



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES CON MENCIÓN EN REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

RPC-SO-17-NO.363-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:

UN ANÁLISIS PROSPECTIVO DE 50 AÑOS DE  
MODELACIÓN, PREDICCIÓN DE CLIMA Y  
FLUJO EN LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME,  
EL PANGUI, ECUADOR.

AUTOR:

ARQUIMIDES ADRIÁN JUMBO BECERRA

DIRECTOR:

CHRISTIAN PAÚL MERA PARRA

CUENCA – ECUADOR  
2025

**Autor:****Arquimides Adrián Jumbo Becerra**

Ingeniero en Gestión Ambiental.

Candidato a Magíster en Recursos Naturales Renovables con Mención en Remediación y Restauración por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

arquimidesadrianj@gmail.com

**Dirigido por:****Christian Paúl Mera Parra**

Ingeniero Civil.

Magíster en Recursos Hídricos.

Doctorando en Ciudad, Territorio y Planificación Sostenible.

cmera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

ARQUIMIDES ADRIÁN JUMBO BECERRA

Un análisis prospectivo de 50 años de modelación, predicción de clima y flujo en la cuenca del río Wawayme, el Pangui, Ecuador.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a la memoria de mi padre, quien falleció durante mi etapa de pregrado, pero cuyo ejemplo y esfuerzo siguen guiando mis pasos. A mi madre, por todo el sacrificio y compromiso que compartió junto a él para que pudiera alcanzar mi formación profesional. A mis hermanos, por estar presentes en mi vida a pesar de la distancia y del tiempo que, por mi trabajo, no siempre puedo compartir con ellos. Y a mi novia, por su apoyo incondicional, incluso en los momentos más difíciles.

Este posgrado no solo representa una meta académica, sino también el reflejo del esfuerzo compartido, de las ausencias que dolieron, de los días de incertidumbre y de las personas que, sin pedir nada a cambio, me dieron su apoyo. Cada página de este trabajo lleva parte de su entrega, su paciencia y su confianza en mí.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por haberme brindado la oportunidad de cursar este programa de maestría, por la formación académica recibida y por el acompañamiento durante este proceso. Este espacio de crecimiento profesional y personal ha sido fundamental en mi desarrollo. También extiendo mi agradecimiento a la empresa Ecuacorriente S.A., lugar donde desempeño mi labor profesional, por el apoyo brindado a lo largo de estos años. Su respaldo ha sido clave respaldando mi desarrollo académico en paralelo a mis funciones laborales.

De igual manera, agradezco a todos los docentes que formaron parte de este programa, por compartir sus conocimientos y experiencias, y en especial a mi tutor, quien asumió esta responsabilidad de manera imprevista tras la renuncia de mi tutor anterior. Agradezco profundamente el tiempo y la paciencia que dedicó para orientarme en esta etapa final, convirtiéndose en un apoyo clave para la culminación de este trabajo.

# TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	13
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	17
3.1 HIDROLOGÍA Y EL CICLO DEL AGUA.....	17
3.2 LA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	21
3.3 USO Y COBERTURA DEL SUELO Y RÉGIMEN HÍDRICO.....	25
3.3.1 LA VEGETACIÓN EN EL CICLO HIDROLÓGICO.....	25
3.3.2 CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE SUELO.....	30
3.4 MODELO GR2M DE MOUËLHI.....	34
3.5 MODELO SWAT.....	40
3.6 MODELO WEAP.....	41
3.7 ESCENARIOS DEL IPCC.....	41
4. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	44
4.1 UBICACIÓN.....	44
4.2 METODOLOGÍA.....	47
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
5.1 PARÁMETROS ANALIZADOS.....	56
5.1.1 ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	56
5.1.2 PRECIPITACIÓN.....	57
5.1.3 TEMPERATURA.....	60
5.1.4 CAUDAL.....	63
5.1.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN (ETP).....	66
5.2. MODELAMIENTO CON GR2M.....	72
5.3. PROYECCIÓN CLIMÁTICA Y ESCENARIOS RCP.....	79
5.4. RESULTADOS MODELACIÓN DEL ESCENARIO HÍDRICO FUTURO.....	87
5.5. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CAUDAL.....	88
6. CONCLUSIONES.....	93

---

REFERENCIAS .....	95
ANEXOS .....	103
ANEXO 1. VALORES DE PRECIPITACIÓN.....	103
ANEXO 2. VALORES DE TEMPERATURA.....	106
ANEXO 3. VALORES DE CAUDAL .....	109
ANEXO 4. VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	112

UN ANÁLISIS  
PROSPECTIVO DE 50  
AÑOS DE  
MODELACIÓN,  
PREDICCIÓN DEL  
CLIMA Y FLUJO EN LA  
CUENCA DEL RÍO  
WAWAYME, EL PANGUI,  
ECUADOR

AUTOR:

ARQUIMIDES ADRIÁN JUMBO BECERRA

## RESUMEN

---

EN EL PRESENTE ESTUDIO SE REALIZA UN ANÁLISIS PROSPECTIVO DEL CLIMA Y EL FLUJO DEL RÍO WAWAYME, EN EL PANGUI, ECUADOR, PARA LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS ASUMIENDO LAS CONDICIONES DEL ESCENARIO RCP 4.5. PARA TAL FIN, SE EMPLEAN DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS OBTENIDOS DE ESTACIONES LOCALES Y HERRAMIENTAS DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), CON EL FIN DE MODELAR EL FLUJO DEL RÍO WAWAYME. LA INVESTIGACIÓN EN EL USO DEL MODELO HIDROLÓGICO GR2M SE BASA EN LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO PARA SIMULAR LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LA PRECIPITACIÓN, LA TEMPERATURA Y LOS CAUDALES, BUSCANDO LA PROYECCIÓN DE LOS CAUDALES FUTUROS. LOS RESULTADOS MUESTRAN QUE LAS VARIACIONES DE LOS PATRONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA ALTERARÁN DE MANERA SIGNIFICATIVA LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DEL RÍO WAWAYME, QUE SEGURAMENTE AFECTA A SU VEZ LAS ACTIVIDADES AGRÍCOLAS, INDUSTRIALES Y DOMÉSTICAS DE LAS COMUNIDADES LOCALES. DE LA INVESTIGACIÓN SE PUEDE INFERIR LA IMPORTANCIA DE CONTAR CON DATOS Y MODELOS ROBUSTOS EN LA PROYECCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS, ASÍ COMO LA OPORTUNIDAD DE GENERAR ALTERNATIVAS O VÍAS PARA EL USO Y GESTIÓN DEL AGUA. POR OTRO LADO, ES IMPORTANTE MENCIONAR QUE SE DEBE MEJORAR LA INTERACCIÓN ENTRE LA CIENCIA CLIMÁTICA Y LA ADMINISTRACIÓN LOCAL PARA MITIGAR LOS PRONÓSTICOS.

**PALABRAS CLAVE:** CAMBIO CLIMÁTICO, CUENCA HIDROGRÁFICA, MODELACIÓN HIDROLÓGICA, ESCENARIOS RCP.

---

## ABSTRACT

---

IN THE PRESENT STUDY, A PROSPECTIVE ANALYSIS OF THE CLIMATE AND FLOW OF THE WAWAYME RIVER, IN EL PANGUI, ECUADOR, IS CARRIED OUT FOR THE NEXT 50 YEARS ASSUMING THE CONDITIONS OF THE RCP 4.5 SCENARIO. FOR THIS PURPOSE, HYDROMETEOROLOGICAL DATA OBTAINED FROM LOCAL STATIONS AND TOOLS FROM A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS) ARE USED TO MODEL THE FLOW OF THE WAWAYME RIVER. RESEARCH IN THE USE OF THE GR2M HYDROLOGICAL MODEL IS BASED ON THE CALIBRATION AND VALIDATION OF THE MODEL TO SIMULATE THE RELATIONSHIP BETWEEN PRECIPITATION, TEMPERATURE AND FLOWS, SEEKING THE PROJECTION OF FUTURE FLOWS. THE RESULTS SHOW THAT VARIATIONS IN PRECIPITATION AND TEMPERATURE PATTERNS WILL SIGNIFICANTLY ALTER THE WATER AVAILABILITY OF THE WAWAYME RIVER, WHICH WILL SURELY AFFECT THE AGRICULTURAL, INDUSTRIAL AND DOMESTIC ACTIVITIES OF LOCAL COMMUNITIES. FROM THE RESEARCH, WE CAN INFER THE IMPORTANCE OF HAVING ROBUST DATA AND MODELS IN PROJECTING THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON WATER RESOURCES, AS WELL AS THE OPPORTUNITY TO GENERATE ALTERNATIVES OR PATHWAYS FOR THE USE AND MANAGEMENT OF WATER. ON THE OTHER HAND, IT IS IMPORTANT TO MENTION THAT THE INTERACTION BETWEEN CLIMATE SCIENCE AND LOCAL

---

ADMINISTRATION MUST BE IMPROVED TO MITIGATE THE FORECASTS.

**KEYWORDS:** CLIMATE CHANGE, HYDROGRAPHIC BASIN, HYDROLOGICAL MODELING, RCP SCENARIOS.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS, LA PREOCUPACIÓN GLOBAL POR EL CAMBIO CLIMÁTICO HA CRECIDO DE MANERA EXPONENCIAL DEBIDO A LA EVIDENCIA CIENTÍFICA QUE REVELA SUS EFECTOS DEVASTADORES SOBRE LOS ECOSISTEMAS NATURALES Y HUMANOS; ESTE FENÓMENO NO SOLO HA ALTERADO PATRONES CLIMÁTICOS, SINO QUE TAMBIÉN HA EXACERBADO EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS COMO SEQUÍAS, INUNDACIONES Y TORMENTAS (ALLAN ET AL., 2021; ARAÚZ, 2023; MALDONADO ET AL., 2023).

LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS, EN PARTICULAR, SE ENCUENTRAN ENTRE LOS ECOSISTEMAS MÁS VULNERABLES A ESTOS CAMBIOS, YA QUE SU EQUILIBRIO HIDROLÓGICO DEPENDE DE INTERACCIONES COMPLEJAS ENTRE EL CLIMA, LA GEOGRAFÍA Y LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS (KUMAR ET AL., 2021; SU ET AL., 2021). LAS ALTERACIONES EN LAS TEMPERATURAS Y EN LOS REGÍMENES DE PRECIPITACIÓN IMPACTAN DIRECTAMENTE EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA, AFECTANDO TANTO A LA BIODIVERSIDAD COMO A LAS POBLACIONES HUMANAS QUE DEPENDEN DE ESTOS RECURSOS VITALES (KOUTSOYIANNIS, 2020; YANG ET AL., 2021). COMO RESULTADO, LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS SE HA CONVERTIDO EN UNA PRIORIDAD PARA MITIGAR LAS CONSECUENCIAS ADVERSAS DE LA VARIACIÓN CLIMÁTICA SOBRE LA PROVISIÓN HÍDRICA Y LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (POWER ET AL., 2024; GRIFFITH Y GOBLER, 2020).

EN ESTE CONTEXTO, EL CANTÓN DE EL PANGUI EN ECUADOR NO ES UNA EXCEPCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO; LA AMENAZA ASOCIADA A LAS TEMPERATURAS EXTREMADAMENTE ALTAS, DE ACUERDO CON LA TENDENCIA CRECIENTE EN EL NÚMERO DE DÍAS ANUALES CON MÁXIMAS EXTREMAS DURANTE EL PERÍODO HISTÓRICO DE 1981 A 2015,

---

SE CLASIFICA COMO UN NIVEL DE AMENAZA RPC 8.5 MUY ALTO. SE EVIDENCIA QUE GRAN PARTE DE LA PARROQUIA DE TUNDAYME, TODA LA PARROQUIA DE PACHICUTZA Y CASI LA TOTALIDAD DE LAS ÁREAS DE EL PANGUI Y EL GUISMI ESTÁN AFECTADAS POR ESTAS TEMPERATURAS (GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN EL PANGUI, 2020).

ADICIONALMENTE, LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME, UBICADA EN EL PANGUI, ECUADOR, REPRESENTA UN ÁREA DE ESTUDIO RELEVANTE DEBIDO A SU IMPORTANCIA ECOLÓGICA Y SU PAPEL EN EL SUMINISTRO HÍDRICO PARA LAS COLECTIVIDADES DE LA LOCALIDAD (PAUTA, 2024). LA PREVISIÓN DE LAS SECUELAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS ESPECÍFICAS, COMO LA DEL RÍO WAWAYME, PRESENTA DESAFÍOS CONSIDERABLES; LAS CONDICIONES TOPOGRÁFICAS, CLIMÁTICAS Y METEOROLÓGICAS DE ESTAS REGIONES MONTAÑOSAS REQUIEREN LA APLICACIÓN DE MODELOS PRECISOS QUE PUEDAN CAPTURAR LA VARIABILIDAD Y LAS DINÁMICAS LOCALES, SIENDO HERRAMIENTAS FUNDAMENTALES QUE PERMITEN PROYECTAR CÓMO LOS CAMBIOS EN LOS FORZAMIENTOS METEOROLÓGICOS INFLUIRÁN EN LOS RECURSOS HÍDRICOS A LO LARGO DEL TIEMPO (PÉREZ ET AL., 2016; WALSH, 2021; BROUSSARD, 2021).

## 2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

EL CANTÓN DE EL PANGUI SE ENCUENTRA EN LA PARTE SUR DE ECUADOR, DENTRO DE LA PROVINCIA DE ZAMORA CHINCHIPE, Y SU CAPITAL ES LA CIUDAD HOMÓNIMA. ACTUALMENTE, EL PANGUI TIENE UNA POBLACIÓN DE 10.945 PERSONAS, LO QUE EQUIVALE AL 9,08% DE LA URBE TOTAL DE LA PROVINCIA. LOS REGISTROS CLIMÁTICOS OBTENIDOS ENTRE 2002 Y 2022 INDICAN QUE EL PANGUI ESTÁ EXPERIMENTANDO UN AUMENTO EN LAS TEMPERATURAS (GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN EL PANGUI, 2020).

EN CUANTO A LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS, LA CUENCA DEL RÍO QUIMI, QUE VIERTE EN EL ZAMORA, PERTENECE AL SISTEMA HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO SANTIAGO. ESTE SISTEMA, SITUADO EN EL SURESTE DE LA NACIÓN, CONDUCE SUS AGUAS HACIA EL NORESTE, FLUYENDO HACIA LA CUENCA AMAZÓNICA. LA SUPERFICIE TOTAL EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL RÍO WAWAYME ES RELATIVAMENTE PEQUEÑA, CON APROXIMADAMENTE 32,68 KM<sup>2</sup> HASTA SU UNIÓN CON EL RÍO QUIMI. LAS CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS Y GEOLÓGICAS FAVORECEN LA CONVERGENCIA DE LOS CUERPOS HÍDRICOS HACIA LOS RÍOS PRINCIPALES. EL RELIEVE INDICA QUE LAS PENDIENTES ALARGADAS DE LAS CUENCAS SON BASTANTE MARCADAS, CON INCLINACIONES QUE OSCILAN ENTRE EL 15% Y EL 25% (QUEZADA, 2014).

EN ESTE ÁMBITO, CABE DESTACAR QUE EL CAMBIO NATURAL CLIMÁTICO Y LA FALTA DE PRECISIÓN EN LA PREDICCIÓN DE LAS DISPERSIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO GENERAN UNA AMPLIA INCERTIDUMBRE EN LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS; ESTA INCERTIDUMBRE DIFICULTA LA CREACIÓN DE MODELOS CONFIABLES, YA QUE LOS RESULTADOS PUEDEN VARIAR CONSIDERABLEMENTE

DEPENDIENDO DE LAS PROYECCIONES DE EMISIONES Y DE LAS DINÁMICAS CLIMÁTICAS GLOBALES Y LOCALES. HERMAN ET AL. (2020) DESTACAN QUE LAS POLÍTICAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO ENFRENTAN SERIOS DESAFÍOS CUANDO LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS NO PUEDEN SER PREDICHOS CON ALTA CERTEZA, LO QUE REDUCE LA EFECTIVIDAD DE LAS DECISIONES BASADAS EN ESTOS MODELOS.

CONJUNTAMENTE, EN MUCHAS REGIONES MONTAÑOSAS Y REMOTAS, COMO LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME, LA DISPONIBILIDAD DE DATOS METEOROLÓGICOS DE ALTA RESOLUCIÓN ES LIMITADA; ESTA ESCASEZ DE DATOS DIFICULTA LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN PRECISA DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS, COMPROMETIENDO LA EXACTITUD DE LAS PROYECCIONES FUTURAS. SEGÚN PATIÑO ET AL. (2021) LA FALTA DE INFORMACIÓN DETALLADA SOBRE LA PRECIPITACIÓN, LA TEMPERATURA Y OTROS FACTORES CLIMÁTICOS CLAVE ES UN PROBLEMA RECURRENTE EN LOS ANDES TROPICALES, AFECTANDO LA CAPACIDAD DE MODELAR CON PRECISIÓN LOS RECURSOS HÍDRICOS.

POR SU PARTE, ALTHOFF Y RODRIGUES (2021) ARGUMENTAN QUE LAS CUENCAS COMPLEJAS REQUIEREN MODELOS MÁS ROBUSTOS QUE CONSIDEREN MÚLTIPLES MEDIDAS DE INFORMACIÓN PARA CAPTURAR MEJOR LAS INTERACCIONES HIDROLÓGICAS NO LINEALES. LOS MODELOS TRADICIONALES ASUMEN QUE LAS RELACIONES ENTRE EL CLIMA Y LA HIDROLOGÍA SON ESTACIONARIAS, ES DECIR, QUE PERMANECEN CONSTANTES A LO LARGO DEL TIEMPO. NO OBSTANTE, EL CAMBIO CLIMÁTICO HA DEMOSTRADO QUE ESTAS RELACIONES PUEDEN SER NO ESTACIONARIAS, LO QUE SIGNIFICA QUE LOS MODELOS BASADOS EN DATOS HISTÓRICOS YA NO SON CONFIABLES PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO FUTURO DE LOS SISTEMAS HIDROLÓGICOS (YANG ET AL., 2021; PERRAMOND, 2020).

SIN EMBARGO, AUNQUE EXISTEN AVANCES EN LA MODELACIÓN CLIMÁTICA, EXISTE UNA DESCONEXIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE LOS

MODELOS Y LAS NECESIDADES PRÁCTICAS DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS. LOS MODELOS CLIMÁTICOS A MENUDO NO SE ADAPTAN A LAS ESCALAS TEMPORALES Y ESPACIALES RELEVANTES PARA LA PLANIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS A NIVEL LOCAL, LO QUE INDICA QUE UNA MEJOR INTEGRACIÓN ENTRE LA CIENCIA CLIMÁTICA Y LA ADMINISTRACIÓN HÍDRICA ES FUNDAMENTAL PARA DISEÑAR ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN QUE RESPONDAN A LAS REALIDADES LOCALES, ESPECIALMENTE EN REGIONES VULNERABLES AL CAMBIO CLIMÁTICO (GIRI ET AL., 2020; BĂNĂDUC ET AL., 2022).

EN ESTE CONTEXTO, LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME, CARACTERIZADA POR SU COMPLEJA GEOGRAFÍA Y SU CLIMA TROPICAL MONTAÑOSO, ENFRENTA UN RETO SIGNIFICATIVO: LA FALTA DE ESTUDIOS DETALLADOS QUE MODELEN DE MANERA PROSPECTIVA LA HUELLA DEL CAMBIO DEL CLIMA EN EL RECURSO AGUA. ESTE PROBLEMA ES CRÍTICO DADO QUE LAS COMUNIDADES QUE HABITAN EN ESTA REGIÓN DEPENDEN DEL AGUA PROVENIENTE DEL RÍO PARA SU SUBSISTENCIA Y DESARROLLO ECONÓMICO (GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN EL PANGUI, 2020). SIN UN CONOCIMIENTO ADECUADO DE CÓMO EL CAMBIO CLIMÁTICO PODRÍA ALTERAR EL FLUJO Y LA ACCESIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA EN LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS, LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN SOSTENIBLE DE ESTOS RECURSOS SE VE COMPROMETIDA.

EN CUANTO AL MODELADO HIDROLÓGICO Y CLIMÁTICO, LLEVAR A CABO ESTE TIPO DE ANÁLISIS ES CRUCIAL, DADO QUE LOS RECURSOS HÍDRICOS SON ESPECIALMENTE SENSIBLES A LAS HUELLAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO (OLVERA Y GAY, 2023; OCHOA, 2022). LAS PROYECCIONES FUTURAS DE VARIABLES HIDRO-METEOROLÓGICAS SON ALTAMENTE NOTABLES EN UN ENTORNO DE CAMBIO CLIMÁTICO, YA QUE IMPLICAN ALTERACIONES REVELADORAS EN LA ACCESIBILIDAD AL AGUA EN EL PAÍS. ESTAS PROYECCIONES SON ESPECIALMENTE IMPORTANTES EN LA INGENIERÍA CIVIL, CONSIDERANDO QUE MUCHAS GRANDES OBRAS

HIDRÁULICAS, COMO LOS EMBALSES, FUERON DISEÑADAS BAJO SUPUESTOS DE ESTACIONARIEDAD. EN ECUADOR, POR EJEMPLO, SE HAN EXPERIMENTADO PERÍODOS DE SEQUÍA, LO QUE HA LLEVADO A QUE DIVERSOS PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS SE VEAN OBLIGADOS A DETENER SU PRODUCCIÓN POR LA ESCASEZ DE RECURSOS HÍDRICOS (AGENCIA EFE, 2023; GESTIÓN DIGITAL, 2024).

LOS MODELOS HIDROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS PERMITEN ANTICIPAR LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS FUTURAS Y SU IMPACTO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS, LO CUAL ES ESENCIAL PARA TOMAR DISPOSICIONES AFINES CON LA UTILIZACIÓN Y LA GESTIÓN DEL AGUA. POR LO TANTO, ESTE ESTUDIO CONTRIBUIRÁ DE MANERA SIGNIFICATIVA AL ENTENDIMIENTO DE LAS SECUELAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DE GRADO LOCAL Y PROPORCIONARÁ UNA BASE CONCRETA PARA TOMAR DISPOSICIONES EN LA ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL TERRITORIO.

BAJO ESTOS ANTECEDENTES, SE FORMULA LA PREGUNTA CENTRAL DE INVESTIGACIÓN: ¿CÓMO SE VERÁ AFECTADA LA ACCESIBILIDAD FUTURA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO WAWAYME EN LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS CONSIDERANDO UN ESCALAMIENTO ESPACIAL JUNTO CON PROCESOS NO ESTACIONARIOS EN LOS FORZAMIENTOS METEOROLÓGICOS?

## 3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 3.1 HIDROLOGÍA Y EL CICLO DEL AGUA

EL VOCABLO "HIDROLOGÍA" SE ORIGINA DE LAS RAÍCES GRIEGAS "HIDROS", QUE SIGNIFICA AGUA, Y "LOGOS", QUE SE REFIERE A TRATADO, POR LO TANTO, SE DEFINE COMO LA CIENCIA DEL AGUA Y SE OCUPA DEL ESTUDIO DEL AGUA EN EL PLANETA, ABARCANDO SU REPARTICIÓN, CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS, ASÍ COMO SU IMPACTO EN EL ENTORNO AMBIENTAL, PUESTO QUE EL RECURSO HÍDRICO ES FUNDAMENTAL PARA LA CALIDAD DE VIDA DE LOS SERES HUMANOS. LA HIDROLOGÍA ES CRUCIAL PARA DISEÑAR Y OPERAR LA MAYORÍA DE LOS PLANES CIVILES, TALES COMO LA CIMENTACIÓN DE CARRETERAS, EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE, EL DISEÑO DE REPRESAS Y PLANES HIDROELÉCTRICOS, ASÍ COMO EN EL AJUSTE Y DRENAJE DE TERRENOS, PREVENIR Y CONTROLAR INUNDACIONES, Y EL DISEÑO DE CONDUCTOS, PUENTES Y SISTEMAS DE ALCANTARILLADO PARA AGUAS PLUVIALES (VÉLEZ, 2000).

EL AGUA SE ENCUENTRA EN UN ÁREA CONOCIDA COMO HIDROSFERA, QUE ABARCA DESDE APROXIMADAMENTE 15 KM EN LA ATMÓSFERA HASTA 1 KM BAJO LA SUPERFICIE TERRENA. EL AGUA QUE SE MUEVE DENTRO DE LA HIDROSFERA FORMA PARTE DEL CICLO HIDROLÓGICO. ESTE CONCEPTO IMPLICA EL DESPLAZAMIENTO O LA TRANSFERENCIA DE LAS MASAS DE AGUA, YA SEA EN FASE SÓLIDA, LÍQUIDA O VAPOR, A TRAVÉS DE DIVERSAS RUTAS O TRAYECTORIAS (RUIZ Y MARTÍNEZ, 2015). EL CICLO DEL AGUA ILUSTRRA EL MOVIMIENTO CONSTANTE Y COMPLEJO DEL AGUA TANTO EN LA TIERRA COMO EN LA ATMÓSFERA, DONDE ESTA SE TRASLADA DESDE LAS SUPERFICIES TERRESTRES Y OCEÁNICAS HACIA LA ATMÓSFERA Y REGRESA EN FORMA DE PRECIPITACIÓN; ESTE CICLO ES CRUCIAL PARA MANTENER EL EQUILIBRIO DEL ECOSISTEMA NATURAL Y FAVORECER EL PROGRESO DE LA SOCIEDAD HUMANA. SIN EMBARGO,

LAS ACCIONES ANTRÓPICAS Y LAS MODIFICACIONES EN EL MEDIO AMBIENTE HAN IMPACTADO ESTE CICLO; POR ELLO, ES FUNDAMENTAL ENTENDER LOS PROCESOS DEL CICLO DEL AGUA Y CÓMO RESPONDEN A LAS INTERVENCIONES HUMANAS Y A LAS VARIACIONES AMBIENTALES (WEIGUANG ET AL., 2021).

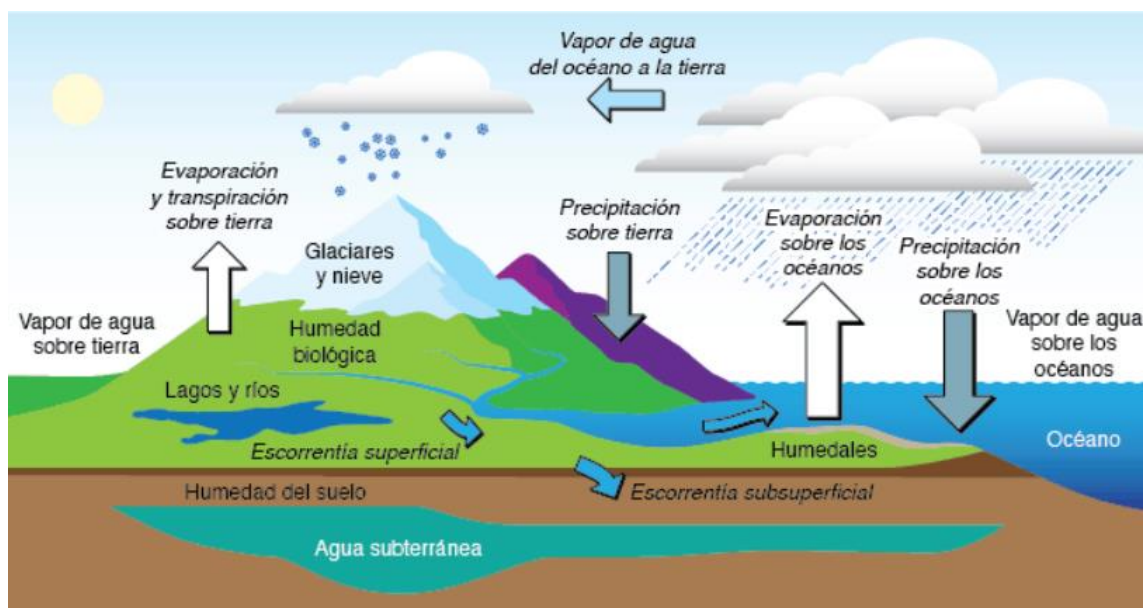
EL CICLO DEL AGUA ES ESENCIAL PARA COMPRENDER LOS PROCEDIMIENTOS QUE OCURREN EN EL PLANETA, AUNQUE NO HAY UN PUNTO DE INICIO DEFINIDO EN EL CICLO DEL AGUA, ES EVIDENTE QUE SE FUNDAMENTA EN SUS DIFERENTES ESTADOS: GASEOSO, LÍQUIDO Y SÓLIDO. TODOS ESTOS ESTADOS SE ENCUENTRAN EN LA NATURALEZA Y SON CRUCIALES PARA LOS RECURSOS HUMANOS. EL AGUA EXISTE EN FORMA GASEOSA EN LA ATMÓSFERA, ESPECIALMENTE EN LAS NUBES Y COMO VAPOR, EL CUAL SE MANIFIESTA TAMBIÉN COMO HUMEDAD. LAS NUBES SON LA REPRESENTACIÓN VISIBLE DEL GAS QUE SE CONDENSA EN PEQUEÑAS PARTÍCULAS. ESTAS PARTÍCULAS, AL DESVIARSE LOS RAYOS DE LUZ, FORMAN LAS NUBES. CUANDO LAS PARTÍCULAS CRECEN MEDIANTE DIFERENTES ADHESIONES, SU PESO AUMENTA Y PRECIPITAN EN FORMA DE LLUVIA, GRANIZO O NIEVE.

UNA VEZ QUE EL AGUA CAE, VUELVE A EVAPORARSE, PUEDE SER BLOQUEADA POR ESTRUCTURAS O ABSORBERSE EN LA FLORA. CUANDO LLEGA AL SUELO EN ESTADO LÍQUIDO, LO HUMEDECE, Y, SI SE ACUMULA EN GRANDIOSAS CANTIDADES, PUEDE INUNDARLO HASTA QUE ESCURRE POR LA ZONA. EL PATRÓN DE DRENAJE NO ESTÁ DEL TODO DEFINIDO, YA QUE DEPENDE DEL TIPO DE TERRENO. ASIMISMO, LA EVAPORACIÓN DEL AGUA TAMBIÉN SE VE INFLUENCIADA POR FACTORES COMO LA HUMEDAD Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y LA TEMPERATURA.

POR UN LADO, EL AGUA SE INFILTRA EN EL SUELO, SIGUIENDO RUTAS QUE ESTÁN DETERMINADOS POR LA ESTRUCTURA DEL SUELO, YA SEA POROSA O NO POROSA. EN TERRENOS POROSOS, EL AGUA SUELE DESLIZARSE CASI DE MANERA VERTICAL, INTEGRÁNDOSE AL ACUÍFERO

(BATEMAN, 2007). A CONTINUACIÓN, LA FIGURA 1 MUESTRA LO INDICADO:

FIGURA 1. CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA



NOTA. ADAPTADO DE SMART ENERGY EDUCATION. CICLO HIDROLÓGICO (2016).

ES ASÍ QUE, EL CICLO HIDROLÓGICO ES DESCRITO COMO UN PROCEDIMIENTO ESENCIAL QUE COMPRENDE LA CIRCULACIÓN CONTINUA DEL AGUA EN EL PLANETA, INCLUYENDO LA EVAPORACIÓN, CONDENSACIÓN, PRECIPITACIÓN, INFILTRACIÓN, Y ESCORRENTÍA; ENTENDER ESTOS PROCESOS EN UN CONTEXTO TAN VARIADO COMO EL DE PAÍSES COMO ECUADOR Y COLOMBIA, DONDE FACTORES COMO LA OROGRAFÍA, LAS DIFERENCIAS REGIONALES EN LA DISTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS, Y LAS INFLUENCIAS DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS COMO EL NIÑO Y LA NIÑA, JUEGAN UN PAPEL CRUCIAL EN LA DINÁMICA DEL AGUA (POVEDA ET AL., 2023).

ASIMISMO, EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL Y EL INCREMENTO DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS HAN GENERADO MODIFICACIONES SIGNIFICATIVAS EN LOS PROCESOS DEL CICLO DEL AGUA Y EN LOS RECURSOS HÍDRICOS, LO QUE HA OCASIONADO SERIOS PROBLEMAS Y CRISIS RELACIONADAS CON EL AGUA EN MUCHAS

REGIONES. LA PRINCIPAL CAUSA DE ESTOS CAMBIOS RADICA EN QUE LA DINÁMICA DEL CICLO HIDROLÓGICO, SU ESTRUCTURA Y LOS PARÁMETROS ASOCIADOS HAN EXPERIMENTADO UN DESARROLLO DUAL EN RESPUESTA A LA INFLUENCIA HUMANA, LO QUE HA LLEVADO A UNA DISMINUCIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA EN ESCORRENTÍA, ASÍ COMO A LA POLUCIÓN Y DETERIORO DE LOS HÁBITATS ACUÁTICOS. PARA ALCANZAR EL PROPÓSITO DE AVALAR LA SEGURIDAD DE LA PROVISIÓN DE AGUA, ES CRUCIAL REGULAR CIENTÍFICAMENTE LOS RECURSOS HÍDRICOS, CONSIDERANDO EL SISTEMA DEL CICLO DEL AGUA EN LA CUENCA COMO UNA BASE UNIFICADA (QIN ET AL., 2014). DE IGUAL FORMA, LA PROVISIÓN HÍDRICA EN EL PLANETA ES LA SIGUIENTE: EL 96.5% DEL AGUA ESTÁ PRESENTE EN LOS OCÉANOS, EL 1.7% SE HALLA EN LOS CASQUETES POLARES, OTRO 1.7% SE ENCUENTRA EN RESERVAS SUBTERRÁNEAS Y SOLO EL 0.1% ESTÁ DISPONIBLE EN LOS SISTEMAS DE AGUA SUPERFICIAL Y EN LA ATMÓSFERA. LA MAYOR FRACCIÓN DEL AGUA DULCE MUNDIAL SE CONCENTRA EN LOS HIELOS POLARES, REPRESENTANDO DOS TERCERAS PARTES DEL TOTAL, MIENTRAS QUE EL RESTO CORRESPONDE AL AGUA SUBTERRÁNEA. ADEMÁS, SE ESTIMA QUE EL AGUA BIOLÓGICA, QUE SE ENCUENTRA EN LOS ORGANISMOS VIVOS, CONSTITUYE APROXIMADAMENTE EL 0.003% DEL TOTAL DE AGUA DULCE (RUIZ Y MARTÍNEZ, 2015).

EN ESTE CONTEXTO, LOS MODELOS HIDROLÓGICOS NO SOLO SON HERRAMIENTAS CLAVE PARA SIMULAR CÓMO EL AGUA SE MUEVE A TRAVÉS DE DIFERENTES ENTORNOS, SINO QUE TAMBIÉN SON CRUCIALES PARA VALORAR LAS HUELLAS DEL CAMBIO DEL CLIMA EN LOS RECURSOS HÍDRICOS. AUNQUE SE HAN LOGRADO AVANCES SIGNIFICATIVOS, PERSISTEN DESAFÍOS EN CUANTO A LA PRECISIÓN Y LA INCERTIDUMBRE EN LOS DATOS Y PARÁMETROS DEL MODELO, ESPECIALMENTE BAJO CONDICIONES CAMBIANTES (WEIGUANG ET AL., 2021).

## 3.2 LA CUENCA HIDROGRÁFICA

LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS SE DEFINEN COMO TERRITORIOS NATURALES DONDE TODOS LOS PROCESOS SOCIOECOLÓGICOS ESTÁN PROFUNDAMENTE INTERCONECTADOS; ESTAS ÁREAS ABARCAN DESDE LAS ZONAS MÁS ALTAS (PARTEAGUAS) HASTA LOS PUNTOS DE SALIDA, COMO UN LAGO O EL MAR, Y SON FUNDAMENTALES PARA LA ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS ACUÁTICOS Y LOS BIENES ECOSISTÉMICOS (COTLER ET AL., 2013).

POR SU PARTE, SÁNCHEZ ET AL. (2003) UNA CUENCA HIDROGRÁFICA SE REFIERE A UN ÁREA GEOGRÁFICA DONDE LA PRINCIPAL CARACTERÍSTICA ES QUE LA LLUVIA QUE CAE EN ESA ZONA FLUYE HACIA UN MISMO CAUCE; ESTO INDICA QUE TODA EL AGUA QUE SE ACUMULA TERMINA DESEMBOLCANDO EN UN AFLUENTE MAYOR, UNA LAGUNA O EL OCÉANO. UNA CUENCA COMPRENDE UNA ZONA DE MÁS DE 50000 HECTÁREAS; LAS SUBCUENCAS TIENEN UN TAMAÑO QUE VARÍA ENTRE 5000-50000 HECTÁREAS; LAS MICROCUENCAS OSCILAN ENTRE 3000-5000 HECTÁREAS, Y EN CONDICIONES OROGRÁFICAS PROPICIAS, PUEDEN PRESENTARSE MICROCUENCAS DE MENOS DE TRES MIL HECTÁREAS.

EL MINISTERIO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, FORGAES Y CONSORCIO CARE (2018) REVELA QUE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA ES UNA ZONA TERRITORIAL DEFINIDA POR LA LÍNEA DE SEPARACIÓN DE LAS AGUAS, QUE SE COMPONE DE UN SISTEMA ACUÁTICO QUE ORIENTA SUS FLUJOS HACIA UN RÍO PRINCIPAL, UN GRAN RÍO, UN ESTANQUE O EL OCÉANO (FIGURA 2). SE TRATA DE UN ENTORNO TRIDIMENSIONAL QUE INCLUYE LAS RELACIONES ENTRE LA VEGETACIÓN DEL SUELO, LOS ESTRATOS DEL TERRENO Y EL AMBIENTE DE LA DIVISORIA DE AGUAS. EN EL INTERIOR DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA COEXISTEN ELEMENTOS

NATURALES Y LA CONSTRUCCIÓN EDIFICADA POR EL SER HUMANO, DONDE SE LLEVAN A CABO DIVERSAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS Y SOCIALES, GENERANDO EFECTOS TANTO POSITIVOS COMO NEGATIVOS EN EL BIENESTAR DE LAS PERSONAS. NO HAY NINGÚN LUGAR EN LA TIERRA QUE NO ESTÉ INCLUIDO EN ALGUNA CUENCA HIDROGRÁFICA.

FIGURA 2. CUENCA HIDROGRÁFICA



NOTA. ADAPTADO DE MANUAL DE MANEJO DE CUENCAS, POR MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, FORGAES Y CONSORCIO CARE (2018).

SEGÚN ORDOÑEZ (2011) ENTRE LOS COMPONENTES QUE DESTACAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS DESTACAN (VER FIGURAS 3 Y 4): CUENCA ALTA: SE REFIERE GENERALMENTE A LAS REGIONES MONTAÑOSAS O LAS CUMBRES DE LAS COLINAS, QUE ESTÁN

DELIMITADAS EN SU PARTE ALTA POR LOS LÍMITES DE LAS CORRIENTES DE AGUA.

**CUENCA MEDIA:** ES LA ZONA EN LA QUE SE INTEGRAN LAS AGUAS RECOLECTADAS EN LAS ZONAS ELEVADAS Y DONDE EL RÍO PRINCIPAL PRESENTA UN LECHO CLARAMENTE DELINEADO.

**CUENCA BAJA O ÁREAS INTERMEDIAS:** ES LA REGIÓN POR LA QUE EL RÍO SE DIRIGE HACIA RÍOS DE MAYOR TAMAÑO O HACIA TERRENOS MÁS BAJOS, COMO ESTUARIOS Y PANTANOS.

FIGURA 3. PARTES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

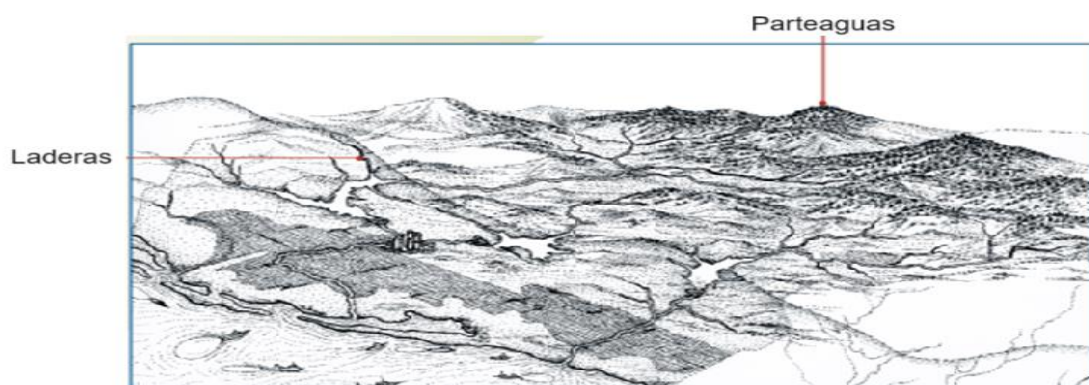


NOTA. ADAPTADO DE ¿QUÉ ES CUENCA HIDROLÓGICA?, POR ORDOÑEZ (2011).

**PARTEAGUAS:** SON LAS DIVISIONES NATURALES DEL TERRENO DE LAS QUE PROVIENEN LOS ESCURRIMIENTOS QUE DAN ORIGEN A UNA RED DE RÍOS. ESTAS ÁREAS SON LAS MÁS ALTAS DE LA MONTAÑA Y DELIMITAN UNA CUENCA DE OTRA ADYACENTE. LA SUPERFICIE DE MONTAÑAS Y COLINAS QUE DESEMBOCAN EN UN MISMO CAUCE Y VIERTEN EN UN RÍO PRINCIPAL FORMAN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA (SÁNCHEZ ET AL., 2003).

**LADERAS:** SON LAS ÁREAS SITUADAS EN LAS PARTES MÁS ELEVADAS, QUE A SU VEZ DAN LUGAR A UNA SERIE DE RIACHUELOS. LAS IRREGULARIDADES TERRENALES CONSTITUYEN EL SISTEMA DE DESAGÜE DE LA CUENCA, QUE RECOGE TODA EL AGUA DE LAS LLUVIAS Y LOS ESCURRIMIENTOS CONTINUOS, DIRIGIÉNDOLOS HACIA UN CAUCE PRINCIPAL O COMPARTIDO, DONDE FINALMENTE DESEMBOCAN EN UNA CORRIENTE MAYOR, QUE PUEDE SER UNA LAGUNA O EL MAR (SÁNCHEZ ET AL., 2003).

FIGURA 4. PARTES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA



**NOTA.** ADAPTADO DE SÁNCHEZ ET AL., LA CUENCA HIDROGRÁFICA: UNIDAD BÁSICA DE PLANEACIÓN Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES (2003).

LA GESTIÓN DE UNA CUENCA CONLLEVA UN PROCEDIMIENTO HOLÍSTICO QUE INCLUYE PLANIFICAR, EJECUTAR Y VALORAR ACTIVIDADES, SIEMPRE CON LA IMPLICACIÓN ORDENADA Y CONSCIENTE DE LA COMUNIDAD LOCAL. ES FUNDAMENTAL IDENTIFICAR A LOS RESIDENTES DE UNA CUENCA COMO RECEPTORES DE SUS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS, ASÍ COMO POTENCIALES CAUSANTES DE IMPACTOS ACUMULATIVOS EN LAS PARTES BAJAS, ES ESENCIAL PARA UN MANEJO SOSTENIBLE. ESTO PERMITE NO SOLO APROVECHAR LOS RECURSOS DE MANERA EQUITATIVA Y RESPONSABLE, SINO TAMBIÉN MITIGAR LOS EFECTOS NEGATIVOS QUE PUEDEN ACUMULARSE EN LA CUENCA (COTLER ET AL., 2013).

### 3.3 USO Y COBERTURA DEL SUELO Y RÉGIMEN HÍDRICO

DE ACUERDO CON EL SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN DE TIERRAS RURALES E INFRAESTRUCTURA TECNOLÓGICA (2020) ESTA SE REFIERE A LA CAPA BIOFÍSICA QUE SE OBSERVA EN LA SUPERFICIE TERRESTRE, FORMADA POR ELEMENTOS TANTO NATURALES COMO ANTRÓPICOS. EL USO DEL SUELO SE REFIERE A LA MANERA EN QUE EL SER HUMANO UTILIZA LOS DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA, LO CUAL ES RESULTADO DE LA INTERACCIÓN ENTRE LOS FACTORES BIOFÍSICOS Y CULTURALES EN UN ÁREA GEOGRÁFICA ESPECÍFICA.

#### 3.3.1 LA VEGETACIÓN EN EL CICLO HIDROLÓGICO

LA VEGETACIÓN AFECTA LOS COMPONENTES DEL CICLO DEL AGUA DE MANERA DIFERENTE. SE HA DEMOSTRADO QUE LOS BOSQUES DISMINUYEN LOS CAUDALES GENERADOS POR LAS LLUVIAS, LO CUAL PUEDE PREVENIR AVENIDAS E INUNDACIONES (GARCÍA ET AL., 2011).

DE ACUERDO CON LA COMISIÓN NACIONAL FORESTAL (2020) LOS BOSQUES DESEMPEÑAN UN PAPEL CRUCIAL EN EL CICLO DEL AGUA, YA QUE CONTRIBUYEN A PRESERVAR SU CALIDAD, REGULAR SU DISPONIBILIDAD Y MINIMIZAR RIESGOS COMO DESLIZAMIENTOS DE TIERRA, INUNDACIONES Y SEQUÍAS. ESTE CICLO ES FUNDAMENTAL PARA LA VIDA EN EL PLANETA, PERMITIENDO QUE EL AGUA SE TRANSFORME Y SE MUEVA A TRAVÉS DE DIFERENTES ENTORNOS. LA EROSIÓN, UN PROCESO QUE OCURRE EN TIEMPOS GEOLÓGICOS LARGOS, AFECTA LA FORMA DE LAS MONTAÑAS Y RESALTA LA IMPORTANCIA DE LOS BOSQUES EN LA ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS Y EN LA GESTIÓN DE ESTE VALIOSO RECURSO.

LA VEGETACIÓN DE LOS BOSQUES, JUNTO CON EL SUELO, CREA CONDICIONES QUE RALENTIZAN EL FLUJO DEL AGUA, LO QUE A SU VEZ EVITA LA EROSIÓN Y PREVIENE DESASTRES NATURALES. AL RETENER EL AGUA DE LA LLUVIA Y PROMOVER SU INFILTRACIÓN EN EL SUELO, LOS BOSQUES AYUDAN A MANTENER EL EQUILIBRIO HÍDRICO EN SUS ECOSISTEMAS. ADEMÁS, DEBAJO DE ESTOS BOSQUES EXISTEN CAPAS DE ROCA FRACTURADA QUE PERMITEN QUE EL AGUA SE FILTRE Y ALIMENTE LOS ACUÍFEROS, FUENTES ESENCIALES DE AGUA DULCE PARA LA AGRICULTURA Y LAS COMUNIDADES.

LA CRECIENTE CONCIENCIA SOBRE LA IMPORTANCIA DE LOS BOSQUES EN EL SUMINISTRO DE AGUA HA LLEVADO A UN ÉNFASIS EN LA NECESIDAD DE UN MANEJO SOSTENIBLE DE ESTOS ECOSISTEMAS. AL PRESERVAR SU CAPACIDAD PARA PREVENIR LA EROSIÓN Y MANTENER LOS NIVELES DE LOS MANTOS ACUÍFEROS, LOS BOSQUES NO SOLO SON FUNDAMENTALES PARA EL ACCESO AL AGUA DULCE DE CALIDAD, SINO TAMBIÉN PARA LA MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA PROTECCIÓN FRENTE A FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS. POR LO TANTO, GARANTIZAR LA SALUD DE LOS ECOSISTEMAS FORESTALES ES VITAL PARA LA SOSTENIBILIDAD Y

BIENESTAR DE LAS COMUNIDADES (COMISIÓN NACIONAL FORESTAL, 2020).

A ESTO SE SUMA, LO INDICADO POR RODRÍGUEZ Y DELGADO (2020) QUIENES INDICAN QUE LOS BOSQUES DESEMPEÑAN UN PAPEL CRUCIAL EN LA REGULACIÓN DE LA TEMPERATURA Y EN EL CICLO DEL AGUA. ESTE CICLO IMPLICA EL TRANSPORTE DEL AGUA EN FORMA DE PRECIPITACIONES DESDE LA ATMÓSFERA HACIA LA TIERRA, DONDE LOS BOSQUES Y LA VEGETACIÓN EN GENERAL RECICLAN ESTAS PRECIPITACIONES Y LAS DEVUELVEN A LA ATMÓSFERA, COMPLETANDO ASÍ SU CICLO. LA CAPACIDAD INNATA DE LOS BOSQUES DE INTERCEPTAR Y EVAPORAR MÁS AGUA EN COMPARACIÓN CON OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN, ASÍ COMO SU HABILIDAD PARA ABSORBER AGUA GRACIAS A SUS SISTEMAS DE RAÍCES MÁS PROFUNDOS Y PARA FILTRAR Y MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA, ADQUIERE AÚN MÁS RELEVANCIA EN EL CONTEXTO DE LA CRISIS DEL AGUA QUE AFECTA A GRAN PARTE DE LA POBLACIÓN GLOBAL.

POR SU PARTE, GENTINE (2018) MANIFIESTA QUE LA VEGETACIÓN TIENE UN PAPEL CRUCIAL EN EL CICLO DEL AGUA EN NUESTRO PLANETA, Y SE ESPERA QUE LAS PLANTAS GESTIONEN Y CONTROLÉN EL CRECIENTE ESTRÉS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS TERRESTRES EN EL FUTURO.

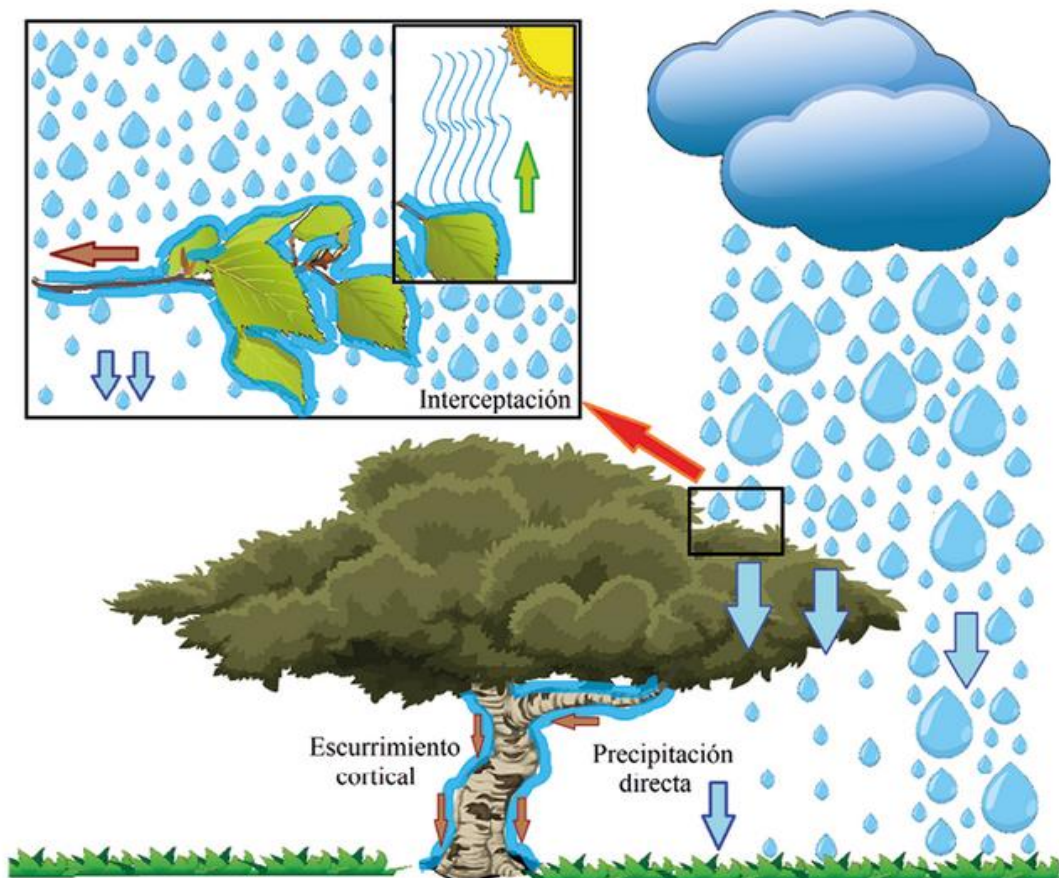
ASIMISMO, MORALES Y GÓMEZ (2017) ES UN HECHO AMPLIAMENTE RECONOCIDO QUE EL AGUA ES UNO DE LOS RECURSOS ESENCIALES PARA EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS, POR LO QUE LA LLUVIA, SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS, AFECTA DE MANERA SIGNIFICATIVA LA VEGETACIÓN EN UNA REGIÓN ESPECÍFICA. DURANTE PERIODOS DE SEQUÍA, EL DESARROLLO DE LA VEGETACIÓN DISMINUYE CONSIDERABLEMENTE, MIENTRAS QUE EN ÉPOCAS DE LLUVIAS ABUNDANTES, LAS PLANTAS PROSPERAN DE MANERA NOTABLE. LAS PLANTAS HAN CREADO DIVERSAS ESTRATEGIAS, TANTO MORFOLÓGICAS (COMO LA ALTURA, EL NÚMERO DE RAMAS Y LA FORMA DE LAS HOJAS) COMO FISIOLÓGICAS (INCLUYENDO LA FLORACIÓN, LA

TRANSPIRACIÓN Y LA DEFOLIACIÓN), QUE SE ACTIVAN O MODIFICAN EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD, FRECUENCIA O FALTA DE LLUVIA. POR EJEMPLO, EN PASTIZALES Y CULTIVOS, EL CRECIMIENTO ESTACIONAL DE LAS PLANTAS SE ALINEA PERFECTAMENTE CON LA TEMPORADA DE LLUVIAS.

ADEMÁS, LA LLUVIA PUEDE AFECTAR Y CAMBIAR LA DISTRIBUCIÓN, EL NÚMERO Y LA DENSIDAD DE LAS ESPECIES VEGETALES. SIN EMBARGO, ESTAS ALTERACIONES EN LA VEGETACIÓN TAMBIÉN IMPACTAN EN LA FORMA EN QUE LA PRECIPITACIÓN SE DISPERSA EN EL ECOSISTEMA. AL CAER DESDE LA ATMÓSFERA HACIA LA SUPERFICIE TERRESTRE, LAS GOTAS DE AGUA SE ENCUENTRAN CON UNA SERIE DE OBSTÁCULOS. EN EL ENTORNO URBANO, LA PRECIPITACIÓN ENFRENTA EDIFICIOS, CASAS, FÁBRICAS, ESCUELAS, CAMPOS Y PARQUES; MIENTRAS QUE EN UN BOSQUE, SELVA, MATORRAL O PASTIZAL, SON LAS COMUNIDADES VEGETALES LAS QUE ACTÚAN COMO OBSTÁCULOS PARA LA LLUVIA.

LA ESTRUCTURA FÍSICA DE LA VEGETACIÓN TIENE UN FUERTE IMPACTO EN EL PATRÓN DE PRECIPITACIÓN QUE LLEGA AL SUELO. ESTE FENÓMENO SE CONOCE COMO LA PARTICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (VER FIGURA 5).

***FIGURA 5. PARTICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN***



NOTA. ADAPTADO DE INTERCEPTACIÓN Y CAPTACIÓN DE AGUA POR LA VEGETACIÓN, POR MORALES Y GÓMEZ (2017).

CONJUNTAMENTE, LA PÁGINA WEB BANCO DE OCCIDENTE (2023) ESTE CICLO ES CRUCIAL PARA EL CORRECTO FUNCIONAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS Y LA SUPERVIVENCIA DE TODAS LAS ESPECIES EN LA TIERRA. ENTRE SUS FUNCIONES MÁS IMPORTANTES DESTACAN:

- CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA: LA CUBIERTA FORESTAL EN LOS BOSQUES INTERCEPTA Y RECOGE IMPORTANTES VOLÚMENES DE AGUA DE LLUVIA; ESTO IMPIDE QUE EL AGUA FLUYA DIRECTAMENTE HACIA RÍOS Y ARROYOS, DISMINUYENDO EL RIESGO DE INUNDACIONES REPENTINAS.
- ALMACENAMIENTO DE AGUA: LOS SUELOS DE LOS BOSQUES FUNCIONAN COMO ESPONJAS NATURALES, ASIMILANDO EL EXCESO DE AGUA DE LLUVIA Y LIBERÁNDOLA DE FORMA GRADUAL. ESTE PROCESO ES FUNDAMENTAL PARA MANTENER UN FLUJO

CONTINUO DE AGUA EN RÍOS Y ARROYOS, INCLUSO EN ÉPOCAS DE SEQUÍA.

- FILTRACIÓN DE AGUA: LA VEGETACIÓN DE LOS BOSQUES AYUDA A PURIFICAR EL AGUA AL FILTRARSE A TRAVÉS DE LAS CAPAS DE SUELO Y LAS RAÍCES DE LAS PLANTAS, ESTO ATENÚA LA EROSIÓN DEL SUELO Y PREVIENE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA CON SEDIMENTOS Y NUTRIENTES INDESEABLES.
- TRANSPIRACIÓN: A TRAVÉS DE UN PROCESO CONOCIDO COMO TRANSPIRACIÓN, LOS ÁRBOLES Y OTRAS PLANTAS EN LOS BOSQUES LIBERAN AGUA EN FORMA DE VAPOR, ESTA ACCIÓN ES CLAVE PARA MANTENER LA HUMEDAD DEL AIRE Y PARA INFLUIR EN LOS PATRONES CLIMÁTICOS DE LA REGIÓN.
- SOSTENIMIENTO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS: LOS BOSQUES PROTEGEN LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS, QUE SON ZONAS DE DRENAJE DE AGUA. PRESERVAR LOS BOSQUES EN ESTAS REGIONES ES VITAL PARA ASEGURAR EL SUMINISTRO DE AGUA DULCE PARA LAS COMUNIDADES Y PARA LA BIODIVERSIDAD.

### 3.3.2 CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE SUELO

DE ACUERDO CON LÓPEZ (2018) LA COBERTURA DEL SUELO SE REFIERE A LA CAPA BIOFÍSICA VISIBLE EN LA SUPERFICIE TERRESTRE, QUE ABARCA LA VEGETACIÓN, SUPERFICIES COMO FORMACIONES ROCOSAS Y CUERPOS DE AGUA. POR OTRO LADO, EL TÉRMINO USO SE REFIERE A LAS FUNCIONES QUE DETERMINADOS TIPOS DE COBERTURA TIENEN PARA LOS SERES HUMANOS, QUE SE VINCULA A LAS ACTIVIDADES HUMANAS O FUNCIONES ECONÓMICAS DE UN ÁREA PARTICULAR DE LA TIERRA, COMO PUEDE SER EL USO URBANO, INDUSTRIAL O EL DE RESERVAS NATURALES, ENTRE OTROS. EL ANÁLISIS DE LAS COBERTURAS TERRESTRES ES FUNDAMENTAL PARA LA GESTIÓN Y TOMA DE DECISIONES DE QUIENES ADMINISTRAN EL TERRITORIO, YA QUE

FACILITA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO AMBIENTAL DE DICHAS COBERTURAS Y LAS DINÁMICAS TERRITORIALES. ADEMÁS, SE CONVIERTE EN UNA HERRAMIENTA ESENCIAL PARA CREAR PRODUCTOS NECESARIOS PARA EL ORDENAMIENTO AMBIENTAL, COMO MAPAS DE RIESGO Y MAPAS DE CONFLICTOS DE USO DE SUELO, ENTRE OTROS.

ADICIONALMENTE, PIMIENTA Y LÓPEZ (2022) EXPRESAN QUE LA COBERTURA Y EL USO DEL SUELO SON CONCEPTOS FUNDAMENTALES QUE PERMITEN ENTENDER LA INTERRELACIÓN ENTRE ESTOS DOS ELEMENTOS; INDICANDO QUE LA COBERTURA DEL SUELO SE REFIERE AL ESTADO NATURAL DE LA SUPERFICIE TERRESTRE, INCLUYENDO TIPOS DE VEGETACIÓN, CUERPOS DE AGUA, SUELOS, MONTAÑAS, BOSQUES, GLACIARES, RÍOS, LAGOS, ASÍ COMO CONSTRUCCIONES HUMANAS COMO CARRETERAS, CIUDADES, PRESAS Y OTRAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.

POR OTRO LADO, EL USO DEL SUELO SE REFIERE A CÓMO SE EMPLEA LA TIERRA EN RELACIÓN CON LAS ACTIVIDADES HUMANAS DESTINADAS A SATISFACER NECESIDADES BÁSICAS Y A DIVERSAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS, COMO LA AGRICULTURA, LA GANADERÍA, LA INDUSTRIA, LA VIVIENDA, EL OCIO, LA PROVISIÓN DE REFUGIO Y LA EXTRACCIÓN DE RECURSOS NATURALES.

DE ESTA MANERA, TRUJILLO ET AL. (2022) SOSTIENEN QUE LOS MAPAS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO (LULC, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) SON REPRESENTACIONES DEL TERRITORIO QUE PERMITEN EVALUAR LAS CONDICIONES PASADAS Y PRESENTES, ASÍ COMO ANALIZAR LAS TENDENCIAS DE CAMBIO EN LAS DINÁMICAS SOCIOAMBIENTALES DE UN PAISAJE ESPECÍFICO. ESTOS MAPAS SON INSUMOS FUNDAMENTALES PARA LA EVALUACIÓN Y MODELIZACIÓN ESPACIAL DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS. POR LO TANTO, SON ELEMENTOS ESENCIALES PARA EL ORDENAMIENTO DEL TERRITORIO Y LAS POLÍTICAS PÚBLICAS. LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE LULC PRECISOS ES UNA TAREA COMPLEJA QUE REQUIERE UNA CANTIDAD SIGNIFICATIVA DE DATOS RELEVANTES,

TANTO DE OBSERVACIONES EN EL CAMPO COMO DE IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN, ADEMÁS DE ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN EFICIENTES, CAPACES DE INTEGRAR ESTOS DATOS DE SENSORES REMOTOS CON LOS RECOLECTADOS EN EL TERRENO PARA CARACTERIZAR CON EXACTITUD LAS COBERTURAS DEL SUELO EN UNA DETERMINADA ÁREA.

### *3.3.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO*

EN ESTA TEMÁTICA, PABÓN (2022) INDICA QUE HAY UN AMPLIO DEBATE ACERCA DE LA CATEGORIZACIÓN DE LOS TIPOS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO, Y SU REPRESENTACIÓN HA REPRESENTADO UN RETO DEBIDO A LA DIVERSIDAD DE ESCALAS. LOS CIENTÍFICOS HAN TENIDO QUE ENFRENTARSE AL DESAFÍO DE ESTABLECER UN MÉTODO SIMPLIFICADO PARA CLASIFICAR EL USO Y LA COBERTURA VEGETAL DEL SUELO, EN GRAN MEDIDA A CAUSA DE LA VARIEDAD DE CLIMAS, LAS PERTURBACIONES NATURALES, ASÍ COMO LA DINÁMICA GEOMORFOLÓGICA Y LAS INFLUENCIAS HUMANAS, ENTRE OTRAS VARIABLES QUE AFECTAN CADA REGIÓN.

ES ASÍ COMO, ALGUNOS ESTUDIOS HAN INTENTADO REALIZAR UNA CLASIFICACIÓN GLOBAL DEL USO Y LA COBERTURA DEL SUELO BASÁNDOSE EN CARACTERÍSTICAS COMO LA PERSISTENCIA DE LA BIOMASA VIVA AÉREA, SU LONGEVIDAD Y EL TIPO DE HOJAS; OTROS ENFOQUES SE CENTRAN EN EL "USO ANTROPOGÉNICO", CONSIDERANDO LAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS ASOCIADAS, COMO LA AGRICULTURA, LA SILVICULTURA, LA GANADERÍA Y LA PESCA. POR OTRO LADO, ECUADOR LLEVÓ A CABO ENTRE 2016 Y 2019 SU PROPIA CLASIFICACIÓN DEL USO Y LA COBERTURA DEL SUELO, RECOLECTANDO Y PROCESANDO DATOS A TRAVÉS DE DIVERSAS ENTIDADES ESTATALES ENCARGADAS DE GENERAR INFORMACIÓN ESPACIAL EN EL PAÍS, TALES COMO EL MINISTERIO DEL AMBIENTE (MAE), EL MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA, ACUACULTURA Y PESCA (MAGAP), Y EL

INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO (IEE) (MAE, 2012). COMO RESULTADO DE ESTE PROCESAMIENTO DE DATOS, SE CREARON MAPAS QUE MUESTRAN LA COBERTURA VEGETAL Y EL USO DEL SUELO EN ECUADOR PARA LOS AÑOS 1990 (MAE 2016), 2000 (MAE 2016), 2008 (MAE 2016), 2014 (MAE 2016), 2016 (MAE 2017) Y 2018 (MAE 2018), UTILIZANDO UNA ESCALA ESPACIAL DE 1:100.000 (TABLA 1).

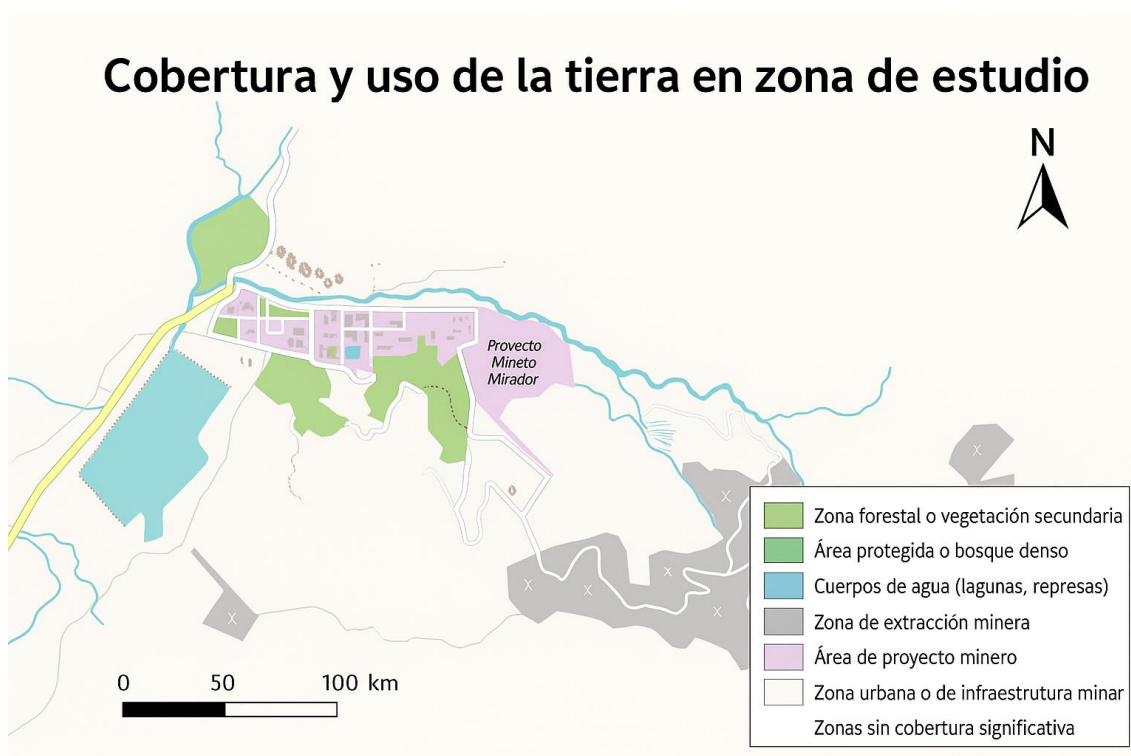
**TABLA 1. COBERTURA Y USOS DE TIERRA**

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FUENTE
ZONA FORESTAL O VEGETACIÓN SECUNDARIA	EXTENSIONES O ÁREAS CON VEGETACIÓN NATURAL EN PROCESO DE REGENERACIÓN O BIEN EN ESTADO SECUNDARIO, CON FRECUENTEMENTE Y DE UNA FORMA INDETERMINADA DE COBERTURA ARBÓREA Y ARBUSTIVA.	MAE (2016)
ÁREA PROTEGIDA O BOSQUE DENSO	ECOSISTEMAS FORESTALES PRIMIGENIOS CON ALTO GRADO DE CONSERVACIÓN, CON PRESENCIA DE ESPECIES NATIVAS Y ESTRATIFICACIÓN VEGETAL INTENSA.	MAE (2016)
CUERPOS DE AGUA (LAGUNAS, REPRESA)	SUPERFICIES CON UNA PRESENCIA DEL AGUA PERMANENTE, YA SEA DE FORMA NATURAL O ARTIFICIAL, PARA CONSERVACIÓN O CON POTENCIAL MINERO.	MAE-MAGAP - IEE (2012)
ZONA DE EXTRACCIÓN MINERA	SUPERFICIES ALTERADAS SIGNIFICATIVAMENTE POR ACTIVIDADES MINERAS, QUE PRESENTAN ALTERACIONES DEL RELIEVE Y PÉRDIDA DE COBERTURA VEGETAL.	MAE (2016)
ÁREA DE PROYECTO MINERO	SUPERFICIE QUE CORRESPONDE A LAS INSTALACIONES DEL PROYECTO MINERO (CAMINOS, PLANTAS, DEPÓSITOS, OFICINAS, ETC.).	
ZONA URBANA	SECTORES DEFINIDOS O CONSOLIDADOS CON EDIFICACIONES, CAMINOS Y SERVICIOS BÁSICOS PARA EL SOPORTE DEL PROYECTO Y PARA LA OCUPACIÓN HUMANA.	MAE-MAGAP-IEE (2012)
ZONA SIN COBERTURA SIGNIFICATIVA	TERRENOS QUE PRESENTAN SIN VEGETACIÓN VISIBLE O QUE, SI LA PRESENTAN, ADOLESCEN DEL ESTRATO VEGETAL, PRODUCTO DE LA INTERVENCIÓN ANTRÓPICA Y/O BIEN DE CONDICIONES NATURALES ADVERSAS.	MAE-MAGAP-IEE (2012)

NOTA. ADAPTADO DE MAE (2016).

SEGUIDAMENTE, EN LA FIGURA 6 SE MUESTRA UNA IMAGEN DE COBERTURA DE SUELO DEL ÁREA DE ESTUDIO:

FIGURA 6. COBERTURA Y USO DE LA TIERRA EN LA ZONA DE ESTUDIO



NOTA. TOMADO DE VISOR GEOGRÁFICO DEL MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA-GEOPORTAL DEL AGRO ECUATORIANO.

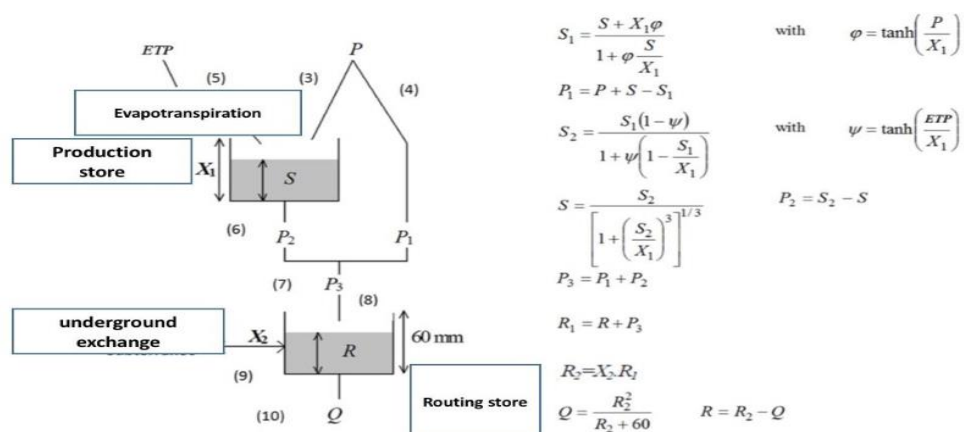
### 3.4 MODELO GR2M DE MOUELHI

REALIZADO POR EL CEMAGREF (CENTRO DE INVESTIGACIÓN AGRÍCOLA E INGENIERÍA AMBIENTAL FRANCIA), QUIEN PLANTEÓ UN MODELO GENERAL, PARA RECONSTRUIR LOS CAUDALES TOMANDO EN CONSIDERACIÓN LA PRECIPITACIÓN Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN. CONSECUTIVAMENTE EL MODELO A SEGUIDO EVOLUCIONANDO MOSTRANDO OTRAS VERSIONES COMO EL GR1A, GR2M, GR3J, GR4J. EL NÚMERO ENSEÑA LA CANTIDAD DE PARÁMETROS A MODELAR Y LA ÚLTIMA LETRA EL PASO DE TIEMPO: J (DIARIO), M (MENSUAL), A (ANUAL). EL MODELO GR2M, MARCHA A PASO DE TIEMPO MENSUAL,

QUE ESTÁ FUNDADO EN LA TRANSFORMACIÓN DE LA LLUVIA EN ESCORRENTÍA (VERA, 2011).

EL MODELO GR2M ES UN MODELO CON DOS RESERVORIOS, DONDE LA FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN SE INSTITUYE EN TORNO A UN RESERVORIO DENOMINADO RESERVORIO-SUELO, Y LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ESTÁ TUTELADA POR EL SEGUNDO RESERVORIO LLAMADO RESERVORIO DE AGUA GRAVITACIONAL, DONDE EL APOORTE ES INSTANTÁNEO AL INICIO DEL PASO DE TIEMPO, LUEGO EL RESERVORIO SE VACÍA GRADUALMENTE. EL NIVEL DE ESTE RESERVORIO DETERMINA EL CAUDAL QUE SE PUEDE LIBERAR (VER FIGURA 7).

FIGURA 7. MODELO GR2M



NOTA. TOMADO DE (ZUBIETA ET AL., 2018).

DONDE:

**VARIABLES DE ENTRADA:**

P=PRECIPITACIÓN MENSUAL (MM).

E=EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL (MM).

**PARÁMETROS DEL MODELO:**

X<sub>1</sub>= CAPACIDAD MÁXIMA DEL ALMACÉN DE PRODUCCIÓN (MM).

X<sub>2</sub>= CAPACIDAD MÁXIMA DEL ALMACÉN DE ENRUTAMIENTO (MM).

**VARIABLES INTERNAS:**

S= CONTENIDO DE AGUA EN EL ALMACÉN DE PRODUCCIÓN AL INICIO DE MES (MM).

$R$ = CONTENIDO DE AGUA EN EL ALMACÉN DE ENRUTAMIENTO AL INICIO DE MES (MM).

$S_1$ = AGUA INFILTRADA QUE ENTRA EN EL ALMACÉN DE PRODUCCIÓN.

$S_2$ = AGUA QUE PERMANECE EN EL ALMACÉN DE PRODUCCIÓN DESPUÉS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.

$P_1$ = PARTE DE LA PRECIPITACIÓN QUE PASA AL ALMACÉN DE PRODUCCIÓN.

$P_2$ = PARTE DE LA PRECIPITACIÓN DIRECTA QUE GENERA ESCORRENTÍA.

$P_3$ = AGUA DISPONIBLE PARA ESCURRIMIENTO (SUMA DE  $P_1$  Y  $P_2$ ).

$R_1$ = AGUA QUE ENTRA AL ALMACÉN DE ENRUTAMIENTO.

$R_2$ = PARTE DEL AGUA EN EL ALMACÉN DE ENRUTAMIENTO QUE GENERA ESCORRENTÍA (FLUJO).

$Q$ = ESCORRENTÍA MENSUAL GENERADA (MM).

$\varphi$  = FUNCIÓN DE TRANSFORMACIÓN NO LINEAL QUE DEPENDE DE LA RELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL PARÁMETRO  $X_1$ , SE USA PARA ESTIMAR  $S_1$ .

$\psi$ = FUNCIÓN DE TRANSFORMACIÓN NO LINEAL QUE DEPENDE DE LA RELACIÓN ENTRE EVAPORACIÓN Y EL PARÁMETRO  $X_1$ , SE USA PARA ESTIMAR  $S_2$ .

LAS VARIABLES DE ENTRADA ( $P$ ) Y SALIDA (ETP) DEL DEPÓSITO-SUELO (PRODUCCIÓN ALMACENADA-CAPACIDAD MÁXIMA  $X_1$ ) SE CALCULAN EN FUNCIÓN DEL ALMACENAMIENTO DEL DEPÓSITO DE PRODUCCIÓN ( $S$ ). UNA PARTE DE LA PRECIPITACIÓN  $P_1$  SE REFIERE A LA DIFERENCIA ENTRE  $P$  Y LA PRECIPITACIÓN QUE ENTRA AL SUELO, Y OTRA PARTE,  $P_2$ , SE REFIERE A LA CANTIDAD DE AGUA QUE CONTRIBUYE AL INTERCAMBIO SUBTERRÁNEO. LA SUMA DE  $P_1$  Y  $P_2$  CORRESPONDE A LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA,  $P_3$ , QUE ENTRA AL DEPÓSITO DE AGUA GRAVITACIONAL ( $R$ ) (CAPACIDAD MÁXIMA FIJADA EN 60 MM). EL INTERCAMBIO SUBTERRÁNEO ( $R_2$ ) SE INCLUYE EN EL MODELO  $X_2$  (FIGURA 7). FINALMENTE COMO RESULTADO DEL CAUDAL DE SALIDA, EL

DEPÓSITO DE AGUA GRAVITACIONAL SE LIBERA SEGÚN UNA FUNCIÓN CUADRÁTICA. LA OPTIMIZACIÓN DEL MODELO RESPONDE PRINCIPALMENTE A DOS PARÁMETROS:  $X_1$ , CAPACIDAD DEL DEPÓSITO-SUELO EN MILÍMETROS, Y  $X_2$ , COEFICIENTE DE INTERCAMBIO SUBTERRÁNEO (ADIMENSIONAL). PARA ELLO SE REALIZA UNA CALIBRACIÓN MANUAL PREVIA.

EL AGUA ACCESIBLE EN EL SUELO ( $S$ ) ES REDISTRIBUIDA TOMANDO COMO BASE LAS SIGUIENTES VARIABLES:

$\varphi$  (PHI) = COEFICIENTE DE RETENCIÓN DEL SUELO, DEFINIDO COMO:

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$$

$\psi$  (PSI) = COEFICIENTE DE DEMANDA EVAPORATIVA, DEFINIDO COMO: ESTE PARÁMETRO DETERMINA UNA FRACCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN QUE QUEDA EN EL SUELO: MAYOR RETENCIÓN CON UNAS PRECIPITACIONES BAJAS.

$$\psi = \tanh\left(\frac{ETP}{X_1}\right)$$

DETERMINA QUÉ FRACCIÓN DEL AGUA IMAGINARIA ALMACENADA EN EL SUELO SE EVAPOTRANSPIRA: MAYOR ETP, MAYOR EXTRACCIÓN DE AGUA DEL SUELO.

LA REDISTRIBUCIÓN DEL AGUA SE DESARROLLA DE LA FORMA SIGUIENTE:

SE CALCULA EL VOLUMEN DE AGUA  $S_1$  QUE PUEDE RETENER EL SUELO CON LAS PRECIPITACIONES  $P$ .

LA DIFERENCIA ENTRE  $P$  Y  $S_1$  SE DENOMINA  $P_1$  Y SE CONSIDERA EL EXCEDENTE NO RETENIDO EN EL SUELO.

LUEGO SE DETERMINA EL AGUA  $S_2$  QUE PUEDE SER UTILIZADA A LA EVASIÓN DEL AGUA DEL SUELO (EVAPOTRANSPIRACIÓN DE AGUA DEL SUELO), DESCONTANDO EL EFECTO DE  $\psi$ .

A CONTINUACIÓN SE CALCULA LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL S, EL AGUA RESTANTE REPRESENTA EL COMPONENTE  $P_2$  QUE PASA A FORMAR PARTE EL FLUJO SUBTERRÁNEO.

LA SUMA DE  $P_1$  Y  $P_2$  SE DENOMINA PRECIPITACIÓN EFECTIVA  $P_3$  Y LLEGA AL DEPÓSITO DE ESCORRENTÍA.

EL DEPÓSITO DE ESCORRENTÍA (R) TIENE UNA CAPACIDAD FIJA DE 60 MM Y SE DESARROLLA SIGUIENDO EL SEGUNDO PARÁMETRO DEL MODELO,  $X_2$ , EL COEFICIENTE DE INTERCAMBIO SUBTERRÁNEO (ADIMENSIONAL), QUE PERMITIRÁ DETERMINAR CUÁNTA AGUA SE DEVUELVE COMO ESCORRENTÍAS POR LA SIGUIENTE RELACIÓN:

$$R_2 = X_2 * R_1 \text{ y } Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60}$$

PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL MODELO SE UTILIZAN LAS SIGUIENTES FUNCIONES OBJETIVO: COEFICIENTE DE NASH SUTCLIFFE (NS), DIFERENCIA ENTRE VOLÚMENES CALCULADOS Y OBSERVADOS POR EL ERROR DE VOLUMEN ( $\Delta V$ ) Y COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (ZUBIETA ET AL., 2018) MOSTRADOS EN LAS SIGUIENTES ECUACIONES:

#### COEFICIENTE DE NASH SUTCLIFFE (NS)

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{nt} (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum_{t=1}^{nt} (Q_{obs}(t) - Q_{obs})^2} \text{ (ZUBIETA ET AL., 2018)}$$

DONDE:

$Q_{OBS}(T)$  ES EL CAUDAL OBSERVADO EN EL TIEMPO T;

$Q_{CAL}(T)$  ES EL CAUDAL SIMULADO (CALCULADO) POR EL MODELO EN EL MISMO INSTANTE;

$Q_{OBS}$  ES EL VALOR MEDIO DEL CAUDAL OBSERVADO EN EL PERÍODO DE ANÁLISIS;

N ES EL NÚMERO TOTAL DE OBSERVACIONES.

EL VALOR DEL NS VARÍA ENTRE  $-\infty$  Y 1, DONDE 1 INDICA UNA PREDICCIÓN PERFECTA Y VALORES CERCANOS O MENORES A 0 INDICAN UN MAL DESEMPEÑO DEL MODELO.

PARA EL CONTROL DE UN MODELO HIDROLÓGICO, A LA DISPOSICIÓN DE VARIOS INDICADORES ESTADÍSTICOS QUE CUANTIFIQUEN EL GRADO DE AJUSTE ENTRE LAS SIMULACIONES Y LAS OBSERVACIONES. DENTRO DE ELLOS SE HALLA EL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN ( $R^2$ ), QUE EVALÚA LA PROPORCIÓN DE LA VARIANZA DE LOS DATOS OBSERVADOS QUE ES EXPLICADA POR EL PROPIO MODELO. SU RANGO OSCILARÁ ENTRE 0 A 1, ESTANDO QUE CUANDO MÁS SE ACERQUE A 1 MEJOR SERÁ LA CAPACIDAD EXPLICATIVA DEL MODELO. AUNQUE NO ESTÉ RELACIONADO NI EL SESGO NI EL ERROR DE MAGNITUD, EL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN,  $R^2$ , TAMBIÉN PUEDE APLICARSE PARA CONTRASTAR LA CORRELACIÓN LINEAL ENTRE CAUDALES SIMULADOS Y CAUDALES OBSERVADOS (MORIASI ET AL., 2017).

**ERROR RELATIVO DE VOLUMEN ( $\Delta V$ ):**

$$\Delta V = \frac{\Sigma(Q_{obs}(t)) - \Sigma(Q_{cal}(t))}{\Sigma(Q_{obs}(t))} \text{ (ZUBIETA ET AL., 2018)}$$

DONDE:

$\Sigma Q_{CAL}$  (T) Y  $\Sigma Q_{OBS}$  (T) SON LOS VOLÚMENES TOTALES SIMULADOS Y OBSERVADOS, RESPECTIVAMENTE. ÉSTE INDICADOR REFLEJA EL SESGO VOLUMÉTRICO DEL MODELO, DONDE VALORES POSITIVOS INDICAN SOBREESTIMACIÓN DEL VOLUMEN, MIENTRAS LOS VALORES NEGATIVOS INDICAN SUBESTIMACIÓN.

**COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (P):**

$$\rho_{Q_{obs}, Q_{cal}} = \frac{\sigma_{Q_{obs}, Q_{cal}}}{\sigma_{Q_{obs}} \cdot \sigma_{Q_{cal}}} \text{ (ZUBIETA ET AL., 2018)}$$

DONDE:

$\sigma Q_{obs}, Q_{cal}$  ES LA COVARIANZA ENTRE LOS CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS;

$\sigma Q_{obs}$  y  $Q_{cal}$  SON LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR DE LOS CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS, RESPECTIVAMENTE.

ESTE COEFICIENTE MIDE LA RELACIÓN LINEAL ENTRE LAS SERIES DE CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS, CON VALORES QUE VARÍAN ENTRE -1 Y 1, DONDE LOS VALORES CERCANOS A 1 INDICAN UNA ALTA CORRELACIÓN POSITIVA.

### 3.5 MODELO SWAT

EL MODELO SWAT (*SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL*) ES UN MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO, FÍSICAMENTE ESTABLECIDO, QUE ADMITE SIMBOLIZAR LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO; TAMBIÉN, OPERA CON EL PASO DIARIO DEL TIEMPO Y ESTÁ DISEÑADO PARA PRONOSTICAR EL EFECTO QUE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO DEL SUELO TIENEN SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ESCURRIMIENTOS, SEDIMENTOS; ASÍ COMO LA HUELLA DE LOS FERTILIZANTES EN GRANDES CUENCAS COMPLEJAS CON DIFERENTES TIPOS DE SUELO, COBERTURA VEGETAL Y CONDICIONES DE MANEJO POR TIEMPOS LARGOS. PARA EJECUTAR ESTA MODELACIÓN EN LA CUENCA, EL MODELO SWAT DEMANDA DATOS DE CLIMA, LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL TIPO DE SUELO, PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS, EL RELIEVE, LA COBERTURA VEGETAL Y LAS PRÁCTICAS DE MANEJO DEL SUELO. ESTE MODELO SE GRADÚA CON DATOS DE PRODUCCIÓN DE ESCURRIMIENTOS Y SEDIMENTOS, ASIMISMO EXISTEN INVESTIGACIONES QUE EMPLEAN PARÁMETROS AFINES CON LAS PÉRDIDAS DE SUELO EN LADERAS.

EL DESEMPEÑO DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT HA MEJORADO NOTABLEMENTE UTILIZANDO DIFERENTES FUENTES DE DATOS DE TIPO DE SUELO, CONFIRMANDO QUE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL ES ESENCIAL PARA LA DEFINICIÓN DE LAS SUBCUENCAS Y CONFIGURACIÓN DEL

MODELO; DEBIDO A QUE EL TIPO DE SUELO ES UN FACTOR CLAVE PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA. LAS FUENTES DE INFORMACIÓN, ESCALA Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES SON DIVERSAS, LO QUE HA LLEVADO A AUMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE MAPAS MEDIANTE DIFERENTES TÉCNICAS COMO LA DIGITAL SOIL MAPPING (DSM), DEBIDO A QUE, EN COMPARACIÓN CON EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS TRADICIONAL, REALIZADO POR EL INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI), EL DSM ES MÁS RÁPIDO Y ECONÓMICO YA QUE REQUIERE DE MENOS PLANEACIÓN, INTENSIDAD DE MUESTREO, ANÁLISIS DE LABORATORIO Y PROCESAMIENTO DE DATOS (COLÍN ET AL., 2023).

### 3.6 MODELO WEAP

WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM (WEAP) ES UN INSTRUMENTO DE MODELACIÓN PARA PLANIFICAR Y DISTRIBUIR AGUA QUE PUEDE SER APROVECHADA A DIFERENTES ESCALAS, DESDE PEQUEÑAS FRANJAS DE CAPTACIÓN HASTA EXTENSAS CUENCAS. WEAP CLARAMENTE CONTIENE DEMANDAS DE AGUA CON PRIORIDADES ASOCIADAS Y EMPLEA ESCENARIOS PARA VALORAR DIFERENTES REPRESENTACIONES DE DISTRIBUCIÓN DEL RECURSO. WEAP CONTIENE UN MODELO HIDROLÓGICO, ASÍ COMO VARIOS MÓDULOS QUE ADMITEN INTEGRAR WEAP CON EL MODELO DE AGUA SUBTERRÁNEA MODFLOW Y CON EL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA QUAL2K (CENTRO DE CAMBIO GLOBAL-UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE; STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE, 2009).

### 3.7 ESCENARIOS DEL IPCC

EL GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC) FUE ESTABLECIDO EN COLABORACIÓN ENTRE LA ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM) Y EL PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA) CON EL PROPÓSITO DE EVALUAR LA INFORMACIÓN CIENTÍFICA, TÉCNICA Y

SOCIOECONÓMICA RELACIONADA CON EL RIESGO DE CAMBIO CLIMÁTICO PROVOCADO POR LA ACTIVIDAD HUMANA. DESDE SU FUNDACIÓN, EL IPCC HA ELABORADO UNA SERIE DE INFORMES DE EVALUACIÓN EXHAUSTIVOS SOBRE EL ESTADO DEL CONOCIMIENTO RESPECTO A LAS CAUSAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO, SUS POSIBLES EFECTOS Y LAS DISTINTAS OPCIONES DE RESPUESTA. ASIMISMO, HA PRODUCIDO INFORMES ESPECIALES, DOCUMENTOS TÉCNICOS, METODOLOGÍAS Y DIRECTRICES. LAS PUBLICACIONES DEL IPCC SE HAN CONVERTIDO EN REFERENCIAS FUNDAMENTALES, UTILIZADAS AMPLIAMENTE POR RESPONSABLES DE POLÍTICAS, CIENTÍFICOS Y OTROS ESPECIALISTAS (PNUMA, OMM, 2000).

EN 1992, EL IPCC LANZÓ UNOS ESCENARIOS DE EMISIONES QUE FUNDAMENTARON LOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL PARA DESARROLLAR PROYECCIONES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. LOS LLAMADOS "ESCENARIOS IS92" REPRESENTARON UN AVANCE SIGNIFICATIVO AL SER LOS PRIMEROS EN OFRECER ESTIMACIONES DE TODOS LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO A NIVEL MUNDIAL. DESDE ENTONCES, NUESTRO ENTENDIMIENTO SOBRE LAS FUTURAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO HA EVOLUCIONADO CONSIDERABLEMENTE. POR ESTA RAZÓN, EN 1996, EL IPCC DECIDIÓ CREAR UN NUEVO CONJUNTO DE ESCENARIOS DE EMISIONES QUE SERVIRÍAN COMO BASE PARA SU TERCER INFORME DE EVALUACIÓN, CON LA INTENCIÓN DE QUE FUERAN MÁS ÚTILES QUE LOS ESCENARIOS IS92. ESTOS NUEVOS ESCENARIOS TAMBIÉN SE UTILIZARÁN PARA EVALUAR LAS IMPLICACIONES CLIMÁTICAS Y MEDIOAMBIENTALES DE LAS FUTURAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, ASÍ COMO PARA ANALIZAR DIVERSAS ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN.

DE ACUERDO CON LA NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (2013) LOS MODELOS CLIMÁTICOS SE EMPLEAN PARA DIVERSOS FINES, QUE VAN DESDE EL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL

CLIMA Y EL SISTEMA CLIMÁTICO HASTA LAS PROYECCIONES SOBRE EL CLIMA EN EL FUTURO. ES ASÍ QUE, EL LABORATORIO DE DINÁMICA DE FLUIDOS GEOFÍSICOS DE LA NOAA HA DESARROLLADO VARIOS MODELOS ACOPLADOS DE OCÉANO Y ATMÓSFERA PARA ANTICIPAR CÓMO LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, CONSIDERANDO DIFERENTES PROYECCIONES DE POBLACIÓN, ECONOMÍA Y CONSUMO ENERGÉTICO, PUEDEN IMPACTAR AL PLANETA. LAS TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS (RCP, EN INGLÉS) NO SON ESCENARIOS COMPLETAMENTE NUEVOS E INTEGRADOS (ES DECIR, NO CONSTITUYEN UN CONJUNTO INTEGRAL DE PROYECCIONES SOCIOECONÓMICAS, DE EMISIONES Y CLIMÁTICAS). SON CONJUNTOS COHERENTES DE PROYECCIONES QUE ABARCAN ÚNICAMENTE LOS ELEMENTOS DEL FORZAMIENTO RADIATIVO, DISEÑADOS PARA SER UTILIZADOS EN MODELIZACIÓN CLIMÁTICA, ESCALADO DE PATRONES Y EN EL MODELADO DE LA QUÍMICA ATMOSFÉRICA, SEGÚN LA BASE DE DATOS RCP. EL ESCENARIO RCP 4.5 SE CONSIDERA UN ESCENARIO DE ESTABILIZACIÓN, LO QUE IMPLICA QUE EL NIVEL DE FORZAMIENTO RADIATIVO SE MANTIENE EN  $4,5 \text{ W/m}^2$  ANTES DE 2100, GRACIAS A LA IMPLEMENTACIÓN DE DIVERSAS TECNOLOGÍAS Y ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (THOMSON ET AL., 2011).

POR OTRO LADO, EN EL CONTEXTO DE LAS EMISIONES RCP 8.5, EL FORZAMIENTO RADIATIVO SE ELEVA A  $8,5 \text{ W/m}^2$ , LO QUE SE DEBE AL INCREMENTO DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO A LO LARGO DEL TIEMPO. ESTE ESCENARIO ES TÍPICO DE AQUELLOS DESCRITOS EN LA LITERATURA QUE RESULTAN EN ELEVADAS CONCENTRACIONES DE DICHOS GASES (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2013).

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 4.1 UBICACIÓN

LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME SE ENCUENTRA UBICADA EN EL CANTÓN EL PANGUI, PARROQUIA TUNDAYME QUE DE ACUERDO CON EL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL (PDOT) DEL CANTÓN EL PANGUI (GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN EL PANGUI, 2020) CUENTA CON UN CLIMA CÁLIDO Y HÚMEDO, Y SE SITÚA EN EL BOSQUE MUY HÚMEDO SUBTROPICAL, QUE SE CARACTERIZA POR LA PRESENCIA DE GRAN CANTIDAD DE LLUVIAS, LLEGANDO A UNA PRECIPITACIÓN DE 3.000 MM. ASIMISMO, LA TEMPERATURA VARÍA ENTRE 18 Y 24 °C; EL 77,53% DEL ÁREA TIENE UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE ENTRE 20 Y 22 °C. EL 11,40% DEL TERRITORIO PRESENTA TEMPERATURAS DE ENTRE 18 Y 20 °C, MIENTRAS QUE EL 11,07% SE SITÚA EN EL RANGO DE 22 A 24 °C. NO OBSTANTE, HAY DÍAS DEL AÑO EN LOS QUE LA TEMPERATURA PUEDE ALCANZAR LOS 30 °C Y DESCENDER HASTA LOS 13 °C DURANTE LAS TEMPORADAS MÁS FRÍAS.

SE PIENSA QUE LAS ÁREAS MÁS ELEVADAS DE LA PARROQUIA TUNDAYME SON TAMBIÉN LAS QUE RECIBEN MÁS LLUVIA. A MEDIDA QUE SE DESCENDE EN ALTITUD, LA CANTIDAD DE PRECIPITACIONES DISMINUYE EN LUGARES COMO EL PANGUI, TUNDAYME Y GUISMI. EN CAMBIO, SE OBSERVA UNA FRECUENCIA DE LLUVIA MODERADA EN LAS ZONAS DE TUNDAYME, PACHICUTZA Y EN LAS PARTES ALTAS DE EL PANGUI Y GUISMI. EL PANGUI PRESENTA PRECIPITACIONES A LO LARGO DE TODO EL AÑO, CON UN RANGO DE LLUVIAS QUE VARÍA ENTRE 1.750 Y 2.000 MM, CONSIDERADO COMO MEDIO.

ADEMÁS, LOS PROMEDIOS DE PRECIPITACIÓN OBSERVADOS EN EL CANTÓN EL PANGUI SE DIVIDEN EN TRES CATEGORÍAS: EL 15% DEL TERRITORIO PRESENTA LLUVIAS ABUNDANTES QUE OSCILAN ENTRE

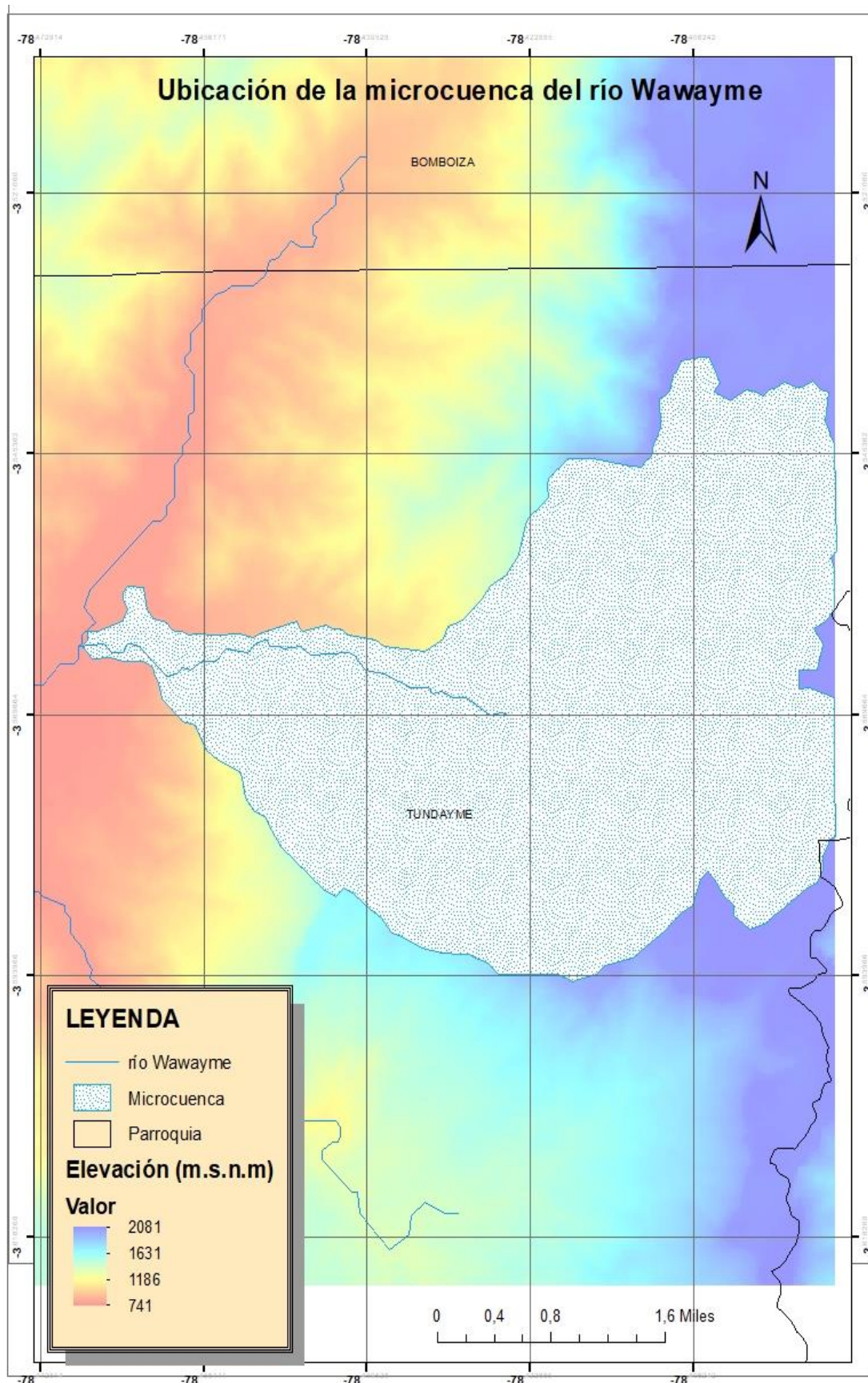
2.000 Y 2.500 MM AL AÑO; EL 28,10% DEL ÁREA EXPERIMENTA PRECIPITACIONES MÁS LEVES, CON UN RANGO DE 1.500 A 1.750 MM ANUALES; MIENTRAS QUE EL 56,90% RESTANTE DEL CANTÓN RECIBE PRECIPITACIONES MODERADAS, SITUADAS ENTRE 1.750 Y 2.000 MM AL AÑO.

EL CANTÓN PRESENTA UNA ALTITUD QUE VARÍA ENTRE 748 Y 2.178 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR. LA ELEVACIÓN MÁS BAJA EN EL CANTÓN ES DE 760 MSNM, LOCALIZADA EN LA RIBERA DEL RÍO CHUCHUMBLETA, MIENTRAS QUE LA MÁXIMA ALCANZA LOS 2.440 MSNM, EN EL SITIO DONDE SE HALLA EL CERRO DE PACHICUTZA.

EN CUANTO AL USO DEL SUELO, LA COBERTURA MÁS REPRESENTATIVA EN EL CANTÓN EL PANGUI CORRESPONDE AL ÁREA DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN, QUE ABARCA EL 71,41%, DESGLOSÁNDOSE EN UN 64,44% DE BOSQUE HÚMEDO Y UN 6,97% DE VEGETACIÓN HERBÁCEA HÚMEDA. A CONTINUACIÓN, SE ENCUENTRA LA COBERTURA DE PASTIZALES, QUE REPRESENTA EL 21,64%, LOS CUALES SE GENERAN EN BOSQUES INTERVENIDOS, COMBINÁNDOSE CON CULTIVOS DE CICLO CORTO Y ÁRBOLES FRUTALES, ADEMÁS DE INCLUIR CUERPOS DE AGUA, ÁREAS POBLADAS, CULTIVOS, VEGETACIÓN HERBÁCEA E INFRAESTRUCTURA ANTROPOGÉNICA, ENTRE OTROS ELEMENTOS.

LA CUENCA DEL RIO WAWAYME TIENE UN ÁREA DE 29,07 KM<sup>2</sup>, FORMA PARTE DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE SANTIAGO, QUE SE MUESTRA A CONTINUACIÓN EN LA FIGURA 8:

FIGURA 8. UBICACIÓN DEL RÍO WAWAYME



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

## 4.2 METODOLOGÍA

EL PRESENTE TRABAJO SE EFECTUÓ EN TRES FASES, QUE SE ADOPTARON DEL ENFOQUE EMPLEADO POR GALLO E IZA (2018), A CONTINUACIÓN, SE DETALLA LA SECUENCIA DE ESTAS FASES.

### FASE 1: RECOLECCIÓN DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

EN PRIMER LUGAR, SE RECOPILO INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DE LAS ESTACIONES UBICADAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA, OBTENIDA A TRAVÉS DE LA PÁGINA WEB DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA INAMHI Y QUE SE DETALLAN EN LA TABLA 2 Y FIGURA 9. PARA ELLO, SE SELECCIONARON LAS ESTACIONES CON LA MAYOR CANTIDAD DE REGISTROS MENSUALES DISPONIBLES EN UN PERÍODO DE 11 AÑOS (2003-2013).

**TABLA 2.** ESTACIONES EMPLEADAS EN EL ESTUDIO, PERIODO 2003-2013

CÓDIGO	ESTACIÓN
H884	ZAMORA AJ BOMBOIZA
H887	YACUAMBI AJ ZAMORA
H889	ZAMORA DJ SABANILLA
H890	ZAMORA DJ NANGARITZA
M189	GUALAQUIZA INAHMI
M190	YANZATZA
M502	EL PANGUI
M506	PAQUISHA

FUENTE: INAMHI

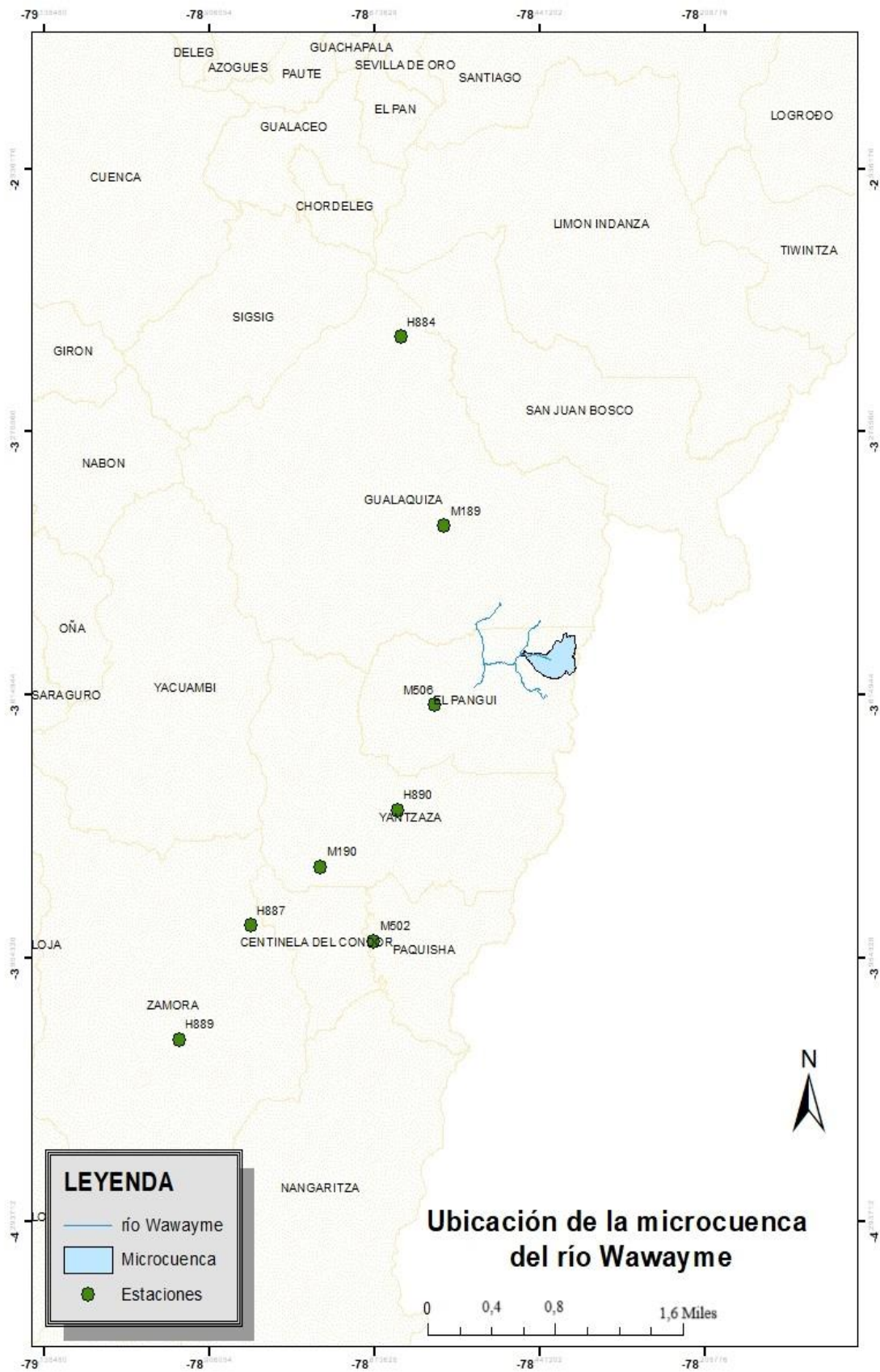
ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

CABE DESTACAR QUE AL ANALIZAR EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME SE EVIDENCIÓ LA PRESENCIA DE CUATRO ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA Y QUE COMPARTEN CARACTERÍSTICAS SIMILARES EN CUANTO A CONDICIONES CLIMÁTICAS, SIENDO ESTAS: ESTACIÓN GUALAQUIZA, YANZATZA, EL PANGUI Y PAQUISHA. ASIMISMO, EN LA PÁGINA WEB DEL INAMHI EXISTEN REGISTROS METEOROLÓGICOS DESDE 1971; SIN EMBARGO, EN LOS SIGUIENTES AÑOS SE ENCONTRÓ INFORMACIÓN

ÚNICAMENTE PARA PRECIPITACIÓN Y NO HAY DATOS DE TEMPERATURA (INFORMACIÓN QUE ES IMPORTANTE PARA CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN SEGÚN RODRÍGUEZ (2021)). CONFORME A LA LITERATURA EXISTENTE PARA PODER HACER UN RELLENO DE DATOS SE NECESITAN MÍNIMOS DOS AÑOS, Y EXISTEN MUCHAS ESTACIONES QUE NO CUENTAN CON DATOS, POR ELLO SE OPTÓ POR ANALIZAR ÚNICAMENTE DESDE EL AÑO 2003-2013 YA QUE SE EVIDENCIÓ LA MAYOR CANTIDAD DE DATOS PARA PROCEDER A HACER RELLENO DE DATOS.

LAS ESTACIONES ESCOGIDAS FUERON: PARA TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y EVAPORACIÓN – ESTACIONES M189 Y M190, ESTACIONES HIDROLÓGICAS PARA CAUDALES: H884, H887, H889 Y H890. CABE DESTACAR QUE EN CUANTO A LOS CAUDALES FUE MAYOR EL NÚMERO DE ESTACIONES HIDROLÓGICAS QUE CUENTAN CON INFORMACIÓN. ADEMÁS, SE COMPLETARON LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN MEDIANTE LOS MÉTODOS CURVA DE DOBLE MASA (CARRERA, 2016), REGRESIÓN LINEAL (HERRERA ET AL., 2017) E INVERSO DE LA DISTANCIA EUCLIDIANA AL CUADRADO (TERRERO ET AL., 2014), Y POSTERIORMENTE SE CALCULÓ LA MEDIA ANUAL. AL TENER COMO MÍNIMO DATOS DE TRES ESTACIONES METEOROLÓGICAS SE USÓ EL INVERSO DE LA DISTANCIA EUCLIDIANA AL CUADRADO; EN EL CASO DE SOLO EXISTIR DATOS DE DOS ESTACIONES COMO SUCEDIÓ EN LA TEMPERATURA SE EMPLEÓ EL ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL Y CURVA DE DOBLE MASA.

FIGURA 9. UBICACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME Y ESTACIONES EMPLEADAS EN EL ESTUDIO



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

PARA EMPLEAR EL MÉTODO DE DISTANCIA EUCLIDIANA (HERNÁNDEZ Y BROWN, 2014) SE USÓ LA SIGUIENTE FÓRMULA:

$$\text{Distancia euclidiana} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

DONDE:

$X_i$ =LONGITUD DE ESTACIÓN 1

$X_j$ =LONGITUD DE ESTACIÓN 2

$Y_i$ =LATITUD DE ESTACIÓN 1

$Y_j$ =LATITUD DE ESTACIÓN 2

$Z_i$ =ALTITUD DE ESTACIÓN 1

$Z_j$ =ALTITUD DE ESTACIÓN 2

### CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ( $E_0$ ), SE APLICÓ LA ECUACIÓN DE HARGREAVES Y SAMANI (RODRÍGUEZ J. , 2021), EXPRESADA DE LA SIGUIENTE MANERA:

$$E_0 = \frac{0.0023(T + 17.8)(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5} Ra}{\lambda}$$

DONDE:

- $T_{m\acute{a}x}$  ES LA MEDIA MENSUAL DE TEMPERATURA MÁXIMA (°C),
- $T_{m\acute{i}n}$  ES LA MEDIA MENSUAL TEMPERATURA MÍNIMA (°C).
- LA TEMPERATURA MEDIA MENSUAL ( $T$ ) (RODRÍGUEZ J. , 2021), SE CALCULÓ EMPLEANDO LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$T = \frac{T_{m\acute{i}n} + T_{m\acute{a}x}}{2}$$

- $\lambda$  = CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN MENSUAL, FUE CALCULADO POR CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA, Y SE UTILIZÓ PARA OBTENER DIRECTAMENTE EL RESULTADO DE  $E_0$  EN MM D<sup>-1</sup>, Y ESTÁ DADO POR:

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 T$$

- RA: RADIACIÓN EXTRATERRESTRE, FUE ESTIMADA A PARTIR DE LAS TABLAS PROPUESTAS POR LA FAO (2006), DONDE A CADA LATITUD

DE CADA HEMISFERIO SE LE CALCULÓ LA RADIACIÓN, CON DICHAS TABLAS SE REALIZÓ UNA CORRELACIÓN POLINOMIAL DE CUATRO PARÁMETROS ENTRE LA RADIACIÓN Y LA LATITUD, DE DONDE SE OBTUVIERON FUNCIONES COMO LA SIGUIENTE:

$$y = 1E - 06x^4 - 0.0001x^3 - 0.0004x^2 - 0.436x + 36.305$$

DONDE  $x$  =LATITUD EN GRADOS DECIMALES.

### **OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DEL DEM**

SE OBTUVO EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM), A PARTIR DE LA PLATAFORMA OPEN TOPOGRAPHY 30 M DEM DOWNLOAD. PARA PROCESAR EL DEM, SE EMPLEÓ EL SOFTWARE DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO QGIS. PRIMERO SE DELIMITÓ EL ÁREA DE ESTUDIO, Y POSTERIORMENTE SE RECORTÓ EL DEM APLICANDO LA HERRAMIENTA RÁSTER CORTAR POR CAPA DE MÁSCARA.

CON EL DEM YA RECORTADO, SE PROCEDIÓ A LA DELIMITACIÓN DE LA CUENCA MEDIANTE EL MODELO “DEFINE WATERSHED”, EL CUAL REQUIERE DE UN PUNTO DE DESCARGA, SELECCIONADO PREVIAMENTE EN FUNCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LA CUENCA (ESCUELA DE CIENCIAS DEL AGUA, 2019).

### **FASE II: APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO GR2M**

PARA AJUSTAR Y VALIDAR EL MODELO HIDROLÓGICO GR2M, SE UTILIZARON DATOS CORRESPONDIENTES AL PERÍODO 2003-2013. EL PROCESO DE AJUSTE DEL MODELO SE CENTRÓ EN OPTIMIZAR LOS PARÁMETROS  $X_1$  Y  $X_2$ , CON EL OBJETIVO DE MAXIMIZAR EL COEFICIENTE DE NASH (LIN ET AL., 2017) Y MEJORAR LA PRECISIÓN DE LAS SIMULACIONES. PARA LA PREPARACIÓN DE LOS DATOS CLIMÁTICOS DE ENTRADA AL MODELO GR2M, SE TOMARON DATOS DIARIOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE DENTRO Y ALREDEDOR DE LA CUENCA CORRESPONDIENTES A LOS VARIABLES PRECIPITACIÓN Y

TEMPERATURA, Y SE APLICARON LOS MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL (IDW) CONSIDERANDO LA ALTITUD, PARA GENERAR SERIES REPRESENTATIVAS PARA EL CENTROIDE DE LA CUENCA.

FINALMENTE, SE CONSIDERA LA REPRESENTATIVIDAD DE LOS DATOS QUE HAN SIDO CONSIDERADOS, ESTA ACCIÓN SE REALIZÓ A PARTIR DE COMPARACIONES DE LOS DATOS, PARA VER LA COHERENCIA Y VERIFICAR LA RIGUROSIDAD DE LOS DATOS QUE SERÁN INTRODUCIDOS EN EL MODELO HIDROLÓGICO.

EL MODELO HIDROLÓGICO GR2M, AMPLIAMENTE UTILIZADO POR SU USO EN ESTUDIOS DE ANÁLISIS HIDROLÓGICO MENSUAL, SE IMPLEMENTÓ PARA EVALUAR LA RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y CAUDALES DE UN RÍO. ESTE MODELO SE FUNDAMENTA EN EL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA, E INCORPORA DOS PARÁMETROS ESENCIALES QUE CONTROLAN LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA Y LA ESCORRENTÍA.

### **CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO**

PARA CALIBRAR Y VALIDAR EL MODELO HIDROLÓGICO GR2M SE RECOPIARON LOS DATOS CLIMÁTICOS PARA EL PERÍODO 2003-2013, ESPECIALMENTE EN LOS PARÁMETROS DE TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y CAUDALES. PARA CALIBRAR EL MODELO SE TOMÓ EN CONSIDERACIÓN DOS TERCIOS DEL PERÍODO DE ANÁLISIS (2003-2009) Y UN TERCIO PARA LA VALIDACIÓN (2010-2013).

EN UNA FASE POSTERIOR, SE COMENZÓ A DEFINIR LA ESTRUCTURA DEL PROPIO MODELO, DANDO UN VALOR INICIAL DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS: X1 (ALMACENAMIENTO DEL RESERVORIO-SUELO) Y X2 (COEFICIENTE DE INTERCAMBIO SUBTERRÁNEO), EJECUTÁNDOSE POSTERIORMENTE EL MODELO CON ESTOS PRIMEROS VALORES DE LOS PARÁMETROS, OBTENIENDO UNA PRIMERA SIMULACIÓN DE CAUDALES, POSTERIORMENTE AJUSTADA MEDIANTE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN DEL TIPO COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE (NSE).

ENTONCES, ESTE PROCESO SE REALIZA AJUSTANDO LOS PARÁMETROS DEL MODELO GR2M PARA MINIMIZAR LAS DIFERENCIAS ENTRE LOS CAUDALES SIMULADOS Y LOS OBSERVADOS. PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL MODELO, SE UTILIZAN DOS INDICADORES ESTADÍSTICOS COMUNES: EL COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE (NSE) Y EL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE).

### **FASE III: PROYECCIÓN CLIMÁTICA Y ESCENARIOS RCP**

#### **SELECCIÓN DEL ESCENARIO CLIMÁTICO RCP 4.5**

PARA PROYECTAR LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS, SE UTILIZÓ EL ESCENARIO DE EMISIONES RCP 4.5 (REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS 4.5). ESTE ESCENARIO, QUE ASUME LA IMPLEMENTACIÓN DE POLÍTICAS MODERADAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES, PREVÉ UN FORZAMIENTO RADIATIVO DE  $4.5 \text{ W/m}^2$  PARA EL AÑO 2100, EL CUAL RESULTA PARA ANÁLISIS PROSPECTIVOS, YA QUE REPRESENTA UN CAMINO INTERMEDIO ENTRE LOS ESCENARIOS MÁS OPTIMISTAS (RCP 2.6) Y LOS MÁS PESIMISTAS (RCP 8.5). LOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL (GCMS) VINCULADOS A ESTE ESCENARIO GENERAN PROYECCIONES DE CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN Y LA TEMPERATURA APLICABLES A LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME (ÁLVAREZ ET AL., 2020; MENA ET AL., 2020).

LOS DATOS DE CLIMA FUTURO FUERON OBTENIDOS DESDE LA PLATAFORMA WORLDCLIM DONDE EXISTEN PROYECCIONES PARA LOS AÑOS 2021-2040, 2041-2060 Y 2061-2080. SE TOMÓ ESTOS AÑOS PARA CUBRIR LA PROYECCIÓN DE LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS. A CONTINUACIÓN, PARA EL ESTUDIO DE LOS DATOS SE DIFERENCIÓ EL ESCENARIO ACTUAL Y EL FUTURO Y CON BASE EN LA METODOLOGÍA DETERMINADA POR EL IPCC (2007), SE CONSIDERÓ QUE A MAYOR VARIACIÓN ENTRE EL PROMEDIO DE LAS VARIABLES DE LA LÍNEA BASE CON EL ESCENARIO FUTURO SE TENDRÍA UN MAYOR IMPACTO (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2007).

PARA OBTENER LOS VALORES PROMEDIO DE CADA VARIABLE A NIVEL DE SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS SE UTILIZÓ LA HERRAMIENTA "ZONAL STATISTICS AS TABLE" DE LA HERRAMIENTA DE SPATIAL ANALYST DE ARCMAP VERSIÓN 10.2. SE CALCULARON LAS DIFERENCIAS PROMEDIO MENSUALES ENTRE EL AÑO 2080 Y LA LÍNEA BASE.

### **PROYECCIÓN DEL CAUDAL FUTURO**

CON EL MODELO CALIBRADO Y VALIDADO, SE PROCEDIÓ A REALIZAR LAS SIMULACIONES DE CAUDALES FUTUROS PARA LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS BAJO EL ESCENARIO RCP 4.5. SE UTILIZÓ LA SERIE PROYECTADA DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA COMO ENTRADA PARA EL MODELO GR2M, EL CUAL GENERARÁ UNA SERIE DE CAUDALES MENSUALES FUTUROS. ESTAS PROYECCIONES PERMITEN IDENTIFICAR PATRONES A LARGO PLAZO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA. SE ESPERA QUE, BAJO EL ESCENARIO RCP 4.5, SE PRESENTEN CAMBIOS EN LA ESTACIONALIDAD Y MAGNITUD DE LOS CAUDALES, LO CUAL TENDRÁ IMPLICACIONES DIRECTAS SOBRE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA.

### **ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS**

FINALMENTE, SE REALIZÓ UN ANÁLISIS DETALLADO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS, ENFOCÁNDOSE EN CÓMO LAS VARIACIONES EN LOS CAUDALES PROYECTADOS AFECTARÁN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO WAWAYME.

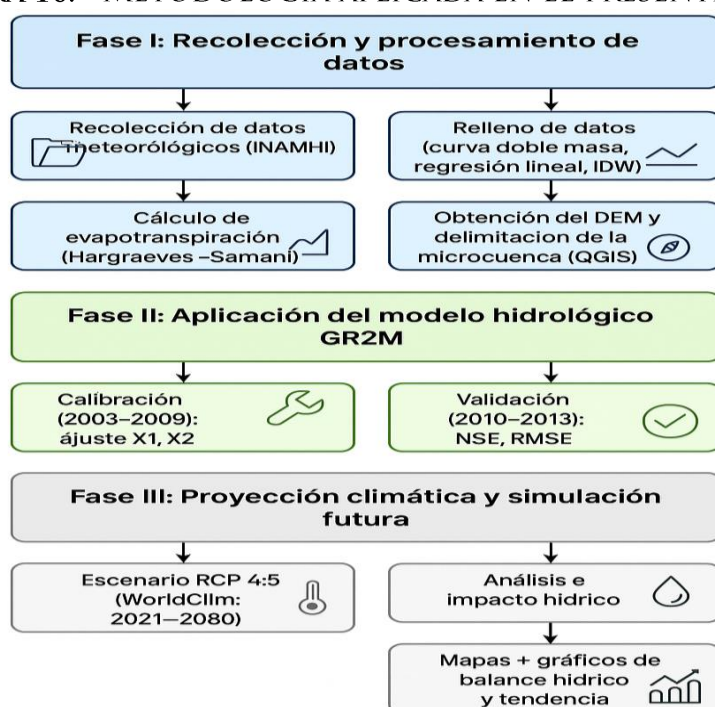
### **VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS**

LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS SE VISUALIZARON A TRAVÉS DE GRÁFICOS QUE MOSTRARON LAS TENDENCIAS DE LOS CAUDALES PROYECTADOS PARA LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS, DESTACANDO LOS PERIODOS CRÍTICOS DE MAYOR O MENOR DISPONIBILIDAD DE AGUA. ADEMÁS, UN MAPA DE BALANCE HÍDRICO ILUSTRÓ LAS ZONAS DE LA

CUENCA CON MAYORES CAMBIOS EN EL ALMACENAMIENTO Y CAUDALES.

A CONTINUACIÓN, LA FIGURA 10 MUESTRA UN RESUMEN DE LA METODOLOGÍA APLICADA:

FIGURA 10. METODOLOGÍA APLICADA EN EL PRESENTE ESTUDIO



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 PARÁMETROS ANALIZADOS

#### 5.1.1 ESTACIONES METEOROLÓGICAS

ASIMISMO, SE RECOLECTÓ INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DE 8 ESTACIONES, CUYOS DATOS SE OBTUVIERON DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI). LAS ESTACIONES SELECCIONADAS FUERON 2 CLIMATOLÓGICAS, 2 PLUVIOMÉTRICAS Y CUATRO LIMNIMÉTRICAS, YA QUE ESTAS PRESENTARON LA MAYOR CANTIDAD DE DATOS DURANTE EL PERÍODO ANALIZADO QUE CORRESPONDE A 2003-2013.

SEGUIDAMENTE, EN LA TABLA 3 SE DETALLAN SUS CARACTERÍSTICAS:

**TABLA 3.** CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES EMPLEADAS EN EL ESTUDIO, PERIODO 2003-2013.

CÓDIGO	ESTACIÓN	COORDENADAS UTM-ZONA 17S		ALTITUD MSNM	TIPO	CUENCA
		LATITUD X	LONGITUD Y			
H884	ZAMORA AJ BOMBOIZA	762720	9651068	548	LM	S/N
H887	YACUAMBI AJ ZAMORA	738928	9567238	961	LM	S/N
H889	ZAMORA DJ SABANILLA	727809	9550921	902	LM	S/N
H890	ZAMORA DJ NANGARITZA	761904	9583587	890	LM	S/N
M189	GUALAQUIZA INAHMI	769358	9624070	750	CO	S/N
M190	YANZATZA	749844	9575506	830	CO	S/N
M502	EL PANGUI	769750	9596595	820	PV	S/N
M506	PAQUISHA	762014	9567330	650	PV	S/N

CO=CLIMATOLÓGICA ORDINARIA; LM=LIMNIMÉTRICA; PV=PLUVIOMÉTRICA.

FUENTE: INAMHI

ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

## 5.1.2 PRECIPITACIÓN

A CONTINUACIÓN, SE PRESENTA UN RESUMEN ESTADÍSTICO DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL REGISTRADA EN CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DURANTE TODO EL PERÍODO DE ANÁLISIS, LA TABLA 4 MUESTRA LOS VALORES PROMEDIO, MÍNIMO, MÁXIMO Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL ACUMULADA. LA SERIE COMPLETA DE DATOS MENSUALES POR AÑO SE PRESENTA EN EL ANEXO 1:

**TABLA 4. RESUMEN ESTADÍSTICO DE PRECIPITACIÓN MENSUAL**

ESTACIÓN	MEDIA (MM)	MÍNIMO (MM)	MÁXIMO (MM)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
M189	148,54	26,4	358,4	66,42
M190	244,41	0,0	711,8	131,80
M502	148,64	0,0	225,1	63,56
M506	205,42	6,6	632,0	107,37

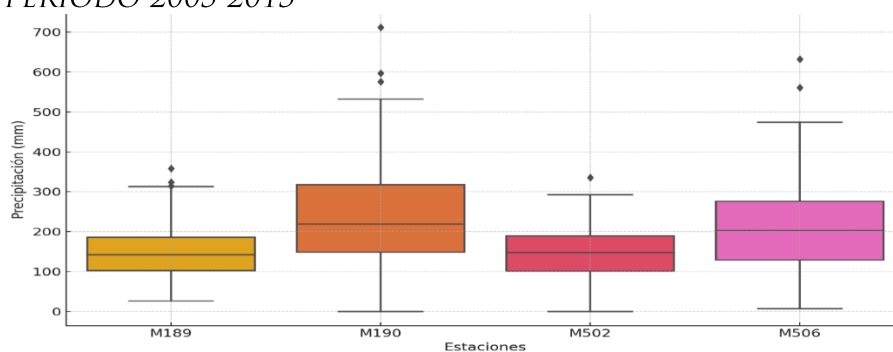
ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LOS PROMEDIOS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL MUESTRAN UN COEFICIENTE DE VARIABILIDAD ELEVADO A LO LARGO DE LA SERIE PARA LAS ESTACIONES. LA M190 LLEGA A LOS MÁS ELEVADOS PROMEDIOS MENSUALES, CON UN PROMEDIO DE 244,41MM Y LA MAYOR DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DE = 131,80 MM), LO QUE PODRÍA ASOCIARSE CON LOS ACONTECIMIENTOS PLUVIALES MÁS EXTREMOS. LAS ESTACIONES M189 Y M502 MUESTRAN LOS PROMEDIOS MÁS REDUCIDOS Y TAMBIÉN EL COEFICIENTE DE VARIABILIDAD, LO QUE PODRÍA ASOCIARSE CON UN RÉGIMEN MÁS MODERADO DE LLUVIAS. LA ESTACIÓN M506 ES LA QUE MUESTRA PROMEDIOS MÁS ELEVADOS ASOCIADOS A UNA ELEVADA DE, INDICANDO UNA IMPORTANTE IRREGULARIDAD DE LOS REGISTROS CLIMÁTICOS.

LOS DATOS DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS M189, M190, M502 Y M506 ENTRE LOS AÑOS 2003 Y 2013, SE RECOGEN MEDIANTE EL DIAGRAMA DE CAJAS (BOXPLOT)

DETALLADO EN LA FIGURA 11, QUE PERMITE OBSERVAR LA DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA, LA VARIABILIDAD Y LA EXISTENCIA DE VALORES EXTREMOS DE CADA UNA DE ELLAS:

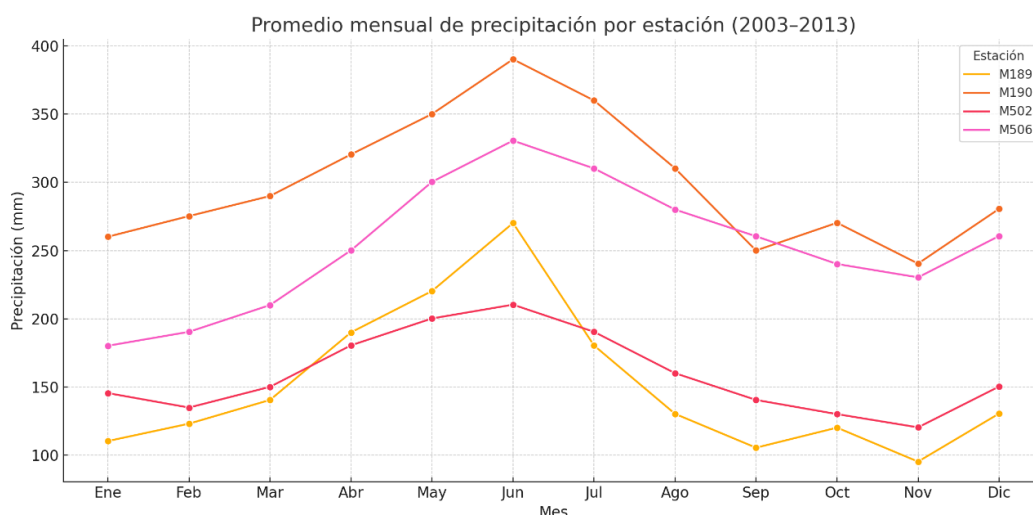
**FIGURA 11.** *PRECIPITACIÓN MENSUAL EN MM DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ZONA DE ESTUDIO, PERÍODO 2003-2013*



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

CON EL OBJETIVO DE VISUALIZAR LA VARIABILIDAD ESTACIONAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO, SE ELABORÓ UNA GRÁFICA DE LÍNEAS (FIGURA 11) QUE REPRESENTA EL PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS M189, M190, M502 Y M506 EN EL PERIODO 2003–2013, QUE PERMITE ASÍ REPRESENTAR CLARAMENTE LOS PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS A LO LARGO DEL AÑO PARA COMPLEMENTAR LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS REALIZADOS PREVIAMENTE Y FACILITAR ASÍ PODER INTERPRETAR DEL MODO MÁS ADECUADO POSIBLE EL COMPORTAMIENTO CLIMÁTICO QUE SE PUEDE CONSIDERAR CARACTERÍSTICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME.

**FIGURA 12.** *PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN POR ESTACIÓN, PERÍODO 2003-2013*



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LA FIGURA 12 DETALLA LA GRÁFICA DE LÍNEAS DEL PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA PARA LAS ESTACIONES M189, M190, M502 Y M506 DURANTE EL PERIODO 2003-2013 PONE DE MANIFIESTO UNA ESTACIONALIDAD BIEN MARCADA, CON DOSIS MEDIAS DE LLUVIA MÁS ALTAS EN LOS MESES DE ABRIL-JULIO (ESPECIALMENTE JUNIO, CUANDO SE ALCANZA EL MÁXIMO) Y DOSIS ACUMULADAS MEDIA MÁS BAJA (SEPTIEMBRE-NOVIEMBRE), DE FORMA QUE LA SERIE TEMPORAL DIBUJA UN RÉGIMEN CLIMÁTICO QUE PODEMOS ASOCIAR CON EL DE LAS ZONAS TROPICALES DE MONTAÑA. LAS ESTACIONES M190 Y M506 EXHIBEN LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN MÁS ELEVADOS YA QUE PROBABLEMENTE SE UBICAN EN ZONAS DE MAYOR EXPOSICIÓN OROGRÁFICA/PATENTE INFLUENCIA DE MASAS DE AIRE HÚMEDO.

EN CAMBIO, LAS ESTACIONES M189 Y M502, CON VALORES DE PRECIPITACIÓN MÁS INTERMEDIOS, DEFINIRÍAN UNA GEOGRAFÍA MENOS EXPUESTA. ÉSTA DISTRIBUCIÓN DE VALORES EVIDENCIARÍA LA EXISTENCIA DE UNA CONCRETA ESTACIÓN LLUVIOSA Y UNA SECA, A TENER EN CUENTA EN CUANTO A LA GESTIÓN HÍDRICA, LA PLANIFICACIÓN AGRÍCOLA Y LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME. POR ÚLTIMO, AL PRESENTAR UN PATRÓN DE DISTRIBUCIÓN COMO EL INDICADO, CABE ESPERAR QUE

EXISTAN INDICADORES DE UNA MAYOR DISPONIBILIDAD DE LLUVIA EN DETERMINADAS ESTACIONES DE LA MICROCUENCA.

A SU VEZ LA VARIABILIDAD INTERANUAL ES CONSIDERABLE CON NIVELES DE PRECIPITACIÓN, O CON FRECUENCIA SE DERIVAN DEL COMPORTAMIENTO DE FENÓMENOS CLIMÁTICOS DE EL NIÑO O DE LA NIÑA, QUE POSIBLEMENTE MODULAN LA INTENSIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS. LA ESTACIÓN M506 DA CUENTA, POR OTRA PARTE, DE LAS PRECIPITACIONES MÁS ALTAS EN VARIOS MESES, DE AHÍ QUE PLANTEA QUE TAL VEZ ESTÉ SITUADA EN UN ÁREA CON EXPOSICIONES MÁS INTENSAS DE LLUVIAS.

### 5.1.3 TEMPERATURA

EN LO QUE RESPECTA A LA TEMPERATURA DE LA CUENCA DEL RIO WAWAYME, SOLO SE PUDO OBTENER INFORMACIÓN DE DOS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS COMO SON YANZATZA Y GUALAQUIZA, CUYOS DATOS SE PRESENTAN EN LA TABLA 5 (LA SERIE COMPLETA DE TEMPERATURA MENSUAL PARA LAS ESTACIONES SE PRESENTA EN EL ANEXO 2):

**TABLA 5. RESUMEN ESTADÍSTICO DE TEMPERATURA MENSUAL EN °C**

ESTACIÓN	MEDIA (°C)	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
M189	23,09	20,9	25,5	0,97
M190	28,67	21,2	35,7	4,85

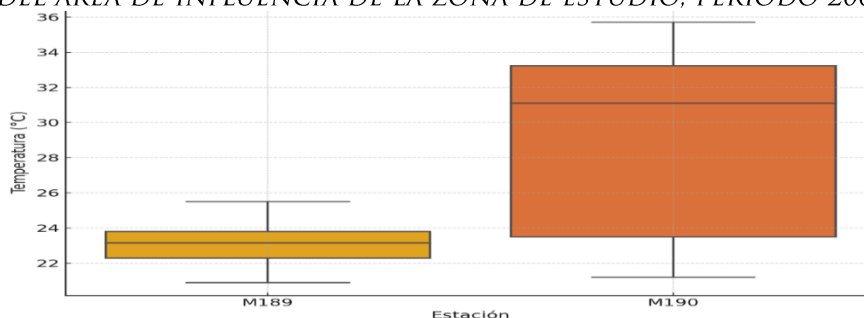
ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LA TABLA 5 DETALLA LOS VALORES MENSUALES DE TEMPERATURA DONDE SE MUESTRA LOS PROMEDIOS DE LAS TEMPERATURAS DE DOS ESTACIONES, M190 Y M189, Y LA TEMPERATURA MEDIA GENERAL PARA TODOS LOS MESES DURANTE EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE ENERO DE 2003 Y DICIEMBRE DE 2013. DE MANERA GENERAL, SE OBSERVA UNA TENDENCIA DE QUE LAS TEMPERATURAS SON LIGERAMENTE MÁS ELEVADAS EN LA ESTACIÓN M190 CON RESPECTO A

LA ESTACIÓN M189, AUNQUE PUEDE TAMBIÉN SER INDICATIVO DE LA POSICIÓN GEOGRÁFICA DE ESTAS.

A CONTINUACIÓN, EN LA FIGURA 12 SE MUESTRA LA VARIABILIDAD TÉRMICA DE LA MICROCUENCA EN ESTUDIO:

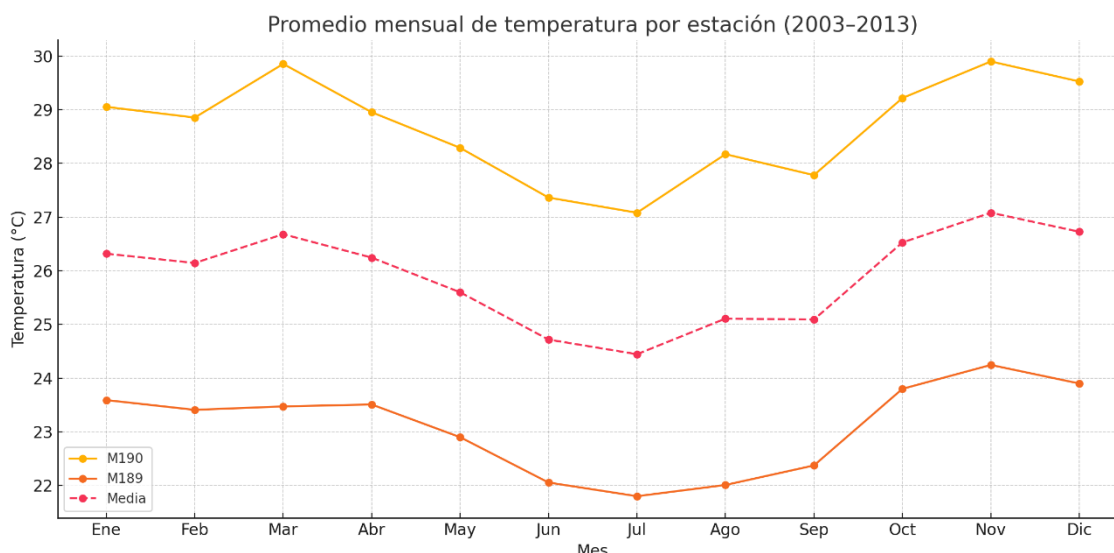
**FIGURA 13.** *TEMPERATURA MENSUAL EN °C DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ZONA DE ESTUDIO, PERÍODO 2003-2013*



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

A CONTINUACIÓN SE DETALLA LA FIGURA 14 DE LÍNEAS CON EL OBJETIVO DE PODER CARACTERIZAR LA VARIABILIDAD TÉRMICA DE LA MICROCUENCA, MOSTRANDO EL PROMEDIO MENSUAL DE TEMPERATURA DEL AIRE REGISTRADO EN LAS ESTACIONES M190 Y M189 DURANTE EL PERÍODO QUE ABARCA LOS AÑOS 2003 HASTA 2013, A LA QUE SE AÑADE LA SERIE DENOMINADA COMO "MEDIA", QUE REPRESENTA EL CÁLCULO DEL VALOR MEDIO SIMPLE DE LAS TEMPERATURAS AIRE ENTRE AMBAS ESTACIONES. ÉSTA REPRESENTACIÓN GRÁFICA ES UN BUEN COMPLEMENTO A LOS ANÁLISIS PLUVIOMÉTRICOS PREVIOS Y PERMITE OBSERVAR LOS PULSOS CÁLIDOS Y FRESCOS QUE CONFIGURAN EL RÉGIMEN TÉRMICO ANUAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.

**FIGURA 14.** *PROMEDIO MENSUAL DE TEMPERATURA POR ESTACIÓN, PERÍODO 2003-2013*



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LA FIGURA 14 MUESTRA EL PATRÓN TÉRMICO ESPECÍFICO DEL LUGAR ANALIZADO, DONDE SE PONE DE MANIFIESTO UNA CLARA VARIACIÓN ESTACIONAL; LOS MÁXIMOS TÉRMICOS SE ENCUENTRAN DESDE OCTUBRE-NOVIEMBRE, EN DONDE SE REGISTRAN LAS TEMPERATURAS MEDIAS SUPERIORES A 29 °C (E INCLUSO 34-35 °C EN M190), Y EL RANGO MÁS FRÍO VIENE DADO ENTRE LOS MESES DE JUNIO Y JULIO, DONDE LA MEDIA DE LA ESTACIÓN BAJA A 25-26 °C Y LA ESTACIÓN MÁS FRÍA, M189, SE SITÚA EN TEMPERATURAS MÍNIMAS CERCANAS A LOS 21 °C. LA OSCILACIÓN MENSUAL DE 6-8 °C PARECE INDICAR AMPLITUD TÉRMICA INTRA-ANUAL, PROPIO DE UN CLIMA TROPICAL DE MONTAÑA, SOMETIDO A LA ACCIÓN DE LA ALTURA Y LA DINÁMICA DE LA ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL.

LAS DIFERENCIAS ABSOLUTAS ENTRE ESTACIONES PARECEN INTERESANTES: M190 PRESENTA SISTEMÁTICAMENTE TEMPERATURAS ENTRE 9 Y 10 °C SUPERIORES A M189, LO QUE PARECE INDICAR UNA POSICIÓN EN COTAS MÁS BAJAS O EN ZONAS DE MENOR COBERTURA NUBOSA, MIENTRAS QUE M189 MUESTRA LA AMORTIGUACIÓN TÉRMICA PROPIA DE LA ALTURA EXTREMA. EN SÍNTESIS, EL RÉGIMEN TÉRMICO ANOTADO PICOS CÁLIDOS LAS PRIMERAS SEMANAS DEL ÚLTIMO TRIMESTRE Y MÍNIMOS EN PLENO INVIERNO AUSTRALIANO PARECE

PALIAR LOS REQUERIMIENTOS AGROCLIMÁTICOS EN FUNCIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS QUE TENGAN LUGAR EN LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME.

### 5.1.4 CAUDAL

CONJUNTAMENTE, EN LA TABLA 6 SE DETALLA EL ANÁLISIS DEL CAUDAL DE CUATRO ESTACIONES DEL ÁREA DE INFLUENCIA, (LA SERIE COMPLETA DE CAUDAL MENSUAL PARA LAS ESTACIONES SE PRESENTA EN EL ANEXO 3):

**TABLA 6. RESUMEN ESTADÍSTICO CAUDAL EN L/S**

ESTACIÓN	MEDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
H884	731,57	191,47	2031,84	325,74
H887	829,99	42,91	7265,58	1291,60
H889	134,12	16,80	802,27	164,66
H890	587,60	48,74	1717,34	364,87

ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

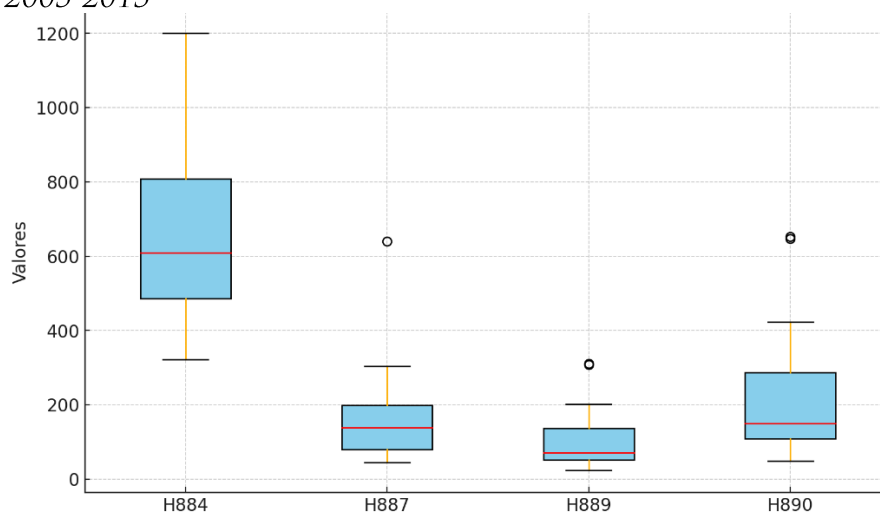
DE ACUERDO CON LA TABLA 6, EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS SERIES DE CAUDALES MENSUALES PROCEDENTES DE LAS ESTACIONES H884, H887, H889 Y H890 PONE CLARAMENTE DE MANIFIESTO LA EXISTENCIA DE VARIABILIDAD ESPACIAL ENTRE LAS SERIES DE CAUDALES MENSUALES ANALIZADAS. SE EVIDENCIA QUE LA ESTACIÓN H887 TIENE LA MEDIA MÁS ALTA, LO CUAL REVELA UN MAYOR APORTE HÍDRICO EN ESTA ZONA, DEBIDO A UNA MAYOR CAÍDA DE PRECIPITACIÓN EN EL PERIODO CONSIDERADO, O BIEN A LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS QUE FAVORECEN LA ESCORRENTÍA, ASÍ COMO TAMBIÉN EL HECHO DE QUE EN ESTA ESTACIÓN SE HA DADO UN COMPORTAMIENTO EXTREMO DE CAUDAL.

EN CONTRAPOSICIÓN, LA ESTACIÓN H889 ES LA QUE TIENE LA MEDIA MÁS BAJA, LO QUE EVIDENCIA UN RÉGIMEN MÁS ESTABLE Y TAMBIÉN DE MENOR VOLUMEN HÍDRICO. LAS ESTACIONES H884 Y H889 PARECEN MOSTRAR UN COMPORTAMIENTO INTERMEDIO; ASIMISMO, LA

ESTACIÓN H887 TIENE UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR CONSIDERABLEMENTE MÁS ELEVADA, LO CUAL EVIDENCIA UNA MAYOR DISPERSIÓN ENTRE LOS VALORES DE CAUDALES MENSUALES CALCULADOS.

A CONTINUACIÓN, SE DETALLAN LOS CAUDALES MENSUALES EN L/S (FIGURA 15):

**FIGURA 15.** CAUDALES MENSUALES EN MM/S DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ZONA DE ESTUDIO, PERÍODO 2003-2013



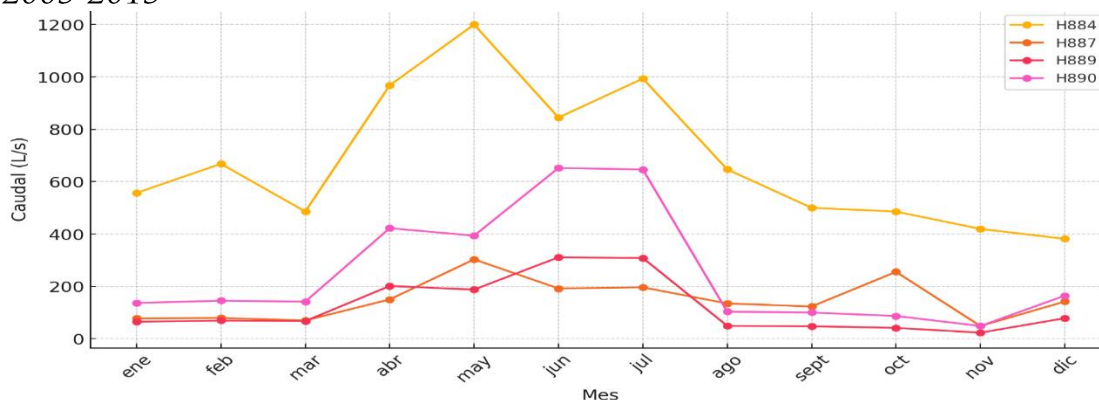
ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

DE ACUERDO CON LA FIGURA 15 SE EVIDENCIA LA VISUALIZACIÓN GRÁFICA DE LA DISPERSIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES MENSUALES PARA LAS CUATRO ESTACIONES, DONDE SE DESTACA QUE LA ESTACIÓN H884, TIENE UNA CAJA MUY GRANDE Y LOS BIGOTES SON LARGOS, DE TAL MANERA QUE ESTO REFLEJA UNA ALTA VARIABILIDAD EN EL CAUDAL Y, POR TANTO, UNA GRAN CANTIDAD DE VALORES ATÍPICOS QUE PUEDEN RELACIONARSE CON CRECIDAS PUNTUALES O EPISODIOS CLIMÁTICOS EXTREMOS. POR OTRO LADO, LA ESTACIÓN H889 TIENE UNA CAJA DE TAMAÑO MENOR Y SITUADA MUY CERCA DEL EJE INFERIOR POR LO QUE TAMBIÉN INDICA MUY BAJOS CAUDALES, ASÍ COMO BAJA VARIABILIDAD, TÍPICA DE UN CAUCE CON ESCASA O

CONSTANTE ALIMENTACIÓN. LAS ESTACIONES H887 Y H890 OCUPAN POSICIONES INTERMEDIAS.

A CONTINUACIÓN, LA FIGURA 16 EXPONE EL COMPORTAMIENTO PROMEDIO MENSUAL DEL CAUDAL, EN LITROS POR SEGUNDO (L/S) A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS EN CUATRO ESTACIONES DE CONTROL DE CAUDALES (H884, H887, H889 Y H890) EN EL PERIODO 2003 A 2013, DE FORMA DE OBSERVAR PATRONES ESTACIONALES Y PODER COMPARAR LA DISPONIBILIDAD DE ESTE RECURSO A LO LARGO DEL AÑO ENTRE LAS DISTINTAS ESTACIONES DE CONTROL DE CAUDALES SITUADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO. LOS DATOS ANALIZADOS PROVIENEN DEL REGISTRO HISTÓRICO MENSUAL DE CAUDALES QUE PERMITE OBSERVAR TENDENCIAS Y LAS POSIBLES ÉPOCAS DE MAYOR O MENOR DISPONIBILIDAD.

**FIGURA 16.** PROMEDIO MENSUAL DE CAUDAL POR ESTACIÓN, PERÍODO 2003-2013



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

EL ANÁLISIS DE LA FIGURA 16 DETERMINA QUE LA ESTACIÓN H884 PROPORCIONA UNOS VALORES QUE SON SIGNIFICATIVAMENTE MÁS ELEVADOS DE CAUDAL EN COMPARACIÓN CON LAS OTRAS ESTACIONES, SOBRE TODO DURANTE LA ÉPOCA COMPRENDIDA ENTRE LOS MESES DE ABRIL A JULIO, LO CUAL PODRÍA EXPLICARSE CON LA MAYOR

INFLUENCIA DE LAS PRECIPITACIONES O A LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS PROPIAS DE LA ESTACIÓN. EN CONTRAPUNTO, LA ESTACIÓN H889 PROPORCIONA LOS CAUDALES MÁS BAJOS DURANTE TODO EL AÑO LO CUAL PODRÍA CORRESPONDER CON LA MENOR CAPTACIÓN DE ESCORRENTÍA O BIEN A UNAS CONDICIONES DE DRENAJE MÁS LIMITADAS, PERO TAMBIÉN CON UNA GRAN ESTACIONALIDAD EN CASI TODAS LAS ESTACIONES DONDE SE DA UN AUMENTO DEL CAUDAL ENTRE ABRIL A JULIO QUE PODRÍA CORRESPONDER CON LA ÉPOCA DE LLUVIAS. ESTE TIPO DE RESULTADOS SON IMPORTANTES A LA HORA DE COMPRENDER EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DEL SISTEMA Y A LA HORA DE PLANIFICAR EL USO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA REGIÓN.

### 5.1.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN (ETP)

CONJUNTAMENTE, LUEGO DE OBTENER ESTOS DATOS SE DETERMINÓ LA EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIANTE UNA HOJA DE CÁLCULO EN EXCEL BASADO EN HARGREAVES, CUYOS RESULTADOS SE EXPRESARON EN MM MENSUALES, YA QUE EL MODELO HIDROLÓGICO GR2M, REQUIERE LA INFORMACIÓN EN ESTA MEDIDA (LA SERIE COMPLETA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL PARA LAS ESTACIONES SE PRESENTA EN EL ANEXO 4).

**TABLA 7. RESUMEN ESTADÍSTICO ETP EN MM**

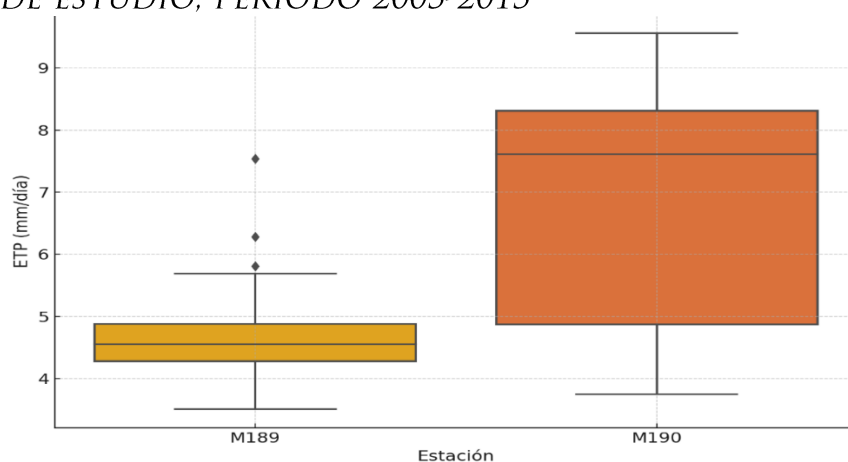
ESTACIÓN	MEDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
M189	4,59	3,51	7,54	0,54
M190	6,82	3,75	9,56	1,80

ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

AL ANALIZAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP), EN LA ESTACIÓN M189 SE APRECIA UN VALOR MEDIO DE 87,65 MM, MIENTRAS QUE EN LA ETP DE LA M190 SE ABRIGA UN VALOR PROMEDIO DE 86,51 MM, QUE SEÑALA QUE LA DEMANDA ATMOSFÉRICA DE AGUA ES LIGERA PERO SUPERIOR PARA M189. LOS VALORES EXTREMOS DE ETP SON LOS

MÍNIMOS DE M189 DE 70,9 MM Y MÁXIMOS DE 111,6 MM, MIENTRAS QUE EN M190 LOS EXTREMOS SON LOS MÍNIMOS DE 68,7 MM Y MÁXIMOS DE 109,9 MM, INDICANDO LA SIMILITUD EN LA VARIABILIDAD MENSUAL DE AMBAS ESTACIONES. FINALMENTE, LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR SON DE 10,53 MM PARA M189 Y DE 10,52 MM PARA M190, INDICANDO POCA DISPERSIÓN DE LOS DATOS Y, POR LO TANTO, UNA ETP RELATIVAMENTE ESTABLE DURANTE EL PERIODO ANALIZADO.

**FIGURA 17.** *EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL EN MM DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ZONA DE ESTUDIO, PERÍODO 2003-2013*

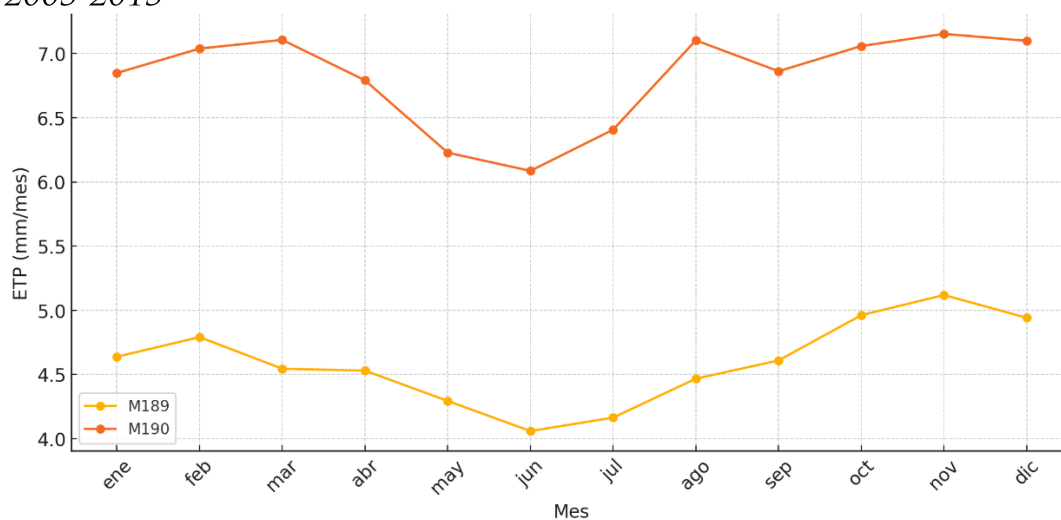


ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LA TABLA 7 INDICA UNA CLARA ESTACIONALIDAD RELATIVA A LOS VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN, CON PICOS EN PRIMAVERA Y VERANO Y CON VALORES BAJOS EN LOS MESES INVERNALES. LAS ESTACIONES GUARDAN UN COMPORTAMIENTO SIMILAR, M190 TIENE UNOS VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN LIGERAMENTE ALTOS EN COMPARACIÓN CON M189. LA MEDIA MENSUAL ES INDICATIVA DE QUE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ES MÁS ELEVADA, PRECISAMENTE, EN LAS CIRCUNSTANCIAS CLIMÁTICAS QUE IMPLICAN UNA MAYOR EVAPORACIÓN, ES DECIR, LOS MESES MÁS CÁLIDOS DEL AÑO, MIENTRAS QUE BAJA CUANDO LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS SON FRÍAS Y SECAS. RESPECTO A LA VARIABILIDAD INTERANUAL, ESTA NO ES EXCESIVA E INDICA UNA RELATIVA ESTABILIDAD CLIMÁTICA EN LA ZONA.

EN LA FIGURA 18, SE CONTEMPLA EL PROMEDIO MENSUAL DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP) DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS M189 Y M190, ABARCANDO PARA DICHO ESTUDIO EL PERÍODO 2003 - 2013. EL PROMEDIO MENSUAL ESTÁ EXPRESADO EN MM POR MES Y SE HA CUANTIFICADO A PARTIR DE LOS DATOS HISTÓRICOS EN LA TABLA 12, CONSIDERANDO LA INFORMACIÓN AGREGADA POR MES Y PROMEDIANDO DURANTE LOS ONCE AÑOS DE ESTUDIO. ÉSTA FIGURA GRÁFICA, PERMITE COMPARAR LA DEMANDA ATMOSFÉRICA DE AGUA, QUE SE ENTIENDE COMO LA CANTIDAD DE AGUA QUE SE EVAPOTRANSFIERE DE LA INTERFAZ SUELO-ATMÓSFERA AL MEDIO ATMOSFÉRICO BAJO LA FORMA DE EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN, ENTRE LAS ESTACIONES M189 Y M190. TAMBIÉN ES POSIBLE APRECIAR, DE ESTE MODO, EL COMPORTAMIENTO Y LOS MESES DE MAYOR PRESIÓN EVAPORATIVA EN LA ZONA DE ESTUDIO.

**FIGURA 18.** PROMEDIO MENSUAL DE ETP POR ESTACIÓN, PERÍODO 2003-2013



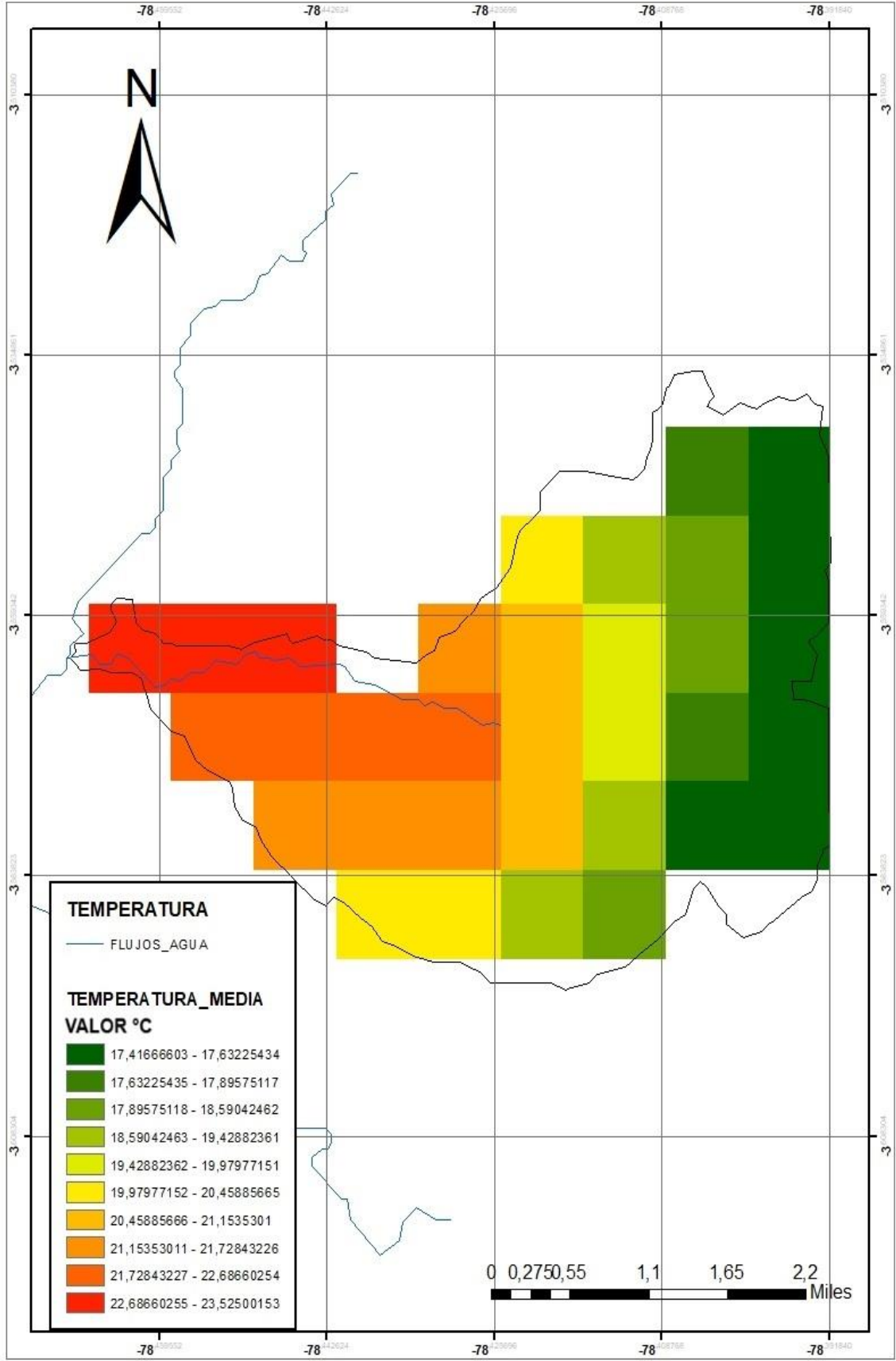
ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LOS DATOS DE LA FIGURA 18 EVIDENCIAN QUE M190 PRESENTA SISTEMÁTICAMENTE, A LO LARGO DE TODO EL AÑO, VALORES DE ETP MÁS ALTOS QUE M189, INCLUSO PICOS DE APROXIMADAMENTE 7 MM/MES EN MARZO, ASÍ COMO AGOSTO Y OCTUBRE. TODO ELLO INDICARÍA QUE M190 SE DESARROLLA EN UN MEDIO CON MAYOR

RADIACIÓN SOLAR, MENOS CUBIERTAS NUBOSAS O MAYOR VENTILACIÓN, FACTORES DETERMINANTES DE LA CAPACIDAD DE LA ATMÓSFERA PARA EXTRAER AGUA DEL MEDIO SUELO-VEGETACIÓN. LOS VALORES CORRESPONDIENTES A M189 SE ENCUENTRAN ENTRE 4,0 Y 5,1 MM/MES, SIENDO ESTE ÚLTIMO EL QUE CORRESPONDE A JUNIO-JULIO Y AQUEL EL QUE SE ENCUENTRA EN NOVIEMBRE; LA ESTACIONALIDAD ES MUY CLARA: M189 Y M190 MANIFIESTAN EL MÍNIMO DE ETP AL INICIO DE LA ESTACIÓN HÚMEDA (JUNIO-JULIO) EN TANTO QUE, YA AL FINAL DEL AÑO, LA ETP COMIENZA A AUMENTAR EN COINCIDENCIA CON EL AUMENTO DE LA ARIDEZ Y EL INCREMENTO DE LAS TEMPERATURAS. ÉSTAS DIFERENCIAS ESPACIALES Y TEMPORALES DE LA ETP SON SIGNIFICATIVAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO Y DISEÑO DE LAS ESTRATEGIAS DE RIEGO, PUESTO QUE INDICAN EL AGUA QUE LAS PLANTAS DEBEN COMPENSAR PARA OBTENER UN CRECIMIENTO ÓPTIMO.

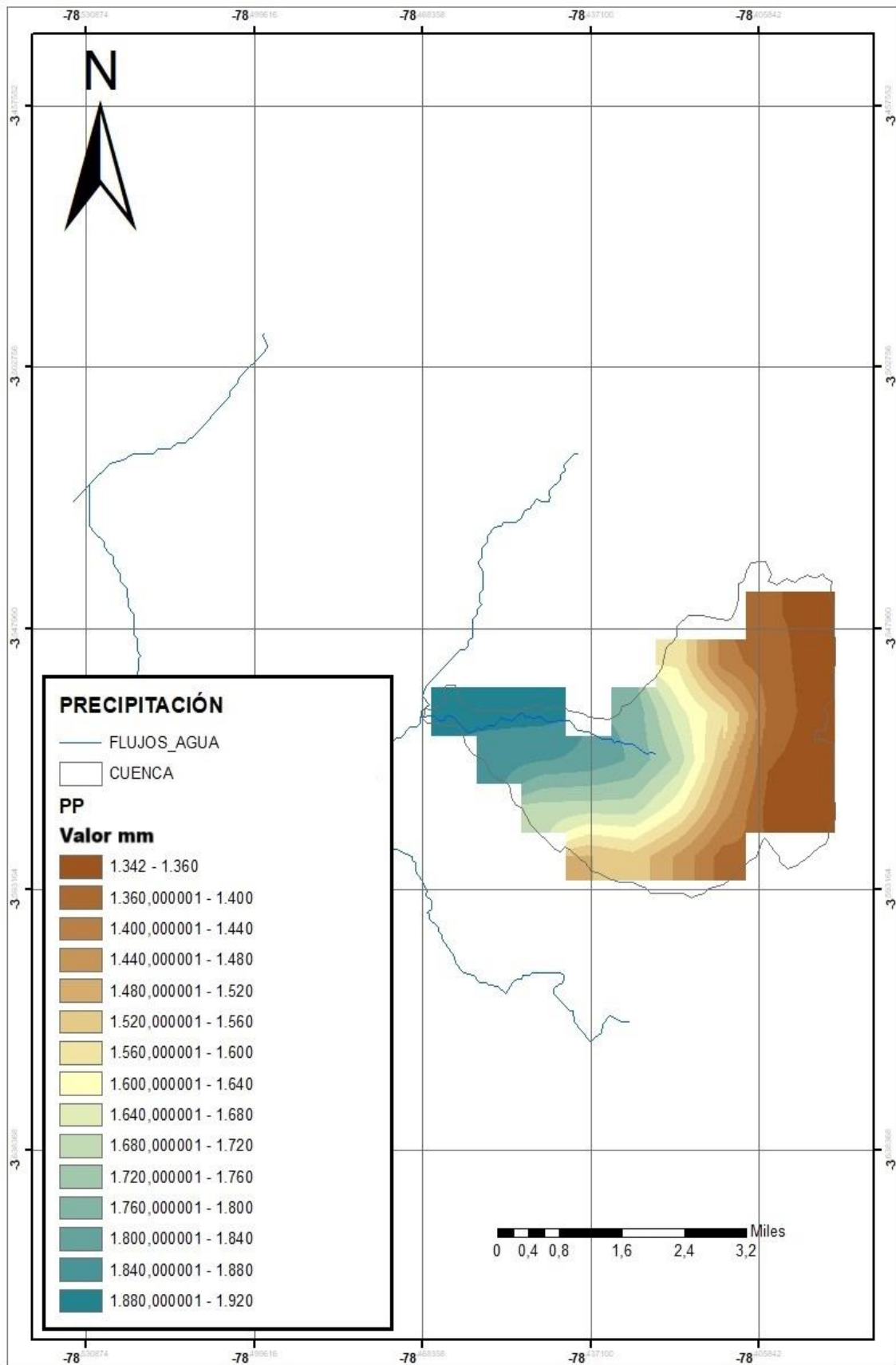
ASIMISMO, LAS FIGURAS 19 Y 20 MUESTRAN, RESPECTIVAMENTE, LA TEMPERATURA Y LA PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO WAWAYME. ES IMPORTANTE SEÑALAR QUE EL TAMAÑO DEL PÍXEL QUE SE OBSERVA EN LOS MAPAS SE DEBE A LA RESOLUCIÓN DE LAS CAPAS DE DATOS OBTENIDAS DE WORLDCLIMATE, QUE ES DE ~1 KM (30 ARC-SECONDS); ESTA ES LA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LA QUE SE DISPONE Y FUE LA QUE SE TOMÓ COMO BASE EN EL PROCESAMIENTO QUE POSTERIORMENTE SE HA HECHO DE IMÁGENES CON LA FINALIDAD DE QUE SE MANTENGA LA INTEGRIDAD DE LOS DATOS CLIMÁTICOS ORIGINALES. NO OBSTANTE, PARA UNA FUTURA REPRESENTACIÓN SE SUGIERE LA OPCIÓN DE APLICAR UN REMUESTREO MÁS FINO O UNA INTERPOLACIÓN MÁS DETALLADA CON LA FINALIDAD DE MEJORAR LA PRECISIÓN VISUAL A ESCALA SUBCUENCA:

FIGURA 19. MAPA DE TEMPERATURA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO WAWAYME.



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

FIGURA 20. MAPA DE PRECIPITACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO WAWAYME.



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

## 5.2. MODELAMIENTO CON GR2M

LOS DATOS UTILIZADOS COMO ENTRADAS PARA EL MODELO HIDROLÓGICO GR2M TUVIERON UNA FRECUENCIA MENSUAL Y FUERON TRES VARIABLES DIFERENTES ENTRE SÍ: PRECIPITACIÓN (MM), EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (MM) Y CAUDAL OBSERVADO (L/S). EL INTERVALO TEMPORAL ESTUDIADO DURÓ ONCE AÑOS (DESDE ENERO DE 2003 A DICIEMBRE DE 2013) QUE SE SEPARA EN MOMENTOS DIFERENTES: LA FASE DE CALIBRACIÓN (2003–2010) Y LA FASE DE VALIDACIÓN (2010–2013). PARA EVITAR EFECTOS NO REPRESENTATIVOS DERIVADOS DEL ESTADO INICIAL DEL MODELO, SE SUMÓ UN AÑO DE CALENTAMIENTO (WARM-UP) PARA CADA FASE DE ESTUDIO SIGUIENDO LAS RECOMENDACIONES METODOLÓGICAS DEL PAQUETE AIRGR.

LA SERIE DE CAUDALES MENSUALES NO FUE OBTENIDA A PARTIR DE UNA ÚNICA ESTACIÓN HIDROLÓGICA SINO QUE FUE GENERADA A PARTIR DEL PROMEDIO MENSUAL PONDERADO DE CUATRO ESTACIONES; H884, H887, H889 Y H890. AUNQUE TODAS ELLAS ESTÁN UBICADAS EN CUENCAS MÁS AMPLIAS Y ALEJADAS, ESTAS ESTACIONES, TIENEN SIMILITUDES FISIGRÁFICAS Y CLIMÁTICAS CON LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME. LAS SERIES DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES MENCIONADAS SE AJUSTARON UTILIZANDO EL MÉTODO DE TRANSFERENCIA DE CUENCAS POR RELACIÓN DE ÁREAS, TRANSFORMADOS DE L/S A MM/MES MEDIANTE LA EXPRESIÓN:

$$Q_{mm/mes} = \frac{Q_{l/s} * 86400 * D}{A * 10^6}$$

DONDE D ES EL NÚMERO DE DÍAS DEL MES Y A = ÁREA DE LA CUENCA, ESTA CONVERSIÓN PERMITIÓ UNIFICAR EL CAUDAL CON LAS OTRAS VARIABLES CLIMÁTICAS, FACILITANDO SU INTEGRACIÓN AL MODELO. MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO KGE2 FUE POSIBLE AJUSTAR EL MODELO, EL CUAL, A LA VEZ, PERMITE COMPARAR DE MANERA SIMULTÁNEA LA CORRELACIÓN, LA DESVIACIÓN TÍPICA Y

EL SESGO ENTRE LOS FLUJOS OBSERVADOS Y SIMULADOS. PARA LA CALIBRACIÓN SE PUDIERON OBTENER 871,31 MM Y 0,413 PARA LOS PARÁMETROS X1 Y X2, QUE CORRESPONDEN A LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DEL SUELO Y EL COEFICIENTE DE INTERCAMBIO SUBTERRÁNEO, RESPECTIVAMENTE, SIENDO ESTOS APLICADOS SIN NINGÚN TIPO DE ALTERACIÓN DURANTE LA VALIDACIÓN COMO PARTE DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN DE LA ROBUSTEZ DEL MODELO. LA TABLA 8 HACE REFERENCIA AL DESEMPEÑO COMPLETO DEL MODELO DURANTE AMBAS FASES, DONDE SE ESTABLECE QUE EL MODELO TUVO UN AJUSTE MODERADO EN CALIBRACIÓN ( $NSE = 0,175$ ), TAMBIÉN TENIENDO UN BUEN AJUSTE PARA CAUDALES BAJOS DESDE LA CALIBRACIÓN ( $NSE-LOG = 0,51$ ), EN COMPARACIÓN CON LA VALIDACIÓN EN DONDE LA EFICIENCIA BAJA ABRUPTAMENTE ( $NSE = -3,029$ ), ES DECIR, QUE EL MODELO TIENE UNA BAJA CAPACIDAD DE PREDICCIÓN EN SITUACIÓN DE INDEPENDENCIA.

EN LA TABLA 8, SE RESUME EL DESEMPEÑO DEL MODELO GR2M:

**TABLA 8. DESEMPEÑO DEL MODELO GR2M**

FASE	NSE	KGE	RMSE (MM)	PBIAS (%)	NSE- LOG	CORRIDAS
CALIBRACIÓN	0.175	0.283	34.8	-2.6	0.510	68
VALIDACIÓN	-3.03	-0.159	23.9	26.8	-0.240	—

ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

EN RELACIÓN CON LOS CAUDALES BAJOS, EL MODELO MOSTRÓ UN COMPORTAMIENTO ACEPTABLE EN LA CALIBRACIÓN Y MALO EN LA VALIDACIÓN, TENIENDO EN CUENTA QUE PARA LA FASE DE PRUEBA FUE EL QUE MÁS LO SUBESTIMÓ, EN UN 31,7 %.

CON EL OBJETIVO ESPECÍFICO DE EVALUAR EL COMPORTAMIENTO QUE PRESENTA EL MODELO LA SIMULACIÓN DE CAUDALES BAJOS, POR AQUELLOS CAUDALES SITUADOS EN NIVELES SUPERIORES DE ESTO, EL PERCENTIL DE NO SUPERACIÓN 95 % (Q95), SE HA LLEVADO A CABO EL CÁLCULO DE UN INDICADOR, CONSIDERADO CLAVE DEL COMPORTAMIENTO DEL MODELO, COMO ES QUÉ CAUDAL PRESENTA

PARA EL CAUDAL BAJO (PBIAS BAJO) Y LA RELACIÓN ENTRE CAUDALES SIMULADOS Y OBSERVADOS BAJO Q95 (Q95 SIM / Q95 OBS). ESTO PERMITE DETERMINAR EN QUÉ MEDIDA EL MODELO SUBESTIMA O SOBRESTIMA EL FLUJO BASE, QUE ES UN ASPECTO MUY IMPORTANTE A LAS CÓMPUTOS DE CAUDALES PARA PODER GESTIONAR LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS QUE PRESENTAN UNA ALTA REGULACIÓN NATURAL O QUE TIENEN UN INTERÉS ECOLÓGICO. LA TABLA 9 SINTETIZA ESTOS RESULTADOS PARA LAS FASES DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO GR2M.

**TABLA 9. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO EN CAUDALES BAJOS ( $Q > Q95$ )**

<i>FASE</i>	<i>PBIAS BAJO (%)</i>	<i>Q95 SIM / Q95 OBS</i>
<i>CALIBRACIÓN</i>	<i>-5.4</i>	<i>1.02</i>
<i>VALIDACIÓN</i>	<i>31.7</i>	<i>0.76</i>

ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

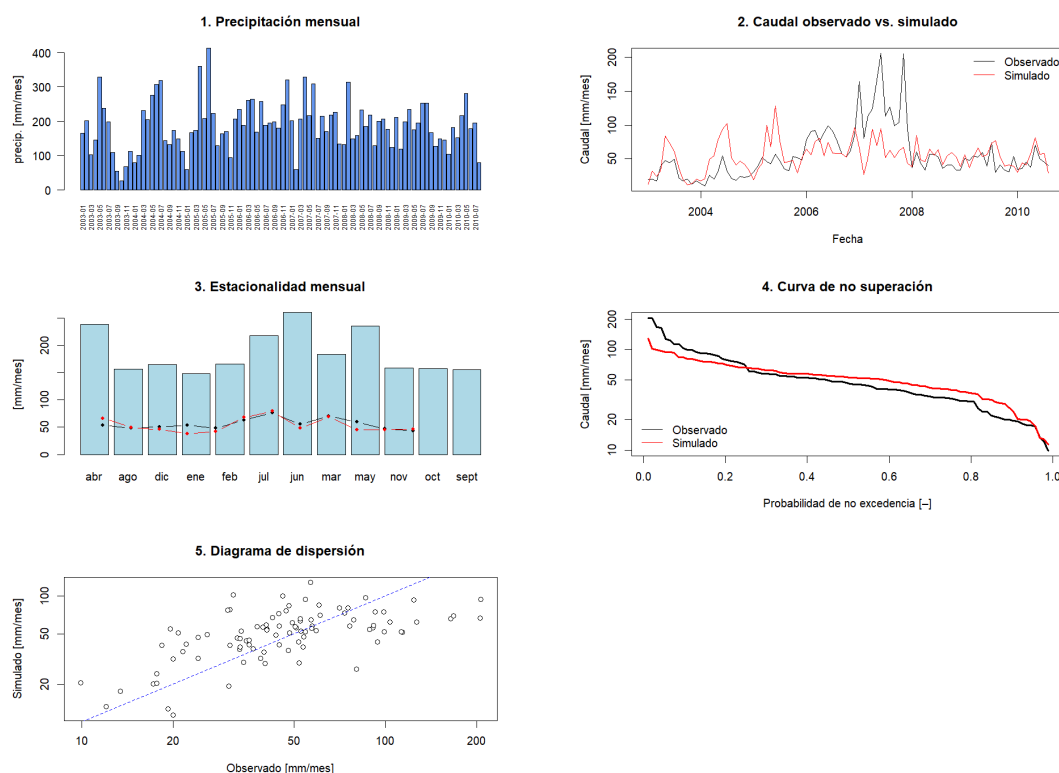
LOS RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN CONSTATAN QUE EL MODELO OFRECE UNA REPRESENTACIÓN SATISFACTORIA DE LOS BAJOS CAUDALES, OBSERVÁNDOSE UN LEVE SESGO NEGATIVO MODERADO DE -5,4% QUE INDICA UNA PEQUEÑA SOBREESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA DE LOS CAUDALES BASE, COMPLEMENTADO POR UNA RAZÓN Q95 SIM / Q95 OBS CERCANA A UNO (1,02), LO QUE CONFIRMA UNA BUENA REPRESENTACIÓN DEL QUE SE OBSERVA A CAUDALES BAJOS. DURANTE LA VALIDACIÓN, SIN EMBARGO, SE SEÑALA UNA PÉRDIDA IMPORTANTE DE EFICIENCIA, YA QUE PRESENTA IMPORTANTES INFRAVALORACIONES DEL -31,7 %, Y LA RAZÓN DE Q95 SIMULADO/OBSERVADO DESCENDE A 0,76. ESTA PÉRDIDA EN EL AJUSTE EN LA VALIDACIÓN SUGIERE QUE, SI BIEN EL MODELO ESTÁ CALIBRADO PARA REPRESENTAR ADECUADAMENTE EL COMPORTAMIENTO DE BAJO CAUDAL, TAMBIÉN SU LIMITACIÓN PREDICTIVA EN CONDICIONES NO CALIBRADAS SE VE REFLEJADA EN EL POSIBLE CAMBIO EN LAS CONDICIONES DEL USO DEL SUELO, LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA, O LA ESCASEZ DE INFORMACIÓN FIABLE PARA LOS EVENTOS DE BAJA MAGNITUD.

LOS RESULTADOS OBTENIDOS OFRECEN LA POSIBILIDAD DE ASEGURAR QUE EL MODELO DE LA GR2M ES CAPAZ DE CAPTAR EL COMPORTAMIENTO BASE DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA CON UNA RAZONABLE PRECISIÓN Y AFINAMIENTO, LA CUAL VIENE DETERMINADA POR SU COBERTURA VEGETAL Y SUS CARACTERÍSTICAS DE SUELO, A DIFERENCIA DEL MODELO GR4J QUE, AUNQUE TAMBIÉN ES CAPAZ DE SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE LA CUENCA, NO HA MOSTRADO TAN BUENOS RESULTADOS EN SU VALIDACIÓN. EN EL CASO DE LA MODELACIÓN GR2M, LOS RESULTADOS SUGIEREN QUE EL MODELO UTILIZADO NO ES CAPAZ DE CAPTAR SITUACIONES DE EVENTOS EXTREMOS, POSIBLEMENTE COMO CONSECUENCIA DE LA INTERVENCIÓN HUMANA (MINERÍA, URBANISMO, ETC.) Y POR EL PROPIO CARÁCTER DE ESCASA CALIDAD DE LOS DATOS DE ENTRADA. LA MODELACIÓN DE TOMAR EL DETALLE DE REALIZAR LA MODELACIÓN EN SEGMENTOS DE ÉPOCAS CLIMÁTICAS (USO DE SUELO) PODRÍA MEJORAR EL AJUSTE DEL MODELO EN AQUELLOS CASOS EN QUE, DEBIDO A LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DE ENTRADA, BIEN LA SERIE HISTÓRICA NO INCLUYA ESTAS CONDICIONES O BIEN COINCIDAN CON EL MARCO TEMPERADO Y CON MENOR USO ANTRÓPICO DE LA ZONA HIDRÁULICA.

A CONTINUACIÓN, LA FIGURA 21 MUESTRA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO GR2M CON DATOS OBSERVADOS CORRESPONDIENTES AL PERIODO 2003-2009, DE MODO QUE SIRVE PARA AJUSTAR LOS PARÁMETROS DEL MODELO PARA QUE ESTE SEA LO MÁS REPRESENTATIVO POSIBLE DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA. PARA LA CALIBRACIÓN SE USARON CINCO REPRESENTACIONES GRÁFICAS: (1) LA DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL, (2) LA COMPARACIÓN ENTRE EL CAUDAL OBSERVADO Y SIMULADO, (3) LA ESTACIONALIDAD HIDROLÓGICA MENSUAL, (4) LA CURVA DE NO SUPERACIÓN Y (5) EL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN. ESTAS HERRAMIENTAS PERMITEN EVALUAR VISIBLEMENTE

LA CAPACIDAD DEL MODELO PARA PODER REPRODUCIR LA DINÁMICA DEL CAUDAL EN DIFERENTES CONDICIONES HIDROLÓGICAS Y CON DIFERENTES CONDICIONES ESTACIONALES.

**FIGURA 21.** CALIBRACIÓN DEL MODELO GR2M PARA EL RÍO WAWAYME CON VALORES DE PRECIPITACIÓN, CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS.



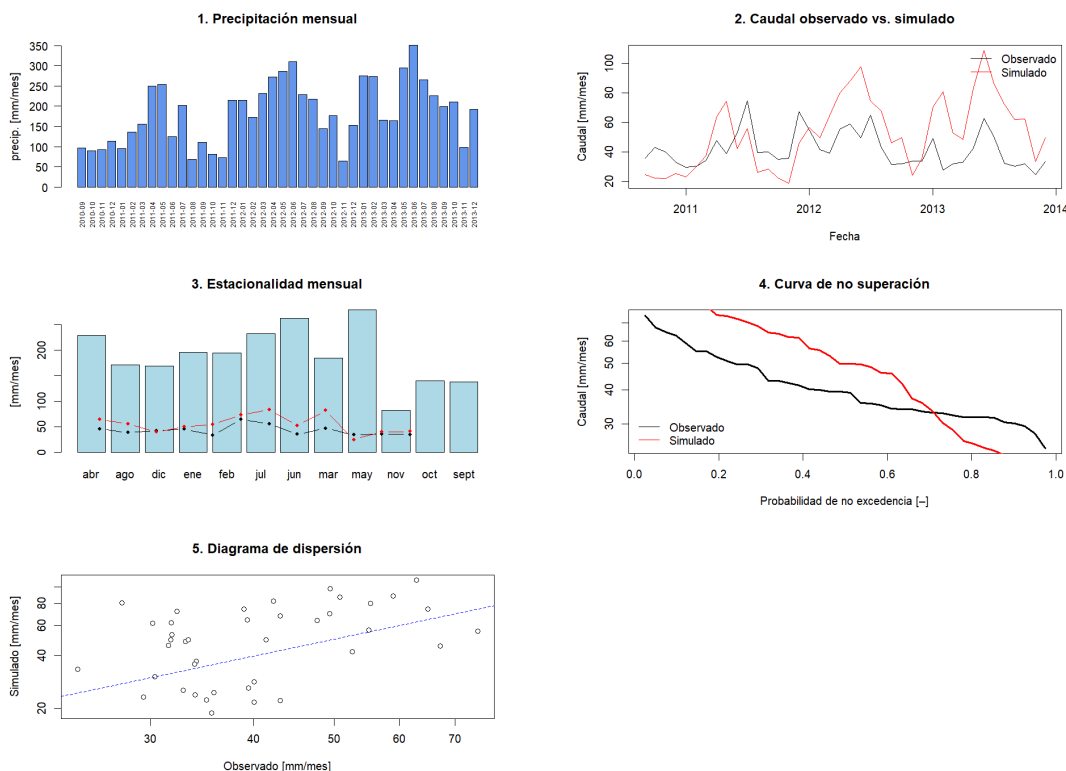
ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

COMO SE EVIDENCIA EN LA FIGURA 21, AL MOMENTO DE LA CALIBRACIÓN SE APRECIÓ QUE LA SIMULACIÓN MOSTRABA UNA SUBESTIMACIÓN CONSTANTE DEL CAUDAL, ESPECIALMENTE EN LAS CORRESPONDIENTES A LAS DE ALTO CAUDAL, EN CONSONANCIA CON LA GRÁFICA NÚMERO 2. POR OTRO LADO, LA ESTACIONALIDAD SE MUESTRA EN LÍNEAS GENERALES COMO ACEPTABLE EN MESES DE MÁS PRECIPITACIÓN, NO OBSTANTE, EL MODELO TIENDE A SUAVIZAR LOS PICOS EN EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO. LA CURVA DE NO SUPERACIÓN (GRÁFICA NÚMERO 4) DEMUESTRA TAMBIÉN QUE EL

MODELO NO ES CAPAZ DE REPRODUCIR LOS FENÓMENOS EXTRAORDINARIOS, ES DECIR LA SUBESTIMACIÓN DE LAS FRECUENCIAS ALTAS. POR ÚLTIMO, EL DIAGRAMA 5 ENTRE CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS DA CUENTA DE QUE ESTOS NO TIENEN UNA CORRELACIÓN ALTA, TAL VEZ UN REFLEJO DE LA ESCASA CAPACIDAD DEL MODELO PARA CAPTAR LA VARIABILIDAD INTERMENSUAL DE LA ESCORRENTÍA, LO CUAL SUGIERE LA NECESIDAD DE UN AJUSTE DE PARÁMETROS O LA APLICACIÓN DE MODELOS MÁS COMPLEJOS PARA LA CUENCA, LO QUE RETROALIMENTA, A SU VEZ, EL MODELO INICIAL.

LA VALIDACIÓN DEL MODELO GR2M SE LLEVÓ A CABO PARA EL PERIODO 2010-2013 HACIENDO USO DE LOS PARÁMETROS QUE HABÍA OBTENIDO EN LA ETAPA DE CALIBRACIÓN. ESTE PROCEDIMIENTO PERMITE DETERMINAR LA CAPACIDAD PREDICTIVA DEL MODELO CON DATOS INDEPENDIENTES, Y DE ESTA FORMA, EXAMINAR LA ROBUSTEZ DE LOS PARÁMETROS AJUSTADOS Y LA CAPACIDAD DEL MODELO PARA SIMULAR LAS MISMAS CONDICIONES HIDROLÓGICAS QUE ÉSTAS SE USARON EN LA CALIBRACIÓN. SE UTILIZARON DE NUEVO CINCO TIPOS DE GRÁFICAS PARA ANALIZAR LOS RESULTADOS Y COMPROBAR EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO SIMULADO Y EL QUE SE OBTUVO CON LAS OBSERVACIONES, COMO SE EVIDENCIA EN LA FIGURA 22:

**FIGURA 22.** *VALIDACIÓN DEL MODELO GR2M PARA EL RÍO WAWAYME CON VALORES DE PRECIPITACIÓN, CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS.*



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LOS RESULTADOS DE VALIDACIÓN REFLEJAN UNA MEJORA RELATIVA RESPECTO A LA REPRESENTACIÓN DE LOS CAUDALES OBSERVADOS EN LO QUE FUE LA FASE DE CALIBRACIÓN, AUNQUE EXISTE UN ATENUAMIENTO CONTINUADO EN LOS VALORES MÁXIMOS. LA GRÁFICA DE CAUDAL OBSERVADO VS. SIMULADO MUESTRA UNA MEJOR COINCIDENCIA RESPECTO A LA FASE DE CALIBRACIÓN EN LO QUE SON LOS PATRONES ESTACIONALES Y, ESPECIALMENTE, EN LOS MESES DE ESTIAJE. LA ESTACIONALIDAD MENSUAL (GRÁFICA 3) PONE DE MANIFIESTO QUE EL MODELO ES CAPAZ DE REPRODUCIR CORRECTAMENTE LA FORMA GENERAL DEL CICLO HIDROLÓGICO ANUAL, AUNQUE SIN ALCANZAR LOS VALORES ESTIMADOS. EN CUANTO A LA CURVA DE NO SUPERACIÓN, REFLEJA NUEVAMENTE UN ATENUAMIENTO EN LA REPRODUCCIÓN DE EVENTOS FRECUENTES; PERO EL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN APUNTA A UNA DISPERSIÓN CONSIDERABLE CON MEJOR ALINEACIÓN EN LO QUE ES LA LÍNEA DE TENDENCIA, LO QUE SUGIERE QUE EL MODELO TIENE UNA CAPACIDAD

ACEPTABLE PARA REPRODUCIR LOS PATRONES MEDIOS DEL ESCURRIMIENTO MENSUAL.

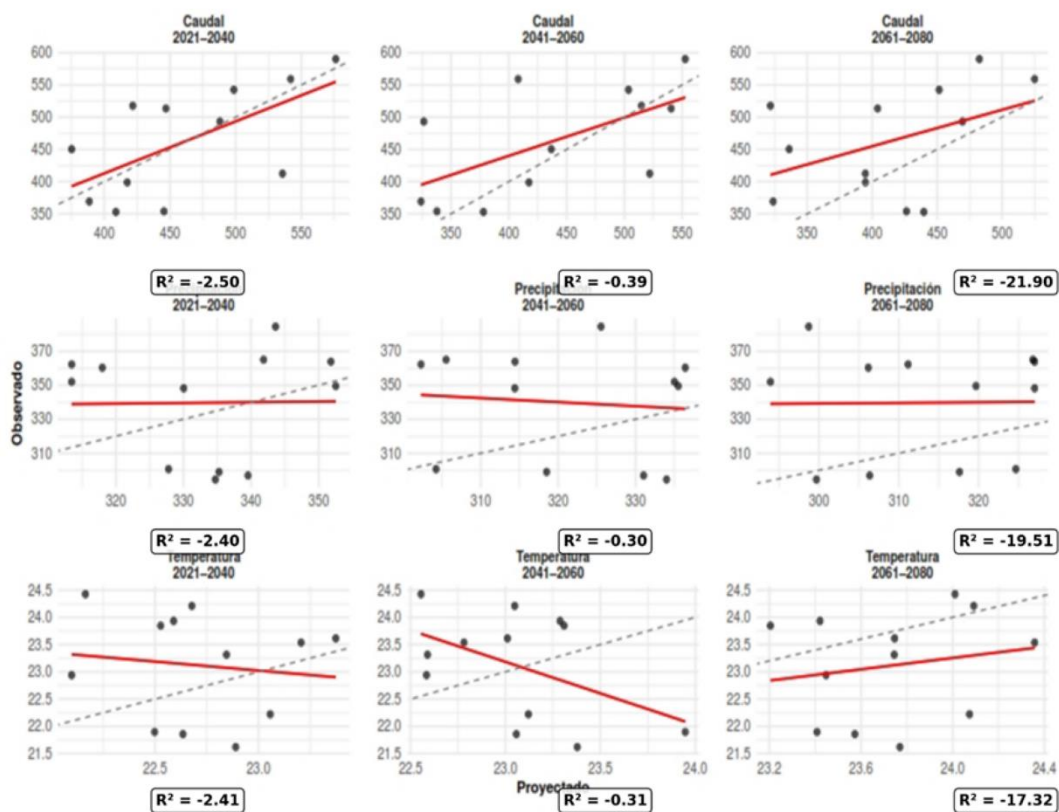
### 5.3. PROYECCIÓN CLIMÁTICA Y ESCENARIOS RCP

CON EL PROPÓSITO DE ANALIZAR LOS IMPACTOS QUE TENDRÁ EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME, SE CALCULARON DIVERSOS PARÁMETROS HÍDRICOS PARA LAS CONDICIONES PRESENTES Y PARA DOS ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO: RCP 4.5 Y RCP 8.5, AMBOS ESCENARIOS PROYECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN, EL ESCURRIMIENTO, LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y LA INFILTRACIÓN PROYECTADAS HASTA EL AÑO 2080, TODO ELLO BAJO LA CONSIDERACIÓN DE UN DESCENSO PROGRESIVO DE LA PRECIPITACIÓN ANUAL QUE INFLUIRÁ EN LA CONFIGURACIÓN DEL BALANCE DE AGUA DE LA CUENCA.

EN LA SIGUIENTE FIGURA, CADA PUNTO QUE SE HALLA REPRESENTADO, CORRESPONDE A UN PAR DE OBSERVACIONES-PROYECCIONES PARA EL CASO DEL CAUDAL (MM/MES), LA PRECIPITACIÓN (MM/MES) Y LA TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C).

LA LÍNEA ROJA REPRESENTA LA REGRESIÓN LINEAL DE LOS DATOS, MIENTRAS LA LÍNEA PUNTEADA CORRESPONDE A LA LÍNEA 1:1 (PARA IGUALDAD PERFECTA).

FIGURA 23. REPRESENTACIÓN DE DISPERSIÓN DE DATOS OBSERVADOS VS. PROYECTADOS – MICROCUENCA RÍO WAWAYME – ESCENARIO RCP4.5



Legenda:

- Línea roja: regresión lineal de los datos.
- Línea punteada: línea 1:1 (igualdad perfecta).

•  $R^2$  representa el coeficiente de determinación. Cuantifica la similitud entre datos observados y proyectados en cada variable.

ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LA FIGURA 23 PRESENTA LOS DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN QUE COMPARAN LOS VALORES OBSERVADOS Y PROYECTADOS DE CAUDAL,

PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PARA TRES HORIZONTES TEMPORALES BAJO EL ESCENARIO CLIMÁTICO RCP 4.5 EN LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME, 2021–2040, 2041–2060 Y 2061–2080. CADA SUBGRÁFICO PARA LA PRECIPITACIÓN REVELA QUE LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LA PRECIPITACIÓN QUE APARECEN EN LOS DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN SON EL RESULTADO DE LOS PROMEDIOS OBSERVADOS EN CONDICIONES CLIMÁTICAS LOCALES Y DE LOS PROMEDIOS ESPACIALES PROYECTADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CALIBRADOS A ESCALA LOCAL DE WORLDCLIM.

EN CUANTO A LA PRECIPITACIÓN, LA RELACIÓN CON LOS DATOS OBSERVADOS DEL PASADO EVIDENCIARÁ UNA TENDENCIA ASCENDENTE. PARA EL HORIZONTE 2021-2040, LOS VALORES PROPUESTOS POR EL MODELO FORMAN UN LIGERO INCREMENTO RESPECTO DE LA LÍNEA DE IDENTIDAD, UNA TENDENCIA QUE SE HACE MÁS MARCADA A MEDIDA QUE SE EVOLUCIONA AL PERIODO 2041-2060 Y, POSTERIORMENTE, AL PERIODO 2061-2080; ESTO PODRÍA TRADUCIRSE EN UN AUMENTO DE LA AFLUENCIA SUPERFICIAL DE AGUA, QUE PUEDE TAMBIÉN AUMENTAR EL NÚMERO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN O BIEN LA CANTIDAD DE ESCORRENTÍA.

EN EL MARCO DEL ESCENARIO RCP 4.5, EL RÉGIMEN DE CAUDALES EN LA MICROCUENCA DEL WAWAYME PODRÍA SUFRIR UN LIGERO INCREMENTO DE CARA AL FUTURO, MANTENIÉNDOSE LA RELACIÓN POSITIVA ENTRE DATOS SIMULADOS Y OBSERVADOS; EN ESTE SENTIDO, SE REITERA LA IDEA DE QUE EL CAUDAL SERÁ, INVARIABLEMENTE, MUY DEPENDIENTE DE LA PRECIPITACIÓN A LA QUE SE LE SOMETA, PERO TAMBIÉN SE HA DE TENER CONSIDERACIÓN DE LOS EFECTOS DEL INCREMENTO TÉRMICO Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.

RESPECTO A LA TEMPERATURA, LOS DATOS PROYECTADOS SUPERARÁN CONSISTENTEMENTE A LOS OBSERVADOS EN LOS TRES PERÍODOS, REFLEJANDO ASÍ EL AUMENTO SOSTENIDO QUE, AUNQUE NO MUY AMPLIO EN MAGNITUD MENSUAL, PODRÍA TENER EFECTOS EN LA

ACUMULACIÓN INTERANUAL EN EL BALANCE HÍDRICO. ESTE CRECIMIENTO TÉRMICO COINCIDE DE LAS PROYECCIONES DEL IPCC, QUE PREVÉN UN AUMENTO TÉRMICO DE ENTRE 1,5 Y 2,5°C A FINALES DE SIGLO PARA ESCENARIOS INTERMEDIOS EN LAS REGIONES TROPICALES ANDINAS.

DESDE UN ENFOQUE DE PROSPECTIVA CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA, SE HA CONSTRUIDO UN PROBABLE ESCENARIO EN BASE A LOS DATOS CLIMÁTICOS DEL ESCENARIO RCP 4.5 (PROPORCIONADOS POR WORLDCLIM Y VALIDADOS EN UNA ESCALA LOCAL), QUE NO SE CIÑE A UNA EXTRAPOLACIÓN ESTADÍSTICA, SINO QUE ATIENDE A LAS TENDENCIAS CLIMÁTICAS, A LAS MAGNITUDES PROYECTADAS Y A LAS OCASIONES HIDROLÓGICAMENTE RELEVANTES PARA LA CUENCA HIDROGRÁFICA CONSIDERADA.

LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME PODRÍA EXPERIMENTAR MAYOR VARIABILIDAD EN LA PRECIPITACIÓN CON LLUVIAS MÁS INTENSAS PERO TAMBIÉN, POR OTRO LADO, PROCESOS DE SEQUÍA MÁS PROLONGADOS, DATOS QUE MODIFICARÍAN LOS PATRONES DE ESCORRENTÍA.

ANALIZANDO LOS EFECTOS DE LA INCREMENTADA EVAPOTRANSPIRACIÓN, LA CUAL ES PROVOCADA POR EL AUMENTO DE LA TEMPERATURA, ESTA PUEDE SER LA CAUSA DE LA REDUCCIÓN DEL CAUDAL BASE, POR LO QUE ESTO REDUCIRÁ LA CANTIDAD DE AGUA DISPONIBLE EN LA ÉPOCA HUECA Y, POR ENDE, CALMADO EL AUMENTO DE LA DEMANDA DEL AGUA EN INTERVENCIONES DE PRECIPITACIONES. ESTA SITUACIÓN PRODUCE UNA POTENCIALIDAD DE ESTACIONALIDAD EN EL AGUA, AGRAVÁNDOSE INCLUSO SI LOS TOTALES ANUALES EN PRECIPITACIONES AUMENTAN.

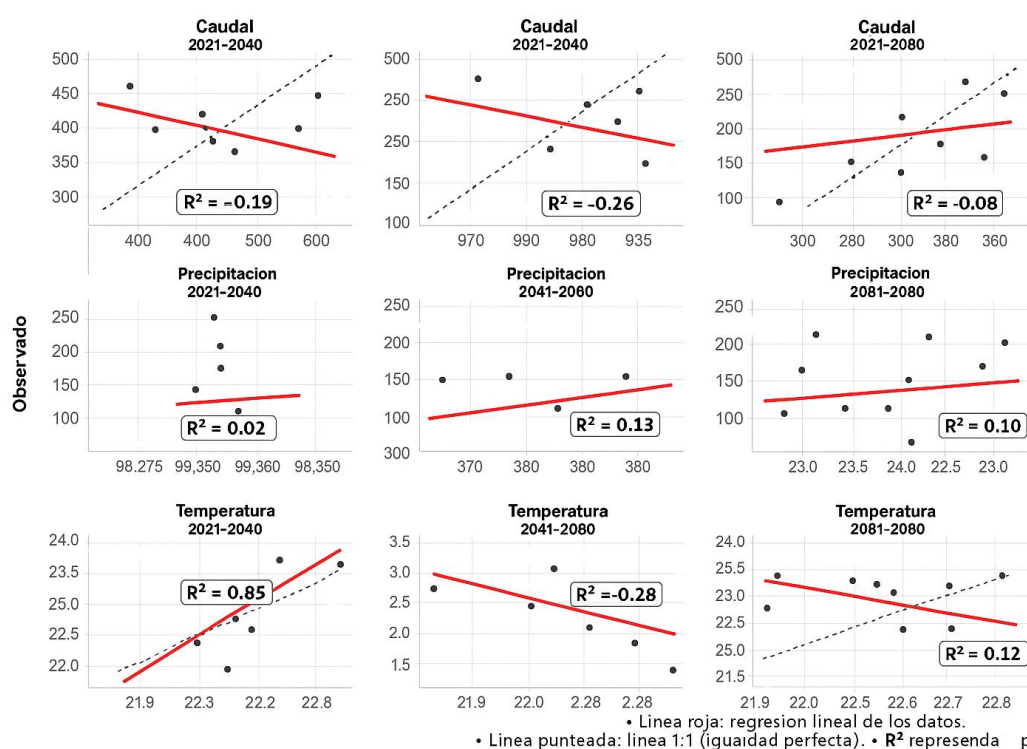
LA REDUCCIÓN DE LÍQUIDO PODRÁ AFECTAR CULTIVOS DE CICLOS LARGOS O DE ALTA DEMANDA DE AGUA (CAFÉ O FRUTALES ANDINOS) AL ALTERAR LA FENOLOGÍA DEL CULTIVO. A NIVEL ECOLÓGICO, SE PODRÍAN VER AFECTADOS LOS FLUJOS ECOLÓGICOS MÍNIMOS QUE SE GENERAN, ANULANDO ASÍ ECOSISTEMAS RIBEREÑOS FRÁGILES.

LOS RESULTADOS DE ESTA INVESTIGACIÓN SON COHERENTES CON LO ENCONTRADO EN OTROS ESTUDIOS INTERNACIONALES EN UN

CONTEXTO CON UNAS CONDICIONES HIDROLÓGICAS SIMILARES AL DE ESPAÑA. EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO TAIBILLA (SURESTE DE ESPAÑA), REALIZADA BAJO EL MODELO SWAT BAJO DISTINTOS ESCENARIOS RCP, SE ESTIMÓ UN INCREMENTO DE ENTRE 1,5 Y 1,7 °C EN LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL Y EN LA PRECIPITACIÓN ANUAL SE ESTIMÓ UNA REDUCCIÓN DE HASTA UN 13 %. ESTOS CAMBIOS CLIMÁTICOS PODRÍAN PROVOCAR UN AUMENTO DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y UN DESCENSO EN LA RECARGA DE ACUÍFEROS, LO QUE ALTERARÁ EL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA (JODAR ET AL., 2018). CONSECUENTEMENTE, ESTAS PROYECCIONES GUARDAN EVIDENTE COHERENCIA CON LOS RESULTADOS ALCANZADOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME; EN CONSECUENCIA, ESTO REFUERZA LA VALIDEZ DE LOS ESCENARIOS PROSPECTIVOS QUE HEMOS PLANTEADO Y SE PUEDE ESTABLECER UN PARALELISMO REGIONAL. POR OTRO LADO, UN ESTUDIO QUE SE LLEVÓ A CABO EN LA REGIÓN DE TOSCANA (ITALIA) UTILIZÓ ÍNDICES ESTANDARIZADOS Y MODELOS DE CIRCULACIÓN REGIONAL PARA ANALIZAR LA RESPUESTA DE LOS ACUÍFEROS AL CAMBIO CLIMÁTICO. ESTE ESTUDIO CONCLUYÓ QUE LAS PRECIPITACIONES MOSTRABAN CIERTA ESTABILIDAD RELATIVO A LAS ANUALES, PERO LOS CAMBIOS EN LA ESTACIONALIDAD Y EL AUMENTO TÉRMICO FUERON DETERMINANTES EN AUMENTAR LA FRECUENCIA DE SEQUÍAS EN FORMA DE SEQUÍAS SUBTERRÁNEAS (SECCI ET AL., 2021). ESTOS ESTUDIOS AVALAN LA RELEVANCIA DE INCLUIR ESCENARIOS PROSPECTIVOS EN LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO, DADO ADEMÁS QUE LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME DEBE SER INTERPRETADA COMO UNA UNIDAD VULNERABLE A LOS IMPACTOS QUE GENERA EL CAMBIO CLIMÁTICO. POR LO TANTO, ES INDISPENSABLE QUE LAS INSTANCIAS LOCALES DE LA GOBERNANZA DEL AGUA INCORPOREN EN SU GESTIÓN DIFERENTES ACCIONES DE ADAPTACIÓN A FUTURO, COMO LA COSECHA DE AGUA, CAMBIO DEL CALENDARIO AGRÍCOLA, ASÍ COMO TAMBIÉN REFORZAMIENTO DE LAS CAPACIDADES COMUNITARIAS

SOBRE LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO Y EL MONITOREO ADAPTATIVO.

**FIGURA 24.** REPRESENTACIÓN DE DISPERSIÓN DE DATOS OBSERVADOS VS. PROYECTADOS – MICROCUENCA RÍO WAWAYME – ESCENARIO RCP8.5



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRIMERA PROSPECTIVA APLICADA A LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME, UBICADA EN EL CANTÓN EL PANGUI, ES EL RESULTADO DE LA SIMULACIÓN DEL FUTURO RÉGIMEN DE CAUDALES, BASÁNDOSE EN EL MODELO FÍSICO GR2M Y EN LOS DATOS CLIMÁTICOS CLIMÁTICOS PROYECTADOS EN EL MARCO DEL ESCENARIO RCP 8.5. ESTE TIPO DE ESCENARIO SE UBICA EN LA CATEGORÍA DE LOS DE ALTAS EMISIONES Y SE DIFERENCIA DE OTROS

ESCENARIOS POR SER UNA DE LAS HERRAMIENTAS MÁS IMPORTANTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS, POR ENCIMA DE LAS SIMPLES PROYECCIONES ESTADÍSTICAS DE SERIES HISTÓRICAS.

DURANTE EL PRIMER PERIODO ANALIZADO (2021–2040), LAS PROYECCIONES MUESTRAN UNA ALTA CORRELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL PROYECTADA Y EL CAUDAL SIMULADO, INDICANDO QUE EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO TODAVÍA ESTARÁ FUERTEMENTE CONTROLADO POR LA LLUVIA. LA CORRELACIÓN SE VUELVE MENOS CLARA EN LOS PERIODOS 2041–2060 Y 2061–2080, UNA POSIBLE CONSECUENCIA DE UNA MAYOR IRREGULARIDAD EN LA DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES. AUNQUE LA PRECIPITACIÓN TOTAL ES MAYOR, OCURRE EN EVENTOS MÁS INTENSOS, LO QUE LES DA LUGAR A UNA ESCORRENTÍA MÁS CONSIDERABLE Y A UNA MENOR INFILTRACIÓN, LO QUE PODRÍA LLEVAR A UN EFECTO NEGATIVO SOBRE LA RECARGA DE ACUÍFEROS.

EL PATRÓN DESCRITO ES SIMILAR AL OBSERVADO POR JÓDAR ET AL. (2018) EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO TAIBILLA (SURESTE DE ESPAÑA), DONDE BAJO VARIOS ESCENARIOS RCP OBSERVARON UN INCREMENTO TÉRMICO DE 1,7 °C Y UNA DISMINUCIÓN DE PRECIPITACIONES ANUALES DEL 13 %. EN ESTE CASO, LOS CAMBIOS EN EL BALANCE HÍDRICO CONDUJERON A UNA REDUCCIÓN DE LA RECARGA SUBTERRÁNEA Y UN INCREMENTO DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL. EN WAWAYME, SI BIEN NO SE PRONOSTICA UNA DISMINUCIÓN EN LAS PRECIPITACIONES, EL EFECTO COMBINADO DEL INCREMENTO TÉRMICO (HASTA VALORES DE 2.5 °C PARA EL 2080) Y LA INTENSIFICACIÓN DE LLUVIAS MÁS INTENSAS PODRÍA LLEVAR A UN EFECTO SIMILAR EN FORMA DE UNA MENOR CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN QUE SE ALMACENA PARA SU POSTERIOR USO, ASÍ COMO UN INCREMENTO DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL QUE ALTERE EL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA.

POR OTRA PARTE, EL ÍNDICE DE CAMBIO QUE OFRECE LA COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES PROYECTADOS Y AQUELLOS OBSERVADOS MUESTRA UNA TENDENCIA CRECIENTE EN EL CASO DE LAS TEMPERATURAS PARA LOS ÚLTIMOS PERIODOS ANALIZADOS, LO QUE INDICA QUE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL INCREMENTA EN LOS ÚLTIMOS PERIODOS ANALIZADOS. EN LA SERIE DE 2021 A 2040, ESE EFECTO TÉRMICO TODAVÍA NO ESTÁ DOMINADO POR EL CAUDAL, AUNQUE POR OTRO LADO LA TENDENCIA GRADUAL DE AUMENTO DE LAS TEMPERATURAS TAL VEZ IMPACTE DE FORMA MÁS DETERMINANTE LA ESCORRENTÍA BASE EN MOMENTOS POSTERIORES, DE ACUERDO CON LO DETECTADO TAMBIÉN POR SECCI ET AL.(2021) EN LA REGIÓN DE LA TOSCANA (ITALIA), QUIENES INDICAN QUE PESE A UNA ESTABILIDAD DE LAS PRECIPITACIONES PLUVIALES ANUALES, EL CAMBIO HACIA UNA ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA DIFERENTE Y UN INCREMENTO EN LAS TEMPERATURAS HA DESARROLLADO CONDICIONES DE SEQUÍAS SUBTERRÁNEAS DE FORMA MÁS HABITUAL, PONIENDO DE MANIFIESTO QUE LOS IMPACTOS NO SIEMPRE ESTÁN REFLEJADOS DE INMEDIATO EN LA ESCORRENTÍA, PERO HACEN QUE SE REDUZCA LENTAMENTE EL ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO.

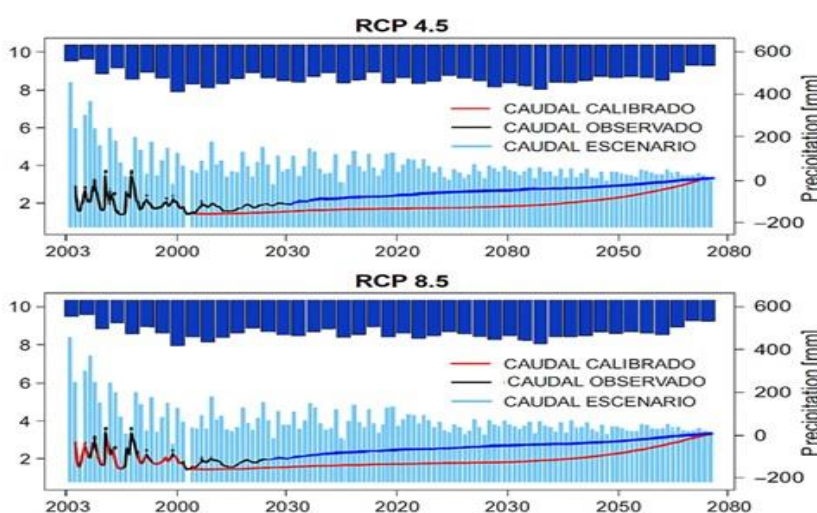
LOS RESULTADOS HALLADOS PARA EL ESCENARIO RCP 8.5 EN WAWAYME MUESTRAN UN PAULATINO CAMBIO EN EL RÉGIMEN CLIMÁTICO DEL LUGAR, CON UN INCREMENTO DE LA TEMPERATURA, MAYORES EVENTOS DE LLUVIA Y UNA MAYOR DESVINCULACIÓN ENTRE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS Y LOS CAUDALES. ESTE NUEVO CONTEXTO PODRÍA SUPONER UNA PÉRDIDA DE ESTACIONALIDAD, UN RIESGO MENGUANTE DE CRECIDAS SÚBITAS Y UN CAUDAL BASE CADA VEZ MÁS REDUCIDO, AFECTANDO ASÍ LA SEGURIDAD HÍDRICA Y LA AGRICULTURA DEL LUGAR. LA COMPARATIVA CON ESTUDIOS INTERNACIONALES APOYA EL ENFOQUE PROSPECTIVO ESCOGIDO Y RESALTA LA NECESIDAD DE ACOPLAR MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES

CON ESTUDIOS HIDROLÓGICOS LOCALES PARA LA CREACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN EFICIENTES Y SOSTENIBLES.

## 5.4. RESULTADOS MODELACIÓN DEL ESCENARIO HÍDRICO FUTURO

SE LLEVÓ A CABO UN ANÁLISIS DE PRONÓSTICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME, CONSIDERANDO EL CLIMA Y LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN BASE A LOS DATOS OBSERVACIONALES DESDE EL AÑO 2021 HASTA EL AÑO 2080. PARA ELLO, SE ASUMIERON LOS ESCENARIOS DEL IPCC BAJO EL RCP 4.5 Y RCP 8.5 PARA LOS PERIODOS DISTRIBUIDOS ENTRE EL 2021 Y EL 2040, 2041–2060 Y 2061–2080, LO CUAL PERMITIÓ PROYECTAR EL POSIBLE COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DEL FUTURO DE LA CUENCA HASTA 2080 EN FUNCIÓN DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS PROYECTADAS, QUE SE OBSERVA EN LA FIGURA 25:

FIGURA 25. ESCENARIO HÍDRICO FUTURO 2080 EN MM POR CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME



ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

LA FIGURA 25 MUESTRA LA EVOLUCIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO DEL CAUDAL EN LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME, EN LA QUE SE

INCLUYEN LOS DATOS OBSERVADOS (2003-2013), CAUDALES CALIBRADOS, CAUDALES SIMULADOS BAJO LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS RCP 4.5 Y RCP 8.5 HASTA EL AÑO 2080 Y LA PRECIPITACIÓN MENSUAL COMO REFERENCIA (REPRESENTADA MEDIANTE BARRAS INVERTIDAS EN COLOR AZUL), DE MANERA QUE SE ESTUDIA LA RELACIÓN LLUVIA/RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA.

LA PARTE ANALIZADA REFIERE AL COMPORTAMIENTO DEL RÉGIMEN HÍDRICO FUTURO EN RELACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA TRANSFORMACIÓN DEL USO DEL SUELO, DONDE EN LOS DOS ESCENARIOS SE PERCIBE UN INCREMENTO LIGERO EN LOS CAUDALES FUTUROS A PARTIR DEL AÑO 2021 POR EL AUMENTO DE LA PRECIPITACIÓN Y DE LAS CARACTERÍSTICAS ANTERIORMENTE DESCRITAS DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DEBIDAS A LA TRANSFORMACIÓN DEL USO DEL SUELO.

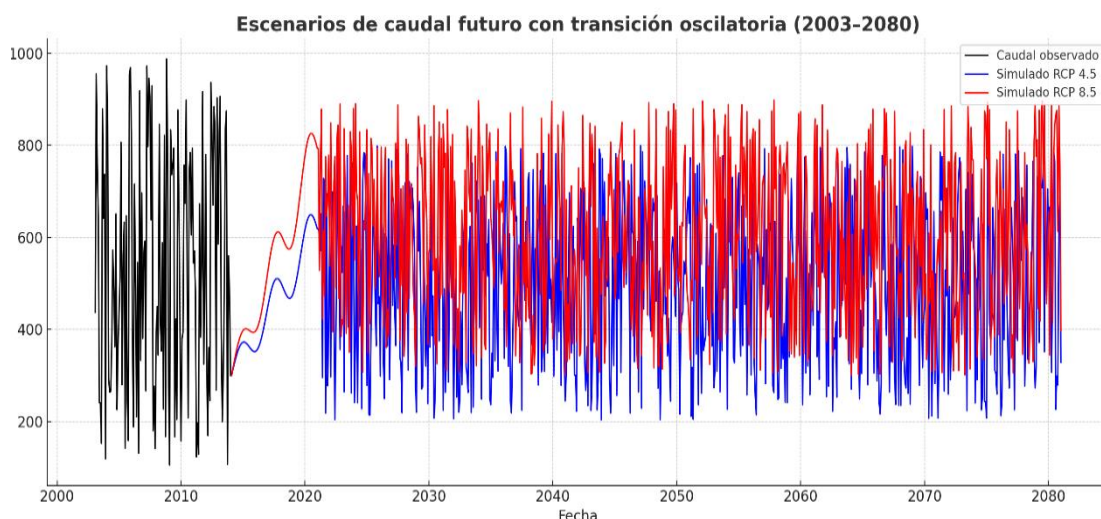
LA INFORMACIÓN DA CUENTA DE QUE EL CAUDAL DE LA MICROCUENCA DEL WAWAYME PUEDE CONSIDERARSE RELATIVAMENTE ESTABLE EN TÉRMINOS GENERALES, AUNQUE BAJO AMBOS ESCENARIOS TAMBIÉN PODRÍA TENER UNA LEVE TENDENCIA AL AUMENTO, ESTO PODRÍA TENER IMPORTANTES IMPLICACIONES PARA LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL CONTEXTO DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y TRANSFORMACIÓN TERRITORIAL.

## 5.5. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CAUDAL

LA FIGURA 26 QUE SE PRESENTA A CONTINUACIÓN TIENE LA PROYECCIÓN DEL CAUDAL EN LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME EN BASE A LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS RCP 4.5 Y RCP 8.5 EN EL PERIODO 2003-2080 POR MEDIO DEL MODELO HIDROLÓGICO GR2M USANDO DATOS HISTÓRICOS (2003-2013) PARA LA CALIBRACIÓN, Y

PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA INICIALES QUE FUERON OBTENIDAS CON WORLDCLIM PARA EL FUTURO. SE PUEDE OBSERVAR CÓMO SE PRESENTA UN CAMBIO DESDE LOS CAUDALES OBSERVADOS HACIA UNA OSCILACIÓN QUE ES CARACTERÍSTICA EN DAR COMO RESULTADO EL RENDIMIENTO ESPERADO DE LOS ESCENARIOS QUE SE PRESENTAN, LO QUE PERMITE REALIZAR UN ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE SU CUENCA PARA DISTINTOS CONTEXTOS CLIMÁTICOS EN EL SIGLO XXI.

**FIGURA 26.** *ESCENARIO DE CAUDAL FUTURO EN LA MICROCUENCA RÍO WAWAYME*



**Elaborado por:** Adrián Jumbo, 2025.

EN LA FIGURA 26 SE PUEDE OBSERVAR EL PASO DE LOS DATOS HISTÓRICOS OBSERVADOS DEL CAUDAL A LOS CAUDALES PROYECTADOS

SEGÚN LOS DOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS CORRESPONDIENTES A RCP 4.5 Y RCP 8.5. LA SECCIÓN DE LA CURVA COMPRENDIDA ENTRE LOS AÑOS 2013 Y 2021 NO CORRESPONDE A DATOS OBSERVACIONALES, YA QUE SE TRATA DE UNA CURVA DE CONEXIÓN QUE TIENE FORMA OSCILATORIA Y QUE SE INTRODUCE ÚNICAMENTE CON EL PROPÓSITO VISUAL. ESTA DECISIÓN VIENE MOTIVADA POR EL HECHO DE QUE LOS DATOS DEL CAUDAL OBSERVADO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME SE ENCUENTRAN SOLAMENTE HASTA EL AÑO 2013, MIENTRAS QUE LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS OBTENIDAS DE LOS MODELOS DE WORLDCLIM (ENSEMBLE CMIP5) COMIENZAN A PARTIR DEL AÑO 2021. ASÍ PUES, NO HAY DATOS OBSERVACIONALES NI PROYECTADOS EN LOS AÑOS INTERMEDIOS (2014–2020), DICHA CURVA DE CONEXIÓN DA CAUCE VISUAL AL HIDROGRAMA FACILITA LA INTERPRETACIÓN DE LAS TENDENCIAS.

CON EL FIN DE CUANTIFICAR EL EFECTO QUE PUEDE PROVOCAR EL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO WAWAYME, SE LLEVÓ A CABO UNA COMPARACIÓN DE LOS CAUDALES OBSERVADOS (2003–2013) EN RELACIÓN CON LOS CAUDALES PROYECTADOS, PROCEDENTES DE LOS ESCENARIOS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVA RCP4.5 Y RCP8.5 MEDIANTE LA SIMULACIÓN DEL MODELO GR2M Y SUS DATOS CLIMÁTICOS PROYECTADOS DEL CONJUNTO WORLDCLIM; ESTA SERIE HACE ALUSIÓN A UNA HISTORIA COMPLETA DE 78 AÑOS DE ANÁLISIS, A PARTIR DE LOS DATOS DE 2003 Y HASTA 2080.

EN LA FIGURA SE MUESTRAN LAS TRES SERIES DE CAUDALES: EL CAUDAL OBSERVADO (LÍNEA NEGRA CONTINUA), EL CAUDAL PROYECTADO DEL ESCENARIO RCP4.5 (LÍNEA AZUL CORRESPONDIENTE A LAS PROYECCIONES CLIMATOLÓGICAS) Y EL CAUDAL PROYECTADO PARA EL ESCENARIO RCP8.5 ACOMPAÑADO DE LA LÍNEA ROJA QUE INFORMA DE LAS PROYECCIONES CLIMATOLÓGICAS. SE PUEDE EVIDENCIAR QUE, EN TÉRMINOS GENERALES, LOS CAUDALES PROYECTADOS EMPIEZAN UNA

TENDENCIA LIGERAMENTE CRECIENTE A PARTIR DE 2021, SIENDO MÁS FUERTE EN EL ESCENARIO RCP8.5 DONDE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS SON MÁS EXTREMAS Y DONDE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA HA CRECIDO.

EN LO QUE SE REFIERE HACIA EL PERÍODO FUTURO QUE CORRESPONDE AL PERÍODO 2024–2080, LOS VALORES CALCULADOS EN EL RCP 4.5 DURANTE EL MISMO, MARCARÍAN UN CAUDAL PROMEDIO DE 0,335 M<sup>3</sup>/S; POR OTRA PARTE, EN EL CASO DEL RCP 8.5, EL CAUDAL MEDIO QUE SE OBTUVO ES MÁS ALTO, MARCANDO ASÍ UN 0,356 M<sup>3</sup>/S. ESTO SUGIERE QUE EN LA MICROCUENCA DEL WAWAYME, EL RÉGIMEN HÍDRICO PODRÍA SER RELATIVAMENTE CONSTANTE, PERO CON LIGEROS INCREMENTOS EN EL MISMO BAJO LA INTERVENCIÓN DE FUERZAS CLIMÁTICAS. DE ACUERDO A ESTA ÚLTIMA, LA DIFERENCIA ENTRE LOS DOS ESCENARIOS ES PEQUEÑA, PERO MUESTRA TENDENCIAS HACIA LA MAYOR DISPONIBILIDAD HÍDRICA SI SE TOMA EN CONSIDERACIÓN EL RCP 8.5, LO QUE PUEDE ESTAR MÁS RELACIONADO CON EL AUMENTO EN LA PROPIA INTENSIDAD DE LAS PRECIPITACIONES FUTURAS.

AL COMPARAR LOS RESULTADOS CON EL TRABAJO DE COLÍN ET AL (2023) QUE TRATA EL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO MIXTECO, Y EN EL QUE SE ANALIZAN DISTINTOS MODELOS ESPACIALES DEL TIPO DE SUELO, SE PUDO CONTRASTAR QUE EL IMPACTO DEL CLIMA EXTREMO NO SOLO DEPENDERÁ DE LOS SUCEOS QUE PREVEEMOS, SINO QUE TAMBIÉN TENDRÁ QUE VER CON LA RESOLUCIÓN ESPACIAL CONSIDERADA Y LAS CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS DE LA CUENCA. MIENTRAS EL MODELO SWAT PONE EL ACENTO EN CONOCER LAS INTERACCIONES ENTRE SUELOS, USOS DE SUELO Y CLIMA; LOS ANÁLISIS DEL TIPO RCP SUPONEN UNA MANERA DE CONSIDERAR LA INCERTIDUMBRE CLIMÁTICA DE FORMA DIRECTA, Y AUNQUE SE PRESENTAN DE MANERA GLOBAL, SE PERMITEN UNA FORMA DE ABORDAR EL PROBLEMA DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE UN ENFOQUE

COMPLEMENTARIO; SI EL SWAT BASA SUS REFLEXIONES EN SERVIRSE DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA HETEROGENEIDAD QUE PRESENTA LA CUENCA Y LA FUSIÓN DE SUS SUELOS; LOS DEL TIPO RCP LO HARÁN OBEDECIENDO A LA MANERA DE VER CÓMO LAS TENDENCIAS CLIMÁTICAS GLOBALES GENERAN EL CANTE HACIA EL INTERIOR DE LA CUENCA.

POR OTRO LADO, EL MODELO WEAP APLICADO EN CUENCAS CRIOSFÉRICAS DE LOS ANDES (RAMÍREZ Y KÖLN, 2015) PONE ÉNFASIS EN LOS COMPONENTES DE TIPO CRIOSFÉRICO, SOBRE TODO CUANDO LA FUSIÓN DE GLACIARES Y EL MANEJO ESTACIONAL DE NIEVE TIENEN UN PAPEL ESPECÍFICO EN EL DESPLAZAMIENTO DEL AGUA. AUNQUE EL MODELO UTILIZADO EN ESTE TRABAJO NO CONSIDERA ESTA COMPONENTE, LA VISIÓN DEL TIPO RCP PODRÍA INCLUIRSE A LOS MODELOS TIPO WEAP PARA ANALIZAR, POR EJEMPLO, CÓMO EL CALENTAMIENTO GLOBAL AFECTA LOS RECURSOS CRIOSFÉRICOS Y LA MANERA QUE ESTOS INTERACTÚAN CON LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS ANDINAS.

FINALMENTE, LOS TRES ENFOQUES HACEN VER LA NECESIDAD DE PENSAR EN LO LOCAL (SWAT Y WEAP) Y EN LO GLOBAL (RCP); ESTO DA CUENTA DEL VALOR DE UNA INTEGRACIÓN MULTIMODELO PARA EVALUAR DE UNA MANERA MÁS COMPLETA EL IMPACTO DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DEL AGUA, PERO TAMBIÉN PARA PLANTEAR ESTRATEGIAS DE MANEJO ADAPTATIVO EN LAS CUENCAS.

## 6. CONCLUSIONES

SE DETERMINA QUE, AL EVALUAR LOS CAMBIOS FUTUROS DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CON EL MODELO GR2M CONSIDERANDO LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y SIMULANDO LA DISPONIBILIDAD DEL RÍO WAWAYME DURANTE LA PRÓXIMA MITAD DE SIGLO SE ENCONTRÓ UNA TENDENCIA HACIA UNA REDUCCIÓN EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN MESES CONCRETOS. EL ESCALAMIENTO ESPACIAL Y LA APLICACIÓN DE PROCESOS NO ESTACIONARIOS PERMITIERON PODER AJUSTAR LOS DATOS CLIMÁTICOS A LA REALIDAD DE LA CUENCA PRIVILEGIANDO LA MEJORA DE LA CALIDAD DE LAS PROYECCIONES HIDROLÓGICAS. SE EVIDENCIÓ QUE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA TENDRÁ UN IMPACTO DETERMINANTE EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA FUTURA, CON CAMBIOS EN LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA QUE AFECTARÁN AL BALANCE HÍDRICO.

LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO GR2M PARA EL ESCENARIO RCP 4.5 INDICAN UNA CAPACIDAD PREDICTIVA ADECUADA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES FUTUROS EN LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME, MOSTRANDO UNA BUENA CORRESPONDENCIA ENTRE LOS CAUDALES OBSERVADOS, Y LOS CAUDALES SIMULADOS, CORROBORANDO ASÍ LA CONFIABILIDAD DEL MODELO PARA ABORDAR Y EVALUAR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS POSIBLES EFECTOS QUE PUEDE TENER EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA REGIÓN EN ESTUDIO.

EN RELACIÓN CON EL ESCENARIO RCP 4.5, EL RCP 8.5 PROYECTA CAMBIOS MÁS ACENTUADOS EN LAS VARIABLES CLIMÁTICAS, CON MAYORES AUMENTOS EN LA TEMPERATURA Y UNA MAYOR

VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN. ESTOS CAMBIOS, A SU VEZ, INTENSIFICARÍAN LOS PERÍODOS DE ESCASEZ HÍDRICA Y MODIFICARÍAN EL RÉGIMEN DE LOS CAUDALES DE LA CUENCA, QUE AUMENTARÍA LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA Y LA PRESIÓN SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS LOCALES.

LOS HALLAZGOS DEMUESTRAN UNA INFLUENCIA DIRECTA DE LOS PROCESOS DE SIMULACIÓN CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA EN EL SUMINISTRO DE AGUA DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO WAWAYME. ESTOS RESULTADOS SUBRAYAN LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS ACTIVOS HÍDRICOS A MODIFICACIONES EN LAS PRECIPITACIONES Y CONDICIONES MÁS CÁLIDAS COMO SE PREDICE EN EL ESCENARIO RCP 4.5.

## REFERENCIAS

- [1] R. ALLAN, P. ARIAS, S. BERGER, J. CANADELL, C. CASSOU, D. CHEN, A. CHERCHI, S. CONNORS, E. COPPOLA, A. CRUZ, A. DIONGUE-NIANG, F. DOBLAS-REYES, H. DOUVILLE, F. DRIQUECH, T. EDWARDS, F. ENGELBRECHT, V. EYRING, E. FISCHER Y G. FLATO, «SUMMARY FOR POLICYMAKERS. IN CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE SIXTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE,» *INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)*, pp. 3-32, 2021.
- [2] B. ARAÚZ, «ANÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO DAVID, CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CHIRIQUÍ (108), REPÚBLICA DE PANAMÁ,» 2023. [EN LÍNEA]. AVAILABLE:  
[HTTPS://REPOSITORIO.CATIE.AC.CR/BITSTREAM/HANDLE/11554/12258/ARAUZDELGADOBRENDAJANETH.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/12258/ARAUZDELGADOBRENDAJANETH.PDF?sequence=1&isAllowed=y).
- [3] C. MALDONADO, C. FRANCO-BILLINI Y U. JÁURGEUI-HAZA, «GESTIÓN INTEGRADA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS: HACIA UN NUEVO PARADIGMA EN LA GOBERNANZA DEL AGUA,» *CIENCIA, AMBIENTE Y CLIMA*, VOL. 6, N° 2, pp. 67-101, 2023.
- [4] B. KUMAR, P. KUMAR, C. SARASWAT, S. CHAKRABORTY Y A. GAUTAM, «WATER SECURITY IN A CHANGING ENVIRONMENT: CONCEPT, CHALLENGES AND SOLUTIONS,» *WATER*, VOL. 13, N° 4, pp. 1-21, 2021.
- [5] G. SU, M. LOGEZ, J. SHENGLI, S. VILLÉGER Y S. BROSSE, «HUMAN IMPACTS ON GLOBAL FRESHWATER FISH BIODIVERSITY,» *SCIENCE*, VOL. 371, N° 6531, pp. 835-838, 2021.
- [6] D. KOUTSOYIANNIS, «REVISITING THE GLOBAL HYDROLOGICAL CYCLE: IS IT INTENSIFYING?,» *HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES*, VOL. 24, N° 8, p. 3899-3932, 2020.
- [7] D. YANG, Y. YANG Y J. XIA, «HYDROLOGICAL CYCLE AND WATER RESOURCES IN A CHANGING WORLD: A REVIEW,» *GEOGRAPHY AND SUSTAINABILITY*, VOL. 2, N° 2, pp. 115-122, 2021.
- [8] M. POWER, S. CHANDRA, P. GLEICK Y W. DIETRICH, «ANTICIPATING RESPONSES TO CLIMATE CHANGE AND PLANNING FOR RESILIENCE IN CALIFORNIA'S FRESHWATER ECOSYSTEMS,» *ENVIRONMENTAL SCIENCES*, VOL. 121, N° 32, 2024.
- [9] A. GRIFFITH Y C. GOBLER, «HARMFUL ALGAL BLOOMS: A CLIMATE CHANGE CO-STRESSOR IN MARINE AND FRESHWATER ECOSYSTEMS,» *HARMFUL ALGAE*, VOL. 91, pp. 1-12, 2020.

- [10] GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN EL PANGUI, «ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y FORMULACIÓN DEL PLAN DE USO Y GESTIÓN DEL SUELO PUGS DEL CANTÓN EL PANGUI,» 2020. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://ELPANGUI.GOB.EC/WP-CONTENT/UPLOADS/2022/08/PDOT-EL-PANGUI-FINAL-1.PDF](https://elpangui.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/PDOT-EL-PANGUI-FINAL-1.pdf).
- [11] D. PAUTA, «TERRITORIALIDADES HIDRO-SOCIALES EN MUTACIÓN EN EL CONTEXTO DEL PROYECTO MEGA-MINERO MIRADOR, EJECUTADA POR LA EMPRESA ECSA,» 2024. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://REPOSITORIO.UASB.EDU.EC/BITSTREAM/10644/10000/1/T4383-MEPAD-PAUTA-TERRITORIALIDADES.PDF](https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/10000/1/T4383-MEPAD-PAUTA-TERRITORIALIDADES.pdf).
- [12] J. PÉREZ, M. MENÉNDEZ Y F. MÉNDEZ, «HABILIDAD DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS REGIONALES,» 2016. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://AECLIM.ORG/WP-CONTENT/UPLOADS/2016/02/0017\\_PUSA-VIII-2012-J\\_PEREZ.PDF](https://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0017_PUSA-VIII-2012-J_PEREZ.pdf).
- [13] A. WALSH, «EL CAMBIO CLIMÁTICO AMENAZA LAS REGIONES MONTAÑOSAS DEL MUNDO,» 12 10 2021. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.DW.COM/ES/EL-CAMBIO-CLIM%C3%A1TICO-AMENAZA-LAS-REGIONES-MONTA%C3%B1OSAS-DEL-MUNDO/G-60080822](https://www.dw.com/es/el-cambio-clim%C3%A1tico-amenaza-las-regiones-monta%C3%B1osas-del-mundo/g-60080822).
- [14] E. BROUSSARD, «EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS REGIONES MONTAÑOSAS: CONCLUSIONES DE LAS EXPEDICIONES CIENTÍFICAS FAO/OIEA EN LOS ANDES,» 17 11 2021. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.IAEA.ORG/ES/NEWSCENTER/NEWS/EFECTOS-DEL-CAMBIO-CLIMATICO-EN-LAS-REGIONES-MONTANOSAS-CONCLUSIONES-DE-LAS-EXPEDICIONES-CIENTIFICAS-FAO/OIEA-EN-LOS-ANDES](https://www.iaea.org/es/newscenter/news/efectos-del-cambio-climatico-en-las-regiones-montanosas-conclusiones-de-las-expediciones-cientificas-fao/oiea-en-los-andes).
- [15] N. QUEZADA, «USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL DIAGNÓSTICO AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL: CASO DE APLICACIÓN EN LA PARROQUIA DE WAWAYME, CANTÓN EL PANGUI, PROVINCIA DE ZAMORA CHINCHIPE,» 2014. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://REPOSITORIO.USFQ.EDU.EC/BITSTREAM/23000/3575/1/1103580120.PDF](https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/3575/1/1103580120.pdf) .
- [16] J. HERMAN, J. QUINN, S. STEINSCHNEIDER, M. GIULIANI Y S. FLETCHER, «CLIMATE ADAPTATION AS A CONTROL PROBLEM: REVIEW AND PERSPECTIVES ON DYNAMIC WATER RESOURCES PLANNING UNDER UNCERTAINTY,» *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 56, Nº 2, PP. 1-32, 2020.
- [17] S. PATIÑO, Y. HERNÁNDEZ, C. PLATA, I. DOMÍNGUEZ, M. DAZA, R. OVIEDO-OCAÑA, W. BUYTAERT Y B. OCHOA-TOCACHI, «INFLUENCE OF LAND USE ON HYDRO-PHYSICAL SOIL PROPERTIES OF ANDEAN

- PÁRAMOS AND ITS EFFECT ON STREAMFLOW BUFFERING,» *CATENA*, VOL. 202, PP. 1-14, 2021.
- [18 D. ALTHOFF Y L. RODRIGUES, «GOODNESS-OF-FIT CRITERIA FOR ]  
] HYDROLOGICAL MODELS: MODEL CALIBRATION AND PERFORMANCE ASSESSMENT,» *JOURNAL OF HYDROLOGY*, VOL. 600, PP. 1-15, 2021.
- [19 Y. YANG, M. RODERICK, D. YANG, Z. WANG, F. RUAN, T. MCVICAR, S. ]  
] ZHANG Y H. BECK, «STREAMFLOW STATIONARITY IN A CHANGING WORLD,» *ENVIROMENTAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 16, N° 6, PP. 1-9, 2021.
- [20 E. PERRAMOND, «WATER RIGHTS, RIVER COMPACTS, AND LEGAL- ]  
] POLICY STATIONARITY IN THE AMERICAN WEST,» *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 15, N° 2, PP. 1-8, 2020.
- [21 S. GIRI, R. LATHROP Y C. OBROPTA, «CLIMATE CHANGE ]  
] VULNERABILITY ASSESSMENT AND ADAPTATION STRATEGIES THROUGH BEST MANAGEMENT PRACTICES,» *JOURNAL OF HYDROLOGY*, VOL. 580, PP. 1-19, 2020.
- [22 D. BĂNĂDUC, V. SIMIĆ, K. CIANFAGLIONE, S. BARINOVA, S. ]  
] AFANASYEV, A. ÖKTENER, G. MCCALL, S. SIMIĆ Y A. CURTEAN-BĂNĂDUC, «FRESHWATER AS A SUSTAINABLE RESOURCE AND GENERATOR OF SECONDARY RESOURCES IN THE 21ST CENTURY: STRESSORS, THREATS, RISKS, MANAGEMENT AND PROTECTION STRATEGIES, AND CONSERVATION APPROACHES,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH*, VOL. 19, N° 24, PP. 1-29, 2022.
- [23 N. OLVERA Y C. GAY, «HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL DE RECURSOS ]  
] HÍDRICOS ANTE SEQUÍAS PARA LA ZMVM: ENFOQUE TRANSDISCIPLINARIO DESDE LA COMPLEJIDAD,» *IMPLUVIUM, PUBLICACIÓN DIGITAL DE LA RED DEL AGUA, UNAM*, N° 22, PP. 71-77, 2023.
- [24 C. OCHOA, «ANÁLISIS ECONÓMICO-SOCIAL DE LA SOSTENIBILIDAD ]  
] DEL MODELO DE DESARROLLO AGRÍCOLA DE LA COSTA DE HERMOSILLO, MÉXICO,» 2022. [EN LÍNEA].
- [25 AGENCIA EFE, «EL GOBIERNO DE ECUADOR ANUNCIA NUEVOS ]  
] APAGONES POR LA SEQUÍA EN LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS,» 26 10 2023. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://EFE.COM/ECONOMIA/2023-10-26/EL-GOBIERNO-DE-ECUADOR-ANUNCIA-NUEVOS-APAGONES-POR-SEQUIA-EN-LAS-CENTRALES-HIDROELECTRICAS/](https://efe.com/economia/2023-10-26/el-gobierno-de-ecuador-anuncia-nuevos-apagones-por-sequia-en-las-centrales-hidroelectricas/).
- [26 GESTIÓN DIGITAL, «ECUADOR A OSCURAS: UNA HISTORIA ]  
] ENERGÉTICA MARCADA POR LA INEFICIENCIA,» 19 05 2024. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://REVISTAGESTION.EC/ANALISIS-ECONOMIA-Y-FINANZAS/ECUADOR-OSCURAS-UNA-HISTORIA-ENERGETICA-MARCADA-POR-LA-INEFICIENCIA/](https://revistagestion.ec/analisis-economia-y-finanzas/ecuador-oscuras-una-historia-energetica-marcada-por-la-ineficiencia/).
- [27 M. VÉLEZ, *HIDROLOGÍA PARA INGENIEROS*, UNIVERSIDAD NACIONAL ]  
] DE COLOMBIA, 2000.

- [28 E. RUIZ Y M. MARTÍNEZ, HIDROLOGÍA APLICADA: INTRODUCCIÓN, ] 2015.
- [29 R. WEIGUANG, L. CHEN Y C. YU XU, «HYDROLOGICAL MODELING IN ] WATER CYCLE PROCESSES,» *WATER*, VOL. 13, N° 14, PP. 1-3, 2021.
- [30 A. BATEMAN, HIDROLOGÍA BÁSICA Y APLICADA, GRUPO DE ] INVESTIGACIÓN EN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, 2007.
- [31 SMART ENERGY EDUCATION, «CICLO HIDROLÓGICO,» 2016. [EN ] LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://STEM.GUIDE/TOPIC/CICLO-HIDROLOGICO/?LANG=ES](https://stem.guide/topic/ciclo-hidrologico/?lang=es).
- [32 G. POVEDA, O. MESA Y J. VÉLEZ, HIDROLOGÍA DE COLOMBIA: EL CICLO ] DEL AGUA EN UNA GEOGRAFÍA COMPLEJA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2023.
- [33 D. QIN, J. LIU, H. WANG, J. WANG, H. LI, J. CHU Y G. CHEN, ] «THEORETICAL FRAMEWORK OF DUALISTIC NATURE–SOCIAL WATER CYCLE,» *CHIN. SCI. BULL*, VOL. 59, P. 810–820, 2014.
- [34 H. COTLER, A. GALINDO, I. GONZÁLEZ, R. PINEDA Y E. RÍOS, ] «CUENCAS HIDROGRÁFICAS. FUNDAMENTOS Y PERSPECTIVAS PARA SU MANEJO Y GESTIÓN,» SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, 2013.
- [35 A. SÁNCHEZ, R. GARCÍA Y A. PALMA, LA CUENCA HIDROGRÁFICA: ] UNIDAD BÁSICA DE PLANEACIÓN Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES, 2003.
- [36 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, ] FORGAES, CONSORCIO CARE, «MANUAL DE MANEJO DE CUENCAS,» 2018.
- [37 J. ORDOÑEZ, «¿QUÉ ES CUENCA HIDROLÓGICA? CARTILLA TÉCNICA,» ] SOCIEDAD GEOGRÁFICA DE LIMA, 2011.
- [38 SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN DE TIERRAS RURALES E ] INFRAESTRUCTURA TECNOLÓGICA, «COBERTURA Y USO DE LA TIERRA,» 2020.
- [39 A. GARCÍA, J. TORRENT, M. LÓPEZ Y A. DEL CAMPO, «INFLUENCIA DE ] LA VEGETACIÓN EN EL CICLO HIDROLÓGICO, FACTORES ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN,» 2011. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://SECFORRESTALES.ORG/PUBLICACIONES/INDEX.PHP/CUADERNOS\\_SECF/ARTICLE/VIEW/10151/10055](https://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernos_secf/article/view/10151/10055).
- [40 COMISIÓN NACIONAL FORESTAL, «LOS BOSQUES Y EL CICLO DEL ] AGUA,» 24 03 2020. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.GOB.MX/CONAFOR/ARTICULOS/LOS-BOSQUES-Y-EL-CICLO-DEL-AGUA](https://www.gob.mx/conafor/articulos/los-bosques-y-el-ciclo-del-agua).
- [41 S. RODRÍGUEZ Y M. DELGADO, «LOS BOSQUES COMO REGULADORES ] DEL CICLO DE AGUA PARA DISMINUIR LOS RIESGOS DE INUNDACIONES,» 07 09 2020. [EN LÍNEA]. AVAILABLE:

- [HTTP://SEDICI.UNLP.EDU.AR/BITSTREAM/HANDLE/10915/130930/DOCUMENTO\\_COMPLETO.PDF-PDFA.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y.](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/130930/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [42 P. GENTINE, «LA VEGETACIÓN CONTROLA EL FUTURO DEL CICLO DEL AGUA,» 03 04 2018. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.EUROPAPRESS.ES/CIENCIA/CAMBIO-CLIMATICO/NOTICIA-VEGETACION-CONTROLA-FUTURO-CICLO-AGUA-20180403123558.HTML.](https://www.europapress.es/ciencia/cambio-climatico/noticia-vegetacion-controla-futuro-ciclo-agua-20180403123558.html)
- [43 R. MORALES Y A. GÓMEZ, «INTERCEPTACIÓN Y CAPTACIÓN DE AGUA POR LA VEGETACIÓN,» 2017.
- [44 BANCO DE OCCIDENTE, «LOS BOSQUES Y SU IMPORTANCIA EN LA REGULACIÓN DEL AGUA,» 29 09 2023. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://COMUNIDADPLANETAAZUL.COM/LOS-BOSQUES-Y-EL-CICLO-DEL-AGUA/.](https://comunidadplanetaazul.com/los-bosques-y-el-ciclo-del-agua/)
- [45 C. LÓPEZ, «COBERTURA Y USO DE LA TIERRA,» 2018. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.CORNARE.GOV.CO/POMCAS/PLANES-DE-ORDENACION/DOCUMENTOSFASESNARE/DIAGNOSTICO/CAPITULO 4.CARACTERIZACION-FISICO-BIOTICA/4.11\\_COBERTURAS.PDF.](https://www.cornare.gov.co/pomcas/planes-de-ordenacion/documentosfasesnare/diagnostico/capitulo4.caracterizacion-fisico-biotica/4.11_coberturas.pdf)
- [46 L. PIMIENTA Y E. LÓPEZ, «LA COBERTURA Y EL USO DEL SUELO,» 2022. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.SABERMAS.UMICH.MX/ARCHIVO/ARTICULOS/599-NUMERO-67/1193-LA-COBERTURA-Y-EL-USO-DEL-SUELO.HTML.](https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/599-numero-67/1193-la-cobertura-y-el-uso-del-suelo.html)
- [47 M. TRUJILLO, A. LIBEROFF, N. PESSACG, C. PACHECO Y S. FLAHERTY, «METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE USO Y COBERTURA DE SUELO,» 11 08 2022. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://SEDICI.UNLP.EDU.AR/BITSTREAM/HANDLE/10915/140748/DOCUMENTO\\_COMPLETO.PDF-PDFA.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y.](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/140748/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [48 E. PABÓN, «ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE CAMBIO DE USO Y COBERTURA DEL SUELO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TABACAY,» 2022. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://REPOSITORIO.UASB.EDU.EC/BITSTREAM/10644/8687/1/T3801-MCCSD-PABON-ANALISIS.PDF.](https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/8687/1/T3801-MCCSD-PABON-ANALISIS.PDF)
- [49 MAE, «COBERTURA Y USO DEL SUELO,» 2016. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://IDE.AMBIENTE.GOB.EC/MAPAININTERACTIVO/.](https://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/)
- [50 H. VERA, «APLICACIÓN DEL MODELO GR2M,» 2011.
- [51 R. ZUBIETA, W. LAQUI Y W. LAVADO, «MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO LLAVE A PARTIR DE DATOS DE PRECIPITACIÓN OBSERVADA Y DE SATÉLITE, PERÍODO 2011-2015, PUNO, PERÚ,» *TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA*, VOL. 9, N° 5, PP. 85-105, 2018.
- [52 D. MORIASI, J. ARNOLD, M. VAN, R. BINGER, R. HARMEL Y T. VEITH, «MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS,» 2017. [EN LÍNEA].

- [53] G. COLÍN, E. PALACIOS, D. FERNÁNDEZ, A. LÓPEZ, H. FLORES, R. ASCENCIO Y E. CANALES, «MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO SWAT EMPLEANDO DIFERENTES DISTRIBUCIONES ESPACIALES DEL TIPO SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MIXTECO,» *TERRA LATINOAMERICANA*, VOL. 41, PP. 1-15, 2023.
- [54] CENTRO DE CAMBIO GLOBAL-UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE; STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE, «GUÍA METODOLÓGICA – MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE RECURSOS HÍDRICOS CON EL MODELO WEAP,» 2009.
- [55] PNUMA, OMM, «INFORME ESPECIAL DEL IPCC,» 2000. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://ARCHIVE.IPCC.CH/PDF/SPECIAL-REPORTS/SPM/SRES-SP.PDF](https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf).
- [56] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION , «MODELO CLIMÁTICO: CAMBIO DE TEMPERATURA (RCP 4.5) - 2006 - 2100,» 17 NOVIEMBRE 2013. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://SOS-NOAA-GOV.TRANSLATE.GOOG/CATALOG/DATASETS/CLIMATE-MODEL-TEMPERATURE-CHANGE-RCP-45-2006-2100/?\\_X\\_TR\\_SL=EN&\\_X\\_TR\\_TL=ES&\\_X\\_TR\\_HL=ES&\\_X\\_TR\\_PTO=SGE#:~:TEXT=EL%20ESCENARIO%20RCP%204.5%20ES%20UN%20ESCENARIO,LA S%20EMISIONES%20DE%20GASES%20DE%20EFECTO%2](https://sos-noaa-gov.translate.google.com/catalog/datasets/climate-model-temperature-change-rcp-45-2006-2100/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:TEXT=EL%20ESCENARIO%20RCP%204.5%20ES%20UN%20ESCENARIO,LA%20EMISIONES%20DE%20GASES%20DE%20EFECTO%2).
- [57] A. THOMSON, C. CALVINO, S. SMITH, G. KYLE, A. VOLKE, P. PATEL, S. DELGADO, B. BOND, M. WISE, L. CLARKE Y J. EDMOND, «RCP4.5: UNA VÍA PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL FORZAMIENTO RADIATIVO PARA EL AÑO 2100,» *CLIMATIC CHANGE*, N° 109, PP. 77-94, 2011.
- [58] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, «MODELO CLIMÁTICO: CAMBIO DE TEMPERATURA (RCP 8.5) - 2006 - 2100,» 17 NOVIEMBRE 2013. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://SOS-NOAA-GOV.TRANSLATE.GOOG/CATALOG/DATASETS/CLIMATE-MODEL-TEMPERATURE-CHANGE-RCP-85-2006-2100/?\\_X\\_TR\\_SL=EN&\\_X\\_TR\\_TL=ES&\\_X\\_TR\\_HL=ES&\\_X\\_TR\\_PTO=SGE#:~:TEXT=EN%20EL%20ESCENARIO%20DE%20EMISIONES%20RCP%208.5%20C,CONDUCEN%20A%20ALTOS%20NIVELES%20DE%20CON](https://sos-noaa-gov.translate.google.com/catalog/datasets/climate-model-temperature-change-rcp-85-2006-2100/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:TEXT=EN%20EL%20ESCENARIO%20DE%20EMISIONES%20RCP%208.5%20C,CONDUCEN%20A%20ALTOS%20NIVELES%20DE%20CON).
- [59] GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN EL PANGUI, «ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y FORMULACIÓN DEL PLAN DE USO Y GESTIÓN DEL SUELO PUGS DEL CANTÓN EL PANGUI,» 2020. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://ELPANGUI.GOB.EC/WP-CONTENT/UPLOADS/2022/08/PDOT-EL-PANGUI-FINAL-1.PDF](https://elpangui.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/PDOT-EL-PANGUI-FINAL-1.pdf).
- [60] K. GALLO Y B. IZA, «MODELAMIENTO CON SWAT Y GR2M PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA,» UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, 2018.
- [61] J. RODRÍGUEZ, «AJUSTE DE LA ECUACIÓN HARGREAVES-SAMANI Y EVALUACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN CON DATOS LIMITADOS,» 2021. [EN LÍNEA]. AVAILABLE:

[HTTP://COLPOSDIGITAL.COLPOS.MX:8080/XMLUI/BITSTREAM/HANDLE/10521/4687/RODRIGUEZ\\_GAETA\\_JM\\_DC\\_HIDROCIENCIAS\\_2021.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y#:~:TEXT=LA%20ECUACI%C3%B3N%20DE%20HARGREAVES%20Y%20SAMANI%20\(1985\)%2C,LA%20ECUACI%C3%B3N%20\[4\]%20\(HARGREAVES%20Y%20SA](http://colposdigital.colpos.mx:8080/XMLUI/BITSTREAM/HANDLE/10521/4687/RODRIGUEZ_GAETA_JM_DC_HIDROCIENCIAS_2021.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y#:~:TEXT=LA%20ECUACI%C3%B3N%20DE%20HARGREAVES%20Y%20SAMANI%20(1985)%2C,LA%20ECUACI%C3%B3N%20[4]%20(HARGREAVES%20Y%20SA)

- [62] D. CARRERA, «RELLENO DE SERIES ANUALES DE DATOS METEOROLÓGICOS MEDIANTE MÉTODOS ESTADÍSTICOS EN LA ZONA COSTERA E INTERANDINA DEL ECUADOR, Y CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA,» 2016. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.ACADEMIA.EDU/83272024/RELLENO\\_DE\\_SERIES\\_ANUALES\\_DE\\_DATOS\\_METEOROL%C3%B3GICOS\\_MEDIANTE\\_M%C3%A9TODOS\\_ESTADÍSTICOS\\_EN\\_LA\\_ZONA\\_COSTERA\\_E\\_INTERANDINA\\_DEL\\_ECUADOR\\_Y\\_CÁLCULO\\_DE\\_LA\\_PRECIPITACIÓN\\_MEDIA](https://www.academia.edu/83272024/RELLENO_DE_SERIES_ANUALES_DE_DATOS_METEOROL%C3%B3GICOS_MEDIANTE_M%C3%A9TODOS_ESTADÍSTICOS_EN_LA_ZONA_COSTERA_E_INTERANDINA_DEL_ECUADOR_Y_CÁLCULO_DE_LA_PRECIPITACIÓN_MEDIA).
- [63] C. HERRERA, J. CAMPOS Y F. CARRILLO, «ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES DE PRECIPITACIÓN POR EL MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL: CASO DE ESTUDIO CUENCA GUADALUPE, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO,» *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, VOL. 25, N° 71, PP. 34-44, 2017.
- [64] E. TERRERO, A. LEGRÁ Y A. LAMORÚ, «MÉTODO DE INVERSO DE LA POTENCIA DE LA DISTANCIA PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD DEL VIENTO,» *INGENIERÍA ENERGÉTICA*, VOL. 35, N° 3, PP. 263-273, 2014.
- [65] F. HERNÁNDEZ Y M. BROWN, «EL CONCEPTO DE DISTANCIA Y SU APLICACIÓN EN ESTADÍSTICA MULTIVARIADA,» 2014. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.AMAI.ORG/REVISTAAMAI/27-8/REVISTAAMAI-ARTICULO-20050428\\_105423.PDF](https://www.amai.org/revistaamai/27-8/revista-amai-articulo-20050428_105423.pdf).
- [66] ESCUELA DE CIENCIAS DEL AGUA, «CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y CUENCAS DE DRENAJE,» 8 6 2019. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW-USGS-GOV.TRANSLATE.GOOG/SPECIAL-TOPICS/WATER-SCIENCE-SCHOOL/SCIENCE/WATERSHEDS-AND-DRAINAGE-BASINS?\\_X\\_TR\\_SL=EN&\\_X\\_TR\\_TL=ES&\\_X\\_TR\\_HL=ES&\\_X\\_TR\\_PTO=TC](https://www-usgs-gov.translate.google.com/special-topics/water-science-school/science/watersheds-and-drainage-basins?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc).
- [67] F. LIN, X. CHEN Y H. YAO, «EVALUATING THE USE OF NASH-SUTCLIFFE EFFICIENCY COEFFICIENT IN GOODNESS-OF-FIT MEASURES FOR DAILY RUNOFF SIMULATION WITH SWAT,» *JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING*, VOL. 22, 2017.
- [68] A. ÁLVAREZ, R. VILLAVICENCIO, J. RUIZ Y A. SANTIAGO, «EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO A PARTIR DE LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DEL AÑO 2050 EN EL BALANCE HÍDRICO DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA LA PRIMAVERA, JALISCO, MÉXICO,» *ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS SCRIPTA*, VOL. 6, N° 1, PP. 53-74, 2020.
- [69] D. MENA, M. CAÑÓN Y A. SUÁREZ, «MODELACIÓN DE LOS IMPACTOS DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA EN NORTE DE SANTANDER,» *REVISTA EIA*, VOL. 17, N° 33, 2020.

- [70 INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC),  
] «CLIMATE CHANGE 2007: SYNTHESIS REPORT. CONTRIBUTION OF  
WORKING GROUPS I, II AND III TO THE FOURTH ASSESSMENT  
REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE  
CHANGE,» 2007. [EN LÍNEA]. AVAILABLE:  
[HTTPS://WWW.IPCC.CH/REPORT/AR4/SYR/](https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/).
- [71]. CALLES-GARCÍA Y P. GONZÁLEZ-PÉREZ, LA BIBLIA DEL  
] FOOTPRINTING, 2011.
- [72 WWW.ELHACKER.NET, «WWW.ELHACKER.NET,» [EN LÍNEA]. AVAILABLE:  
] [HTTPS://WWW.ELHACKER.NET/TRUCOS\\_GOOGLE.HTML](https://www.elhacker.net/trucos_google.html).
- [73 AGRIMETSOFT, «COEFICIENTE DE EFICIENCIA DEL MODELO DE NASH  
] SUTCLIFFE,» 2019. [EN LÍNEA]. AVAILABLE: [HTTPS://AGRIMETSOFT-  
COM.TRANSLATE.GOOG/CALCULATORS/NASH%20SUTCLIFFE%20MO  
DEL%20EFFICIENCY%20COEFFICIENT?\\_X\\_TR\\_SL=EN&\\_X\\_TR\\_TL=ES&\\_X\\_  
TR\\_HL=ES&\\_X\\_TR\\_PTO=WA#](https://agrimetsoft-com.translate.google.com/calculators/nash%20sutcliffe%20model%20efficiency%20coefficient?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wa#).

# ANEXOS

## ANEXO 1. VALORES DE PRECIPITACIÓN

**TABLA 10. VALORES DE LA MEDIA MENSUAL DE PRECIPITACIÓN EN MM**

MES/AÑO	ESTACIONES				PROMEDIO
	M189	M190	M502	M506	
ENE-03	92,4	239,8	167,7	159,6	164,9
FEB-03	89,1	356,0	121,8	237,0	201,0
MAR-03	146,0	117,3	70,0	78,1	102,9
ABR-03	186,2	107,4	216,9	71,5	145,5
MAY-03	242,6	531,9	183,8	354,1	328,1
JUN-03	276,8	311,6	154,5	207,4	237,6
JUL-03	146,8	309,8	130,0	206,2	198,2
AGO-03	102,2	160,0	67,7	106,5	109,1
SEP-03	74,8	37,7	81,7	25,1	54,8
OCT-03	82,8	9,9	6,6	6,6	26,5
NOV-03	42,8	71,2	106,8	47,4	67,1
DIC-03	95,2	171,6	66,0	114,2	111,7
ENE-04	37,6	123,2	74,9	82,0	79,4
FEB-04	78,0	148,1	79,3	98,6	101,0
MAR-04	175,4	338,1	185,9	225,1	231,1
ABR-04	167,0	288,6	175,0	185,1	203,9
MAY-04	213,4	439,1	159,8	292,3	276,1
JUN-04	358,4	433,8	148,0	288,8	307,3
JUL-04	232,6	524,9	169,5	349,4	319,1
AGO-04	123,8	214,0	158,6	80,0	144,1
SEP-04	90,2	202,3	101,8	134,7	132,3
OCT-04	171,6	221,7	152,2	147,6	173,3
NOV-04	162,0	144,8	188,1	96,4	147,8
DIC-04	132,6	114,9	125,3	76,5	112,3
ENE-05	72,0	55,7	72,0	37,1	59,2
FEB-05	157,2	206,9	165,5	137,7	166,8
MAR-05	69,0	298,2	126,0	198,5	172,9
ABR-05	218,5	575,6	265,0	383,2	360,6
MAY-05	111,0	341,6	152,4	227,4	208,1
JUN-05	303,2	711,8	164,9	473,8	413,4
JUL-05	162,4	340,1	159,3	226,4	222,1
AGO-05	26,4	266,8	42,9	177,6	128,4
SEP-05	129,5	259,3	93,8	172,6	163,8
OCT-05	191,0	157,2	94,8	236,2	169,8
NOV-05	75,8	85,3	83,8	128,1	93,3
DIC-05	171,2	192,6	171,8	289,3	206,2
ENE-06	137,7	392,5	147,9	261,3	234,9
FEB-06	130,2	196,3	158,2	270,5	188,8

MES/AÑO	ESTACIONES				PROMEDIO
	M189	M190	M502	M506	
MAR-06	156,7	432,2	166,0	287,7	260,6
ABR-06	216,0	404,5	166,8	269,3	264,2
MAY-06	115,1	272,5	101,4	181,4	167,6
JUN-06	248,5	336,0	222,3	223,7	257,6
JUL-06	124,6	282,1	155,3	187,8	187,5
AGO-06	212,4	286,0	89,8	190,4	194,7
SEP-06	134,0	344,2	86,4	229,1	198,4
OCT-06	85,4	340,1	65,7	226,4	179,4
NOV-06	161,7	427,7	116,7	284,7	247,7
DIC-06	190,5	512,3	239,4	341,0	320,8
ENE-07	172,7	205,9	176,0	249,4	201,0
FEB-07	46,1	39,0	55,7	96,1	59,2
MAR-07	113,6	205,4	216,0	287,7	205,7
ABR-07	202,5	216,3	335,1	560,8	328,7
MAY-07	200,1	121,8	230,9	308,5	215,3
JUN-07	251,2	296,3	282,6	402,0	308,0
JUL-07	102,8	126,0	142,7	231,8	150,8
AGO-07	135,1	155,6	188,3	376,7	213,9
SEP-07	111,0	179,3	100,4	290,2	170,2
OCT-07	133,8	199,7	262,7	272,8	217,3
NOV-07	144,7	285,6	193,4	277,9	225,4
DIC-07	104,3	156,7	112,8	160,8	133,7
ENE-08	54,8	140,5	132,8	198,6	131,7
FEB-08	168,1	330,6	120,7	632,0	312,9
MAR-08	167,0	0,0	145,7	282,6	148,8
ABR-08	180,5	154,8	159,0	141,7	159,0
MAY-08	323,7	255,5	198,4	154,5	233,0
JUN-08	245,8	184,1	205,7	100,6	184,1
JUL-08	194,3	180,5	198,2	297,7	217,7
AGO-08	118,5	150,2	82,0	162,1	128,2
SEP-08	162,3	169,1	239,2	229,6	200,1
OCT-08	126,8	242,8	196,3	260,4	206,6
NOV-08	103,1	104,7	264,2	237,1	177,3
DIC-08	72,4	148,7	122,6	151,8	123,9
ENE-09	166,9	213,6	190,7	274,0	211,3
FEB-09	75,0	147,9	0,0	251,3	118,6
MAR-09	93,2	261,9	145,8	288,5	197,4
ABR-09	280,0	221,6	225,2	208,8	233,9
MAY-09	163,6	188,6	143,2	203,7	174,8
JUN-09	201,7	211,4	140,4	225,8	194,8
JUL-09	199,4	270,8	228,7	309,6	252,1
AGO-09	150,0	434,1	136,9	289,0	252,5
SEP-09	81,5	144,1	143,5	299,2	167,1
OCT-09	81,4	153,4	141,9	129,1	126,5

MES/AÑO	ESTACIONES				PROMEDIO
	M189	M190	M502	M506	
NOV-09	33,6	258,1	102,0	200,8	148,6
DIC-09	129,5	139,5	211,5	97,7	144,6
ENE-10	58,4	126,1	55,4	175,9	104,0
FEB-10	180,7	165,5	103,8	275,5	181,4
MAR-10	68,0	124,9	95,8	316,3	151,3
ABR-10	147,3	298,3	217,5	203,0	216,5
MAY-10	312,7	337,6	290,6	182,7	280,9
JUN-10	203,0	194,1	149,4	167,7	178,6
JUL-10	135,5	270,9	292,8	79,7	194,7
AGO-10	80,2	64,5	94,2	78,3	79,3
SEP-10	113,6	143,7	93,0	34,2	96,1
OCT-10	128,2	96,1	87,3	45,0	89,2
NOV-10	122,1	129,1	61,5	55,1	92,0
DIC-10	106,5	156,2	102,5	91,8	114,2
ENE-11	106,4	147,7	69,9	58,9	95,7
FEB-11	113,2	172,9	156,6	99,6	135,6
MAR-11	65,2	204,8	113,9	237,5	155,3
ABR-11	172,7	327,5	289,6	208,3	249,5
MAY-11	235,5	194,6	190,3	396,7	254,3
JUN-11	186,1	130,3	137,1	46,6	125,0
JUL-11	211,9	227,0	205,4	160,7	201,3
AGO-11	119,5	39,2	87,9	26,1	68,2
SEP-11	174,4	84,0	131,2	55,9	111,4
OCT-11	76,7	121,7	47,7	81,0	81,8
NOV-11	135,5	94,6	0,0	63,0	73,3
DIC-11	186,6	197,3	193,8	279,9	214,4
ENE-12	206,4	313,8	180,6	156,9	214,4
FEB-12	146,3	222,4	128,0	193,5	172,6
MAR-12	162,1	246,4	141,9	375,5	231,5
ABR-12	200,4	304,6	237,9	347,4	272,6
MAY-12	145,3	479,5	199,1	319,2	285,8
JUN-12	272,8	471,8	182,0	314,1	310,2
JUL-12	228,6	303,9	181,1	202,3	229,0
AGO-12	128,7	335,3	184,7	223,2	218,0
SEP-12	91,9	232,5	97,8	154,8	144,3
OCT-12	140,2	298,9	71,0	199,0	177,3
NOV-12	30,4	61,6	124,9	41,0	64,5
DIC-12	91,6	246,4	106,7	164,0	152,2
ENE-13	157,6	487,5	128,6	324,5	274,5
FEB-13	161,5	434,9	207,4	289,5	273,3
MAR-13	146,1	277,6	118,9	118,6	165,3
ABR-13	123,2	234,1	149,9	149,5	164,2
MAY-13	250,2	475,4	226,6	226,0	294,6
JUN-13	314,1	596,9	247,7	247,0	351,4

MES/AÑO	ESTACIONES				PROMEDIO
	M189	M190	M502	M506	
JUL-13	234,7	446,0	189,8	189,3	265,0
AGO-13	114,9	413,0	100,6	274,9	225,8
SEP-13	156,9	277,6	177,0	184,8	199,1
OCT-13	101,1	343,3	166,4	228,5	209,8
NOV-13	51,2	153,1	84,5	101,9	97,7
DIC-13	100,2	327,9	121,9	218,3	192,1

ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

## ANEXO 2. VALORES DE TEMPERATURA

**TABLA 11. VALORES DE LA MEDIA MENSUAL DE TEMPERATURA EN °C**

MES/ESTACIÓN	M190	M189	MEDIA
ENE-03	33,3	23,5	28,4
FEB-03	33,6	23,8	28,7
MAR-03	33,3	23,5	28,4
ABR-03	33,9	24,0	28,9
MAY-03	32,2	22,6	27,4
JUN-03	31,8	22,3	27,1
JUL-03	30,1	20,9	25,5
AGO-03	31,5	22,0	26,7
SEP-03	32,5	22,9	27,7
OCT-03	34,5	24,5	29,5
NOV-03	34,0	24,1	29,1
DIC-03	34,0	24,1	29,1
ENE-04	35,1	25	30,1
FEB-04	33,3	23,5	28,4
MAR-04	33,5	23,7	28,6
ABR-04	34,1	24,2	29,2
MAY-04	32,8	23,1	27,9
JUN-04	30,8	21,5	26,2
JUL-04	31,3	21,9	26,6
AGO-04	31,1	21,7	26,4
SEP-04	32,1	22,5	27,3
OCT-04	34,6	24,6	29,6
NOV-04	35,7	25,5	30,6
DIC-04	35,0	24,9	29,9
ENE-05	35,0	24,9	29,9
FEB-05	34,1	24,2	29,2
MAR-05	34,3	24,3	29,3
ABR-05	33,8	23,9	28,8
MAY-05	34,1	24,2	29,2
JUN-05	32,4	22,8	27,6
JUL-05	32,7	23	27,8
AGO-05	32,5	22,9	27,7

MES/ESTACIÓN	M190	M189	MEDIA
SEP-05	33,2	23,4	28,3
OCT-05	33,6	23,8	28,7
NOV-05	33,4	23,6	28,5
DIC-05	33,3	23,5	28,4
ENE-06	33,8	23,9	28,8
FEB-06	33,6	23,8	28,7
MAR-06	33,4	23,6	28,5
ABR-06	33,3	23,5	28,4
MAY-06	31,8	22,3	27,1
JUN-06	31,7	22,2	26,9
JUL-06	31,2	21,8	26,5
AGO-06	31,1	21,7	26,4
SEP-06	31,9	22,4	27,2
OCT-06	33,9	24	28,9
NOV-06	34,3	24,3	29,3
DIC-06	34,0	24,1	29,1
ENE-07	23,7	23,5	23,6
FEB-07	24,1	23,9	24,0
MAR-07	23,4	23,1	23,3
ABR-07	23,7	23,4	23,6
MAY-07	23,6	22,8	23,2
JUN-07	21,2	21,2	21,2
JUL-07	22,9	22,2	22,6
AGO-07	22	21,8	21,9
SEP-07	21,8	21,5	21,7
OCT-07	23,5	23,1	23,3
NOV-07	23,8	23,6	23,7
DIC-07	23,6	23,7	23,7
ENE-08	22,8	23,2	23,0
FEB-08	22,5	23	22,8
MAR-08	32,9	23,2	28,1
ABR-08	23,3	23,4	23,4
MAY-08	22,5	22,5	22,5
JUN-08	22,2	22,1	22,2
JUL-08	21,5	21,4	21,5
AGO-08	22,1	22,2	22,2
SEP-08	22,4	22,3	22,4
OCT-08	23,4	23,5	23,5
NOV-08	24,4	24,3	24,4
DIC-08	24,5	24,1	24,3
ENE-09	23,1	22,9	23,0
FEB-09	22,8	22,9	22,9
MAR-09	23,5	23,4	23,5
ABR-09	23,5	23,3	23,4
MAY-09	23,1	23,3	23,2

MES/ESTACIÓN	M190	M189	MEDIA
JUN-09	22,5	22,3	22,4
JUL-09	22,1	22,3	22,2
AGO-09	31,9	22,4	27,2
SEP-09	23,5	23,1	23,3
OCT-09	24,4	24	24,2
NOV-09	24,6	24,2	24,4
DIC-09	24,4	24	24,2
ENE-10	23,4	23,8	23,6
FEB-10	24,5	23,9	24,2
MAR-10	24,9	24,4	24,7
ABR-10	24,2	24	24,1
MAY-10	24	23,6	23,8
JUN-10	22,8	22,1	22,5
JUL-10	23,5	23	23,3
AGO-10	22,7	22,2	22,5
SEP-10	23,6	22,8	23,2
OCT-10	24,5	24,2	24,4
NOV-10	24,9	24,2	24,6
DIC-10	24,3	23,3	23,8
ENE-11	24,2	22,9	23,6
FEB-11	24,3	23,1	23,7
MAR-11	24,6	23,6	24,1
ABR-11	23,3	22,8	23,1
MAY-11	23	22,5	22,8
JUN-11	22,9	22,3	22,6
JUL-11	22	21,2	21,6
AGO-11	23,2	22,1	22,7
SEP-11	22,3	21,7	22,0
OCT-11	23,1	23,6	23,4
NOV-11	24,5	23,7	24,1
DIC-11	24	23,3	23,7
ENE-12	32,7	23	27,8
FEB-12	32,3	22,7	27,5
MAR-12	31,8	22,3	27,1
ABR-12	32,9	23,2	28,1
MAY-12	31,6	22,1	26,8
JUN-12	31,5	22	26,7
JUL-12	30,4	21,1	25,7
AGO-12	30,8	21,5	26,2
SEP-12	31,2	21,8	26,5
OCT-12	32,9	23,2	28,1
NOV-12	34,3	24,3	29,3
DIC-12	33,4	23,6	28,5
ENE-13	32,5	22,9	27,7
FEB-13	32,3	22,7	27,5

MES/ESTACIÓN	M190	M189	MEDIA
MAR-13	32,8	23,1	27,9
ABR-13	32,5	22,9	27,7
MAY-13	32,5	22,9	27,7
JUN-13	31,2	21,8	26,5
JUL-13	30,2	21	25,6
AGO-13	31,0	21,6	26,3
SEP-13	31,1	21,7	26,4
OCT-13	33,0	23,3	28,2
NOV-13	35,0	24,9	29,9
DIC-13	34,3	24,3	29,3

ELABORADO POR: ADRIÁN JUMBO, 2025.

### ANEXO 3. VALORES DE CAUDAL

**Tabla 12.** Valores de la media mensual de caudal (l/s)

PERIODO	H884	H887	H889	H890	MEDIA
ene-03	174,0	77,8	65,1	136,5	113,4
feb-03	220,0	79,4	69,4	145,4	128,5
mar-03	143,0	69,9	67,6	141,7	105,5
abr-03	331,0	150,1	201,5	422,4	276,2
may-03	420,0	303,2	187,7	393,6	326,1
jun-03	288,0	192,2	311,1	352,2	285,9
jul-03	345,0	196,3	308,4	346,5	299,0
ago-03	206,0	134,8	49,3	103,3	123,4
sep-03	146,0	123,3	47,8	100,2	104,3
oct-03	131,0	255,5	41,5	87,0	128,7
nov-03	114,0	48,7	23,3	48,7	58,7
dic-03	94,0	142,1	78,5	164,5	119,8
ene-04	85,0	55,5	53,2	111,5	76,3
feb-04	70,0	44,6	35,3	73,9	56,0
mar-04	230,0	121,8	100,5	210,6	165,7
abr-04	179,0	135,8	55,2	115,6	121,4
may-04	266,0	291,9	84,3	176,8	204,8
jun-04	423,0	639,9	194,9	408,5	416,6
jul-04	272,0	203,7	119,7	250,9	211,6
ago-04	156,0	155,4	74,1	155,4	135,2
sep-04	169,0	141,2	43,9	91,9	111,5
oct-04	218,0	222,1	49,5	103,8	148,3
nov-04	217,0	159,6	52,6	110,2	134,9
dic-04	234,0	162,4	80,9	169,7	161,7
ene-05	266,4	103,6	32,8	221,7	156,1
feb-05	232,5	301,6	90,0	286,0	227,5
mar-05	121,4	188,2	153,0	128,6	147,8
abr-05	249,3	342,6	102,0	261,9	238,9
may-05	288,4	404,0	59,2	289,5	260,3
jun-05	281,3	392,9	157,2	131,3	240,7

PERIODO	H884	H887	H889	H890	MEDIA
jul-05	281,4	293,6	102,4	264,6	235,5
ago-05	159,2	201,0	45,7	203,7	152,4
sep-05	259,0	54,4	58,5	285,4	164,3
oct-05	280,0	89,1	170,4	397,5	234,3
nov-05	87,2	88,0	168,3	384,1	181,9
dic-05	77,8	73,2	139,9	120,3	102,8
ene-06	225,9	364,8	84,1	50,3	181,3
feb-06	218,1	345,4	78,3	48,6	172,6
mar-06	205,1	313,1	68,6	45,7	158,1
abr-06	180,5	251,9	50,3	40,2	130,7
may-06	196,6	292,0	62,3	43,8	148,7
jun-06	226,4	366,1	84,5	50,4	181,9
jul-06	234,4	385,8	90,3	52,2	190,7
ago-06	186,5	266,8	54,7	41,5	137,4
sep-06	172,3	231,6	44,2	38,4	121,6
oct-06	168,5	222,2	41,4	37,5	117,4
nov-06	161,0	203,4	35,8	35,9	109,0
dic-06	185,0	263,1	53,6	41,2	135,7
ene-07	264,0	1887,0	107,6	211,9	617,6
feb-07	111,0	835,4	55,5	253,8	313,9
mar-07	168,0	1227,2	62,0	298,7	439,0
abr-07	198,0	1433,3	71,0	260,2	490,6
may-07	277,0	1976,3	86,9	270,0	652,6
jun-07	337,0	2388,7	185,8	134,9	761,6
jul-07	165,0	1206,5	65,2	220,6	414,3
ago-07	177,0	1289,0	100,6	262,3	457,2
sep-07	137,0	1014,1	72,0	267,6	372,7
oct-07	151,0	1110,3	44,5	278,3	396,0
nov-07	360,0	2546,7	103,4	283,5	823,4
dic-07	129,0	959,1	44,9	380,9	378,5
ene-08	155,0	573,3	66,4	440,6	308,8
feb-08	270,0	1133,7	95,8	871,3	592,7
mar-08	196,0	685,0	72,4	526,4	369,9
abr-08	205,0	305,6	77,9	233,2	205,4
may-08	248,0	287,5	65,8	221,0	205,5
jun-08	254,0	329,2	74,7	253,0	227,7
jul-08	216,0	325,2	122,0	250,0	228,3
ago-08	151,0	271,9	94,6	209,0	181,6
sep-08	168,0	292,0	67,8	224,4	188,0
oct-08	144,0	296,1	58,8	227,6	181,6
nov-08	164,0	265,9	39,1	204,4	168,3
dic-08	159,0	364,6	34,5	280,2	209,6
ene-09	176,0	373,1	63,4	286,8	224,8
feb-09	147,0	337,7	62,2	259,6	201,6
mar-09	186,0	311,5	68,9	239,4	201,5

PERIODO	H884	H887	H889	H890	MEDIA
abr-09	247,0	290,2	92,1	223,0	213,1
may-09	196,0	278,3	75,6	213,9	190,9
jun-09	172,0	374,7	94,6	288,0	232,3
jul-09	255,0	382,1	131,8	293,6	265,6
ago-09	530,1	162,0	93,5	228,5	253,5
sep-09	164,0	304,2	64,3	233,8	191,6
oct-09	124,0	272,0	61,9	209,0	166,7
nov-09	0,0	388,5	40,3	298,6	181,8
dic-09	156,0	328,2	79,3	252,2	203,9
ene-10	397,6	310,7	73,9	238,8	255,3
feb-10	596,5	324,6	76,1	249,5	311,7
mar-10	439,7	290,0	70,5	222,9	255,8
abr-10	602,3	318,1	69,0	244,4	308,4
may-10	972,0	343,2	101,0	263,7	420,0
jun-10	648,0	305,1	153,8	234,5	335,4
jul-10	596,3	295,8	133,2	227,3	313,1
ago-10	393,5	348,7	45,0	268,0	263,8
sep-10	320,5	310,4	45,9	238,5	228,8
oct-10	746,6	555,9	24,5	427,2	438,6
nov-10	719,7	598,7	16,8	460,1	448,8
dic-10	570,3	474,3	18,0	364,5	356,8
ene-11	359,2	504,8	25,1	387,9	319,2
feb-11	388,1	461,2	55,6	354,4	314,8
mar-11	353,7	402,3	29,8	393,5	294,8
abr-11	384,3	347,1	74,3	335,3	285,2
may-11	633,4	257,5	61,4	235,9	297,0
jun-11	118,4	217,1	89,3	235,3	165,0
jul-11	198,9	166,3	196,2	278,1	209,9
ago-11	376,1	347,0	61,0	227,8	253,0
sep-11	301,8	115,0	93,6	284,3	198,7
oct-11	368,3	104,0	48,1	202,4	180,7
nov-11	333,0	219,8	34,7	206,9	198,6
dic-11	312,0	223,4	66,3	271,7	218,4
ene-12	343,4	190,7	92,7	146,5	193,3
feb-12	366,5	119,1	88,5	215,5	197,4
mar-12	309,5	101,8	111,2	282,7	201,3
abr-12	349,3	173,6	123,5	333,9	245,1
may-12	354,5	371,0	103,8	130,5	240,0
jun-12	391,2	238,7	130,2	259,4	254,9
jul-12	385,2	283,1	131,0	216,7	254,0
ago-12	392,4	298,3	66,1	313,5	267,6
sep-12	312,4	323,9	71,3	396,3	276,0
oct-12	377,5	211,6	41,9	346,9	244,5
nov-12	378,8	246,9	50,5	350,9	256,8
dic-12	364,1	214,7	68,4	326,1	243,3

PERIODO	H884	H887	H889	H890	MEDIA
ene-13	331,7	146,3	141,1	225,1	211,0
feb-13	388,9	89,7	98,9	453,9	257,9
mar-13	307,0	95,9	84,8	393,8	220,4
abr-13	388,1	61,7	64,2	569,6	270,9
may-13	380,6	131,5	94,7	327,0	233,5
jun-13	307,4	331,9	175,6	307,4	280,6
jul-13	360,2	231,2	145,1	368,8	276,3
ago-13	300,8	219,8	87,1	494,0	275,4
sep-13	390,8	117,9	51,6	393,6	238,5
oct-13	319,3	92,3	70,0	397,7	219,8
nov-13	328,2	42,9	28,8	298,5	174,6
dic-13	370,4	47,9	50,1	378,9	211,8

Elaborado por: Adrián Jumbo, 2025.

## ANEXO 4. VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

**Tabla 13.** Valores de la media mensual de evapotranspiración en mm

MES/AÑO	M189	M190	MEDIA
ene-03	4,14	7,75	5,95
feb-03	4,25	7,83	6,04
mar-03	4,29	7,99	6,14
abr-03	4,39	7,99	6,19
may-03	3,66	7,26	5,46
jun-03	3,74	7,59	5,67
jul-03	3,71	8,11	5,91
ago-03	3,92	8,04	5,98
sep-03	4,42	8,68	6,55
oct-03	4,78	8,61	6,70
nov-03	4,73	8,58	6,66
dic-03	4,48	8,18	6,33
ene-04	5,3	9,55	7,43
feb-04	4,19	7,89	6,04
mar-04	4,06	7,48	5,77
abr-04	4,61	8,41	6,51
may-04	3,98	7,6	5,79
jun-04	3,54	7,51	5,53
jul-04	3,73	7,82	5,78
ago-04	4,17	8,73	6,45
sep-04	4,26	8,49	6,38
oct-04	4,6	8,25	6,43
nov-04	5,1	8,89	7,00
dic-04	4,98	8,81	6,90
ene-05	5,12	9,22	7,17
feb-05	4,21	7,62	5,92

MES/AÑO	M189	M190	MEDIA
mar-05	4,35	7,92	6,14
abr-05	3,87	7,2	5,54
may-05	4,41	8,03	6,22
jun-05	4,07	7,85	5,96
jul-05	4,45	8,77	6,61
ago-05	4,42	8,85	6,64
sep-05	4,68	8,81	6,75
oct-05	4,54	8,31	6,43
nov-05	4,52	8,27	6,40
dic-05	4,53	8,32	6,43
ene-06	4,6	8,47	6,54
feb-06	4,48	8,23	6,36
mar-06	4,35	7,96	6,16
abr-06	4,39	8,32	6,36
may-06	4,07	8,03	6,05
jun-06	4,16	8,19	6,18
jul-06	4,02	8,15	6,09
ago-06	4,01	8,13	6,07
sep-06	4,41	8,58	6,50
oct-06	4,86	8,74	6,80
nov-06	4,96	8,83	6,90
dic-06	4,73	8,35	6,54
ene-07	4,27	4,28	4,28
feb-07	4,82	7,01	5,92
mar-07	4,35	5,04	4,70
abr-07	4,35	5,22	4,79
may-07	4,24	4,62	4,43
jun-07	3,51	3,75	3,63
jul-07	4,43	4,74	4,59
ago-07	4,32	4,51	4,42
sep-07	4,24	4,38	4,31
oct-07	4,84	4,83	4,84
nov-07	4,74	4,69	4,72
dic-07	4,76	4,87	4,82
ene-08	4,36	4,26	4,31
feb-08	7,54	7,51	7,53
mar-08	4,56	8,17	6,37
abr-08	4,59	5,4	5,00
may-08	4,16	4,2	4,18
jun-08	4,17	4,47	4,32
jul-08	4,03	3,93	3,98
ago-08	4,56	4,65	4,61
sep-08	4,31	4,6	4,46
oct-08	4,67	4,62	4,65
nov-08	4,89	5,11	5,00

MES/AÑO	M189	M190	MEDIA
dic-08	5,11	5,06	5,09
ene-09	4,11	4,19	4,15
feb-09	4,23	4,13	4,18
mar-09	4,61	4,5	4,56
abr-09	4,3	4,3	4,30
may-09	4,53	4,48	4,51
jun-09	3,97	4,29	4,13
jul-09	3,85	4,16	4,01
ago-09	4,34	8,01	6,18
sep-09	4,64	5,25	4,95
oct-09	4,97	5,35	5,16
nov-09	5,08	5,47	5,28
dic-09	4,72	4,83	4,78
ene-10	4,61	6,64	5,63
feb-10	4,53	6,6	5,57
mar-10	4,72	7,28	6,00
abr-10	4,44	6,69	5,57
may-10	4,28	4,41	4,35
jun-10	3,85	4,08	3,97
jul-10	4,43	4,66	4,55
ago-10	4,67	4,89	4,78
sep-10	5,07	4,98	5,03
oct-10	5,14	5,3	5,22
nov-10	5,08	5,39	5,24
dic-10	4,71	5,04	4,88
ene-11	4,64	4,87	4,76
feb-11	4,75	4,63	4,69
mar-11	5,17	5,16	5,17
abr-11	4,63	4,45	4,54
may-11	4,31	4,28	4,30
jun-11	4,31	4,31	4,31
jul-11	4,1	4,15	4,13
ago-11	4,7	4,95	4,83
sep-11	4,38	4,32	4,35
oct-11	5,48	4,98	5,23
nov-11	5,24	4,95	5,10
dic-11	4,97	7,02	6,00
ene-12	4,95	7,66	6,31
feb-12	4,83	8,21	6,52
mar-12	4,57	8,17	6,37
abr-12	5	8,15	6,58
may-12	4,53	7,54	6,04
jun-12	4,75	6,95	5,85
jul-12	4,48	8,05	6,27
ago-12	5,13	8,37	6,75

MES/AÑO	M189	M190	MEDIA
sep-12	5,08	8,59	6,84
oct-12	5,24	9,49	7,37
nov-12	5,69	9,56	7,63
dic-12	5,56	8,77	7,17
ene-13	4,92	8,45	6,69
feb-13	4,87	7,77	6,32
mar-13	4,96	8,51	6,74
abr-13	5,26	8,58	6,92
may-13	5,06	8,06	6,56
jun-13	4,58	7,96	6,27
jul-13	4,57	7,94	6,26
ago-13	4,9	9,01	6,96
sep-13	5,21	8,81	7,01
oct-13	5,46	9,17	7,32
nov-13	6,28	8,95	7,62
dic-13	5,81	8,85	7,33

Elaborado por: Adrián Jumbo, 2024.