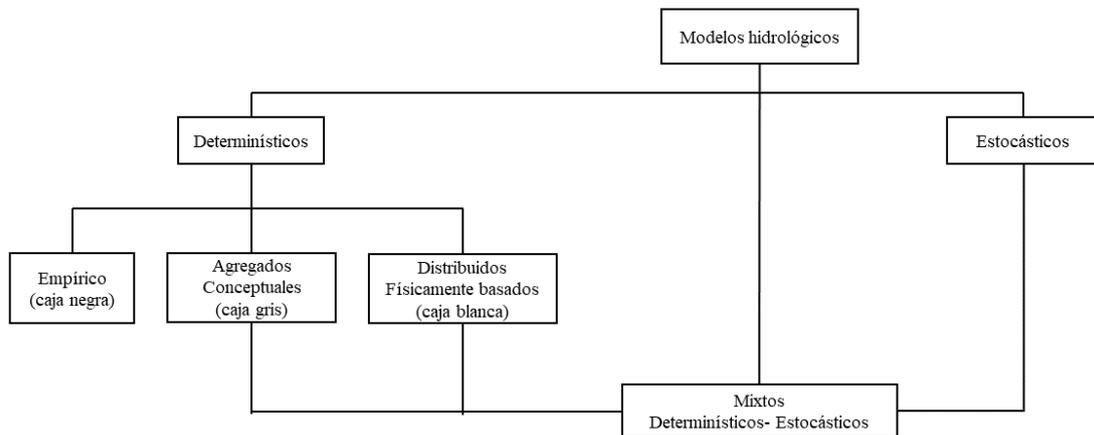


Figura 2. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la naturaleza de los algoritmos básicos

Fuente: Refsgaard y Abbott (1996)

La comunidad científica ha desarrollado una gran cantidad de herramientas para modelación hidrológica, como el modelo *Water Evaluation And Planning* (WEAP) que

tiene implementaciones en diferentes partes del mundo, como California, Massachusetts, Georgia, Sur y Norte de África, además ha sido utilizado para diversos fines tales como: predicciones de cambio climático, predicciones de vulnerabilidad del recurso hídrico y para conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca (Labrador et al., 2016).

Otro modelo ampliamente empleado es la herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (SWAT), desarrollada por el servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-ARS) y *Texas A&M AgriLife Research* (Espinoza, 2017). Este modelo se conforma por un conjunto de modelos que son empleados para la simulación de diferentes procesos hidrológicos (Torres-Benites1 et al., 2004). La información requerida por el SWAT es de clima, tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas (Uribe, 2010).

El Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (HEC- HMS por sus siglas en inglés) siendo un programa gratuito y de utilización a nivel internacional (Estrada y Pachecho, 2011). Este modelo se diseñó con el fin de simular procesos de lluvia-escorrentamiento en sistemas dendríticos de cuencas, por lo que es utilizado en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones y reducción del daño por inundaciones (Carrilo y Mejía, 2016).

2.1.7. Datos de cambio climático WCRP- CMIP5

Los efectos del cambio climático pueden ser estudiados con técnicas estadísticas a partir de valores observados o de la implementación de modelos globales del clima (GCM por sus siglas en inglés), los cuales representan procesos físicos fundamentales de la atmósfera (Bonilla-Ovallos y Mesa, 2017). En 2008, veinte grupos de modelación del clima se reunieron, con el fin de promover un nuevo conjunto de experimentos de modelos climáticos (Taylor et al., 2012). Estos experimentos son la quinta fase del proyecto de Intercomparación de modelos acoplados (Coupled Model Intercomparison Project- CMIP5) (Roldán et al., 2013).

Los cuatro escenarios del CMIP5 tienen una gran gama de futuros simulados, los cuales tratan prioridades, ideas y sugerencias de muchas comunidades científicas dedicadas a los modelos de clima, biogeoquímica, procesos climáticos, entre otros; de esta manera, la información puede usarse como base exploratoria de los impactos de cambio climático en un área de estudio (Armenta et al., 2016). Los modelos de última generación CMIP6 presentan mejor desempeño con respecto al CMIP5, sin embargo, siguen presentando sesgos sistemáticos que dificultan representar procesos que dependen de elevación, precipitación y temperatura (Arias et al., 2021). Además, no existe un estudio en Ecuador con datos actualizados al CMIP6, por lo que se propone este trabajo investigativo como línea base de futuras comparaciones de proyecciones del modelo CMIP5 y CMIP6.

Las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP en sus siglas en inglés), son escenarios conformados por series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de los gases de efecto invernadero (GEI), aerosoles y gases químicamente activos, uso del suelo y cobertura vegetal (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente & Agencia Estatal de Meteorología, 2017). De la misma manera, los escenarios RCP brindan una imagen de desarrollo socio-económico más realista en comparación a los escenarios sucesores SRES del cuarto informe del IPCC (Ministerio del Ambiente et al., 2017). A continuación, se describe las características de las vías de concentración en los escenarios medio y extremo (Tabla 1).

Tabla 1. Escenarios cambio climático

RCP	Descripción	Forzamiento radiactivo	Concentración de CO ₂	Evolución
RCP 4.5	Es un escenario menos extremo.	Aproximadamente 4.5 W/m ² estabilizado a partir del 2100	Aproximadamente 650 CO ₂ -eq en 2100	Estabilización sin trans-limitaciones
RCP 8.5	Es un escenario agresivo o pesimista con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero y en el que los efectos antrópicos son mayores.	8.5 W/m ² en 2100	Aproximadamente 1370 CO ₂ -eq en 2100	En aumento

Fuente: Hidalgo et al. (2021).

- **Modelo GISS-E2-R:** Las configuraciones de este modelo varían en función del grado de interactividad en la composición atmosférica, el ciclo del carbono, el modelado oceánico y el pixel atmosférico; fue creado por la NASA a una resolución de 2.5° x 2.5° (Espinoza, 2019).

Para determinar los efectos de los Modelos Climáticos Globales a escala se debe emplear métodos de *downscaling*, existen tres tipos: estadísticos, dinámicos y dinámico-estadístico (Gálvez, 2022). El *downscaling* estadístico se basa en el desarrollo de relaciones cuantitativas de variables locales de superficie (predictandos) y variables atmosféricas a gran escala (predictores) (Guanunchi, 2015). Se representa con la ecuación 2:

$$R = F(X) \quad (2)$$

Donde:

R= Predictando;

F= Función determinista o estocástica que relaciona a predictando y predictor (lineal o no lineal);

X= Predictor (presión atmosférica, humedad, etc)

- Validación de datos de cambio climático

La calidad de un modelo se mide por el uso de información validada (Bustamante, 2008). Al obtener los datos ajustados de downscaling dinámico, se realiza una evaluación entre estos y los observados para conocer si sus resultados tienen una buena representación para la región (Muñoz, 2010). Los investigadores o tomadores de decisiones utilizan pruebas estadísticas (Tabla 2), ya que estas muestran la capacidad del modelo para reproducir patrones espacio-temporales observados (Cofiño et al., 2004).

Tabla 2. Pruebas estadísticas para validación de datos de cambio climático

Test estadístico	Fórmula
Correlación R ²	$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}}$
BIAS	$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})}{N}$
RMSE	$\sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})^2}{N}}$
	Donde: ϕ_i = valor pronosticado para celda i ϕ_{iobs} = valor observado para la celda i N = número de valores analizados

2.1.8. Modelo Presión-Estado-Respuesta (PER)

El modelo PER fue desarrollado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1993), a partir del trabajo Friend y Rapport (1979), con la finalidad de obtener información que permita estructurar su trabajo sobre políticas ambientales. Los indicadores propuestos identifican las relaciones causa-efecto que están asociadas a los trabajos productivos y las dinámicas nacionales, regionales y locales (Manteiga, 2000). Precisamente, los indicadores de presión cubren las actividades humanas, tendencias, patrones de significancia ambiental, uso de los recursos, descarga de contaminantes y materiales de desechos (Ibáñez, 2012), mientras que los indicadores de estado están diseñados para mostrar la situación en el medio ambiente y recursos naturales en un periodo de tiempo (Vázquez-Valencia y García-Almada, 2018). Los

indicadores de respuesta son las reacciones colectivas que se llevan a cabo por la sociedad con la finalidad de mitigar, adaptar y revertir los efectos negativos (Sifuentes, 2009).

2.2. Marco legal

En este estudio se presenta el siguiente marco legal, el cual se distribuye de manera jerárquica según la pirámide de Kelsen (Figura 3). En cuanto a las leyes constitucionales, se señala la protección del recurso hídrico, ordenamiento territorial, salvaguardar la vida de los habitantes en caso de fenómenos naturales tales como inundaciones o deslizamientos de tierra, proteger los ecosistemas tales como bosques y páramos. Asimismo, se mencionan dos artículos (Art. 411 y Art. 414) importantes para el estudio ya que hablan acerca del manejo integral de los recursos hídricos y medidas de cambio climático y mitigación (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

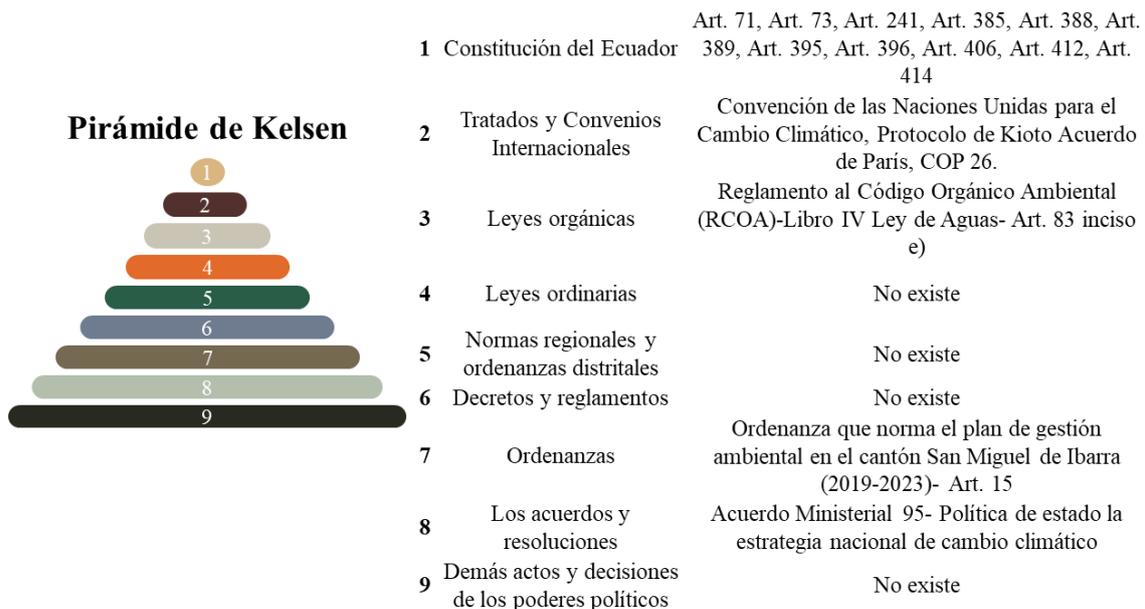


Figura 3. Sistema legal investigativo referente al cambio climático en el Ecuador

Los tratados y convenios internacionales que son acorde a la presente investigación sugieren la adaptación y mitigación del cambio climático, de la misma manera, se da importancia a la investigación de los efectos de cambio climático en diferentes áreas como suelos o recursos hídricos, que fortalecerá la toma de decisiones futuras en un contexto de manejo integral en donde se dará prioridad la vida de las personas y el buen funcionamiento de ecosistemas.

Las leyes orgánicas ecuatorianas que están dentro del tema de cambio climático son: Reglamento al Código Orgánico Ambiental (RCOA) y la Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua. En el libro cuarto del RCOA existen artículos que establecen objetivos de monitoreo, instrumentos para la gestión de cambio climático, adaptación y mitigación. Precisamente en el Artículo 258 se fomenta precautelar la vida de la población y ecosistemas tomando en cuenta los diferentes escenarios actuales y futuros del cambio climático (Reglamento al Código Orgánico del Ambiente, 2019). La ley de aguas en el artículo 83 inciso e) menciona al cambio climático para la adaptación y mitigación, protegiendo a la población (Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua, 2014).

La ordenanza que norma el plan de gestión ambiental en el cantón San Miguel de Ibarra especifica en el artículo 15 que se debe garantizar el recurso hídrico conservándolo mediante educación ambiental la cual también debe mencionar los peligros de riesgos naturales como las inundaciones (Gobierno Autónomo Descentralizado, 2020). Según el acuerdo ministerial 95 se establece como prioridad las competencias de las entidades públicas, quienes deben ser partícipes de la gestión en planes, proyectos y programas que ayuden a la adaptación (Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2013).

Capítulo III

Metodología

3.1. Descripción del área de estudio

3.1.1. Área de estudio

La subcuenca del río Tahuando se encuentra en la República del Ecuador, provincia de Imbabura; específicamente en los cantones Ibarra, Antonio Ante y Otavalo. Es perteneciente a las parroquias de Angochagua, La Esperanza, San Francisco, Sagrario, Priorato, Salinas, Imbaya y San Pablo de Lago (Figura 4). La subcuenca tiene un área de 349.88 km², su red hídrica se constituye por la quebrada de Yuracruz, quebrada San Clemente, río Cariacu, quebrada Rumipamba, quebrada Cucho de Torres, quebrada La Rinconada, quebrada Yanajaca, quebrada Santa Martha, quebrada San Pedro, quebrada Guayrapungo y quebrada El Chilco (Yáñez, 2019).

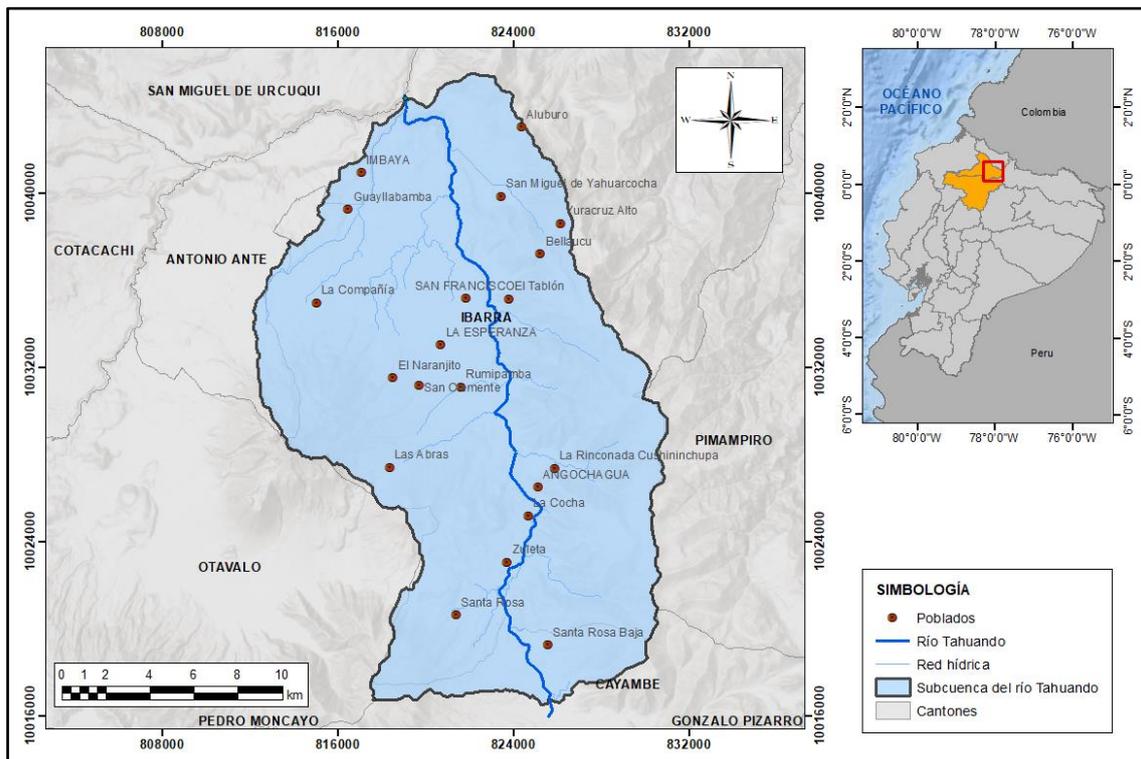


Figura 4. Ubicación de la subcuenca del río Tahuando

La delimitación se realizó en el software ArcGIS 10.8 con datos tomados del IGM, usando como base la capa de curvas de nivel a escala 1:50.000 y el modelo digital de elevación obtenida de *Open Topography* (<https://opentopography.org/>), donde se definió

el límite considerando el área de origen del río Tahuando como inicio y salida de la cuenca en el punto de captación de la acequia Rosas Pamba, la misma que provee de agua de riego a la parte media de la subcuenca (Rosas, 2009).

3.1.2. Factores climáticos

La subcuenca del río Tahuando tiene una precipitación media de 992.05 mm al año. La temperatura varía de $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Yáñez, 2019), y presenta dos tipos de climas según Pourrut (1983), los cuales son Ecuatorial frío de alta montaña y Ecuatorial mesotérmico semi-húmedo a húmedo (Figura 5). Para obtener la clasificación se utilizó datos georreferenciados del SNI (2007) y el modelo digital de elevación descargada de *Open Topography*, se realizó una interpolación de datos con la herramienta de *Kriging* (Carrera-Villacrés et al., 2016) en ArcGIS 10.8 y se usó las estaciones del INAMHI (Atuntaqui-M021, Ibarra Aeropuerto-M053, Topo-Imbabura-M321, Zuleta-M316) más cercanas a la subcuenca en ArcMap 10.8 con la finalidad de tener información precisa.

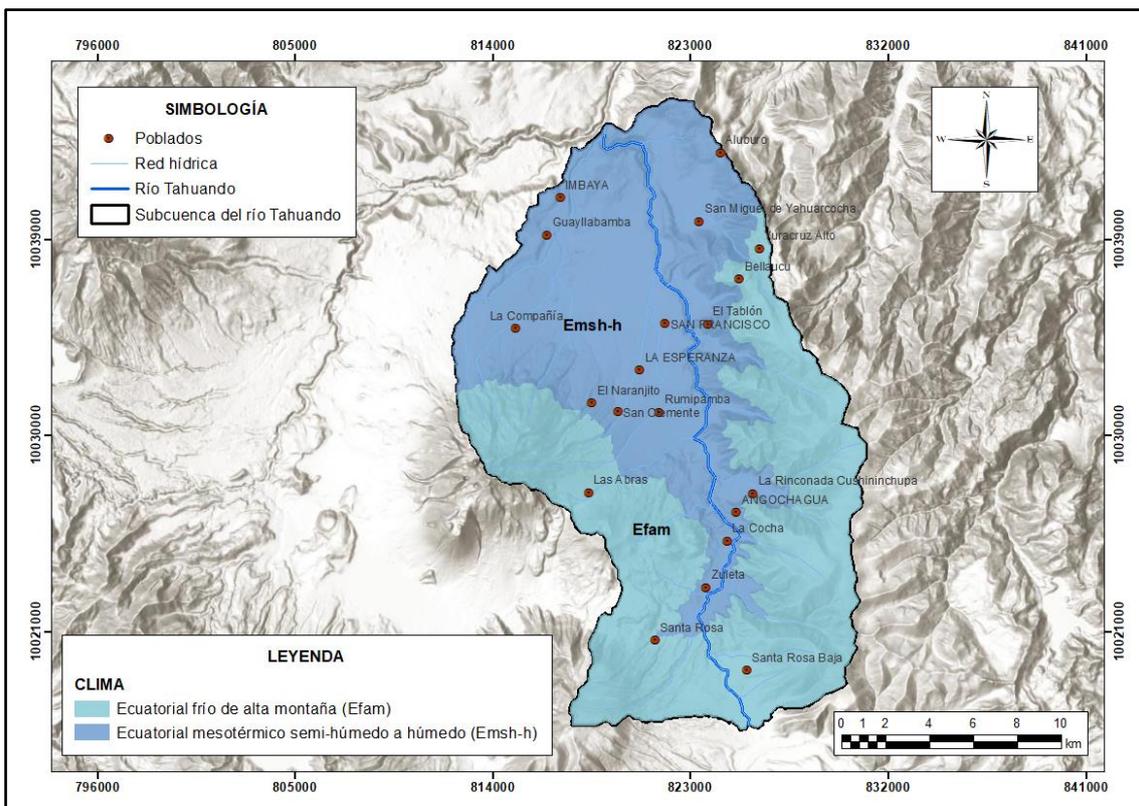


Figura 5. Tipos de clima de la subcuenca del río Tahuando según Pourrut

3.1.3. Factores topográficos

Es importante conocer las características topográficas del área de estudio ya que estas generan mayor acumulación en flujos de los sistemas de agua por medio de la escorrentía superficial y subsuperficial (Amendaño, 2018). La subcuenca tiene tipos de suelos tales como: Entisol que contienen minerales de textura moderadamente gruesa a fina y topografía entre plana a extremadamente empinada, suelo Inceptisol que son superficiales a moderadamente profundos y topografía de plana a quebrada y finalmente Mollisol que de la misma manera son superficiales a moderadamente profundos con topografía ligeramente inclinada a extremadamente empinada (Figura 6). Las características del relieve benefician a la presencia de numerosas quebradas donde se originan cauces de agua y pequeños cursos de agua que desembocan a otros cauces. Esta subcuenca alimenta alrededor de 43 cauces de agua, ríos y quebradas (Yáñez, 2019).

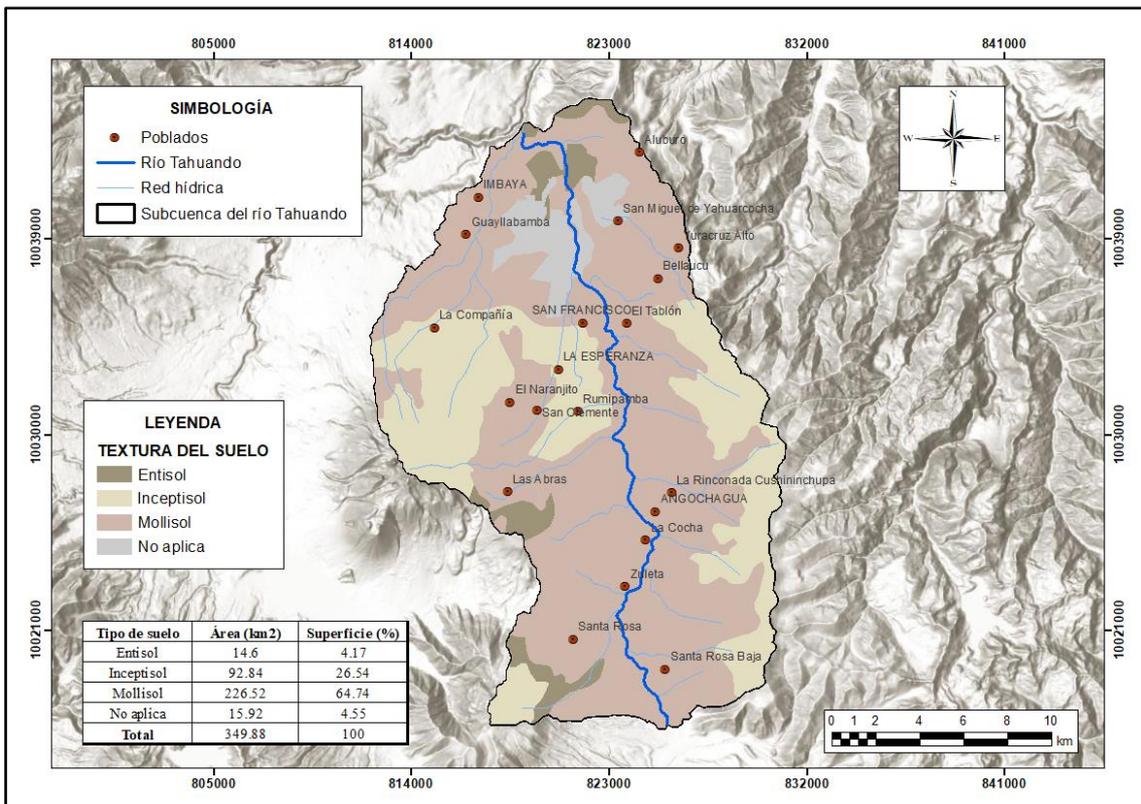


Figura 6. Tipo de suelo de la subcuenca del río Tahuando

Fuente: Geoportal del Agro Ecuatoriano (2017)

3.2. Métodos

3.2.1. Análisis de datos climáticos y disponibilidad hídrica superficial

Estos análisis se realizaron de manera ordenada y sistemática para poder obtener resultados acertados, cumpliendo con el primer objetivo de este trabajo de titulación.

3.2.1.1. Obtención de datos de precipitación

Los datos diarios de precipitación media fueron obtenidos a partir del satélite CHIRPS desde la plataforma *Climate Engine* (<https://app.climateengine.com/climateEngine>) para un periodo de 5 años (2016-01-01/2021-12-31), con una resolución de 4800 m (1/20-deg) en mm y para el periodo de 1991-2015 se utilizó la librería de IRI/LDEO Climate Data (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/>). En ambas plataformas se ingresó la coordenada de la estación Otavalo (78.275W 0.225N) por ser la estación meteorológica más cercana a la subcuenca del río Tahuando con datos de precipitación completos, además, (Yáñez, 2019) menciona que esta estación tiene características meteorológicas similares a la unidad hidrográfica del río Tahuando.

Se utilizó información satelital con la finalidad de calibrar el modelo hidrológico escogido, ya que los datos de los modelos de cambio climático se presentan en resoluciones espaciales similares a 0.05° y 0.25° (5.5 y 28 Km) correspondientes a las de la precipitación satelital CHIRPS.

3.2.1.2. Validación de datos

Para la validación de datos se utilizó la estación meteorológica Otavalo entre el periodo de 1991 al 2015. Cabe mencionar que se validaron series de datos mensuales y anuales ya que a nivel diario no fue posible obtener resultados a pesar de haber utilizado el paquete de interpolación de RegRAIN en Rstudio. Esta información ayudó a observar la eficiencia del modelo hidrológico creado con los datos satelitales de CHIRPS, tomando en cuenta que en la actualidad los modelos son creados con estas bases de datos satelitales. Con el fin de corroborar la información, se realizó una doble validación de datos con la información satelital obtenida de CHIRPS. Para esto se aplicó el método de regresión

lineal tanto para el conjunto de datos mensuales y anuales (ecuación 2). En las sumas anuales se eliminaron tres datos atípicos correspondientes a los años 1993, 1994 y 2015, se considera que en periodos históricos el INAMHI pudo haber tenido fallas al momento de registrar las precipitaciones.

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (2)$$

Donde:

n = Número de observaciones

X = Datos de estación meteorológica

Y = Datos satelitales

3.2.1.3. Modelamiento hidrológico HEC-HMS

El modelo hidrológico requiere de las características principales de la subcuenca como su ubicación, por lo que se la delimitó con una base topográfica y un modelo digital de elevación raster descargada de la página *Open Topography* (<https://opentopography.org/>), además, se utilizó la capa de ríos del IGM en escala 1:50.000.

El área total de la subcuenca se la determinó mediante la proyección de la línea divisoria de aguas sobre el plano horizontal, expresada en kilómetros (km), con la herramienta *Calculate Geometry* en ArcMap 10.8 (Rosas, 2009). Posterior a esto, se clasificó a partir de la Tabla 3, detallando los rangos del área y denominaciones respectivas.

Tabla 3. Rangos del área de la cuenca

Área (ha)	Descripción
Menos 10000	Microcuenca
10000- 100000	Subcuenca
100000- 300000	Cuenca
Mayor 300000	Sistemas Hidrológicos

Fuente: SENAGUA (2012)

El primer paso para el modelamiento hidrológico en HEC-HMS es dividir la subcuenca, ya que para reflejar la realidad de una cuenca es necesario ingresar los

diferentes parámetros de cada una de las subdivisiones, los mismos que se encuentran en el método de pérdidas, transformación, flujo base y tránsito de avenidas (Carrilo y Mejía, 2016). Por lo tanto, para obtener datos precisos en este estudio y distribuir los píxeles de la información meteorológica se subdividió a la cuenca en cuatro partes en el mismo software con la herramienta *Sub basin Creation*, misma que permitió definir los parámetros que caracterizan las zonas.

3.2.1.4. Modelo de pérdidas de la precipitación total

Para obtener el mapa de cobertura vegetal se utilizó método de clasificación supervisada con áreas de entrenamiento. Por disponibilidad de información se empleó una imagen Sentinel- 2B del año 2020, la misma que fue descargada de la plataforma *Land Viewer* (<https://eos.com/es/products/landviewer/>).

Una vez cargada la imagen en ArcGIS 10.8, se proyectó a coordenadas WGS_1984_UTM_Zone_17S y se recortó con el límite de la subcuenca, codificando las zonas de acuerdo con la Tabla 4. Con la creación de un nuevo *shapefile* llamado áreas de entrenamiento, se seleccionaron las categorías de uso y cobertura en forma de polígonos con la herramienta Clasificación de Imagen y se clasificó según el color de píxel (Tabla 9) (Rosero, 2017).

Tabla 4. Colores de píxeles para cada cobertura vegetal dentro de la subcuenca del río Tahuando

Cobertura vegetal	Color Píxel
Agua	Negro- verde
Páramo	Café claro
Zona Poblada	Blanco
Cultivos	Amarillo- naranja
Vegetación arbustiva	Verde
Suelos con escasa cobertura vegetal	Verde claro
Bosques	Verde oscuro

Finalmente, con el método de Clasificación de Máxima Verosimilitud, se seleccionó el archivo de muestras y se identificó los colores de cada cobertura vegetal. Este mapa es de gran importancia ya que es el primer paso para obtener el número de curva, apartado que se explicará más adelante.

En la determinación del grupo hidrológico se utilizó el *shapefile* de suelos, descargado del Geoportal del Agro Ecuatoriano (<http://geoportal.agricultura.gob.ec/>), el cual cuenta con información de textura de suelo de todo el Ecuador a una escala de 1:25.000 del año 2019. Con esta capa en el software ArcGIS 10.8 se procedió a clasificar la textura del suelo con su grupo hidrológico según la Tabla 5 y se realizó el correspondiente mapa de grupo hidrológico de la subcuenca del río Tahuando.

Tabla 5. Grupo hidrológico según la textura del suelo

Textura del suelo	Grupo Hidrológico
Arenosa	A
Areno- limosa	
Franco- arenosa	
Franca	
Franco- arcillosa- arenosa	B
Franco- limosa	
Franco- arcillosa	
Franco- arcillo- limosa	C
Arcillo- arenosa	
Arcillosa	D

Fuente: Montoya y Juan Rey (2019)

En cuanto al cálculo de número de curva, se utilizaron los mapas generados anteriormente de cobertura vegetal y grupo hidrológico. Se realizó una nueva reclasificación que tiene los tipos de cobertura vegetal, número de reclasificación y la nueva descripción (Tabla 6). Esta información fue procesada en ArcGis 10.8

Tabla 6. Valores reclasificados para generar el número de curva de una cuenca

<i>Clasificación original</i>		<i>Reclasificación</i>	
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>	<i>Número</i>	<i>Descripción</i>
11	Agua a cielo abierto		
90	Humedales leñosos	1	Agua
95	Humedales herbáceos emergentes		
21	Poblados en espacios abiertos		
22	Poblados de baja intensidad	2	Residencial media
23	Poblados de mediana densidad		
24	Poblados de alta densidad		
41	Bosques secos		
42	Bosques verdes	3	Bosque
43	Bosques mixtos		
31	Tierra fértil		
52	Arbustos/matorrales		
71	Pastizales/herbáceas	4	Agricultura
81	Pasto/heno		
82	Cultivos		

Esta información fue intersecada con los valores de la Tabla 7, proceso que también fue realizado en el mismo software.

Tabla 7. Reclasificación según la cobertura vegetal de la subcuenca del río Tahuando

<i>Uso del Suelo</i>	<i>Reclasificación</i>
Agua	1
Bosque	3
Páramo	4
Cultivos	4
Zona Urbana	2
Suelos con escasa cobertura vegetal	4
Vegetación arbustiva	4

Se realizó una nueva reclasificación a los valores de cobertura vegetal y el grupo hidrológico con la Tabla 8. Con estos procedimientos se calculó el número de curva, utilizando el componente diseñado por Hydrologic Engineering Center (2003) HEC-GeoHMS , mediante la herramienta Utilidad-Generador de CN en ArcGIS 10.8.

Tabla 8. Valores reclasificados según el grupo hidrológico

N°	Uso	Grupo			
		A	B	C	D
1	Agua	100	100	100	100
2	Residencial media	57	72	81	86
3	Bosque	30	58	71	78
4	Agricultura	67	77	83	87

El número de curva para cada subdivisión se lo calculó con la ecuación 5, correspondiente a una media ponderada (Mendoza y González, 2017). El área impermeable con el porcentual de las zonas con valores de N/A (zonas urbanas, cubiertas de invernaderos, sistemas de agua) en el número de curva y se aplicó la ecuación 6 (Pilco, 2013).

$$Media\ Ponderada = \frac{A1*NC+A2*NC+A3*NC+.....}{Área\ Total} \quad (5)$$

$$Aimpermeable = \frac{\sum \text{Áreas impermeables}}{\text{Área total de la subdivisión}} * 100 \quad (6)$$

3.2.1.5. Modelo de transformación SCS Unit Hydrograph

La longitud del río se obtuvo de las características de la subcuenca en HEC-HMS, el cual se calcula automáticamente con el DEM utilizado en la delimitación de la subcuenca, ya que a través de este se obtiene la red de drenaje de la subcuenca. Las características de la subcuenca calculadas también incluyen el centroide de cada subdivisión con la *Basin Centroid*, el centroide del río Tahuando y la pendiente de cada subdivisión (Pilco, 2013).

El tiempo de concentración se lo obtuvo mediante el método de Kirpich (Ibáñez et al., 2015) con la ecuación 7. Luego de obtener el tiempo de concentración se procedió a calcular el tiempo de retraso (*lag time*) por cada subdivisión de la subcuenca, el cual fue el 60% del tiempo de concentración expresado en minutos (Umaña, 2014).

$$Tc = 0.06628 * \frac{L^{0.77}}{i^{0.385}} \quad (7)$$

Donde:

L = longitud del cauce más largo en Km;

i = pendiente media de la cuenca en %;

T_c = tiempo de concentración expresado en horas.

El caudal base se seleccionó en el editor de componentes de cada subdivisión y se utilizó el flujo base de depósito lineal por ser el único que mantiene la masa dentro de la subcuenca (Hydrologic Engineering Center, 2022), el cual tiene un GW inicial, fracción, coeficiente y reservorios, por lo que se asignó los valores 0.01, 0.2, 40 y 3 respectivamente. Una vez obtenidos estos datos se procede a ingresar la información por cada subdivisión en el HEC-HMS.

3.2.1.6. Modelo de tránsito de avenida

El modelo de tránsito de avenida es por donde circula el hidrograma, para la cual se utilizó el método de *Muskingum Cunge* usando parámetros de entrada para cada subdivisión, entre estos parámetros está el largo total del tramo (m), la pendiente del cauce (m/m) y una sección transversal del río (Figura 8) (Martínez, 2015). Esta herramienta se la encuentra dentro de los parámetros del HEC-HMS.

Cabe recalcar que este método modeló el almacenamiento volumétrico de los hidrogramas a lo largo de los cauces con dos almacenamientos conceptuales, los cuales son: en forma de cuña y en forma de prisma. La ecuación de este método es:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (8)$$

Donde:

I_j = caudal entrante en un tramo en el instante j ;

Q_j = es caudal saliente del mismo tramo en el instante j ;

C_1 , C_2 y C_3 son constantes que dependen de los parámetros k y x , representando un tiempo de circulación o de tránsito, tiene dimensiones de tiempo y un coeficiente de almacenamiento adimensional.

3.2.1.7. Modelo meteorológico

En la opción *Meteorologic Model* del HEC-HMS se seleccionó la subcuenca del río Tahuando y la configuración se mantuvo por defecto.

3.2.1.8. Series de tiempo

Al igual que el modelo meteorológico, las series de tiempo se crean en componentes. Este procedimiento se lo realizó cuatro veces ya que para el estudio se requería configurar las series de tiempo para cada subdivisión de la subcuenca (Campo et al., 2020). Esto se debe a que no existe la misma precipitación para el área total de la subcuenca. Una vez creadas las series de tiempo se calculó el porcentaje de superficie por cada subdivisión (Figura 18). El resultado de este cálculo fue multiplicado por las precipitaciones diarias del satélite CHIRPS en el periodo de años del 2000 al 2021, los mismos que fueron validados con la estación meteorológica Otavalo e ingresados al HEC-HMS.

3.2.1.9. Control del modelo y validación

El control y validación del modelo hidrológico se lo realizó en función de los caudales aforados en el punto UTM X=823528; Y=10029705, ubicado cerca al sector Rumimpamba siendo la parte media del río Tahuando (Figura 7).

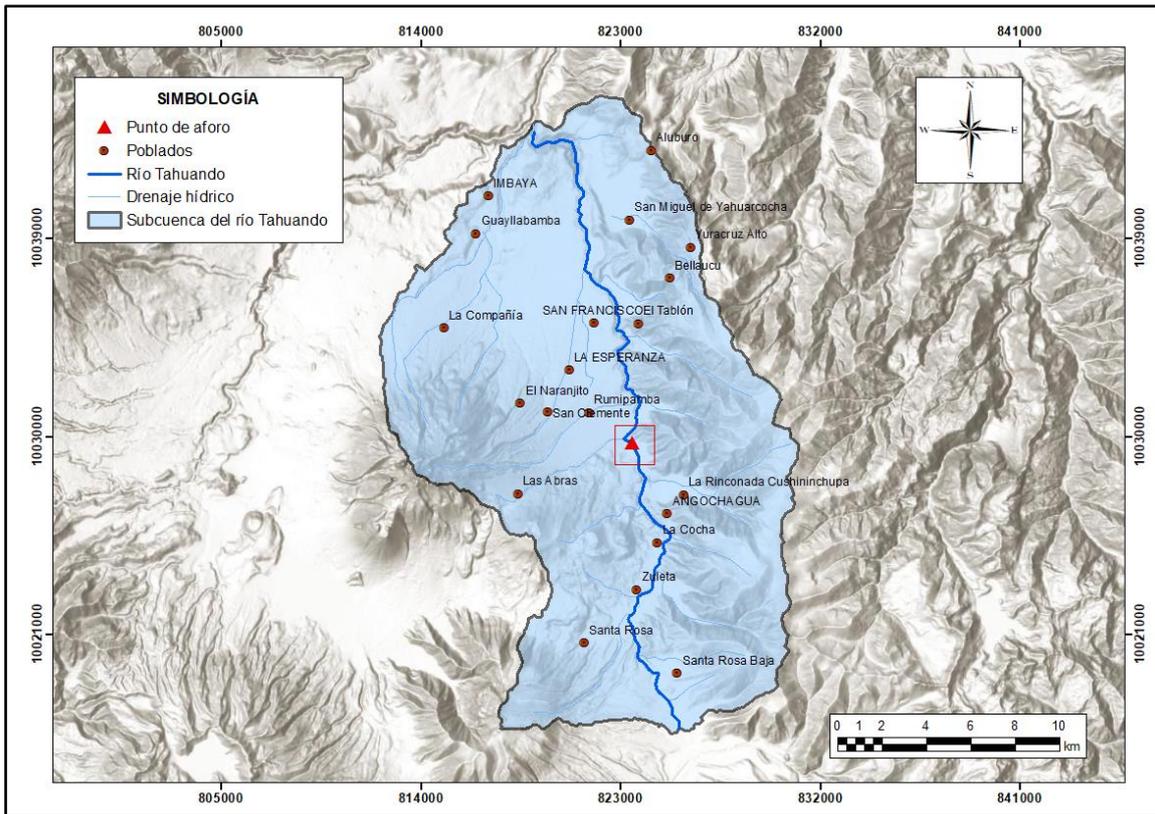


Figura 7. Punto de aforo en la subcuena del río Tahuando

Las mediciones se realizaron en las fechas: 16/10/2021, 30/10/2021 y 15/12/2021, con un molinete electromagnético (OTT MF Pro) (Figura 8), que mide la velocidad (m/s) de los flujos en cauces descubiertos. Se realizó tres mediciones por la disponibilidad del instrumento.



Figura 8. Molinete electromagnético (OTT MF Pro)

Se midió la velocidad del flujo de agua en 13 secciones del punto de control del cauce, a un distanciamiento de 0.5 m y a tres profundidades como se muestra en la Figura 10.

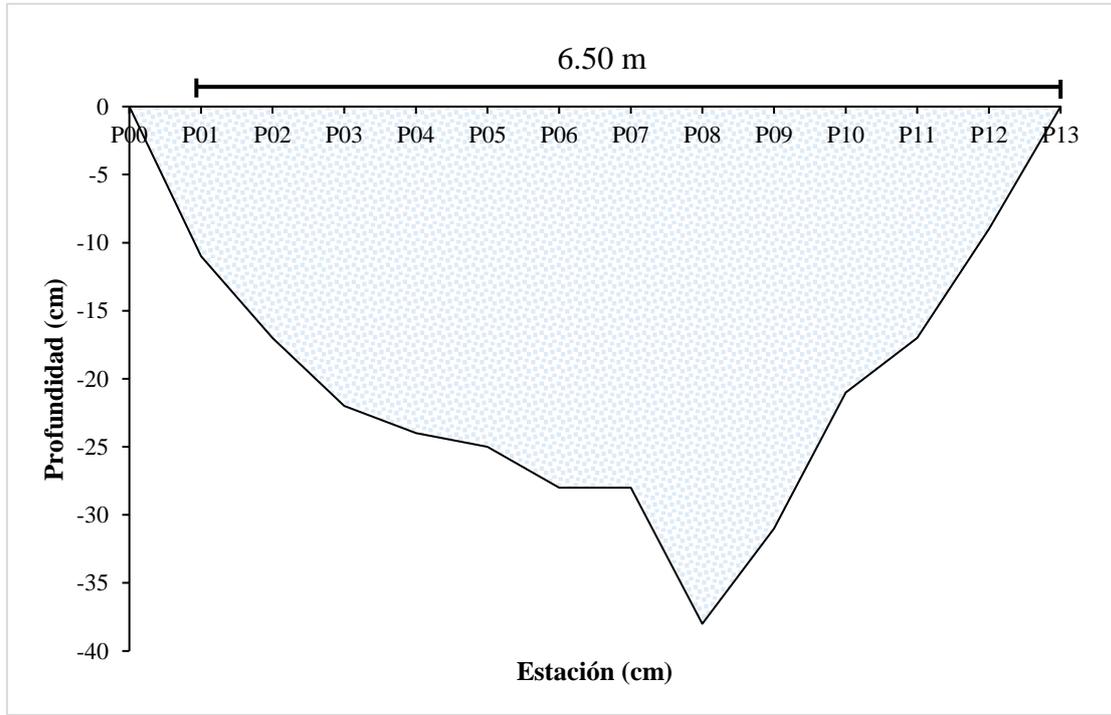


Figura 9. Secciones de control del cauce

Se calculó el área mojada del cauce (ecuación 9) y se obtuvo el caudal de cada tramo usando la ecuación 10, posteriormente se obtuvo un valor promedio, que se estableció como el caudal medio por cada fecha.

$$A = (b + zh) * h \quad (9)$$

Donde:

A = Área mojada del cauce (m^2);

b = Anchura del fondo (m);

h = Altura máxima del agua en el centro del canal (m);

z = Pendiente lateral, cambio horizontal por cambio vertical unitario (m).

$$Q = A * V \quad (10)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s);

A = Área (m^2);

V= Velocidad media (m/s)

El modelo hidrológico de la cuenca se desarrolló con el punto de cierre el aforo levantado y se obtuvo las corridas de caudal. Se seleccionó los caudales simulados en las mismas fechas que los caudales observados y se realizó una comparación entre observados y simulados, empleando el método de regresión lineal.

Como control del modelo se estableció 5 minutos, por lo que adicionalmente se calculó el promedio del caudal diario y se estableció los límites de confianza con una significancia de 0.05. Finalmente se validó el modelo hasta tener valores de R^2 superiores a 0.7 y hasta que los datos observados estén dentro de los límites de confianza de los caudales simulados.

3.2.2. Modelos climáticos y proyección hídrica

3.2.2.1. Datos climáticos en diferentes escenarios

Los datos climáticos en diferentes escenarios fueron proporcionados por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica; quienes obtuvieron esta información mediante un inventario de los GCM disponibles en bases de datos del proyecto CMIP5, considerando datos diarios y mensuales para precipitación. El periodo de datos procesados en *downscaling* dinámico y disponibles es de 2011 al 2070, para este estudio se seleccionó el modelo GISS-E2-R correspondiente a la *NASA Goddard Institute* por tener un buen desempeño en estudios realizados en Ecuador (Espinoza, 2019).

Para la extracción de información de cambio climático, se realizó un código de programa en Matlab (Anexo 1), el cual seleccionó la longitud, latitud, tiempo y precipitación para la estación meteorológica Otavalo. Una vez obtenidos los datos, se ingresaron al HEC-HMS, tomando en cuenta los porcentajes de superficies de cada subcuenca.

En la metodología de validación de estos datos, se filtraron las estaciones que tenían una cantidad de datos aceptables de al menos el 85% de información para los siguientes periodos: 1981-2010, 1976-2005, 1981-2005. Se realizó el factor de ajuste de

las series (ecuación 11) de estos modelos para el periodo 1981-2005, buscando reducir los valores observados (estación meteorológica Otavalo) y los valores simulados (datos de cambio climático).

$$X_{i,j} = \alpha_j X_{i,j}^m \quad (11)$$

Donde:

$X_{i,j}$ = Valor ajustado de la variable X del año i-ésimo y del mes j-ésimo;

$X_{i,j}^m$ = Valor simulado de la variable X del año i-ésimo y del mes j-ésimo,

α_j = Factor de ajuste para el mes j-ésimo, el cual se calcula como la ecuación 12:

$$\alpha_j = \frac{\overline{X_j^o}}{\overline{X_j^m}} \quad (12)$$

Donde:

$\overline{X_j^o}$ = Promedio multianual de la serie de datos observados para el mes j-ésimo; y

$\overline{X_j^m}$ = Promedio multianual de la serie de datos simulados para el mes j-ésimo.

Con los datos de los modelos globales ajustados se hizo una evaluación de estos comparándolos con los datos observados usando tres métricas, las cuales son correlación, BIAS, RMSE (Armenta et al., 2016). Al obtener esta información, se evaluó en promedio para todo el país y se creó un listado de los 15 modelos, considerando que el modelo es muy bueno si su correlación es mayor a 0.50, bueno si el valor está entre el rango de 0.45 y 0.49 y no tan bueno si es inferior a 0.449.

3.2.2.2. Proyecciones hídricas a un futuro cercano y lejano

Para conocer la disponibilidad hídrica frente a escenarios de cambio climático, se distribuyó la información para un futuro cercano (2022-2045) y un lejano (2046-2070), posterior a esto se realizó los promedios anuales de precipitación y de caudales para cada periodo bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5, de esta manera se obtuvo proyecciones conservadoras y extremas respectivamente (Manzanilla et al., 2018). Para este estudio se tomó en cuenta solo estos dos escenarios porque a corto plazo no se pronostica una disminución de emisiones de efecto invernadero a nivel global a pesar del aumento de sensibilización a la población y creaciones de tratados internacionales (Fernández, 2020).

Por la disponibilidad de información, se establecieron dos periodos de proyecciones (medio y lejano) para que los conjuntos de datos sean comparables entre sí. De la misma manera se realizó una regresión entre los promedios anuales de precipitación y el caudal obtenido por el modelo y se obtuvo R^2 .

3.2.2.3. Efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica

La finalidad de las hipótesis planteadas en esta investigación es conocer si existen efectos significativos en la disponibilidad hídrica de la subcuenca, por lo tanto, se realizó pruebas estadísticas en ambos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), comprobando si la información cumple con los requisitos paramétricos o no paramétricos.

Para la prueba de normalidad se aplicó Shapiro- Wilks (ecuación 13) al conjunto de promedios de precipitación en el periodo actual, cercano y lejano, al igual que los caudales simulados en los mismos periodos. Esta prueba plantea una hipótesis nula para una distribución normal con un nivel de significancia de 0.05 y una hipótesis alternativa donde la distribución no es normal. La información fue procesada en el programa InfoStat.

Ho: La distribución es normal

H1: La distribución no es normal

Por lo que si $p > 0.05$ es distribución normal; si $p < 0.05$ no es distribución normal.

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

Donde:

$x_{(i)}$ = número que ocupa la i-ésima posición en la muestra (ordenada de menor a mayor);

\bar{x} = media muestral;

a_i = coeficientes tabulados.

Al conjunto de datos de residuos absolutos se le aplicó la igualdad de varianzas de Levene (ecuación 14), la cual considera una hipótesis nula donde todas las varianzas

son iguales y una alternativa que indica que al menos dos varianzas son diferentes. Para esta prueba se utilizó InfoStat.

Ho: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_a^2$ Todas las varianzas son iguales

Ha: Al menos dos varianzas son diferentes

Si $p > 0.05$ es todas las varianzas son iguales; si $p < 0.05$ al menos dos varianzas son diferentes.

$$F = \frac{\frac{\sum_{i=1}^t n_i (\overline{D}_i - \overline{D})^2}{(t-1)}}{\frac{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{n_i} (D_{ij} - \overline{D}_i)^2}{(N-t)}} \quad (14)$$

Donde:

t = número de tratamientos;

y_{ij} = muestra de observación j del tratamiento i ;

n_i = número de observaciones del tratamiento i ;

$N = n_1 + n_2 + \dots + n_t$ = número total de piezas de datos;

\overline{y}_i = media de datos muestrales del tratamiento i ;

$D_{ij} = |y_{ij} - \overline{y}_i|$ = desviación absoluta de la observación j del tratamiento i media;

\overline{D}_i = promedio de los n_i absolutos del tratamiento i ;

\overline{D} =promedio de todas las N desviaciones absolutas.

Como se comprobó que el aglomerado de datos no presenta normalidad se realizó la prueba de Kruskal Wallis en el programa InfoStat. Esta prueba tiene el fundamento de la ecuación 14.

Ho: Las medias de la población son iguales

H1: Las medianas de la población no son iguales

Si $p > 0.05$ significa que las medias son iguales; si $p < 0.05$ al menos dos poblaciones son diferentes.

$$K = (N - 1) \frac{\sum_{i=1}^g n_i (\overline{r}_i - \overline{r})^2}{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} - \overline{r})^2} \quad (14)$$

Donde:

n_i = número de observaciones en el grupo i ;

r_{ij} = rango (entre todas las observaciones) de la observación j en el grupo i;

N = número total de observaciones entre todos los grupos;

$\bar{r}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} r_{ij}}{n_i}$, $\bar{r} = (N+1)/2$ es el promedio de r_{ij} .

3.2.3. Lineamientos técnicos de protección de la subcuenca del río Tahuando frente a escenarios de cambio climático

Para definir los lineamientos técnicos se realizó un árbol de problemas, el cual consistió en identificar las posibles causas del conflicto (Figura 10). El problema principal representa el tronco, las raíces son las causas y las ramas los efectos, reflejando una interrelación entre todo el elemento (Hernández-Hernández y Garnica-González, 2015).

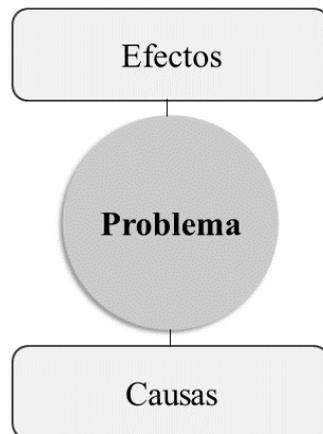


Figura 10. Árbol de problemas

Fuente: Martínez y Fernández (2019).

Posterior a delimitar los problemas de la subcuenca entorno al cambio climático se realizaron propuestas mediante el modelo presión-estado-respuesta (PER). Este modelo se basa principalmente en las actividades humanas que impactan de manera directa o indirecta (presiones) sobre el ambiente, afectando la calidad y cantidad de recursos naturales (estado) (Polanco, 2006). En cada acción contemplada se desarrolla un indicador de presión, estado y respuesta como se indica en la Figura 11.

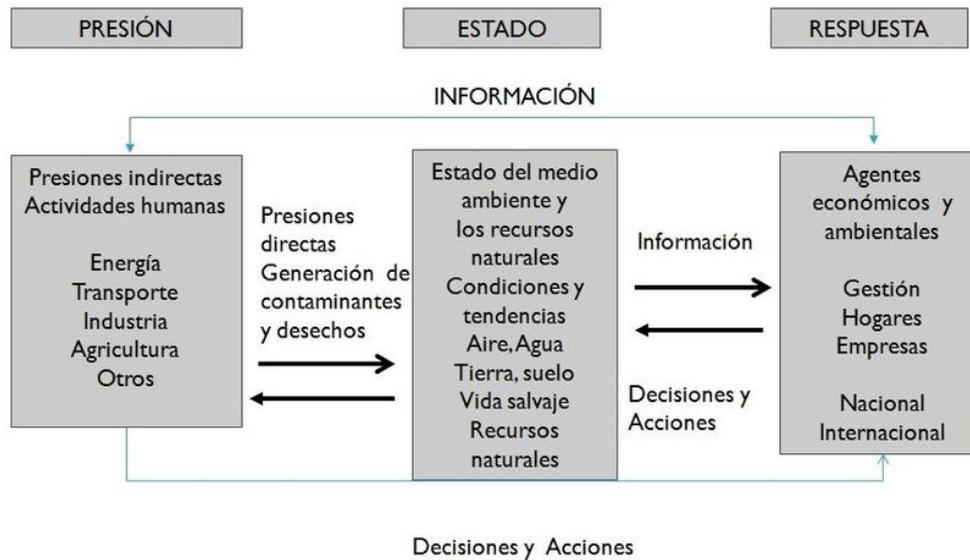


Figura 11. Sistema Presión- Estado- Respuesta

3.3. Materiales y equipos

Para este estudio se utilizaron los siguientes instrumentos, programas y materiales (Tabla 9).

Tabla 9. Materiales y Equipos

Software	Equipos de computo	Información
Hec-HMS 4.9	Procesador Intel Core i7 10TH GEN	Modelo Digital de elevación USGS NASA (geotif)
ArGIS 10.8	Impresora	Información climática (precipitación), información de cambio climático CIMP5
RStudio, Matlab, InfoStat	Material de escritorio	Información hidrométrica generada por modelos
Microsoft Office 2016	Disco duro externo 4 TB	Cartas topográficas del IGM e imágenes satelitales Sentinel de años actuales

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1. Análisis de datos climáticos y disponibilidad hídrica superficial

En los análisis de datos climáticos y disponibilidad hídrica superficial se realizaron diferentes pasos, por lo cual son presentados en esta sección y dan la respuesta correspondiente al objetivo 1 propuesto en el estudio.

4.1.1. Datos de precipitación

La serie temporal diaria del periodo (1991-2015) de la estación meteorológica Otavalo se presenta en la Figura 12. Estos datos presentan altas precipitaciones entre los años de 1996 y 1997 al igual que en los años 2014 y 2015. Según esta información las precipitaciones más altas están aproximadamente a los 60 mm y las más bajas en 1 mm. También se puede observar que no existen precipitaciones constantes a lo largo de este periodo.

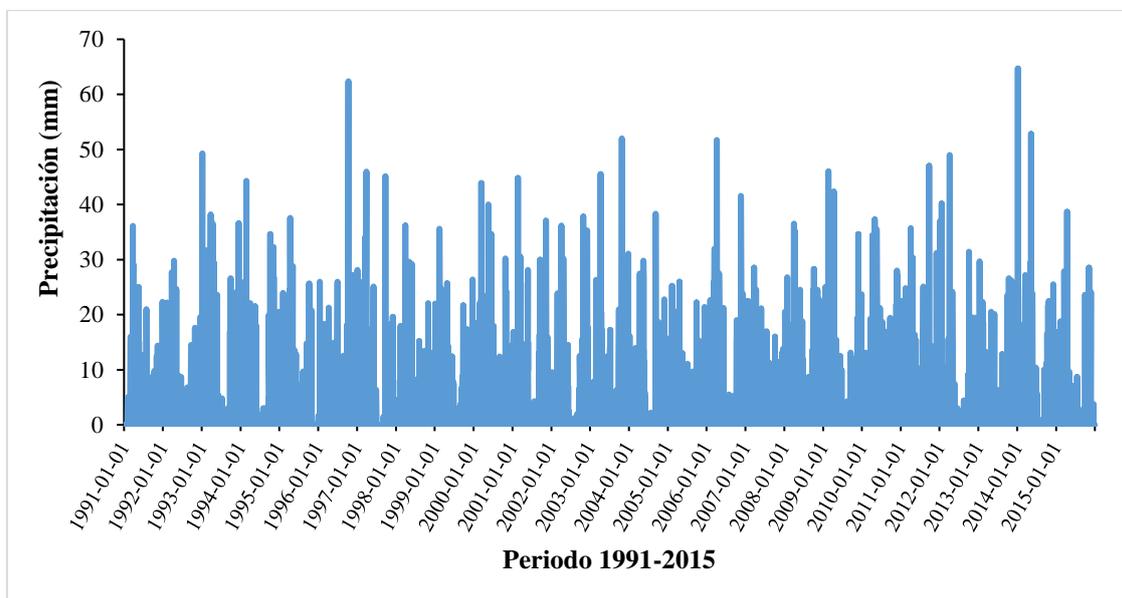


Figura 12. Serie temporal de precipitación de la estación meteorológica Otavalo (M0105)

Los datos satelitales CHIRPS del periodo 1991-2021 muestran precipitaciones aproximadas por encima de los 80 mm en el periodo del 2011 al 2013 (Figura 13). Los

valores más bajos rodean los 5 mm, y los más altos, exceptuando ese periodo, están entre los 70 mm. La información obtenida es valiosa para el estudio hidrológico ya que contiene datos históricos y actuales, lo que no sucede con la estación meteorológica Otavalo que solo cuenta con datos completos para un periodo de tiempo corto.

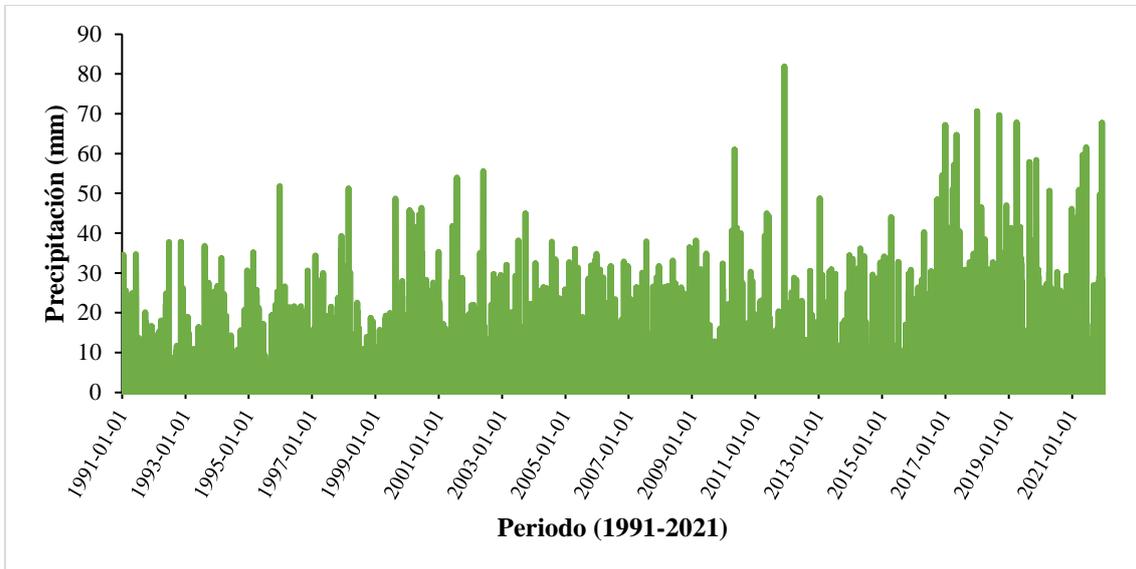


Figura 13. Serie temporal de precipitación de los datos satelitales CHIRPS

4.1.2. Validación de datos de precipitación

4.1.2.1. Validación de datos mensuales de precipitación

En la comparativa entre las sumas mensuales de la estación meteorológica Otavalo y las satelitales CHIRPS (Figura 14), se observa que en los meses marzo, abril y mayo presentan mayor diferencia entre ellos, los cuales se los cataloga como datos atípicos. Analizando la gráfica se puede apreciar que el mes con mayor precipitación fue diciembre con más de 100 mm, y una precipitación constante entre enero hasta noviembre. Los meses con mayor similitud entre ambas bases de datos son septiembre, octubre y noviembre.

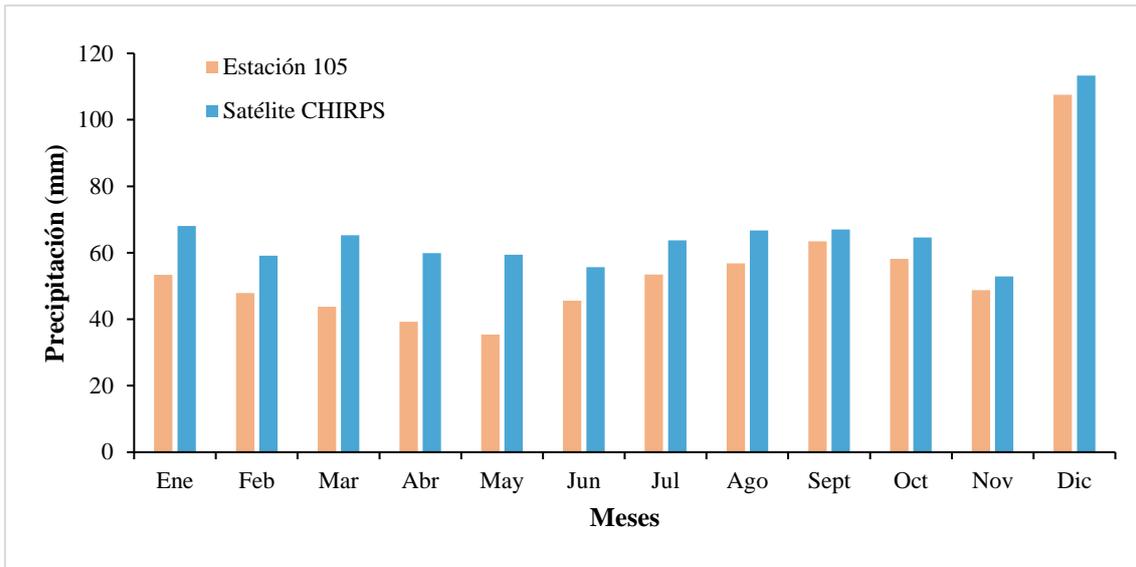


Figura 14. Comparativa mensual de información de precipitación de la estación Otavalo y el satélite CHIRPS

A pesar de las diferencias observadas en el anterior gráfico se obtiene un buen ajuste de datos mensuales estimados por el satélite CHIRPS y la estación meteorológica Otavalo, por lo que su R^2 es de 0.868 (Figura 15), indicando que los valores satelitales tienen validez para la construcción del modelo meteorológico y para futuras proyecciones climáticas entrando en un rango de valor satisfactorio. Calle (2016), obtiene buenos ajustes en sus datos satelitales y observados de manera mensual, por lo que este método es certero al momento de validar datos de precipitación.

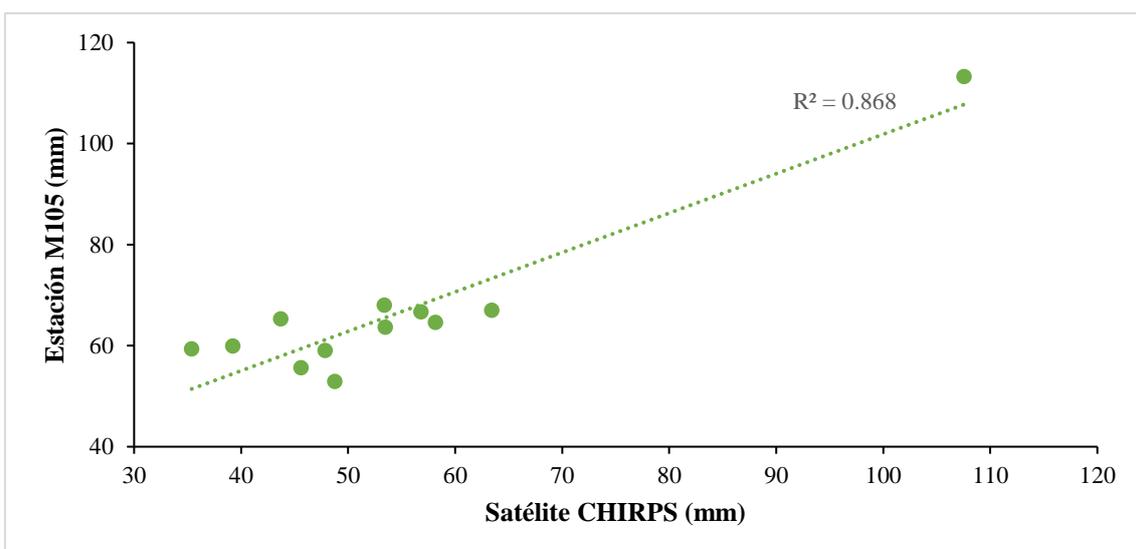


Figura 15. Relación de los datos mensuales de precipitación estación Otavalo y satélite CHIRPS

4.1.2.2. Validación de datos anuales de precipitación

Los datos anuales de la estación meteorológica Otavalo y satélite CHIRPS presentan una diferencia entre los años 1993, 1994, 2005 y 2010 por lo que son tomados como datos atípicos (Figura 16). En 1999 y 2008 existió mayor precipitación con un valor por encima de los 1200 mm, mientras que el año con menor precipitación fue en el 2005 con menos de 200 mm. Entre esta comparativa también se puede observar la similitud de la estación meteorológica y el satélite CHIRPS en los años 1991, 1995, 2000, 2003 y 2011.

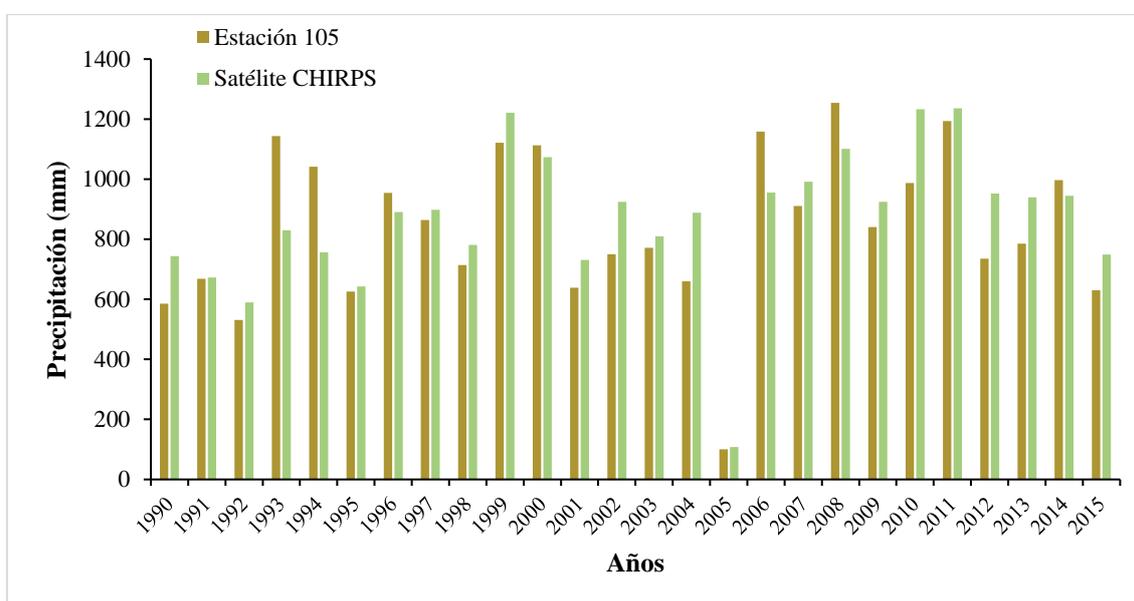


Figura 16. Comparativa anual de información de precipitación de la estación Otavalo y el satélite CHIRPS

Aun cuando se ha obtenido datos atípicos en las comparativas anuales, se destaca un buen ajuste de información (Figura 17). Para obtener resultados positivos en esta correlación se eliminaron tres puntos especiales siendo los años 1993, 1994 y 2005. Gavilán (2019) afirma que, la validación anual puede mostrar estrechas correlaciones entre la precipitación medida y estimada, dando validez al uso de datos satelitales, estas correspondencias se pueden observar en su estudio.

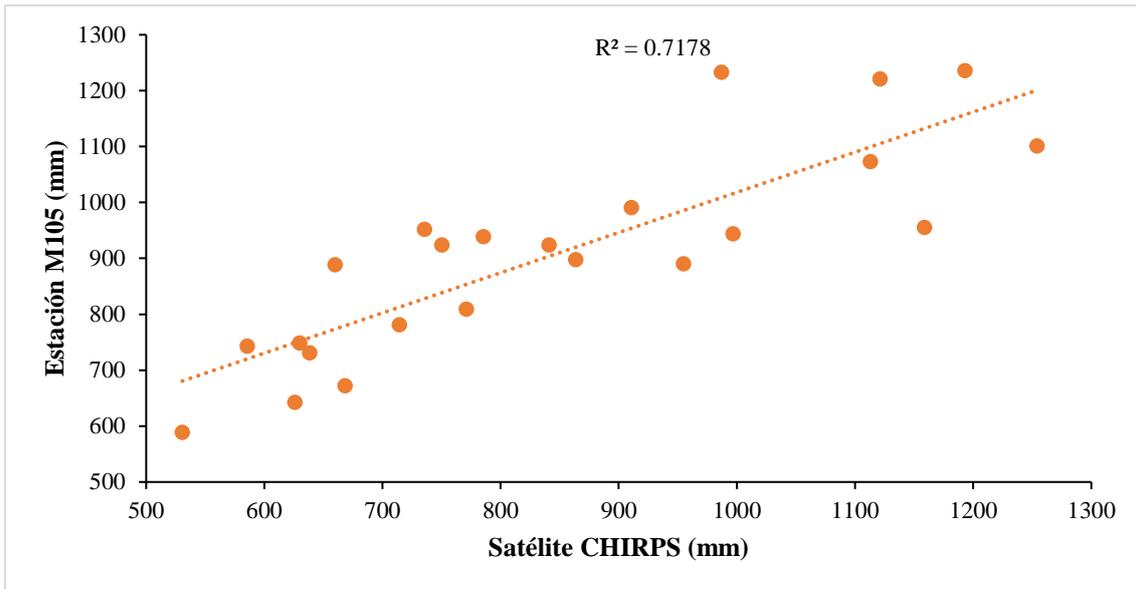


Figura 17. Relación de los datos anuales de precipitación de la estación Otavalo y el satélite CHIRPS

4.1.3. Modelamiento hidrológico HEC-HMS

4.1.3.1. Cálculo de área de la subcuenca y subdivisiones

La cuenca fue subdivida en cuatro partes de manera automática del HEC-HMS (Figura 18). Diez (2016) manifiesta que, no existe criterios para fijar números concretos de subdivisiones, sino que el profesional decide analizando la variabilidad espacial de la cuenca y precipitación, al igual que en este estudio los autores dividen en cuatro subcuencas.

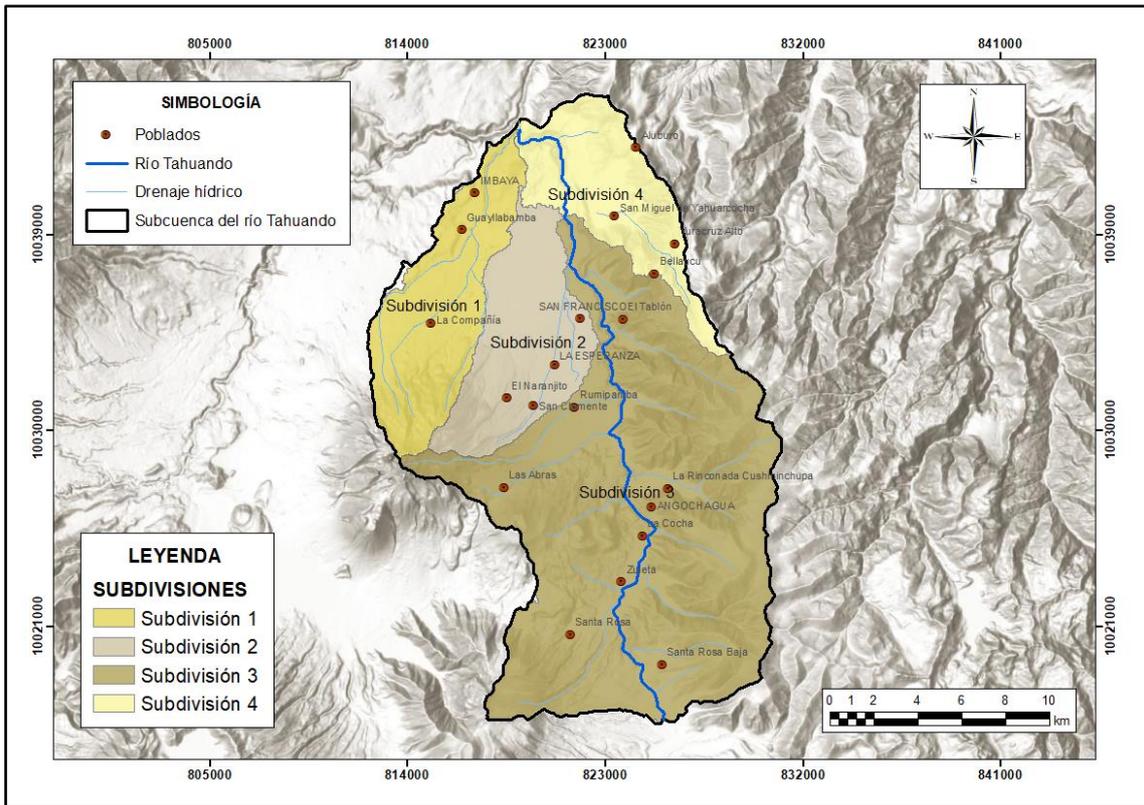


Figura 18. Subdivisiones de la subcuenca del río Tahuando generadas en el HEC-HMS

El área y porcentaje de superficie de cada una de las subdivisiones se visualizan en la Tabla 10. Entre las subdivisiones se determina que la SB3 tiene mayor porcentaje de superficie y la menor es la SB4. Mientras que SB1 y SB2 tienen un área y porcentaje similar entre sí.

Tabla 10. Áreas y porcentajes de superficies de cada subdivisión de la subcuenca

Subdivisión	Área (km ²)	Superficie (%)
SB1	50.16	13
SB2	47.03	14
SB3	210.75	6
SB4	41.00	13
Total	348.94	100

4.1.4. Modelo de pérdidas de la precipitación total

4.1.4.1. Cobertura vegetal de la subcuenca

La subcuenca del río Tahuando está compuesta por siete distintas coberturas vegetales, las cuales son agua, bosque, cultivos, páramo, suelos con escasa cobertura vegetal, vegetación arbustiva y zona urbana. Según la Figura 19 la cobertura vegetal más abundante es el páramo y los bosques.

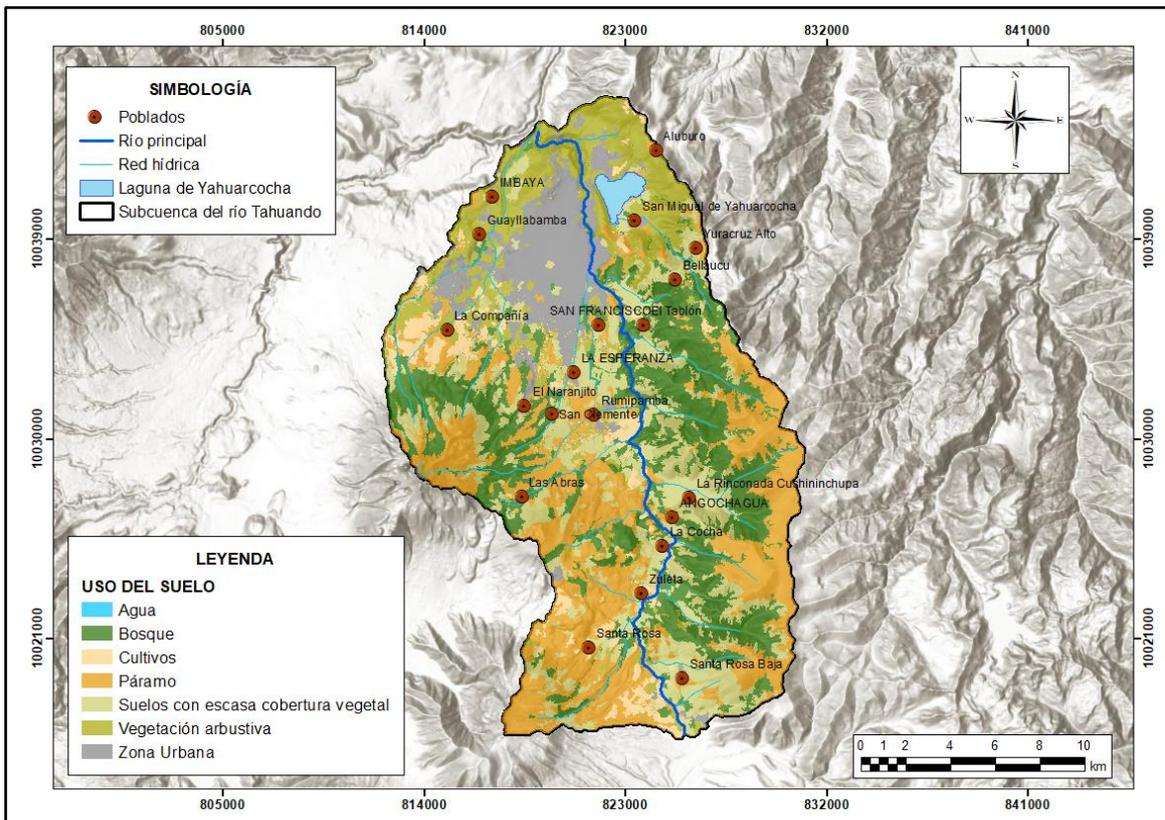


Figura 19. Uso del suelo de la subcuenca del río Tahuando

Yáñez (2019) afirma que las coberturas que existen en la subcuenca del río Tahuando son: páramo en mayor porcentaje de superficie, bosque nativo, bosque plantado, cultivos, construcciones antrópicas, pastizales, vegetación arbustiva, vegetación herbácea y la de menor superficie la unidad hidrográfica. En la Tabla 11 se puede constatar los resultados del estudio mencionado, donde se observa mayor porcentaje de superficie para el páramo y menor para agua.

Tabla 11. Área y porcentaje de superficie de la cobertura vegetal de la subcuenca del río Tahuando

Cobertura vegetal	Área (km²)	Superficie (%)
Agua	2.80	0.80
Bosque	84.94	24.28
Páramo	93.18	26.63
Cultivos	14.70	4.20
Zona Urbana	34.98	10.00
Suelos con escasa cobertura vegetal	72.61	20.76
Vegetación arbustiva	46.62	13.33
Total	349.83	100

4.1.4.2. Grupo hidrológico de la subcuenca

Existen cuatro tipos de grupos hidrológicos en la subcuenca (Figura 21), al grupo A le corresponde la textura de suelo arenosa o areno-limosa, este grupo está presente en un 60.62%. En el grupo B están los suelos franco-arenosos, francos, franco-arcillosos-arenosos, franco-limosos en un porcentaje del 10.86%, mientras que el grupo C se clasifica para los suelos franco-arcillosos, franco-arcillo-limosos, y arcillo-arenosos con un porcentaje de 6.46%, siendo el menor en la subcuenca, en el grupo D están los suelos arcillosos con el porcentaje 15.46%, finalmente, está la clasificación N/A que da lugar a las zonas impermeables y tiene un porcentaje de 6.60%.

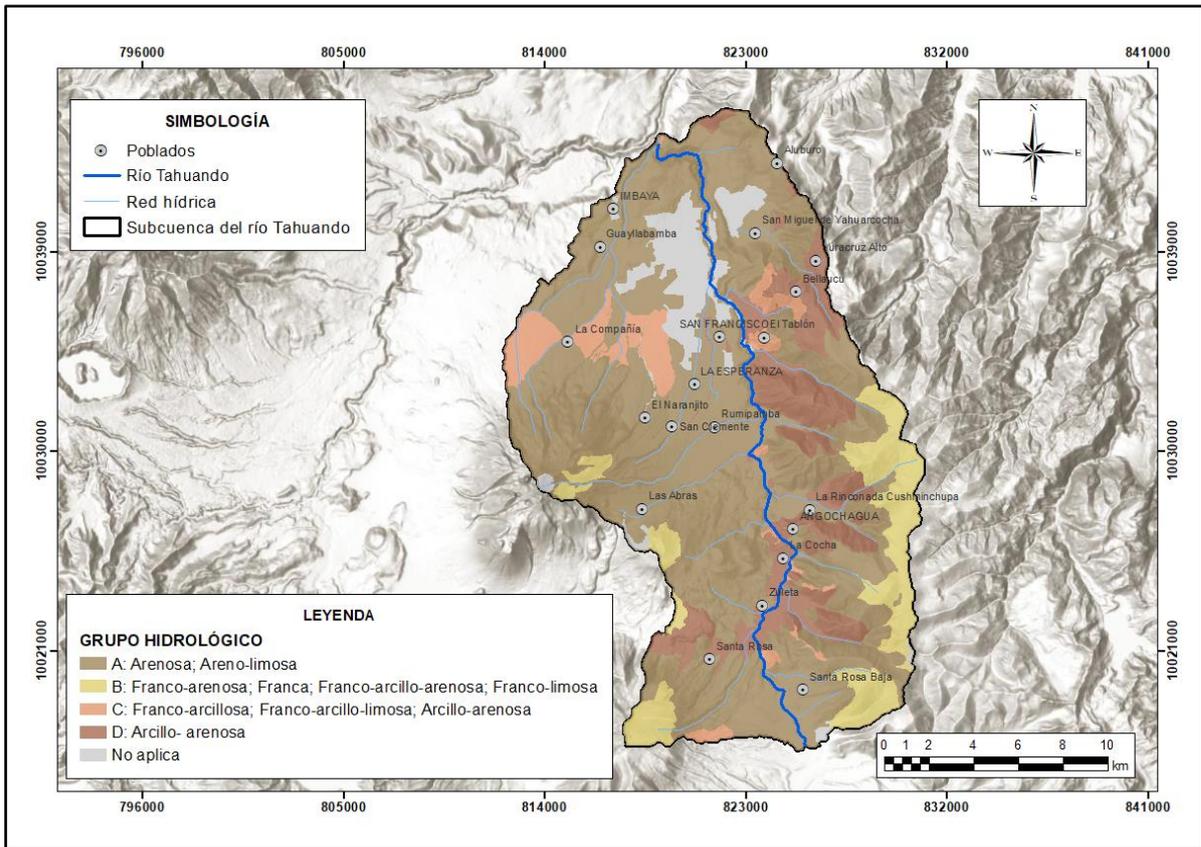


Figura 20. Textura del suelo y grupo hidrológico de la subcuenca del río Tahuando

Fuente: Pacheco Moya et al. (2018)

4.1.4.3. Número de curva

Por cada subdivisión se calculó un número de curva, los mismos son superiores a 60 pero no mayores a 70. La subdivisión 3 que tiene mayor porcentaje de superficie tiene un número de curva de 65. El menor número de curva le corresponde a la subdivisión 2. Carvajal y Mercado (2017) mencionan que, la combinación de mapa de coberturas y el mapa de grupos hidrológicos de suelo generó su resultado de número de curva. Con este método aplicado en la subcuenca del río Tahuando se encuentran cuatro valores diferentes de número de curva (Figura 21). Un número de curva (CN) con valor a 100 indica que toda la lluvia escurre y un CN de 1 determina que toda la lluvia se infiltra (Lavao, 2014), por esta razón se considera que la subcuenca tiene una infiltración media en las 4 subdivisiones.

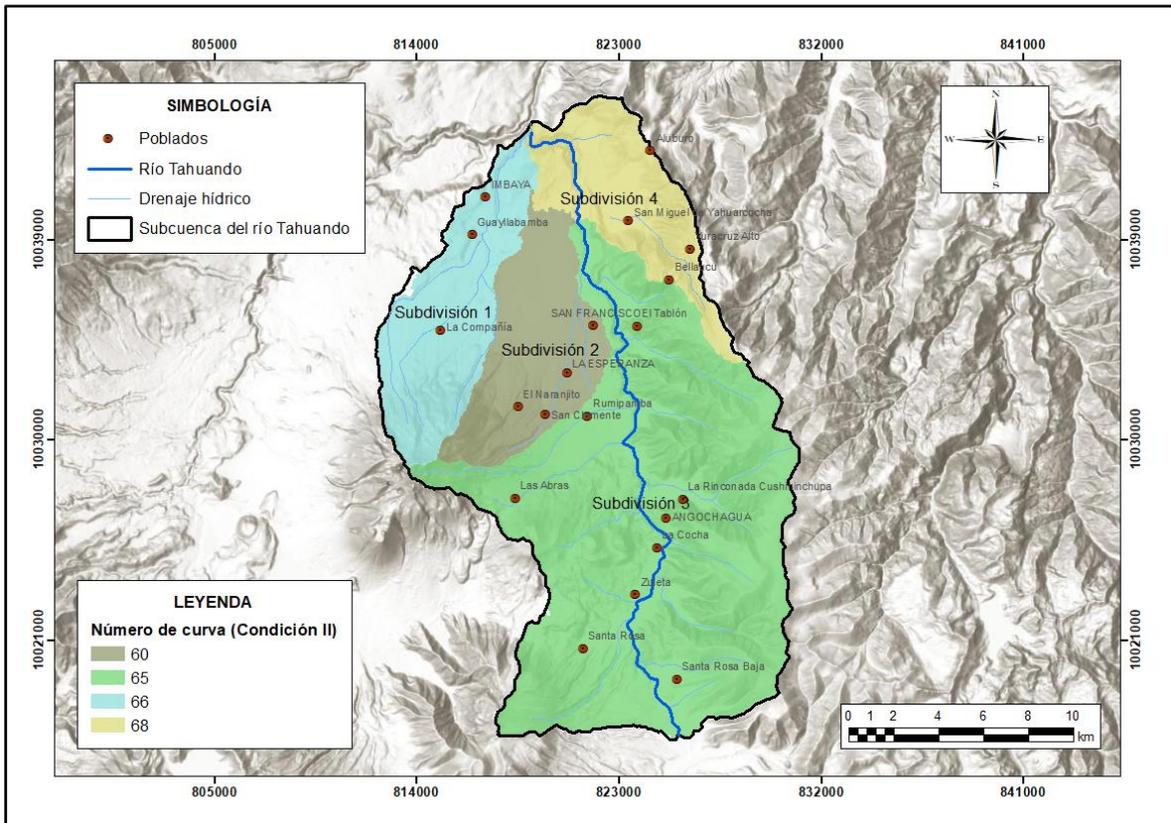


Figura 21. Número de curva de las subdivisiones de la subcuenca del río Tahuando

Uno de los cálculos importantes para el modelamiento es el porcentaje de impermeabilidad. Cabrera (2017) no aplica este parámetro por tener zonas impermeables insignificantes, sin embargo, en la subcuenca de este estudio se tiene un buen porcentaje de zona urbana por lo que si fue requerido. En la Tabla 12 se presenta el porcentaje de impermeabilidad por subdivisión, y se evidencia un mayor porcentaje de impermeabilidad en la SB2 donde existe mayor asentamiento humano.

Tabla 12. Porcentaje de impermeabilidad de cada subdivisión

Subdivisión	Superficie (%)
SB1	1.52
SB2	23.06
SB3	1.78
SB4	10.81

4.1.5. Modelo de transformación SCS Unit Hydrograph

4.1.5.1. Longitud del río

Previo al cálculo de tiempo de concentración se obtuvo la longitud de río, en donde los valores obtenidos se presentan en la Tabla 13. De la misma manera, López et al. (2012) obtiene resultados de los tramos de cauce de cada una de las subcuencas. La subdivisión 3 es la que mayor longitud de río tiene debido al área que abarca.

Tabla 13. Longitud de río de cada subdivisión de la subcuenca

Subdivisión	Longitud de río (km)
SB1	15.94
SB2	12.85
SB3	27.56
SB4	13.59

4.1.5.2. Tiempo de concentración y tiempo de retraso

La Tabla 14 presenta el tiempo de concentración y de retraso de cada una de las subdivisiones. Como el tiempo de concentración está en función de la longitud del río, la subdivisión 3 tiene un mayor tiempo de concentración y de retraso. Los tiempos de retraso se ingresaron en el modelo del HEC-HMS como un parámetro requerido.

Tabla 14. Tiempo de concentración y tiempo de retraso de cada subdivisión

Subdivisión	Tiempo de concentración (h)	Tiempo de retraso (min)
SB1	1.53	55.08
SB2	1.32	47.52
SB3	3.45	124.20
SB4	1.43	51.48

4.1.5.3. Caudal Base

Goñi et al. (2008), afirma haber obtenido resultados positivos en su simulación con un método de depósito lineal, además, de que facilita la modelación con HEC-HMS

en cuencas montañosas. En la Tabla 15 se observan los datos ingresados al software, en la cual GW 1 Inicial es 0.01, GW 1 Parcial es 0.2, GW 1 Coeficiente es 40 y 3 reservorios.

Tabla 15. Método de depósito lineal para el modelo de transformación del HEC-HMS

Subdivisión	GW 1 Inicio	GW 1 Fracción	GW 1 Coeficiente	GW 1 Reservorios
Subdivisiones	0.01	0.2	40	3

4.1.6. Modelo de Tránsito de avenida

4.1.6.1. Selección de modelo de tránsito

Koussis (2009) examinó modelos de tránsito con los métodos Kalinin Miljukov y Muskingum, por lo que aconsejó utilizar el segundo por ser más flexible y destacar la importancia correcta de la división de tránsitos según unidades morfológicas similares. En la Tabla 16 se presenta los cálculos realizados por el HEC-HMS en el método de Muskingum Cunge. Baláž et al. (2010) afirman que los resultados de este método son válidos y sirven para los casos con suficientes datos de calibración.

Tabla 16. Resultados del método Muskingum Cunge

<i>Muskingum Cunge</i>	Parámetro calculado
Tipo inicial	Descarga= entrada
Largo (m)	6742.49
Pendiente (m/m)	0.05755
N de Manning	0.25
Método espacio-tiempo	Auto DX Auto DT
Método de índice	Celeridad
Índice de celeridad (m/s)	8.58
Forma	Ocho puntos
Izquierda de dotación n	0.25
Derecha de dotación n	0.25

La sección transversal realizada por el método Muskingum se representa en la Figura 22, en el cual se muestran los 8 puntos. Este resultado se basa en una serie de simulación bidimensional simplificada que facilitó el uso y la correcta definición del modelo

hidrológico. Martínez (2015) afirma que, esta metodología del HEC-HMSS describe la sección representativa de un tramo homogéneo de un cauce.

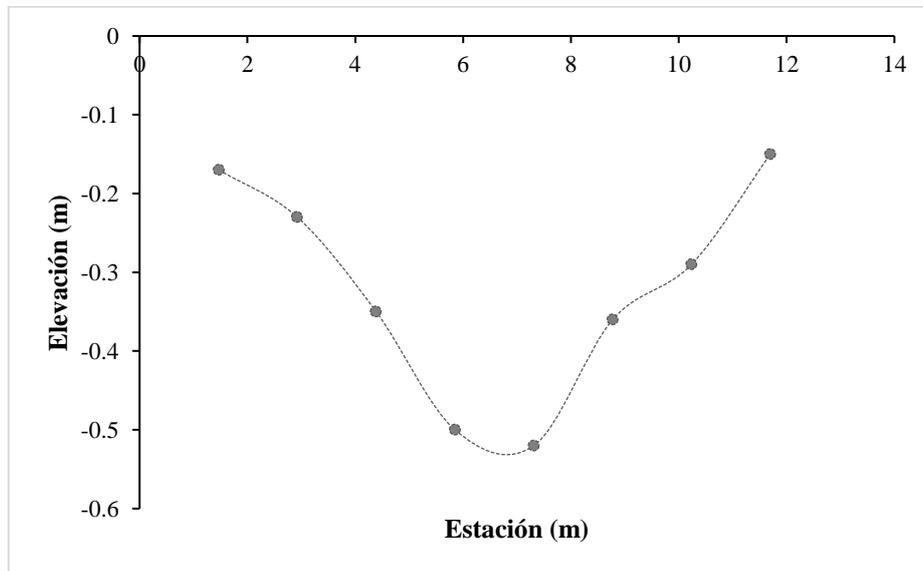


Figura 22. Método Muskingum Cunge 8 puntos

4.1.7. Modelo meteorológico

4.1.8. Series de tiempo

Se representan las cuatro series de tiempo de cada subdivisión, las mismas que fueron validadas previamente con la estación meteorológica Otavalo (Figura 23). Esta gráfica muestra el periodo desde el año 2000 al 2021, siendo el periodo actual en los análisis que se mostrarán más adelante.

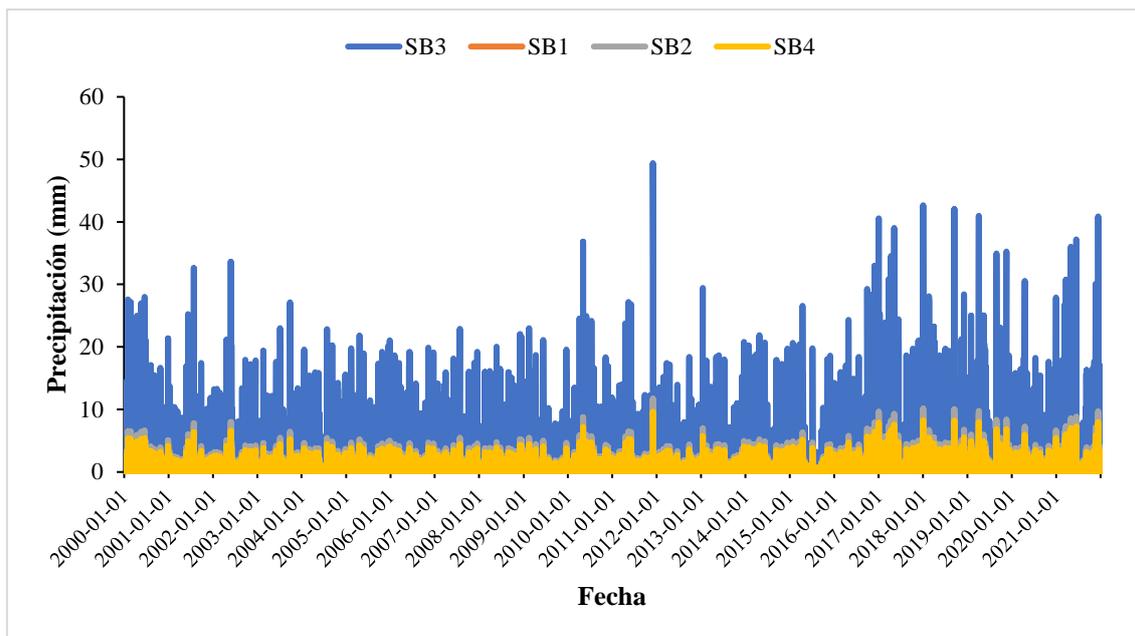


Figura 23. Series temporales del satélite CHIRPS para cada subdivisión

4.1.9. Control del Modelo y Validación

Existe una semejanza en el caudal aforado y el caudal simulado de las distintas fechas de toma de datos en campo (Tabla 17). Angulo & Saavedra (2018) realizan la validación de su modelo comparando volúmenes de caudales simulados y reales medidos por 3 días a la misma hora obteniendo resultados positivos. De la misma manera que el estudio mencionado, en la validación de esta investigación se obtiene valores que están dentro de los intervalos de confianza. En el Anexo 2 se observan las gráficas del HEC-HMS. Álvarez (2018) destaca haber realizado una validación del modelo con datos históricos y datos de caudales en un periodo de 2 años, por lo que obtuvo resultados de pruebas estadísticas como Nash-Sutcliffe, Coeficiente de correlación de Pearson, RMSE y PBIAS.

Tabla 17. Intervalos de confianza de los caudales aforados y simulados

Fecha	Caudal Aforado	Caudal Simulado	Error estándar	L. izq. (95%)	L. der. (95%)
16/10/2021	0.42	0.38	0.04	0.34	0.42
30/10/2021	0.72	0.79	0.09	0.70	0.88
15/12/2021	1.01	1.03	0.03	1.00	1.06

La relación entre caudal simulado y caudal aforado tiene un buen ajuste (Figura 25) por lo tanto, el modelo meteorológico estaría validado con datos de campo y tendría un alto nivel de confianza para conocer la disponibilidad hídrica de la subcuenca y sus respectivas proyecciones climáticas en distintos escenarios.

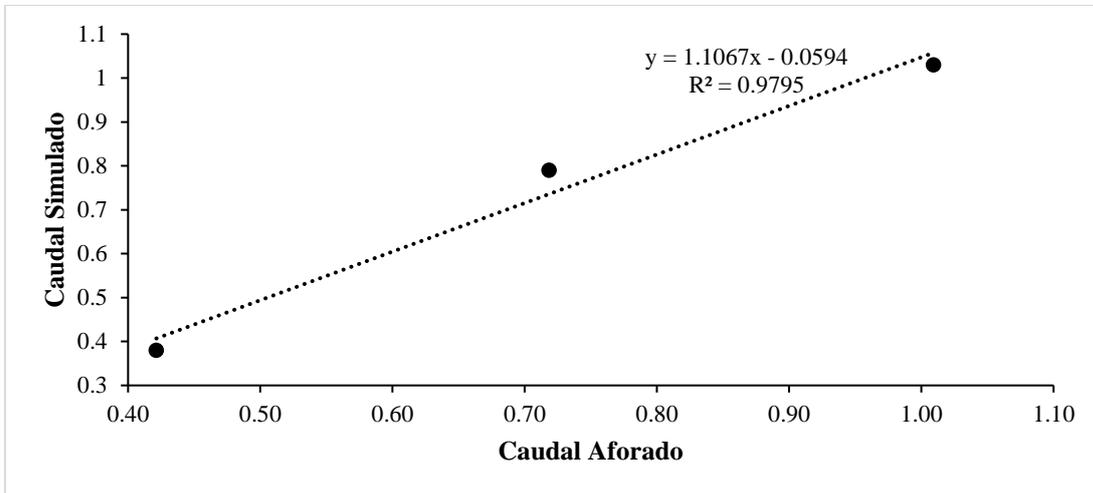


Figura 24. Relación entre caudal simulado y caudal aforado

4.1.10. Disponibilidad hídrica 2000-2021

La proyección de la disponibilidad hídrica de la subcuenca del río Tahuando para el periodo 2000-2021 muestra un aumento de caudal desde el año 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021, en relación con los anteriores años donde el caudal se mantenía por debajo de los 4.10 m³/s (Figura 25). El punto máximo del caudal de la subcuenca se presentó en el año 2021 con 5.97 m³/s. Dando como respuesta a la primera pregunta directriz, el cambio climático afectó a la oferta hídrica aumentando el nivel de caudal del río ya que en el 2016 el caudal llegó a los 2.68 m³/s. En el 2017 creció a 5.67 m³/s. Adicional, se observa una línea tendencia que muestra el incremento de caudal en el periodo 2000-2020.

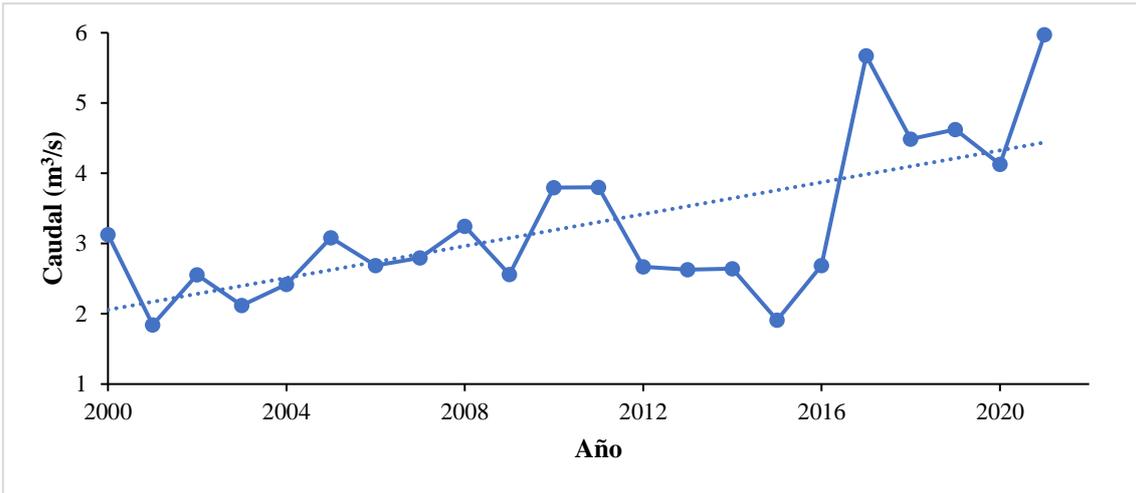


Figura 25. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2000-2021

La relación que existe entre el caudal calculado por el HEC-HMS y los promedios de la precipitación obtiene un R^2 de 0.99 por lo que tiene un buen ajuste de datos (Figura 26). Además, con este resultado se interpreta que la precipitación es directamente proporcional al caudal, es decir si la precipitación aumenta, el caudal de la subcuenca lo hará también. Pizarro-Tapia et al. (2011) relacionó de la misma manera ambas variables, obteniendo un R^2 de 0.94

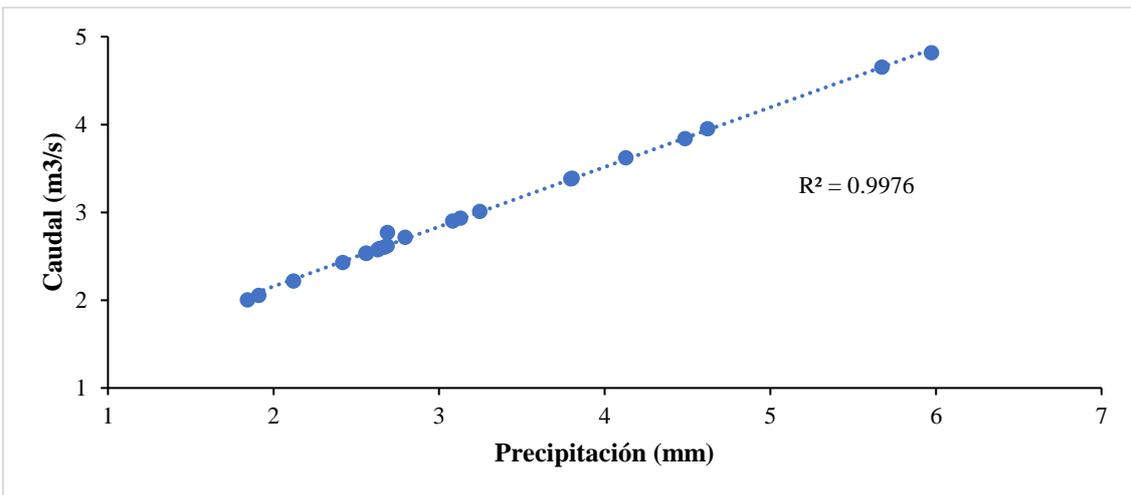
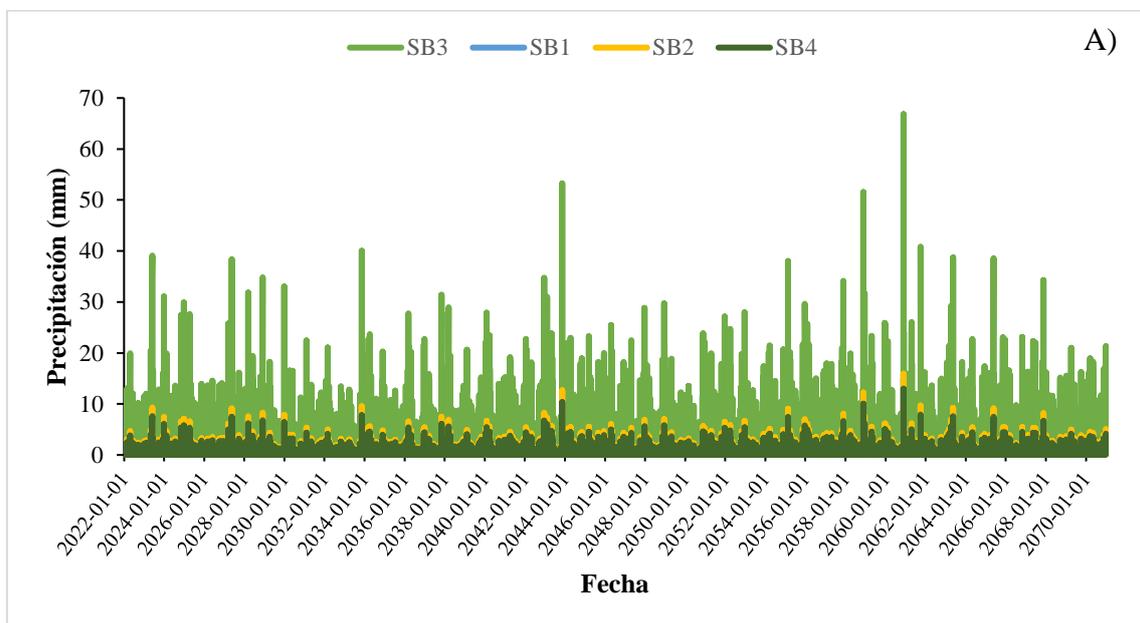


Figura 26. Relación de los promedios de precipitación y caudal en el periodo 2000-2021

4.2. Proyecciones hídricas

4.2.1. Datos climáticos para el escenario CMIP5_GISS-E2-R.rcp45

La Figura 27 presentan los datos climáticos para el escenario RCP 4.5 (A) y RCP 8.5 (B) por porcentaje de superficie de cada subdivisión de la subcuenca del río Tahuando para el periodo 2022-2070. Llamocca (2022) menciona que estos modelos tienen un comportamiento similar, sin embargo, la precipitación en un escenario RCP 4.5 es menor que una distribución del RCP 8.5, ya que en el último mencionado existe mayor concentración de gases invernadero e implica en una mayor distribución espacial.



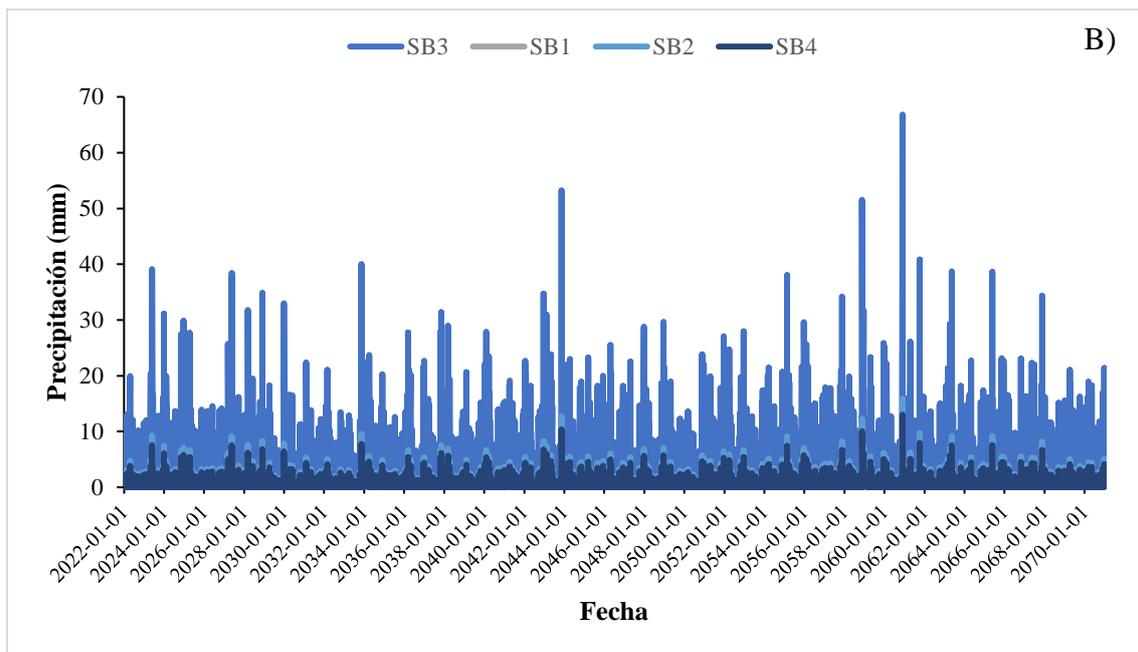


Figura 27. Serie temporal del modelo climático CMIP5_GISS_E2-R para los escenarios A) RCP 4.5 y B) RCP 8.5

4.2.2. Calibración de datos climáticos

Los datos de cambio climático fueron calibrados, validados y regionalizados a la estación meteorológica Otavalo con *downscaling* estadístico. La Tabla 23 muestra las pruebas estadísticas realizadas para este modelo de datos de cambio climático. Existe un valor muy bueno de correlación y RMSE y bueno para el método BIAS. Según Laura (2019) las pruebas estadísticas más confiables para este tipo de análisis es el coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE). De la misma manera Álvarez (2018) menciona que un BIAS positivo mayor a 0.40 implica que los resultados tengan validez para proyecciones futuras.

Tabla 18. Pruebas estadísticas para *downscaling* de datos de cambio climático

Métrica	Correlación	BIAS	RMSE
GISS-E2-R	0.51	0.40	88.4

4.2.3. Proyecciones hídricas a un futuro cercano y lejano en diferentes escenarios de cambio climático

4.2.3.1. Proyección a un futuro cercano (2022-2045) escenario CMIP5_GISS-E2-R.rcp45

La proyección de caudal para un futuro cercano (2022-2045) en un escenario RCP 45 se presenta en la Figura 28. Existe picos de incremento de caudal para los años 2023, 2025, 2034, 2036, 2040, 2043. A diferencia de los años 2035 y 2037 que tienen caudales por debajo de los 5 m³/s. De esta manera, el punto máximo de caudal se lo observa en el año 2043 con 7.32 m³/s. La línea tendencia obtenida muestra un leve incremento. El periodo actual y el futuro cercano muestra un gran incremento de caudal, ya que el mínimo del periodo actual estaba por debajo de los 2 m³/s y el máximo por debajo de los 6 m³/s.

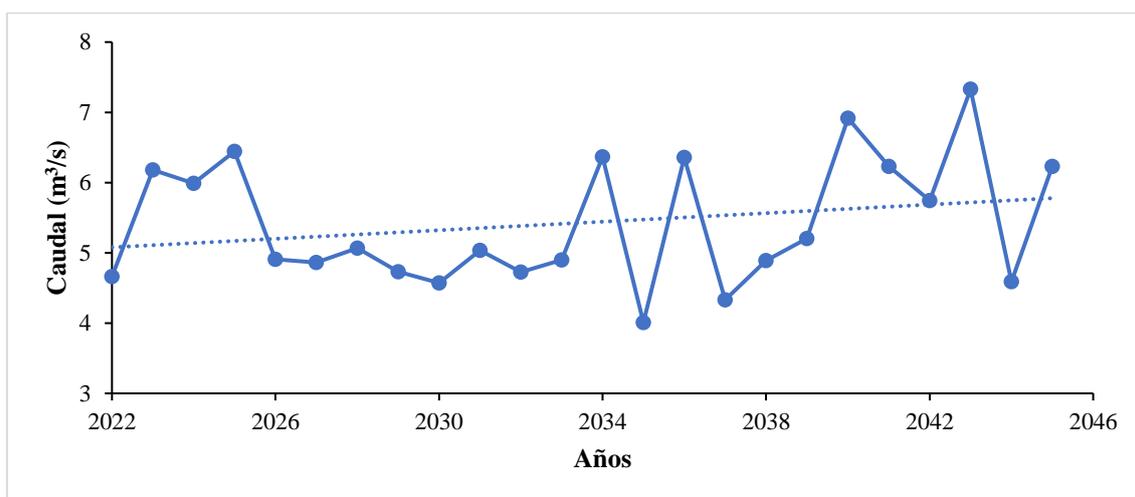


Figura 28. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2022-2045 escenario RCP 4.5

El incremento de caudal en función de la precipitación es notorio en la Figura 29. La comparación con los resultados del periodo actual y el cercano muestra que existe un incremento significativo. En esta relación se tiene un buen ajuste, por lo tanto, a mayor precipitación mayor caudal en la subcuenca del río Tahuando. Entre los resultados de otros estudios, Guerra (2018) menciona que la precipitación aumenta para el escenario RCP 4.5, su estudio también está centrado en Imbabura. El aumento excesivo de las precipitaciones está marcado en muchas zonas del país, como es el caso de la cuenca del

río Jubones, la cual también tendrá incrementos del 15% en precipitaciones en estación seca debido al impacto del cambio climático (Hasan y Wyseure, 2018).

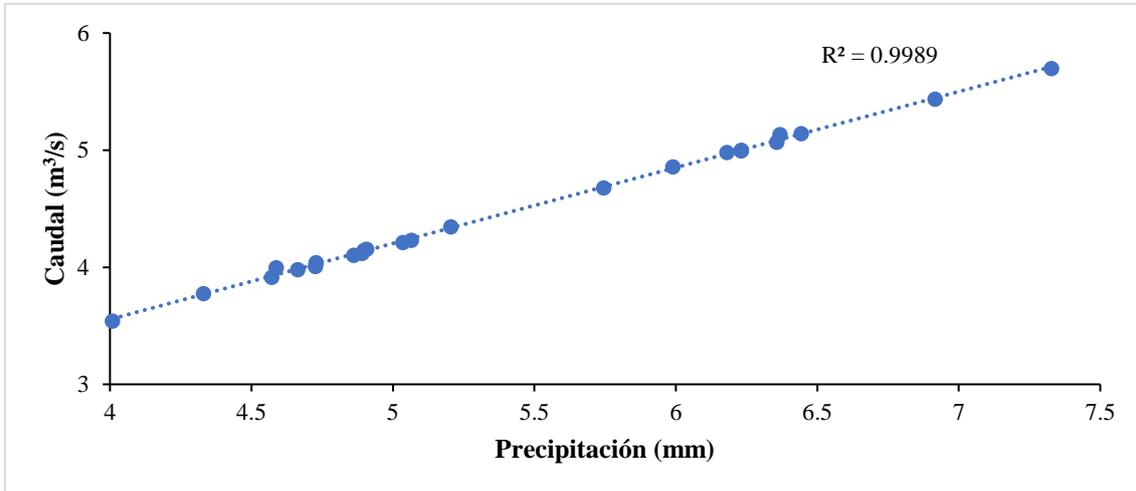


Figura 29. Relación de los promedios de precipitación y de caudal generado en el periodo 2022-2046 del modelo CMIP5_GISS_E2-R_RCP45

4.2.3.2. Proyección a un futuro lejano (2046-2070) escenario CMIP5_GISS-E2-R.RCP45

En el futuro lejano del escenario RCP 4.5 se encuentran similares caudales tanto para el futuro cercano y lejano (Figura 30). Existe una similitud de caudales mayores tanto para el periodo cercano y lejano con un valor de 7.32 m³/s y 7.23 m³/s respectivamente. Los caudales menores de este periodo están por debajo de los 5 m³/s. Según la línea tendencia presentada, se observa una estabilización de los caudales. Laura (2019) expone un aumento de precipitaciones en la mayoría de las estaciones meteorológicas del 2% al 22% para un periodo de 2020-2050. Para la región Costa, específicamente en la cuenca del río Guayas se prevé un incremento de precipitación de 6% para el periodo 2050-2079 (Ilbay-Yupa et al., 2021). En ciertas áreas o regiones del Ecuador se obtendrá mayores precipitaciones en cierta temporada del año y decrecimientos de lluvias en épocas secas, sin embargo, para Imbabura se proyectan precipitaciones altas incluso en esta estación (Armenta et al., 2016).

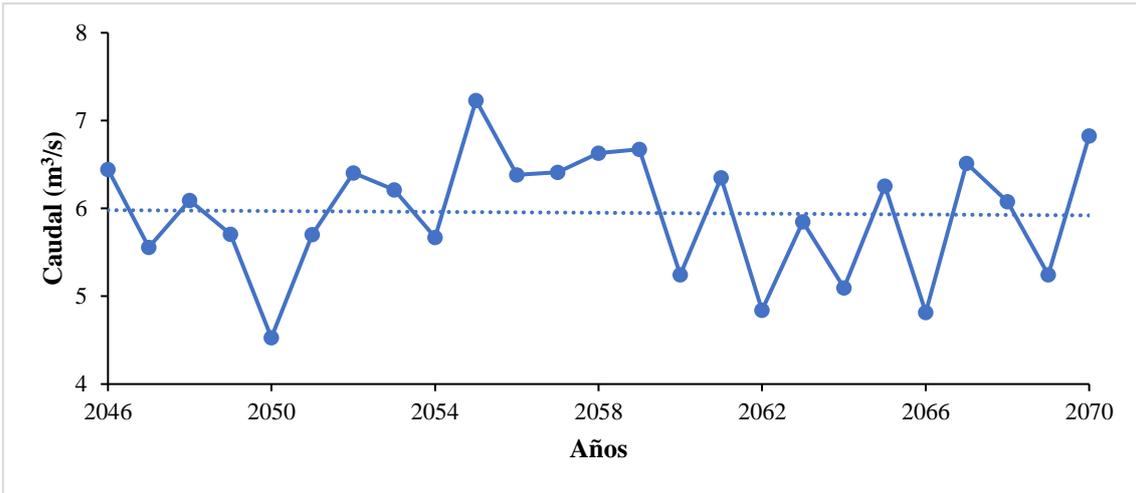


Figura 30. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2046-2070 escenario RCP 4.5

Existe un buen ajuste en la relación de los promedios anuales de la precipitación y el caudal del escenario RCP 4.5 en un futuro lejano por presentar un sesgo mínimo entre ambas variables (Figura 31). El caudal y la precipitación son directamente proporcionales por lo que si el uno aumenta el otro también lo hará. La precipitación es la entrada con mayor aportación de agua a una cuenca, determinando cantidad y frecuencia (Bateman, 2007). Para este periodo se manejan similares valores a los del futuro cercano.

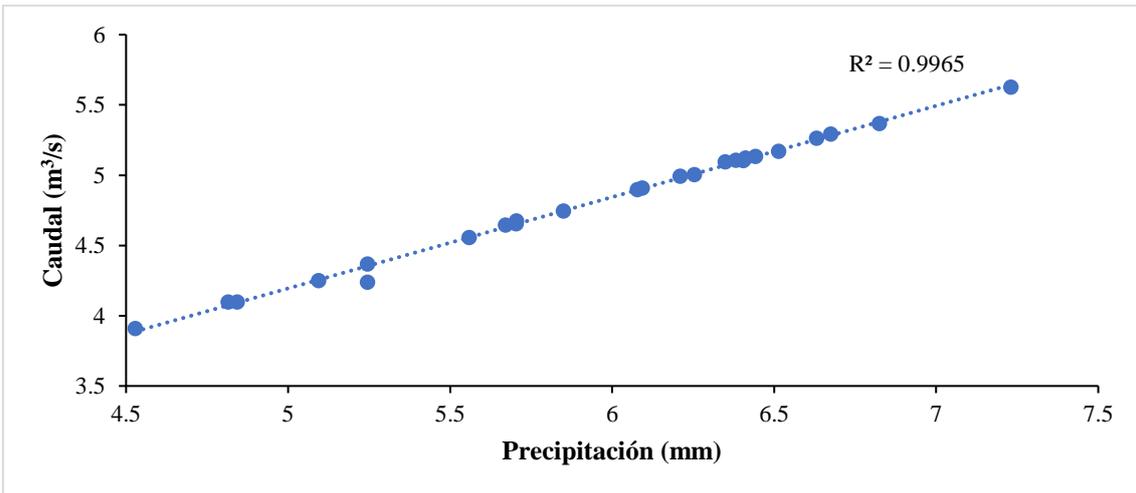


Figura 31. Relación de los promedios de precipitación y de caudal generado en el periodo 2046-2070 del modelo CMIP5_GISS_E2-R_RCP 4.5

4.2.3.3. Proyección a un futuro cercano (2022-2045) escenario CMIP5_GISS-E2-R.RCP85

La proyección de la disponibilidad hídrica en el periodo 2022-2045 (futuro cercano) muestra un incremento de caudal al igual que la línea tendencia (Figura 32). Existe un pico máximo de $6.59 \text{ m}^3/\text{s}$ para el año 2041, según (Laura, 2019) el escenario con forzamiento radiactivo RCP 8.5 son catalogados como extremos, es decir, esta proyección es en un escenario crítico por lo que en su estudio también muestra un aumento de caudales. CIIFEN (2014) realiza un estudio en diferentes escenarios climáticos para Ecuador, Perú y Bolivia, entre ellos está el escenario RCP 8.5, el cual muestra resultados de exceso de precipitaciones en el norte del Ecuador y la Cordillera de los Andes en el periodo de tiempo 2022-2045.

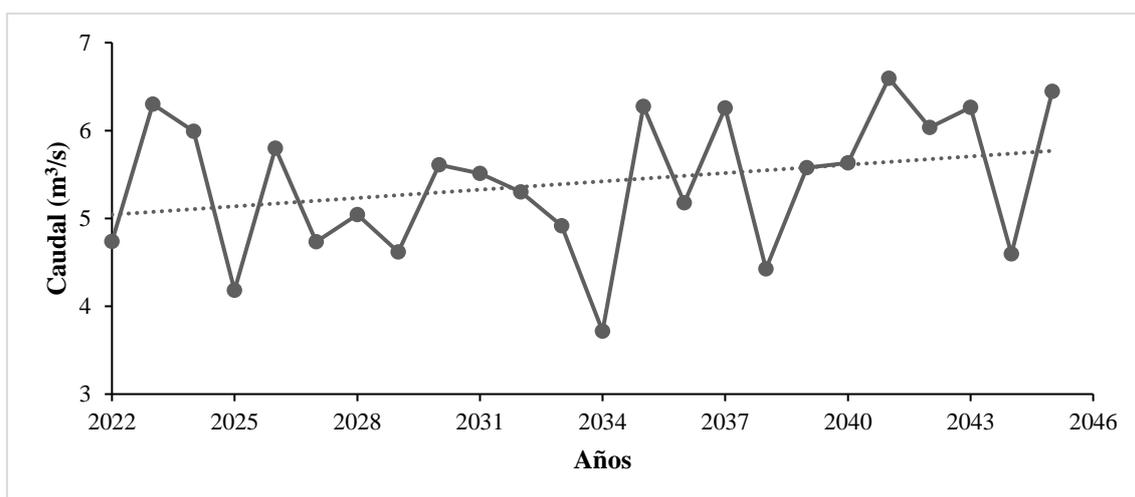


Figura 32. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2022-2045 escenario RCP 8.5

La precipitación y el caudal del escenario RCP 8.5 en el periodo 2022-2045 (Figura 33) tiene una relación donde se muestra un buen ajuste de R^2 , por lo que a mayor caudal mayor precipitación. El escenario RCP 4.5 y RCP 8.5 para la proyección a futuro cercano es muy similar. Armenta (2016) presenta en resultados ráster el aumento de precipitación para Imbabura en el periodo de 2020-2050.

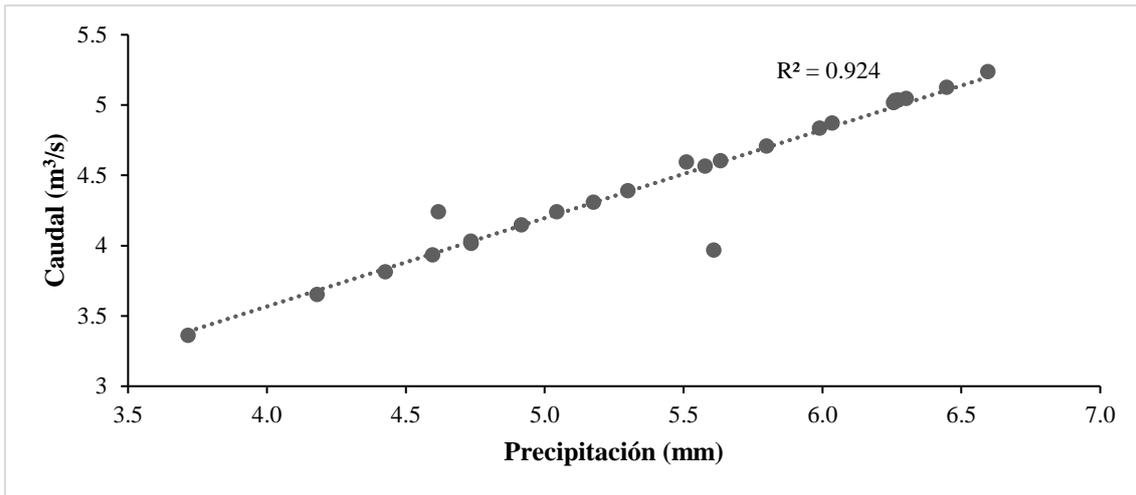


Figura 33. Relación de los promedios de precipitación y de caudal generado en el periodo 2022-2045 del modelo CMIP5_GISS_E2-R_RCP85

4.2.3.4. Proyección a un futuro lejano (2046-2070) escenario CMIP5_GISS-E2-R.RCP85

En el periodo futuro lejano del escenario RCP 8.5 se observa una línea tendencia de incremento en los caudales. Se prevé picos de caudales sumamente altos con relación al periodo 2000-2021 (Figura 34). Además, habrá caudales por encima de los 7 m³/s en los años 2053, 2059, 2060, 2061, 2068, 2069 y 2070 esto es algo que no existía en el periodo de 2022-2045. La pendiente positiva de la línea tendencia obtenida sugiere un incremento de caudal para este periodo. Armenta (2016) realiza un estudio de tendencias y eventos climáticos extremos, los resultados para precipitación es que habrá incrementos de al menos 5 mm/década en valores anuales y que existirán precipitaciones extremas en gran parte de la Sierra. Por lo tanto, el comportamiento en un futuro de la precipitación en contexto de cambio climático es que aumentará notoriamente en el periodo cercano y lejano según el escenario crítico (RCP 8.5).

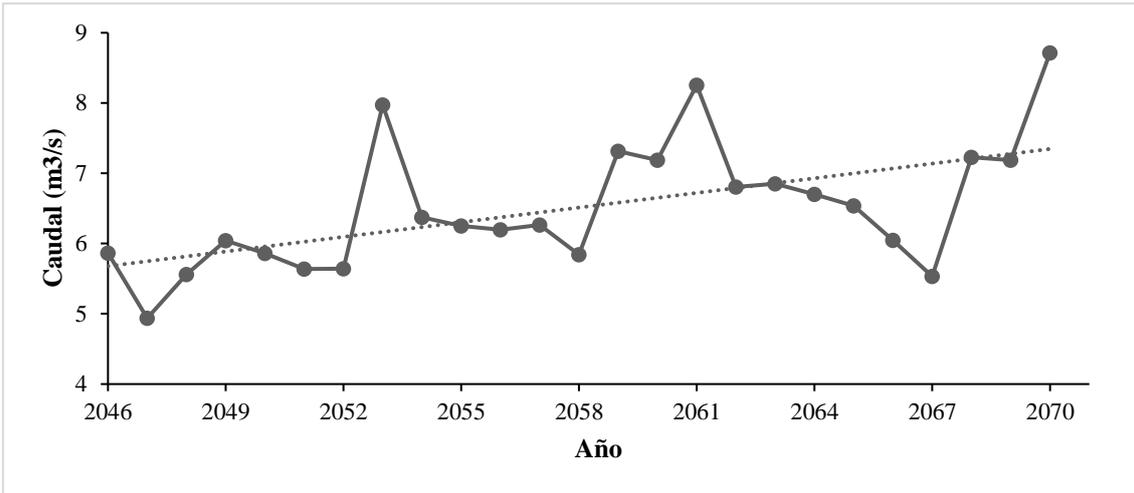


Figura 34. Disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Tahuando en el periodo 2046-2070 escenario RCP 8.5

Los promedios de precipitación y caudal presentan un ajuste de R^2 de 0.93, por lo que a mayor precipitación mayor caudal (Figura 36). En el futuro cercano escenario 8.5, se observa un mayor incremento tanto de caudal como de precipitación a diferencia del futuro cercano. De esta manera se comprueba que el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano es más crítico que el RCP 4.5.

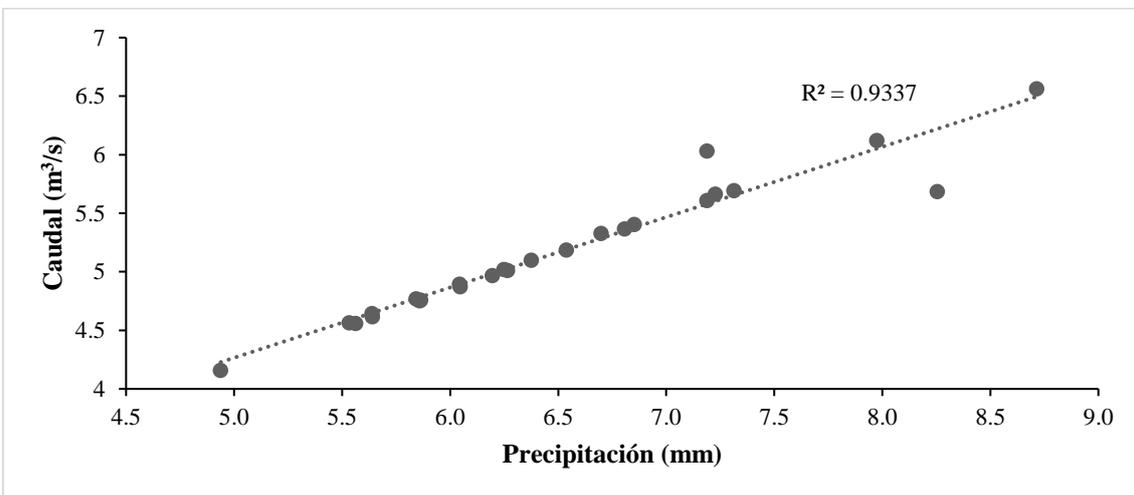


Figura 35. Relación de los promedios de precipitación y de caudal generado en el periodo 2046-2070 del modelo CMIP5_GISS_E2-R_RCP85

4.2.3. Efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica

4.2.3.1. Pruebas estadísticas para el periodo actual, futuro cercano y lejano en el escenario CMIP5_GISS-E2-R.RCP45

Las pruebas estadísticas se aplicaron al futuro cercano (2022-2045) y para el escenario RCP 4.5, por lo que primero se comprobó si los datos eran paramétricos. Para conocer la normalidad de la información tanto para la precipitación y caudal del escenario RCP 4.5, se aplicó la prueba de Shapiro- Wilks (Tabla 19). La prueba de normalidad arrojó un $P < 0.0001$ para caudal predicho y precipitación, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa la cual indica que no existe normalidad en la información.

Tabla 19. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks para caudales y precipitaciones predichas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP45

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
PRED Caudal	71	4.94	1.16	0.67	<0.0001
PRED Precipitación	71	5.05	1.46	0.72	<0.0001

- Precipitación

En la prueba de homocedasticidad de Levene de la precipitación (Tabla 20), se obtuvo un P mayor a 0.6450, por lo que se acepta la hipótesis nula donde si existe homocedasticidad en los datos de precipitación absolutas. Sin embargo, al no tener normalidad no se pudo utilizar pruebas estadísticas para datos paramétricos.

Tabla 20. Prueba de Homocedasticidad Levene para precipitaciones absolutas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP45

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.20	2	0.10	0.44	0.6450
Año	0.20	2	0.10	0.44	0.6450
Error	15.05	68	0.22		
Total	15.24	70			

- **Caudal**

En los datos de caudal (Tabla 21) se obtuvo un P mayor a 0.0877, por lo que se acepta la hipótesis nula comprobando que si existe homogeneidad en los caudales absolutos. De la misma manera que la precipitación, al no tener datos con normalidad no se pudo realizar pruebas estadísticas comparativas para datos paramétricos.

Tabla 21. Prueba de Homocedasticidad Levene para caudales absolutos del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP45

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.21	2	0.60	2.52	0.0877
Año	1.21	2	0.60	2.52	0.0877
Error	16.26	68	0.24		
Total	17.47	70			

Paliz et al., (2021) realiza un estudio para identificar periodos de mayor o menor precipitación con sus respectivas variaciones en la ciudad de Riobamba, empleó métodos estadísticos analizando la normalidad con la prueba de Kolmogorov Smirnov y luego el intervalo de confianza de *bootstrap* para estimar las diferencias. En este estudio al no obtener datos paramétricos se aplicó la prueba de Kruskal Wallis a la precipitación en el periodo actual, cercano y lejano (Tabla 22) y se obtuvo un P menor a 0.0001, por lo que se acepta la hipótesis alternativa la cual indica que el cambio climático en esta variable afecta significativamente a la oferta hídrica de la subcuenca del río Tahuando.

Tabla 22. Prueba de Kruskal Wallis para un periodo actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP45

Variable	Año	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Caudal	Actual	22	3.01	0.77	2.74	49.84	<0.0001
Caudal	Cercano	24	5.41	0.79	5.54		
Caudal	Lejano	25	6.51	0.92	6.27		

En la comparativa de diferencias de los periodos: actual, cercano y lejano se obtuvo letras similares para el futuro cercano y lejano por lo que las medias con una letra en común no son significativamente diferentes (Tabla 23). Sin embargo, ambos periodos

son distintos al periodo actual (2000-2021), demostrando que si existirá un incremento de precipitación. El efecto de cambio climático para el escenario RCP 4.5 del modelo CMIP 5 GISS-E2-R afecta significativamente a la oferta hídrica de la subcuenca del río Tahuando.

Tabla 23. Comparativa de diferencias entre los periodos actual, cercano y lejano de caudales del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP45

Periodo	Medianas	Ranks	Diferencias
Actual	2.74	14.05	A
Cercano	5.05	40.92	B
Lejano	6.09	50.60	B

Para la prueba estadística Kruskal Wallis en los periodos: actual, cercano y lejano del escenario RCP 4.5 se obtiene un $P < 0.0001$ (Tabla 24), de tal manera que, se acepta la hipótesis alternativa, mencionando que existe una diferencia significativa para los periodos: actual (2000-2021), cercano (2022-2045) y lejano (2045-2070).

Tabla 24. Prueba de Kruskal Wallis para un periodo actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp45

Variable	Año	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Precipitación	Actual	22	3.25	1.13	2.74	38.76	<0.0001
Precipitación	Cercano	24	5.43	0.90	5.05		
Precipitación	Lejano	25	5.95	0.69	6.09		

La comparativa de a pares muestra que ningún periodo son similares, por lo que cada uno de ellos tiene una letra distinta (Tabla 25). De esta manera se puede comprobar que los caudales en estos periodos si son afectados significativamente por el cambio climático.

Tabla 25. Comparativa de diferencias entre los periodos actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP45

Periodo	Medianas	Ranks	Diferencias
Actual	2.74	12.14	A
Cercano	5.54	38.63	B
Lejano	6.27	54.48	C

4.2.3.2. Pruebas estadísticas con datos históricos y escenario CMIP5_GISS-E2-R.RCP85

Los resultados de la prueba estadística (Shapiro- Wilks) para la precipitación y caudal se detallan en la (Tabla 26). Se obtuvo un $P < 0.0001$ para caudal predicho y precipitación, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa la misma que indica que no existe normalidad en la información.

Tabla 26. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks para caudales y precipitaciones predichas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP85

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
PRED Precipitación	71	4.26	0.90	0.73	<0.0001
PRED Caudal	71	5.13	1.35	0.73	<0.0001

- Precipitación

Se obtuvo un P mayor a 0.25 (Tabla 27) en la prueba de homocedasticidad de Levene, por lo que se acepta la hipótesis nula donde si existe homocedasticidad en los datos de precipitación absolutos. Sin embargo, al no tener normalidad no se pudo utilizar pruebas estadísticas para datos paramétricos.

Tabla 27. Prueba de Homocedasticidad Levene para precipitaciones absolutas del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP85

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.35	2	0.17	1.40	0.25
Año	0.35	2	0.17	1.40	0.25
Error	8.47	68	0.12		
Total	8.82	70			

- Caudal

En la prueba de homocedasticidad del caudal se obtuvo un P mayor a 0.3848 (Tabla 28), por lo que se acepta la hipótesis nula comprobando que si existe homogeneidad en los caudales absolutos. De la misma manera que la precipitación, al no tener datos con normalidad no se pudo realizar pruebas estadísticas comparativas para datos paramétricos.

Tabla 28. Prueba de Homocedasticidad Levene para caudales absolutos del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP85

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.57	2	0.29	0.97	0.38
Año	0.57	2	0.29	0.97	0.38
Error	20.09	68	0.30		
Total	20.67	70			

Al no tener datos paramétricos se aplicó la prueba de Kruskal Wallis a los caudales, obteniendo un $P < 0.0001$ (Tabla 29), por lo que se acepta la hipótesis alternativa en la cual se menciona que existe diferencia significativa entre los periodos actuales (2002-2021), cercano (2022-2045) y lejano (2046-2070).

Tabla 29. Prueba de Kruskal Wallis para un periodo actual, cercano y lejano de caudal del escenario CMIP5_GISS_E22-R.RCP85

Variable	Año	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Caudal	Actual	22	3.25	1.13	2.74	44.04	<0.0001
Caudal	Cercano	24	5.41	0.79	5.54		
Caudal	Lejano	25	6.51	0.92	6.27		

La comparativa de a pares muestra que ningún periodo son similares, por lo que cada periodo tiene una letra distinta (Tabla 30). De esta manera se puede comprobar que los caudales en estos periodos si son afectados significativamente por el cambio climático.

Tabla 30. Comparativa de diferencias de caudales entre los periodos actual, cercano y lejano de caudales del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP85

Trat.	Medianas	Ranks	Diferencias
Actual	2.74	14.00	A
Cercano	5.54	37.46	B
Lejano	6.27	53.96	C

De igual forma se aplicó Kruskal Wallis para la precipitación en donde se obtiene un $P < 0.0001$ (Tabla 31). Se acepta la hipótesis alternativa, la cual menciona que existe diferencia significativa para los periodos: actual (2000-2021), cercano (2022-2045) y lejano (2045-2070).

Tabla 31. Prueba de Kruskal Wallis para un periodo actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.rcp85

Variable	Año	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Precipitación	Actual	22	3.01	0.77	2.74	44.04	<0.0001
Precipitación	Cercano	24	4.45	0.52	4.48		
Precipitación	Lejano	25	5.17	0.57	5.02		

En la comparativa de diferencias de los periodos: actual, cercano y lejano se obtuvo letras distintas para cada uno (Tabla 32). De esta manera se comprueba que el

efecto de cambio climático para el escenario RCP 85 del modelo CMIP 5 GISS-E2-R afecta significativamente a la oferta hídrica de la subcuenca del río Tahuando. Según el IPCC (2007) los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son la principal causa del cambio climático por lo que genera un patrón irregular y cambiante de las precipitaciones y un incremento de desastres climáticos. En el estudio de Serrano et al. (2012) realizado en el Distrito Metropolitano de Quito se observa el comportamiento irregular de la precipitación en un periodo de 30 años históricos el cual puede ser causado por el cambio climático. En el escenario pesimista (RCP 8.5) periodo 2011-2100, existe un incremento significativo de precipitaciones en la Sierra Central (Armenta et al., 2016). Benítez (2018) en su tesis de maestría afirma que, existen incrementos de precipitación de alrededor un 40% y de balance hídrico un 50%, en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para el periodo 2011-2050 en la cuenca Catamayo-Chira.

Tabla 32. Comparativa de diferencias entre los periodos actual, cercano y lejano de precipitación del escenario CMIP5_GISS_E2-R.RCP85

Trat.	Medianas	Ranks	Diferencias
Actual	2.74	13.95	A
Cercano	4.48	37.58	B
Lejano	5.02	53.88	C

4.3. Lineamientos técnicos de protección para el manejo de la subcuenca frente a escenarios de cambio climático

En función de los resultados los lineamientos técnicos para protección y manejo de esta subcuenca es de gran importancia para salvaguardar sus alrededores como zonas pobladas, cultivos, etc. Las estrategias para identificación y control de una amenaza deben entenderse con las estrategias para mejorar las condiciones de la población, disminuir la sensibilidad y aumentar la adaptabilidad a los efectos del cambio climático (Arias Muñoz et al., 2022). De manera preliminar se realizó un árbol de problemas en la cual se puede apreciar las causas y consecuencias del problema central (Figura 36).

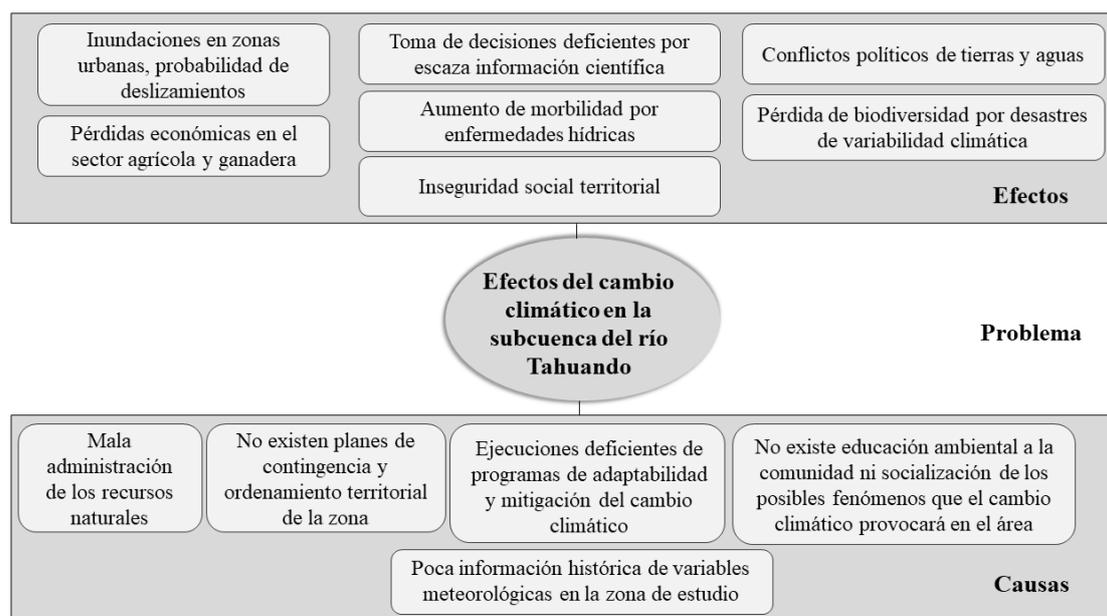


Figura 36. Árbol de problemas de los efectos del cambio climático en la subcuenca del río Tahuando

Los programas propuestos a continuación tienen como objetivo obtener una adaptabilidad de los efectos de cambio climático en la subcuenca del río Tahuando. El uso adecuado de los ecosistemas existentes en la subcuenca es un factor necesario, ya que permite un manejo de los recursos naturales asegurando la conservación de ecosistemas vitales y la disminución de los efectos adversos en una toma de decisiones sobre el desarrollo y gestión (Jácome, 2015).

4.3.1. Lineamiento 1: Conservación de los páramos de la subcuenca del río Tahuando

Los páramos son ecosistemas frágiles que tienen vegetación herbácea y arbustiva, están ubicados a los 3 000 msnm y 5 000 msnm a lo largo de los Andes entre Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela (Lozano et al., 2016). Acevedo y Rodríguez, (2012) menciona que el páramo andino es conocido como un gran proveedor y regulador de agua, el clima frío y húmedo y los suelos volcánicos favorecen al almacenamiento del agua en el ecosistema.

Estos humedales tienen una fuerte permeabilidad, por lo que evitan las inundaciones y actúan como buenas reservas de agua natural, flora y fauna (García, 2010). Entre la flora del páramo herbáceo destacan las especies *Calamagrostis intermedia* y *Azorella pedunculata*, estas plantas mantienen los caudales de un sistema hidrológico en aproximadamente 6 l/s y también almacenan y liberan 7'101 064,10 m³/año de agua (Lozano et al., 2016).

La alteración de los suelos del páramo es uno de los problemas principales de la agricultura, por su alto impacto en la extracción y venta de turba, así mismo con el uso de fertilizantes y el avance ganadero en la zona (Camacho, 2013). Otras de las amenazas que sufren los páramos andinos son los incendios para asentamientos ganaderos, el turismo no sustentable y la minería, estas actividades afectan seriamente de forma irreversible a la biodiversidad y servicios ecológicos del ecosistema (Navarrete, 2021).

Se propone esta estrategia (Tabla 33) para la protección hídrica de la subcuenca del río Tahuando por presentar un porcentaje de superficie de 26.63%, siendo la cobertura vegetal predominante, está dirigida a juntas parroquiales, Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, Gobierno Provincial de Imbabura y comunidades.

Tabla 33. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para el lineamiento técnico de conservación de páramos

Presión	Estado	Respuestas/Actividades	Estrategia/Técnica
	Pérdida de cobertura vegetal en el páramo de la subcuenca.	Promoción de estrategias de conservación con prácticas productivas tradicionales y sustentables que ayuden al uso sostenible del recurso suelo. Capacitación al sector agrícola y ganadera para las buenas prácticas ambientales	Planificación estratégica
Páramo	Avance de la frontera agrícola y ganadera en zonas de páramo.	Promoción de proyectos de conservación y restauración de los páramos de la subcuenca y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en estas áreas. Gestión de fondos públicos y privados para restauración de páramos y su respectivo seguimiento anual.	Conservación y restauración de las especies <i>Calamagrostis intermedia</i> y <i>Azorella pedunculata</i>
	Incendios forestales y daño a la fauna y flora del lugar.	Vinculación de la participación del Estado a través de Gobierno cantonal, juntas parroquiales y ciudadanía en capacitaciones y talleres de conservación ambiental, incendios e importancia de la flora y fauna del lugar.	Educación ambiental/participación ciudadana

3.4.2. Lineamiento 2: Conservación de los bosques de la subcuenca del río Tahuando

Los bosques juegan un papel importante en cuánto a la retención y filtración del agua. Permiten la regeneración de los recursos hídricos ayudando a que el agua del subsuelo se recargue con agua potable de buena calidad. Además, la presencia de bosques es una protección eficiente contra las inundaciones y la erosión del suelo. Las raíces estabilizan el suelo y contribuyen a prevenir la erosión y los deslizamientos (Brüschweiler et al., 2004).

La protección contra los aludes es un desafío actual para asentamientos poblacionales de regiones montañosas, estos bosques los reducen considerablemente. El cambio climático producirá un impacto en la hidrología y los recursos hídricos, algunos de estas catástrofes son: inundaciones, sequías y deslaves, en todos estos fenómenos influye la cubierta forestal (FAO, 2009).

La cubierta vegetal influye en el ciclo hidrológico global de manera que regula la humedad atmosférica y cumple un rol importante en la precipitación sobre las zonas terrestres. De esta manera, los bosques afectan a muchos aspectos del ciclo como la protección de frente a avenidas, corrimientos de tierra, colmatación de embalses de agua, protección de orillas de cursos de agua, entre otros (Blanco, 2017). La subcuenca del río Tahuando tiene un porcentaje de superficie de bosque del 24.28%, seguido de los páramos por lo que se vuelve importante la conservación de estos, por tal motivo se propone el siguiente lineamiento técnico (Tabla 34).

Tabla 34. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para el lineamiento técnico de conservación de los bosques

Presión	Estado	Respuestas/ Acciones	Estrategia/Técnica
Bosques	Pérdida de bosques por avance agrícola y ganadera	Construcción de viveros comunitarios para la producción de especies nativas que ayuden a la restauración de suelos sin cobertura vegetal.	Planificación estratégica
	Pérdida de bosques por tenencia de tierras	Dotación de incentivos a los propietarios de tierras forestales para facilitar la conservación de los bosques de la subcuenca.	Planificación estratégica.
	Tala indiscriminada de árboles. Incendios forestales provocados.	Promoción de la educación ambiental a las comunidades cercanas acerca del cuidado de los bosques para evitar incendios forestales y la tala indiscriminada cerca de las fuentes de agua. Mitigación de riesgos de incendios forestales con barreras cortafuegos y líneas de control de igniciones.	Educación Ambiental y participación ciudadana. Planificación estratégica.

4.3.2. *Lineamiento 3: Participación de comunidades, autoridades y academia*

El cambio climático es un problema socioambiental complejo que no tienen soluciones claras y difícilmente es la responsabilidad de una sola organización o grupo de personas. El Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (2013) manifiesta que el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación se debe considerar tanto a los componentes físicos y económicos del cambio climático como dimensión social y psicológica. En este contexto, la participación ciudadana frente al cambio climático y el cuidado hídrico es fundamental.

La información científica rigurosa, legítima, pertinente y de calidad sobre los efectos de cambio climático es uno de los factores que deben ser tomados en cuenta en planificaciones y decisiones futuras (González, 2012). Los estudios de variabilidad climática y cambio climático son un desafío para el Ecuador en generar datos e información con niveles altos de rigor científico que permita la comprensión de la temática asociada a los cambios de clima y afectaciones a los sistemas hídricos del país (Cadilhac et al., 2017).

La elaboración de los Planes de Ordenamiento Territorial (PDOT) parten del conocimiento y análisis de las características de cada zona e intereses de su población, por lo que debe tener directrices e intervenciones concretas en cuanto al desarrollo económico, conservación, uso y gestión de los recursos naturales, gestión del cambio climático, entre otros factores (Secretaría Técnica Planifica Ecuador, 2019).

Una de las principales estrategias para hacer frente al cambio climático y adaptación es integrar un enfoque de derechos humanos, las normas y leyes deben informar y fortalecer la formulación de políticas climáticas para obtener resultados sostenibles y evitar riesgos de los fenómenos del cambio climático a la población (Naciones Unidas, 2019). Al igual que la participación de las comunidades, un marco de gobernanza apropiado hace la diferencia en el momento de querer conservar y mantener la subcuenca frente a escenarios de cambio climático. Para este lineamiento se proponen acciones con la incorporación de instituciones públicas y la academia (Tabla 35).

Tabla 35. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para el lineamiento técnico de Actividades para la participación de comunidades, autoridades y academia

Presión	Estado	Respuestas/ Actividades	Estrategia/Técnica
		Elaboración de un Plan de Ordenamiento Territorial para la subcuenca del río Tahuando.	
		Definición de políticas y leyes claras acerca de construcciones o asentamientos humanos cerca de las fuentes de agua y zonas de inundación.	
	Riegos de inundaciones y deslizamientos.	Elaboración de estudios de riesgos de deslaves o deslizamientos.	Planificación estratégica
Fuentes hídricas	Poca información de los efectos de cambio climático de la zona.	Implementación de estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca para el constante monitoreo de esta.	
Asentamientos humanos	Desconocimiento de los riesgos de los efectos de cambio climático.	Dotación de acceso gratuito a información histórica para estudios futuros.	
Investigación		Elaboración de planes de contingencias y riesgos ambientales.	
		Delimitación de zonas de protección hídrica para fuentes de agua.	
		Socialización continua de los efectos de cambio climático en la subcuenca del río Tahuando a las comunidades agrícolas y ganaderas para evitar pérdidas económicas de estas familias.	

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Los datos satelitales CHIRPS y de la estación meteorológica Otavalo mostraron tendencias mensuales y anuales significativamente similares, por lo que el uso de este tipo de datos es adecuado para modelos de simulación hidrológicas de respuesta precipitación-escorrentía en cuencas de montaña. En cuanto a la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca para el periodo actual (2000-2021), existió un incremento de caudales mayores a $4 \text{ m}^3/\text{s}$ a partir del 2016.
- Existe suficiente evidencia estadística para afirmar que el efecto del cambio climático en las precipitaciones afectará de manera significativa la disponibilidad hídrica dentro de la subcuenca del río Tahuando. Se registra incrementos en el caudal de la cuenca en los escenarios cercano y lejano, con lo que se muestra tendencias a crecidas y la salida acelerada del agua de la cuenca. Esta situación afecta la capacidad de la cuenca para la recarga de acuíferos afectando la disponibilidad hídrica en épocas de estiaje.
- Los lineamientos para el mantenimiento del recurso hídrico frente a escenarios climáticos en la subcuenca del río Tahuando, se orientan a la conservación y protección de páramos y bosques, al ser almacenadores hídricos y barreras naturales protectores de deslizamientos. Adicionalmente se destaca la importancia de la participación social y la generación de políticas, leyes y estudios que deben ser implementadas para garantizar el manejo adecuado de la subcuenca.

5.2. Recomendaciones

- Para tener mejores resultados en el proceso de creación de un modelo hidrológico es necesario la creación de estaciones meteorológicas distribuidas dentro de la subcuenca del río Tahuando y que se lleven registros completos ya que esto permite una mejor validación con los datos satelitales CHIRPS, además de que ayudaría a tener un mayor control meteorológico en la subcuenca y aportaría al manejo de esta.

- En cuanto a los datos calibrados de las proyecciones climáticas es mejor trabajar con el escalamiento dinámico ya que el estadístico tiene muchas limitaciones y no tiene nuevas técnicas de corrección de sesgo, por lo que *downscaling* dinámico ayuda a reducir la incertidumbre de los posibles escenarios de la oferta hídrica de la subcuenca del río Tahuando. De igual manera, para reducir esta incertidumbre del efecto climático en la subcuenca para futuro cercano y lejano se debería evaluar más Modelos Climáticos Globales actualizados como el CMIP6 con rutas representativas de concentración. Además, este estudio sirve como línea base para comparativas de proyecciones y análisis de sesgos en los datos CMIP5 y CMIP6.
- La toma de datos en campo es importante para la calibración del modelo meteorológico, por lo que se debe realizar las salidas en época seca y lluviosa, al menos cinco veces para poder pasar por pruebas como Nash-Sutcliffe o Nash-In y sumarle la correlación de Pearson, de esta manera se obtendría datos más certeros y más confiabilidad en el modelamiento.
- Se podría realizar un estudio completo de la variación climática en la subcuenca si existiera información histórica completa de la temperatura diaria tanto para estaciones meteorológicas e información satelital, de otra manera, se puede utilizar diferentes softwares que permitan modelar con temperaturas y precipitaciones mensuales.
- En la aplicación de la matriz FODA, se requiere hacer un estudio más profundo y multidisciplinario, ya que se requiere conocer las condiciones socioeconómicas actuales de la población de la subcuenca, conocer el manejo de esta actualmente y muchas otras más variables que facilitarían identificar de manera adecuada las fortalezas, debilidades, amenazas y oportunidades.

Referencias

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. A., Parks, K. C., y Hegewisch. (2018). *Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015*. Scientific Data. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/IDAHO_EPSCOR_TERRACLIMATE
- Acevedo, y Rodríguez. (2012). *Páramo andino como productor y regulador del recurso agua, microcuenca alta de la quebrada Mixteque, Sierra Nevada de Mérida, Venezuela*.
- Aguirre1, N., Ojeda2, T., y Eguiguren2, P. (2010). *El cambio climático y la conservación de la biodiversidad en el Ecuador. 1*, 17-25.
- Albano, C. (2021). *Climate Engine applications for USFS Monitoring and assessment*.
- Almeida, L. (2014). *Una revisión de la evaluación de la calidad del agua de los ríos de la provincia de Imbabura* [Ingeniero en Gestión Ambiental]. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Álvarez Francoso, J. I. (2016). *Geovisualización de grandes volúmenes de datos ambientales. Diseño e implementación de un sistema para el acceso y la difusión de datos globales*. <https://idus.us.es/handle/11441/45259>
- Álvarez, J. (2018). *Análisis de la disponibilidad de agua superficial ante distintos escenarios de oferta y demanda en la Cuenca del Río San Antonio, Provincia de Córdoba*. Universidad Nacional de Córdoba.
- Amendaño, E. (2018). *Propuesta de gestión del recurso hídrico de la vertiente La Merced para el desarrollo sostenible, provincia de Pichincha, cantón Mejía, parroquia Cutuglagua* [Mestría en planificación y ordenamiento territorial para el desarrollo]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

- Angulo, M. A., y Saavedra, O. C. (2018). MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA MAYLANCO UTILIZANDO HEC-HMS. *Investigación & Desarrollo*, 18(1), 53-67.
- Arias-Muñoz, D., Jácome, G., y Vilela, P. (2022). Analysis of vulnerability to climate change in small cities using livelihood approach. A case of study of Cotacachi, Ecuador. *Acta Geographica*, 66, 63-79.
- Arias, P., Ortega, G., Villegas, L. D., y Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 100, 75-96.
- Armenta, E., Villa, J., y Jácome, P. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*.
- Armenta, G. (2016). *Análisis de tendencias climáticas y eventos climáticos extremos para Ecuador*.
- Baláž, M., Danáčová, M., y Szolgay, J. (2010). *On the use of the Muskingum Method for the Simulation of Flood Wave Movements*. 14-20.
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2014). *Guía para la gestión de recursos hídricos en cuencas de montaña, bajo el efecto del cambio climático*. Corporación Andina de Fomento.
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2015). *Inseguridad Económica del Agua en Latinoamérica: De la abundancia a la inseguridad: Vol. VII Foro Mundial del Agua*. Corporación Andina de Fomento. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00406.pdf>
- Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada*. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.

- Benítez, M. B. (2018). *La Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) como herramienta para contribuir al proceso de adaptación del Cambio Climático en la Cuenca Transfronteriza Catamayo-Chira* [Universidad Andina Simón Bolívar].
- Bergkamp, G., Orlando, B., y Burton, I. (2003). *Change. Adaptation of Water Management to Climate Change*.
<https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2003-004-es.pdf>
- Blanco, J. A. (2017). *Bosques, suelo y agua: Explorando sus interacciones*. 26(2).
- Bonilla-Ovallos, C., y Mesa, O. (2017). *Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia*. 41(158). <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v41n158/0370-3908-racefn-41-158-00107.pdf>
- Brüschweiler, S., Höggel, U., y Kläy, A. (2004). *Los Bosques y el Agua: Interrelaciones y su Manejo*.
<http://www.asocam.org/sites/default/files/publicaciones/files/aad619d8985985532e7d6e0a326fb81a.pdf>
- Bustamante, R. (2008). *Calibración y Validación del Modelo HEC-HMS, en la cuenca de Huechún, Región Metropolitana* [Ingeniero Forestal].
- Cabezas, F. (2015). *Análisis Estructural de Modelos Hidrológicos y de Sistemas de Recursos Hídricos en Zonas Semiáridas*. Universidad de Murcia.
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/371735/TFACCR.pdf?sequence=1>
- Cabrera, J. (2017). *Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo* [Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad de Cuenca]. <https://core.ac.uk/download/pdf/288582526.pdf>

- Cadilhac, L., Torres, R., Calles, J., Vanacker, V., y Calderón, E. (2017). Desafíos para la investigación sobre el cambio climático en Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 168-181. <https://doi.org/10.1080/23766808.2017.1328247>
- Cajamarca, R. (2017). *Estudio de balance hídrico superficial de las cuencas hidrográficas, sector Jadán y Zhidmad en el área de interceptación con el bosque y vegetación protectora aguarongo (BVPA)*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14595/1/UPS-CT007172.pdf>
- Calle, S. (2016). *Análisis y Evaluación de los datos de precipitación de los satélites TRMM y GPM, en las 4 macro regiones climáticas de Bolivia* [Maestría en Teledetección Espacial y Sistemas de Información Geográfica aplicadas a las ciencias de la Tierra, Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/22078/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Camacho, M. (2013). *Los páramos ecuatorianos: Caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible*. 372.
- Campo, F., González, M., González, I., y Kobiyama, M. (2020). *Modelación Hidrológica usando el modelo HEC-HMS*.
- Carrera-Villacrés, D. V., Guevara-García, P. V., Tamayo-Bacacela, L. C., Balarezo-Aguilar, A. L., Narváez-Rivera, C. A., y Morocho-López, D. R. (2016). *Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media*. 34(3), 81-90.
- Carrilo, C., y Mejía, N. (2016). *Utilización del Modelo «HEC- HMS» en sistemas de pronósticos hidrológicos y verificación de los datos obtenidos por el modelo CMPORH, en la cuenca del río Sucio* [Para optar al título de Ingeniero Civil,

Universidad de El Salvador].

PORH%2C%20en%20la%20cuencia%20del%20R%C3%ADo%20Sucio.pdf

Carvajal, Á., y Mercado, T. (2017). *Determinación del número de curva en la subcuena del Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG*. 35(2). <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v35n2/2145-9371-inde-35-02-00452.pdf>

Castro, C., Guzmán, D., y Cortés, D. (2021). *El almacenamiento y la disponibilidad de agua en la determinación del uso potencial de las tierras*. 18(1), 36-48.

Chiriboga, C. (2010). *Propuesta de un sistema de Monitoreo para la caracterización de las aguas residuales que receipta el río Tahuando* [Tesis de grado en Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales]. Universidad Técnica del Norte.

Chuvienco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial* (Vol. 52).

CIIFEN. (2014). *Metodología para la Estimación de Vulnerabilidad en Ecuador, Perú y Bolivia, Proyecto Información de cambio climático y biodiversidad para el fomento de políticas públicas de conservación y adaptación en la región de los Andes Tropicales*.

Cofiño, A., Sordo, C., y Gutiérrez, J. (2004). *Prometeo: Aplicación operativa de downscaling estadístico para la predicción de fenómenos locales*. 4.

Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Asamblea Nacional.

Córdova, J., y Iturbe, I. (2015). *El ciclo hidrológico y su significación ecológica* (pp. 79-101).

Corporación Andina de Fomento. (2014). *Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe*. Corporación Andina de Fomento. <https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/517/caf-indice-vulnerabilidad-cambio-climatico.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

- Crego, R. D., Stabach, J. A., y Connette, G. (2022). Implementation of species distribution models in Google Earth Engine. *Diversity and Distributions*, 28(5), 904-916. <https://doi.org/10.1111/ddi.13491>
- Cuaspu, N. (2017). *Manejo y protección de fuentes de agua para consumo humano en la microcuenca del Tahuando, en el cantón Ibarra, Provincia de Imbabura* [Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de Magister en Gestión]. Universidad Técnica del Norte.
- De la Vega, L. (2014). *Análisis del ciclo hidrológico Menorquín. Por una gestión sostenible en el territorio*. [Máster en Arquitectura Energía y Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona_ETSAAB]. <https://core.ac.uk/download/pdf/41815137.pdf>
- Diez, J. (2016). *Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS (Geo-HMS): Pronóstico de crecidas*. http://www.gef-ecohidrologia.org/uploads/2/6/2/7/26276580/fundamentos_inhouse.pdf
- Espinoza, L. (2019). “Evaluación de la precipitación mensual en el Ecuador según los modelos globales de clima del CMIP5 y de modelos regionales de clima de alta resolución” [Ingeniera Civil, Universidad de Cuenca].
- Espinoza, M. (2017). *Impacto del Cambio Climático en el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas, aplicando el modelo SWAT en Nicaragua* [Trabajo de Grado]. Universidad Nacional Agraria.
- Estrada, V., y Pachecho, R. (2011). *Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba*. XXXIII(1).
- FAO. (2009). *Los bosques y el agua*. https://www.ipcinfo.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/i0410s00.pdf

- Fernández, J. (2020). *Proyecciones futuras de la temperatura máxima en las principales ciudades de la Península Ibérica* [Grado en Ciencias Ambientales]. Universidad de Vigo.
- Filgueiras, R., Venancio, L. P., Aleman, C. C., y Cunha, F. F. da. (2022). Comparison and calibration of terraclimate climatological variables over the Brazilian territory. *Journal of South American Earth Sciences*, 117, 103882. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103882>
- Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, R., Romero, B. E., Husak, G. J., Michaelsen, J. C., y Verdin, A. P. (2014). *A quasi-global precipitation time series for drought monitoring*. 4.
- Gálvez, J. (2022). Efectos del cambio climático en la precipitación local del Parque Nacional Radal Siete Tazas, República de Chile, empleando un método de downscaling estadístico. *Revista Geográfica*, 164, Art. 164. <https://doi.org/10.35424/regeo.164.2022.1039>
- García, D. (2010). *Propuesta del plan de manejo de la parte alta de la subcuenca del río Juval e el cantón Alausí, provincia del Chimborazo—Ecuador, con la utilización de un SIG*.
- García, M., Carvajal, Y., y Jiménez, H. (2007). *La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático*. 9(1), 19-29.
- Gaspari, F., Senisterra, G., y Marlats, R. (2007). *Relación precipitación- escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina*. 39(1), 21-28.
- Gavilán, S. (2019). *Modelado del Balance Hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de la Plata.

- Gobierno Autónomo Descentralizado. (2020). *Ordenanza que norma el plan de gestión ambiental en el cantón San Miguel de Ibarra*.
- Gobierno Vasco y Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial. (2015). *Documento guía para la realización de balances hídricos en vertederos*. euskadi.eus.
- González Gaudiano, É. J. (2012). La representación social del cambio climático: Una revisión internacional. *Revista mexicana de investigación educativa*, 17(55), 1035-1062.
- González, H. (2009). *Los satélites meteorológicos y ambientales como herramientas de trabajo operativas para la meteorología, la hidrología y la oceanología en Colombia y en apoyo a las actividades de prevención de desastres*.
- González, M. (2010). *Los satélites y su utilidad en nuestro día a día*. Instituto Espacial de Técnica Aeroespacial.
- Goñi, M., López, J., y Aguirre, G. (2008). *Simulación de la escorrentía directa en una cuenca forestal del norte de España*. 15(1).
- Guanunchi, J. (2015). *Análisis comparativos de Downscaling estadístico y dinámico en las cuencas de los ríos Paute y Jubones* [Ingeniero Ambiental]. Universidad de Cuenca.
- Guerra, E. (2018). *Comportamiento de la precipitación frente al cambio climático en la microcuenca del río Escudillas* [Trabajo de titulación presentado como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Forestal]. Universidad Técnica del Norte.
- Hasan, M., y Wyseure, G. (2018). Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador. *Water Science and Engineering*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2018.07.002>

- Hernández-Hernández, N., y Garnica-González, J. (2015). *Árbol de problemas del análisis al diseño y desarrollo de productos*. 50.
- Hidalgo, H., Alfaro, E., y Pérez-Briceño, P. (2021). *Cambios climáticos proyectados de modelos CMIP5 en La Cruz, Guanacaste, Costa Rica*.
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v69s2/0034-7744-rbt-69-s2-60.pdf>
- Hydrologic Engineering Center. (2003). *Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-GeoHMS*.
- Hydrologic Engineering Center. (2022). *Selecting a Baseflow Method*.
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest/subbasin-elements/selecting-a-baseflow-method>
- Ibáñez, R. (2012). *Sustainability indicators: Their uses and limitations*. 11, 102-126.
- Ibáñez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2015). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica*.
- Ilbay-Yupa, M., Ilbay, F., Zubieta, R., García-Mora, M., y Chasi, P. (2021). *Impacts of Climate Change on the Precipitation and Streamflow Regimes in Equatorial Regions: Guayas River Basin*. 13(3138). <https://doi.org/10.3390/w13213138>
- INDECI. (2017). *Boletín Estadístico Virtual de la Gestión Reactiva*. Boletín Estadístico.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica*.
- IPCC. (2007). *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jácome, G. (2015). *Propuesta de gestión de los conflictos socioambientales generados por el agua de consumo humano dentro de la microcuenca de la laguna de Yahuarcocha* [Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables].

- Jácome, G., Mejía, J., Guerra, N., Romero, A., Piedmag, V., Padilla, C., Tanaí., y Pupiales, N. (2020). *Los volcanes de Imbabura y su tiempo geológico. Imbabura-Ecuador*. FICAYA Emprende.
- Koussis, A. D. (2009). *Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method*. 54(1), 43-61.
- Labrador, A., Zúñiga, J. M., & Romero, J. (2016). *Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia*. *Ingeniería y Región*, 15, 23-35.
- Laura, J. (2019). *Efecto del cambio climático en la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Ilave—Puno*. Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- Lavao, S. (2014). *Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. Caso de estudio: Cuenca del río Murca, mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica [Diplomado en SIG y sensores remotos aplicados a recursos hídricos]*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Leal, A., & Portes, S. (2020). *Análisis de las variables climatológicas de precipitación y temperatura de los municipios de Tocaima y Jerusalén [Universidad Piloto de Colombia Seccional del Alto Magdalena]*.
- León, E., Vásquez, V., y Valderrama, M. (2021). *Cambios en patrones de precipitación y temperatura en el Ecuador: Regiones sierra y oriente*. 8.
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua. (2014). *Registro Oficial Suplemento 305*.
- Linck, A., y Weemaels, N. (2010). *Hacia una agenda Sudamericana del agua*.
- Llamocca, J. (2022). *Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos con CMIP5 para el Perú*. 164, 99-111.

- López, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J., y Gimena, F. (2012). *Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas*. 12, 15-30.
- López, L., Peña, F., y Velastegui, J. (2019). *Determinación del balance hídrico y mapeo con sistemas de información geográfica de la microcuenca de la quebrada de Quillalli en el Cantón Ambato*. 3(4), 129-143.
- Lozano, P., Armas, A., y Machado, V. (2016). Estrategias para la conservación del ecosistema páramo en Pulinguí San Pablo y Chorrera Mirador, Ecuador. *Enfoque UTE*, 7(4), 55-70.
- Manteiga, L. (2000). *Los Indicadores Ambientales como Instrumento para el Desarrollo de la Política Ambiental y su Integración en otras Políticas*.
www.terracentro.org/Terraweb/Doc-es/San%20LUcar%20indicadores.PDF
- Manzanilla, U., Aguirre, Ó., Jiménez, J., Treviño, E., y Yerena, J. (2018). *Escenarios de cambio climático (CMIP-5) para tres áreas naturales protegidas en el Eje Neovolcánico Transversal*. 9(50).
- Marcos, C. (2017). *Satélites meteorológicos*. 7. <https://doi.org/10.31978/014-18-009-X.07>
- Martínez, I. (2015). *Análisis del efecto laminador del cauce utilizando modelos fluviales bidimensionales* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].
https://oa.upm.es/39064/1/Ignacio_Martinez_Gonzalez.pdf
- Martínez, P., y Patiño, C. (2012). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México*. III(1), 5-20.
- Martínez, R., y Fernández, A. (2019). *Árbol de problema y áreas de intervención*. CEPAL.

- Mendoza, H., y González, M. (2017). *Evaluación hidrológica e hidráulica mediante la aplicación de modelos, del puente la Zompopera, Pantasma* [Ingeniería civil]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, & Agencia Estatal de Meteorología. (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*.
- Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2013). *Acuerdo Ministerial 95: Política de estado la estrategia nacional de cambio climático*.
- Ministerio del Ambiente. (2002). *División Hidrográfica del Ecuador*. http://intranet.comunidadandina.org/Documentos/Reuniones/DTrabajo/SG_REG_EMAB_IX_dt%203_Ax2.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador. ENCC 2012-2025*.
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*.
- Ministerio del Ambiente. (2018). *Proyecto de adaptación a los impactos del cambio climático en recursos hídricos en los Andes (AICCA)*.
- Ministerio del Ambiente, Ministerio de Agricultura, & Autoridad Nacional del Agua. (2017). *Línea de base climática parte II: escenarios climáticos Cordillera Blanca y Santa Teresa*.
- Montoya, J. y Juan Rey. (2019). *ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD POR INUNDACIÓN DEL CAÑO BUQUE EN EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO* [Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos., Universidad Católica de Colombia].

- Muñoz, Á. (2010). *Validación y análisis de consenso de modelos de escenarios de cambio climático para Ecuador*. Universidad del Zulia.
- Muñoz, Á., Torres, W., y Cisneros, J. (2014). *Disponibilidad de agua en la cuenca alta del río Guayllabamba y unidades hídricas orientales aportantes de agua para Quito: Oyacachi, Chalpi Grande, Papallacta y Antisana*.
- Murillo, L., Rivera, J., y Castizo, R. (2018). *Cambio Climático y Desarrollo Sostenible en Iberoamérica*. <https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2019/06/SEGIB-Informe-La-Ra%CC%81bida-2018-completo.pdf>
- Naciones Unidas. (2019). *Cambio Climático y Derechos Humanos. Contribuciones desde y para América Latina y El Caribe* (Naciones Unidas).
- Navarrete, V. (2021). *Análisis de los ecosistemas de páramo en la cosmovisión andina ecuatoriana* [Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de Licenciada en Ciencias de la Educación mención Ciencias Sociales]. Universidad Central del Ecuador.
- OCDE. (1993). *OECD Environmental Indicators. Development, Measurement and Use*.
- Ontaneda, D. (2020). *Efectos de la variabilidad climática sobre los caudales aportantes al embalse Salve Faccha perteneciente a la red de agua potable Papallacta* [Maestría Profesional en Cambio Climático y Negociación Ambiental].
- Ordoñez, J. (2011). *Balance hídrico superficial* (Primer). SENAMHI. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Orozco, I., Ramirez, A., y Francés, F. (2018). Modelación de los impactos del Cambio Climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Ingeniería del agua*, 22, 125. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8931>

- Orozco, M., & Valdez, E. (2018). *Sistema Presión-Estado-Respuesta*. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/figure/Fig-N2-Sistema-Presion-Estado-Respuesta_fig1_336411629
- Ortega, H. (Quito). *Evaluación de la influencia de la incorporación de datos de precipitación satelital (TMPA-3B42R) sobre la simulación hidrológica a escala diaria en la cuenca alta del río Guayllabamba* [Máster en Ingeniería en Recursos Hídricos]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20072/1/CD-9510.pdf>
- Pacheco Moya, R. M., Quiala Ortiz, E., y Martínez Hernández, I. (2018). Determinación del parámetro número de curva en la cuenca Las Coloradas en un entorno SIG. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(2), 60-71.
- Paliz, C., Perugachi, N., Martínez, J., Moreno, M., Yaucán, C., y Palaguachi, R. (2021). *Análisis estadístico de datos de las precipitaciones usando métodos robustos y bootstrap*. 12, 52-61.
- Pilco, H. (2013). *Modelación hidrológica distribuida espacializada usando HEC-HMS para la represa Chirimayuni-Moquegua* [Ingeniero Geólogo-Geotécnico, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna].
- Pizarro-Tapia, R., Cabrera-Jofre, C., y Morales-Calderón, C. (2011). *Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glaciaria en la producción de agua (1963-2006)*. 2(3).
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000300001
- Polanco, C. (2006). *Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones*. 9(2).
- Pourrut, P. (1983). *Los Climas del Ecuador*. Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica.

- Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. (2019). *Decreto Ejecutivo 752: Reglamento al Código Orgánico del Ambiente*.
- Reis, R., Datia, N., y Pato, M. P. (2020). *A primer on understanding Google Earth Engine APIs*. 6(1).
- Rodriguez, J. (2021). *Validación de los productos TRMM y CHIRPS para la intercuenca Alto Aparímac* [Tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Roldán, G., Rodríguez, A., Jácome, G., y Schuler, C. (2013). *Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: Proyecciones al año 2030 en la Región Ucayali*.
- Rosas, L. (2009). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas*.
- Rosero, M. (2017). *Análisis Multitemporal del Uso del Suelo y Cobertura Vegetal de la Cuenca del Río Tahuando y Proyección de Cambios al Año 2031, en el Cantón Ibarra, Provincia de Imbabura* [Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de Magíster en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas].
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025*.
- Secretaría Técnica Planifica Ecuador. (2019). *Guía para formulación/ actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT)* (Primera edición).
- Segura-Castruita, M., y Ortiz-Solorio, C. (2016). *Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas- mínimas y altitud*. 3(3), 93-110.
- SENAGUA. (2016). *Base de Datos de las concesiones a marzo 2016*.
- Serrano, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., y Villacís, M. (2012). *Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la*

determinación de variabilidad y Cambio Climático en el Distrito Metropolitano de Quito. 16(2), 23-47.

Sifuentes, A. (2009). *Indicadores de sustentabilidad para los municipios de la franja fronteriza norte de México* [Grado académico de maestro en ciencias con especialidad en sistemas ambientales].
https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/569382/DocsTec_10116.pdf?sequence=1

Suescún, L. L. D., y Africano, J. G. A. (2018). *Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada niscota para un acueducto interveredal en nunchía, casanare*. Universidad Católica de Colombia.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., y Meehl, G. A. (2012). *An Overview of CMIP5 and the Experiment Design*. 485-498.

Terán Vinuesa, B. F. (2021). *Plan de manejo ambiental para la cuenca alta del Río Tahuando, cantón Ibarra, provincia de Imbabura*.

Tobar, L. (2019). *Diseño urbano arquitectónico de un parque natural en las riberas urbanas del río Tahuando* [Previo a la Obtención del Título de Arquitecto].

Torres-Benites¹, E., Fernández-Reynoso, D., Oropeza-Mota, J. L., y Mejía-Saenz, E. (2004). *Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca «El Tejocote», Atlacomulco, Estado de México*. 22(4), 437-444.

Úbeda, J., y Delgado, Y. (2018). *La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura*. 4(7), 889-896.

- Umaña, B. (2014). *Análisis hidrológico de la cuenca del río Toyogres utilizando el modelo HEC-HMS* [Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción].
- Unión Europea. (2018). *Introducción a la evapotranspiración del agua en las plantas cultivadas*. https://www.aragon.es/documents/20127/674325/IT_269-18.pdf/9712441a-f8c1-e991-2831-5bc8dbded142
- Uribe, N. (2010). *SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*.
- Urrea, V., Ochoa, A., y Mesa, O. (2016). *Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo de 1981-2014*.
- Valle, W., y Méndez, H. (2015a). *El Medio Ambiente y los Recursos Naturales*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Valle, W., y Méndez, H. (2015b). *Fases, Efectos, Abastecimiento y Conservación del Agua*. [Trabajo final para optar al título de Licenciado en Ciencias de la Educación con mención en Ciencias Naturales.].
- Vázquez-Valencia, R., y García-Almada, R. (2018). *Indicadores PER y FPEIR para el análisis de la sustentabilidad en el municipio de Cihuatlán, Jalisco, México*. 27(53). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2395-86692018000200001&script=sci_arttext
- Yáñez, M. (2019). *Balance hídrico de la microcuenca del río Tahuando, parroquia Angochagua- Ibarra* [Ingeniero Geógrafo y del medio ambiente]. Universidad de las Fuerzas Armadas.

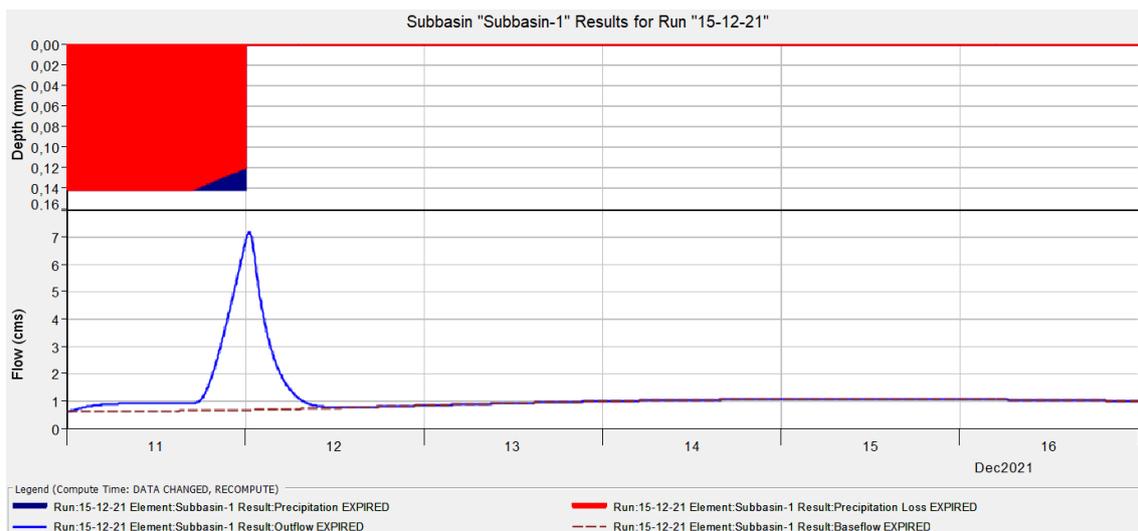
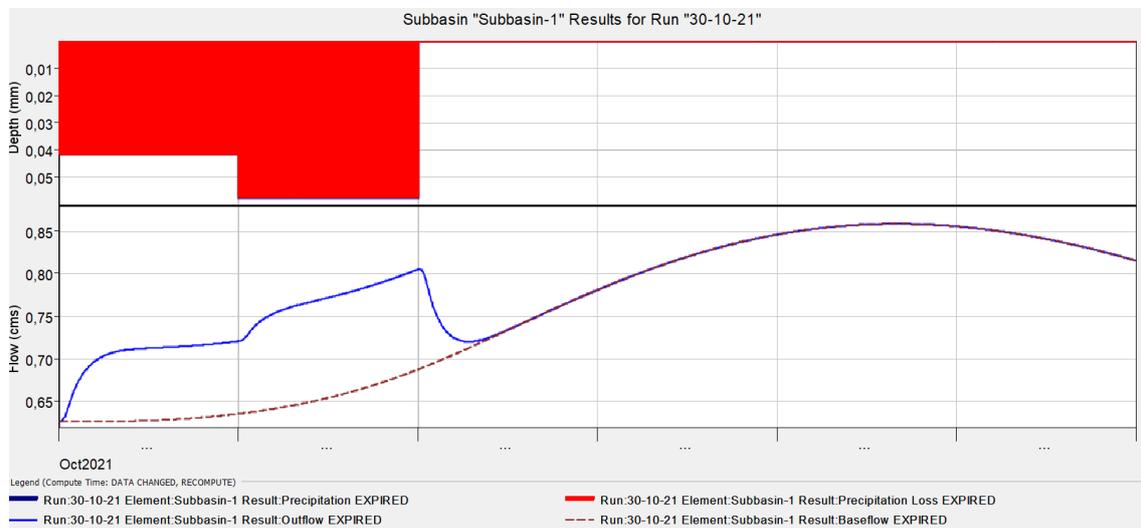
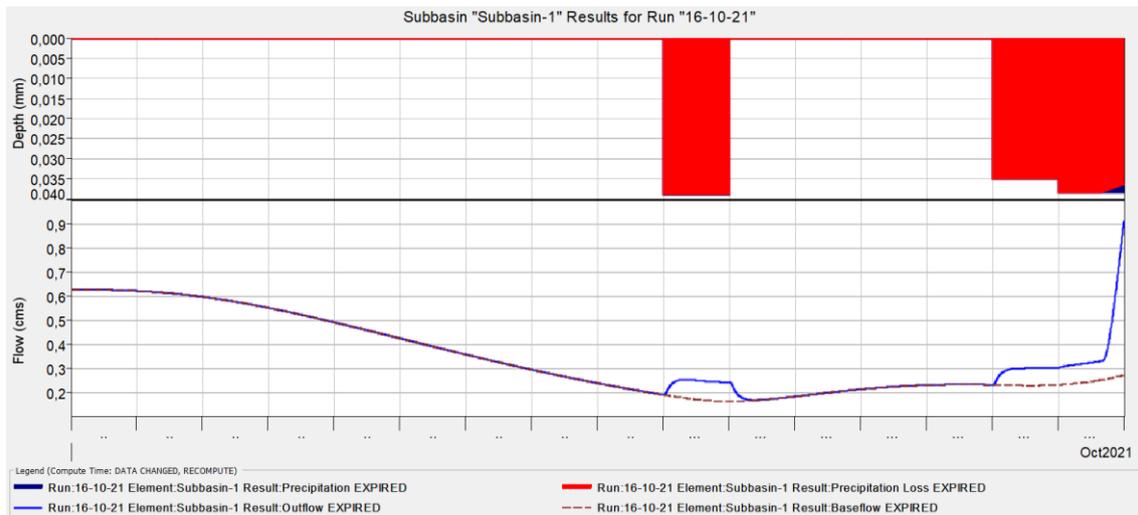
Anexos

Anexo 1. Programa de extracción de información en formato .nc

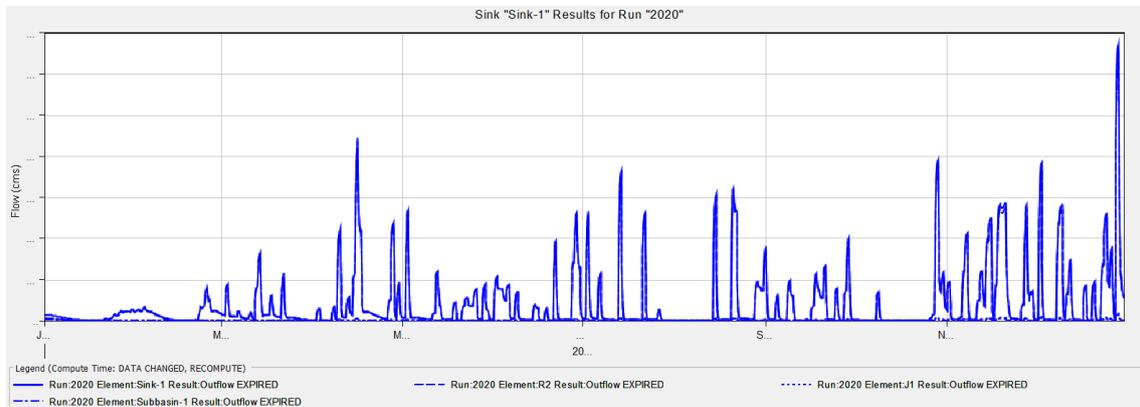
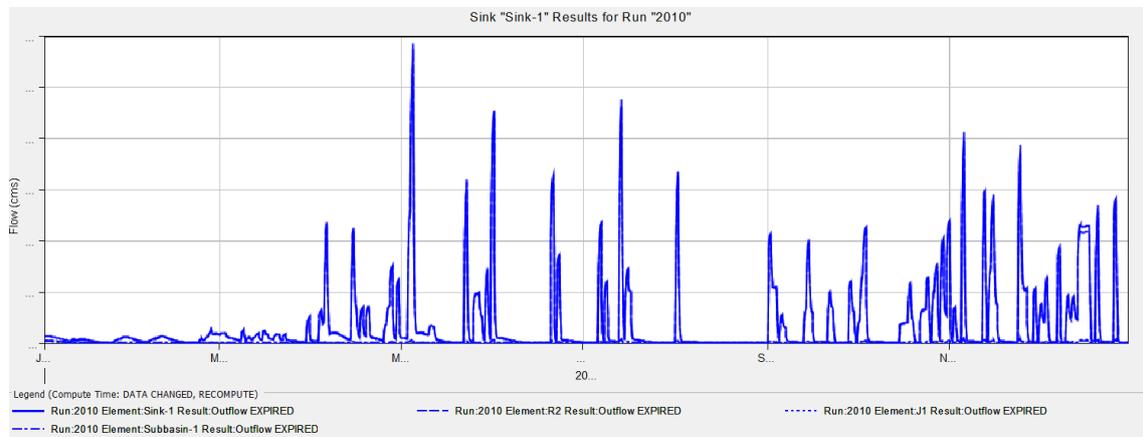
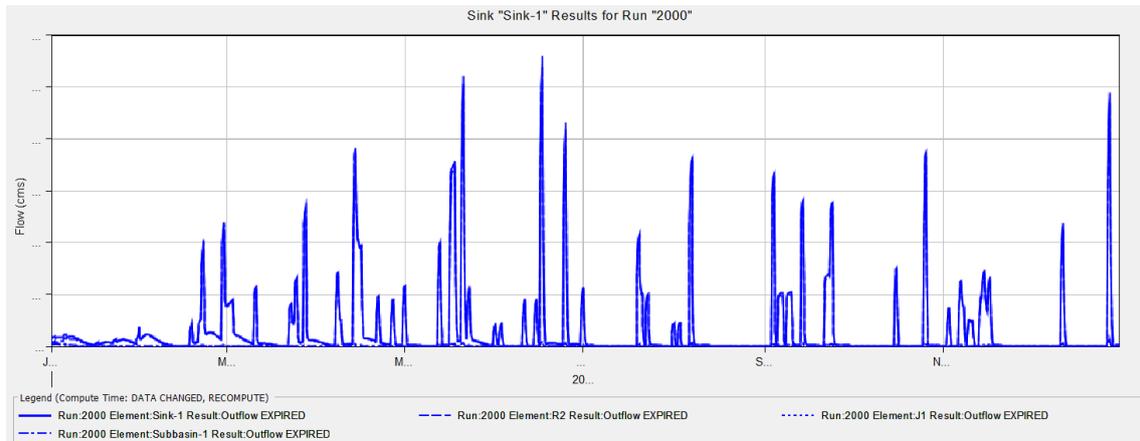
```
clear all
clc
direccion="pr_day_Ecuador_MIROC-ESM_rcp85_"
fecha_final=2070
for year=2011:fecha_final
y=string(year)

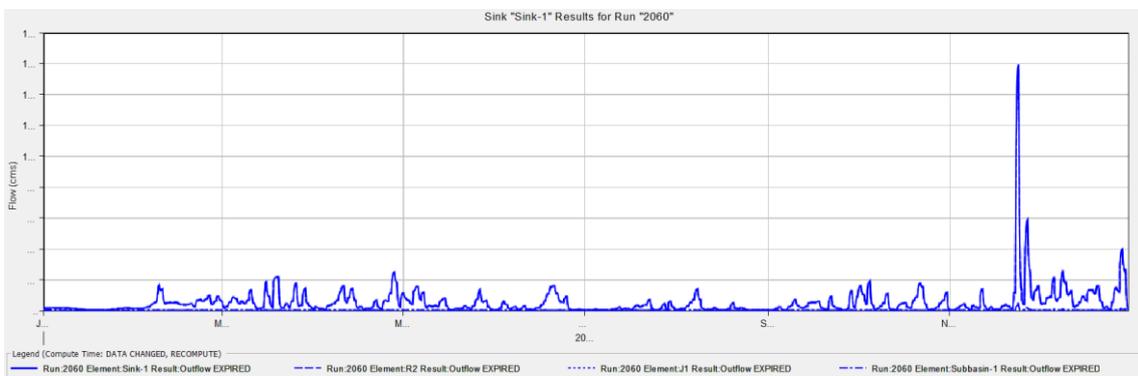
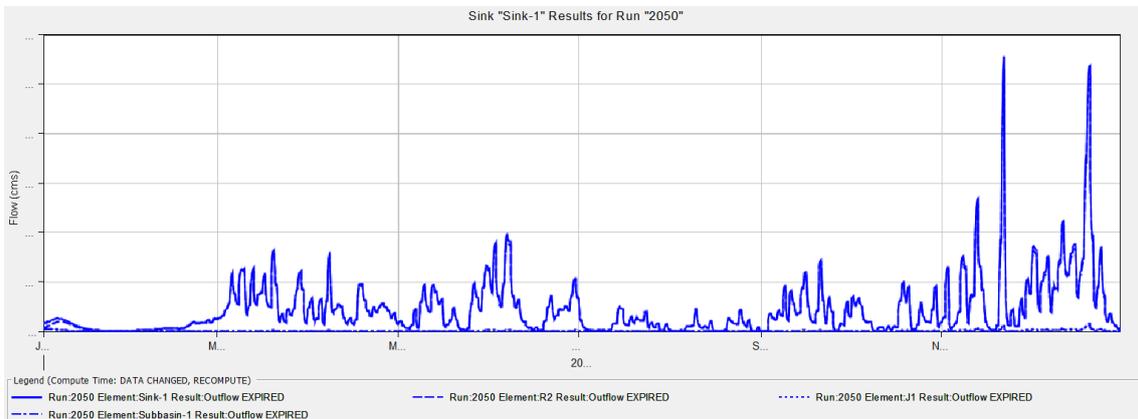
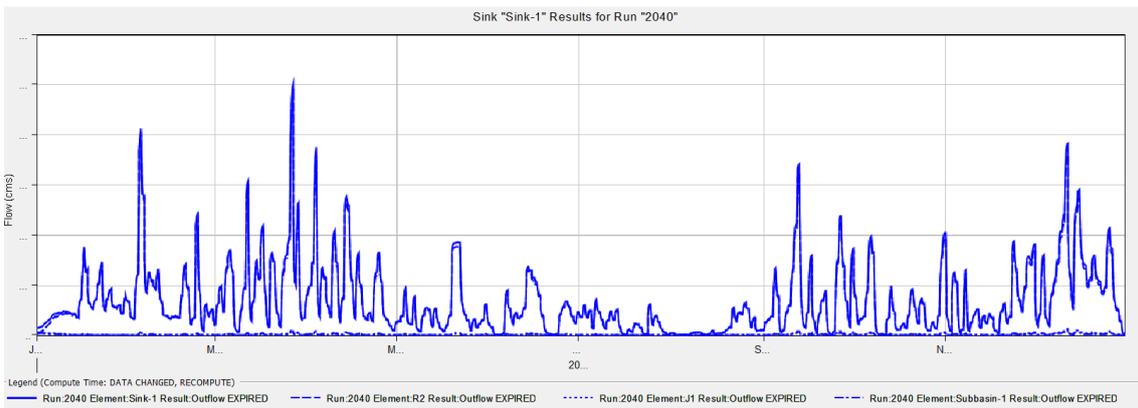
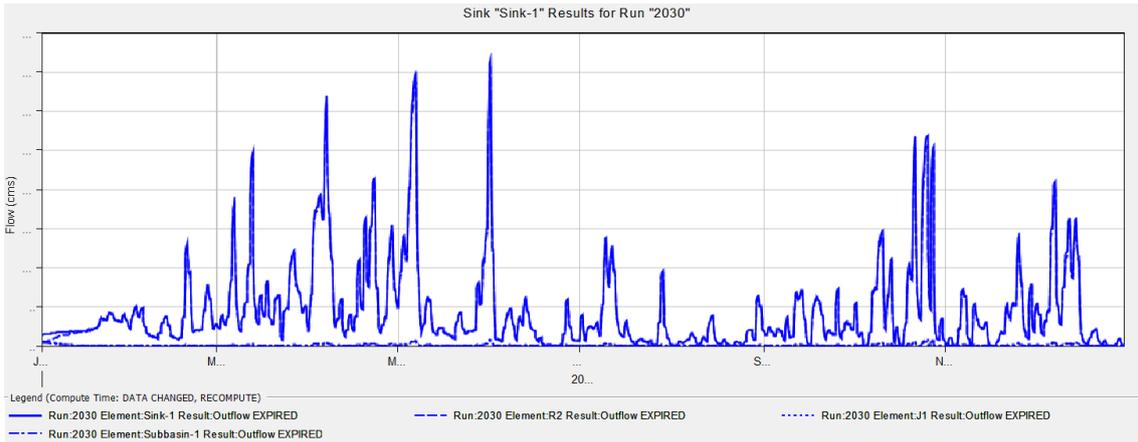
lon=ncread(strcat(direccion,y,'.nc'),'lon');
lat=ncread(strcat(direccion,y,'.nc'),'lat');
tiempo=ncread(strcat(direccion,y,'.nc'),'time');
precipitacion=ncread(strcat(direccion,y,'.nc'),'precip');
salida=precipitacion(49,21,1:length(tiempo));
fecha=datestr(tiempo);
a=length(fecha)
fecha=string(fecha);
preci=zeros(a,1);
for i=1:a
    preci(i,1)=salida(:, :, i);
end
preci1=table(preci);
fecha=table(fecha);
basedatos=[fecha preci1];
writetable(basedatos, strcat(direccion,y, '.xlsx'));
end
```

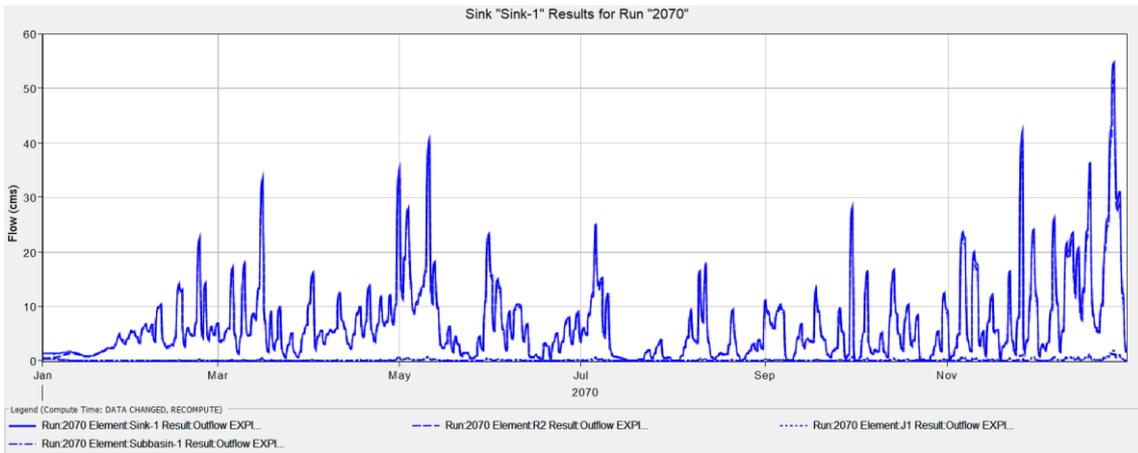
Anexo 2. Validación del modelo hidrológico



Anexo 3. Gráficas realizadas por el modelo hidrológico HEC-HMS en distintos años







Anexo 3. Salida a campo





Anexo 4. Mapas Cartográficos

