

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación del cambio climático en los patrones de precipitación y su influencia en el diseño y planificación del Embalse Chiquicahua situado en la provincia de Tungurahua, Ecuador

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

**Maestría en Ingeniería Civil Con Mención En Construcción
Y Saneamiento**

Presentado por:

Erick Kenneth Torres Bonilla

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, cuyo apoyo incondicional y enseñanzas han sido la base de cada uno de mis logros.

A mi esposa, cuyo amor, paciencia y comprensión me han acompañado cada día en este proceso.

A mi hija fuente de inspiración y alegría, que me recuerda la importancia de construir un futuro mejor.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mis padres, por su inquebrantable apoyo y guía en cada etapa de mi vida.

A mi esposa, mi compañera de vida, quien ha estado a mi lado en cada momento, brindándome su amor, paciencia y comprensión.

A mi hija, quien me inspira a seguir adelante y a buscar siempre ser un mejor ejemplo.

A mis profesores, quienes, con su dedicación, conocimiento, y guía han sido fundamentales en mi formación académica y profesional.

A la ESPOL, por brindarme la oportunidad de crecer, aprender y desarrollarme en un ambiente de excelencia académica y compromiso.

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo ERICK KENNETH TORRES BONILLA acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 04 de diciembre del 2024.

ING. ERICK KENNETH
TORRES BONILLA

EVALUADORES

.....
M.Sc. Nadia Quijano

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
M.Sc. Samantha Hidalgo

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
M.Sc. Mónica Marina Rojo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El cambio climático está transformando los patrones de precipitación, planteando retos importantes para la planificación y gestión de infraestructuras hídricas. Según Poveda y Mesa, es esencial actualizar los modelos hidrológicos e incorporar escenarios climáticos futuros para garantizar la sostenibilidad de estas infraestructuras a largo plazo. Este proyecto aborda esta problemática evaluando los efectos del cambio climático en los patrones de precipitación y su impacto en el diseño y la planificación del embalse Chiquicahua, localizado en Tungurahua, Ecuador. El estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y ODS 13 (Acción por el clima). Este proyecto analiza como el cambio climático puede influir en el diseño y la planificación hidráulica del embalse Chiquicahua. Los resultados muestran que, para el período 2040-2059, el caudal proyectado bajo RCP 2.6 (concentración baja), supera en un 6.6% la precipitación base utilizada en el diseño del embalse. Esto indica que un escenario de bajas emisiones podría mejorar la disponibilidad de agua, mientras que las altas emisiones (RCP 8.5) implican riesgos de reducción del caudal en un 1.70 % y menor sostenibilidad del proyecto. Este análisis subraya la importancia de integrar proyecciones climáticas en el diseño de infraestructuras hídricas para garantizar su resiliencia frente al cambio climático.

Palabras Clave: Embalse, cambio climático, gestión de recursos hídricos, precipitación, Tungurahua.

ABSTRACT

Climate change is transforming precipitation patterns, posing significant challenges for the planning and management of water infrastructure. According to Poveda and Mesa, it is essential to update hydrological models and incorporate future climate scenarios to ensure the long-term sustainability of hydraulic infrastructures. This project analyzes how climate change may affect precipitation patterns and the design of the Chiquicahua reservoir in Tungurahua, Ecuador. The study aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs): SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 7 (Affordable and Clean Energy), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), and SDG 13 (Climate Action). The results show that for the period 2040-2059, the projected flow under the RCP 2.6 (low concentration) scenario exceeds the baseline precipitation used in the design of the reservoir by 6.6%. This indicates that a low-emissions scenario could enhance water availability, whereas high emissions, RCP 8.5, pose risks of reduced flow in 1.7% and decreased sustainability. This analysis underscores the importance of integrating climate projections into the design of water infrastructure to ensure its resilience to climate change.

Keywords: Reservoir, climate change, water resource management, Tungurahua, rainfall.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	6
<i>ABSTRACT</i>	7
ÍNDICE GENERAL	8
SIMBOLOGÍA.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
CAPÍTULO 1.....	14
Introducción	14
1.1 Antecedentes	15
1.2 Localización.....	16
1.3 Estudios previos	18
1.4 Problemática que resolver.....	19
1.5 Justificación.....	19
1.6 Objetivos	22
1.6.1 Objetivo General	22
1.6.2 Objetivos Específicos.....	22
CAPÍTULO 2.....	23
Desarrollo del proyecto.....	23
2.1 Marco conceptual	23
2.1.1 Cambio Climático.....	23
2.1.2 Modelos Climáticos.....	27
2.1.3 Patrones de Precipitación	28
2.1.4 Infraestructuras Hidráulicas	29
2.1.5 Evaluación de Impacto Climático en Infraestructuras Hidráulicas.....	31

2.2	Marco metodológico	32
2.2.1	Tabulación de datos.....	34
2.2.2	Solución a diseñar	35
CAPÍTULO 3.....		37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		37
3.1	Metodología.....	37
3.1.1	Volumen de embalse	38
3.1.2	Precipitación en Tungurahua – Ecuador 2011	40
3.1.3	Temperatura	41
3.1.4	Cálculo de Caudal.....	46
3.1.5	Cálculo de ETR (Evapotranspiración Real)	47
3.2	Resultados	47
3.3	Diseño de la solución	55
3.3.1	Aumento de la capacidad de almacenamiento	55
3.3.2	Refuerzos estructurales	56
3.3.3	Sistemas de monitoreo y alerta temprana	56
3.3.4	Reforestación de cuencas	56
3.3.5	Construcción de humedales	57
CAPÍTULO 4.....		58
Conclusiones Y Recomendaciones		58
Conclusiones.....		58
Recomendaciones.....		59
BIBLIOGRAFÍA.....		60

ABREVIATURAS

PNA	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
PNUD	Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo
CCKP	Climate Change Knowledge Portal
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación
PNCC	Programa Nacional para el Cambio Climático
GEI	Gases de Efecto Invernadero
RCP	Vías de Concentración Representativa
EBM	Modelos de Equilibrio Terrestre
EMIC	Modelo de Complejidad Intermedia
GCM	Modelo Climático General
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
°C	Celsius
s	Segundos
t	Tiempo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del Embalse Quebrada Chiquicahua división Parroquial-Cantonal (Llamuca & Velasco, 2021a).....	17
Figura 2 Valores de RCPs (CoastAdapt, n.d.)	26
Figura 3 Metodología propuesta.....	33
Figura 4 Implantación general de las obras (Llamuca & Velasco, 2021b).	38
Figura 5 Ecuación para cálculo de caudal.	46
Figura 6 Proyección 2020-2039 de precipitación vs meses	49
Figura 7 Proyección 2040-2059 de precipitación vs meses	51
Figura 8 Proyección 2040-2079 de precipitación vs meses	52
Figura 9 Proyección 2080-2099 de precipitación vs meses	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de presas según características físicas y categorías de HPC (Islam et al., 2024).....	27
Tabla 2 Datos de precipitación promedio anual (mm) (INGECONSULT, 2015)	35
Tabla 3 Caudales Autorizados y Caudales de ingreso al embalse. (Llamuca & Velasco, 2021b)	39
Tabla 4 Caudales Aforados (promedios mensuales). (Llamuca & Velasco, 2021b)	39
Tabla 5 Temperatura en la Provincia de Tungurahua periodo 2011 (World Bank Group, n.d.).	42
Tabla 6 Temperatura en la Provincia de Tungurahua Proyección 2020-2039 (World Bank Group, n.d.).	43
Tabla 7 Temperatura en la Provincia de Tungurahua Proyección 2040-2059 (World Bank Group, n.d.).	43
Tabla 8 Temperatura en la Provincia de Tungurahua Proyección 2060-2079 (World Bank Group, n.d.).	44
Tabla 9 Temperatura en la Provincia de Tungurahua Proyección 2080-2099 (World Bank Group, n.d.).	45
Tabla 10 Precipitación y Caudal para una proyección del periodo 2020-2039	49
Tabla 11 Precipitación y Caudal para una proyección del periodo 2040-2059	50
Tabla 12 Precipitación y Caudal para una proyección del periodo 2060-2079	52
Tabla 13 Precipitación y Caudal para una proyección del periodo 2080-2099	53

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, el cambio climático es uno de los factores más importantes que alteran los patrones de precipitaciones a nivel mundial (IPCC, 2021). Los impactos se manifiestan en la intensificación de eventos climáticos extremos, como inundaciones repentinas o sequías prolongadas, que afectan la disponibilidad y distribución de los recursos hídricos (Oppenheimer et al., 2019). La variabilidad climática presenta un desafío significativo para la planificación y gestión de infraestructuras hídricas. Es especialmente crítico en la región andina de América Latina, donde las cadenas montañosas intensifican los cambios en el ciclo hidrológico (Buytaert et al., 2006).

Un ejemplo relevante para Ecuador es que la provincia de Tungurahua, que ha experimentado fluctuaciones significativas en los patrones de lluvia en las últimas décadas, afectando así el suministro de agua para la agricultura, la producción de

energía y el consumo humano (MAATE, 2023). La infraestructura crítica para la región será el embalse de Chiquicahua, ya que los páramos son ecosistemas reguladores hídricos sometidos a fuertes presiones (Aucancela Concha & Chiluiza Ramos, 2011). Por lo tanto, habrá una preocupación de como el embalse reaccionará a los diferentes niveles de agua debido al cambio climático, lo que podría obstaculizar su función.

Diversos estudios han señalado la importancia de integrar el cambio climático en el diseño y planificación de embalses y otras infraestructuras hídricas (WWAP, 2012). Las proyecciones climáticas para la región andina indican un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación, lo que hace urgente reconsiderar las estrategias nacionales de gestión del agua (Vergara et al., 2007). Es Fundamental actualizar los modelos hidrológicos y emplear escenarios climáticos futuros en el diseño de infraestructuras hidráulicas, con el objetivo de asegurar su sostenibilidad a largo plazo (Poveda & Mesa, 2000).

En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo analizar los impactos del cambio climático en el régimen de precipitaciones en la cuenca que alimenta el embalse Chiquicahua y discutir sus implicaciones para la futura planificación y operación de la presa. Los hallazgos del estudio no solo generarán evidencia científica para apoyar decisiones informadas de manejo del embalse, sino que también informarán el desarrollo de estrategias de adaptación en la región andina.

1.1 Antecedentes

Los embalses se han adaptado al cambio climático los cuales evidencian avances importantes tanto a nivel global como en Ecuador. A nivel mundial, países como Kenia, Tanzania y Uganda han implementado proyectos en la cuenca del Lago Victoria, enfocados en incrementar la resiliencia al cambio climático mediante la gestión sostenible del agua y la restauración de ecosistemas vulnerables. Estas iniciativas han sido financiadas por organismos internacionales como el Fondo de Adaptación y han permitido reducir riesgos asociados con eventos climáticos extremos (Fondo de Adaptación, 2023).

En Ecuador, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático representa un esfuerzo significativo. Este plan, coordinado por el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, establece estrategias para reducir los riesgos climáticos y aumentar la capacidad adaptativa de comunidades vulnerables (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2023). Incluye acciones específicas como la creación del Sistema de Información, Proyecciones, Riesgo Climático y Adaptación, que brinda datos esenciales para la planificación de infraestructuras críticas, como embalses (MAATE, 2023).

Proyectos locales, como la restauración de cuencas hidrográficas y la implementación de sistemas de alerta temprana, están transformando la gestión hídrica en el país. Estas iniciativas no solo buscan mitigar impactos inmediatos, sino también garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos a largo plazo, lo que es especialmente relevante para infraestructuras como el embalse Chiquicahua, situado en la región andina ecuatoriana, donde se proyectan cambios significativos en los patrones de precipitación debido al cambio climático (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2023).

Estos esfuerzos subrayan la importancia de integrar medidas de adaptación específicas para infraestructuras hidráulicas, asegurando su funcionalidad frente a un clima cambiante y priorizando la seguridad hídrica de las comunidades dependientes.

1.2 Localización

El Embalse está ubicado en la Quebrada Chiquicahua en la provincia de Tungurahua, y regulará las aguas provenientes de la Unidad Hídrica Quebrada Chiquicahua, Unidad Hídrica Rio Blanco y la Zona Hídrica 1 Cocha Colorada (Llamuca & Velasco, 2021a).

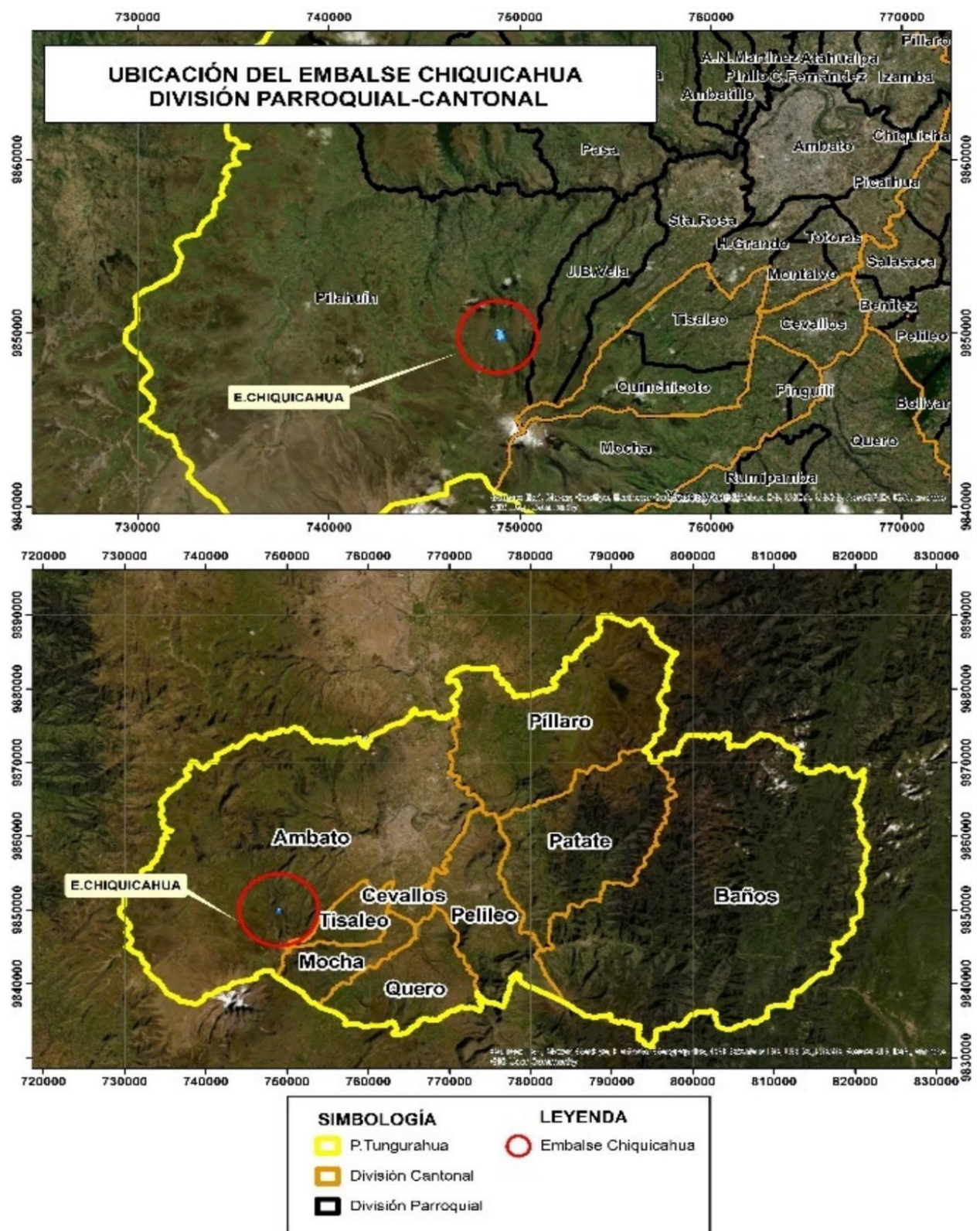


Figura 1 Ubicación del Embalse Quebrada Chiquicahua división Parroquial-Cantonal (Llamuca & Velasco, 2021a)

1.3 Estudios previos

La investigación sobre los impactos del cambio climático en los patrones de precipitación y su influencia en infraestructuras hidráulicas ha sido ampliamente explorada en diversas regiones del mundo. En particular, los estudios realizados en áreas montañosas, como los Andes, han resaltado la vulnerabilidad de estas regiones frente a las variaciones climáticas. (Buytaert et al., 2006) llevaron a cabo un estudio detallado sobre la hidrología del páramo andino, destacando cómo las alteraciones en el ciclo hidrológico, provocadas por el cambio climático pueden afectar la disponibilidad de agua en estas regiones. Sus hallazgos indican que la variabilidad climática, amplificada por el cambio climático, representa un riesgo significativo para las infraestructuras hídricas que dependen de la estabilidad de los patrones de precipitación.

En cuanto a las metodologías para analizar la influencia del cambio climático en las infraestructuras, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha establecido directrices que sugieren la utilización de un mínimo de 30 años de datos climatológicos para asegurar la precisión y fiabilidad de los estudios. Estas recomendaciones han sido adoptadas en investigaciones recientes que buscan evaluar los cambios en los patrones de precipitación y su impacto en infraestructuras críticas. Por ejemplo, (Buytaert et al., 2011) proyecta un aumento en la frecuencia de eventos de precipitación extrema en los Andes tropicales, con implicaciones significativas para la gestión de recursos hídricos y la seguridad de las infraestructuras. Asimismo, análisis regionales indican que la variabilidad climática intensificada incrementará la vulnerabilidad de las infraestructuras, exigiendo revisiones en su planificación y diseño (Vuille et al., 2008).

Estos estudios previos forman la base para la evaluación del embalse Chiquicahua en la provincia de Tungurahua, Ecuador. Al basarse en investigaciones que destacan la necesidad de incorporar los efectos del cambio climático en la planificación y diseño de infraestructuras, este proyecto se alinea con las mejores prácticas internacionales y contribuye al desarrollo de estrategias adaptativas que aseguren la sostenibilidad y resiliencia de las infraestructuras hidráulicas en un contexto de cambio climático.

1.4 Problemática que resolver

Los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos han ocurrido siempre, incluso en un clima estable. Sin embargo, existe una preocupación creciente fundamentada en que algunos de estos eventos extremos están aumentando en frecuencia, siendo el calentamiento global provocado por la actividad humana la principal causa de este cambio (Trenberth et al., 2015).

Las intensidades extremas de precipitación, así como su duración y frecuencia, son factores cruciales para la planificación y diseño de obras hidráulicas, carreteras, redes de alcantarillado, drenajes pluviales en instalaciones y edificaciones, así como para la optimización de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas y la prevención de crecidas (INAMHI, 2019).

La falta de evaluaciones precisas y actualizadas sobre como estas variaciones afectan la disponibilidad de recursos hídricos y la operación de infraestructuras hidráulicas pone en riesgo la eficiencia, la resiliencia y la sostenibilidad a largo plazo de estas estructuras.

La ausencia de estudios sobre el impacto del cambio climático en los patrones de precipitación de la región representa un riesgo considerable para la planificación y operación futura del embalse. Si no se actualizan los diseños y estrategias de gestión actuales, la infraestructura hidráulica podría volverse vulnerable e ineficiente, poniendo en peligro la sostenibilidad de los recursos hídricos y los medios de vida de las comunidades locales.

1.5 Justificación

La evaluación de los efectos del cambio climático en las infraestructuras hidráulicas es crucial debido a los impactos significativos que los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos pueden tener sobre estas estructuras. A medida que el calentamiento global provocado por la actividad humana continúa alterando los patrones de precipitación, se observa un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como lluvias torrenciales y sequías prolongadas (Trenberth et al., 2015). Estos cambios tienen el potencial de comprometer la eficiencia y sostenibilidad de

infraestructuras clave como embalses, que son fundamentales para la gestión de recursos hídricos, control de inundaciones y abastecimiento de agua.

Los embalses, diseñados bajo supuestos de estabilidad climática, ahora enfrentan nuevos desafíos que no se consideraron en su planificación original. La falta de evaluaciones precisas y actualizadas sobre cómo estas variaciones en los patrones de precipitación afectan la disponibilidad de recursos hídricos pone en riesgo la capacidad de estas infraestructuras para adaptarse a condiciones cambiantes. Según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), las intensidades extremas de precipitación, así como su duración y frecuencia, son factores críticos en el diseño de obras hidráulicas y la gestión de cuencas hidrográficas (INAMHI, 2019). Sin una integración adecuada de estos cambios, la infraestructura podría fallar en su propósito de optimizar el uso de los recursos hídricos y prevenir desastres naturales.

Además, la OMM recomienda que los estudios de este tipo se basen en un mínimo de 30 años de datos para asegurar su confiabilidad (INAMHI, 2019). Esto subraya la importancia de utilizar registros meteorológicos extensos y detallados para evaluar los impactos del cambio climático de manera efectiva. Al realizar un análisis exhaustivo de las estaciones meteorológicas más próximas al área de estudio, este proyecto no solo contribuirá a la planificación y gestión del embalse Chiquicahua, sino que también ofrecerá un marco de referencia para otras infraestructuras similares en la región andina.

En este sentido, el proyecto se orienta a garantizar que las infraestructuras hidráulicas sean capaces de adaptarse a las nuevas condiciones climáticas, asegurando su operatividad y eficacia a largo plazo. La integración de los cambios en los patrones de precipitación en la planificación y diseño de estas infraestructuras es esencial para prevenir fallos estructurales y maximizar la resiliencia frente a un clima en constante cambio. Este enfoque no solo es vital para la seguridad hídrica y el bienestar de las comunidades locales, sino que también contribuye al desarrollo sostenible y la protección de los recursos naturales en la región.

El presente proyecto se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que son esenciales (Naciones Unidas, n.d.).

El ODS 6: Agua limpia y saneamiento, específicamente su meta 6.4, se centra en mejorar la eficiencia en el uso del agua y asegurar la sostenibilidad del suministro, lo cual es esencial para una gestión efectiva y resiliente de los recursos hídricos en el embalse. Además, la meta 6.5, que fomenta la gestión integrada de los recursos hídricos, es crucial en un contexto donde el cambio climático altera los patrones de precipitación y la disponibilidad de agua.

El ODS 13: Acción por el Clima destaca la relevancia de aumentar la resiliencia frente a los riesgos climáticos, tal como se menciona en la meta 13.1. La evaluación de los cambios climáticos y su inclusión en el diseño del embalse aportan directamente a la adaptación de infraestructuras esenciales. Asimismo, la meta 13.2, que aboga por integrar el cambio climático en las políticas y estrategias, se pone de manifiesto en la necesidad de actualizar los modelos hidrológicos bajo escenarios futuros, optimizando de esta manera la planificación.

El ODS 7: Energía asequible y no contaminante, especialmente la meta 7.2 que promueve el incremento de la proporción de energía renovable en el mix energético, también se relaciona con este proyecto. Si el embalse Chiquicahua posee o puede desarrollar una función hidroeléctrica, asegurar que su diseño sea resistente frente al cambio climático contribuiría a una fuente sostenible de energía renovable en la región.

Finalmente, el ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, en particular la meta 11.5 que busca mitigar el impacto de los desastres, incluidas las inundaciones, subraya la importancia de este estudio para mejorar la seguridad y la resiliencia de las infraestructuras hidráulicas en un contexto de cambio climático. Planificar infraestructuras hidráulicas resilientes permitirá proteger a las comunidades locales frente a eventos extremos de precipitación, garantizando un desarrollo urbano sostenible.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

El objetivo general es desarrollar un marco metodológico integral para evaluar los efectos del cambio climático en los patrones de precipitación, analizando su impacto en el diseño y planificación del embalse Chiquicahua en Tungurahua, Ecuador, garantizando la sostenibilidad y resiliencia de las infraestructuras hídricas.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Analizar datos históricos de precipitación, así como en utilizar modelos climáticos para proyectar futuros cambios en estos patrones de precipitación.
- Evaluar el impacto de los cambios observados y proyectados en los patrones de precipitación sobre la operación y eficiencia de embalses, identificando las oportunidades de adaptación y optimización en el diseño y gestión frente al cambio climático.
- Planificar estrategias y medidas de adaptación y mitigación que permitan mejorar la resiliencia y la sostenibilidad de las infraestructuras hidráulicas frente a los cambios en los patrones de precipitación.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Cambio Climático

El cambio climático se puede definir como una alteración significativa en los patrones climáticos a largo plazo debido a factores naturales como, en gran medida, a la actividad humana (IPCC, 2021).

Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) los escenarios de cambio climático son “una representación plausible y en ocasiones simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas

internamente coherentes definido explícitamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climatológico antropógeno”.

Este fenómeno está alterando los patrones de precipitación a nivel global. Los estudios predicen un aumento en la frecuencia y severidad de eventos de precipitación extrema en muchas regiones, junto con períodos de sequía más prolongados en otras. Las proyecciones indican que las zonas húmedas tenderán a volverse más húmedas y las zonas secas, más secas, debido al aumento en la capacidad de retención de vapor de agua en una atmósfera más cálida (Field et al., 2014).

Existen organizaciones internacionales, gubernamentales y no gubernamentales que se dedican a estudiar, analizar y monitorear los problemas del cambio climático. Entre las que se incluyen:

- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)
- Organización Meteorológica Mundial (OMM)
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)
- National Aeronautics and Space Administration (NASA)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

En Ecuador también existen instituciones dedicadas al estudio del cambio climático, tales como:

- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador (MAATE)
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)
- Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES)
- Programa Nacional para el Cambio Climático (PNCC)

Las actividades humanas son responsables del calentamiento global, con un aumento de la temperatura superficial global de 1.1°C entre 2011 y 2020 en comparación con el periodo de 1850 a 1900. Este incremento es impulsado por las emisiones derivadas de actividades humanas y el calentamiento debido a los gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC et al., 2023).

El cambio climático inducido por el ser humano es el resultado de más de un siglo de emisiones netas de GEI derivadas del uso de energía, cambios en el uso de la tierra, estilos de vida, y patrones de consumo y producción. Es muy probable que la influencia humana no solo sea el principal motor del retroceso global de los glaciares, sino que también haya contribuido a la disminución de la cubierta de nieve primaveral en el hemisferio norte y al derretimiento de la capa de hielo en Groenlandia. Los efectos sobre algunos ecosistemas están alcanzando un punto de irreversibilidad, como los cambios hidrológicos resultantes del retroceso de los glaciares o las alteraciones en algunos ecosistemas montañosos y árticos debido al deshielo. Cientos de especies han perdido su hábitat local como consecuencia del aumento en la magnitud de fenómenos de calor extremo y la mortalidad masiva tanto en tierra como en el océano (IPCC et al., 2023).

En Ecuador, los impactos del cambio climático también son notables. El retroceso de los glaciares andinos, como el Chimborazo y el Cotopaxi, está directamente vinculado al incremento de las temperaturas. En las últimas décadas, estos glaciares han reducido su masa hasta en un 30%, lo que repercute en la disponibilidad de agua para el consumo humano y la agricultura en diversas regiones del país (INAMHI, 2019).

Las Vías de Concentración Representativa (RCPs, por sus siglas en inglés) son valores que nos ayudan a entender cómo puede cambiar el clima en el futuro y, por ende, necesitamos prever el comportamiento humano (CoastAdapt, n.d.) (Figura 2). Un aumento de temperatura de 2°C o más será el umbral a partir del cual el cambio climático se volverá peligroso. Por ello, los RCPs intentan capturar tendencias futuras, abarcando desde concentraciones muy altas (RCP 8.5) hasta muy bajas (RCP 2.6). Estos valores se refieren a las concentraciones proyectadas para el año 2100 (CoastAdapt, n.d.).

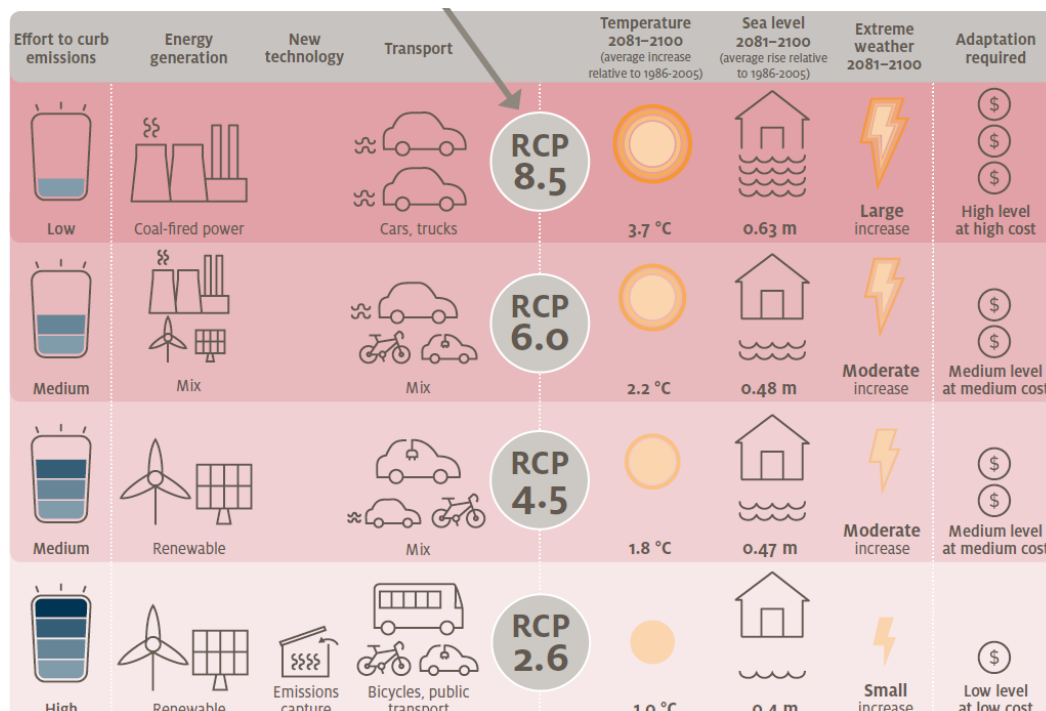


Figura 2 Valores de RCPs (CoastAdapt, n.d.)

Según el Perfil de Riesgo Climático en Ecuador, se destacan varios impactos significativos del cambio climático en diferentes sectores como la agricultura, el agua y la energía.

La agricultura constituye la columna vertebral del sistema económico de Ecuador, ya que proporciona alimentos y materias primas. Sin embargo, es vulnerable a los diversos eventos extremos que el país experimenta periódicamente, como inundaciones y sequías. Se proyecta que para el año 2050, el cambio climático podría impactar significativamente gran parte de las zonas cultivadas. Las variaciones en las temperaturas y la precipitación amenazarán la seguridad alimentaria, reduciendo la producción agrícola y aumentando la incidencia de plagas y enfermedades (The World Bank Group, 2021).

Existen varios tipos de presas (Tabla 1) y su relación con la resiliencia climática es crucial, especialmente considerando la creciente frecuencia e intensidad de las inundaciones, que representan una amenaza significativa para estas infraestructuras (Islam et al., 2024).

Tabla 1 Clasificación de presas según características físicas y categorías de HPC (Islam et al., 2024).

Clasificación de Presas	Almacenamiento (10x6 m3)	Altura (m)	HPC	Inundación de diseño de afluencia en términos de AEP o PMF
Pequeño	< 1.23	8 – 12	Bajo	1/100
			Significativo	Entre 1/100 y 1/1000
Medio	1.23 - 61.7	12 – 30	Alto	1/3 entre 1/1000 y PMF
			Muy Alto	2/3 entre 1/1000 y PMF
Grande	>61.7	> 30	Extremo	PMF

2.1.2 Modelos Climáticos

Los modelos climáticos son herramientas matemáticas esenciales para entender y predecir el comportamiento del clima en nuestro planeta. Estos modelos simulan las interacciones entre la atmosfera, los océanos, la superficie terrestre y el hielo, utilizando ecuaciones basadas en las leyes de la física, la química y la biología. Su objetivo principal es proyectar como cambiara el clima en el futuro, lo cual es crucial para la planificación y mitigación de los efectos del cambio climático (Harvey et al., 1997).

Existen varios tipos de modelos climáticos, cada uno con diferentes niveles de complejidad y aplicaciones. Los Modelos de Equilibrio Terrestre (EBM) son los más simples y se utilizan para estudiar el balance energético de la Tierra. Los Modelos de Complejidad Intermedia (EMIC) ofrecen un equilibrio entre detalle y eficiencia computacional, permitiendo simulaciones más detalladas sin requerir tantos recursos. Finalmente, los Modelos Climáticos Generales (GCM) son los más complejos y detallados, capaces de simular el clima global con alta precisión (Harvey et al., 1997).

Las proyecciones climáticas son una de las más importantes, ya que permiten predecir cambios en la temperatura, precipitación y otros parámetros climáticos. Además, se utilizan en estudios de impacto para evaluar como los cambios climáticos afectarán a diferentes regiones y sectores, como la agricultura, la salud y la infraestructura. También son fundamentales en la investigación científica, ayudando a entender los procesos climáticos y sus interacciones (Harvey et al., 1997).

2.1.3 Patrones de Precipitación

Los patrones se refieren a la distribución espacial y temporal de las lluvias en una región, y están influenciados por factores como la geografía, la atmósfera, los océanos y por el cambio climático.

2.1.3.1 Patrones Espaciales de Precipitación

Los patrones espaciales varían ampliamente según la localización geográfica. Las zonas ecuatoriales tienden a experimentar precipitaciones más abundantes debido a la convergencia de los vientos alisios en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), mientras que las regiones desérticas, como el Sahara, tienen precipitaciones mínimas debido a las zonas de alta presión subtropical (Peel et al., 2007).

2.1.3.2 Patrones Temporales de Precipitación

La precipitación no es constante durante todo el año; muchas regiones experimentan estaciones húmedas y secas. En los trópicos, por ejemplo, el desplazamiento estacional de la ZCIT crea períodos de lluvia intensa seguidos por períodos secos. Las monzones son un ejemplo extremo de variabilidad estacional, especialmente en Asia, donde se alternan estaciones lluviosas e invernales secas (Trenberth, 2011).

2.1.3.3 Factores que Afectan los Patrones de Precipitación

Los patrones de precipitación son componentes cruciales del ciclo hidrológico y están determinados por una variedad de factores climáticos, geográficos y atmosféricos. Estos

factores no solo influyen en la distribución temporal y espacial de las lluvias, sino también en su intensidad y frecuencia. A nivel mundial, el calentamiento atmosférico provocado por el cambio climático está modificando significativamente los patrones de precipitación. Algunos de estos factores son los siguientes:

- **Circulación Atmosférica Global:** Los patrones de circulación, como los vientos alisios, las corrientes en chorro y las células de Hadley, influyen en la distribución de las lluvias(Ropelewski & Halpert, 1987).
- **Fenómenos como El Niño y La Niña:** Estos fenómenos alteran la distribución de las precipitaciones, aumentando o disminuyendo las lluvias en varias partes del mundo(Ropelewski & Halpert, 1987).
- **Orografía:** Las montañas obligan a las masas de aire a elevarse, enfriarse y liberar su humedad en las laderas barlovento, mientras que las áreas sotavento pueden quedar áridas(Ropelewski & Halpert, 1987).

2.1.4 Infraestructuras Hidráulicas

La necesidad de contar con infraestructuras hidráulicas para el suministro y evacuación de agua ha llevado a superar obstáculos en el curso de los ríos y, durante su construcción, también se ha reconocido la importancia de proteger a las personas y sus bienes de los daños que, en ocasiones, la propia actividad humana ha causado. Aunque que el agua es el agente más significativo en la modelación del paisaje terrestre, especialmente a través de la red fluvial, también se deduce que las infraestructuras hidráulicas deben adoptar una postura defensiva clara. Esto implica, protegiéndose antes, durante y después de su vida útil mediante acciones coherentes y justificadas para el mantenimiento y conservación de su funcionalidad en diversos entornos y circunstancias.

Las infraestructuras hidráulicas, que pueden definirse de manera similar a las obras hidráulicas, son esenciales para garantizar que el uso del agua para diversas funciones no sea interrumpido. A lo largo de más de 4,000 años de historia documentada, se han construido innumerables infraestructuras hidráulicas en el mundo para diversas aplicaciones y en variados entornos (Melgarejo Moreno et al., 2023).

Los componentes de las infraestructuras Hidráulicas son elementos constructivos necesarios para lograr una funcionalidad en cuanto al tránsito de fluidos. Podrán añadirse a los elementos propiamente dichos, aquellos que tengan la naturaleza de obra de tratamiento del entorno para lograr el tránsito. Dentro de los componentes, las infraestructuras hidráulicas se incluyen las presas, que son estructuras que normalmente se realizan cerrando, por completo o parcialmente, el cauce de un río o arroyo, para acumular una gran masa de agua. Estos incluyen presas, que son estructuras que cierran, total o parcialmente, el cauce de un río o arroyo para acumular grandes masas de agua. También se incluyen los embalses, que almacenan agua como consecuencia de la construcción de las presas. En los embalses, el agua procedente de ríos y arroyos se almacena a la altura de las estructuras que los contienen. Las obras de toma son galerías, conductos, sifones, tuberías o canales que se llevan una parte del agua de un río para regular o distribuir el caudal (Panduro Gonzales, 2024).

Los embalses se emplean para almacenar, recuperar y regular el agua. Son grandes acumulaciones de agua construidas mediante presas y normalmente están situados en valles o depresiones del terreno y en las inmediaciones de los cauces erosivos de los ríos. El proyecto de un embalse debe abordar las siguientes fases: diseño, construcción y explotación, topografía, geometría estructural y de explotación. La topografía es fundamental en estas fases para el dimensionamiento y control de los distintos aspectos relacionados con el embalse.

Generalmente las presas se sitúan en los valles fluviales y construyen en zonas estrechas para reducir su longitud y, por ende, el volumen que hay que impermeabilizar, lo que disminuye el coste de la obra. La función principal de la presa es retener el agua del embalse con la máxima seguridad y estanqueidad del terreno, además de derivar el agua para minimizar las pérdidas que se producen por el propio embalse. Las presas se pueden clasificar según el material empleado en su construcción. A continuación, se presentan los tipos de presas clasificadas por su material:

- Presa de tierra: se construyen con materiales cohesivos de aluviones o con materiales rocosos de descomposición y alteración media.

- Presa de gravedad: su diseño busca que el peso propio sea el que impida el deslizamiento.
- Presa de escollera: se construyen con bloques de grandes dimensiones.
- Presa de bóveda: su estabilidad se mantiene comprimiéndola en la dirección de su altura para evitar la posible fisura (Melgarejo Moreno & Mejuto, n.d.).

2.1.5 Evaluación de Impacto Climático en Infraestructuras Hidráulicas

Los cambios climáticos previstos, que ocurren en el tiempo, el espacio geográfico y las variaciones en su intensidad, conllevan cambios en la implementación y gestión de la infraestructura hidráulica. Esto incluye aspectos como su construcción, operación, diseño, dimensionamiento y evaluación de impactos; así como su inspección, vigilancia y mantenimiento. Esta sección describe los posibles impactos del cambio climático en la infraestructura hídrica durante la fase de diseño de un proyecto hidráulico, con énfasis en las represas para la acumulación de agua. A partir del análisis de los posibles impactos, se identifican las principales necesidades de investigación en el desarrollo de inversiones en infraestructura hídrica a nivel continental, regional y de ecosistemas (Martínez Nieves, 2022).

El análisis de vulnerabilidad parte del supuesto de que las infraestructuras son vulnerables a ciertos fenómenos naturales o artificiales y, por tanto, se pueden evaluar o medir sus niveles de vulnerabilidad. Existen diversas categorías y subcategorías de indicadores de vulnerabilidad. En el caso de la infraestructura hidráulica, estos incluyen:

1. Sistemas de drenaje y tratamiento de aguas residuales.
2. Obras de drenaje de aguas pluviales.
3. Tomas de aguas con sus embalses.
4. Conducciones de agua bruta.
5. Instalaciones depuradoras.
6. Redes distribuidoras de agua.
7. Redes de sumideros.
8. Colectores específicos de aguas pluviales (Martínez Nieves, 2022).

El riesgo asociado a un fenómeno perturbador, desde el punto de vista de las estructuras hidráulicas, se mide en términos de una variable, generalmente económica, que mide los costes, tanto directos como indirectos, afines al posible deterioro de la estructura escogida. En particular, dado que el método de análisis adoptado será, fundamentalmente, el cálculo de la fracción anual de sobrepasar cierto umbral de actuación, tal valor umbral debe reflejar los efectos negativos producidos por el daño, mal funcionamiento, etc., de dicha estructura. Es lógico pensar que este valor de umbral será mayor o menor dependiendo del grado de utilidad o importancia del bien afectado, de su capacidad económica de resistencia y operatividad, de la complejidad de los procesos de consolidación de las barreras protectoras, así como conocimiento de las amenazas y riesgos existentes, y de los medios materiales y humanos disponibles.

2.2 Marco metodológico

Para el proyecto se ha decidido emplear una metodología mixta, que integrará tanto enfoques cuantitativos como cualitativos. Esta combinación garantiza la unión de datos cuantitativos con evaluaciones cualitativas, lo que permite obtener una visión completa del problema. Así, esta metodología permitirá:

- Validar la precisión de las proyecciones climáticas.
- Simular escenarios futuros para comprobar si el embalse podrá gestionar los cambios en la precipitación.
- Proponer medidas estructurales y operativas basadas en la comprensión de los impactos y vulnerabilidades.

Esta metodología no solo facilitará un análisis exhaustivo de los datos, sino que también permitirá una interpretación más rica y contextualizada de los resultados, asegurando que las decisiones tomadas sean informadas y efectivas.

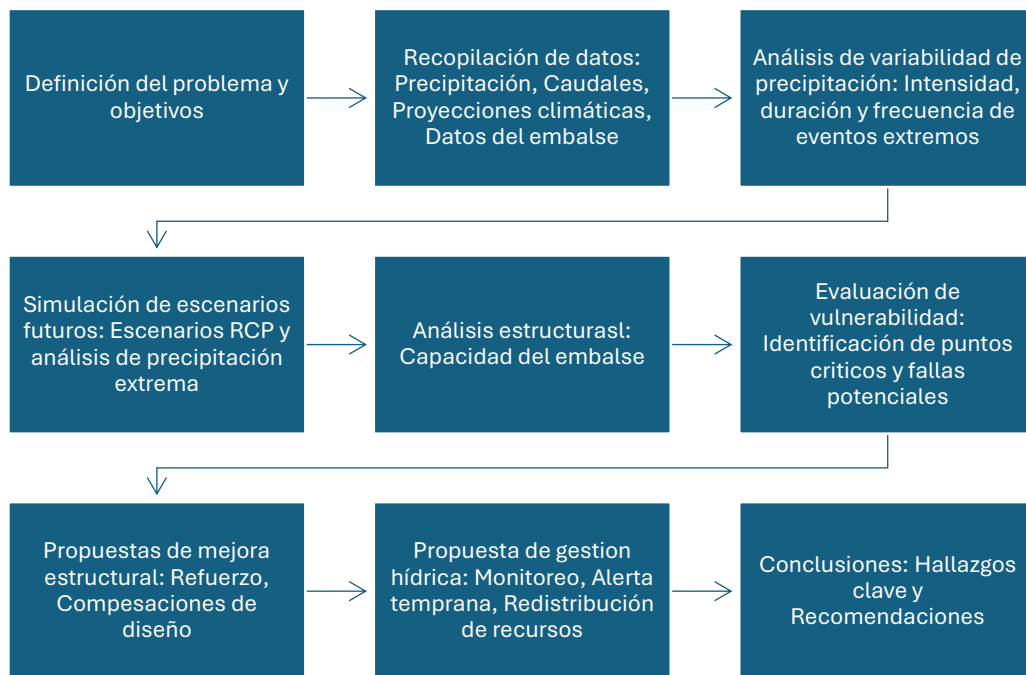


Figura 3 Metodología propuesta.

- **Definición del problema y objetivos:** Se establecerá el problema central del proyecto y los objetivos específicos que orientarán la investigación. El problema principal radica en cómo las variaciones en los patrones de precipitación afectarán el diseño y la operación del embalse Chiquichua.
- **Recopilación de datos:** Se recolectarán datos históricos y proyecciones futuras sobre los patrones de precipitación y las características del embalse. Esto incluirá información meteorológica y datos técnicos relevantes.
- **Análisis de datos:** Se llevará a cabo un análisis comparativo entre los datos históricos de precipitación y las proyecciones climáticas para identificar tendencias y magnitudes de cambio. Este análisis permitirá entender cómo las variaciones climáticas pueden impactar el embalse.
- **Simulación de escenarios:** Se centrará en la simulación de diversos escenarios climáticos proyectados, lo que ayudara a evaluar cómo diferentes condiciones climáticas podrían afectar la operación del embalse.
- **Análisis estructural:** Se evaluará la capacidad del embalse para gestionar mayores volúmenes de agua debido a precipitaciones más intensas. Este análisis incluirá la revisión de los diseños actuales y su adecuación a las nuevas proyecciones.

- Evaluación de vulnerabilidad: Basándose en los resultados de las simulaciones, se evaluarán las vulnerabilidades del embalse y se identificarán los puntos críticos. Esto permitirá desarrollar estrategias de adaptación y mitigación para mejorar la resiliencia de la infraestructura.
- Propuesta de mejora estructural: Se sugerirán mejoras en el diseño estructural del embalse para aumentar su capacidad de almacenamiento y manejo de eventos extremos. Esto puede incluir la optimización de la geometría de la presa, el refuerzo de las estructuras existentes y la implementación de sistemas de desagüe más eficientes para gestionar el exceso de agua durante periodos de alta precipitación.
- Propuesta de gestión hídrica: Se implementarán nuevas políticas de gestión del agua basadas en el uso eficiente y la redistribución de recursos. Esto podría incluir la promoción de prácticas de conservación del agua, la implementación de tarifas que incentiven el uso responsable y la creación de un sistema de monitoreo para evaluar el uso y la disponibilidad de recursos hídricos.
- Conclusiones y recomendaciones: Se resumirán los hallazgos del estudio y se presentarán las conclusiones clave y recomendaciones tanto para el diseño estructural de embalse como para la gestión hídrica en la región. Estas recomendaciones se basarán en el análisis de datos históricos y proyecciones climáticas, así como en la evaluación de vulnerabilidades identificadas durante el estudio

Cada etapa del diagrama (Figura 3) está detallada, desde la identificación del problema hasta las conclusiones y recomendaciones, incluyendo el análisis hidrológico, estructural y las propuestas de adaptación. Este enfoque ofrece una visión clara y estructurada de los pasos necesarios para enfrentar los efectos del cambio climático en el embalse Chiquicahua.

2.2.1 Tabulación de datos

Los datos utilizados en este proyecto provienen de diversas investigaciones y de fuentes especializadas en la recolección de información sobre precipitación, respaldadas por organizaciones reconocidas. En particular, se emplearán los datos proporcionados por

el Climate Change Knowledge Portal, que ofrece información actualizada y relevante sobre patrones climáticos y proyecciones de precipitación.

La tabulación de estos datos se realizará de manera sistemática, organizando la información en formatos que faciliten su análisis. Esto incluirá la creación de tablas que resuman las variaciones en los patrones de precipitación a lo largo del tiempo, así como la comparación de datos históricos con proyecciones futuras. Este enfoque permitirá identificar tendencias significativas y facilitará la interpretación de los resultados en el contexto del impacto del cambio climático en el embalse Chiquicahua.

La Tabla 2 presenta los datos de precipitación promedio anual que se van a tomar para iniciar con las proyecciones de las precipitaciones.

Tabla 2 Datos de precipitación promedio anual (mm) (INGECONSULT, 2015)

CÓD	EST	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL, ANUAL
M0376	Pilahuín	37,80	71,60	43,00	142,6	98,60	66,90	63,40	56,90		29,70	80,80	116,0	
M0377	Tisaleo	44,20	105,5	62,60	141,3	68,70	70,10	58,00	47,70	44,70	12,00	48,60	53,00	756,4
M1069	Calamaca	63,70	107,7	52,40	112,3		44,30	122,9	39,50	76,60	32,70	56,50	234,0	
M0390	Urbina						39,50	61,50	43,50	52,20	49,40	97,90	120,8	

2.2.2 Solución a diseñar

Debido al impacto del cambio climático, se implementarán diversas soluciones para el embalse Chiquicahua con el fin de mejorar su capacidad de adaptación a los futuros

cambios en los patrones de precipitación, garantizando así su sostenibilidad y funcionamiento eficiente. Las soluciones propuestas incluyen:

- Aumento de la capacidad de almacenamiento: Optimización del volumen del embalse para enfrentar mayores volúmenes de agua durante eventos extremos.
- Refuerzos estructurales: Mejoras en la infraestructura existente para aumentar la resistencia a fenómenos climáticos adversos.
- Sistemas de monitoreo y alerta temprana: Mejoras en la implementación de tecnología avanzada para gestionar el agua de forma proactiva, permitiendo una respuesta rápida ante situaciones críticas.
- Reforestación de cuencas: Restauración de áreas clave para mejorar la infiltración del agua y reducir la erosión, contribuyendo a la salud del ecosistema circundante.
- Construcción de humedales: Incorporación de soluciones basadas en la naturaleza para mitigar inundaciones y mejorar la calidad del agua, creando hábitats que beneficien la biodiversidad local.

Estas acciones garantizarán que el embalse pueda operar de manera eficaz y resiliente en un escenario de cambio climático, asegurando la disponibilidad de recursos hídricos para las comunidades locales y el medio ambiente.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Metodología

El proyecto “ESTUDIOS Y DISEÑOS DEFINITIVOS EMBALSE QUEBRADA CHIQUICAHUA” a considerado varias obras civiles, los estudios a Nivel de Diseños Definitivos contemplan los siguientes diseños (Llamuca & Velasco, 2021b).

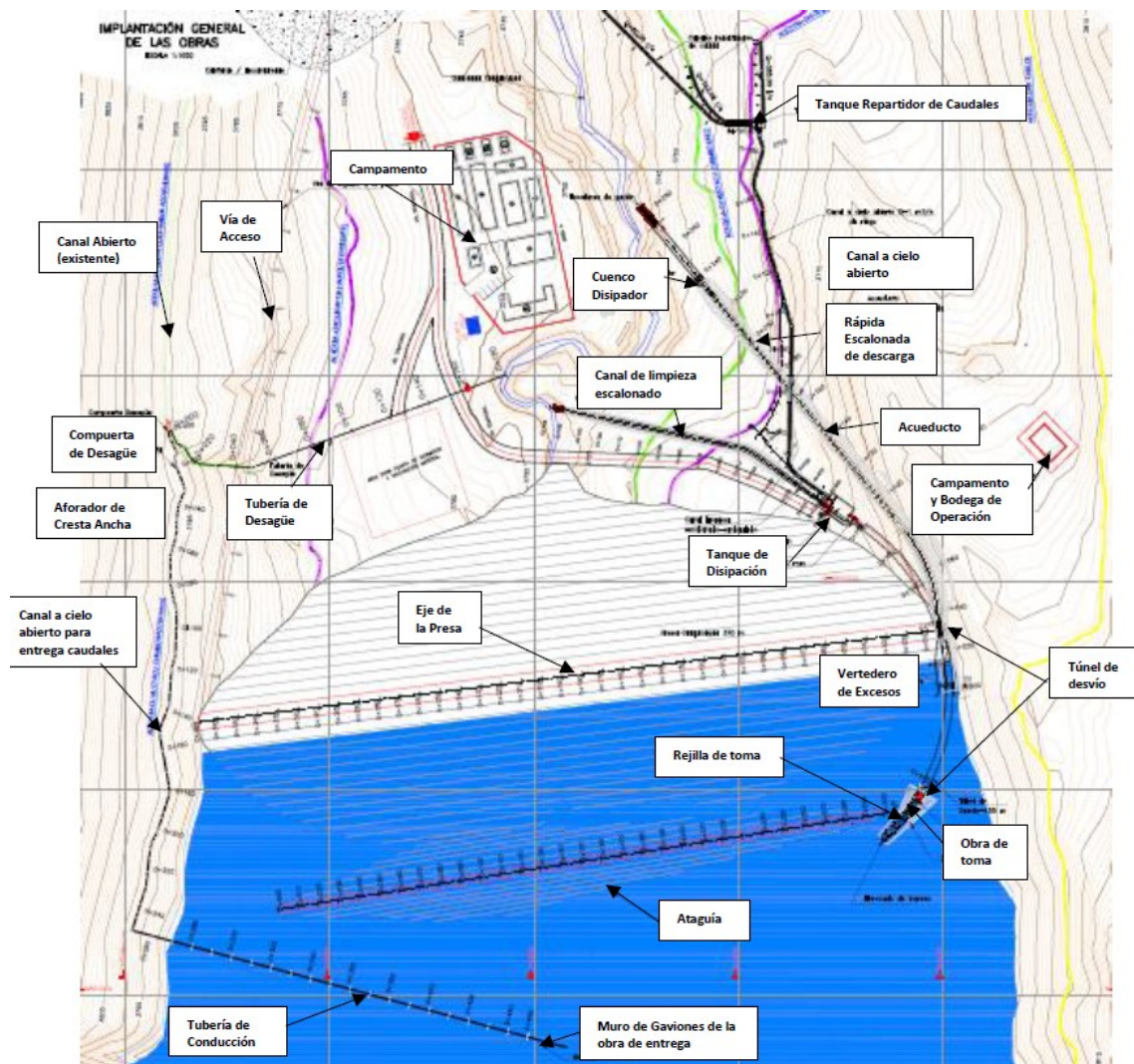


Figura 4 Implantación general de las obras (Llamuca & Velasco, 2021b).

3.1.1 Volumen de embalse

Se determinó mediante la información obtenida de los aforos de las acequias: Chiquicahua, Cunuyacu – Chimborazo, Casimiro Pazmiño y Alta San Carlos. Esta información se obtuvo por un periodo de tiempo desde el año 2013 (Llamuca & Velasco, 2021b).

Con la información de los caudales autorizados y aforados (promedios mensuales), se determinó el volumen del embalse, datos que se encuentran en la Tabla 1 y Tabla 2 (Llamuca & Velasco, 2021b).

Tabla 3 Caudales Autorizados y Caudales de ingreso al embalse. (Llamuca & Velasco, 2021b)

N°	Nombre de la Acequia	Área (Ha)	Caudal Autorizado (l/s)	Caudal de Ingreso al Embalse
1	Chiquicahua	1.027,64	385,00	385,00
2	Alta San Carlos	133,04	35,00	35,00
3	Cunuyacu – Chimborazo	2.434,00	158,48	158,48
4	Casimiro Pazmiño	2.955,40	243,50	80,00
	TOTAL	6 550,08	821,98	685,48

Tabla 4 Caudales Aforados (promedios mensuales). (Llamuca & Velasco, 2021b)

Promedio Ponderado	Acequia	Caudal (l/s)
Alto	Casimiro Pazmiño	360.7
	Cunuyacu-Chimborazo	222.65
	Chiquicahua	409.54
	Alta San Carlos	67.96
	Total	1060.85
Medio	Casimiro Pazmiño	184.4
	Cunuyacu-Chimborazo	198.23
	Chiquicahua	214.09
	Alta San Carlos	33.93
	Total	630.65
Bajo	Casimiro Pazmiño	131.7
	Cunuyacu-Chimborazo	183.24
	Chiquicahua	145.34
	Alta San Carlos	21.97
	Total	482.25

3.1.2 Precipitación en Tungurahua – Ecuador 2011

La precipitación en la cuenca de la quebrada Chiquicahua, ubicada en la provincia de Tungurahua, Ecuador, ha sido un factor clave para el desarrollo del Proyecto del Embalse Chiquicahua, el cual fue planteado en el año 2011. Este embalse tiene como objetivo principal satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua para las zonas agrícolas de influencia en la región, especialmente en tiempos de sequía y durante las temporadas de baja precipitación. A lo largo del año, el embalse permite la acumulación de agua en época lluviosa para su posterior distribución durante las estaciones secas, promoviendo una gestión sostenible del recurso hídrico y favoreciendo la seguridad hídrica de la zona.

Para evaluar la disponibilidad de agua en esta cuenca y la viabilidad del proyecto, se consideraron los datos de precipitación recopilados a lo largo de varios años en la estación meteorológica de Tisaleo, que ofrece registros históricos relevantes sobre los patrones de lluvia en el área. La Tabla 2 del estudio de impacto ambiental del embalse presenta un resumen detallado de la precipitación promedio mensual en la cuenca de Chiquicahua. Según los datos recolectados en el año 2011, la precipitación anual registrada por la estación de Tisaleo alcanzó un total de 756.4 mm. Este valor promedio proporciona una visión general del comportamiento de las lluvias en el área y es esencial para calcular la capacidad de almacenamiento y el diseño del embalse, así como para garantizar que el sistema cumpla con las demandas de riego.

La distribución mensual de las lluvias es otro aspecto de gran relevancia para el proyecto, ya que las precipitaciones no son uniformes a lo largo del año. En la cuenca de Chiquicahua, los meses de mayor precipitación suelen concentrarse en abril y mayo, coincidiendo con el periodo de lluvias de la región interandina de Ecuador. Durante estos meses, la precipitación mensual puede superar los 100 mm, contribuyendo de manera significativa al volumen total anual.

En contraste, los meses más secos, como septiembre y octubre, presentan precipitaciones mínimas, llegando en ocasiones a niveles inferiores a los 20 mm. Esta variabilidad estacional influye en la estrategia de almacenamiento de agua, ya que el

embalse debe contar con la capacidad suficiente para almacenar el exceso de agua en las temporadas lluviosas y disponer de esta durante los periodos secos.

El análisis de precipitación es fundamental no solo para el diseño de la capacidad del embalse, sino también para evaluar la eficiencia y la sostenibilidad del sistema de riego que abastecerá las zonas agrícolas circundantes. La precipitación media anual de 756.4 mm registrada en Tisaleo refleja una cantidad moderada de lluvias en comparación con otras zonas del país, lo que refuerza la necesidad de un sistema de almacenamiento como el embalse Chiquicahua. Con este proyecto, se busca evitar el déficit hídrico en épocas secas, mejorar la disponibilidad de agua para los cultivos, y, en última instancia, apoyar la economía local mediante el fortalecimiento de la actividad agrícola.

Además, los datos de precipitación son de utilidad para estimar el caudal promedio que fluye por la quebrada Chiquicahua hacia el embalse, un cálculo que se basa en la precipitación total y el área de captación de la cuenca. Esto implica analizar tanto la precipitación directa como la escorrentía superficial generada por cada evento de lluvia. Dado que el coeficiente de escorrentía en la zona de Chiquicahua puede variar entre 0.3 y 0.6, dependiendo de la cobertura del suelo y el uso del terreno, es importante ajustar las estimaciones de caudal según los datos específicos de la cuenca y la estación de lluvias.

La gestión del embalse está diseñada para maximizar la disponibilidad de agua en todas las épocas del año, permitiendo un abastecimiento continuo para los agricultores de la región y contribuyendo al desarrollo sostenible de las comunidades locales. Gracias a los datos climáticos recopilados y al análisis detallado de la precipitación, el proyecto del embalse Chiquicahua representa una medida estratégica para la adaptación a los efectos del cambio climático, que puede intensificar las temporadas de sequía o modificar los patrones de precipitación, afectando directamente a las actividades agrícolas en la región.

3.1.3 Temperatura

La temperatura en la provincia de Tungurahua ha mostrado variaciones significativas a lo largo de los años, una tendencia que responde a múltiples factores, incluidos el cambio

climático y las alteraciones en los patrones meteorológicos locales. Estas fluctuaciones no solo afectan el clima anual, sino que también tienen implicaciones directas sobre los cálculos de precipitación, escorrentía y disponibilidad de agua en la región. Por esta razón, para obtener una evaluación precisa de los datos climáticos históricos y realizar proyecciones confiables a futuro, es crucial considerar el año específico en que se llevaron a cabo las mediciones de precipitación y sus tendencias proyectadas a largo plazo, hasta un periodo de diseño de 100 años.

La fuente de estos datos de temperatura y precipitación ha sido el CCKP, una plataforma desarrollada por el Banco Mundial que proporciona acceso a información climática global, vulnerabilidades de las regiones, y sus impactos históricos y proyectados. Este portal se destaca por su amplia base de datos y modelos climáticos que abarcan no solo datos históricos, sino también simulaciones futuras de temperatura y precipitación basadas en diferentes escenarios de cambio climático, como el RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 7.0 y el RCP 8.5. Estas proyecciones permiten estimar cómo podrían evolucionar las temperaturas y los patrones de precipitación en la provincia de Tungurahua y en la región interandina en general, lo cual resulta esencial para la planificación de infraestructura hídrica, especialmente en proyectos de embalses y sistemas de riego.

Al utilizar el CCKP, se accede a información clave que ayuda a prever cómo las variaciones de temperatura pueden influir en los ciclos hídricos locales y, por lo tanto, en la disponibilidad de agua para el riego y otras actividades esenciales. Los datos proyectados a 100 años proporcionan una base sólida para entender las posibles amenazas climáticas a futuro y tomar medidas de adaptación para mitigar sus efectos, beneficiando así la sostenibilidad del desarrollo agrícola y la seguridad hídrica de Tungurahua.

Tabla 5 Temperatura en la Provincia de Tungurahua periodo 2011 (World Bank Group, n.d.).

Periodo	Hist. Ref. Per., 1950-2014
2011,00	19,10

Tabla 6 Temperatura en la Provincia de Tungurahua Proyección 2020-2039 (World Bank Group, n.d.).

Proyección 2020-2039				
Periodo	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5
2020,00	19,49	19,28	19,16	19,24
2021,00	19,45	19,47	19,39	19,38
2022,00	19,45	19,53	19,64	19,62
2023,00	19,61	19,58	19,51	19,35
2024,00	19,60	19,53	19,34	19,73
2025,00	19,61	19,64	19,37	19,68
2026,00	19,55	19,77	19,66	19,67
2027,00	19,54	19,67	19,91	19,72
2028,00	19,93	19,71	19,94	19,82
2029,00	19,50	19,85	19,70	19,73
2030,00	19,56	19,73	19,55	19,98
2031,00	19,76	19,65	19,70	19,95
2032,00	19,78	19,85	19,82	19,90
2033,00	19,79	19,69	19,77	19,89
2034,00	19,94	19,75	19,80	19,95
2035,00	19,69	19,69	19,93	19,89
2036,00	19,69	19,76	19,96	20,15
2037,00	19,95	19,94	20,14	19,84
2038,00	20,01	20,03	20,21	20,23
2039,00	19,80	20,04	19,96	20,32
PROMEDIO	19,69	19,71	19,72	19,80

Tabla 7 Temperatura en la Provincia de Tungurahua Proyección 2040-2059 (World Bank Group, n.d.).

Proyección 2040-2059				
Periodo	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5

2040,00	19,91	19,90	19,94	20,54
2041,00	19,89	20,06	20,12	20,27
2042,00	19,93	19,76	20,23	20,63
2043,00	19,92	19,96	20,03	20,54
2044,00	19,81	20,16	20,16	20,45
2045,00	19,96	19,93	20,15	20,86
2046,00	20,19	20,21	20,34	20,78
2047,00	20,13	20,31	20,23	20,88
2048,00	20,30	20,33	20,21	20,64
2049,00	20,09	20,50	20,72	21,09
2050,00	20,25	20,24	20,57	20,96
2051,00	20,22	20,33	20,42	20,90
2052,00	20,07	20,45	20,58	21,16
2053,00	19,99	20,23	20,88	21,03
2054,00	20,10	20,36	20,38	20,86
2055,00	19,82	20,40	20,56	20,85
2056,00	20,10	20,58	20,77	21,10
2057,00	20,37	20,57	20,91	21,31
2058,00	20,35	20,50	20,99	21,45
2059,00	20,10	20,84	20,68	21,51
PROMEDIO	20,08	20,28	20,44	20,89

Tabla 8 Temperatura en la Provincia de Tungurahua Proyección 2060-2079 (World Bank Group, n.d.).

Proyección 2060-2079				
Periodo	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5
2060,00	20,14	20,65	20,69	21,73
2061,00	20,17	20,69	21,13	21,59
2062,00	20,28	20,77	21,16	21,74
2063,00	20,21	20,70	20,81	21,96
2064,00	20,20	20,51	21,03	22,09

2065,00	20,10	20,82	21,14	21,86
2066,00	20,55	20,82	21,17	22,30
2067,00	20,24	20,69	21,14	22,18
2068,00	20,14	20,57	21,71	22,06
2069,00	20,38	20,77	21,61	22,65
2070,00	20,17	20,74	21,16	22,66
2071,00	20,03	21,04	21,56	22,57
2072,00	20,22	20,93	21,78	22,17
2073,00	20,21	20,98	21,49	22,66
2074,00	20,23	21,01	21,85	22,41
2075,00	20,03	21,22	21,96	22,79
2076,00	20,26	21,08	21,55	22,58
2077,00	20,27	21,17	21,52	22,56
2078,00	20,24	20,88	21,96	22,47
2079,00	20,22	20,87	21,98	22,79
PROMEDIO	20,21	20,85	21,42	22,29

Tabla 9 Temperatura en la Provincia de Tungurahua Proyección 2080-2099 (World Bank Group, n.d.).

Proyección 2080-2099				
Periodo	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5
2080,00	20,07	21,14	21,79	23,04
2081,00	20,15	21,22	21,76	23,06
2082,00	20,35	21,03	21,93	23,41
2083,00	20,27	21,33	22,31	23,63
2084,00	19,91	21,27	22,13	23,19
2085,00	19,97	21,24	22,05	23,51
2086,00	20,26	21,24	22,31	23,69
2087,00	19,95	20,98	22,22	23,50
2088,00	19,96	21,10	22,60	23,75
2089,00	20,11	21,22	22,69	23,40

2090,00	19,96	21,17	21,94	24,11
2091,00	20,25	21,38	22,43	24,06
2092,00	20,29	21,15	22,44	23,98
2093,00	20,08	21,17	22,86	23,92
2094,00	20,19	21,30	22,65	24,04
2095,00	20,13	21,30	22,77	24,02
2096,00	20,06	21,28	22,65	24,28
2097,00	20,00	21,43	22,82	24,55
2098,00	20,32	20,96	23,02	24,47
2099,00	20,24	21,28	23,08	24,19
PROMEDIO	20,13	21,21	22,42	23,79

3.1.4 Cálculo de Caudal

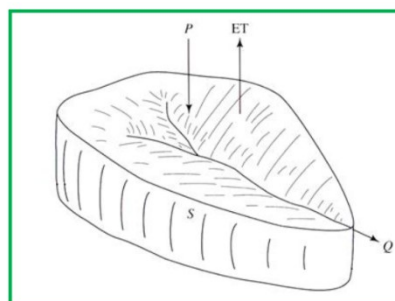
El cálculo de caudal de las precipitaciones es un proceso esencial en la gestión de recursos hídricos, especialmente en el diseño de embalses y sistemas de drenaje. El método utilizado se expresa mediante la ecuación:

$$P - (Q + ET) = 0 \quad (1)$$

Donde:

- P = Precipitación
- Q = Caudal
- ET = Evapotranspiración

Esta relación se ilustra en la Figura 8, que muestra la ecuación para el cálculo de caudal.



Modified from Dingman (1994)

$$P - (Q + ET) = 0$$

Figura 5 Ecuación para cálculo de caudal.

Para cálculos a largo plazo y considerando el cambio climático, se utilizan escenarios de concentración de gases de efecto invernadero, denominados RCP (Representative Concentration Pathways). Estos escenarios, desarrollados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), permiten proyectar cómo las variaciones en la precipitación afectarán el caudal en el futuro.

En cuencas hidrográficas de regiones montañosas, como el caso del embalse Chiquicahua en Tungurahua, Ecuador, es fundamental proyectar los caudales bajo diferentes escenarios de cambio climático (por ejemplo, RCP 4.5 y RCP 8.5). Estas proyecciones, son cruciales, ya que pueden influir en la cantidad de agua disponible y, por lo tanto, en la capacidad del embalse para satisfacer las demandas de riego (Field et al., 2014).

3.1.5 Cálculo de ETR (Evapotranspiración Real)

Para el cálculo del ETR se ocupó la fórmula de Coutagne el cual es:

$$ETR = P - xP^2 \quad (2)$$

donde:

- ETR = Evapotranspiración real en metros/año
- P = Precipitación en metros/año
- $x = \frac{1}{0.8+0.14t}$ (2.1)
- t = temperatura media anual en °C

3.2 Resultados

Se realizaron proyecciones de precipitación en cuatro intervalos temporales: 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 y 2080-2099, considerando como punto de partida los valores de precipitación registrados en 2011. Dicho año fue significativo, ya que sus datos climáticos fueron utilizados como base para el diseño del proyecto del embalse Chiquicahua. Este embalse, diseñado para asegurar el suministro de agua en la región, requiere de estimaciones precisas de precipitación a futuro para evaluar su viabilidad y eficiencia en el contexto del cambio climático.

Las proyecciones de precipitación se realizaron en función de cuatro escenarios futuros, conocidos como RCP (Representative Concentration Pathways), que abarcan desde altas concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5) hasta concentraciones bajas (RCP 2.6). En el escenario RCP 8.5, caracterizado por una alta emisión de gases y un aumento considerable de la temperatura, se observa una disminución de la precipitación en las proyecciones, lo que representa un potencial desafío a largo plazo, ya que el caudal del embalse podría reducirse, afectando el abastecimiento de agua para las zonas agrícolas. Por otro lado, en el escenario RCP 2.6, que asume reducciones significativas en las emisiones, se proyecta un aumento de la precipitación, lo cual favorecería la recarga del embalse y mejoraría la disponibilidad de agua en el futuro.

Estas proyecciones se presentan en gráficos comparativos para visualizar las tendencias en cada escenario y facilitar el análisis de las variaciones. Las figuras del 6 hasta la 9 muestran cómo la disminución de la precipitación en escenarios de altas concentraciones podría comprometer los objetivos del embalse, afectando el caudal en años futuros. Con los valores de precipitación anual proyectados para cada etapa, se estimó el caudal anual que estas precipitaciones generarían en la cuenca del embalse Chiquicahua, cuya área de captación es de aproximadamente 6,551.08 hectáreas. Estos cálculos de caudal son esenciales para evaluar la capacidad del embalse bajo diferentes condiciones climáticas y diseñar estrategias de adaptación para mitigar los riesgos asociados con la disminución del caudal en escenarios de altas emisiones.

La información sobre las precipitaciones históricas y actuales proviene de la estación meteorológica de Tisaleo, con código M0377, cuyos datos son proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Los datos de las proyecciones climáticas futuras se obtuvieron del CCKP, una plataforma del Banco Mundial que proporciona escenarios climáticos globales y proyecciones específicas para diversas regiones del mundo. El uso de estas fuentes garantiza la precisión de los datos y facilita un análisis exhaustivo de los posibles efectos del cambio climático en la cuenca del embalse, contribuyendo al desarrollo de estrategias de manejo de recursos hídricos en el largo plazo.

En las siguientes tablas y gráficos se pueden observar los resultados obtenidos:

Tabla 10 Precipitación y Caudal para una proyección del periodo 2020-2039

Estacion:	Tisaleo								
Codigo:	M0377								
Fuente:	INAMHI, Anuarios Meterológicos, 2011								
Area de Embalse:	6551,08 ha 65510800 m2								
Proyección 2020-2039									
Meses	Precipitación 2011	SSP1-2,6	2,6	SSP2-4,5	4,5	SSP3-7,0	7,0	SSP5-8,5	8,5
Enero	44,20	0,54	44,74	1,13	45,33	-2,87	41,33	-1,32	42,88
Febrero	105,50	2,42	107,92	1,26	106,76	-1,40	104,10	0,10	105,60
Marzo	62,60	1,51	64,11	2,11	64,71	-1,36	61,24	2,99	65,59
Abril	141,30	5,74	147,04	6,49	147,79	3,24	144,54	7,66	148,96
Mayo	68,70	5,84	74,54	1,49	70,19	1,61	70,31	1,94	70,64
Junio	70,10	4,91	75,01	1,79	71,89	2,68	72,78	1,20	71,30
Julio	58,00	3,40	61,40	0,17	58,17	-2,29	55,71	-1,81	56,19
Agosto	47,70	1,70	49,40	0,43	48,13	2,74	50,44	-1,77	45,93
Septiembre	44,70	-2,24	42,46	-5,18	39,52	-1,59	43,11	-6,47	38,23
Octubre	12,00	2,26	14,26	0,86	12,86	-0,99	11,01	-3,52	8,48
Noviembre	48,60	-4,45	44,15	-3,65	44,95	-1,84	46,76	-1,36	47,24
Diciembre	53,00	0,85	53,85	2,60	55,60	2,14	55,14	0,82	53,82
TOTAL PRECIPITACION ANNUAL (mm)	756,40		778,88		765,90		756,47		754,86
TOTAL PRECIPITACION ANNUAL (m)	0,76		0,78		0,77		0,76		0,75
TEMPERATURA (°C)	19,10		19,69		19,71		19,72		19,80
X	0,29		0,28		0,28		0,28		0,28
ETR (m)	0,59		0,61		0,60		0,60		0,60
CAUDAL (l/s)	342,12		354,33		342,35		333,84		331,38

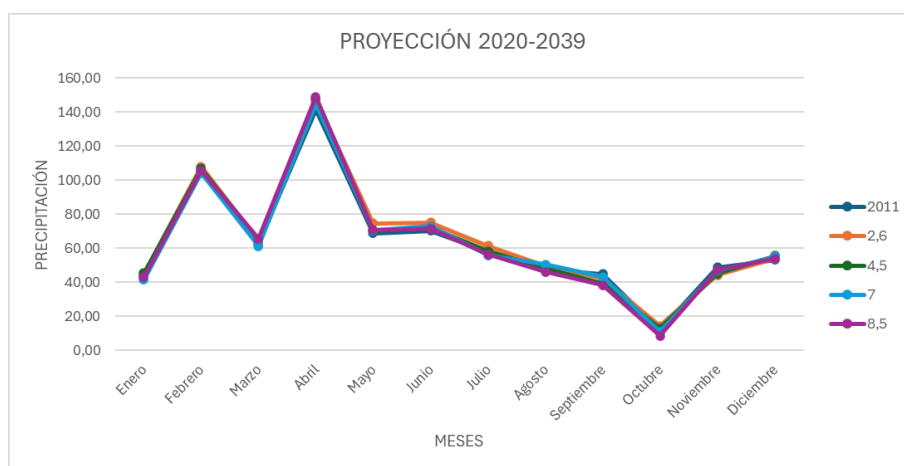


Figura 6 Proyección 2020-2039 de precipitación vs meses

En la Tabla 10, que presenta la proyección de precipitación y caudal para el período 2020-2039, se observa que el caudal proyectado aumenta a 354.33 l/s al considerar el escenario RCP 2.6, que representa una concentración de gases de efecto invernadero

baja. En contraste, bajo el escenario RCP 8.5, que corresponde a una concentración muy alta, el caudal se reduce a 331.38 l/s. Esta diferencia refleja cómo un escenario de menor concentración de emisiones favorece un aumento en las precipitaciones y, consecuentemente, en el caudal disponible, mientras que una mayor concentración en el RCP 8.5 sugiere una reducción en estos valores.

Se observa que la precipitación registrada en el año 2011, equivalente a 342.12 l/s, es menor en comparación con la proyección para un escenario de bajas concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP 2.6), que alcanza 354.33 l/s. Sin embargo, bajo un escenario de altas concentraciones (RCP 8.5), el caudal proyectado disminuye a 331.38 l/s, lo cual indica que la precipitación de 2011 sería ligeramente mayor. Esto implica que, en situaciones de eventos extremos con mayor precipitación, el caudal del escenario del RCP 2.6 podría sobrepasar en un 3.57% al del escenario del año 2011, subrayando la importancia de considerar escenarios de variabilidad climática para el diseño y manejo del embalse.

Tabla 11 Precipitación y Caudal para una proyección del periodo 2040-2059

Estacion	Tisaleo								
Codigo	M0377								
Fuente	INAMHI, Anuarios Meterológicos, 2011								
Area de Embalse:	6550,08 ha	65500800 m2							
Proyección 2040-2059									
Meses	Precipitación 2011	SSP1-2,6	2,6	SSP2-4,5	4,5	SSP3-7,0	7,0	SSP5-8,5	8,5
Enero	44,20	2,88	47,08	1,47	45,67	1,07	45,27	-0,20	44,00
Febrero	105,50	0,69	106,19	-1,15	104,35	-7,51	97,99	-2,52	102,98
Marzo	62,60	4,43	67,03	7,19	69,79	4,69	67,29	2,78	65,38
Abril	141,30	9,97	151,27	14,14	155,44	8,63	149,93	11,88	153,18
Mayo	68,70	5,93	74,63	5,46	74,16	4,30	73,00	6,08	74,78
Junio	70,10	2,92	73,02	1,23	71,33	7,03	77,13	8,51	78,61
Julio	58,00	0,76	58,76	-1,42	56,58	3,00	61,00	2,55	60,55
Agosto	47,70	1,31	49,01	-0,47	47,23	-0,61	47,09	-0,14	47,56
Septiembre	44,70	-3,47	41,23	-3,55	41,15	-2,32	42,38	-8,00	36,70
Octubre	12,00	2,68	14,68	3,25	15,25	1,14	13,14	-1,73	10,27
Noviembre	48,60	1,32	49,92	2,49	51,09	3,87	52,47	5,91	54,51
Diciembre	53,00	4,57	57,57	8,31	61,31	2,48	55,48	3,82	56,82
TOTAL PRECIPITACION ANNUAL (mm)	756,40		790,39		793,35		782,17		785,34
TOTAL PRECIPITACION ANNUAL (m)	0,76		0,79		0,79		0,78		0,79
TEMPERATURA (°C)	19,10		19,69		19,71		19,72		19,80
X	0,29		0,28		0,28		0,28		0,28
ETR (m)	0,59		0,61		0,62		0,61		0,61
CAUDAL (l/s)	342,07		364,83		367,28		356,86		358,63

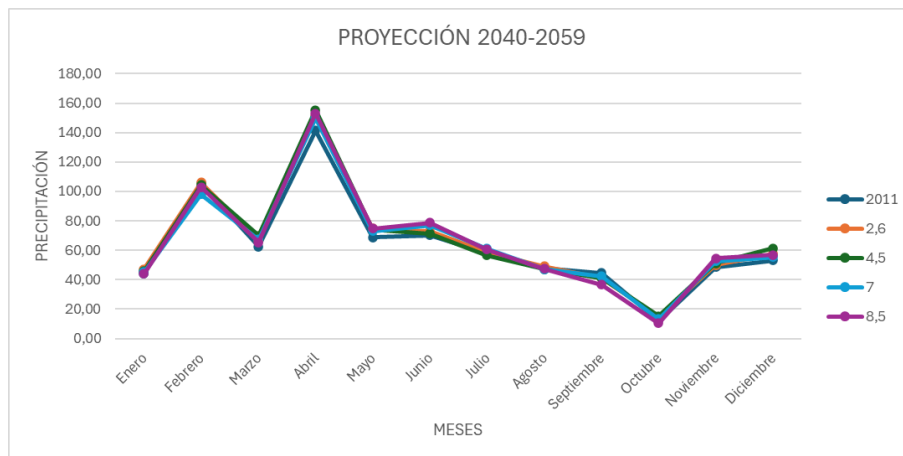


Figura 7 Proyección 2040-2059 de precipitación vs meses

En la Tabla 11, que presenta la proyección de precipitación y caudal para el período 2040-2059, se observa que el caudal proyectado aumenta a 364.83 l/s al considerar el escenario RCP 2.6, que representa una concentración de gases de efecto invernadero baja. En contraste, bajo el escenario RCP 8.5, que corresponde a una concentración muy alta, el caudal se reduce a 358.63 l/s. Esta diferencia refleja cómo un escenario de menor concentración de emisiones favorece un aumento en las precipitaciones y, consecuentemente, en el caudal disponible, mientras que una mayor concentración en el RCP 8.5 sugiere una reducción en estos valores.

Se observa que la precipitación registrada en el año 2011, equivalente a 342.12 l/s, es menor en comparación con la proyección para un escenario de bajas concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP 2.6), que alcanza 364.83 l/s. Sin embargo, bajo un escenario de altas concentraciones (RCP 8.5), el caudal proyectado es 358.63 l/s, lo cual indica que la precipitación de 2011 sería ligeramente menor. Esto implica que, en situaciones de eventos extremos con mayor precipitación, el caudal del escenario del RCP 2.6 podría sobrepasar en un 6.64% al del escenario del año 2011, subrayando la importancia de considerar escenarios de variabilidad climática para el diseño y manejo del embalse.

Tabla 12 Precipitación y Caudal para una proyección del periodo 2060-2079

Estacion	Tisaleo								
Codigo	M0377								
Fuente	INAMHI, Anuarios Meterológicos, 2011								
Area de Embalse:	6550,08 ha	65500800 m2							
Proyección 2060-2079									
Meses	Precipitación 2011	SSP1-2,6	2,6	SSP2-4,5	4,5	SSP3-7,0	7,0	SSP5-8,5	8,5
Enero	44,20	2,55	46,75	6,43	50,63	3,34	47,54	-0,37	43,83
Febrero	105,50	0,25	105,75	0,98	106,48	-6,13	99,37	-0,42	105,08
Marzo	62,60	4,56	67,16	12,09	74,69	3,70	66,30	8,57	71,17
Abril	141,30	5,18	146,48	8,88	150,18	13,96	155,26	8,82	150,12
Mayo	68,70	2,78	71,48	6,71	75,41	4,06	72,76	5,10	73,80
Junio	70,10	4,95	75,05	8,82	78,92	12,42	82,52	11,16	81,26
Julio	58,00	0,79	58,79	3,33	61,33	9,36	67,36	1,79	59,79
Agosto	47,70	2,81	50,51	0,80	48,50	-1,47	46,23	-2,25	45,45
Septiembre	44,70	-0,41	44,29	-1,23	43,47	-4,65	40,05	-10,00	34,70
Octubre	12,00	4,21	16,21	0,72	12,72	-1,47	10,53	-5,03	6,97
Noviembre	48,60	2,57	51,17	3,65	52,25	10,60	59,20	5,17	53,77
Diciembre	53,00	6,55	59,55	11,11	64,11	2,44	55,44	6,34	59,34
TOTAL PRECIPITACION ANNUAL (mm)	756,40		793,19		818,69		802,56		785,28
TOTAL PRECIPITACION ANNUAL (m)	0,76		0,79		0,82		0,80		0,79
TEMPERATURA (°C)	19,10		19,69		19,71		19,72		19,80
X	0,29		0,28		0,28		0,28		0,28
ETR (m)	0,59		0,62		0,63		0,62		0,61
CAUDAL (l/s)	342,07		367,42		391,11		375,71		358,57

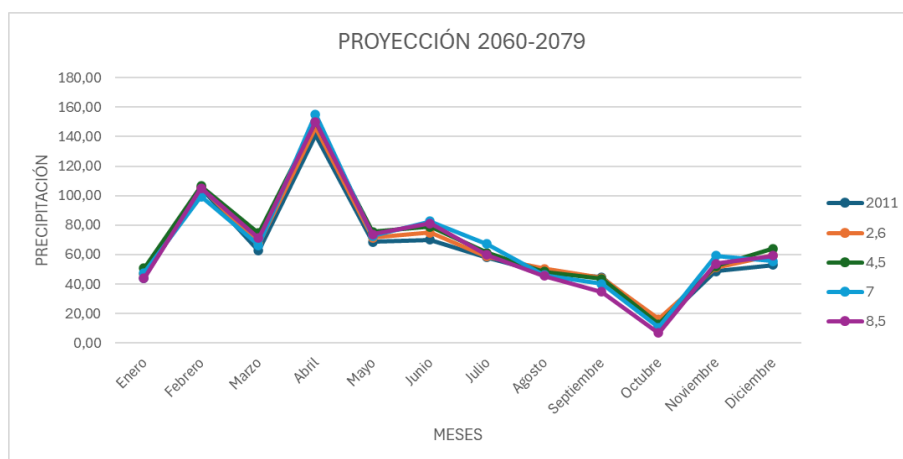


Figura 8 Proyección 2040-2079 de precipitación vs meses

En la Tabla 12, que presenta la proyección de precipitación y caudal para el período 2060-2079, se observa que el caudal proyectado aumenta a 367.42 l/s al considerar el escenario RCP 2.6, que representa una concentración de gases de efecto invernadero baja. En contraste, bajo el escenario RCP 8.5, que corresponde a una concentración muy alta, el caudal se reduce a 358.57 l/s. Esta diferencia refleja cómo un escenario de

menor concentración de emisiones favorece un aumento en las precipitaciones y, consecuentemente, en el caudal disponible, mientras que una mayor concentración en el RCP 8.5 sugiere una reducción en estos valores.

Se observa que la precipitación registrada en el año 2011, equivalente a 342.12 l/s, es menor en comparación con la proyección para un escenario de bajas concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP 2.6), que alcanza 367.42 l/s. Sin embargo, bajo un escenario de altas concentraciones (RCP 8.5), el caudal proyectado es 358.57 l/s, lo cual indica que la precipitación de 2011 sería ligeramente menor. Esto implica que, en situaciones de eventos extremos con mayor precipitación, el caudal del escenario del RCP 2.6 podría sobrepasar en un 7.40% al del escenario del año 2011, subrayando la importancia de considerar escenarios de variabilidad climática para el diseño y manejo del embalse.

Tabla 13 Precipitación y Caudal para una proyección del periodo 2080-2099

Estacion	Tisaleo								
Codigo	M0377								
Fuente	INAMHI, Anuarios Meterológicos, 2011								
Area de Embalse:	6550,08 ha 65500800 m2								
Proyección 2080-2099									
Meses	Precipitación 2011	SSP1-2,6	2,6	SSP2-4,5	4,5	SSP3-7,0	7,0	SSP5-8,5	8,5
Enero	44,20	3,43	47,63	6,71	50,91	-2,65	41,55	3,43	47,63
Febrero	105,50	-3,98	101,52	11,48	116,98	-5,20	100,30	-5,87	99,63
Marzo	62,60	6,86	69,46	12,56	75,16	14,85	77,45	15,66	78,26
Abril	141,30	10,77	152,07	15,65	156,95	17,41	158,71	22,23	163,53
Mayo	68,70	3,85	72,55	3,29	71,99	9,90	78,60	10,54	79,24
Junio	70,10	6,98	77,08	9,33	79,43	7,47	77,57	10,05	80,15
Julio	58,00	3,24	61,24	3,22	61,22	7,98	65,98	1,52	59,52
Agosto	47,70	3,65	51,35	0,75	48,45	0,61	48,31	-3,45	44,25
Septiembre	44,70	0,91	45,61	-6,93	37,77	-7,54	37,16	-11,81	32,89
Octubre	12,00	3,10	15,10	0,70	12,70	-2,18	9,82	-12,60	-0,60
Noviembre	48,60	1,52	50,12	6,41	55,01	11,22	59,82	8,38	56,98
Diciembre	53,00	2,71	55,71	10,81	63,81	1,32	54,32	8,98	61,98
TOTAL PRECIPITACION ANNUAL (mm)	756,40		799,44		830,38		809,59		803,46
TOTAL PRECIPITACION ANNUAL (m)	0,76		0,80		0,83		0,81		0,80
TEMPERATURA (°C)	19,10		19,69		19,71		19,72		19,80
X	0,29		0,28		0,28		0,28		0,28
ETR (m)	0,59		0,62		0,64		0,63		0,62
CAUDAL (l/s)	342,07		373,23		402,36		382,32		375,37

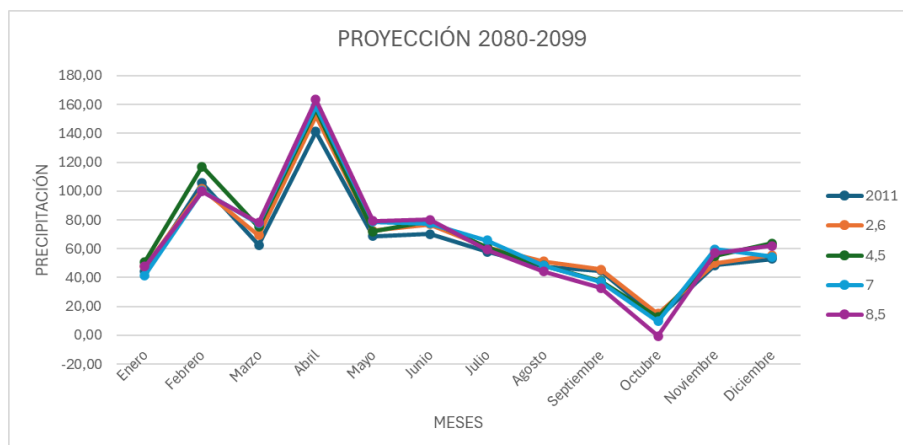


Figura 9 Proyección 2080-2099 de precipitación vs meses

En la Tabla 13, que presenta la proyección de precipitación y caudal para el período 2080-2099, se observa que el caudal proyectado aumenta a 373.23 l/s al considerar el escenario RCP 2.6, que representa una concentración de gases de efecto invernadero baja. En contraste, bajo el escenario RCP 8.5, que corresponde a una concentración muy alta, el caudal es de 375.37 l/s. Se observa un ligero cambio en la tendencia, lo que podría estar asociado con cambios en los patrones climáticos en la región.

Se observa que la precipitación registrada en el año 2011, equivalente a 342.12 l/s, es menor en comparación con la proyección para un escenario de bajas concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP 2.6), que alcanza 373.23 l/s. Sin embargo, bajo un escenario de altas concentraciones (RCP 8.5), el caudal proyectado es 375.37 l/s, lo cual indica que la precipitación de 2011 sería menor. Esto implica que, en situaciones de eventos extremos con mayor precipitación, el caudal del escenario del RCP 8.5 podría sobrepasar en un 9.72% al del escenario del año 2011, subrayando la importancia de considerar escenarios de variabilidad climática para el diseño y manejo del embalse.

Estos resultados reflejan que los caudales son generalmente mayores en escenarios de bajas emisiones (RCP 2.6) en comparación con aquellos de altas concentraciones (RCP 8.5), especialmente en los tres primeros periodos. Sin embargo, para el último periodo, se observa un ligero cambio en la tendencia, lo que podría estar asociado con cambios en los patrones climáticos en la región. Estos hallazgos son cruciales para la planificación

de la capacidad del embalse y su manejo a largo plazo, permitiendo anticipar la disponibilidad de agua bajo distintos escenarios climáticos futuros.

3.3 Diseño de la solución

El diseño de la solución para la gestión hídrica en el embalse Chiquicahua se fundamenta en la necesidad de adaptar la infraestructura a las variaciones climáticas proyectadas y asegurar una capacidad de almacenamiento de agua adecuada para el riego y otros usos esenciales en la región. Dada la variabilidad en las precipitaciones y la incertidumbre asociada al cambio climático, es fundamental implementar un diseño que no solo optimice la captación y retención de agua, sino que también permita un manejo eficiente del recurso en periodos de sequía y épocas de mayor precipitación.

Este diseño incluye el análisis detallado de caudales proyectados, considerando escenarios de cambio climático basados en los RCP, así como la evaluación de escorrentías y su impacto en la capacidad del embalse. Así mismo, se contemplan mecanismos de control de flujo y sistemas de monitoreo continuo para ajustar el manejo del recurso en tiempo real.

La integración de estos elementos en el diseño busca promover una infraestructura resiliente y sostenible, que pueda responder eficazmente a las demandas actuales y futuras de agua, brindando seguridad hídrica a las áreas agrícolas dependientes del embalse. Además, el diseño se enfoca en minimizar los impactos ambientales y sociales, asegurando que la solución propuesta sea tanto técnica como ambientalmente viable y que apoye el desarrollo sostenible de la región.

3.3.1 Aumento de la capacidad de almacenamiento

Para responder a los aumentos de caudal proyectados bajo el RCP 2.6, es recomendable ampliar la capacidad de almacenamiento en al menos un 10-15%, asegurando el manejo adecuado de caudales mayores en épocas de alta precipitación. Esto permitirá captar los picos de caudal proyectados y ofrecer un almacenamiento de seguridad para sequías. La ampliación debe incluir una altura adicional en el muro principal y la construcción de un embalse secundario que capture el excedente en eventos de precipitación extrema.

Esta capacidad adicional permitirá una gestión de aguas eficiente en caso de variaciones climáticas severas hacia el fin de siglo, incluso si las tendencias climáticas llegasen a favorecer el RCP 8.5.

3.3.2 Refuerzos estructurales

Los refuerzos estructurales se orientarán principalmente al muro de contención y compuertas, mejorando su capacidad de resistencia a incrementos de presión hídrica. Para el diseño, es recomendable utilizar hormigón de alta resistencia y sistemas de amortiguación de impactos hidrodinámicos en las compuertas, lo que asegurará la estabilidad estructural frente a las condiciones extremas proyectadas en el periodo de vida del embalse. Además, reforzar las bases con materiales compactos reducirá el riesgo de socavación y filtraciones, preservando la integridad estructural ante variaciones de caudal.

3.3.3 Sistemas de monitoreo y alerta temprana

Este sistema incluirá estaciones meteorológicas y de caudal en puntos estratégicos de la cuenca. Los sensores medirán en tiempo real el nivel de precipitación, caudal y condiciones atmosféricas, con datos enviados a una central de monitoreo. El sistema debería integrar un modelo de predicción basado en inteligencia artificial para anticipar episodios de crecidas y alertar a los operadores en caso de alcanzar umbrales críticos. Esto permite realizar ajustes preventivos, como la liberación de agua, reduciendo la presión sobre el embalse.

3.3.4 Reforestación de cuencas

La reforestación tiene un doble propósito: aumentar la infiltración de agua y reducir el escurrimiento superficial, disminuyendo la carga de sedimentos y erosión. Para lograrlo, se recomienda plantar especies nativas de crecimiento rápido y tolerancia a la humedad en áreas vulnerables a la erosión. Un plan de mantenimiento anual garantizará la viabilidad de estas áreas, además de la colaboración con la comunidad local en su conservación, prolongando el ciclo de vida y calidad del agua en la cuenca.

3.3.5 Construcción de humedales

Los humedales artificiales son una solución ecológica que permitirá el almacenamiento temporal de agua y la regulación del caudal hacia el embalse. Además, actúan como un filtro natural, mejorando la calidad del agua y reduciendo la sedimentación. Diseñar humedales en zonas estratégicas de la cuenca implicará evaluar áreas con pendiente baja y alta capacidad de retención. Estos humedales deben diseñarse con plantas acuáticas adecuadas para maximizar la filtración y aumentar la biodiversidad en la cuenca.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El escenario de bajas emisiones de las vías de concentración representativa RCP 2.6, prevé caudales más altos en comparación con el escenario de altas emisiones RCP 8.5. Tomando en cuenta que el diseño hidráulico del embalse Chiquicahua está previsto para un periodo de 50 años, en la Tabla 11 donde se proyecta la precipitación y el caudal en un periodo de 2040-2059, observando que la proyección con un RCP 2.6 sobrepasara en un 6.6% (364.83 l/s) a la precipitación diseñada (342.07 l/s). Esto sugiere que un menor impacto de los gases de efecto invernadero podría favorecer la disponibilidad de agua en el embalse a lo largo de su vida útil, mientras que las altas emisiones (RCP 8.5) conllevan un riesgo de disminución de caudal en un 1.7% (358.63 l/s).

- La adaptación estructural y ambiental del embalse, puede incluir el aumento de la capacidad hidráulica, el refuerzo estructural y la reforestación, son cruciales para la mitigación de riesgos asociados con la variabilidad climática y el aumento de la demanda hídrica. Estas medidas asegurarán la funcionalidad y resiliencia del embalse frente al cambio climático.
- La implementación de sistemas de monitoreo y alertas tempranas son esenciales para anticipar eventos extremos, gestionar los caudales y optimizar el uso de los recursos hídricos en tiempo real. Esta estrategia es especialmente importante para asegurar la estabilidad y la adecuada distribución del agua durante todo el periodo de operación del embalse.

Recomendaciones

- Priorizar la ampliación de la capacidad de almacenamiento para gestionar los caudales proyectados en escenarios de alta precipitación. Esta medida aumentará la seguridad del embalse y su capacidad para enfrentar variaciones en el caudal en periodos de precipitación intensa, mejorando la sostenibilidad de la estructura a largo plazo.
- Implementar un programa de reforestación intensiva en la cuenca alta del embalse con especies nativas. Esto contribuirá a reducir la erosión y el arrastre de sedimentos, mejorando la calidad del agua y la retención de esta en el suelo, lo cual disminuirá la presión sobre el embalse durante eventos de altas precipitaciones.
- Establecer estaciones de monitoreo automatizadas que faciliten la evaluación continua de los niveles de caudal y precipitación, vinculadas a un sistema de alerta temprana. Este sistema permitirá a los operadores del embalse actuar con anticipación y realizar ajustes necesarios, preservando la estabilidad y funcionalidad del embalse frente a eventos climáticos extremos.

BIBLIOGRAFÍA

- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. In *Global Ecology and Biogeography* (Vol. 20, Issue 1, pp. 19–33). <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- CoastAdapt. (n.d.). *What are the RCPs*.
- Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Yuka, K. L. E., Estrada, O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., White, L. L., Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., ... Mastrandrea, M. D. (2014). *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. www.cambridge.org/9781107641655
- Fondo de Adaptación. (2023). *Proyectos en África Oriental para mejorar la resiliencia hídrica en la cuenca del Lago Victoria*.
- Harvey, D., Gregory, J., Hoffert, M., Jain, A., Lal, M., Leemans, R., Raper, S., Wigley, T., & de Wolde, J. (1997). *INTRODUCCION A LOS MODELOS CLIMATICOS SIMPLES UTILIZADOS EN EL SEGUNDO INFORME DE EVALUACION DEL IPCC*.
- INAMHI. (2019). *Informe anual sobre variaciones climáticas y su impacto en las infraestructuras hidráulicas en Ecuador*.
- INGECONSULT. (2015). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL BORRADOR EMBALSE QUEBRADA CHIQUICAHUA Y CANAL RECOLECTOR*.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC, Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward,

- B., ... Ha, M. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Islam, M. R., Fereshtepour, M., Najafi, M. R., Khaliq, M. N., Khan, A. A., Sushama, L., Nguyen, V. T. V., Elshorbagy, A., Roy, R., Wilson, A., Perdikaris, J., Masud, M. B., & Khan, M. S. (2024). Climate-resilience of dams and levees in Canada: a review. *Discover Applied Sciences*, 6(4), 1–31. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05814-4>
- Llamuca, D., & Velasco, D. (2021a). *ESTUDIOS Y DISEÑOS DEFINITIVOS EMBALSE QUEBRADA CHIQUICAHUA 1-TOPOGRAFIA* (Vol. 1).
- Llamuca, D., & Velasco, L. (2021b). *ESTUDIOS Y DISEÑOS DEFINITIVOS EMBALSE QUEBRADA CHIQUICAHUA - DISEÑO HIDRÁULICO* (Vol. 4).
- MAATE. (2023). *PLAN NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL ECUADOR (2022-2027)*. www.ambiente.gob.ec
- Martinez Nieves, O. A. (2022). *INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA SUSTENTABLE PARA RIEGO Y DRENAJE EN EL CANTÓN BABAHOYO*. UNIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE DE GUAYAQUIL.
- Melgarejo Moreno, J., Lopez Ortiz, M. I., & Fernandez Aracil, P. (2023). *SEGURIDAD HÍDRICA*.
- Melgarejo Moreno, J., & Mejuto, M. F. (n.d.). *El Agua en la Provincia de Alicante*. www.ciclohidrico.es
- Naciones Unidas. (n.d.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Retrieved September 7, 2024, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>.
- Panduro Gonzales, F. (2024). *Aplicación de sistema de información geográfica para el cálculo de llanuras de inundación en la Cuenca “Pozo Negro.”* UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11. www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/

- Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11), 1675–1678. <https://doi.org/10.1029/1999GL006091>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2023). *Gobierno del Ecuador presenta el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. <https://www.undp.org/es/ecuador/noticias/gobierno-del-ecuador-presenta-el-plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico-pna>
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1987). Global and regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115.
- The World Bank Group. (2021). *CLIMATE RISK PROFILE: ECUADOR*. www.worldbank.org
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, 5(8), 725–730. <https://doi.org/10.1038/nclimate2657>
- Vergara, W., Deeb, A., Valencia, M., Bradley, R., Francou, B., Zarzar, A., Grunwaldt, A., & Haeussling, S. (2007). Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 88(25), 261–268. <https://doi.org/10.1029/2002jd002959>
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3–4), 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- World Bank Group. (n.d.). *Climate Change Knowledge Portal*. Retrieved November 6, 2024, from <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>.
- WWAP. (2012). *The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk*. www.unwater.org/documents.html