

Estudio de Disponibilidad Hídrica y Resiliencia Urbana en el GAD DMQ frente al Cambio Climático

Investigación

N°- 02 – 2026 - DAD



Investigación N°– 02 – 2026 – DAD

Dirección de Analítica de datos (DAD)

Autorías:

- Autor(es) Principal(es):
 - Alexander Gualli, Jefferson Revelo, María Isabel Velásquez

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
2.	Problemática	2
3.	Justificación	3
4.	Objetivo general.....	4
4.1.	Objetivos específicos.....	4
5.	Metodología	4
5.1.	Ingeniería de datos y construcción del cubo hidroclimático	5
5.2.	Modelo hidrológico semi-distribuido.....	6
5.2.1.	Estrategia de calibración restringida y validación multi-objetivo	8
5.2.2.	Proyección de disponibilidad hídrica bajos escenarios de cambio climático	9
5.3.	Proyección de demanda hídrica a largo plazo (2020 – 2100)	9
5.3.1.	Modelo demográfico de saturación asintótica	10
5.3.2.	Hipótesis de eficiencia y gestión de la demanda unitarias	10
5.3.3.	Síntesis de la demanda total y diferenciación zonal	11
6.	Caracterización de la cuenca.....	11
6.1.1.	Morfometría y estructura topológica.....	11
6.1.2.	Cobertura y uso del suelo.....	12
6.1.3.	Edafología y capacidad de regulación hídrica	13
7.	Resultados	14
7.1.	Validación del modelo.....	14
7.2.	Interpretación hidrológica del sistema Guayllabamba	17
7.3.	Estimación de caudales ecológicos y disponibilidad ambiental.....	19
7.4.	Proyección hidrológica futura	19
7.5.	Proyección de demanda y disponibilidad futura bajo cambio climático	21
8.	Discusión	25
8.1.	Limitaciones técnicas	25
8.2.	Paradoja de la abundancia hídrica ante el estés urbano y climático	26
9.	Conclusiones.....	27
10.	Referencias bibliográficas	29

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Diagrama de flujo metodológico integral del estudio.....	5
Gráfico 2. Esquema topológico del sistema hídrico modelado en airGRid, detallando la conectividad entre nodos y la inyección de caudales externos (trasvases)	8
Gráfico 3. Esquema metodológico para la proyección de la demanda hídrica al 2100.....	10
Gráfico 4. Relación entre el área de aporte y pendiente media.....	12
Gráfico 5. Distribución de la cobertura y uso del suelo por subcuenca	13
Gráfico 6. Distribución de tipos de suelo (capacidad de regulación)	14
Gráfico 7. Panel integral de modelación (Red de flujo, hidrogramas y curvas de diagnóstico)	16
Gráfico 8. Variación mensual de caudales característicos en el río Guayllabamba	19
Gráfico 9. Proyección hidrológica del río Guayllabamba Bajo (2025 – 2100)	21
Gráfico 10. Proyección de la demanda de caudal medio de agua potable en el DMQ (2020-2100)	21
Gráfico 11. Curvas de duración, hidrograma mensual medio en el histórico y las simulaciones para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5	24

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Mapa de la cuenca delimitada para la estación H 0149 y las seis subcuencas que componen el modelo semidistribuido. Incluye la subcuenca del río Machángara	7
---	---

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros morfométricos por subcuenca	11
Tabla 2. Resumen de indicadores de bondad de ajuste (Estación H 0149)	15
Tabla 3. Parámetros Estructurales del Modelo (GR4J + Lag)	17
Tabla 4. Resumen de aportes externos (caudales medios estimados).....	18
Tabla 5. Indicadores de caudal para el periodo histórico y escenarios sintéticos RCP 2.6 y RCP 8.8 en Guayllabamba bajo.....	22

1. Introducción

En un contexto global marcado por la incertidumbre climática y una presión urbana sostenida, las autoridades locales se enfrentan a la responsabilidad histórica de tomar decisiones que garanticen la viabilidad de la ciudad para las próximas generaciones. Es así que, la gestión del agua en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) ha dejado de ser un desafío meramente técnico para convertirse en un imperativo de gobernanza y seguridad territorial que exige una visión de largo plazo. La presente investigación responde a la necesidad de tener una herramienta de planificación basada en evidencia científica robusta sobre la disponibilidad hídrica y la resiliencia urbana. El documento combina una recopilación de datos hidrológicos, con una hoja de ruta estratégica que sintetiza los resultados de un proceso de modelación avanzado, para predecir el comportamiento futuro de nuestras cuencas.

Desde una perspectiva de seguridad hídrica, el estudio ha diagnosticado una vulnerabilidad estructural que debe ser atendida con prontitud. El balance de masa del modelo hidrológico evidenció un déficit hídrico estructural, revelando que el sistema no se sostiene únicamente con la precipitación natural registrada, sino que depende de un aporte externo no aforado que representa aproximadamente el 14% del volumen circulante. Este hallazgo técnico tiene una implicación política directa: la seguridad hídrica actual de Quito es, en gran medida, artificial y depende críticamente de la operación continua y eficiente de los sistemas de trasvase (Mica y Papallacta), así como de flujos subterráneos y retornos urbanos no contabilizados. Para la administración municipal, esto subraya la necesidad imperiosa de proteger estas fuentes externas y mejorar los sistemas de monitoreo, pues cualquier fallo en estos aportes pondría en jaque el abastecimiento de la ciudad, desmitificando la idea de una autonomía hídrica completa basada solo en recursos locales inmediatos.

El análisis técnico de la cuenca del río Guayllabamba, revela una realidad compleja que desafía los paradigmas tradicionales de planificación y que hemos denominado la "*Paradoja de la Abundancia*". Bajo escenarios climáticos futuros (RCP2.6 y RCP8.5), las simulaciones climáticas proyectadas hacia el año 2100, se evidencia que la oferta hídrica media anual de la cuenca podría experimentar un aumento de entre un 30% y un 40%. No obstante, este aparente superávit debe interpretarse en el contexto de la vulnerabilidad estructural previamente identificada, ya que no implica una mejora automática en la seguridad hídrica del sistema, por el contrario, este aumento se encuentra asociado a una intensificación de la variabilidad hidrológica y de los eventos extremos. En particular, los caudales de crecida (Q5) podrían incrementarse hasta en un 44%, sometiendo a una presión significativa a los sistemas de drenaje y elevando el riesgo de inundaciones en las zonas más vulnerables del Distrito.

Esto implica que la gobernanza del agua deberá transitar de un enfoque centrado exclusivamente en la búsqueda de nuevas fuentes, hacia una gestión prioritaria del riesgo y la adaptación de la infraestructura existente para manejar excesos hídricos violentos.

Asimismo, el estudio incorpora un análisis demográfico y de consumo esencial para evitar la sobreinversión y optimizar el gasto público en las próximas décadas. Las proyecciones realizadas hasta el año 2100 indican que la población del DMQ encontrará un techo cercano a los 4.9 millones de habitantes, con una desaceleración marcada a partir del año 2050. Este dato es fundamental para la planificación financiera y operativa de la EPMAPS, ya que demuestra que no se requiere una expansión infinita de la infraestructura de captación. Por el contrario, el estudio confirma que la sostenibilidad del sistema depende de mantener y profundizar las políticas de eficiencia hídrica; si se logra consolidar una reducción progresiva de la dotación per cápita hasta los 210 litros/habitante/día, la demanda total de agua se podrá contener en aproximadamente 11.899 litros por segundo hacia el final del siglo. Este

escenario de eficiencia evitaría la necesidad de buscar caudales adicionales por un volumen cercano a 1.427 l/s, lo que representa un ahorro masivo en infraestructura y costos operativos para la ciudad.

La modelación ha permitido diferenciar el comportamiento de subcuencas que actúan como esponjas reguladoras, como el Pita con sus suelos de alta retención, frente a zonas de respuesta rápida y alta peligrosidad como la subcuenca urbana del Machángara, cuya impermeabilización exacerba las crecidas. Esta diferenciación es un insumo clave para la planificación del uso del suelo, pues justifica técnicamente la protección estricta de las áreas de recarga en los páramos y la urgencia de implementar soluciones basadas en la naturaleza en el tejido urbano consolidado.

En conjunto, estos resultados proporcionan una base sólida para impulsar una transición hacia un modelo de gestión hídrica preventivo, eficiente y resiliente, capaz de enfrentar las crecientes incertidumbres climáticas y territoriales del siglo XXI.

2. Problemática

Históricamente, la gestión hídrica de la capital se ha fundamentado en patrones climáticos estacionales y en la premisa de una oferta natural constante proveniente de los páramos circundantes; sin embargo, la evidencia reciente sugiere que estos patrones se están alterando, generando incertidumbre sobre la seguridad hídrica futura de la ciudad. La problemática central radica en la necesidad de conocer mejor cómo interactúa el cambio climático global y la presión demográfica local sobre las fuentes de abastecimiento hídrico. Las autoridades se enfrentan al desafío de administrar un territorio donde los periodos de sequía parecen prolongarse y las lluvias intensas se vuelven más violentas. Esta necesidad de información convierte la planificación a largo plazo en una apuesta arriesgada, donde la infraestructura existente podría resultar insuficiente para contener crecidas extremas o ineficaz para garantizar el suministro en escenarios de estiaje severo.

A la incertidumbre climática se suma una vulnerabilidad territorial autogenerada por décadas de expansión urbana con escasa planificación. El modelo de ocupación del suelo en Quito ha privilegiado la impermeabilización de superficies sobre la conservación de las funciones ecosistémicas, transformando radicalmente la hidrología de cuencas urbanas estratégicas como la del río Machángara. La problemática aquí trasciende la simple ocupación del espacio; se trata de la pérdida sistemática de la capacidad de regulación natural del suelo. Al cubrir con asfalto y concreto las zonas de infiltración y rellenar los cauces naturales de las quebradas, la ciudad ha eliminado sus mecanismos de amortiguamiento hidráulico. Esto ha creado un sistema de respuesta hidrológica artificialmente acelerado, donde la precipitación se convierte en escorrentía superficial de manera casi inmediata, saturando los sistemas de drenaje y exponiendo a la población a riesgos de inundaciones súbitas o "*flash floods*" que no obedecen necesariamente a lluvias históricas, sino a la incapacidad del suelo urbano para gestionar el agua.

Otro eje fundamental de la problemática es la dependencia estructural y la fragilidad del sistema de abastecimiento. Quito no es una ciudad hídricamente autosuficiente en su núcleo urbano; su supervivencia depende de complejos sistemas de trasvase que importan agua desde cuencas vecinas y lejanas, como los sistemas Mica y Papallacta. Actualmente existe poca evidencia de cómo afectará el cambio climático a estas zonas de alta montaña y si la infraestructura de conducción actual tendrá la resiliencia necesaria para operar bajo nuevas condiciones de estrés ambiental. Esta dependencia externa tiene consecuencias importantes: las fuentes internas están degradadas o son insuficientes, y aún no es claro el balance hídrico propio de la cuenca del Guayllabamba, lo que deja a la administración

municipal con puntos ciegos críticos sobre la autonomía hídrica del Distrito en caso de fallos en los sistemas de importación de agua.

Finalmente, es necesario incorporar en el análisis la tensión entre el crecimiento de la demanda y la degradación de la calidad del recurso. Mientras la población del Distrito continúa en aumento, ejerciendo una presión constante sobre la demanda de agua potable, los cuerpos hídricos receptores, como el río Machángara, han perdido su capacidad de autodepuración debido a la sobrecarga de contaminantes. La gestión del agua se enfrenta así a un dilema de "escasez cualitativa": aunque exista volumen de agua en los ríos, su calidad está tan comprometida por las descargas urbanas e industriales que resulta inutilizable sin tratamientos costosos y complejos. Además, la falta de integración entre la planificación del uso del suelo y la gestión de los recursos hídricos ha generado una gobernanza fragmentada, donde las decisiones sobre dónde construir vivienda no siempre consideran la disponibilidad de agua ni el riesgo de desastres, perpetuando un ciclo de vulnerabilidad que este estudio busca diagnosticar y revertir.

3. Justificación

La presente investigación se justifica en la necesidad de superar la obsolescencia de los paradigmas de planificación hidrológica convencional, los cuales, al estar cimentados en el supuesto de estacionariedad de las series históricas, resultan inadecuados para interpretar un sistema territorial que enfrenta una ruptura climática sin precedentes.

Esta brecha técnica es particularmente sensible considerando que la matriz de abastecimiento de la capital exhibe una dependencia estructural del 97% respecto a fuentes de agua superficiales, una configuración hidro-social que maximiza la vulnerabilidad sistémica frente a cualquier alteración en los regímenes pluviométricos y en la capacidad de regulación de los ecosistemas de alta montaña. En consecuencia, resulta necesario revisar la infraestructura hidráulica diseñada bajo los parámetros climáticos y demográficos estáticos del siglo XX para que pueda responder eficazmente a las demandas exponenciales y la incertidumbre ambiental del siglo XXI. Este estudio trasciende el diagnóstico coyuntural para modelar escenarios de oferta y demanda con un horizonte prospectivo extendido hasta el año 2100, permitiendo determinar con rigor científico si los sistemas actuales poseen la resiliencia necesaria o si el Distrito se enfrenta a un riesgo inminente de déficit hídrico estructural que comprometa su funcionalidad urbana.

Desde una perspectiva de adaptación basada en la ciencia, la investigación se justifica por la necesidad de incorporar variables termodinámicas en la gestión del recurso hídrico, específicamente frente a proyecciones locales que estiman un incremento de la temperatura media de 1,2°C. Este calentamiento no representa una variable aislada, sino un forzante termodinámico que inducirá comportamientos no lineales en el ciclo hidrológico, acelerando tasas de evapotranspiración y alterando el balance hídrico en las cuencas aportantes. El estudio aborda esta complejidad integrando el análisis de factores antrópicos, como la impermeabilización de suelos por expansión urbana, con variables climáticas, facilitando así el tránsito de una gestión reactiva hacia una planificación preventiva fundamentada en la modelación estocástica de amenazas.

Finalmente, los insumos generados en este estudio constituyen la base empírica para la actualización de instrumentos rectores como el Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) y la operatividad de la Ordenanza "Verde-Azul". Al proveer datos validados sobre la disponibilidad hídrica futura y la capacidad de carga real de las cuencas, se dota a la administración municipal de la

evidencia técnica requerida para cumplir con sus competencias de saneamiento y gestión de riesgos con un enfoque de precisión.

4. Objetivo general

Evaluar la disponibilidad hídrica y la resiliencia urbana del GAD DMQ mediante la implementación de modelos hidrológicos semidistribuidos y proyecciones de demanda a largo plazo, generando una herramienta técnica para la toma de decisiones estratégicas frente al cambio climático.

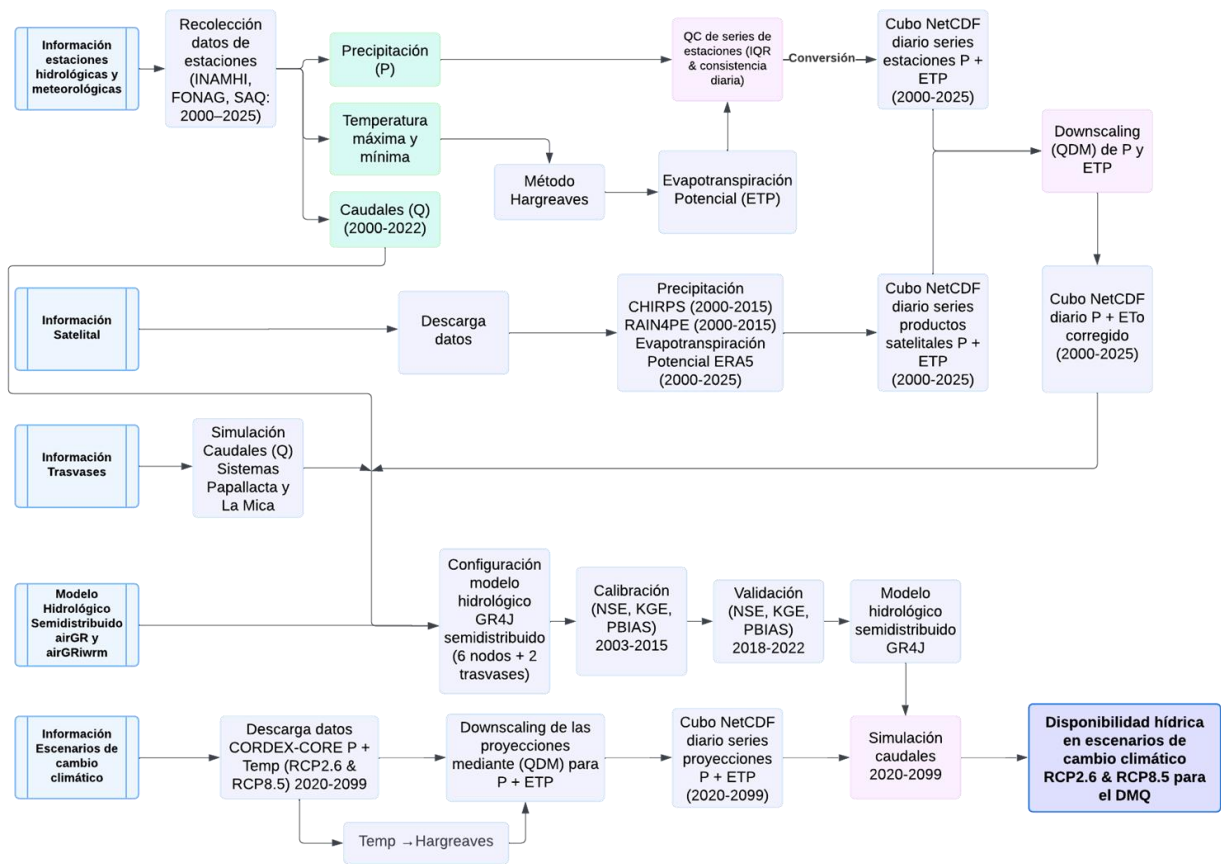
4.1. Objetivos específicos

- Caracterizar la oferta hídrica de la cuenca del río Guayllabamba (estación de cierre H 0149) y sus seis subcuencas aportantes, entendiendo su dinámica espacial y temporal.
- Proyectar la demanda de agua potable del DMQ hasta el año 2100, integrando modelos de crecimiento poblacional logístico con escenarios de eficiencia en la dotación per cápita.
- Simular el impacto del cambio climático, evaluando el comportamiento hidrológico bajo escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 para identificar tendencias de superávit o déficit hídrico futuro.

5. Metodología

Para abordar la complejidad inherente al sistema hídrico del DMQ, caracterizado por una alta variabilidad espacial y una fuerte intervención antrópica, se diseñó e implementó una cadena metodológica integral. Este flujo de trabajo articula secuencialmente el procesamiento de datos masivos, la modelación hidrológica semi-distribuida y la proyección de escenarios climáticos regionalizados. La arquitectura metodológica, sistematizada visualmente en el Gráfico 1, se fundamenta en cuatro pilares operativos que garantizan la robustez de las simulaciones y la coherencia física de los resultados obtenidos.

Gráfico 1. Diagrama de flujo metodológico integral del estudio



Fuente y Elaboración: IIC, 2025

5.1. Ingeniería de datos y construcción del cubo hidroclimático

Con el objetivo de superar la fragmentación de la información disponible, se consolidó una base de datos hidroclimática para el periodo base 2000–2025 a partir de la sistematización de registros diarios de precipitación, temperatura y caudales provenientes de las redes de monitoreo in situ del INAMHI, FONAG y la Secretaría de Ambiente (SAQ).

Dado que estas series presentaban inconsistencias propias de registros históricos, se aplicaron protocolos rigurosos de control de calidad basados en rangos intercuartílicos (IQR) y análisis de consistencia temporal. Para resolver la problemática de los datos faltantes sin perder la varianza climática, se implementaron técnicas de imputación avanzadas mediante el algoritmo *Miss Forest* (basado en *Random Forest*), permitiendo reconstruir series completas y preservar la estructura estadística de la precipitación andina.

Simultáneamente, para mitigar la limitada cobertura de estaciones meteorológicas en zonas de alta montaña y páramo (áreas críticas para la recarga hídrica), se integraron productos de sensores remotos y datos de reanálisis¹. En particular, se utilizaron estimaciones satelitales de precipitación como CHIRPS y RAIN4PE (este último optimizado para condiciones orográficas andinas), junto con

¹ Corresponde a estimaciones modeladas que integran observaciones meteorológicas mediante técnicas de asimilación de datos.

información de reanálisis ERA5. Esta información grillada se fusionó con los datos puntuales para generar un "Cubo de Datos" (NetCDF) continuo.

A partir de las series de temperatura depuradas y consistentes, se estimó la Evapotranspiración Potencial (ETP) mediante el método de Hargreaves. Si bien existen métodos más complejos, la elección de Hargreaves se fundamenta en su robustez en zonas con datos limitados de radiación y viento, habiéndose ajustado mediante gradientes altitudinales térmicos para evitar la sobreestimación de la demanda evaporativa en las cotas altas de la cuenca.

En conjunto, el modelo integra como variables de entrada la precipitación, la temperatura y los caudales, a partir de las cuales se estiman los principales componentes del balance hídrico (ingresos y pérdidas atmosféricas), con el fin de caracterizar la disponibilidad hídrica en la cuenca e identificar patrones espaciales y temporales de la oferta de agua.

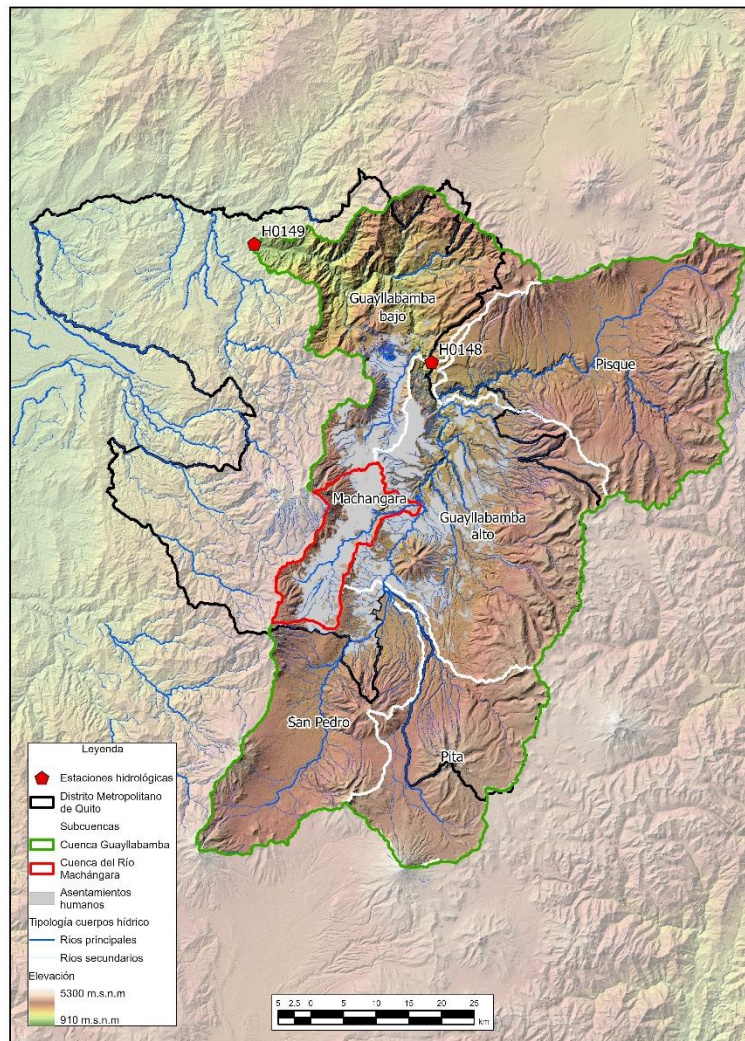
5.2. Modelo hidrológico semi-distribuido

El presente estudio implementa un modelo hidrológico semi-distribuido como herramienta para evaluar la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Guayllabamba y analizar su comportamiento bajo condiciones de variabilidad climática e intervención antrópica.

Para ello, el modelo se desarrolló utilizando las librerías especializadas airGR y airGRiD en el entorno de computación R, descartando el uso de modelos agregados simples en favor de una estructura topológica que subdivide la cuenca del río Guayllabamba en seis unidades de respuesta hidrológica para efectos de modelación: Pita, San Pedro, Machángara, Pisque, Guayllabamba Alto y Guayllabamba Bajo (Mapa 1).

Esta segmentación espacial fue determinante para capturar la heterogeneidad de la respuesta hidrológica, permitiendo diferencias entre subcuencas de cabecera con alta capacidad de regulación natural y cuencas urbanas, como el Machángara, caracterizadas por una respuesta rápida e impermeable.

Mapa 1. Mapa de la cuenca delimitada para la estación H 0149 y las seis subcuencas que componen el modelo semidistribuido. Incluye la subcuenca del río Machángara



Fuente: SRTM 30m, Gobierno Abierto GAD DMQ, Open Street Maps, Secretaría de Ambiente de Quito, 2024.

Elaboración: IIC

En cada unidad de respuesta hidrológica se ejecutó el modelo lluvia-escorrentía GR4, un modelo de cuatro parámetros que permite minimizar la equifinalidad² y la incertidumbre paramétrica, manteniendo al mismo tiempo una alta capacidad para reproducir los procesos de almacenamiento en el suelo y tránsito en cauce.

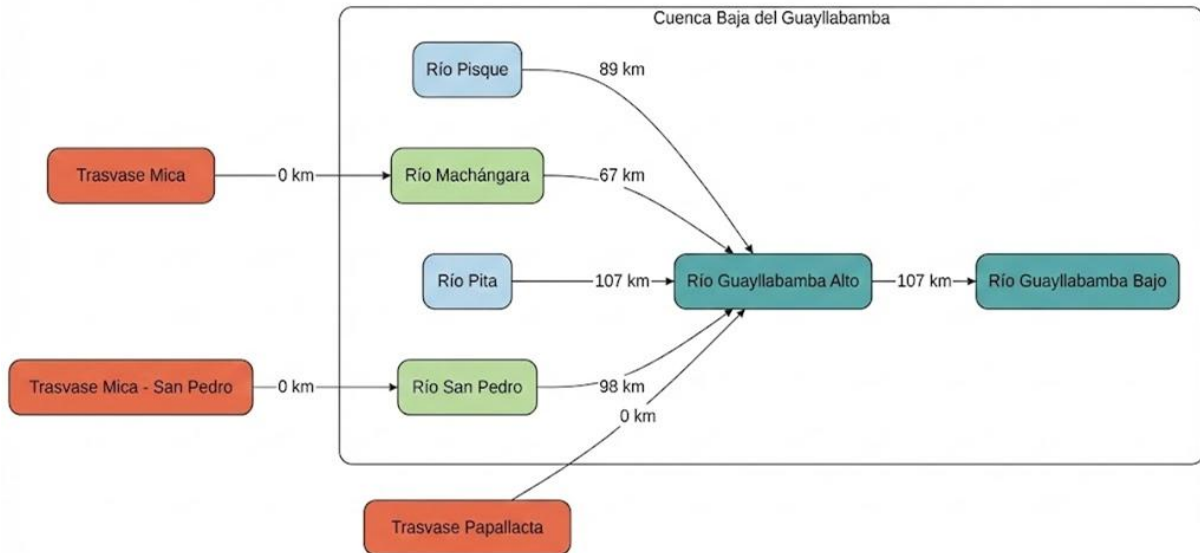
Los parámetros del modelo fueron definidos de manera diferenciada según las características físicas de cada subcuenca. En este sentido, se establecieron límites en parámetros clave como la capacidad de almacenamiento del suelo (X1) y el tiempo de respuesta (X4), con el fin de evitar configuraciones no realistas. En particular, se restringió que las subcuencas urbanas fueran representadas con parámetros de alta retención hídrica, propios de sistemas naturales como los páramos.

Un aspecto innovador y crítico de esta configuración fue la incorporación explícita de intervenciones antrópicas, en particular los caudales provenientes de los sistemas de trasvase Papallacta y La Mica no

² Se refiere a la existencia de múltiples combinaciones de parámetros que producen resultados similares en el modelo.

fueron modelaron como precipitación natural, sino que se integraron como series de tiempo de caudales inyectados (Q_{inf}). Esta decisión metodológica permitió desacoplar la gestión hídrica Q_{inf} artificial de la variabilidad climática, asegurando que el modelo represente de manera fiel el funcionamiento hidráulico real del sistema de abastecimiento de Quito (Gráfico 2).

Gráfico 2. Esquema topológico del sistema hídrico modelado en airGRid, detallando la conectividad entre nodos y la inyección de caudales externos (trasvases)



Fuente y Elaboración: IIC, 2025

5.2.1. Estrategia de calibración restringida y validación multi-objetivo

Para garantizar que las simulaciones no solo fueran estadísticamente precisas sino físicamente coherentes, se desplegó una estrategia de calibración restringida por conocimiento físico (*Physics-Informed*). En lugar de permitir una optimización matemática libre en todo el espacio de parámetros, se definieron hipercubos de búsqueda específicos para cada subcuenca basados en su morfometría (forma, pendiente y tamaño de la cuenca) y edafología (tipo y propiedades del suelo, como su capacidad de infiltración y retención de agua).

Por ejemplo, se restringió la capacidad de almacenamiento del suelo en las zonas urbanas del Machángara para reflejar su baja permeabilidad, mientras que se permitieron mayores tasas de infiltración y retención en los páramos del Pita, consistentes con la presencia de andisoles.

El proceso de parametrización se ejecutó bajo un esquema de "Muestra Dividida" (*Split-Sample*), definiendo un periodo de calibración entre 2003 y 2015, y reservando el periodo 2018-2022 para la validación independiente. La evaluación del desempeño del modelo trascendió el uso de un solo indicador, adoptando una función objetivo compuesta que integra la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la Eficiencia de Kling-Gupta (KGE) y el Sesgo Porcentual (PBIAS), permitiendo evaluar de manera complementaria el ajuste del hidrograma, la representación de la variabilidad y el cierre del balance volumétrico.

Esta aproximación rigurosa aseguró que el modelo calibrado sea robusto tanto en la reproducción de caudales medios como en la simulación de eventos extremos y períodos de estiaje.

La fase de pre-procesamiento de datos fue determinante para corregir inconsistencias estructurales en el balance hídrico observado. Se detectó un déficit artificial de precipitación en la cuenca baja, producto de la escasa densidad de estaciones en el cañón árido del Guayllabamba. La reconstrucción

de las series mediante polígonos de Thiessen ponderados permitió corregir este sesgo, generando una serie final que captura adecuadamente la bimodalidad del régimen climático, con picos de lluvia marcados en abril y octubre. Adicionalmente, se aplicó una corrección física a la Evapotranspiración Potencial (ETP) en las zonas de páramo (subcuenca Pita), donde los valores crudos tienden a sobreestimar la demanda atmosférica; la aplicación de un factor de reducción basado en el gradiente térmico altitudinal ajustó la ETP a valores realistas ($\sim 2,2$ mm/día), evitando la desecación matemática del modelo.

En síntesis, esta estrategia permitió calibrar el modelo hidrológico consistente tanto desde el punto de vista estadístico, capaz de representar el comportamiento del agua en la cuenca y anticipar su variabilidad en el tiempo.

5.2.2. Proyección de disponibilidad hídrica bajos escenarios de cambio climático

La fase final de la metodología consistió en la simulación de la disponibilidad hídrica futura hasta finales del siglo XXI (2080–2100). Para ello, el modelo hidrológico previamente calibrado fue forzado con proyecciones climáticas regionalizadas (RCM) provenientes de la iniciativa global CORDEX-CORE, incorporando información prospectiva sobre las condiciones climáticas futuras.

En este marco, con el fin de evaluar la disponibilidad de agua y la dinámica del sistema hidrológico en el largo plazo bajo distintos escenarios de cambio climático, se descargaron y procesaron las variables de precipitación y temperatura para el periodo 2020–2099 bajo dos escenarios: RCP 2.6, que representa un escenario de mitigación climática ambiciosa con menor calentamiento global, y RCP 8.5, correspondiente a un futuro de altas emisiones y mayor intensificación del cambio climático.

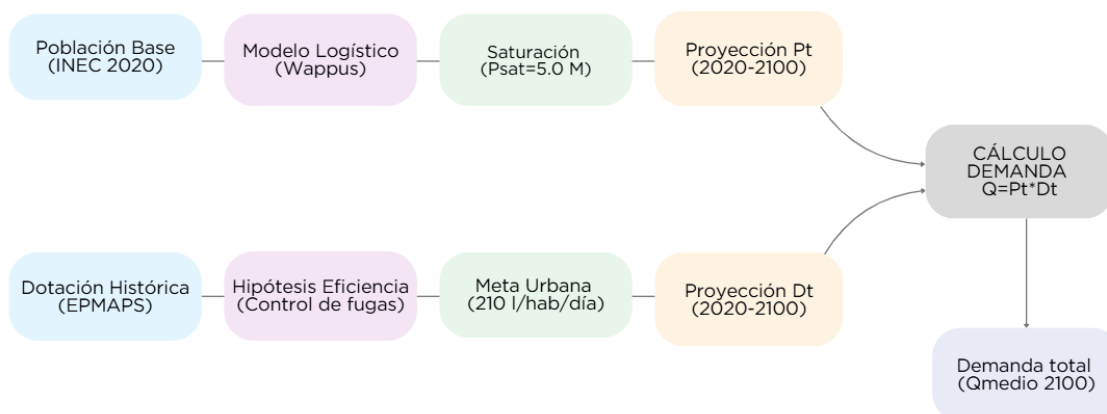
Reconociendo los sesgos inherentes a los Modelos Climáticos Regionales (RCM), se aplicó un proceso de corrección de sesgo (*bias correction*) y reducción de escala estadística (*downscaling*) mediante el método de Mapeo de Cuantiles Delta (QDM). Esta técnica ajusta la distribución de probabilidad de las proyecciones futuras climáticas para hacerlas consistentes con la climatología histórica observada, preservando al mismo tiempo la señal de cambio climático en los extremos y las tendencias a largo plazo.

Como resultado de este proceso, se generaron series sintéticas diarias de caudales futuros, que constituyen la base cuantitativa para evaluar la resiliencia hídrica del DMQ, identificar potenciales déficits y sustentar la planificación de infraestructura de adaptación frente al cambio climático.

5.3. Proyección de demanda hídrica a largo plazo (2020 – 2100)

La planificación estratégica de la seguridad hídrica para el DMQ requiere trascender los horizontes de diseño convencionales de veinte o treinta años para explorar escenarios de saturación urbana a finales del siglo XXI. Con este objetivo, se desarrolló una metodología de proyección desagregada que integra dinámicas demográficas no lineales con hipótesis de eficiencia tecnológica, cuyo marco conceptual se detalla en el Gráfico 3.

El proceso se estructura a partir de la interacción de dos componentes independientes: el crecimiento poblacional y la evolución de la dotación per cápita; cuya combinación define el caudal medio requerido (Q_{medio}) para el horizonte extendido 2020–2100.

Gráfico 3. Esquema metodológico para la proyección de la demanda hídrica al 2100


Fuente y Elaboración: IIC, 2025

5.3.1. Modelo demográfico de saturación asintótica

Para la proyección del componente poblacional P_t , se descartaron los métodos tradicionales de extrapolación geométrica o exponencial, dado que tienden a sobreestimar el crecimiento en horizontes temporales extensos al no incorporar las tendencias actuales de transición demográfica observadas en la región andina, como la disminución sostenida de la fecundidad y la desaceleración de la migración campo-ciudad.

En su lugar, se adoptó un modelo de crecimiento logístico (curva logística modificada), calibrado con la población base reportada por el INEC para el año 2020. La variable clave del modelo es la definición de una población de saturación P_{sat} de 5,0 millones de habitantes para el DMQ. Este parámetro actúa como una asíntota que induce la desaceleración progresiva de las tasas de crecimiento a partir de la década de 2050, reflejando las limitaciones físicas del territorio, la capacidad de carga de los servicios y la madurez urbana de la ciudad.

De este modo, se obtiene una trayectoria de crecimiento que transita desde una fase de expansión hacia una estabilización demográfica a finales de siglo, evitando el sobredimensionamiento de la infraestructura futura derivado de supuestos de crecimiento irreales.

5.3.2. Hipótesis de eficiencia y gestión de la demanda unitarias

El segundo componente del análisis se centró en la evolución de la dotación bruta D_t , entendida como la cantidad de agua necesaria por habitante incluyendo las pérdidas del sistema. Tras analizar las series históricas operativas de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), se evidenció una tendencia decreciente en el consumo unitario, asociada a la implementación de programas de micromedición, sectorización hidráulica y control de fugas.

Con base en esta evidencia empírica, se planteó una "*Hipótesis de Eficiencia*" que proyecta una reducción sostenida de la dotación hasta alcanzar una meta técnica de 210 l/hab/día para el año 2050 en la zona urbana. Este valor objetivo no implica una restricción en el nivel de servicio al usuario, sino que representa el resultado esperado de una gestión óptima del Agua No Contabilizada (ANC), alineando a Quito con estándares internacionales de eficiencia hídrica.

A partir del año 2050, el modelo asume que el sistema alcanza su madurez operativa y tecnológica, manteniendo esta dotación constante hasta el año 2100, lo que impide que la demanda se dispare linealmente con la población.

5.3.3. Síntesis de la demanda total y diferenciación zonal

La síntesis del modelo demográfico se realiza mediante la integración matemática de las proyecciones poblacionales y de eficiencia para estimar el caudal medio diario (Q_{medio}) en cada año del horizonte de planificación. Para ello, se aplicó la ecuación fundamental de la demanda ($Q = \frac{P*D}{86400}$) de manera desagregada, diferenciando las dinámicas de las zonas urbanas consolidadas de las zonas rurales y de expansión periférica.

El resultado final es una curva de Demanda Total que permite identificar el momento en que la capacidad de las fuentes actuales resulta insuficiente, cuantificando el déficit hídrico que deberá ser cubierto bajo los escenarios climáticos modelados en la sección anterior.

6. Caracterización de la cuenca

La cuenca del río Guayllabamba, hasta el punto de cierre en la estación H0149, abarca una superficie de drenaje total de 4.688,14 km² con una configuración topográfica de alta complejidad. El sistema se desarrolla sobre un gradiente altitudinal que va desde las nieves perpetuas del Antisana (>5,700 msnm) hasta el cañón de descarga en la zona de Guayllabamba Bajo (~1,800 msnm), lo que genera una marcada zonificación climática y edafológica.

La cuenca comprende seis subcuencas principales: Pita, San Pedro, Machángara, Pisque, Guayllabamba Alto y Guayllabamba Bajo, cuyas propiedades morfométricas condicionan la velocidad de tránsito del flujo y la capacidad de regulación del sistema hidrológico.

6.1.1. Morfometría y estructura topológica

La red hídrica presenta una estructura tipo "Star-to-Hub", donde cuatro subcuencas de cabecera (Pita, Pisque, San Pedro, Machángara) convergen hacia un nodo central (Guayllabamba Alto) antes de su descarga final.

El análisis morfométrico revela una heterogeneidad crítica en las pendientes medias, factor que controla directamente el parámetro de velocidad (X1) en el modelo hidrológico. Como se evidencia en el gráfico 4, la subcuenca de salida (Guayllabamba Bajo) se distingue por una pendiente media extrema del 46.09%, comportándose hidráulicamente como un canal de transmisión rápida o torrencial, en contraste con las zonas de cabecera como el Pita o San Pedro, donde las pendientes más moderadas (~22-23%) favorecen tiempos de concentración mayores.

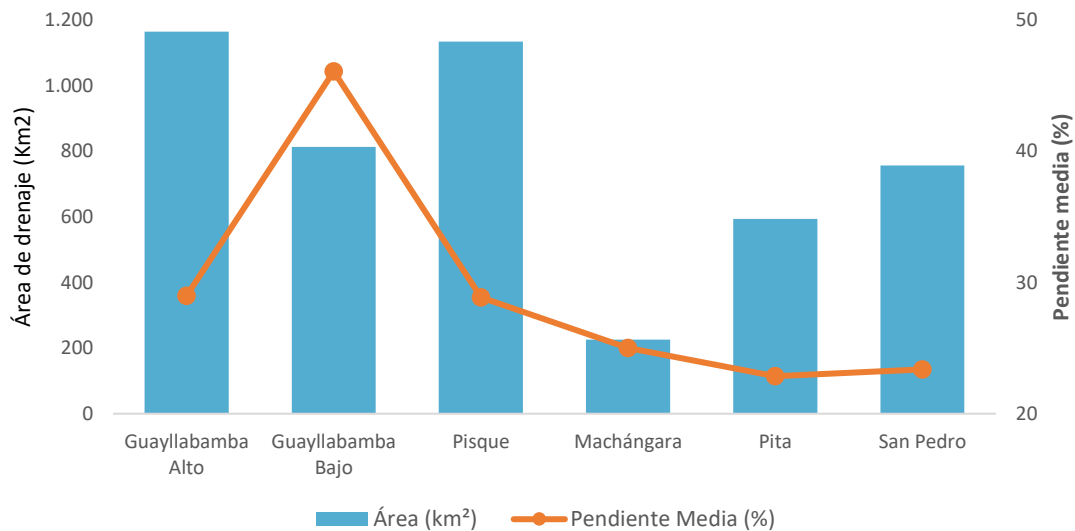
Tabla 1. Parámetros morfométricos por subcuenca

Subcuenca	Área (km ²)	Pendiente Media (%)	Elevación Media (msnm)	Rol Hidrológico
Pita	593,62	22,86	3823,60	Regulador de cabecera
San Pedro	756,53	23,37	3236,90	Aporte valle interandino
Machángara	225,62	25,02	3045,80	Drenaje urbano (rápido)

Pisque	1.134,26	28,87	3316,40	Transición norte
Guayllabamba Alto	1.164,80	29	3035,90	Nodo conector
Guayllabamba Bajo	813,31	46,09	2506,30	Cañón de descarga

Fuente y Elaboración: IIC, 2025

Gráfico 4. Relación entre el área de aporte y pendiente media

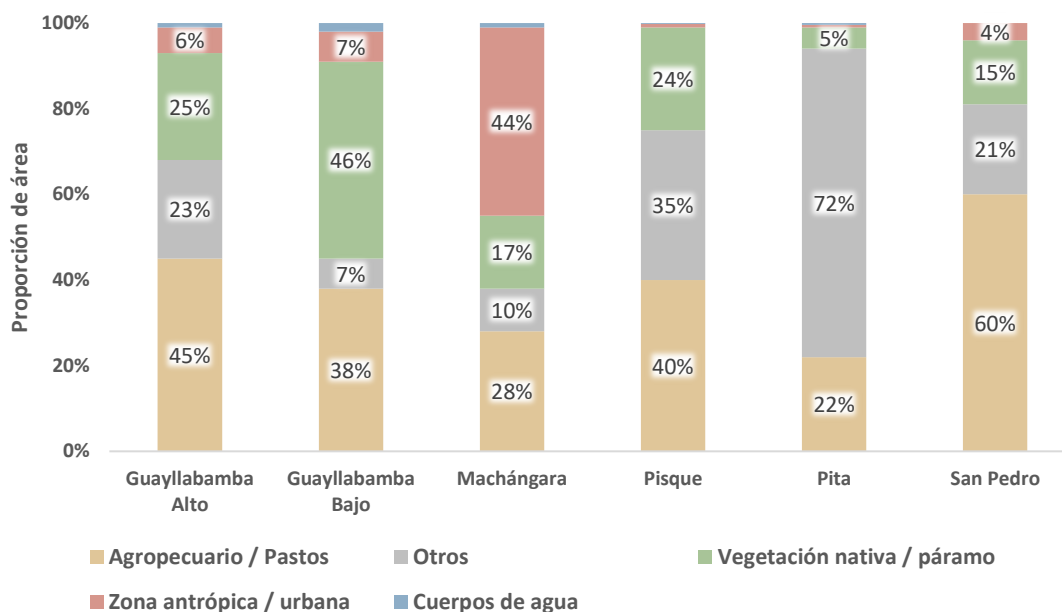


Fuente: Secretaría de Ambiente de Quito, 2024

Elaboración: IIC, 2025

6.1.2. Cobertura y uso del suelo

La interacción entre la precipitación y la escorrentía está fuertemente modulada por la cobertura vegetal y la intervención humana. El Gráfico 5 ilustra una dicotomía hidrológica fundamental en el sistema: mientras que la subcuenca del Pita mantiene un 44% de cobertura de conservación (Páramo y Bosque), favoreciendo la infiltración y recarga, la subcuenca del Machángara está dominada por un 44,5% de infraestructura urbana. Esta urbanización masiva impermeabiliza la superficie, reduciendo la infiltración a niveles mínimos y generando respuestas hidrológicas violentas ("flash floods") que el modelo debe representar mediante tiempos de respuesta cortos (bajo). Adicionalmente, el San Pedro destaca por una vocación agrícola intensiva (60,5%), lo que introduce dinámicas de riego y retorno de flujos que alteran el régimen natural de caudales.

Gráfico 5. Distribución de la cobertura y uso del suelo por subcuenca

Fuente: Secretaría de Ambiente de Quito, 2024

Elaboración: IIC, 2025

6.1.3. Edafología y capacidad de regulación hídrica

La capacidad de almacenamiento y regulación hídrica del suelo constituye uno de los factores clave en la dinámica hidrológica de la cuenca. En el modelo hidrológico GR4J, esta propiedad se representa mediante el parámetro de capacidad de almacenamiento del reservorio del suelo (θ), el cual controla la infiltración, la recarga subterránea y la liberación progresiva del caudal base.

El análisis edafológico de las subcuencas que conforman el sistema del río Guayllabamba evidencia una marcada heterogeneidad en la distribución de suelos con alta capacidad de retención hídrica. Como se observa en el Gráfico 6, los Andisoles, suelos derivados de ceniza volcánica caracterizados por su elevada porosidad y capacidad de retención de humedad, presentan una mayor presencia en las subcuencas de cabecera oriental. En particular, la subcuenca del Pita registra la mayor cobertura de estos suelos (68,7%), seguida por San Pedro (55,4%), Guayllabamba Bajo (53,0%) y Pisque (48,4%), lo que indica una alta capacidad natural de regulación hidrológica en estos territorios.

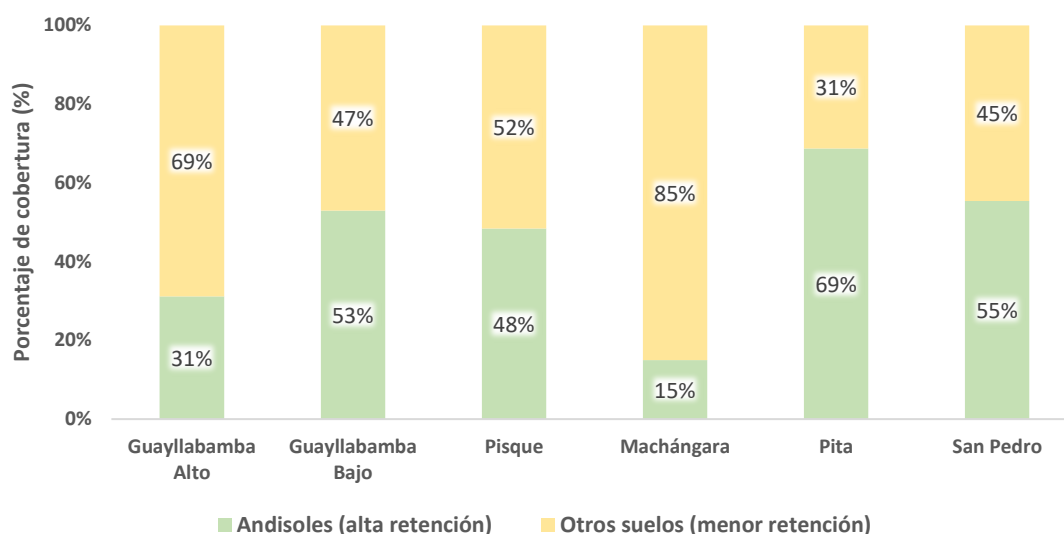
En contraste, la subcuenca del Machángara presenta el porcentaje más bajo de suelos con alta capacidad de retención (15,0%), lo cual refleja una menor capacidad de almacenamiento hídrico del sistema. Esta condición responde tanto a factores geológicos como al alto grado de urbanización y sellado antropogénico del suelo, que reduce significativamente los procesos de infiltración y favorece una respuesta hidrológica más rápida frente a eventos de precipitación.

Por su parte, la subcuenca de Guayllabamba Alto presenta una cobertura intermedia de Andisoles (31,2%), lo que sugiere una capacidad moderada de regulación natural del flujo. Esta distribución espacial de los suelos explica en gran medida las diferencias en la respuesta hidrológica entre las subcuencas del sistema.

En consecuencia, durante el proceso de calibración del modelo se asignaron parámetros de almacenamiento diferenciados entre subcuencas, otorgando valores elevados de capacidad de almacenamiento (>350 mm) en aquellas áreas con mayor presencia de Andisoles y valores más bajos en zonas urbanizadas o con suelos de menor retención hídrica. Esta parametrización permite

representar de manera más realista los procesos de infiltración, almacenamiento y liberación gradual de agua que caracterizan el funcionamiento hidrológico de la cuenca del río Guayllabamba.

Gráfico 6. Distribución de tipos de suelo (capacidad de regulación)



Fuente: Secretaría de Ambiente de Quito, 2024

Elaboración: IIC, 2025

7. Resultados

7.1. Validación del modelo

Los resultados de la validación del modelo hidrológico evidencian un desempeño satisfactorio en la representación de los cambios en los caudales a lo largo del tiempo, incluyendo periodos de crecida y estiaje. Los indicadores de eficiencia, presentados en la siguiente tabla, muestran un valor de Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) de 0,623 y un coeficiente de Kling–Gupta (KGE) de 0,647 para el periodo de validación.

En síntesis, los indicadores obtenidos sugieren que el modelo reproduce de manera adecuada la variabilidad y el comportamiento temporal de los caudales, situándose dentro de rangos aceptables para cuencas andinas caracterizadas por alta incertidumbre en los datos de entrada.

Esto significa que el modelo **sí logra imitar cómo se comportan los ríos en la realidad**, lo que permite utilizarlo como una herramienta confiable para anticipar escenarios futuros y apoyar la toma de decisiones.

No obstante, el sesgo volumétrico positivo observado (PBIAS +14%) evidencia una sobreestimación sistemática del volumen de caudal, lo que sugiere la posible existencia de aportes adicionales no representados explícitamente en las variables de entrada del modelo.

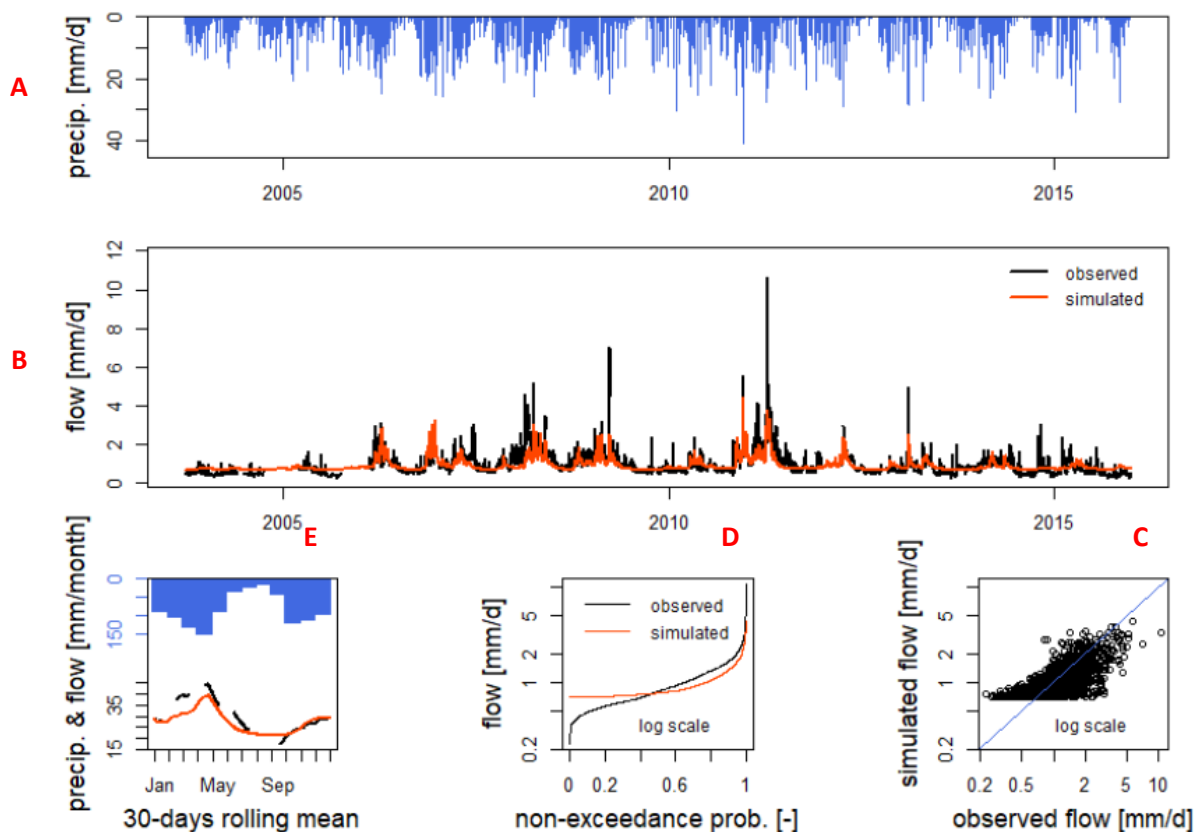
Tabla 2. Resumen de indicadores de bondad de ajuste (Estación H 0149)³

Métrica	Valor Obtenido	Rango de Referencia*	Interpretación Técnica
NSE (Nash-Sutcliffe)	0.6234	>0.50 (Satisfactorio)	El modelo explica el 62.3% de la varianza del caudal observado mejor que la media histórica. Indica una alta capacidad para replicar la forma y fase del hidrograma.
KGE (Kling-Gupta)	0.6468	>0.60 (Bueno)	Equilibrio sólido entre sus tres componentes vectoriales: correlación ($r \approx 0.79$), variabilidad (α) y sesgo (β). Superior al NSE para evaluar caudales medios.
PBIAS (Sesgo %)	+14.05%	$\pm 15\%$ (Satisfactorio)	Existe una sobreestimación sistemática del volumen total (+14%). El modelo genera más agua de la que se registra en el aforo.
RMSE	0.369 mm/d	-	El error cuadrático medio es bajo en relación con la magnitud de los eventos de crecida, descartando desviaciones groseras en los picos.

Fuente y Elaboración: IIC, 2025

La consistencia del desempeño del modelo se evidencia en el Gráfico 7, donde se observa una adecuada reproducción de la sincronización de los picos de crecida y de la pendiente de las curvas de recesión.

³ Criterios de evaluación basados en Moriasi et al. (2007) y Ritter & Muñoz-Carpena (2013)

Gráfico 7. Panel integral de modelación (Red de flujo, hidrogramas y curvas de diagnóstico)⁴


Fuente y Elaboración: IIC, 2025

- A. **Forzamiento hidrometeorológico (Serie de precipitación):** El panel superior presenta la precipitación diaria utilizada como variable de entrada del modelo hidrológico durante el periodo de calibración. Esta muetsa una alta variabilidad intraanual característica de las cuencas andinas, con eventos intensos intercalados con periodos secos. Este patrón constituye el principal forzamiento del sistema hidrológico, condicionando la generación de escorrentía y la recarga de los almacenamientos del modelo.
- B. **Sincronización temporal del hidrograma (observado vs simulado):** El panel central muestra la comparación entre los caudales observados y simulados en escala diaria. En términos generales, se observa una adecuada coincidencia temporal en la ocurrencia de los eventos de crecida, lo que indica que el modelo reproduce de manera consistente la respuesta hidrológica rápida del sistema frente a eventos de precipitación intensa. Los picos simulados se alinean con los observados, lo que sugiere que los parámetros asociados a los procesos de generación y propagación de escorrentía han sido correctamente calibrados. Asimismo, la forma de las curvas de recesión refleja de manera adecuada la descarga progresiva del sistema durante los periodos de estiaje, lo que indica que el modelo captura el comportamiento del almacenamiento hídrico en el suelo y en los acuíferos someros.
- C. **Comportamiento estacional del sistema (media móvil de 30 días):** El panel inferior izquierdo muestra la media móvil de 30 días de precipitación y caudal, lo que permite visualizar las tendencias estacionales del régimen hidrológico. Esto suaviza la variabilidad diaria y permite

⁴ En la parte intermedia se observa el ajuste entre el caudal simulado y observado

observar con mayor claridad la relación entre los periodos húmedos y la respuesta progresiva del caudal en la cuenca. El modelo reproduce adecuadamente el patrón estacional observado, mostrando incrementos de caudal durante los periodos de mayor precipitación y reducciones durante las fases secas del año, lo que confirma que el modelo es capaz de representar los procesos de almacenamiento y liberación gradual de agua dentro del sistema hidrológico.

- D. **Distribución estadística de caudales (curva de duración):** El panel inferior central presenta la curva de probabilidad de no excedencia de los caudales, representada en escala logarítmica. Esta curva permite evaluar la capacidad del modelo para reproducir la distribución estadística de los caudales a lo largo de todo su rango de valores. Se observa un buen ajuste entre la serie simulada y la observada en el rango de caudales medios, lo cual es particularmente relevante para aplicaciones de planificación hídrica y gestión de recursos. No obstante, en los extremos (tanto en caudales muy bajos o muy altos) se pueden observar ligeras divergencias, reflejando las limitaciones inherentes de los modelos conceptuales para representar con precisión los procesos hidrológicos extremos, especialmente aquellos asociados a eventos de tormenta o a condiciones prolongadas de sequía.
- E. **Relación entre caudales observados y simulados (diagrama de dispersión):** El panel inferior derecho presenta el diagrama de dispersión entre los caudales observados y simulados, también en escala logarítmica. Este gráfico permite evaluar el desempeño global del modelo en términos de correlación entre ambas series. La concentración de puntos en torno a la línea de referencia indica que el modelo reproduce de manera consistente el comportamiento general del sistema hidrológico. No obstante, se observa una mayor dispersión en los valores de caudal más altos, lo cual es común en modelos hidrológicos debido a la complejidad de los procesos asociados a eventos extremos de precipitación y escorrentía.

En conjunto, los resultados del Gráfico 7 confirman que el modelo reproduce adecuadamente la dinámica temporal y la distribución general de los caudales. Sin embargo, las ligeras desviaciones observadas, particularmente en los valores extremos y en la dispersión de caudales altos, son consistentes con el sesgo volumétrico positivo identificado (PBIAS +14%), confirmando la sobreestimación sistemática del volumen total simulado.

7.2. Interpretación hidrológica del sistema Guayllabamba

Más allá del desempeño estadístico del modelo, el análisis de los parámetros calibrados permite profundizar en el entendimiento del funcionamiento hidrológico del sistema.

En este contexto, el coeficiente de intercambio subterráneo (X2), estimado durante el proceso de calibración, presentó un valor positivo de 6,40 mm/d, lo que sugiere la presencia de aportes adicionales no explicados únicamente por la precipitación registrada.

Tabla 3. Parámetros Estructurales del Modelo (GR4J + Lag)

Parámetro	Valor Optimizado	Función en el Modelo	Interpretación Física
X1	381.30 mm	Capacidad del Tanque de Producción	Alta Retención. Corresponde a la "memoria" del sistema.

X2	6.40 mm/d	Coefficiente de Intercambio	Ganancia Externa. Aporte neto al balance hídrico.
X3	91.24 mm	Capacidad del Tanque de Ruteo	Amortiguamiento. Capacidad de laminación en cauce.
X4	1.04 días	Tiempo Base del Hidrograma	Respuesta Rápida. Tiempo característico de la crecida.
Lag	19.99	Celeridad de Onda	Flujo Torrencial. Velocidad de tránsito entre nodos.

Fuente y Elaboración: IIC, 2025

En términos hidrológicos, el sesgo positivo del modelo (PBIAS +14%), que sugiere la presencia de un exceso en el balance hídrico simulado es consistente con el valor positivo del coeficiente de intercambio subterráneo (X2), el cual indica la posible existencia de aportes adicionales no aforados en el sistema. Estos aportes podrían estar asociados a la precipitación horizontal (neblina) en cotas superiores a 3500 msnm y, de manera relevante, a los retornos de agua potable no medidos (fugas y descargas) del sistema urbano de Quito hacia el cauce.

Este comportamiento se ve reforzado al considerar la incorporación explícita de los caudales de trasvase en la modelación, lo que evidencia que el sistema Guayllabamba no opera bajo un régimen natural exclusivo. En este sentido, los aportes externos provenientes de los sistemas Mica y Papallacta (Tabla 4) no son marginales, sino estructurales para el balance hídrico, al sostener los caudales base en las subcuencas urbanas (Machángara y San Pedro) durante los periodos de estiaje.

Tabla 4. Resumen de aportes externos (caudales medios estimados)⁵

Sistema de Trasvase	Caudal Medio (m ³ /s)	Destino en el Modelo	Función Principal
Mica - San Pedro	~0.5 - 0.8	Subcuenca San Pedro	Riego y Agua Potable (Sur)
Mica - Machángara	~1.0 - 1.5	Sub Cuenca Machángara	Agua Potable (Centro/Sur)
Papallacta	~2.5 - 3.0	Guayllabamba Alto	Agua Potable (Norte)

Fuente y Elaboración: IIC, 2025

Estos resultados no deben interpretarse como evidencia de una abundancia hídrica estructural, sino como la manifestación de flujos adicionales no contabilizados que sostienen el caudal observado. En consecuencia, el sistema presenta un equilibrio aparente condicionado por factores naturales y antrópicos, donde la disponibilidad de agua depende parcialmente de aportes externos, lo que puede ocultar su susceptibilidad a condiciones de déficit hídrico en ausencia de estos flujos.

⁵ Los caudales son estimaciones referenciales basadas en la capacidad de diseño y operación promedio, integrados en la serie de tiempo diaria

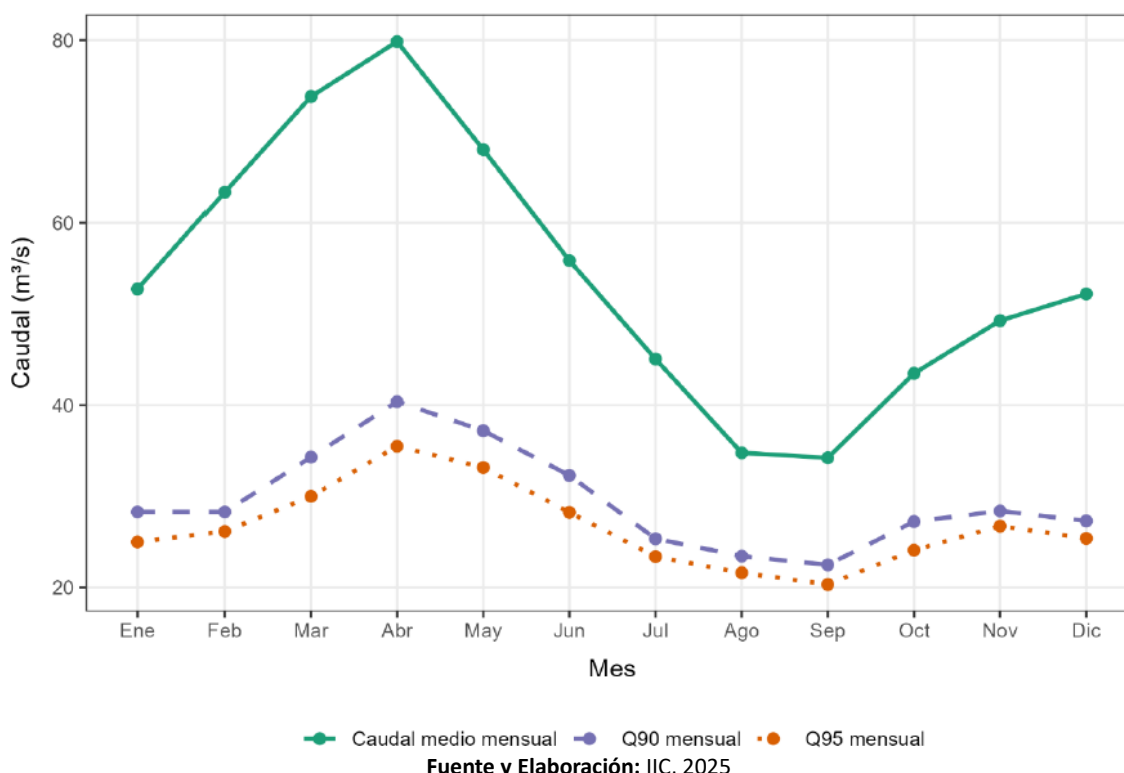
7.3. Estimación de caudales ecológicos y disponibilidad ambiental

Ante la ausencia de información biológica detallada para aplicar métodos de hábitat físico, se empleó una metodología hidrológica basada en la serie histórica depurada (1978-2023) para estimar el caudal ecológico referencial. El análisis estadístico permitió determinar los umbrales de bajo flujo, estableciendo un Q90 de 27,7 m³/s y un Q95 de 24,7 m³/s⁶.

La evaluación de la estacionalidad de estos indicadores (Gráfico 8) identificó que el periodo de mayor vulnerabilidad hídrica ambiental asociada a condiciones de estiaje ocurre consistentemente entre los meses de agosto y septiembre. Durante esta ventana crítica, los caudales descienden a sus mínimos históricos, reduciendo la capacidad de dilución del río y aumentando el riesgo de degradación de la calidad del agua.

Es imperativo señalar que estos valores deben interpretarse como referenciales, dado que el régimen hidrológico del Guayllabamba se encuentra influenciado por descargas urbanas de la subcuenca del Machángara, lo que implica que la cantidad de agua (caudal) no garantiza necesariamente la calidad del hábitat acuático.

Gráfico 8. Variación mensual de caudales característicos en el río Guayllabamba



7.4. Proyección hidrológica futura

La simulación hidrológica proyectada para el periodo 2025–2100 permite analizar el comportamiento futuro de los caudales en la cuenca del río Guayllabamba bajo escenarios climáticos. Para ello, el modelo hidrológico fue forzado con proyecciones de precipitación y temperatura provenientes de los modelos climáticos regionales RCP 2.6 y RCP 8.5, previamente con el objetivo de reducir los sesgos

⁶ Los indicadores Q90 y Q95 corresponden a caudales de permanencia, que representan los valores de flujo que son igualados o superados el 90% y 95% del tiempo, respectivamente, y se utilizan comúnmente como referencia de caudales bajos asociados a condiciones de estiaje.

inherentes a los modelos climáticos globales y asegurar coherencia con la climatología observada histórica.

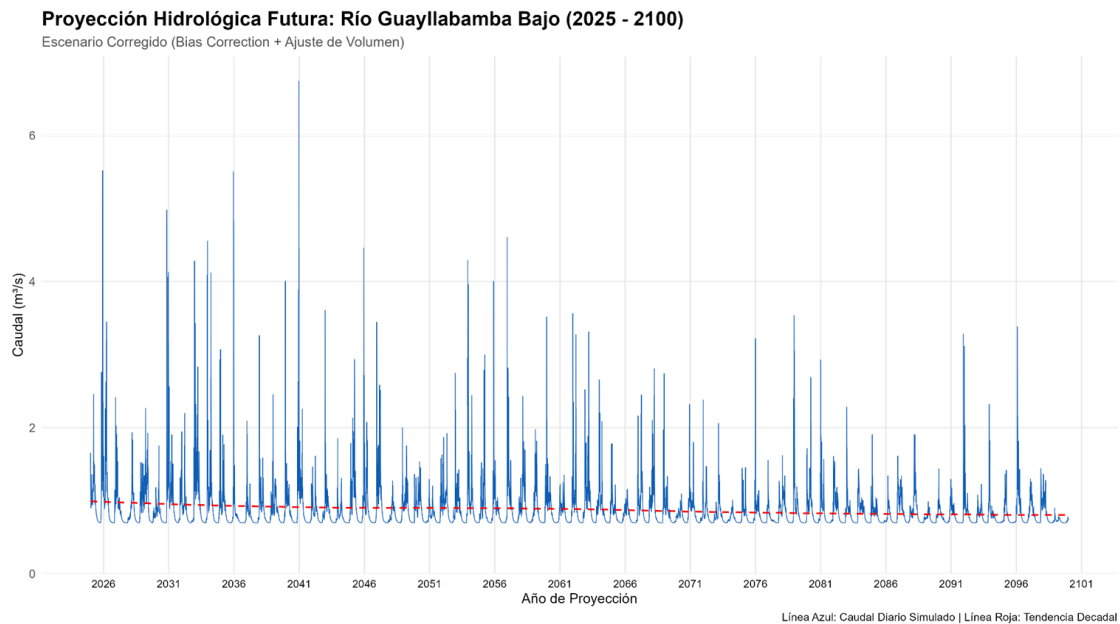
Bajo este enfoque, el gráfico presenta la serie temporal sintética de caudales diarios proyectados para el horizonte de análisis, donde se observa una marcada variabilidad intraanual, caracterizada por picos de caudal asociados a eventos de precipitación intensa y periodos prolongados de caudales base relativamente estables. Esta dinámica refleja la naturaleza hidrológica típica de cuencas andinas, en las que la escorrentía responde de manera rápida a eventos de lluvia intensa, especialmente en subcuencas con pendientes pronunciadas o con menor capacidad de regulación natural.

Uno de los elementos más relevantes que se desprenden del análisis es la persistencia de un caudal base relativamente estable a lo largo del periodo proyectado, representado en el gráfico mediante la línea de tendencia (línea roja discontinua). Este comportamiento sugiere que, a escala de largo plazo, el sistema mantiene una cierta capacidad de regulación hídrica asociada principalmente a los ecosistemas de páramo y a las zonas de almacenamiento natural presentes en las subcuencas de cabecera, particularmente en sectores como el río Pita y San Pedro. Estos ecosistemas continúan cumpliendo un rol fundamental en la amortiguación de la variabilidad hidrológica, permitiendo sostener el flujo base incluso durante periodos de menor precipitación.

No obstante, el gráfico también evidencia un incremento en la frecuencia y magnitud de los eventos extremos de caudal, observándose múltiples picos que superan significativamente el régimen medio del sistema. Este patrón sugiere una intensificación de los eventos de escorrentía asociados a precipitaciones más concentradas, lo cual es consistente con las tendencias proyectadas por diversos escenarios de cambio climático para regiones tropicales de montaña. En términos hidrológicos, esto implica una mayor probabilidad de crecidas súbitas y mayor presión sobre los sistemas de drenaje y control hidráulico existentes.

Adicionalmente, se observa que la tendencia general del caudal medio muestra una ligera reducción progresiva a lo largo del horizonte temporal, lo cual puede interpretarse como un efecto combinado de variaciones en la distribución temporal de la precipitación, cambios en los procesos de evapotranspiración asociados al incremento de temperatura y transformaciones en el uso del suelo dentro de la cuenca. Aunque esta reducción no representa necesariamente un escenario de déficit hídrico estructural, sí sugiere que la seguridad hídrica del sistema dependerá cada vez más de la capacidad de gestión de los picos de escorrentía y de la eficiencia en el uso del recurso.

Gráfico 9. Proyección hidrológica del río Guayllabamba Bajo (2025 – 2100)⁷



Fuente y Elaboración: IIC, 2025

En conjunto, la proyección hidrológica evidencia que el sistema del río Guayllabamba presenta un régimen altamente variable, caracterizado por la recurrencia de eventos de caudal elevado a lo largo de todo el periodo analizado, mientras que el caudal base se mantiene relativamente estable.

En este contexto, aunque el sistema conserva su capacidad de regulación, la persistencia de eventos de caudal elevado y la variabilidad observada refuerzan la necesidad de fortalecer los mecanismos de planificación y gestión del recurso hídrico en el DMQ. Esto incluye la protección de ecosistemas reguladores, la mejora de la infraestructura de drenaje urbano y la implementación de soluciones basadas en la naturaleza que permitan mitigar los efectos de la variabilidad hidrológica futura.

7.5. Proyección de demanda y disponibilidad futura bajo cambio climático

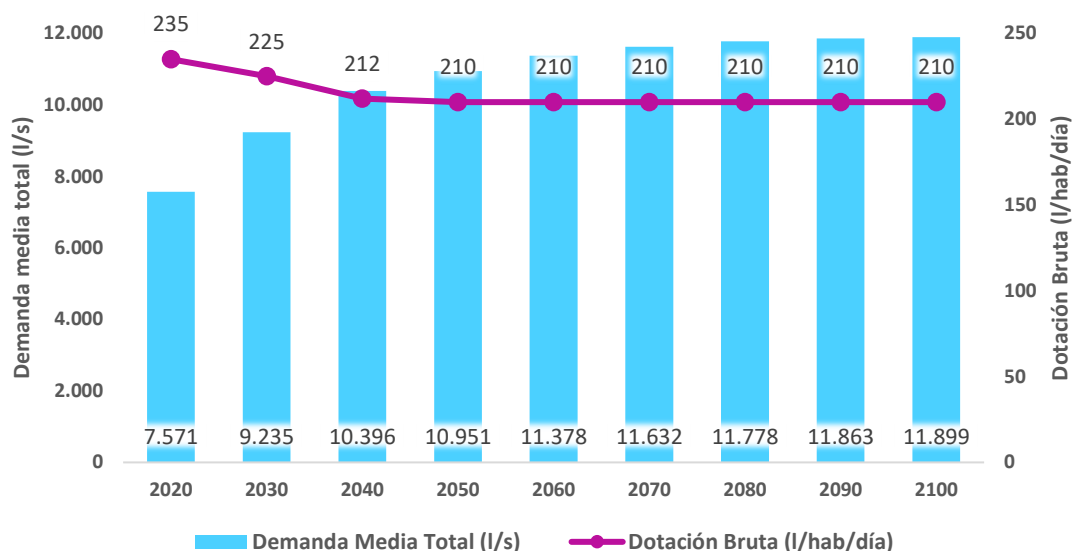
La evaluación conjunta de la demanda proyectada y la disponibilidad hídrica futura permite analizar el equilibrio del sistema de abastecimiento del Distrito Metropolitano de Quito bajo condiciones de cambio climático.

En este contexto, los resultados (Gráfico 10) muestran un fenómeno de desacople crucial en el que el crecimiento poblacional no se traduce en un aumento proporcional de la demanda de agua, consecuencia de la hipótesis de eficiencia que proyecta una reducción progresiva de la dotación per cápita hasta 210 l/hab/día, la demanda de agua potable se estabilizará en torno a los 11,9 m³/s a finales de siglo. Esto implica que, a pesar de la duplicación poblacional, la presión sobre las fuentes no crecerá linealmente, lo que sugiere entonces que un aumento de la población no necesariamente debe traducirse en un aumento infinito de infraestructura de captación existente.

Gráfico 10. Proyección de la demanda de caudal medio de agua potable en el DMQ (2020-2100)⁸

⁷ Escenario corregido (*Bias correction* y ajuste de volumen)

⁸ El gráfico de línea muestra el caudal medio requerido (l/s). La curva de demanda total replica. Las barras representan la curva de demanda total y replica la forma asintótica del crecimiento poblacional, pero con una



Fuente y Elaboración: IIC, 2025

Finalmente, la simulación de la oferta hídrica bajo escenarios climáticos sintéticos (RCP 2.6 y RCP 8.5) proyecta una tendencia hacia el incremento de la disponibilidad superficial bruta. Se observa un aumento del caudal medio anual entre el 30% y 40% (Tabla 5), impulsado principalmente por la intensificación de las precipitaciones durante la época húmeda. Sin embargo, el análisis de extremos (Gráfico 11) advierte sobre la "paradoja de la abundancia": este superávit viene acompañado de un aumento significativo en la magnitud de los caudales altos (Q5), lo que eleva exponencialmente el riesgo de inundaciones y la erosión de cauces.

Por otro lado, los caudales de estiaje (Q95) se mantienen relativamente estables, sugiriendo que la capacidad de regulación natural de los páramos seguirá amortiguando los efectos de la sequía meteorológica, siempre que se conserve la integridad de los ecosistemas de cabecera.

Tabla 5. Indicadores de caudal para el periodo histórico y escenarios sintéticos RCP 2.6 y RCP 8.8 en Guayllabamba bajo

Indicador	Unidad	Histórico	RCP2.6	Cambio RCP2.6 vs hist. (%)	RCP8.5	Cambio RCP8.5 vs hist. (%)
Caudal medio diario	m ³ /s	0,91	1,19	30,50	1,26	38,40
Caudal alto Q5	m ³ /s	1,59	2,08	31,10	2,29	43,90
Caudal bajo Q95	m ³ /s	0,70	0,73	4,20	0,73	4,50
Caudal medio anual	m ³ /s	0,90	1,19	32,10	1,26	40,10
CV del caudal medio anual	%	16,20	6,30	-61,30	8,20	-49,60

menor pendiente (delta) inicial. Esto se debe al efecto compensatorio de la disminución de la dotación per cápita durante las primeras 3 décadas (2020 – 2050), lo que amortigua la demanda agregada

Fuente y Elaboración: IIC, 2025

El Gráfico 11 presenta una comparación del comportamiento hidrológico del río Guayllabamba bajo tres condiciones: el régimen histórico observado y dos escenarios climáticos futuros correspondientes a las trayectorias de concentración representativas RCP2.6 y RCP8.5. El análisis se realiza a partir de dos representaciones complementarias del sistema hidrológico: las curvas de duración de caudales y el hidrograma mensual medio, lo que permite evaluar tanto la distribución probabilística de los caudales como la estacionalidad del régimen hídrico.

Las curvas de duración de caudales evidencian una diferencia clara entre el comportamiento histórico y los escenarios climáticos futuros. En toda la gama de probabilidades de excedencia, los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 presentan caudales superiores a los registrados históricamente. Este patrón sugiere un incremento general de la disponibilidad hídrica superficial en la cuenca bajo condiciones de cambio climático. El escenario RCP8.5, asociado a mayores niveles de emisiones y cambios climáticos más intensos, muestra sistemáticamente los caudales más elevados, especialmente en los rangos de baja probabilidad de excedencia (caudales altos), lo que indica un aumento potencial en la magnitud de eventos hidrológicos extremos. Por su parte, el escenario RCP2.6 mantiene un comportamiento intermedio entre el histórico y el RCP8.5, reflejando un incremento moderado en el régimen de caudales.

En los rangos de alta probabilidad de excedencia, que representan los caudales bajos o de estiaje, la diferencia entre escenarios se reduce, lo que indica que los cambios proyectados en los caudales mínimos serían relativamente menores en comparación con los cambios observados en los caudales máximos. Este resultado sugiere que la regulación natural de la cuenca, asociada principalmente a los ecosistemas de páramo y a las características edáficas de las subcuencas de cabecera, continuaría amortiguando las reducciones extremas de caudal durante los periodos secos.

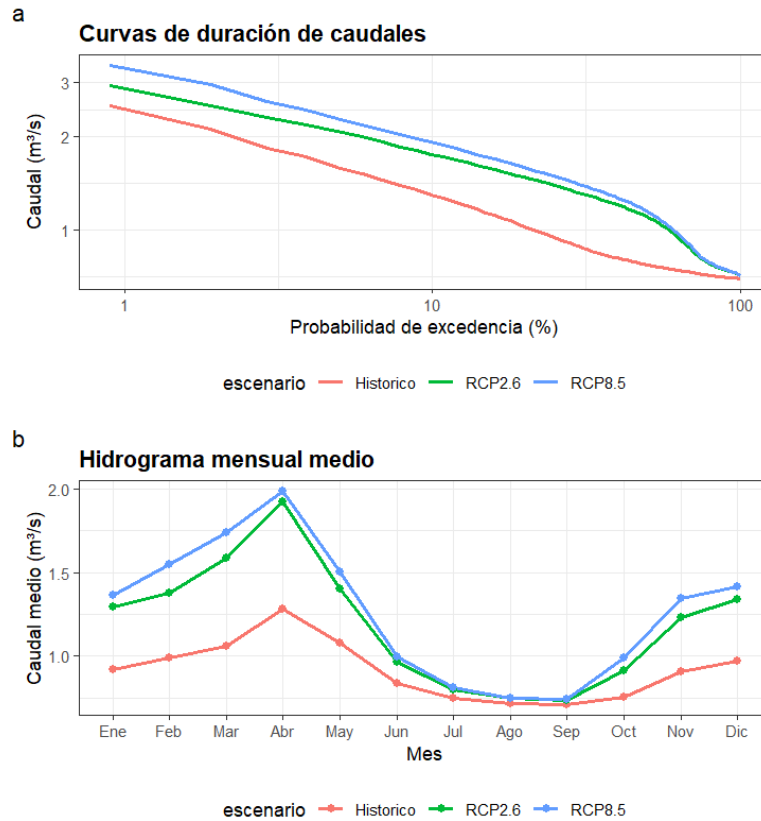
El hidrograma mensual medio complementa esta interpretación al mostrar la evolución estacional de los caudales bajo los tres escenarios. Se observa que el régimen histórico presenta un patrón claramente bimodal, característico de la región andina, con incrementos progresivos desde enero hasta alcanzar su máximo en abril, seguido de una disminución durante los meses secos de julio a septiembre y una recuperación gradual hacia el último trimestre del año. Este patrón estacional se mantiene en los escenarios climáticos futuros; sin embargo, los valores proyectados para RCP2.6 y RCP8.5 son consistentemente superiores a los del periodo histórico, especialmente durante los meses de mayor precipitación.

El incremento más significativo se observa entre febrero y mayo, donde los escenarios futuros muestran caudales medios considerablemente mayores, con un pico máximo en abril. Este comportamiento sugiere una intensificación de la temporada lluviosa, lo cual podría traducirse en mayores volúmenes de escorrentía y una mayor probabilidad de eventos de crecida. De manera similar, durante los meses finales del año (noviembre y diciembre) también se observa un aumento moderado de los caudales en comparación con el régimen histórico.

En contraste, durante el periodo de estiaje comprendido entre julio y septiembre, los caudales proyectados en los escenarios climáticos se mantienen relativamente cercanos a los valores históricos, lo que indica que las variaciones en los caudales mínimos serían menos pronunciadas que las observadas en los máximos. Esto sugiere que la estructura hidrológica de la cuenca conservaría cierto grado de estabilidad en los flujos base, a pesar de los cambios climáticos proyectados.

En términos simples, esto quiere decir que el aumento de agua no es constante, sino que se intensifica en determinados meses. Es decir, el sistema tendrá más agua en promedio, pero distribuida de manera desigual a lo largo del año.

Gráfico 11. Curvas de duración, hidrograma mensual medio en el histórico y las simulaciones para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5



Fuente y Elaboración: IIC, 2025

En conjunto, el análisis de las curvas de duración y del hidrograma mensual permite concluir que el sistema hidrológico del río Guayllabamba podría experimentar en el futuro un aumento general del caudal medio y una intensificación de los eventos de alta escorrentía, especialmente bajo escenarios climáticos más severos como el RCP8.5. Este comportamiento refuerza la hipótesis de un régimen hidrológico potencialmente más variable, en el que el incremento de la disponibilidad hídrica media podría coexistir con mayores riesgos asociados a crecidas, inundaciones y presiones sobre la infraestructura hidráulica del Distrito Metropolitano de Quito. Esto implica que los caudales altos tienden a ser más frecuentes e intensos, sugiriendo un aumento en la disponibilidad hídrica promedio del sistema.

Estos resultados muestran que el principal cambio no es solo cuánto aumenta el agua, sino cómo se distribuye en el tiempo, ya el agua tenderá a concentrarse en periodos más cortos, incrementando la presión sobre el sistema en los meses lluviosos, lo que tiene implicaciones directas para la gestión hídrica y la planificación del territorio que deberá considerar no solo la disponibilidad total del recurso, sino también la gestión de la variabilidad y de los eventos extremos que podrían intensificarse en el contexto del cambio climático.

8. Discusión

8.1. Limitaciones técnicas

Los resultados obtenidos en el presente estudio deben interpretarse considerando ciertas restricciones metodológicas y limitaciones técnicas inherentes al tipo de información disponible, a la escala del análisis y a las herramientas de modelación utilizadas. En primer lugar, existe una incertidumbre asociada a los escenarios climáticos utilizados para las proyecciones futuras. Si bien el estudio emplea trayectorias de concentración representativas ampliamente aceptadas en la literatura científica (RCP 2.6 y RCP 8.5), estas corresponden a escenarios sintéticos derivados de modelos climáticos globales y regionales, los cuales, aunque permiten identificar tendencias plausibles de cambio climático, no constituyen predicciones determinísticas del comportamiento climático local. En consecuencia, la magnitud exacta de las variaciones en precipitación, temperatura y caudales futuros podría diferir de las simulaciones presentadas, especialmente en lo referente a la variabilidad interanual y a la ocurrencia de eventos extremos.

Una segunda limitación relevante se relaciona con las brechas existentes en la red de monitoreo hidroclimático del territorio, particularmente en las zonas bajas de la cuenca del Guayllabamba y en subcuencas como Pisque y San Pedro. La escasa densidad de estaciones meteorológicas en estos sectores introduce incertidumbre en la estimación espacial de variables como la precipitación efectiva y la evapotranspiración, obligando al modelo a inferir ciertos componentes del balance hídrico mediante procedimientos matemáticos de reconstrucción de series y estimación indirecta de volúmenes no observados. Aunque se aplicaron técnicas robustas de imputación y corrección de sesgos, esta situación genera lo que puede denominarse un “punto ciego del monitoreo hidrológico”, que solo podrá reducirse mediante la ampliación de la red instrumental y la generación de registros de campo más densos y continuos.

Adicionalmente, el enfoque de modelación implementado se centra fundamentalmente en la dimensión cuantitativa del recurso hídrico, es decir, en la estimación de volúmenes, caudales y balances hidrológicos. Esto implica que el modelo no incorpora explícitamente variables relacionadas con la calidad del agua, tales como concentraciones de contaminantes, cargas orgánicas o procesos de eutrofización. Por tanto, el superávit hídrico proyectado en algunos escenarios no necesariamente se traduce en una disponibilidad efectiva de agua utilizable para consumo humano o para el mantenimiento de ecosistemas acuáticos. Factores como la contaminación urbana, las descargas industriales y los efectos del incremento de temperatura sobre el oxígeno disuelto pueden alterar significativamente la calidad del recurso, encareciendo los procesos de tratamiento y reduciendo la disponibilidad real para abastecimiento.

Asimismo, debe considerarse que las proyecciones de demanda hídrica incluidas en el estudio se basan en supuestos demográficos y de eficiencia en el consumo que, aunque fundamentados en tendencias observadas, podrían variar en función de cambios estructurales en la dinámica poblacional del Distrito Metropolitano de Quito. La evolución real de la población, los patrones de urbanización y los niveles de consumo per cápita podrían diferir de las estimaciones utilizadas en el modelo, lo que implicaría variaciones en la magnitud de la demanda futura de agua potable. El presente análisis no incorpora explícitamente escenarios de incorporación de nuevas fuentes de abastecimiento hídrico o ampliaciones significativas de la infraestructura de captación y conducción, tales como nuevos sistemas de trasvase, embalses o proyectos de aprovechamiento hídrico que eventualmente pudieran desarrollarse en el territorio o en cuencas vecinas. La implementación de este tipo de infraestructura

estratégica podría modificar sustancialmente el balance hídrico proyectado y mejorar la seguridad de abastecimiento a largo plazo, por lo que los resultados presentados deben interpretarse bajo el supuesto de continuidad de las condiciones actuales del sistema.

Finalmente, debe considerarse que el modelo hidrológico utilizado constituye una representación simplificada de un sistema hidrotitorial altamente complejo, donde intervienen procesos físicos, ecológicos y antrópicos difíciles de capturar completamente en un esquema de simulación. Aunque la calibración y validación del modelo muestran indicadores de desempeño satisfactorios, la dinámica real del sistema hídrico del Distrito Metropolitano de Quito está influenciada por múltiples factores adicionales, tales como cambios en el uso del suelo, expansión urbana futura, modificaciones en la infraestructura hidráulica y transformaciones en la gobernanza del agua. En este sentido, los resultados del estudio deben entenderse como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas, más que como una predicción absoluta del comportamiento hidrológico del territorio.

8.2. Paradoja de la abundancia hídrica ante el estés urbano y climático

Aunque las simulaciones hidrológicas desarrolladas en este estudio proyectan un incremento en la disponibilidad hídrica superficial para la cuenca del río Guayllabamba bajo escenarios de cambio climático (con aumentos del caudal medio anual entre el 30 % y 40 % según se detalla en la sección de Resultados), esta aparente bonanza hídrica no debe interpretarse como una garantía de seguridad hídrica para el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Al contrastar estos resultados con la dinámica de la demanda y las limitaciones de calidad del agua, emerge un escenario complejo donde la vulnerabilidad del sistema se traslada desde la fuente hacia la gestión de la calidad y la infraestructura.

Si bien la oferta hídrica bruta aumenta, la presión antrópica sobre el recurso crecerá de manera desproporcionada. Las proyecciones demográficas indican que la población del DMQ prácticamente se duplicará hacia el año 2100, alcanzando los 4.9 millones de habitantes. La literatura científica establece una correlación directa y no lineal entre la densificación urbana y la degradación de la calidad del agua. Estudios de revisión como los de O'Driscoll et al. (2010) y Halder et al. (2017) demuestran que, sin una expansión equivalente en la infraestructura de saneamiento, el aumento de la densidad poblacional excede la capacidad de autodepuración de los ríos, elevando drásticamente las concentraciones de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y coliformes fecales.

En el caso de Quito, Núñez Mejía (2020) advierte que la infraestructura actual, como la Planta de Tratamiento de Bellavista, opera cerca de su límite técnico. Por lo tanto, el "exceso" de agua proyectado en el río Guayllabamba podría convertirse en un vector de mayor contaminación si el volumen de aguas residuales no tratadas aumenta al mismo ritmo que la población, transformando el superávit hídrico en un problema de salud pública y degradación ecosistémica.

Existe un doble Impacto del aumento de la temperatura, en la demanda y la calidad. El calentamiento global proyectado en los escenarios RCP no solo afecta la hidrología, sino que actúa como un catalizador de estrés en dos frentes críticos:

- **Intensificación de la demanda per cápita:** Contrario a la estabilidad operativa deseada, el aumento de temperatura impulsa un mayor consumo de agua. Núñez Mejía (2020) reporta una correlación positiva significativa entre la temperatura media y la demanda de agua potable en Quito, observando picos de consumo durante los días secos y cálidos. Este comportamiento es consistente con la evidencia global; por ejemplo, Arbués et al. (2003) y Balling y Gobar (2007) señalan que la demanda residencial es altamente sensible a la temperatura, debido al

incremento en usos para higiene, hidratación y riego de jardines. Así, aunque el río traiga más agua, la "sed" de la ciudad crecerá más rápido de lo previsto únicamente por el aumento poblacional, estresando los sistemas de distribución durante las olas de calor.

- **Degradación termoquímica del agua:** Finalmente, es imperativo considerar que un clima más cálido compromete la calidad intrínseca del recurso. El aumento de la temperatura del agua reduce su capacidad para retener oxígeno disuelto (OD), un parámetro vital para la vida acuática y la oxidación de contaminantes orgánicos. Según una revisión crítica de Whitehead et al. (2009) y Delpla et al. (2009), el calentamiento de los cuerpos de agua no solo disminuye el OD, sino que acelera las tasas de reacción química y fomenta la proliferación de patógenos y floraciones algales (eutrofización).

En un río como el Guayllabamba, que ya recibe cargas significativas del Machángara, un aumento en la temperatura ambiente (propio de los escenarios RCP8.5) podría reducir la eficiencia de los procesos de autodepuración natural. Esto implica que, para potabilizar el agua en el futuro, se requerirán procesos más costosos y complejos, validando la tesis de que la disponibilidad física (cantidad) es condición necesaria pero no suficiente para garantizar el abastecimiento seguro.

En síntesis, aunque los modelos hidrológicos descartan un escenario de sequía meteorológica absoluta, el DMQ enfrenta un riesgo alto de "escasez cualitativa y operativa". La combinación de una población creciente (mayor carga contaminante) y un clima más cálido (mayor consumo y menor calidad fisicoquímica del agua) sugiere que la gestión futura no deberá enfocarse en buscar nuevas fuentes, sino en ampliar la infraestructura de tratamiento y proteger la calidad de los caudales excedentes frente a la degradación térmica y urbana.

9. Conclusiones

El estudio ha permitido establecer un diagnóstico cuantitativo robusto sobre el estado actual y futuro de los recursos hídricos en el Distrito Metropolitano de Quito. El modelo hidrológico semi-distribuido (GR4J) calibrado para la cuenca del Guayllabamba demostró una alta suficiencia técnica, alcanzando métricas de eficiencia (NSE 0,623 y KGE 0,647) que superan los estándares comúnmente aceptados para cuencas andinas complejas. Esto valida su uso como herramienta de planificación para la evaluación de balances hídricos a escala mensual y estacional, permitiendo analizar con mayor precisión la interacción entre variables climáticas, territoriales y antrópicas que condicionan la disponibilidad hídrica del Distrito Metropolitano de Quito.

Los resultados del estudio permiten identificar la presencia de fuentes no convencionales dentro del balance hídrico del sistema, ya que el balance de masa del modelo reveló un "déficit hídrico estructural" en los datos observados, el cual es compensado físicamente por un aporte subterráneo positivo estimado en aproximadamente 6,4 mm/día. Este hallazgo sugiere que existe un volumen significativo de agua que ingresa al sistema y que actualmente no está siendo medido por la red de monitoreo existente. Entre las posibles explicaciones se encuentran los procesos de interceptación de neblina en los ecosistemas de páramo (fenómeno conocido como lluvia horizontal) así como los retornos del sistema urbano de abastecimiento, tales como fugas en redes de distribución o descargas de alcantarillado que recargan parcialmente los flujos superficiales y subterráneos del sistema hidrológico.

El análisis hidrológico multiescalar evidencia que la cuenca del río Guayllabamba presenta una alta heterogeneidad en su comportamiento hidrológico, determinada tanto por las condiciones

morfométricas del territorio como por los procesos de ocupación urbana. Subcuencas de cabecera como el río Pita cumplen una función clave de regulación hídrica gracias a la presencia de suelos volcánicos y ecosistemas de páramo que favorecen la infiltración y el almacenamiento natural de agua. En contraste, las subcuencas urbanizadas, particularmente la del río Machángara, presentan una respuesta hidrológica rápida asociada al sellamiento del suelo y a la reducción de la capacidad natural de regulación, lo que incrementa la vulnerabilidad frente a eventos de precipitación intensa y genera mayores riesgos de escorrentía superficial e inundaciones urbanas.

Los escenarios de simulación climática desarrollados para el horizonte temporal 2020–2100 permiten identificar una tendencia general hacia un incremento de la disponibilidad hídrica superficial media en la cuenca, con aumentos proyectados del caudal medio anual entre aproximadamente 30% y 40% dependiendo del escenario climático considerado. Sin embargo, este incremento aparente de la oferta hídrica debe interpretarse con cautela, ya que se encuentra asociado principalmente a una intensificación de los eventos de precipitación durante la temporada húmeda.

En consecuencia, el sistema hidrológico podría enfrentar una mayor frecuencia e intensidad de caudales extremos, lo que incrementa el riesgo de inundaciones, erosión de cauces y presión sobre la infraestructura hidráulica urbana. Este fenómeno configura lo que puede denominarse la “paradoja de la abundancia”, donde un aumento en el volumen total de agua disponible no necesariamente implica una mejora en la seguridad hídrica del territorio, sino que puede venir acompañado de mayores riesgos hidrometeorológicos.

Por otra parte, las proyecciones de demanda hídrica elaborados combinados con los supuestos de eficiencia en el consumo y a la reducción progresiva de la dotación per cápita de agua potable, supone que la demanda total proyectada tiende a estabilizarse hacia finales del periodo de análisis. Este resultado evidencia un desacople parcial entre crecimiento poblacional y demanda hídrica, lo que sugiere que las políticas de eficiencia en el uso del agua y de reducción de pérdidas en el sistema de distribución pueden desempeñar un papel determinante para evitar la necesidad de ampliar de manera desproporcionada la infraestructura de captación en el futuro.

El estudio permite concluir que la seguridad hídrica del Distrito Metropolitano de Quito presenta una dependencia estructural significativa respecto a sistemas de trasvase externos, particularmente los sistemas Mica y Papallacta, cuyos aportes resultan fundamentales para sostener los caudales base en las subcuencas urbanas durante los periodos de estiaje. Esto implica que el sistema hídrico de la ciudad no opera exclusivamente bajo un régimen natural, sino que se encuentra fuertemente condicionado por la operación de infraestructura hidráulica regional. En este contexto, la resiliencia del sistema de abastecimiento urbano dependerá en gran medida de la adecuada gestión, mantenimiento y protección de estas fuentes externas, así como de la diversificación futura de las fuentes de abastecimiento mediante nueva infraestructura o estrategias de gestión integrada del recurso hídrico.

Finalmente, el análisis territorial integrado permite identificar zonas críticas donde convergen presiones climáticas y antrópicas, destacándose los valles orientales de Tumbaco y Cumbayá, las laderas del Pichincha y los sectores del sur del Distrito, como Quitumbe y Guamaní. En estos territorios, la expansión urbana, la impermeabilización del suelo y la ocupación de áreas ambientalmente sensibles incrementan la exposición a riesgos hidrológicos y geomorfológicos. Esto plantea la necesidad de fortalecer los instrumentos de planificación territorial, incorporar soluciones basadas en la naturaleza que permitan recuperar funciones ecosistémicas de regulación hídrica y mejorar la infraestructura de drenaje urbano. En conjunto, los resultados del estudio proporcionan una base

científica sólida para orientar la planificación hídrica del Distrito Metropolitano de Quito, contribuyendo a una gestión más preventiva, resiliente y basada en evidencia frente a los desafíos del cambio climático y la expansión urbana.

10. Referencias bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56). FAO.

Arsenault, R., Huard, D., Martel, J. L., Troin, M., Mai, J., Brissette, F., & colaboradores. (2023). The PAVICS-Hydro platform: A virtual laboratory for hydroclimatic modelling and forecasting over North America. *Environmental Modelling & Software*, 168, 105808. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105808>

Bryson, J. M. (2004). What to do when stakeholders matter: Stakeholder identification and analysis techniques. *Public Management Review*, 6(1), 21–53. <https://doi.org/10.1080/14719030410001675722>

Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A., & Céleri, R. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1247–1258. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1247-2010>

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28, 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>

Craig, J. R., Brown, G., Chlumsky, R., Jenkinson, R. W., Jost, G., Lee, K., & colaboradores. (2020). Flexible watershed simulation with the Raven hydrological modelling framework. *Environmental Modelling & Software*, 129, 104728. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104728>

Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., & Lavado, W. (2022). A novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds: Development and hydrological evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23, 309–336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>

FONAG. (2006). *Apoyo a la conservación en la cuenca alta del río Pita*.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., & colaboradores. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations (CHIRPS): A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Giorgi, F., Coppola, E., Jacob, D., Teichmann, C., Omar, S. A., Ashfaq, M., & colaboradores. (2022). The CORDEX-CORE EXP-I initiative: Description and highlight results from the initial analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103, E293–E310. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0119.1>

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80–91.

- Gutowski, W. J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H. S., & colaboradores. (2016). WCRP coordinated regional downscaling experiment (CORDEX): A diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 4087–4095. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4087-2016>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hermans, L., & Thissen, W. (2009). Actor analysis methods and their use for public policy analysts. *European Journal of Operational Research*.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., & colaboradores. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Lehner, F., Nadeem, I., & Formayer, H. (2023). Evaluating skills and issues of quantile-based bias adjustment for climate change scenarios. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, 9, 29–44. <https://doi.org/10.5194/ascmo-9-29-2023>
- Maraun, D. (2016). Bias correcting climate change simulations: A critical review. *Current Climate Change Reports*, 2, 211–220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Pahl-Wostl, C. (2009). A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. *Global Environmental Change*.
- Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*.
- Rowe, G., & Frewer, L. (2000). Public participation methods: A framework for evaluation. *Science, Technology, & Human Values*, 25(1), 3–29.
- World Meteorological Organization. (2011). *Guide to climatological practices* (WMO-No. 100).