



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Análisis de los Recursos Hídricos en Cuencas Prioritarias de Honduras:

Casos de Estudio en las Cuencas del Río
Choluteca, Ulúa, Chamelecón,
Lempa y Motagua

Autores:

Juliana Corrales (RTI)

Enrique Triana (RTI)

Ben Lord (RTI)

Fekadu Moreda (RTI)

Mauro Nalesso (BID),

Serena Emanuel (BID)

TABLA DE CONTENIDO

A	AGRADECIMIENTOS	8
1	1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	9
	1.1. Enfoque General del Estudio	12
	1.2. Herramientas de Modelación	13
	1.2.1. HydroBID	13
	1.2.2. WaterALLOC	14
	1.3. Organización del Informe	15
2	2. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD Y ESCASEZ HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOLUTECA	16
	2.1. Objetivos	17
	2.2. Área de Estudio	17
	2.3. Datos Usados para el Desarrollo del Escenario Línea Base	18
	2.3.1. Clima	18
	2.3.2. Sistema de Agua Potable	21
	2.3.3. Caudales	22
	2.3.4. Demandas de Agua	23
	2.4. Desarrollo del Modelo de Asignación de Agua	26
	2.4.1. Configuración de la Red de Flujo	26
	2.4.2. Configuración del Uso del Agua	26
	2.4.3. Calibración	29
	2.5. Análisis de la Oferta, Demanda y Déficit Hídrico Actual	34
	2.5.1. Oferta Hídrica	34
	2.5.2. Demanda Hídrica	35
	2.5.3. Déficit Hídrico	37
	2.5.4. Dinámica entre la Producción, Suministro y Almacenamiento del Sistema	38

TABLA DE CONTENIDO

2.6.	Análisis de la Oferta, Demanda y Déficit Hídrico Futuro Frente a un Contexto de Cambio Climático	40
2.6.1.	Proyecciones Climáticas y de Demanda para el 2030	40
2.6.2.	Impacto en la Oferta Hídrica	42
2.6.3.	Impacto en el Suministro y Déficit de Agua	43
2.6.4.	Impacto en la Capacidad de Producción, Suministro y Almacenamiento del Sistema	45
2.7.	Análisis de Alternativas para Reducir la Escasez Hídrica Futura en Tegucigalpa	47
2.7.1.	Descripción de Alternativas Analizadas	48
2.7.2.	Método de Análisis	48
2.7.3.	Resumen de Resultados y Recomendaciones	49
3.	ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD Y ESCASEZ HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO ULÚA	52
3.1.	Objetivos	53
3.2.	Área de Estudio	53
3.3.	Datos Usados para el Desarrollo del Escenario Línea Base	55
3.3.1.	Clima	55
3.3.2.	Características de los Embalses e Hidroeléctricas	55
3.3.3.	Demandas de Agua	58
3.4.	Desarrollo del Modelo de Asignación de Agua	58
3.4.1.	Configuración de la Red de Flujo y Uso del Agua en Tres Subcuencas	58
3.4.2.	Calibración	60
3.5.	Análisis de la Disponibilidad y Déficit Hídrico Actual	62
3.5.1.	Oferta Hídrica	62
3.5.2.	Demanda Hídrica	63
3.5.3.	Déficit Hídrico	64

TABLA DE CONTENIDO

	3.5.4. Disponibilidad Hídrica	65
	3.6. Impacto en la Disponibilidad y Déficit Hídrico frente a un Escenario de Cambio Climático	67
	3.6.1. Oferta Hídrica	67
	3.6.2. Déficit Hídrico	68
	3.6.3. Disponibilidad Hídrica	69
4	4. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LAS CUENCAS CHAMELECÓN, LEMPA Y MOTAGUA	71
	4.1. Objetivos	72
	4.2. Área de Estudio	72
	4.3. Datos Usados para el Desarrollo del Escenario Línea Base	73
	4.3.1. Clima	73
	4.4. Disponibilidad Hídrica Actual	74
	4.5. Impacto en la Disponibilidad Hídrica bajo un Escenario de Cambio Climático	77
5	5. CONCLUSIONES	78
	5.1. Conclusiones del Análisis en la Parte Alta de la Cuenca del Río Choluteca	79
	5.2. Conclusiones del Análisis en la Cuenca del Río Ulúa	82
	5.3. Conclusiones del Análisis en las Cuencas del Río Chamelecón, Lempa y Motagua	84
	5.4. Recomendaciones para Futuros Estudios de los Recursos Hídricos en las Cuencas Simuladas	85
R	REFERENCIAS	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Descripción de las estaciones climáticas	19
Tabla 2.2.	Capacidad de producción de las plantas de tratamiento	21
Tabla 2.3.	Parámetros de las demandas domésticas	24
Tabla 2.4.	Parámetros de las demandas agrícolas	24
Tabla 2.5.	Configuración de las prioridades de asignación de agua	28
Tabla 2.6.	Producción de las plantas de tratamiento en época de sequía	28
Tabla 2.7.	Valores sugeridos para los parámetros de HydroBID	30
Tabla 2.8.	Parámetros del modelo calibrado en dos estaciones hidrológicas	32
Tabla 2.9.	Estadísticas mensuales de calibración en dos estaciones hidrológicas	33
Tabla 2.10.	Cambios proyectados a nivel mensual en la precipitación (%) y temperatura media (oC) para la década del 2030 bajo el escenario RCP8.5	41
Tabla 2.11.	Producción de las plantas de tratamiento en época de sequía bajo las proyecciones de demanda en Tegucigalpa para el 2030	42
Tabla 2.12.	Proyectos propuestos para mejorar el suministro de agua en Tegucigalpa	47
Tabla 2.13.	Proyectos propuestos simulados	48
Tabla 3.1.	Características de los embalses e hidroeléctricas en la cuenca Ulúa	56
Tabla 3.2.	Configuración de las prioridades de asignación de agua en la cuenca Ulúa	59
Tabla 3.3.	Parámetros del modelo calibrado en la estación Chinda	60
Tabla 3.4.	Estadísticas mensuales de calibración en la estación Chinda	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de las cuencas analizadas	12
Figura 2.1. Ubicación de la parte alta de la cuenca del río Choluteca	18
Figura 2.2. Ubicación de las estaciones climáticas	19
Figura 2.3. Precipitación promedio mensual (mm) para la Cuenca Alta del Río Choluteca (2008-2017)	20
Figura 2.4. Temperatura promedio mensual (oC) para la Cuenca Alta del Río Choluteca (2008-2017)	21
Figura 2.5. Esquema del sistema de agua potable de Tegucigalpa	22
Figure 2.6. Caudal promedio mensual en dos estaciones hidrométricas	23
Figura 2.7. Patrón mensual del consumo de agua doméstico y agrícola	25
Figura 2.8. Representación de la red de MODSIM creada en WaterALLOC	27
Figura 2.9. Proceso de calibración	31
Figura 2.10. Comparación de los caudales promedio mensuales simulados con los caudales observados en dos estaciones hidrológicas	33
Figura 2.11. Oferta hídrica anual y mensual simulada en las cuencas de abastecimiento de Tegucigalpa	34
Figura 2.12. Demanda hídrica mensual promedio simulada	35
Figura 2.13. Suministro de agua anual simulado para Tegucigalpa y suministro promedio mensual para los diferentes usuarios en la Cuenca	36
Figura 2.14. Variabilidad en el suministro de agua mensual para Tegucigalpa y otros usuarios dentro de las cuencas de abastecimiento	37
Figura 2.15. Déficit hídrico anual y mensual simulado	38
Figura 2.16. Capacidad, suministro y almacenamiento de agua para Tegucigalpa	39
Figura 2.17. Volumen de agua no capturada por fuente de agua	40
Figura 2.18. Comparación de la oferta hídrica mensual actual y bajo un escenario de cambio climático	43
Figura 2.19. Comparación del suministro de agua promedio mensual actual y bajo un escenario de cambio climático para Tegucigalpa	44
Figura 2.20. Comparación del suministro y déficit hídrico mensual actual y bajo un escenario de cambio climático para Tegucigalpa	45
Figura 2.21. Comparación de los sistemas de abastecimiento de Concepción y Laureles actuales y bajo un escenario de cambio climático	46
Figura 2.22. Capacidad de suministro y producción de la planta de Miraflores con la expansión propuesta y el almacenamiento simulado en la cuenca Sabacuante	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.23. Caudales medios de agua no capturada por fuente de abastecimiento	50
Figura 3.1. Ubicación de la cuenca del río Ulúa	54
Figura 3.2. Subcuencas incluidas en la simulación	54
Figura 3.3. Volumen y evaporación del embalse Yojoa para el período 2000 - 2014	56
Figura 3.4. Curva área-elevación-volumen para el embalse Yojoa	57
Figura 3.5. Caudales de trasvase al lago Yojoa de los canales Yuré y Varsovia entre el período 2000 - 2014	57
Figura 3.6. Representación de la red de MODSIM creada en WaterALLOC para las subcuencas simuladas en la cuenca Ulúa	59
Figura 3.7. Comparación de los caudales promedio mensuales simulados con los caudales observados en la estación Chinda	61
Figura 3.8. Almacenamiento simulado del Embalse Yojoa comparado con los volúmenes históricos	61
Figura 3.9. Oferta hídrica anual y mensual simulada en las cuencas de abastecimiento de la cuenca Ulúa	62
Figura 3.10. Demanda hídrica mensual promedio acumulada	63
Figura 3.11. Suministro y deficiencia anual simulada en las subcuencas de la cuenca Ulúa	64
Figura 3.12. Deficiencias simuladas en el suministro de la demanda por subcuenca	65
Figura 3.13. Resumen de agua no capturada en las subcuencas	66
Figura 3.14. Comparación de la oferta hídrica mensual promedio entre la línea base y el escenario con influencia del cambio climático	68
Figura 3.15. Comparación del porcentaje de deficiencia promedio mensual entre la línea base y el escenario con cambio climático	69
Figura 3.16. Comparación del agua no capturada acumulada a nivel anual en las subcuencas con el efecto del cambio climático	70
Figura 4.1. Ubicación de las cuencas simuladas	73
Figura 4.2. Precipitación promedio anual (izquierda) y temperatura (derecha) para el área de estudio	74
Figura 4.3. Caudal unitario promedio anual generado normalizado por área (cm)	75
Figura 4.4. Coeficiente de variación en la generación de flujo anual promedio	76
Figura 4.5. Cambio porcentual en la generación del caudal promedio anual (izquierda) y en la variación interanual (derecha)	77

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las personas y organizaciones que hicieron contribuciones importantes al éxito del presente proyecto “Análisis de los Recursos Hídricos en Cuencas Prioritarias de Honduras: Casos de Estudio en la Cuencas del Río Choluteca, Ulúa, Chamelecón, Lempa y Motagua”.

Eduardo Marques Almeida, representante del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en Honduras y Mauro Nalesso, especialista de la División de Agua y Saneamiento (WSA, por sus siglas en Inglés), quienes brindaron liderazgo y un fuerte apoyo para desarrollar este estudio de caso. Addis Silva, asistente del representante en Honduras quien organizó la logística de las reuniones durante la misión. Serena Emanuel, Efrain Rueda, Jorge Quiñonez y Roberto Gonzalez consultores del BID, sirvieron de enlace con las partes interesadas locales y recopilaron los datos y la información necesaria para realizar el estudio.

Además, estamos agradecidos por la excelente colaboración y participación de las instituciones locales las cuales facilitaron el intercambio de información. Especialmente queremos agradecer al Ing. Ricardo Velázquez director de la Unidad de Gestión del Agua y Saneamiento Municipal de la Alcaldía Municipal del Distrito Central, (UGASAM-SANAA) y a todo su equipo de colaboradores, entre los cuales se encuentran Marco Moreno, Jose Nelson Duron, Gerson Eliuth Urtecho, Norman Zuniga, Myriam Narvaez e Ivis Peralta. Al Ing. Tomas Romero, jefe de operaciones del Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA). A la Inga. Carmen Cartagena directora de Recursos Hídricos del Ministerio de Medio Ambiente. Al Ing. Raul Alemán y Hector Tablas de Invest Honduras. A los Ings. Joel Silva y Juan Carlos Colindres de la Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG/Proagri). Al Ing. Manuel Conde de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE). A Hector Santos, Andrew McCown y Peter Hearne de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID- Honduras), y a Angel Murillo y Elan Tabora del Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE).



1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES



El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) brinda un importante apoyo financiero y técnico para proyectos de infraestructura en agua y saneamiento, riego, control de inundaciones, transporte y energía. Muchos de estos proyectos dependen de los recursos hídricos y tienen un gran potencial de verse afectados negativamente por los cambios locales y regionales en las variables de desarrollo que alteran la disponibilidad del agua, como el clima, el crecimiento de la población y los cambios en el uso de la tierra asociados con la urbanización, el crecimiento industrial y agricultura. Evaluar el efecto potencial de futuros cambios en la disponibilidad de agua es importante para garantizar que los proyectos de infraestructura cumplan con sus objetivos operativos, financieros y económicos. También es importante examinar las implicaciones de tales proyectos en la asignación futura del agua disponible entre usuarios y usos competitivos, para anticipar y ayudar a mitigar posibles conflictos, y para permitir que dichos proyectos sean consistentes con los planes de desarrollo regional a largo plazo y la preservación de servicios esenciales del ecosistema.

Como parte de su compromiso de ayudar a los países miembros a adaptarse al cambio climático, el BID ha patrocinado el trabajo para desarrollar y aplicar el sistema HydroBID, un conjunto integrado de herramientas de modelación de recursos hídricos personalizados para la región de Latino América y el Caribe (LAC). Las capacidades de HydroBID incluyen la simulación de la hidrología, evaluación efecto del cambio climático, estimación del impacto de la operación de reservorios en la disponibilidad de agua, carga y transporte de sedimentos e interacciones del flujo de agua superficial y subterránea. El sistema de modelación de HydroBID funciona con una base de datos ya incorporada que organiza y agrega propiedades físicas y contiene la conectividad y dirección del flujo de agua a través de más de 300,000 cuencas y flujos de agua en LAC.

Desde la creación de HydroBID, RTI International ha trabajado como firma consultora del BID para aplicar el sistema en varios países de la región, como Argentina, Perú, Brasil, Ecuador, Guatemala, Costa Rica, Colombia, Chile, Paraguay, México y Panamá. Cada uno de los estos proyectos tuvo como objetivo apoyar las decisiones basadas en la ciencia y proveer soluciones para la gestión de los recursos hídricos y los problemas de planificación que experimentan los países, especialmente en el contexto de la gestión integrada de los recursos hídricos y cambio climático.

En el 2019, el gobierno del Honduras solicitó asistencia técnica al BID para analizar los problemas de déficit de agua en la ciudad de Tegucigalpa y proveer alternativas de abastecimiento en la ciudad. Adicionalmente, el gobierno estaba interesado en evaluar la disponibilidad hídrica en otras cuencas prioritarias como la cuenca Ulúa, Chamelecón, Lempa y Motagua, particularmente frente a un contexto de cambio climático.

En Honduras, se espera que el cambio climático aumente temperaturas y disminuya las precipitaciones en las próximas décadas, exacerbando la falta de agua potable que ha obligado

al gobierno a racionar el agua en la capital de Tegucigalpa, donde algunos de sus habitantes reciben agua solo una vez a la semana. Los desastres naturales, la agricultura y la expansión urbana han degradado los bosques y cuencas hidrográficas y las han dejado vulnerables a eventos climáticos extremos. Los huracanes y las tormentas tropicales han azotado repetidamente la nación centroamericana, dañando los embalses que son la principal fuente de agua para las personas y los cultivos. La situación se volvió tan grave que de 1992 a 2011, Honduras ocupó el tercer lugar en un índice global de riesgo climático.

La combinación de un terreno montañoso y una alta estacionalidad climática representan un desafío para el suministro de agua a más de un millón de habitantes en el área metropolitana de Tegucigalpa, la cual es abastecida principalmente por fuentes superficiales en la parte alta de la cuenca del río Choluteca: dos embalses, Concepción y Los Laureles, ubicados en las cuencas de Concepción y Guacerique, respectivamente. La cuenca de Guacerique es una cuenca muy importante porque abastece el 25% del suministro de agua en Tegucigalpa. Sin embargo, esta cuenca ha sido identificada por el Gobierno de Honduras como una de las áreas más vulnerables al cambio climático tras el huracán Mitch en 1998. Desde Mitch, el embalse ha perdido un estimado del 15% de su capacidad de almacenamiento debido al aumento de la sedimentación. Además de la disminución de la capacidad del embalse, el desarrollo urbano y varias tormentas tropicales han provocado una rápida deforestación de la cuenca, lo que lleva a una mayor erosión del suelo, más escorrentía y menos agua capturada por el embalse (Vignola et al., 2015). La ciudad cuenta con otras fuentes adicionales de agua representadas por acueductos (San Juancito-Picacho; Jutiapa-Picacho; San Juan, Las Cañas, Las Trojas-Picacho y Sabacuante, Tatumbala- Miraflores), los cuales aportan alrededor de un 18%, y por pozos profundos que aportan solo un 1%. Sin embargo, estas fuentes de agua potable combinadas con el suministro proveniente de los embalses son insuficientes para satisfacer las necesidades de la población de Tegucigalpa y han provocado una escasez permanente de agua con solo el 52% del agua potable requerida disponible durante la estación seca en Tegucigalpa (Coello-Balthasar et al., 2011).

Para abordar la escasez de agua en Tegucigalpa, la empresa de Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA), la cual es la institución responsable de la administración del suministro de agua y de los servicios de alcantarillado en todo el país, ha llevado a cabo obras de reconstrucción y elaborado un plan maestro de abastecimiento con apoyo de cooperación internacional de varios países extranjeros. Sin embargo, estas obras de reconstrucción no siempre han estado bien organizadas debido a su naturaleza urgente y actualmente se siguen presentando racionamientos sistemáticos en el suministro de agua.

Adicionalmente de la cuenca del río Choluteca, Honduras posee otras cuencas hidrográficas importantes por ser fuentes de abastecimiento para el sector agrícola, centros urbanos, y para la generación hidroeléctrica del país. Algunas de estas cuencas son las del río Ulúa, Chamelecón, Lempa y Motagua. Estas cuencas están bajo el Corredor Seco Centroamericano, lo cual pone las actividades económicas, los servicios ambientales y recursos hídricos de estas cuencas más susceptibles al cambio climático.

1.1. ENFOQUE GENERAL DEL ESTUDIO

Para definir el alcance del trabajo, comprender las necesidades de las instituciones locales y recolectar información, el BID realizó una misión a Honduras integrada por los consultores Efrain Rueda y Serena Emanuel del 9 al 13 de Diciembre de 2019. Durante la misión se realizaron reuniones con representantes de la Unidad de Gestión del Agua y Saneamiento Municipal de la Alcaldía Municipal del Distrito Central (UGASA-SANAA), del Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG), Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE), con la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID- Honduras), el Banco Centroamericano de Integración Económica y otros expertos del sector. En la misión se acordó que la primera fase del estudio se centraría en la cuenca alta del río Choluteca hasta las captaciones que alimentan los acueductos de la región metropolitana de Tegucigalpa y la segunda fase en las cuencas de los ríos Lempa, Ulúa, Chamelecón y Motagua hasta la influencia de los polos de desarrollo. La Figura 1.1 presenta la ubicación y extensión de las cinco cuencas analizadas en este estudio.

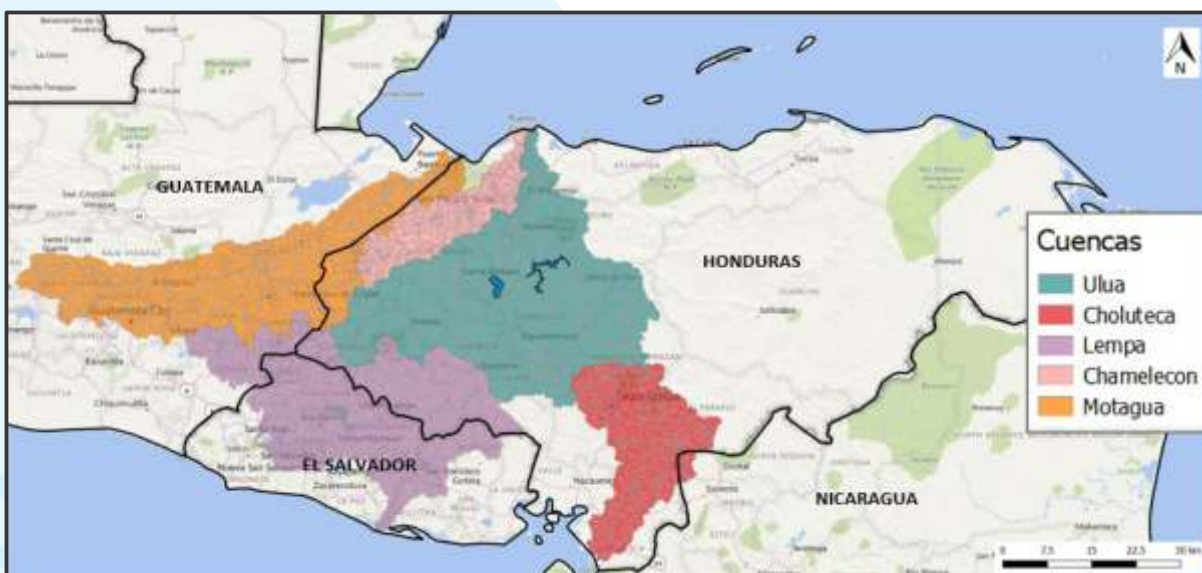


Figura.1.1. Ubicación de las cuencas analizadas.

1.2. HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN

El enfoque utilizado en este estudio se basó en dos herramientas de modelación de hidrología desarrolladas por RTI: HydroBID y WaterALLOC. HydroBID, un sistema de modelación, desarrollado con financiamiento del BID, ha sido personalizado específicamente para la región de América Latina y el Caribe (LAC). El modelo simula flujos superficiales bajo condiciones climáticas y de uso del suelo actuales y futuros en diferentes escalas espaciales y en un paso de tiempo diario. El modelo ya se ha aplicado en más de 15 países de la región, incluyendo Guatemala, Costa Rica, México y Panamá como una de las herramientas de gestión de los recursos hídricos que se utilizan para evaluar alternativas de proyectos de infraestructura y para guiar políticas y programas que sean resilientes a los cambios previstos en la disponibilidad de agua. WaterALLOC es una plataforma que integra perfectamente HydroBID con MODSIM (un modelo de asignación de agua y operación de cuenca) en una sola aplicación, reduciendo la preparación de datos y la integración de los modelos. WaterALLOC se ha aplicado para evaluar la sostenibilidad del balance hídrico frente a los riesgos del cambio climático para la producción agrícola e industrial de Danper Trujillo S.A.C. en Perú, para evaluar los cambios en la disponibilidad de agua para la generación de energía hidroeléctrica y el uso de aguas subterráneas en la cuenca del Maule, Chile en el contexto del cambio climático y recientemente se aplicó en Brasil para apoyar un análisis hidro-económico de la planificación del suministro de agua para el Distrito Federal de Brasilia.

1.2.1. HydroBID

El sistema de modelación HydroBID para la simulación cuantitativa de la hidrología y el cambio climático tiene tres componentes principales: la base de datos de hidrografía analítica (AHD), la base de datos y el modelo hidrológico. La AHD es una representación digital de las cuencas hidrográficas y los segmentos fluviales para toda la región de LAC, la cual contiene más de 300,000 cuencas digitalizadas con un tamaño promedio de 83 km² para Su América y 23 km² para Centro América y el Caribe. La AHD es una plataforma regional de datos espaciales utilizada para integrar diferentes datos necesarios en la modelación hidrológica. Además, la AHD proporciona un marco para la parametrización constante de modelos, proporciona la conectividad de la red fluvial y almacena los datos necesarios para mostrar los resultados en un formato de Sistema de Información Geográfica (SIG). La base de datos contiene información asociada con cada cuenca, incluyendo el área de drenaje, la longitud del río, la pendiente, los usos del suelo y los tipos de suelo. El modelo hidrológico es una versión mejorada del modelo de Función de Carga Generalizada por Cuenca Hidrográfica (GWLF, por sus siglas en inglés) (Haith y Shoemaker, 1987), junto con una nueva metodología de enrutamiento del flujo desarrollada por RTI (Moreda et al., 2014).

El modelo calcula la escorrentía y el flujo base por cuenca. El GWLF estima la escorrentía utilizando el método del número de curva (NC) del Servicio de Conservación del Suelo de los EE.UU. Los NCs de las cuencas se almacenan en la base de datos y están determinados por la combinación de las condiciones de la cobertura del suelo y el tipo de suelo, que se representan como grupos hidrológicos del suelo, tipo de cubierta, tratamiento y condición hidrológica. Después de las estimaciones de escorrentía, el exceso de precipitación se infiltra en la capa no saturada donde está sujeto a evaporación. Con el tiempo, el agua infiltrada se filtra desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el almacenamiento saturado. El agua dentro de la capa saturada ingresa al canal de la corriente como flujo base, donde se combina con la escorrentía de la cuenca y las entradas de agua provenientes de las cuencas aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de la corriente para cada día.

Un preprocesador conocido como la Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos (CDIT), integrado en el sistema de modelación HydroBID, automatiza la interpolación espacial de variables climáticas entre estaciones. La CDIT permite generar series de tiempo diarias de precipitación y temperatura para cada subcuenca incluida en la modelación. Los resultados del modelo se guardan en un formato fácilmente utilizable, de valores separados por comas (.csv), en un paso de tiempo diario o mensual. El sistema tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) que facilita cargar los datos de entrada y su procesamiento, y además, muestra los resultados del modelo gráfica y tubularmente. El modelo hidrológico utiliza la estructura de datos y las topologías de red de drenaje de la AHD para generar estimaciones de flujo en la salida de cualquier cuenca o cuencas seleccionadas por el usuario. Además de la generación de flujo, HydroBID incluye otros módulos para 1) simulación de embalses, 2) transporte de sedimentos e 3) interacciones de aguas superficiales y subterráneas utilizando MODFLOW.

1.2.2. WaterALLOC

WaterALLOC proporciona una nueva interfaz basada en SIG que utiliza la representación de flujo de la AHD para crear automáticamente una red de simulación de MODSIM¹ e importar los resultados de HydroBID. WaterALLOC agiliza el procesamiento de datos entre HydroBID y MODSIM, ofreciendo una solución para realizar análisis de disponibilidad de agua, incluyendo operaciones de regulación y almacenamiento de ríos y embalses, demandas y prioridades de suministro, utilizando todas las herramientas y personalización proporcionadas por MODSIM. WaterALLOC mejora la experiencia de los usuarios de HydroBID y MODSIM, permitiendo al usuario de HydroBID usar la interfaz SIG para ejecutar el sistema y usar diálogos de entrada para introducir los datos de demandas agrícolas y municipales. La red de simulación de MODSIM creada a partir de la red AHD, utiliza las cuencas y cauces para definir los enlaces y nodos de la

1. MODSIM es un sistema generalizado de apoyo a la toma de decisiones sobre las cuencas fluviales, que usa optimización en una red de flujo para simular el movimiento de agua en la cuenca. MODSIM fue desarrollado en la Universidad Estatal de Colorado con el objetivo de ayudar a los administradores de cuencas hidrográficas con el análisis de suministro hídrico ante la incertidumbre hidrológica y el crecimiento de la demanda. <http://modsim.engr.colostate.edu/>

red de MODSIM. WaterALLOC vincula los resultados de la esorrentía local de HydroBID a los nodos de entrada de MODSIM para simular el enrutamiento de los flujos de una cuenca. Los nodos de demanda geo-referenciados se pueden crear con la herramienta para simular el consumo de agua de acuerdo con su disponibilidad en diferentes puntos de la cuenca y de acuerdo con los permisos, prioridades y limitaciones físicas e hidráulicas del sistema. WaterALLOC también permite la creación y simulación de la operación de sistemas de reservorios, simulando operaciones de suministro de agua y generación de energía.

La nueva plataforma de modelación robusta ofrece una solución simplificada para la gestión de datos entre los modelos, la capacidad de realizar un análisis integral del balance hídrico que incluye reglas de operación de infraestructura hídrica, prioridades de asignación de agua y restricciones administrativas y sociales. Además, la plataforma permite la simulación de cambios dinámicos en la cobertura del suelo, la demanda de agua, la población, las interacciones de aguas superficiales y subterráneas y el clima.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El enfoque general utilizado en este estudio se dividió en tres partes principales. Debido a la importancia de la cuenca Choluteca para el suministro de agua a Tegucigalpa, la Sección 2 de este informe está enfocada en dar un análisis detallado de las condiciones actuales y futuras de disponibilidad y escasez hídrica para la ciudad bajo un contexto de cambio climático y un incremento de la demanda. El análisis de la disponibilidad hídrica actual y bajo un efecto de cambio climático para la cuenca Ulúa se presenta en la Sección 3, y en la Sección 4 para las cuencas Chamelecón, Lempa y Motagua. Por último, la Sección 5 presenta las conclusiones y recomendaciones.



2. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD Y ESCASEZ HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOLUTECA



2.1. OBJETIVOS

El sistema de abastecimiento en Tegucigalpa, ubicado en la parte alta de la cuenca del río Choluteca, enfrenta dos grandes problemas: el suministro discontinuo de agua potable que actualmente enfrenta y el abastecimiento futuro teniendo en cuenta el rápido crecimiento de la demanda. Este estudio (en adelante denominado “el Estudio”) tiene como objetivo general brindar asistencia técnica en la implementación de sistemas de modelación como apoyo para la gestión integrada de los recursos hídricos en las cuencas abastecedoras de agua de la ciudad. Los objetivos específicos del estudio son:

- Analizar las condiciones actuales de disponibilidad y escasez hídrica para la ciudad de Tegucigalpa.
- Analizar las condiciones futuras de disponibilidad y escasez hídrica para la ciudad de Tegucigalpa frente a un contexto de cambio climático, y
- Analizar fuentes potenciales y diferentes estrategias de gestión para reducir el déficit de agua actual que enfrenta la ciudad.

2.2. ÁREA DE ESTUDIO

Esta parte del Estudio se concentra en la parte alta de la cuenca del río Choluteca (en adelante denominada “la Cuenca”), cubriendo el área urbana de Tegucigalpa por ser el área de servicio para el suministro de agua y las áreas relacionadas a las fuentes actuales de agua (-Figura 21). La capital, ubicada a unos 900 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), es suministrada principalmente por fuentes superficiales provenientes de las subcuencas de Guacerique, Concepción, Sabacuante, Tatumbra, Ojojona y la Montaña La Tigra (Medina, 2012). La cuenca del río Choluteca ha experimentado cambios significativos en el uso de la tierra en los últimos años, lo cual, combinando con la deforestación, la conversión a la agricultura y los asentamientos humanos ha contribuido a la sedimentación de los canales de los ríos y ha aumentado el potencial de inundación en los afluentes. Además, la proximidad a la ciudad ha promovido proyectos residenciales, comerciales e industriales (Procter et al., 2013).



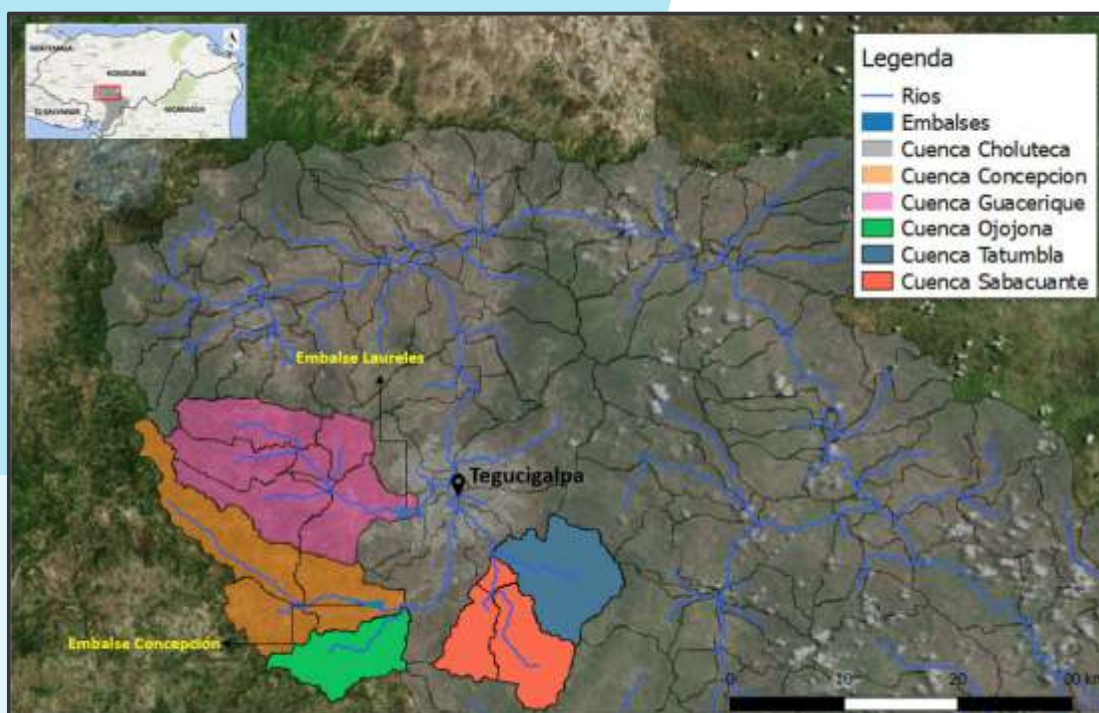


Figura. 2.1. Mapa de ubicación de obras en el Área Metropolitana de Asunción.

2.3. DATOS USADOS PARA EL DESARROLLO DEL ESCENARIO LÍNEA BASE

Con el fin de caracterizar las condiciones históricas de la Cuenca, se recolectaron datos climáticos, hidrológicos, información sobre el sistema de abastecimiento de agua potable para Tegucigalpa y datos sobre las demandas de agua para diferentes tipos de usuarios (domésticos y agrícolas). Estos datos fueron recolectados en su mayoría por el equipo de consultores del BID durante la misión de arranque en Honduras y fueron compartidos por representantes del SANAA. A continuación, se provee un resumen de la información recolectada para configurar los sistemas de modelación, HydroBID y WaterALLOC.

2.3.1. Clima

Se necesitaron dos tipos principales de datos para construir el modelo HydroBID: mediciones de datos climáticos (series temporales diarias de temperatura y precipitación) y mediciones/estimaciones de caudal. La selección de los datos utilizados para el análisis consideró de la calidad, integridad y duración de las series de tiempo. Vale la pena señalar que la disponibilidad de datos limita el período de simulación utilizado para ejecutar el modelo, por lo que el período de simulación debe tener datos climatológicos e hidrológicos que coincidan temporalmente para la cuenca en estudio. Los datos diarios de precipitación y temperatura fueron obtenidos directamente del SANAA para un período entre 2008 - 2017. Aquellas estaciones con más del 95% de los datos completos para el período de tiempo fueron seleccionadas para este estudio. La Tabla 21, presenta una descripción de las estaciones y la Figura 2.2, muestra su ubicación.

Tabla. 2.1. Descripción de las estaciones climáticas.

Estación	Latitud	Longitud	Elevación (m.s.n.m.)	Variable
Aguacatal	13.9844	-87.3717	1423	Precipitación
Batallón	14.0666	-87.2568	1063	Precipitación y Temperatura
Concepción	13.9858	-87.2669	1200	Precipitación y Temperatura
Juana La Inez	14.0927	-87.1999	1071	Precipitación
La Brea	14.0548	-87.3873	1610	Precipitación
Las Sabanas	14.0258	-87.3379	1560	Precipitación
Protección	14.2581	-87.4588	1370	Precipitación
Rincón Dolores	14.1401	-87.3997	1660	Precipitación
San Matías	14.1376	-87.3446	1360	Precipitación
Villa Real	13.9928	-87.1696	1245	Precipitación y Temperatura

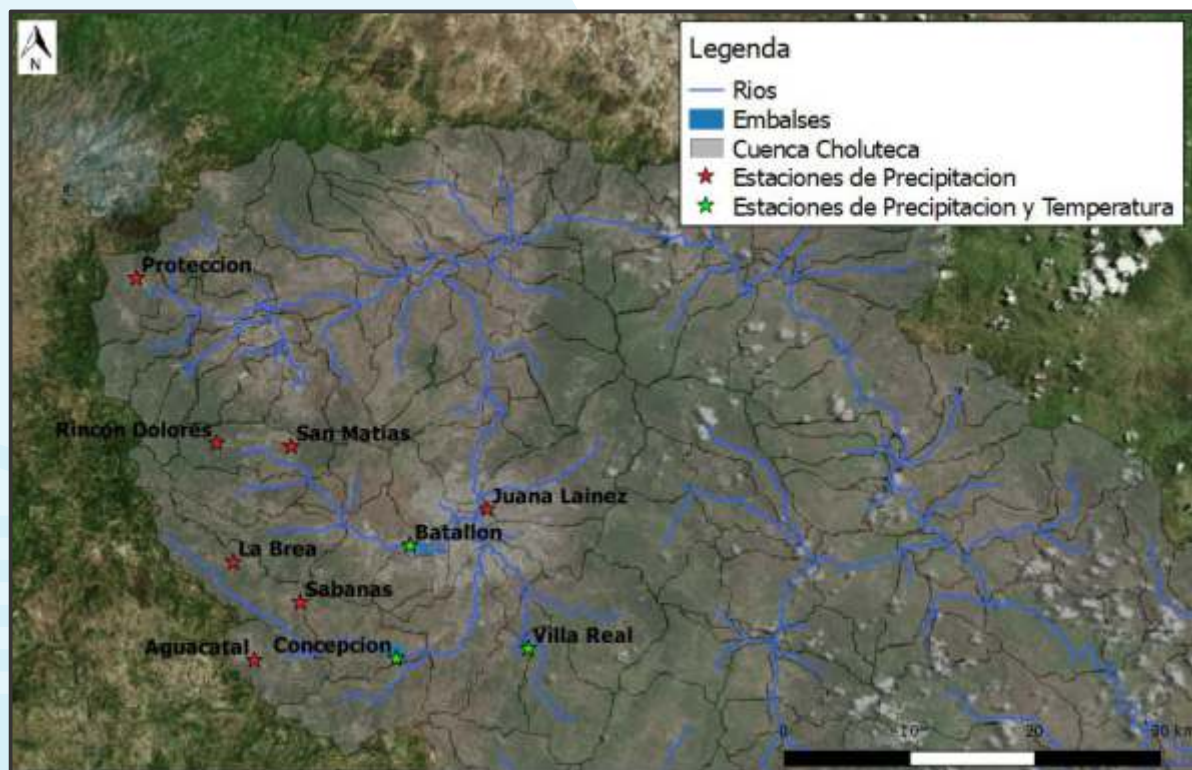


Figura. 2.2. Ubicación de las estaciones climáticas.

En este estudio, el período de la disponibilidad de datos (10 años) fue suficiente para capturar la variabilidad climática y por lo tanto en la respuesta hidrológica de la Cuenca, es decir que el período registra períodos húmedos, normales y secos. La variación estacional de la precipitación y temperatura en la Cuenca se muestra en la Figura 2.3 y Figura 2.4, respectivamente.

La precipitación media anual en la Cuenca es de 1,269 mm (2008 -2017). El régimen de lluvias presenta un comportamiento bimodal, con precipitaciones máximas en promedio de 198 mm entre los meses de Mayo-Junio y Septiembre-Octubre. El período más seco se observa entre los meses de Enero-Marzo con precipitaciones promedio mensuales de 13 mm (Figura 2.3). En cuanto a la temperatura se observan oscilaciones menores durante el año. La temperatura promedio anual en la Cuenca es de 22.4°C. Las temperaturas máximas se alcanzan en el mes de Abril (24.7°C), mientras que las temperaturas mínimas se observan en Enero (20.2°C)(Figura 2.4).

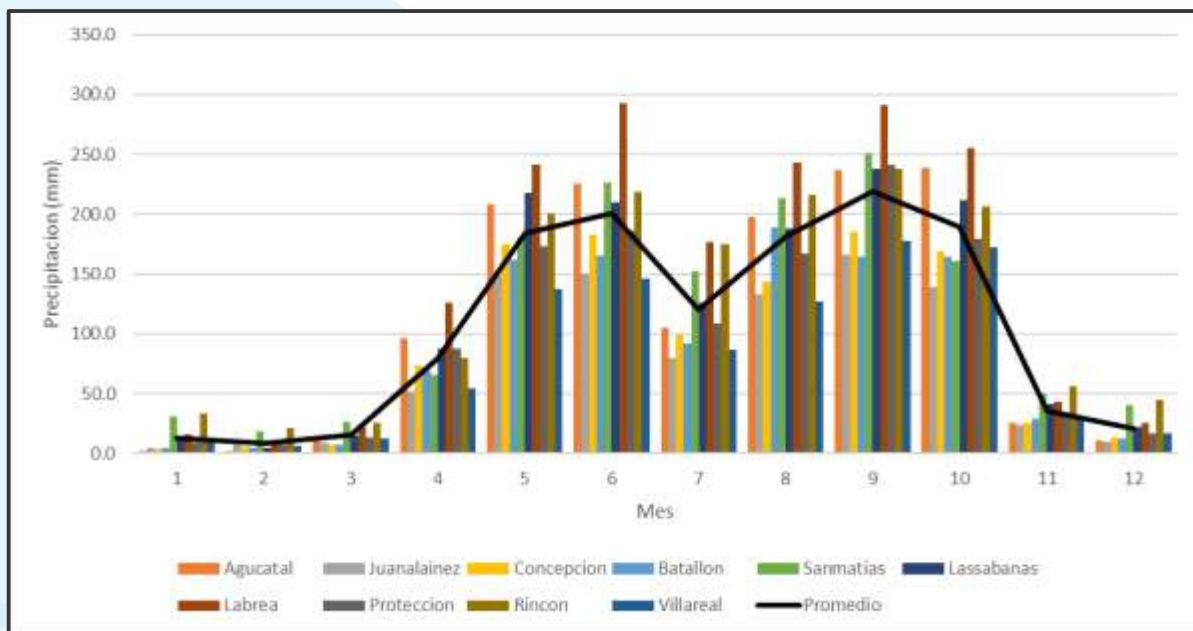


Figura. 2.3. Precipitación promedio mensual (mm) para la Cuenca Alta río Choluteca (2008 - 2017).

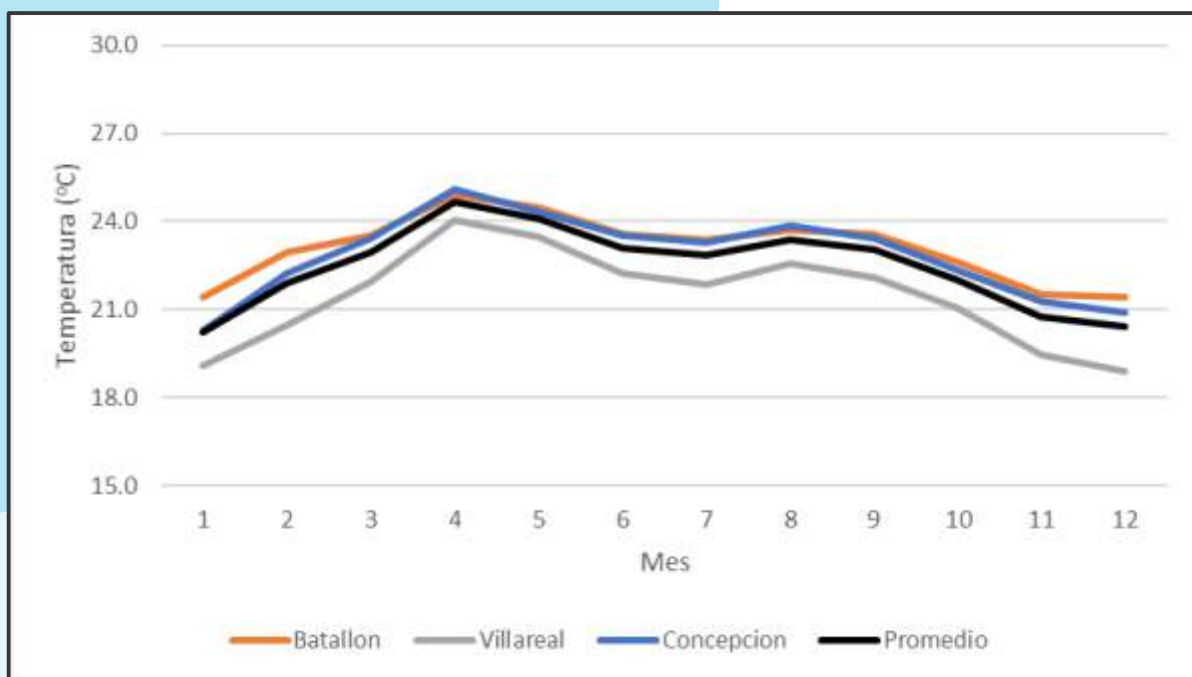


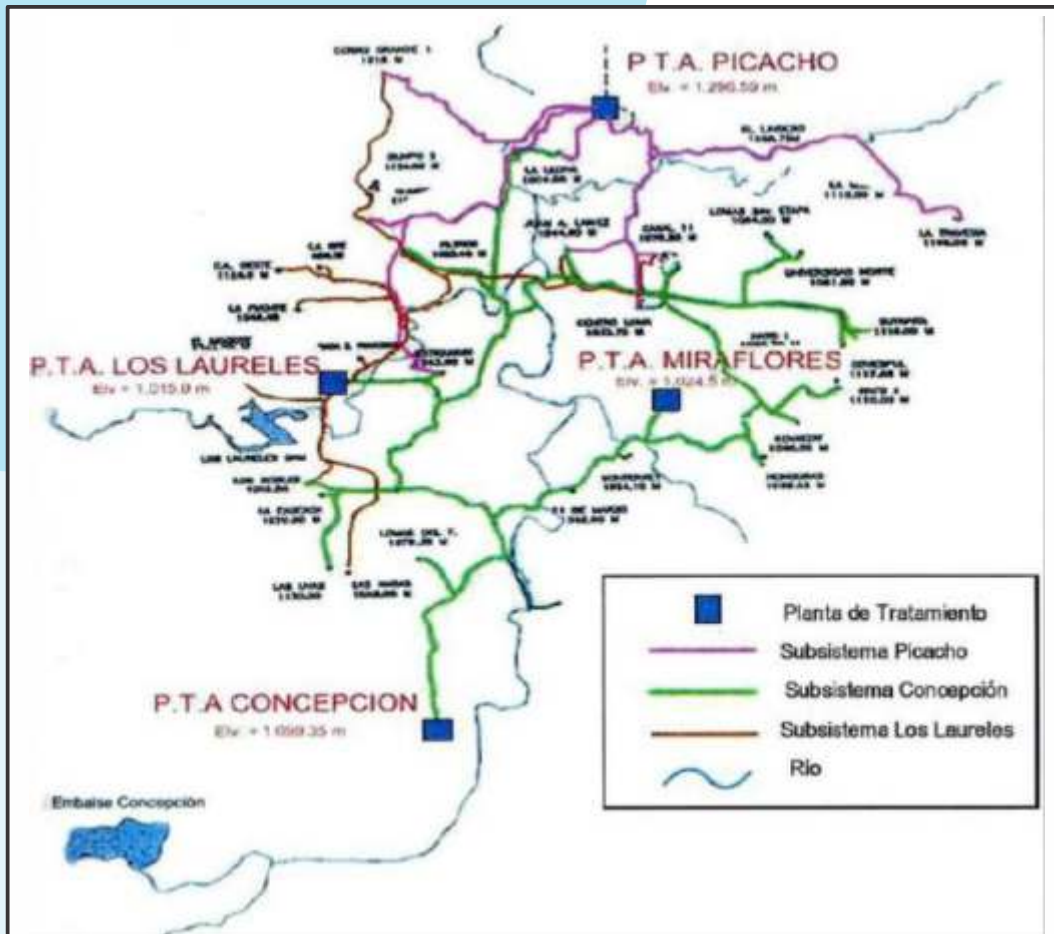
Figura. 2.4. Temperatura promedio mensual (°C) para la Cuenca Alta del Río Choluteca (2008–2017).

2.3.2. Sistema de Agua Potable

El sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Tegucigalpa está constituido por dos embalses de regulación y almacenamiento: Concepción y Laureles, con una capacidad de almacenamiento de 36 Mm³ y de 11 Mm³, respectivamente. Existen también dos sistemas de acueducto: Picacho (proveniente del noreste) y Miraflores (proveniente del sureste). Estas fuentes de agua confluyen hacia cuatro plantas de tratamiento: Concepción, Los Laureles, Picacho y Miraflores (Figura 2.5). La oferta de producción de agua para la ciudad está constituida por un caudal de producción total de las cuatro plantas de 3,495 l/s en época de invierno (Tabla 2.2). Adicionalmente, existen 10 pozos de agua subterránea de reducido caudal y alta dureza los cuales solo representan un 1% del abastecimiento de agua para la ciudad. El sistema se alimenta de un transvase de 250 l/s del Río Ojojona hacia el embalse Concepción. La capacidad máxima de almacenamiento y la capacidad de producción se utilizó para parametrizar los embalses y las plantas de tratamiento en WaterALLOC, respectivamente.

Tabla. 2.2. Capacidad de producción de las plantas de tratamiento.

Planta	Capacidad (l/s)
Concepción	1,600
Laureles	720
Picacho ,1	1 00
Miraflores 5	7
Total	3,495



Fuente: Medina, 2012

Figura. 2.5. Esquema del sistema de agua potable de Tegucigalpa.

2.3.3. Caudales

El Estudio consideró dos estaciones hidrométricas ubicadas en el río Guacerique y en el río Grande, justo a la entrada de los embalses Los Laureles y Concepción, respectivamente. La distribución mensual de los caudales se ilustra en la Figura 2.6. Los caudales en la estación Guacerique son variables en el transcurso del año, registrando los caudales promedios más bajos en los meses de Noviembre a Abril entre $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$ y los caudales promedios más altos en los meses de Junio ($2.36 \text{ m}^3/\text{s}$) y Octubre ($2.78 \text{ m}^3/\text{s}$). Los caudales bajos en la estación Concepción (menores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$), también se registran entre los meses de Noviembre a Abril y el caudal pico de $3.80 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de Octubre. Los caudales promedio mensuales para las estaciones de Guacerique y Concepción fueron de $1.01 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente para un período del 2008 al 2017 y del 2008 al 2015. Los datos de caudal fueron utilizados para la calibración de los modelos. En la Sección 2.4.3 se describe la metodología y resultados de la calibración.

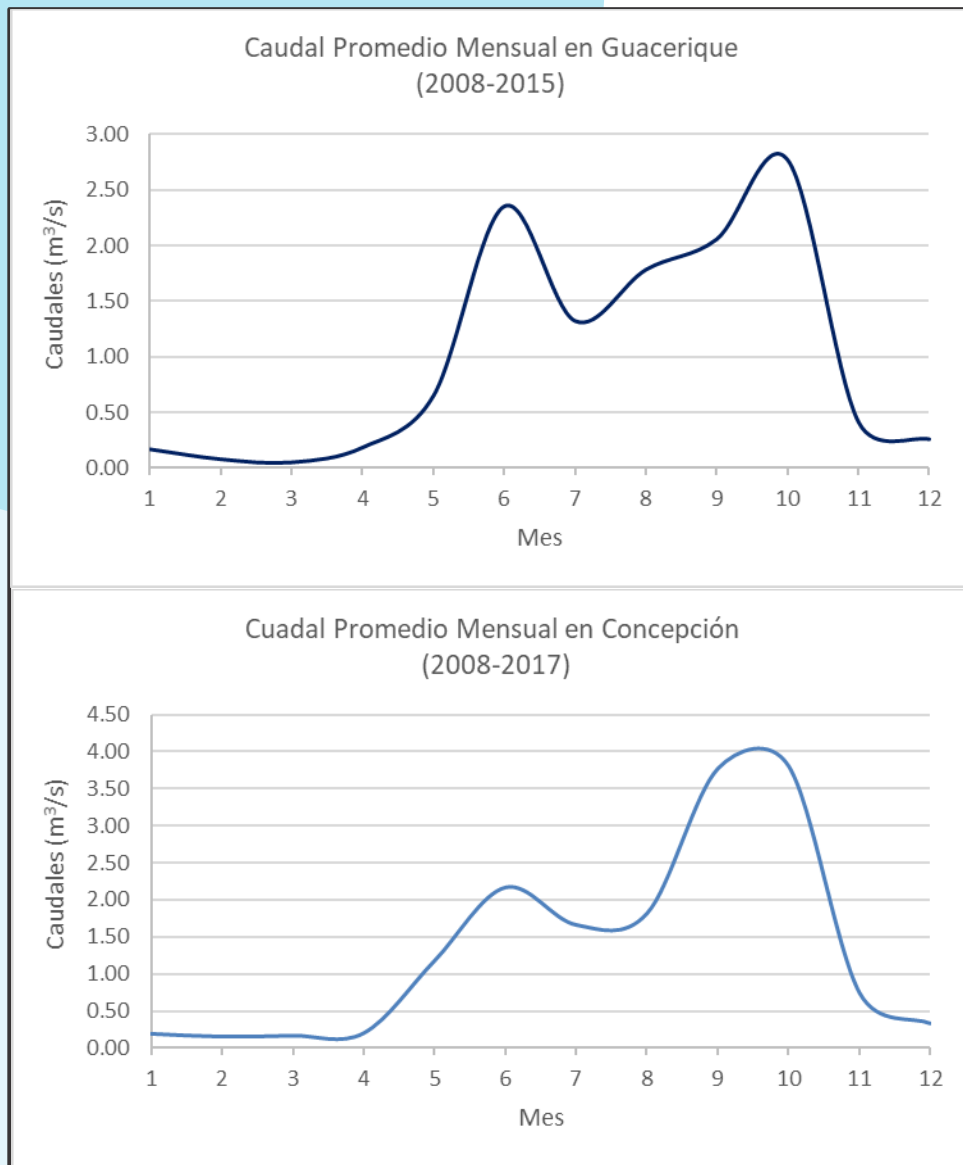


Figura. 2.6. Caudal promedio mensual en dos estaciones hidrométricas.

2.3.4. Demandas de agua

La representación adecuada del consumo de agua en la Cuenca es esencial para hacer un análisis completo del balance de agua. Para este Estudio se recolectaron datos sobre las demandas de agua de usuarios principales domésticos y agrícolas en las cuencas de abastecimiento de Concepción y Guacerique y también sobre las demandas de la ciudad de Tegucigalpa. Para parametrizar las demandas domésticas, se utilizó principalmente la población, el uso del agua per cápita, y la distribución mensual de la demanda total anual. Para caracterizar las demandas agrícolas, se utilizó el área regada, el uso de agua por hectárea y el consumo a nivel mensual. En este caso se asumió un tipo de cultivo mixto. Las Tabla 2.3 y Tabla 2.4 presentan los datos incluidos en WaterALLOC para parametrizar las demandas de agua domésticas y agrícolas, respectivamente. El consumo de agua de las demandas domésticas en

las cuencas de abastecimiento es constante durante el año, sin embargo, la demanda en Tegucigalpa se incrementa durante los meses de Abril a Septiembre. El uso de agua del sector agrícola es bastante variable durante el año, observándose disminuciones abruptas en los meses de Abril y Septiembre en la cuenca Concepción y en el mes de Mayo en la cuenca Guacerique (Figura 2.7).

Tabla. 2.3. Parámetros de las demandas domésticas.

	Concepción	Guacerique	Tegucigalpa
Habitantes	5,000	18,320	1,252,651
Demanda Anual [Mm3]	0.14	1.23	158.04
Demanda Diaria Unitaria [gpcd*]	20.275	48.563	91.954

*gpcd: galones por habitante por día

Tabla. 2.4. Parámetros de las demandas agrícolas.

	Concepción	Guacerique
Área Irrigada [ha]	1,708	2,616
Demanda Anual [Mm3]	1.48	2.56
Demanda Diaria Unitaria [1000 m ³ /ha]	10.420	11.739



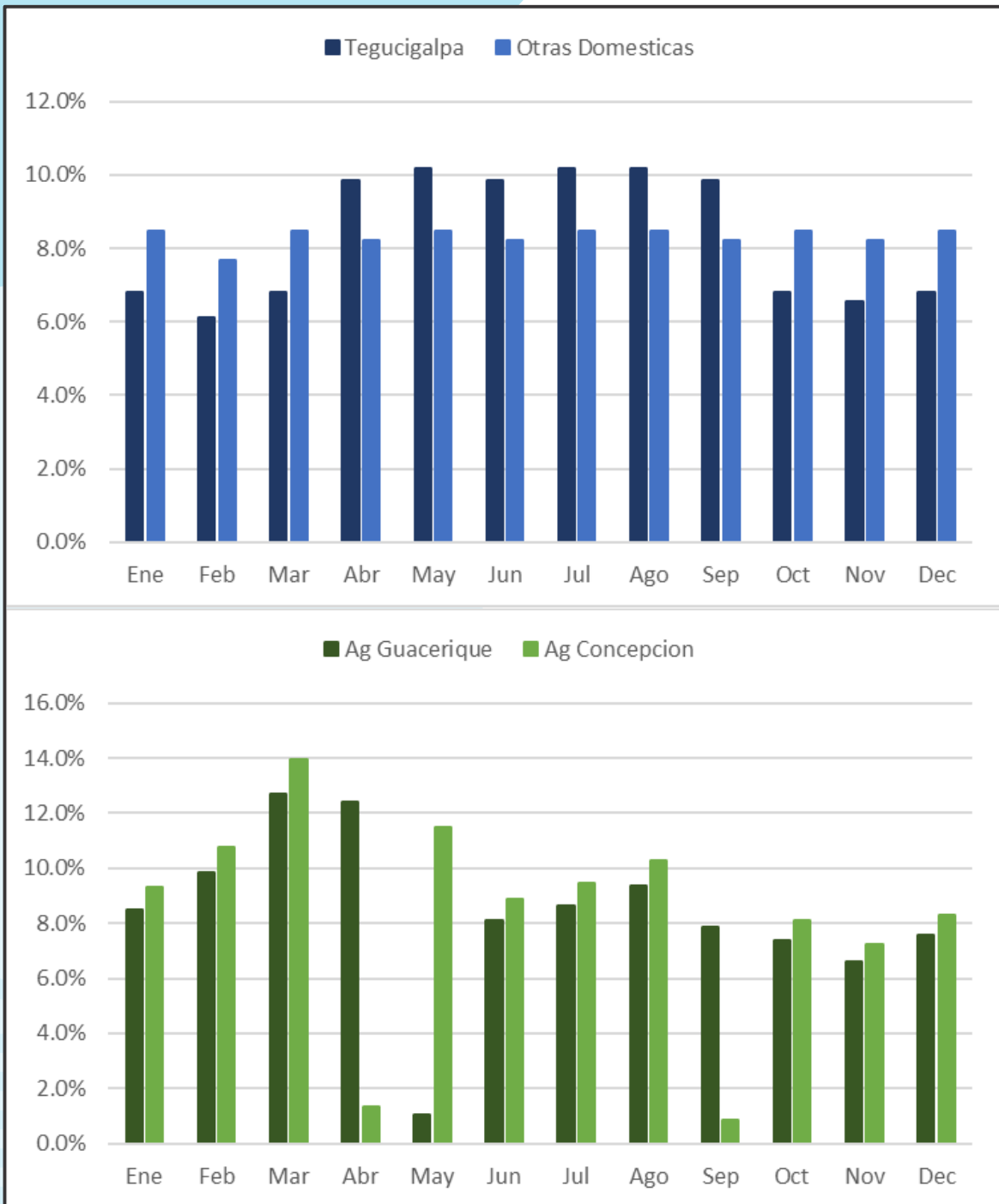


Figura. 2.7. Patrón mensual del consumo de agua doméstica y agrícola.

2.4. DESARROLLO DEL MODELO DE ASIGNACIÓN DE AGUA

2.4.1. Configuración de la Red de Flujo

La red de flujo de MODSIM generada por WaterALLOC se creó utilizando el modelo HydroBID en las áreas relacionadas a las fuentes actuales de suministro de agua para Tegucigalpa. La red se compone de nodos de almacenamiento (nodos azules) para cada COMID simulado que permite simular entradas a la red de flujo (Figura 2.8). Durante la generación de la red de MODSIM, los hidrogramas simulados con HydroBID que ingresan a los segmentos fluviales en cada COMID se cargan como series temporales de entrada de MODSIM en cada nodo sin almacenamiento. El proceso también crea nodos de sumidero (nodos verdes) que se requieren para simular flujos aguas abajo que salen de la red de flujo.

2.4.2. Configuración del Uso del Agua

La red MODSIM, con las entradas de HydroBID, simula el flujo natural enrutado en la red, en otras palabras, las contribuciones naturales del proceso de lluvia-escorrentía a la red hidrológica superficial. Sin embargo, para simular los flujos operativos en la cuenca, se debe incluir los efectos de las intervenciones humanas en los flujos naturales, incluidas las extracciones de agua, los retornos y las operaciones de almacenamiento. Se requieren datos de extracción históricos diarios para considerar los efectos de las intervenciones humanas y estimar los flujos operativos en la red de flujo; sin embargo, esta información generalmente no está disponible. En este caso, el consumo mensual de agua doméstico y agrícola se utilizó para aproximar el desvío histórico de agua en función de la disponibilidad de agua y el equilibrio de la demanda de agua.

La red base para este Estudio incluyó un nodo de demanda aguas abajo para representar las demandas de Tegucigalpa y otros nodos de demanda (nodos rosados) que se satisfacen en las cuencas de Concepción y Guacerique. Adicionalmente, se incluyeron nodos de reservorio (triángulos rojos) para representar los embalses Laureles y Concepción. Estos embalses se crearon con una capacidad máxima de almacenamiento de 36 Mm^3 y 11 Mm^3 , respectivamente y con una capacidad de transferencia del embalse de Laureles hacia el de Concepción de 450 l/s y de 300 l/s del embalse Concepción hacia el de Laureles.

La Figura 2.8, muestra la red de MODSIM completa con la conectividad de la red de flujo a los nodos de los embalses y la ubicación de los nodos de las demandas.



Figura. 2.8. Representación de la red MODSIM creada en WaterALLOC.

Para la ejecución de MODSIM, se asumió un conjunto de prioridades en la asignación de agua a las demandas de acuerdo a la disponibilidad. Es decir, a cada enlace que desvía el agua de la red de flujo a nodos de demandas, se le asignó un costo (prioridad en MODSIM), el cual si está representado por un número negativo, representa beneficios. Por lo tanto, los costos más negativos son los más beneficiosos. La Tabla 2.5, presenta los costos asumidos en los enlaces entre los nodos de afluencia y reservorios y las demandas. La asignación de las prioridades se basó en satisfacer primeramente las demandas domésticas y agrícolas aguas arriba de Tegucigalpa; luego las demandas de Tegucigalpa por medio de los acueductos Picacho y Miraflores y, por último, por medio de los embalses. La baja prioridad de almacenamiento en los embalses permite almacenar el exceso de agua que llega a estos dos sistemas y que no se necesita para satisfacer la demanda de Tegucigalpa.

Tabla. 2.5. Configuración de las prioridades de asignación de agua.

Enlace	Costo (Prioridad)
211928500 - Dom_Concepcion	-180
211897400 - Dom_Guacerique	-180
211928500 - Ag_Concepcion	-150
211897400 - Ag_Guacerique	-150
Picacho - Tegucigalpa	-110
Miraflores - Tegucigalpa	-105
Ojojona - Embalse Concepción - Tegucigalpa	-101
Embalse Concepción -Tegucigalpa	-100
Embalse Laureles - Tegucigalpa	-90

Para simular de una manera más realista el suministro de agua a la ciudad en tiempos de sequias, se tuvieron en cuenta las restricciones aplicadas a la demanda de agua que actualmente se aplican en Tegucigalpa para regular el suministro en tiempos secos. Para este fin, se implementó una lógica de restricciones que simula un suministro de agua más regulado en época de sequía. La lógica usa el volumen total almacenado en el sistema de abastecimiento para aplicar dinámicamente reducciones en la demanda y en los suministros de las diferentes fuentes. En este caso de estudio, se asumió que las restricciones se activan cuando el almacenamiento total cae por debajo del 30%. La producción de las plantas de tratamiento de agua bajo restricciones se presenta en la Tabla 2.6. La implementación de esta lógica de restricciones permite simular y evaluar de una manera más realística el suministro actual y a largo plazo en época de estrés hídrico.

Tabla. 2.6. Producción de las plantas de tratamiento en época de sequia.

Planta	Producción (l/s)
Concepción	1,100
Laureles	340
Picacho	250
Miraflores	10
Total	1,700

2.4.3. Calibración

Metodología de la calibración

Esta sección describe el enfoque adoptado para calibrar los modelos desarrollados en Cuenca de estudio. También se resumen los resultados de la calibración en las cuencas de Concepción y Guacerique Metodología de Calibración.

La calibración es un proceso para ajustar los parámetros del modelo a un conjunto dado de condiciones locales, reduciendo así la incertidumbre de predicción. La cuantificación de la incertidumbre en un modelo calibrado es vital para una aplicación significativa del modelo. La calibración del modelo se realizó seleccionando cuidadosamente los valores para los parámetros de entrada del modelo, de modo que el caudal obtenido con el modelo produzca una representación aceptable de los caudales observados.

HydroBID contiene siete parámetros de calibración. Estos parámetros se introducen para poder ajustar el modelo y optimizar su rendimiento simulando los caudales observados. Sin embargo, los parámetros de entrada HydroBID deben mantenerse dentro de un rango de incertidumbre realista. Los rangos de valores sugeridos para los parámetros del modelo se presentan en la Tabla 2.7.

HydroBID proporciona valores predeterminados para algunos de los parámetros hidrológicos en la base de datos. Por ejemplo, la base de datos contiene valores para los Número de Curva (CN) y para la Capacidad Disponible de Agua (AWC) en el subsuelo (zona no saturada). Sin embargo, estos parámetros deben calibrarse para mediciones históricas de caudal modificando un factor que multiplica los valores ya contenidos en la base de datos. Para otros parámetros, como los coeficientes de recesión (r) y percolación profunda (s), el usuario debe ingresar los valores iniciales que se aplicarán de manera uniforme a todas las cuencas dentro del área simulada.



Tabla. 2.7. Configuración de las prioridades de asignación de agua.

Parámetro	Descripción	Rango de Valor Sugerido
Numero de Curva (CN)	Controla la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escorrentía. Valores por defecto están disponibles en la base de datos.	0.8–1.2 (multiplicador)
Capacidad Disponible de Agua (AWC)	Activa el inicio de la percolación de la capa no saturada a la capa saturada. Valores por defecto están disponibles en la base de datos.	0.2–1.2 (multiplicador)
Coefficiente de Recesión (r)	Controla la tasa del flujo base.	0.001–0.75 (dia^{-1})
Coefficiente de Percolación profunda (s)	Controla la tasa de percolación a la zona saturada profunda.	0.005–0.1 (dia^{-1})
Factor de Evapotranspiración (ET) en la Temporada de Crecimiento	Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo.	0.5–1.5
Factor de Evapotranspiración (ET) en la Temporada Latente	Factor de evapotranspiración durante la estación latente.	0.5–1.5
Umbral de Temperatura	Temperatura por debajo de la cual se supone que la precipitación es nieve y por encima de la cual la nieve acumulada se derretirá.	-1–4 ($^{\circ}\text{C}$)
Factor de Fusión	Factor que controla la tasa a la cual se derrite la nieve.	0.3–0.6 ($\text{mm dia}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

En el proceso de calibración de HydroBID, la búsqueda de los mejores valores para representar los parámetros del modelo se llevó a cabo mediante prueba y error. Para este Estudio, calibramos HydroBID contra los caudales observados en las estaciones hidrológicas de Concepción y Guacerique, para un período entre el 2008 al 2017 y del 2008 al 2015, respectivamente (teniendo en cuenta el primer año como un año de calentamiento de las condiciones iniciales del modelo). Dado que los caudales simulados con HydroBID corresponden al flujo natural generado en la Cuenca, la calibración del modelo se realizó utilizando los caudales simulados obtenidos con MODSIM, los cuales incluyen intervenciones humanas de los flujos naturales, como las extracciones de agua para el suministro doméstico y agrícola. La Figura 2.9, proporciona los pasos principales del procedimiento de calibración utilizado en este Estudio. Ajustamos el valor del parámetro en la interfaz gráfica de usuario (GUI) de HydroBID para obtener flujos simulados naturales. Luego importamos estos flujos a WaterALLOC para simularlos a través de la red MODSIM que incluye el uso de agua procesada y

la infraestructura de agua en la Cuenca. Después de ejecutar MODSIM, exportamos los flujos operativos simulados en el sitio de calibración a Excel para calcular medidas estadísticas y crear hidrogramas. Los caudales mensuales simulados se compararon visual y estadísticamente con las observaciones de caudal correspondiente. Si el rendimiento del modelo no fue satisfactorio, se procedió a ajustar un parámetro a la vez en HydroBID y se repitió el procedimiento de calibración hasta que se obtuvo una solución satisfactoria. Este proceso manual se basa en el conocimiento del usuario de la cuenca y en cómo cada parámetro afecta los resultados.

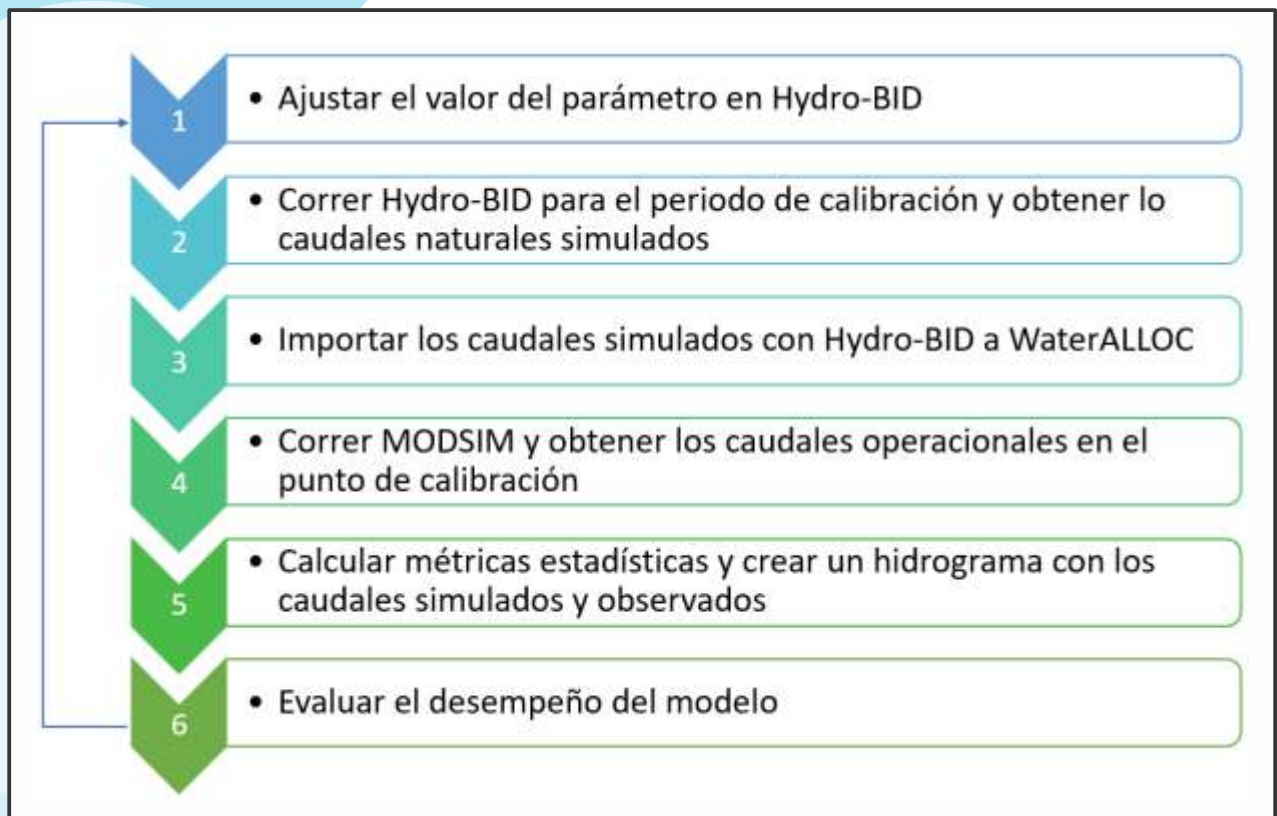


Figura. 2.9. Proceso de calibración.

Evaluamos el rendimiento del modelo utilizando estadísticas, incluido el error de volumen general (OVE), coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y la correlación (r), y mediante el análisis visual de hidrogramas mensuales. El OVE mide la tendencia promedio del volumen total simulado a ser más o menos que el volumen observado; r describe el grado de correlación entre los caudales simulados y observados y refleja las diferencias en la forma del hidrograma; y el NSE compara la varianza residual con la varianza medida, lo que significa que es un indicador de qué tan bien la propagación de los datos simulados coincide con la observada. Debido a esto, es sensible a los valores de caudales grandes. NSE es una métrica común que se ha utilizado en muchos estudios y se puede utilizar con fines de comparación. Resultados de la Calibración.

Después de lograr una calibración satisfactoria del modelo, se obtuvieron conjuntos de valores para los parámetros en las dos estaciones hidrológicas (Tabla 2.8). Los valores obtenidos fueron diferentes entre los dos sitios de calibración, lo que indica condiciones hidrológicas y climáticas distintas en estas dos partes de la Cuenca.

Tabla. 2.8. Parámetros del modelo calibrado en dos estaciones hidrológicas.

Estación	Concepción	Guacerique
COMID de Calibración	211928500	211897400
Área de Calibración (km²)	143.5	195.4
Parámetro		
Número de Curva (CN)	1.2	1
Capacidad Disponible de Agua (AWC)	1	0.3
Coefficiente de Recesión (r)	0.003	0.007
Coefficiente de Percolación profunda (s)	0.5	0.03
Factor de ET en la Temporada de Crecimiento	1	1
Factor de ET en la Temporada Latente	0.5	0.4

La Tabla 2.9, proporcionan las estadísticas y la Figura 2.10, los gráficos utilizados para evaluar el ajuste de los caudales simulados a los flujos observados. De acuerdo con los criterios numéricos de rendimiento recomendados por Moriasi et al. (2007), HydroBID logró un desempeño "bueno" para la cuenca de Concepción y un desempeño "satisfactorio" para la cuenca Guacerique, basado en valores mensuales del NSE ($0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$) y ($0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$), respectivamente. Además, con base en los valores mensuales obtenidos para el periodo de calibración para el OVE de menos de 3 10% y para los valores de correlación cercanos o superiores a 0.8, se consideró que el modelo logró un rendimiento "muy bueno". Asimismo, a partir de la comparación de los hidrogramas, el modelo se ajusta bien a los caudales observados.

Tabla. 2.9. Estadísticas mensuales de calibración en dos estaciones hidrológicas.

Estación	Concepción	Guacerique
Período de Calibración	2009 – 2017	2009 – 2015
Estadísticas		
Error de volumen general, OVE (%)	7.85	-8.8
Correlación, r	0.82	0.78
coeficiente Nash-Sutcliffe, NSE	0.66	0.53

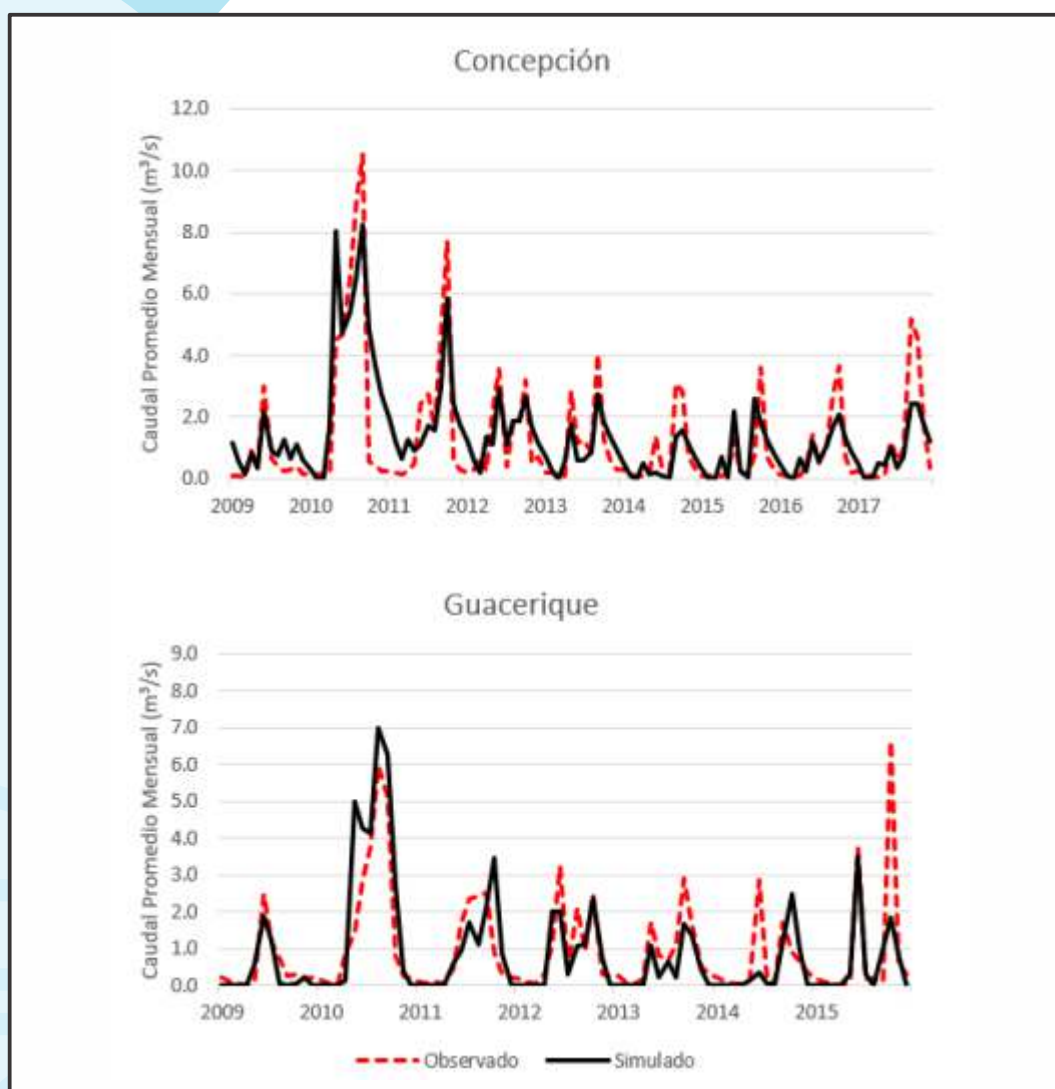


Figura. 2.10. Comparación de los caudales promedio mensuales simulados con los caudales observados en dos estaciones hidrológicas.

2.5. ANÁLISIS DE LA OFERTA, DEMANDA Y DÉFICIT HÍDRICO ACTUAL

A continuación, se presentan los resultados de la modelación del sistema de abastecimiento de agua actual para la ciudad de Tegucigalpa. Estos resultados incluyen una simulación de la demanda consuntiva doméstica del 20%, el uso de restricciones en tiempo de sequía con la demanda del 2020 y la hidrología histórica.

2.5.1. Oferta Hídrica

El volumen promedio anual de agua disponible en todas las fuentes de abastecimiento es de 163 Mm³ para el período de simulación entre 2009 - 2017. Debido a los eventos significativos de lluvia que se presentaron durante el año 2010, el volumen de agua generado en las cuencas de abastecimiento en este año fue dos (2) veces más que el promedio anual (330 Mm³). Por lo contrario, en el año 2014, el cual fue un año seco, la oferta hídrica se redujo en un 66% del promedio anual (107 Mm³). El 63% del agua disponible anualmente se produce en las cuencas de Concepción (60 Mm³) y Guacerique (43 Mm³) y el 37% en el resto de las fuentes de abastecimiento Figura 2.11. La oferta hídrica mensual presenta un comportamiento similar al régimen de lluvias en el área de estudio, donde los volúmenes máximos se observan en los meses de Junio y Octubre, mientras que la época de estiaje se observa entre los meses de Enero y Abril.

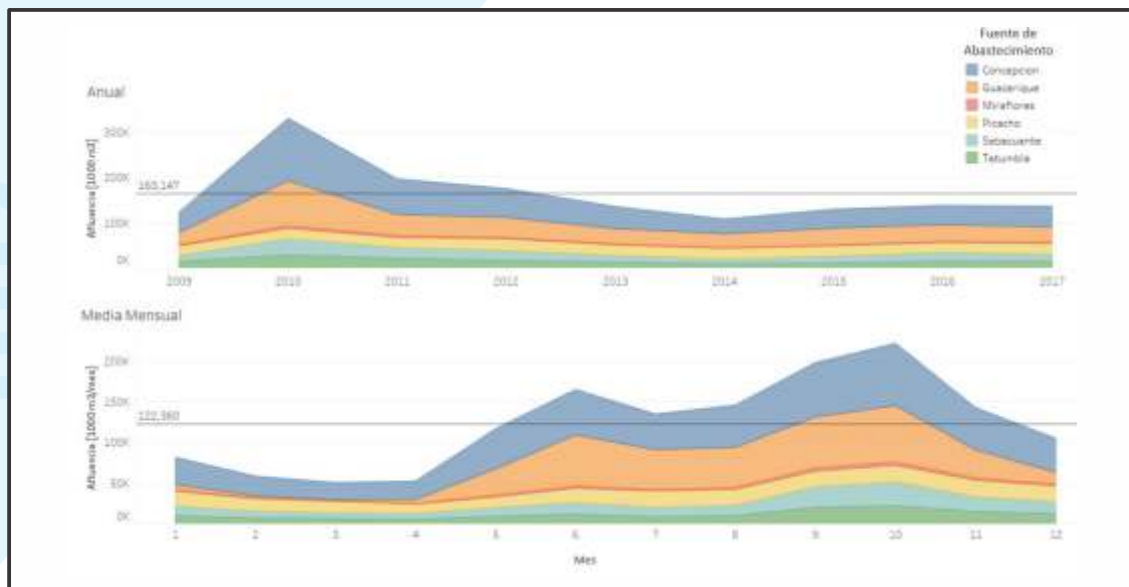


Figura. 2.11. Oferta hídrica anual y mensual simulada en las cuencas de abastecimiento de Tegucigalpa.

2.5.2. Demanda Hídrica

El volumen promedio anual de agua demandada en la Cuenca en el periodo de simulación es de 157 Mm³, donde la demanda en Tegucigalpa representa el 69%, las demandas agrícolas el 30% y las demandas municipales en las cuencas de abastecimiento solo el 1%. La demanda promedio mensual en la Cuenca es de 13 Mm³ (Figura 2.12), donde la mayor demanda ocurre en los meses de Julio y Agosto. La gran variabilidad que se observa en la demanda mensual está influenciada por la demanda en Tegucigalpa y por el uso agrícola, mientras que la demanda municipal en las cuencas de abastecimiento es relativamente constante durante el año.

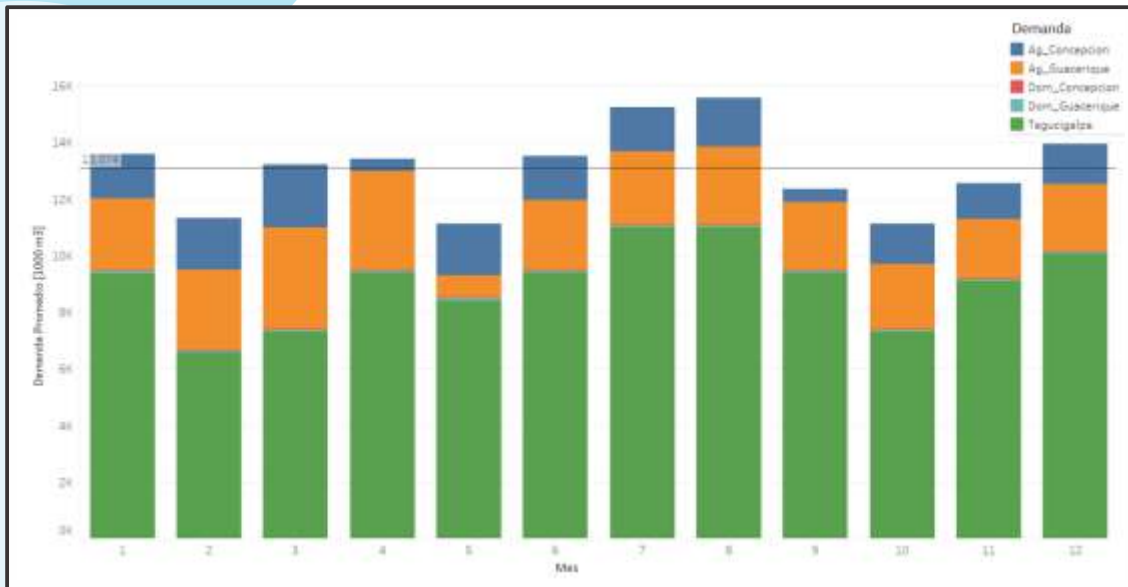


Figura. 2.12. Demanda hídrica mensual promedio simulada.

El agua suministrada a los diferentes usuarios en la Cuenca está influenciada por las restricciones impuestas en el suministro de agua para Tegucigalpa en época de sequía, la capacidad de la infraestructura hídrica, y las prioridades de asignación del agua modeladas. La Figura 2.13, presenta el suministro de agua anual simulado para Tegucigalpa. El promedio anual de agua suministrado en la Cuenca es de 114 Mm³, donde 78 Mm³ son suministrados para la ciudad de Tegucigalpa y 34 Mm³ para las actividades agrícolas en las cuencas de abastecimiento. El suministro para Tegucigalpa varía considerablemente durante el período de simulación; durante los años 2011 - 2013 el suministro es entre un 24% a un 30% mayor al promedio anual, mientras que en años críticos como el 2015, 2016 y 2017 el suministro es un 23%, 17% y 16% menor al promedio anual, respectivamente (Figura 2.13). El suministro promedio mensual en la Cuenca es de 9.5 Mm³, donde el menor suministro se presenta en el mes de Abril (7 Mm³) y el mayor suministro en el mes de Diciembre (11 Mm³).

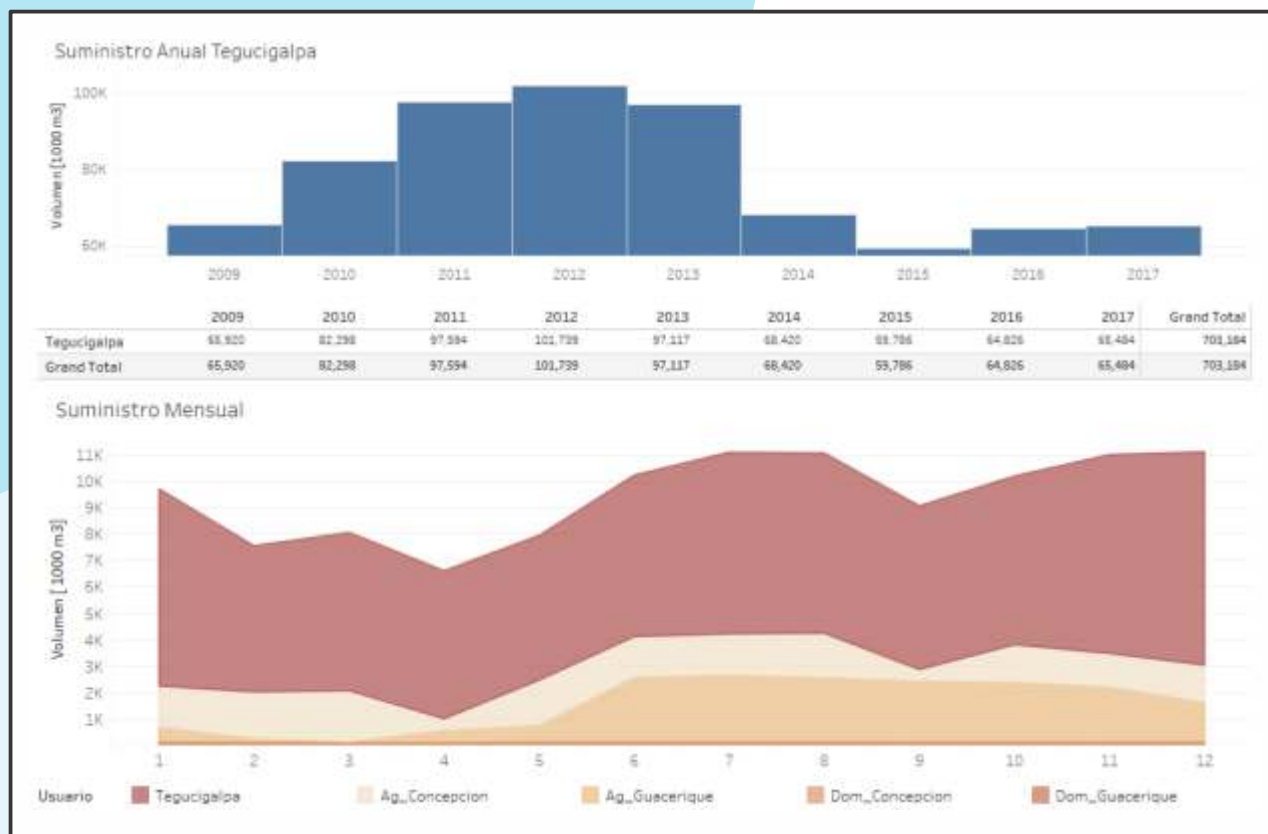


Figura. 2.13. Suministro de agua anual simulado para Tegucigalpa y suministro promedio mensual para los diferentes usuarios en la Cuenca.

La Figura 2.14 ilustra a variabilidad mensual en el suministro de agua tanto para Tegucigalpa como para los demás usuarios en las cuencas de abastecimiento. Los diagramas de caja indican la magnitud y la dispersión del suministro para los años simulados. El suministro para la capital presenta una alta variabilidad durante todos los meses, excepto entre los meses de Noviembre a Enero. La mayor dispersión en el suministro para los usuarios domésticos y agrícolas dentro de la Cuenca es en el mes de Abril donde el suministro cae por debajo de 1Mm^3 . Esta variabilidad en el suministro debe tenerse en cuenta al analizar las asignaciones de agua en escenarios futuros.

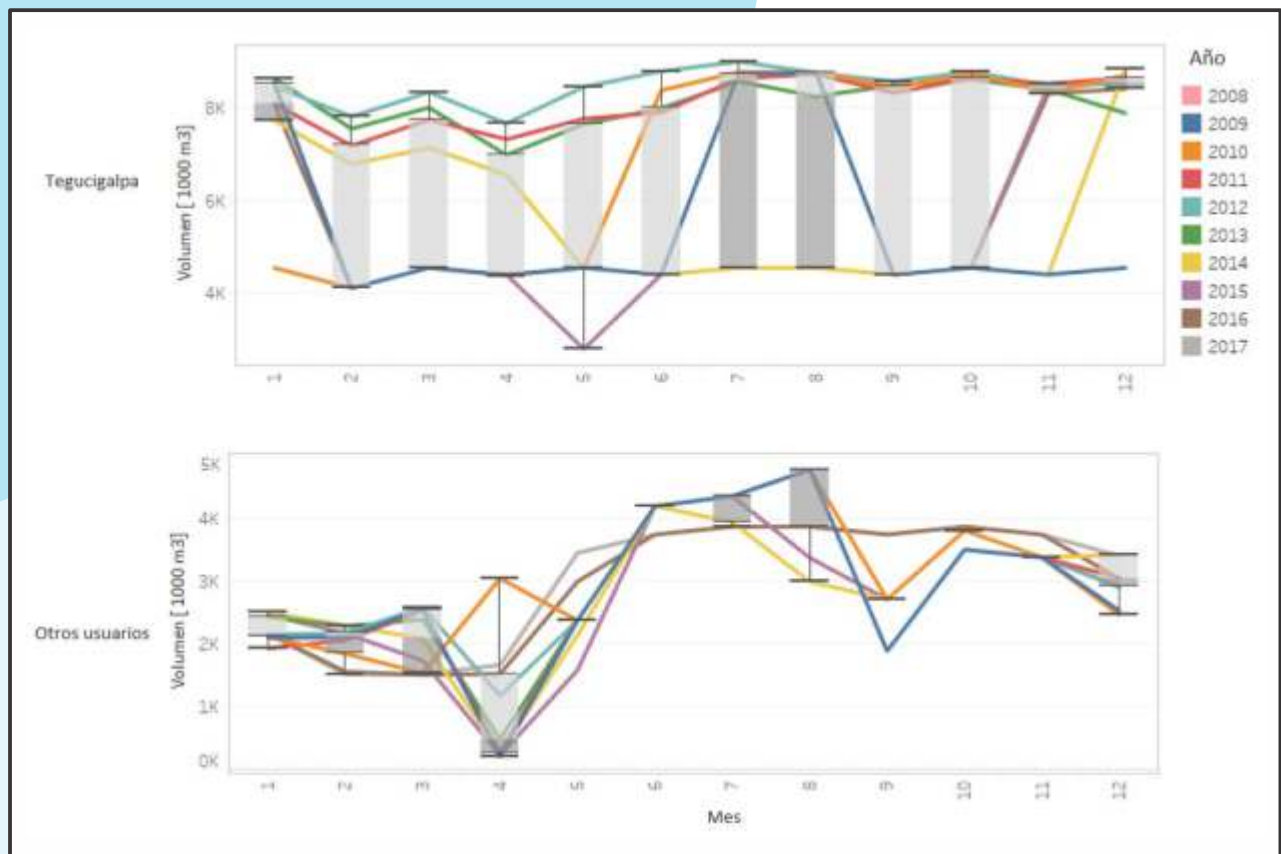


Figura. 2.14. Variabilidad en el suministro de agua mensual para Tegucigalpa y otros usuarios dentro de las cuencas de abastecimiento.

2.5.3 Déficit Hídrico

El déficit promedio anual de agua en el periodo de simulación para toda la Cuenca es de 43 Mm^3 (Figura 2.15). El 69% de este déficit se presenta en Tegucigalpa y el 30% en las actividades agrícolas. A pesar de que en el año 2011 fue uno de los años donde se simuló mayor suministro de agua, este año es donde se presentan las mayores deficiencias, alcanzando un máximo de 76.7 Mm^3 . Los años donde se disminuye la demanda por las restricciones aplicadas en época de sequía, es donde se presentan menores deficiencias (2015-2017). La deficiencia promedio mensual de todos los usuarios en la Cuenca es de 3.6 Mm^3 , donde 2.5 Mm^3 representan las deficiencias para la capital. Las mayores deficiencias a nivel mensual en Tegucigalpa se presentan en los meses de Julio y Agosto con un déficit promedio de agua de 4 Mm^3 (14% de las deficiencias anuales para la ciudad), mientras que los otros usuarios presentan deficiencias máximas en el mes de Abril.

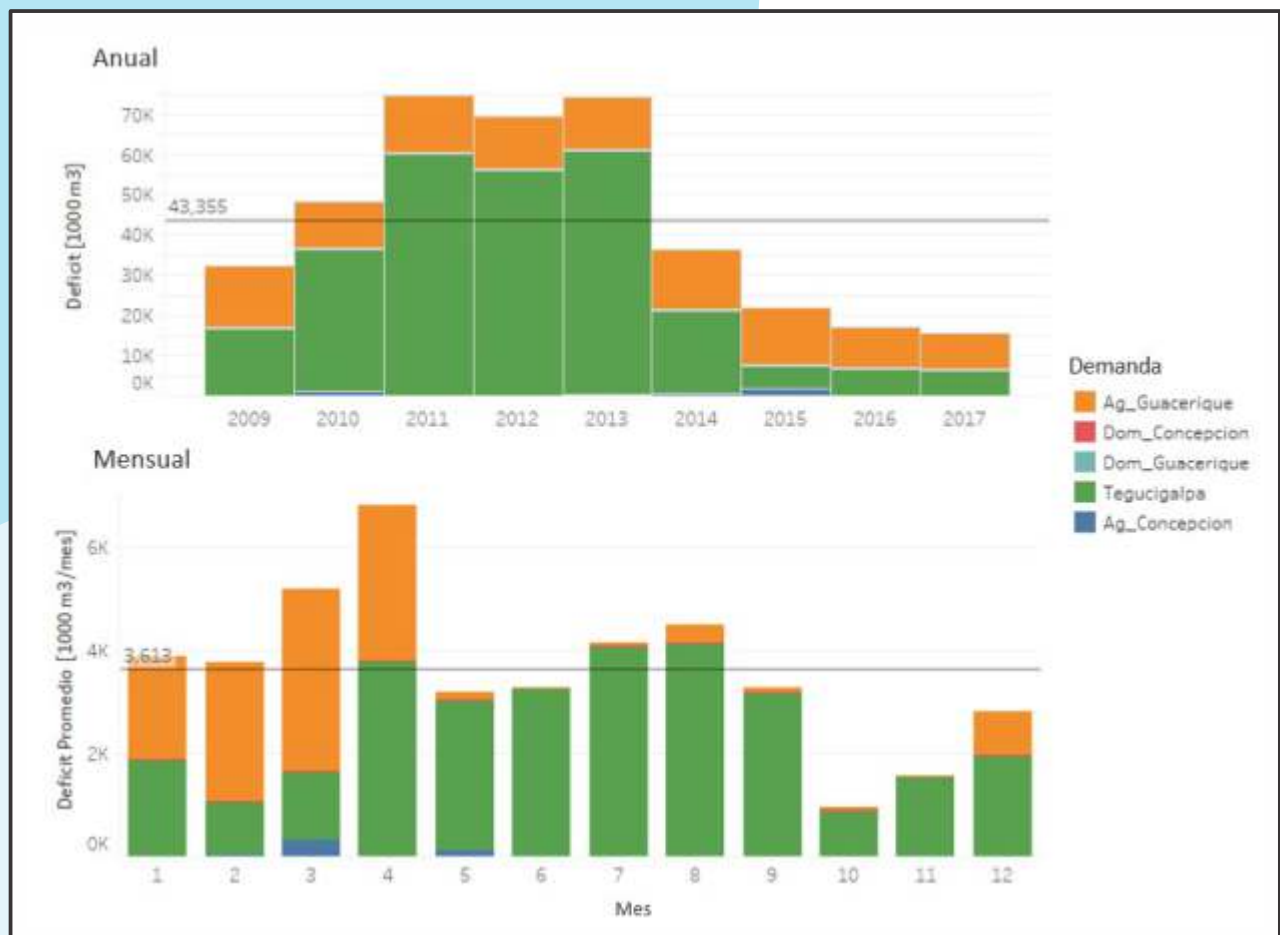


Figura. 2.15. Déficit hídrico anual y mensual simulado.

2.5.4. Dinámica entre la Producción, Suministro y Almacenamiento del Sistema

Las deficiencias de agua en Tegucigalpa no solamente se deben a las limitaciones de oferta hídrica en las fuentes de agua, sino también a las producciones de las plantas de tratamiento de agua, las cuales fueron establecidas con base al estado hidrológico de los embalses para representar de una forma más real la gestión del agua en época de sequía. La Figura 4.6, muestra la relación entre las producciones de cada una de las plantas, el suministro simulado para la ciudad, y el nivel de almacenamiento de los embalses. Las plantas de tratamiento están operando bajo las reglas de restricción a principios de la simulación y después del 2014. En el caso del sistema Concepción, el almacenamiento promedio mensual simulado en el embalse es de 18 Mm³, lo que corresponde al 51% de su capacidad máxima. Solo durante el período entre mediados del 2010 hasta comienzos del 2013, se observa que el embalse alcanza casi su capacidad máxima. A partir del 2013 el almacenamiento en el embalse cae considerablemente, alcanzando niveles mínimos de solo el 17% de la capacidad en el 2015; por lo que el caudal de producción de la planta de tratamiento se disminuye a 783 l/s, 71% de la producción en época de sequía.

En el caso del sistema Laureles, el almacenamiento promedio mensual simulado en el embalse es de 3.2 Mm³, lo que corresponde al 29% de su capacidad máxima. La planta de tratamiento opera a su máxima capacidad la mayoría del tiempo, excepto en algunos meses entre el 2013 el 2015 que es cuando los niveles del embalse se disminuyen considerablemente.

Los caudales simulados en la planta de tratamiento de Picacho, que equivalen a su producción histórica, son menores a la capacidad nominal de la planta. Esto se puede deber a las limitaciones en el sistema de captación. Por lo tanto, consideramos importante que en una segunda fase del estudio se tengan en cuenta las limitaciones físicas de las tomas de captación del sistema de acueducto de Picacho.

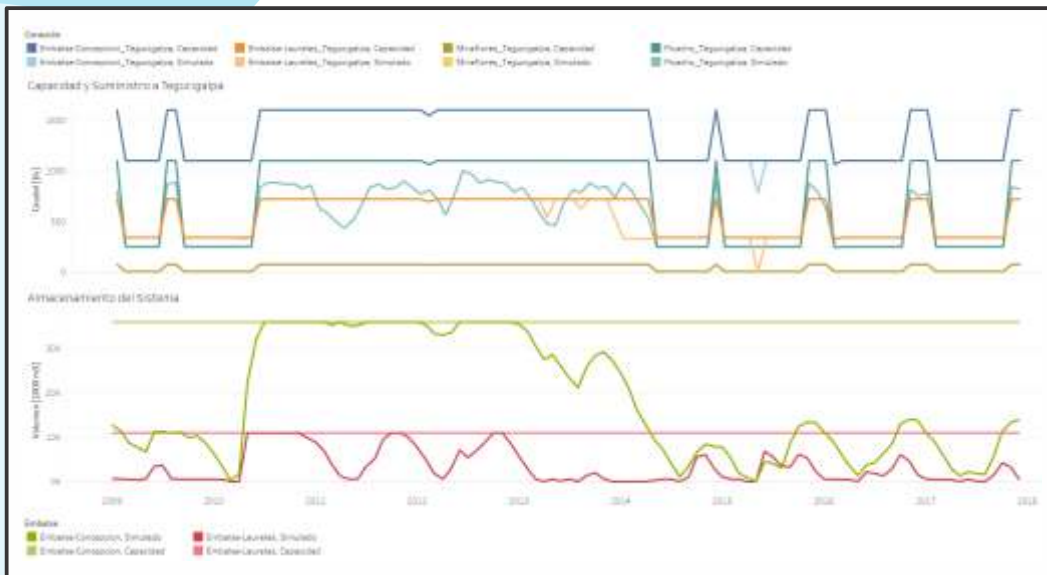


Figura. 2.16. Capacidad, suministro y almacenamiento de agua para Tegucigalpa.

Debido a las limitaciones en la infraestructura hídrica en el sistema de abastecimiento, un gran volumen de agua producido en las fuentes de agua no es capturado para satisfacer la demanda de agua en Tegucigalpa. La Figura 2.17, presenta el volumen de agua que pudiera ser almacenado y suministrado para satisfacer la demanda en la ciudad. El promedio anual de agua no capturado en el periodo de simulación es de 66 Mm³, alcanzando un máximo de 209 Mm³ en el año 2010. El 54% del volumen promedio anual de agua no capturada se produce en las cuencas de Sabacuante y Tatumbula, mientras que, en las fuentes de Concepción, Guacerique, Ojojona y Picacho el volumen de agua no capturada es del 15%, 9%, 12%, y 9%, respectivamente. Aunque este volumen de agua podría capturarse aumentando el almacenamiento actual de los embalses Concepción y Laureles o construyendo nuevos embalses, también se tendría que aumentar la capacidad de las plantas de tratamiento y del sistema de distribución para que el agua pueda ser llevada y suministrada a las diferentes partes de la ciudad. El efecto de la construcción de nuevos embalses y de la ampliación de las capacidades de las plantas se evalúa en la sección 2.7.

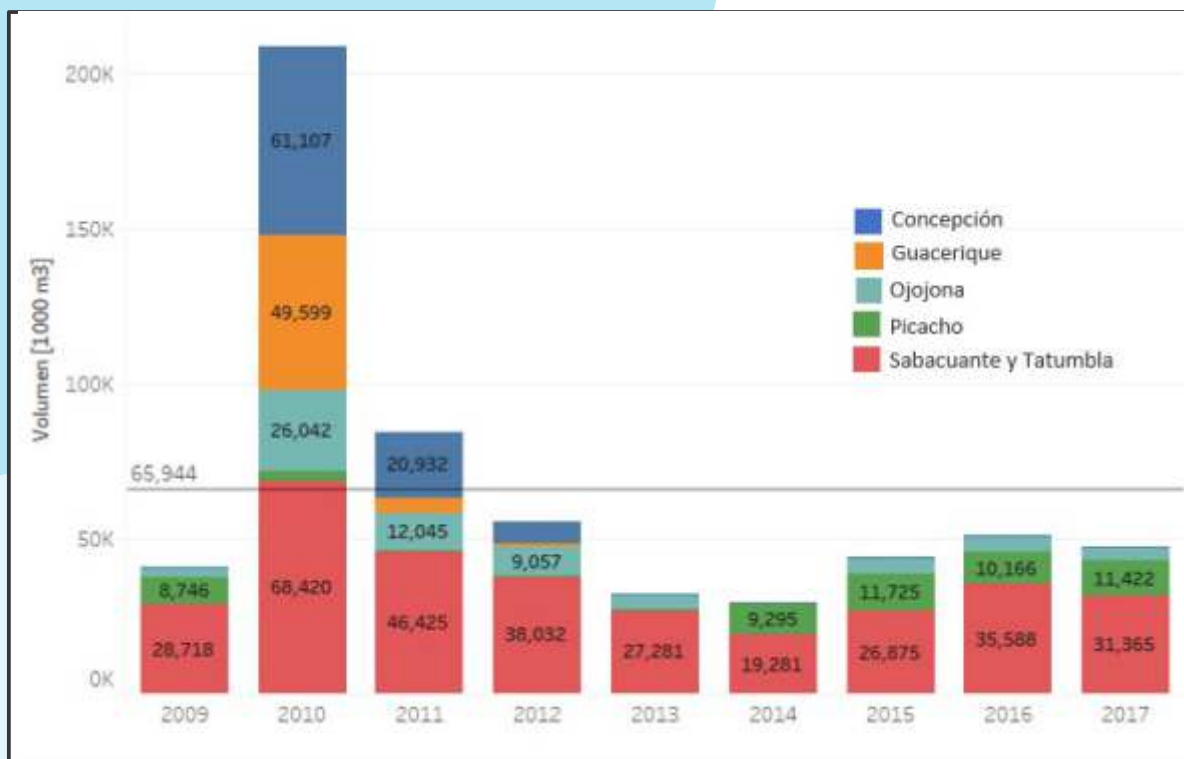


Figura. 2.17. Volumen de agua no capturada por fuente de agua.

2.6. ANÁLISIS DE LA OFERTA, DEMANDA Y DÉFICIT HÍDRICO FUTURO FRENTE AUN CON TEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

A continuación, se presentan los resultados de la modelación del sistema de abastecimiento de Tegucigalpa teniendo en cuenta las proyecciones climáticas y un aumento de la demanda de la ciudad para el año 2030. Las demandas consuntivas en las cuencas de abastecimiento se asumieron permanecer constantes bajo este escenario. Estos resultados también incluyen una simulación de la demanda doméstica del 20% y el uso de restricciones en tiempo de sequía.

2.6.1. Proyecciones Climáticas y de Demanda para el 2030

Para ilustrar las consecuencias potenciales del cambio climático en el suministro de agua para Tegucigalpa y para poder elaborar planes estratégicos y desarrollar políticas de mitigación, el presente estudio tomó en cuenta las proyecciones climáticas para un horizonte a corto plazo (2030s). Se emplearon las proyecciones de precipitación y temperatura elaboradas por Navarro-Racines et al., 2018 para diferentes regiones de Honduras. Para propósitos de este

Estudio, se seleccionó el escenario que corresponde a un futuro con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) más altas del conjunto de escenarios denominados Caminos Representativos de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés). El escenario RCP8.5 combina supuestos sobre una alta población y un crecimiento de ingresos relativamente lento con tasas modestas de cambio tecnológico y mejoras en la intensidad energética, lo que a largo plazo conduce a una alta demanda de energía y emisiones de GEI en ausencia de políticas de cambio climático (Riahi et al. 2011).

Las proyecciones climáticas para la década del 2030 bajo el escenario RCP8.5 se descargaron del portal de datos de Aguas de Honduras² para la región de desarrollo del Distrito Central R12, la cual incluye la ciudad de Tegucigalpa. La Tabla 2.10, presenta un resumen de las proyecciones mensuales incluidas en la modelación. Los cambios en la precipitación y temperatura son derivados de un período de línea base de 1981- 2010 (Navarro-Racines et al., 2018).

Tabla. 2.10. Cambios proyectados a nivel mensual en la precipitación (%) y temperatura media (°C) para la década del 2030 bajo el escenario RCP8.5.

Mes	Precipitación (%)	Temperatura (°C)
Enero	0%	1.13
Febrero	-7%	1.22
Marzo	6%	1.33
Abril	-2%	1.31
Mayo	9%	1.19
Junio	-6%	1.19
Julio	-5%	1.28
Agosto	-13%	1.39
Septiembre	0%	1.31
Octubre	5%	1.16
Noviembre	3%	1.18
Diciembre	10%	1.17

2. Porta de datos de Aguas de Honduras: <https://aguadehonduras.gob.hn/wpshonduras/escenarioscambioclimatico>

Adicionalmente a las proyecciones climáticas, se tuvo en cuenta un incremento en la población en la ciudad de Tegucigalpa del 27% comparado con la población del 2020 de 1,252,651 habitantes. Se asumió que la población municipal y el área bajo irrigación en las cuencas de abastecimiento no tendría un cambio significativo. El incremento en la población de Tegucigalpa representa un incremento en la demanda anual de agua en la ciudad de 108 Mm³ a 125 Mm³. Bajo este escenario de aumento en la demanda, se ajustaron las restricciones aplicadas a la demanda en Tegucigalpa para regular el suministro en tiempos secos asumiendo que la población necesitará un volumen mínimo de agua para satisfacer sus necesidades básicas, el cual es equivalente a un porcentaje de la demanda actual. La producción de las plantas de tratamiento bajo restricciones frente a un escenario de cambio climático y aumento en la demanda en la capital se presenta en la Tabla 2.11.

Tabla. 2.11. Producción de las plantas de tratamiento en época de sequía bajo las proyecciones de demanda en Tegucigalpa para el 2030.

Planta	Producción (l/s)
Concepción	1,400
Laureles	440
Picacho	320
Miraflores	6
Total	2,166

2.6.2 Impacto en la Oferta Hídrica

El volumen promedio anual de agua disponible en todas las fuentes de abastecimiento para Tegucigalpa bajo las proyecciones climáticas para la década del 2030 es de 134 Mm³, representando una disminución de la oferta hídrica del 21% con respecto al escenario de referencia. La Figura 2.18, presenta una comparación de la oferta hídrica a nivel mensual de los escenarios bajo condiciones actuales y futuras. El volumen de agua promedio mensual generado en la Cuenca se reduce de 122 Mm³ a 101 Mm³. Los meses entre Enero y Abril y el mes de Agosto proyectan mayor reducción en la oferta hídrica con reducciones entre el 26% y el 31%. Por lo contrario, el mes de Mayo no proyecta ningún cambio

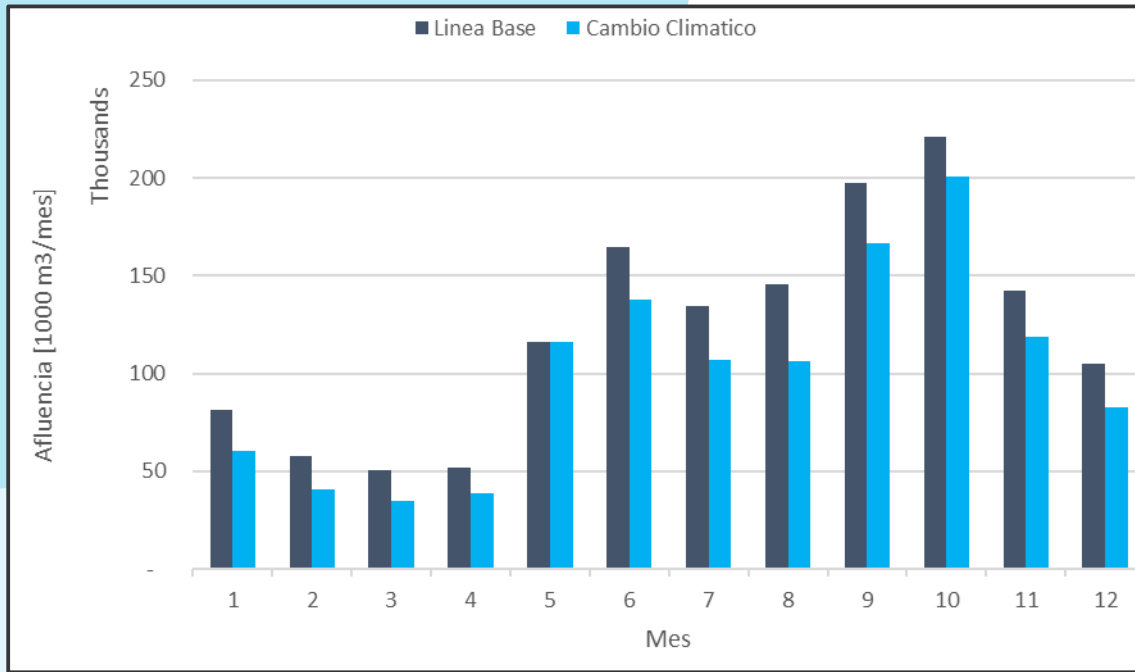


Figura. 2.18. Comparación de la oferta hídrica mensual actual y bajo un escenario de cambio climático.

2.6.3. Impacto en el Suministro y Déficit de Agua

El suministro de agua anual para todos los usuarios de la Cuenca se reduciría en un 16% con respecto al suministro actual. La reducción en el suministro anual para los usuarios de Tegucigalpa podría alcanzar un 23% para el 2030 si las proyecciones climáticas se materializan, inclusive bajo el supuesto que las restricciones en la demanda de agua aplicadas en la ciudad para regular el suministro en época de sequía sean menos severas que en el escenario línea base. Adicionalmente, el patrón del suministro mensual para la ciudad se podría ver modificado, posiblemente debido a las restricciones aplicadas, cambiando el mes donde se registra el mayor suministro de Diciembre a Octubre y cambiando el mes de menor suministro de Mayo a Abril (Figura 2.9). Los volúmenes de agua suministrados mensualmente en Tegucigalpa se reducirían entre un 10% en el mes de Junio hasta un 31% en el mes de Diciembre.

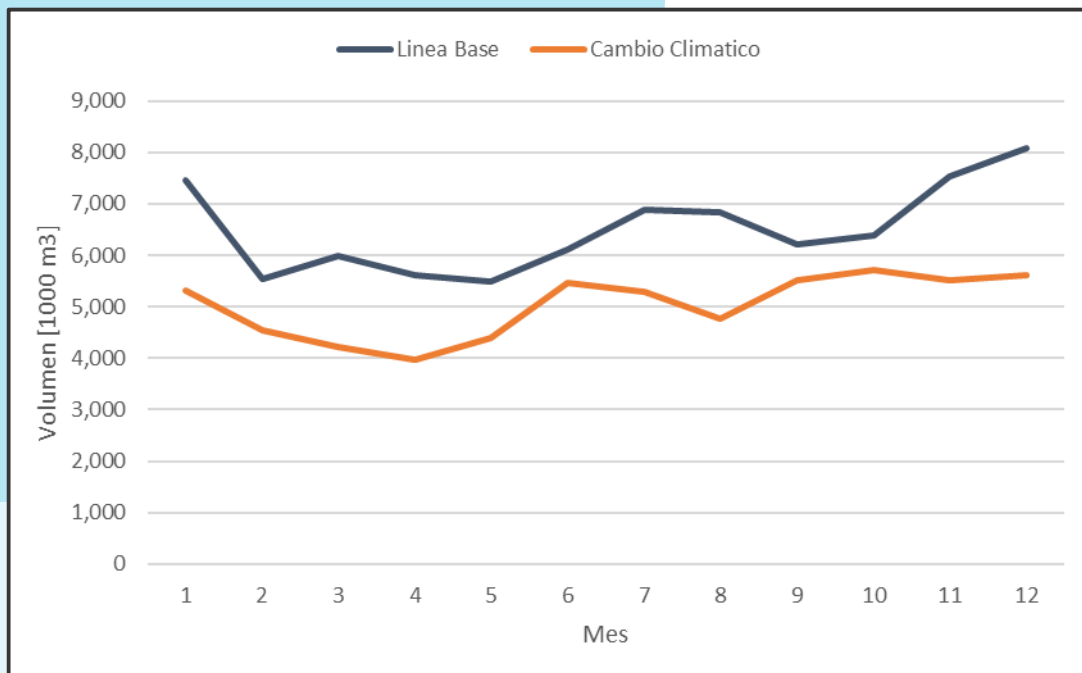


Figura. 2.19. Comparación del suministro de agua promedio mensual actual y bajo un escenario de cambio climático para Tegucigalpa.

El impacto del cambio climático proyectado para satisfacer la demanda de agua en Tegucigalpa se presenta en la Figura 2.20. Las deficiencias promedio mensuales proyectadas para la ciudad son de 5 Mm³, representando un aumento del 116% con respecto a las condiciones de referencia. Las deficiencias en los meses de Febrero, Marzo y Octubre pudieran llegar a ser 4 veces más grandes bajo un escenario de cambio climático. El déficit promedio anual de agua proyectado para toda la Cuenca es de 79 Mm³, representando un aumento del 81% con respecto al escenario línea base.



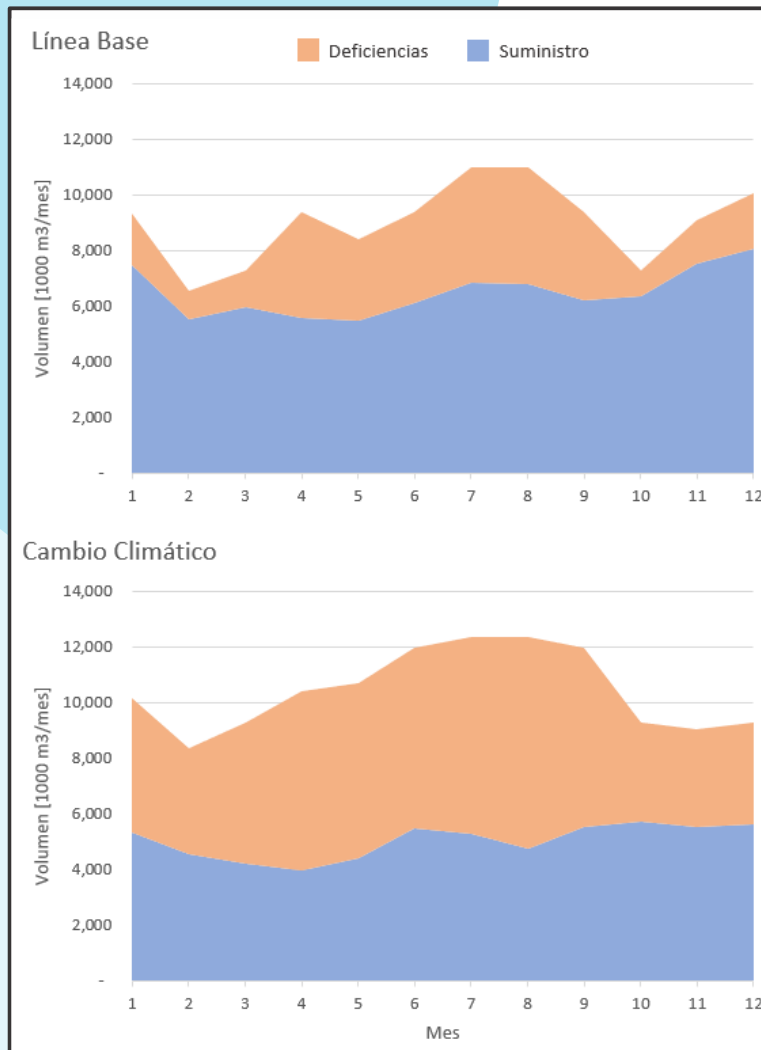


Figura. 2.20. Comparación del suministro y déficit hídrico mensual actual y bajo un escenario de cambio climático para Tegucigalpa.

2.6.4. Impacto en la Capacidad de Producción, Suministro y Almacenamiento del Sistema

La Figura 2.21, muestra una comparación entre el comportamiento de los sistemas de abastecimiento de Concepción y Laureles bajo el escenario de línea base y bajo un escenario de cambio climático. En el caso del sistema Concepción, el volumen promedio mensual almacenado en el embalse se reduciría en un 13% bajo las proyecciones climáticas para el 2030, haciendo que su volumen de almacenamiento sea 1/3 de su capacidad máxima. El sistema de Laureles se vería aún más afectado por el cambio climático, con reducciones en el volumen promedio mensual almacenado del 15%, representando un almacenamiento ¼ de su capacidad máxima.

A pesar de que en el escenario de cambio climático se asumió que las restricciones en el suministro de agua a Tegucigalpa en época de sequía fueran menos severas con respecto a las restricciones actuales, las plantas de tratamiento operan por debajo de los niveles de restricción por un período más prolongado comparado con el escenario de línea base. Esto se debe a que existirá mayor escasez hídrica y los niveles de los embalses disminuirían considerablemente. Adicionalmente, la magnitud del volumen suministrado por las plantas de tratamiento durante los períodos secos alcanza niveles mucho más bajos, particularmente en la planta de tratamiento de Laureles, donde podrían verse períodos de cero producción.

En el caso que no se realicen mejoras en la infraestructura del sistema de almacenamiento, la oferta hídrica promedio anual generada en las fuentes de agua que no es capturada por el sistema podría ser 55 Mm³, de la cual el 61% se genera en las cuencas Sabacuante y Tatumbla.

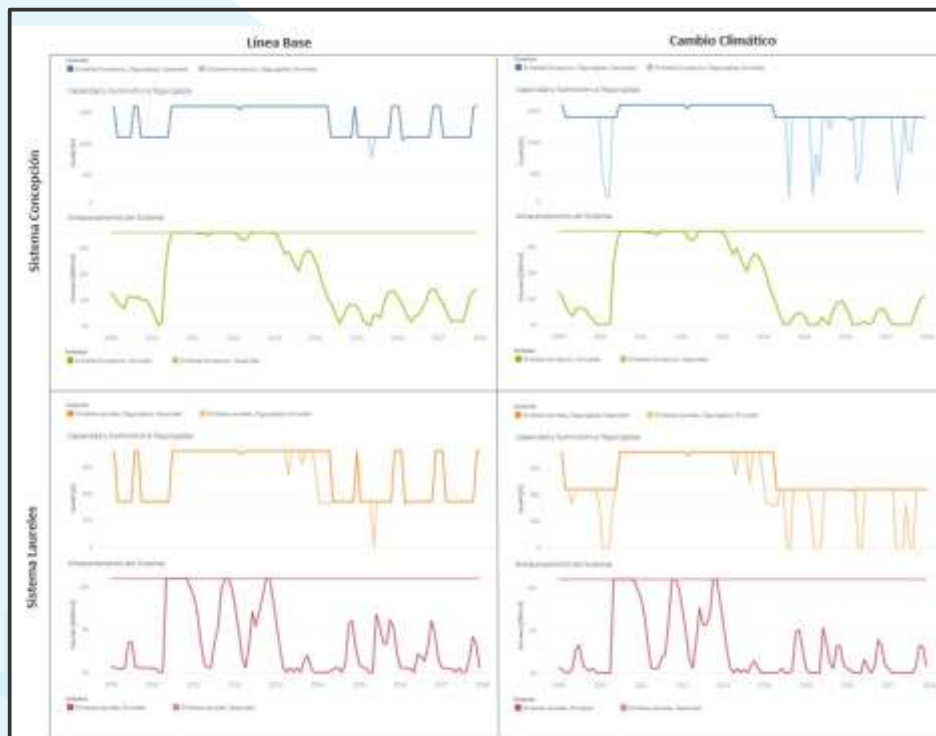


Figura. 2.21. Comparación de los sistemas de abastecimiento de Concepción y Laureles actuales y bajo un escenario de cambio climático.

2.7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA REDUCIR LA ESCASEZ HÍDRICA FUTURA EN TEGUCIGALPA

Actualmente, existen una serie de proyectos propuestos para mejorar el suministro y mitigar el crecimiento de la demanda de agua de Tegucigalpa. Algunos de estos proyectos se encuentran en fase de pre-factibilidad y otros en fase de factibilidad donde se requiere ampliar los estudios para definir volúmenes y caudales de explotación definitivos. La Tabla 2.12 presenta los seis proyectos bajo consideración por la UGASAM-SANAA.

Tabla. 2.12. Proyectos propuestos para mejorar el suministro de agua en Tegucigalpa.

Proyecto	Capacidad (Mm ³)	Año Previsto para Inicio de Operación	Observaciones
Embalse sobre cuenca del río Guacerique (Laureles II modificado)	10	2022	En fase de factibilidad
Embalse sobre cuenca del río Guacerique (Quebra Monte modificado)	50	ND	En fase de pre-factibilidad
Jiniguare	--	2021	Incluye únicamente la ampliación de la línea de conducción a partir de la actual obra toma (a filo de agua)
Sabacuante, San José o Jacaleapa (sobre el río San José)	26.7	2024	En fase de factibilidad
Río del Hombre VII	124.2	ND	En fase de factibilidad
Reservorio Rancho Viejo, en el sector de El Hatillo, La Tigra	3.35	2020	En fase de pre-factibilidad

Fuente: UGASAM-SANA. ND: No determinado.

2.7.1. Descripción de Alternativas Analizadas

De los proyectos nuevos propuestos, se seleccionaron aquellos que estuvieran en la fase de factibilidad y dentro del área de estudio. La Tabla 213 contiene las características de los proyectos de almacenamiento simulados en este escenario, los cuales proporcionan almacenamiento adicional al sistema y permiten el incremento de abastecimiento a las plantas de tratamiento existentes.

Los objetivos de este análisis son:

- Analizar el beneficio del incremento de las capacidades de conducción y producción de las plantas de tratamiento.
- Analizar la función y dimensionamiento de los proyectos de almacenamiento propuestos.

Adicionalmente, como fue inferido del análisis de la oferta y la demanda, las capacidades de conducción a las plantas de tratamiento y las mismas capacidades de producción de las plantas de tratamiento restringen el abastecimiento. En este análisis se simuló la expansión de capacidades de conducción y producción de las plantas de tratamiento para entender el potencial de la oferta hídrica y los proyectos propuestos.

Tabla. 2.13. Proyectos propuestos simulados.

Proyecto	Capacidad	Observaciones
Embalse sobre cuenca del río Guacerique (Laureles II modificado)	10 Mm ³	Almacenamiento adicional en la cuenca Guacerique, simulado como una expansión del embalse Laureles
Embalse Sabacuante, San José o Jacaleapa (sobre el río San José)	26.7 Mm ³	Embalse en la cuenca Sabacuante, simulado como un nuevo embalse en la parte baja de la cuenca

2.7.2. Método de Análisis

En este caso se analizaron las condiciones de suministro para Tegucigalpa con las condiciones de demanda e hidrología para 2030, con la influencia del cambio climático. Para el análisis del mayor potencial de los proyectos propuestos se asume que no van a haber restricciones de demanda impuestas a los habitantes en épocas de sequía debido a que se cuenta con un

sistema de abastecimiento más robusto. Las capacidades de conducción y de producción de las plantas simuladas fueron encontradas con un proceso iterativo para lograr el mayor uso del almacenamiento simulado, aumentando la producción si el embalse se llena y propicia derrames, y reduciendo la producción si el embalse no se usa en su totalidad en los períodos críticos.

2.7.3. Resumen de Resultados y Recomendaciones

El embalse en la cuenca Sabacuante captura el mayor potencial hídrico identificado en el análisis de oferta y demanda, en otras palabras, captura la mayor cantidad de agua que no podía ser utilizada en la simulación de las condiciones actuales (ver Figura 2.17).

Para aprovechar el potencial hídrico en la cuenca de Sabacuante y la regulación del embalse propuesto, sería necesario explorar la expansión de la conducción y la capacidad de la planta de tratamiento de agua de Miraflores alrededor de 1,500 l/s. Figura 2.22, muestra los resultados de la simulación del abastecimiento y la regulación en la cuenca Sabacuante.

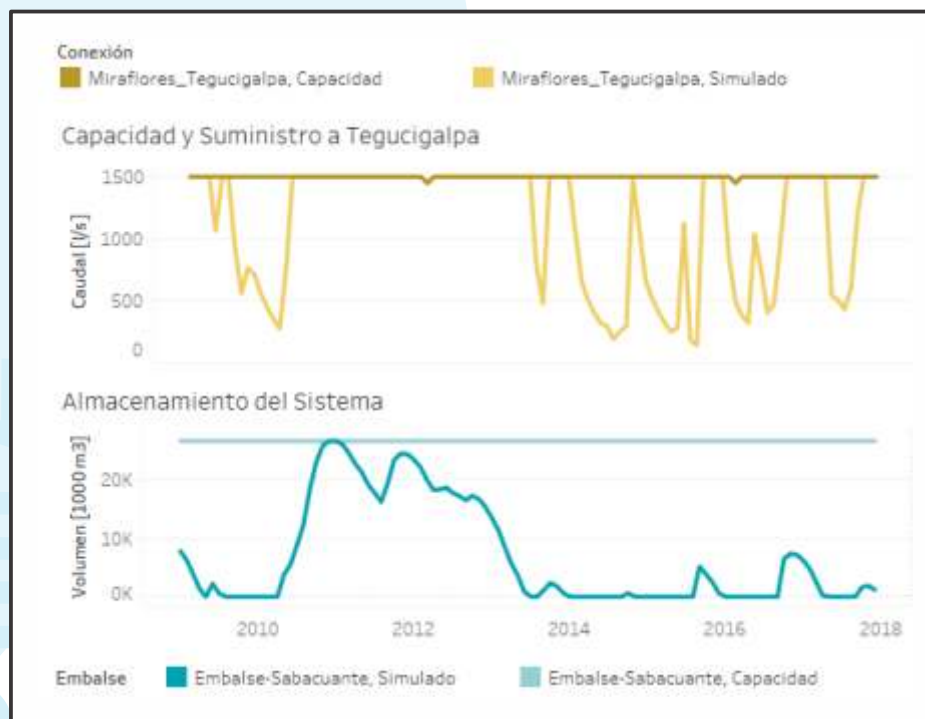


Figura. 2.22. Capacidad de suministro y producción de la planta de Miraflores con la expansión propuesta y el almacenamiento simulado en la cuenca Sabacuante.

Con el embalse en la cuenca Sabacuante y la expansión de la planta de tratamiento de agua de Miraflores simuladas, el promedio anual de agua no capturada en esta cuenca (y en la cuenca Tatumbla) para el suministro de Tegucigalpa se reduce de 33.9 Mm³ a 0.8 Mm³. En promedio el agua no capturada por año en estas condiciones en toda la Cuenca es de 20 Mm³. La Figura 2.23, muestra los caudales medios de agua no capturada en este escenario.

La capacidad de producción, y conducción, simulada de la planta de tratamiento de agua de Laureles fue 860 l/s, que representa un incremento en la capacidad de aproximadamente el 20%.

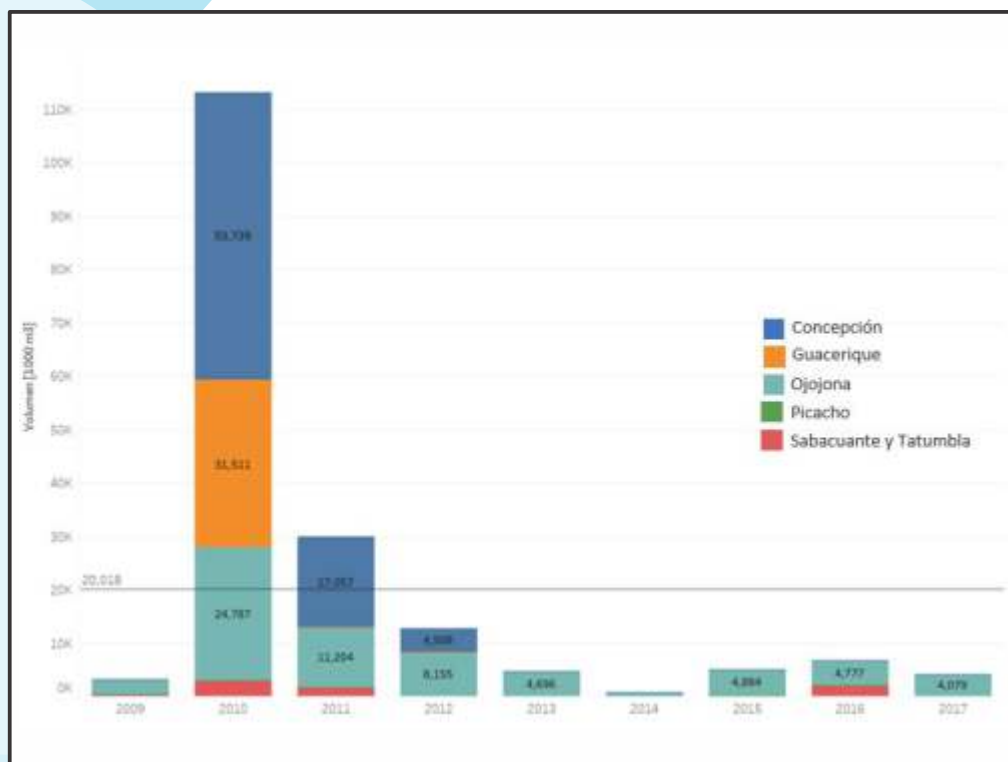


Figura. 2.23. Caudales medios de agua no capturada por fuente de abastecimiento.

En este escenario, teniendo en cuenta la expansión del embalse Laureles, el nuevo embalse en la cuenca Sabacuante y las mejoras en las capacidades de conducción y de producción de las plantas, el suministro promedio anual a Tegucigalpa es de aproximadamente 97 Mm³. A pesar de que aún no se pueden cumplir la totalidad de las demandas estimadas, el incremento del suministro es substancial y equivale a aproximadamente 60% más del suministro bajo un escenario de cambio climático, que en promedio tiene un suministro de 60.2 Mm³ por año.

Cabe anotar que este análisis se realizó sin restricciones, así que, si las mejoras propuestas fueran realizadas, las deficiencias máximas por año podrían ser aminoradas con la implementación de restricciones.

Con estos proyectos simulados, la distribución porcentual del abastecimiento a Tegucigalpa desde las diferentes fuentes cambia, reduciendo la dependencia del embalse de Concepción de aproximadamente 72% en promedio anual en la línea base al 45%, e incrementando el abastecimiento marginal a Miraflores (menos del 2%) en la línea base al 36% en promedio anual.



3. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD Y ESCASEZ HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO ULÚA



3.1. Objetivos

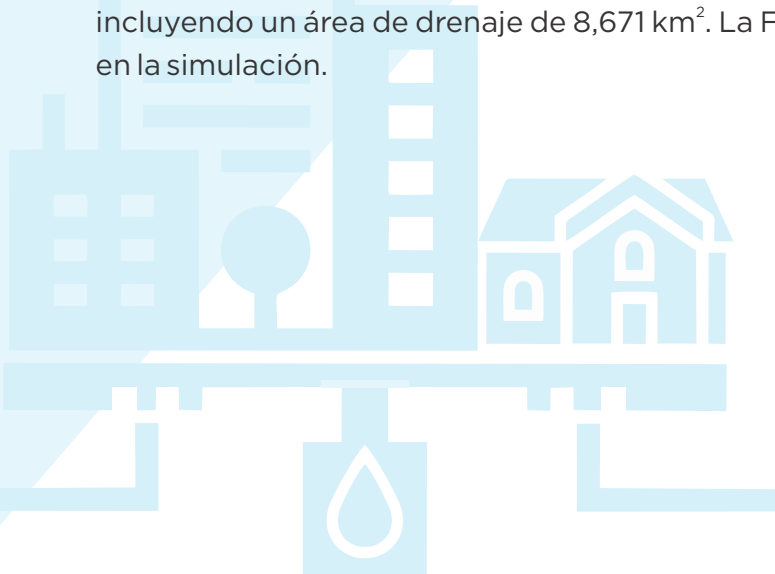
El río Ulúa es uno de los más grandes e importantes de Honduras particularmente para el sector agrícola e hidroeléctrico. Dentro de esta cuenca existen cuatro hidroeléctricas y aproximadamente 63 distritos de riego (con base a datos recibidos por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional [USAID] y la Secretaría de Agricultura y Ganadería [SAG]). Sin embargo, gran parte de la cuenca se encuentra bajo el Corredor Seco Centroamericano, poniendo a la cuenca en una situación estrés hídrico. La competencia por el agua entre los diferentes usuarios en la cuenca podría agravarse en el futuro con las altas tasas de crecimiento poblacional de las ciudades principales en la cuenca como San Pedro Sula y teniendo en cuenta el desarrollo de nuevos centros poblacionales.

Por esta razón, los objetivos de este Estudio en esta cuenca son:

- Analizar la disponibilidad hídrica actual en la cuenca por medio de las herramientas de modelación HydroBID y WaterALLOC.
- Evaluar el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica en la cuenca.

3.2. Área de Estudio

El río Ulúa con más de 240 km de longitud, formado por la unión de los ríos Jicatuyo y Otorodrena, desemboca al Golfo del Océano Atlántico al noroeste de país. Esta cuenca tiene un área de drenaje de 21,772 km² haciéndola una de las cuencas más grandes de Honduras (Figura 3.1). En este Estudio, se seleccionaron tres subcuencas de la cuenca Ulúa para la modelación; estas subcuencas cubren el 81% de toda la cuenca y son las más relevantes para el sector agrícola e hidroeléctrico ya que contienen los embalses Yojoa y Morazán. La subcuenca del embalse Morazán cuenta con un área de drenaje de 8,662 km², mientras que la subcuenca del embalse Yojoa de 297 km². La parte Oeste de la cuenca se simuló hasta donde aproximadamente se encuentra ubicada la municipalidad de Chinda (referida como la subcuenca de Chinda), incluyendo un área de drenaje de 8,671 km². La Figura 3.2, muestra las tres subcuencas incluidas en la simulación.



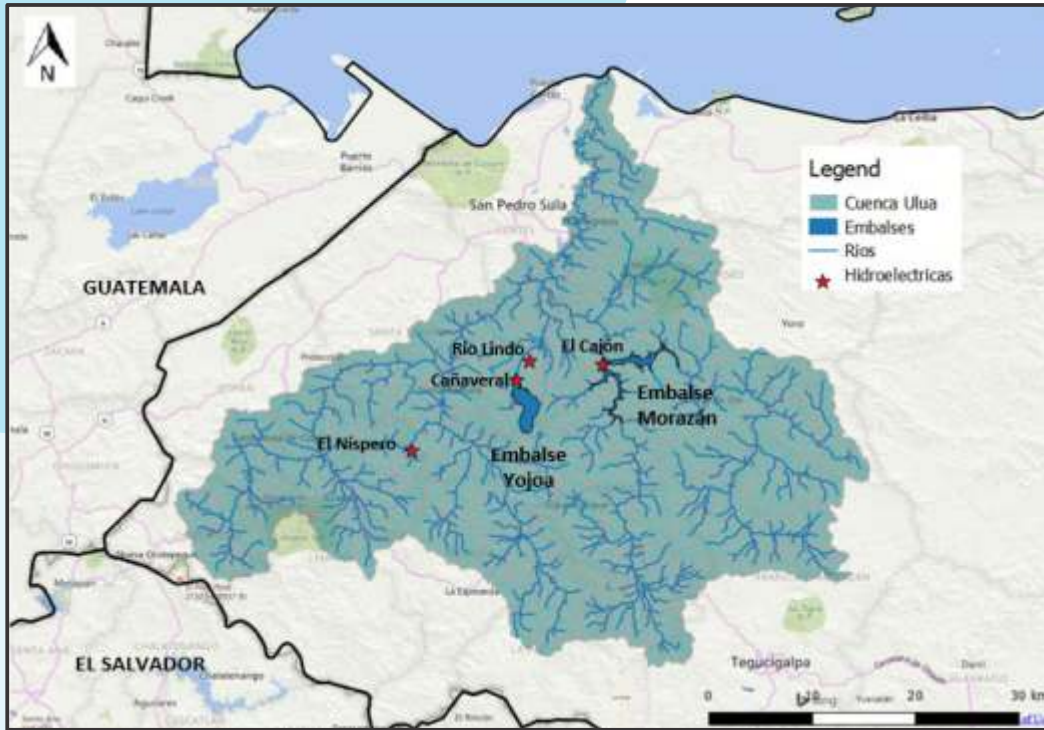


Figura. 3.1. Ubicación de la cuenca del río Ulúa.

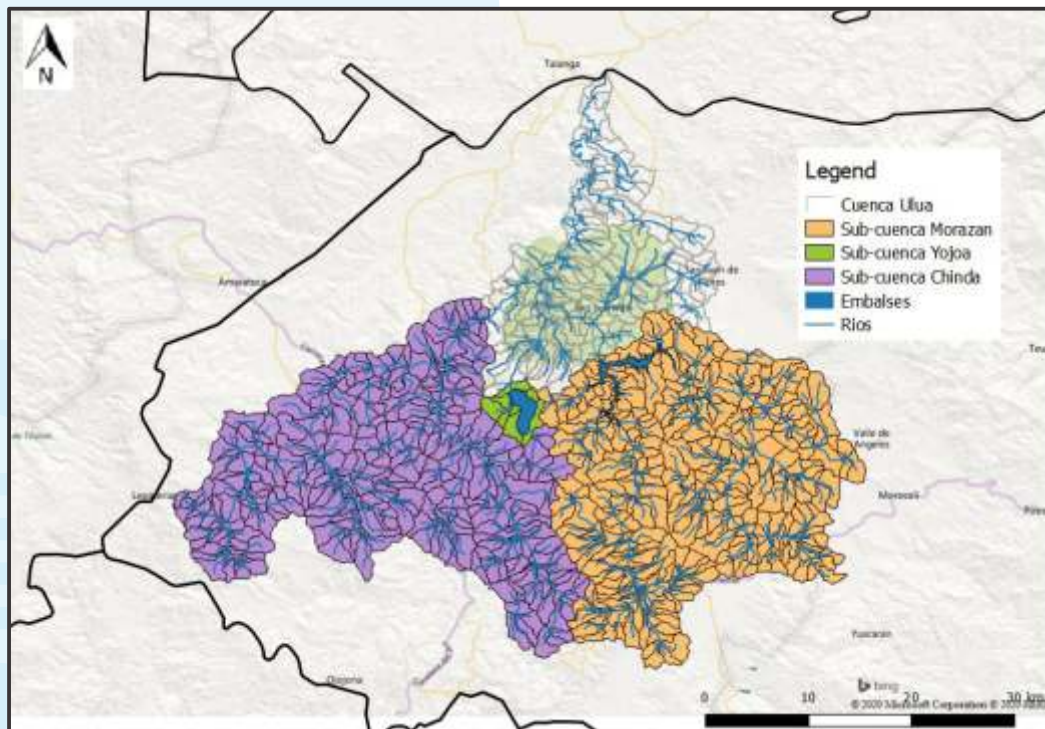


Figura. 3.2. Subcuenclas incluidas en la simulación.

3.3. DATOS USADOS PARA EL DESARROLLO DEL ESCENARIO LÍNEA BASE

3.3.1. Clima

Para caracterizar el clima histórico de la cuenca, se obtuvieron datos satelitales de la NASA a través de su programa de Predicción de los Recursos Energéticos Mundiales (POWER, por sus siglas in ingles) debido a que no se pudo obtener registros de precipitación y temperatura en las estaciones in- situ con períodos largos y continuos disponibles. Los parámetros contenidos en la base de datos NASA-POWER son basados en la radiación solar derivada de las observaciones satelitales y los datos meteorológicos de los modelos de asimilación. Se ha demostrado que estos productos satelitales y basados en modelos son lo suficientemente precisos para proporcionar datos confiables de recursos solares y meteorológicos en regiones donde las mediciones en campo son escasas o inexistentes (Stackhouse et al., 2018). Los datos en NASA-POWER se proporcionan en una cuadrícula global con una resolución espacial de 0.5° de latitud por 0.5° de longitud. Para propósitos de este Estudio, se descargaron datos para un período entre 2000 y 2017.

La precipitación promedio anual en la cuenca es de 1,351 mm presentando picos de lluvia en los meses de Junio y Octubre y un período seco entre Febrero y Abril. La temperatura media en la cuenca oscila entre 21°C y 26°C, donde la temperatura máxima se alcanza en el mes de Abril y la mínima en el mes de Enero.

3.3.2. Características de los Embalses e Hidroeléctricas

La cuenca Ulúa cuenta con dos embalses importantes, el embalse Yojoa y el embalse Morazán, los cuales se utilizan para la generación de energía. El caudal de los tributarios del río también es usado por otras hidroeléctricas para satisfacer la demanda energética en la cuenca. La Tabla 3.1, presenta las características de los embalses e hidroeléctricas incluidos en la simulación.



Tabla. 3.1. Características de los embalses e hidroeléctricas en la cuenca Ulúa.

Hidroeléctrica	Embalse	Capacidad del Embalse (Mm ³)	Potencia (Mw)	Capacidad (m ³ /s)	Factor de Conversión (GWH/mes)/(m ³ /s)
Francisco Morazán	Francisco Morazán	4,200	300	112	1.96
El Nispero	El Nispero	5.5	22.5	17	0.97
Cañaverl	Lago Yojoa	1,574*	29.0	23	0.92
Río Lindo	--	--	80.0	26	2.25

Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).

*Capacidad basada en la curva área-elevación-volumen del año 2007 (ver Figura 3.4).

Los volúmenes de almacenamiento, tasas de evaporación y curvas área-elevación-volumen fueron suministrados por la ENEE solamente para el embalse Yojoa. Estos datos se utilizaron para caracterizar más detalladamente el embalse en el modelo. La Figura 3.3, presenta los volúmenes y la tasa de evaporación histórica para este embalse durante el período de 2000-2014 y la -Figura 34 muestra la curva área-elevación-volumen. El volumen de almacenamiento del embalse durante este período de tiempo osciló entre 1,138 Mm³ y 1,594 Mm³ (Figura 3.3).

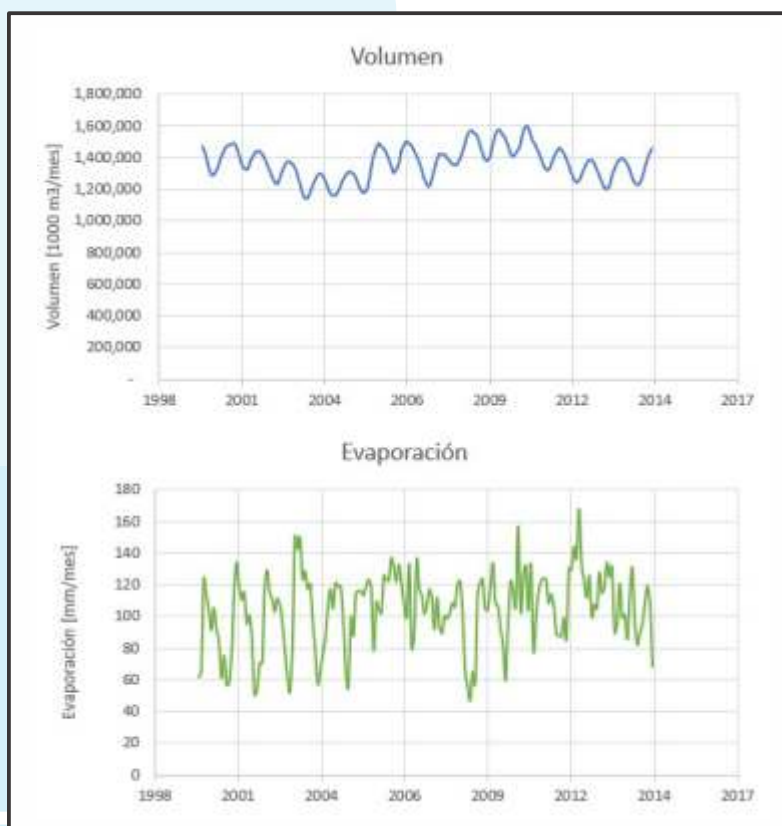


Figura. 3.3. Volumen y evaporación del embalse Yojoa para el período 2000 - 2014.

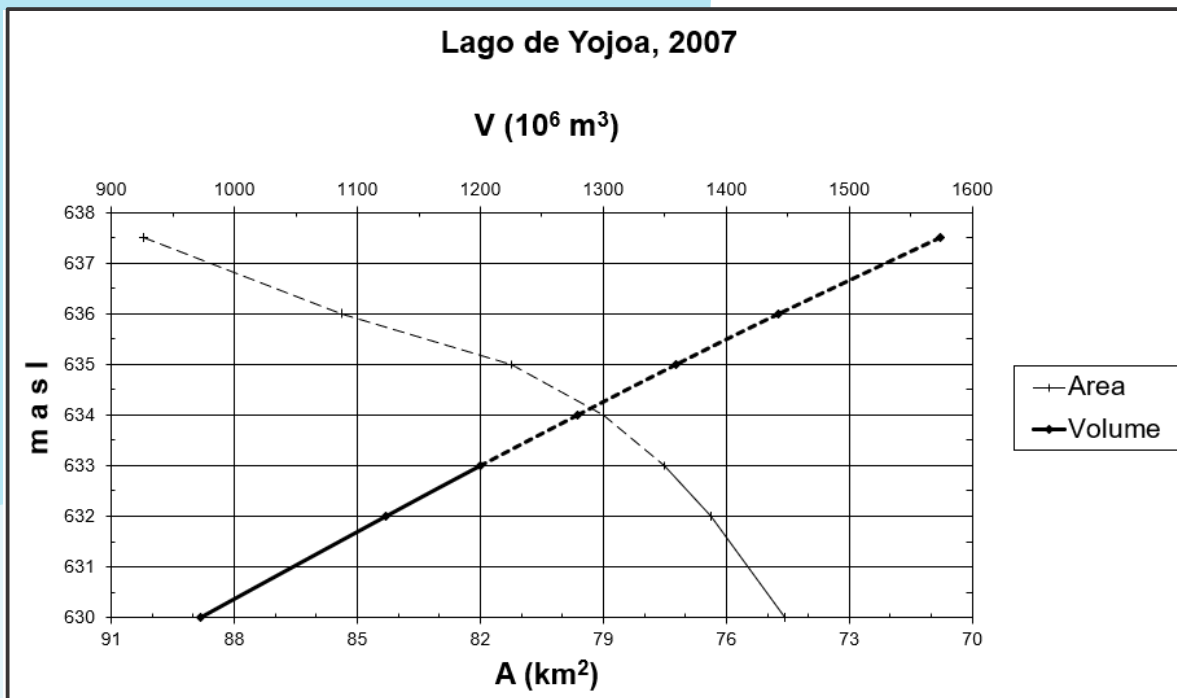


Figura. 3.4. Curva área-elevación-volumen para el embalse Yojoa.

El embalse Yojoa se alimenta además de dos canales de trasvase. Un trasvase proveniente del canal Yuré ubicado al Oeste del embalse con una capacidad de $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ y el trasvase Varsovia ubicado al Sur, con capacidad de $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Los caudales históricos entre el 2000-2014 de estos dos trasvases (suministrados por la ENEE) se utilizaron para caracterizar la afluencia proveniente de estos dos canales (Figura 3.5).

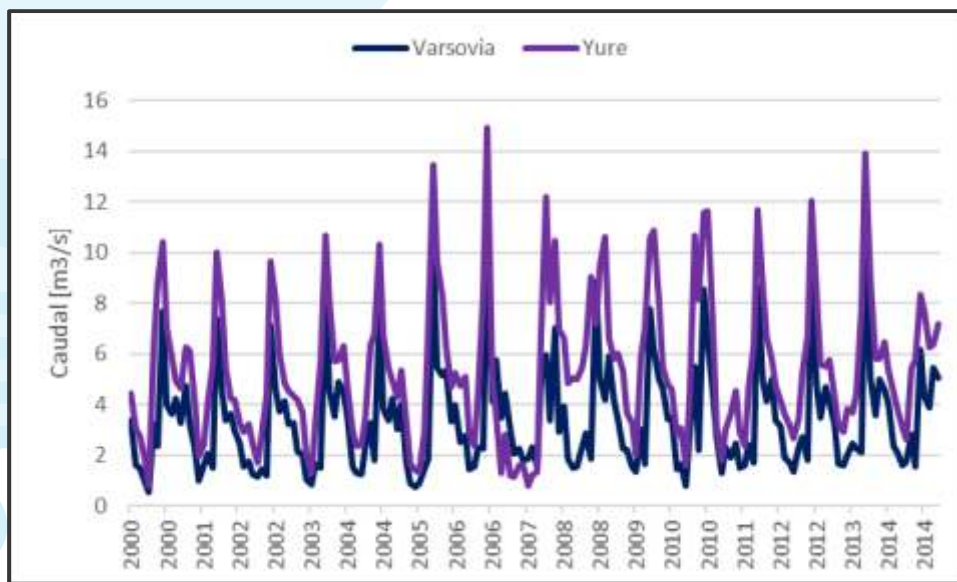


Figura. 3.5. Caudales de trasvase al lago Yojoa de los canales Yuré y Varsovia entre el período 2000 - 2014.

3.3.3. Demandas de Agua

El consumo de agua en la cuenca se caracterizó con demandas domésticas y agrícolas. Se recolectó información de 63³ distritos de riego en la cuenca Ulúa, de los cuales seis (6) son distritos identificados por la SAG y el resto por el USAID. El volumen de agua mensual para las demandas agrícolas se estimó asumiendo una eficiencia de irrigación del 50% y 30% para los distritos identificados por el SAG y USAID, respectivamente. El número de habitantes en la cuenca se obtuvo de la base de datos espacial del WorldPop la cual provee acceso gratuito a la distribución demográfica en alta resolución a nivel global. Para este Estudio, se utilizó la población de Honduras para el año 2018, la cual fue agregada para cada una de las microcuencas dentro de las cuencas simuladas. Para el cálculo de la demanda de agua doméstica se asumió un consumo unitario de 200 l/hab/día; la cual, para el período de verano (Abril - Septiembre) se incrementó en un 20% y para el período de invierno (Octubre - Marzo) se redujo en un 20%. Adicionalmente, se asumió que el 80% del agua residencial consumida retornaba a la red hidrológica superficial.

3.4. DESARROLLO DEL MODELO DE ASIGNACIÓN DE AGUA

3.4.1. Configuración de la Red de Flujo y Uso del Agua en Tres Subcuencas

La red de flujo de MODSIM generada por WaterALLOC se creó agregando la esorrentía generada por el modelo HydroBID en puntos de interés (denominados puntos de flujo local) en cada una de las tres subcuencas simuladas. Estos puntos de flujo local también se utilizaron para agregar las demandas agrícolas y domésticas en las subcuencas. La Figura 3.6, muestra la red de MODSIM completa con la conectividad de la red de flujo a los nodos de los embalses y la ubicación de los nodos de las demandas.

Las demandas en la cuenca se procesaron utilizando una herramienta de manejo de datos personalizada (DMS, por sus siglas en inglés) creada por RTI en el marco del proyecto “Nexus Analysis for Water Security Under Severe Water Scarcity in Brasilia (DF) Through the Use of a Hydro-Economic Model: A Case Study in the Upper Descoberto Basin” (Corrales et al., 2019). El DMS fue customizado para este Estudio permitiendo la creación automática de las demandas en la red de MODSIM y para importar la información de la demanda mensual en WaterALLOC. El DMS asigna un conjunto de prioridades únicas para las demandas para tener soluciones únicas entre múltiples corridas y facilitar la asignación de agua por parte de MODSIM y la comparación de los resultados. El número identificador de cada microcuenca (COMID) y un costo adicional

3. <https://www.worldpop.org/>

arbitrario para los dos tipos de demandas se usaron para establecer un costo único en el modelo (prioridades en MODSIM) en los enlaces que desvían el agua de la red de flujo a las demandas. La Tabla 3.2, presenta las ecuaciones utilizadas por el DMS para calcular el costo en los enlaces para las diferentes demandas. Se asumió que las demandas domésticas tienen mayor prioridad de suministro que las agrícolas.

Tabla. 3.2. Configuración de las prioridades de asignación de agua en la cuenca Ulúa.

Tipo de Demanda	Costo (Prioridad)
Doméstica	-4000 - COMID#
Agrícola	-2000 - COMID#

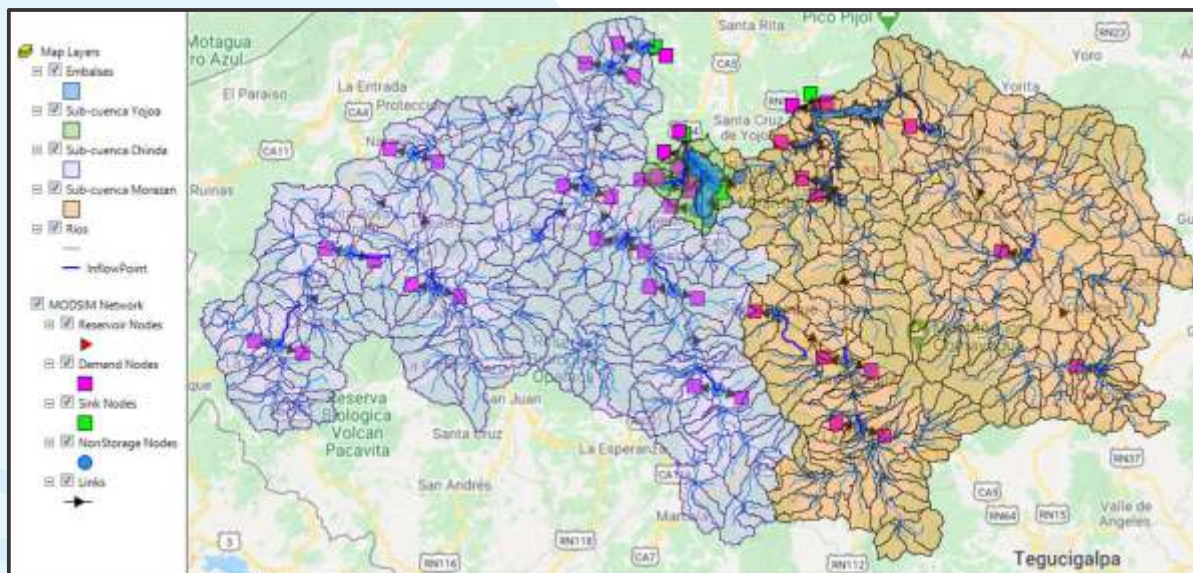


Figura. 3.6. Representación de la red de MODSIM creada en WaterALLOC para las subcuencas simuladas en la cuenca Ulúa.

3.4.2. Calibración

La metodología utilizada para calibrar el modelo en esta cuenca es similar a la aplicada en la cuenca Cholteca (Ver sección 2.4.3). Los caudales de la estación Chinda durante el período 2000 – 2014 (Monserrate et, al. 2018), se utilizaron para compararlos con los caudales simulados por el modelo y evaluar su desempeño. La Tabla 3.3, presenta los valores de los parámetros de calibración.

Tabla. 3.3. Parámetros del modelo calibrado en la estación Chinda.

COMID de Calibración	211437400
Área de Calibración (km²)	8,456
Parámetro	
Número de Curva (CN)	1.2
Capacidad Disponible de Agua (AWC)	0.5
Coefficiente de Recesión (r)	0.02
Coefficiente de Percolación profunda (s)	0.007
Factor de ET en la Temporada de Crecimiento	1
Factor de ET en la Temporada Latente	0.5

Las estadísticas obtenidas del proceso de calibración se muestran en la Tabla 3.4, y la Figura 3.7, presenta la comparación de los hidrogramas de los caudales observados y simulados.

Tabla. 3.4. Estadísticas mensuales de calibración en la estación Chinda.

Estación	Chinda
Período de Calibración	2001 – 2014
Estadísticas	
Error de volumen general, OVE (%)	-14.6
Correlación, r	0.85
coeficiente Nash-Sutcliffe, NSE	0.64

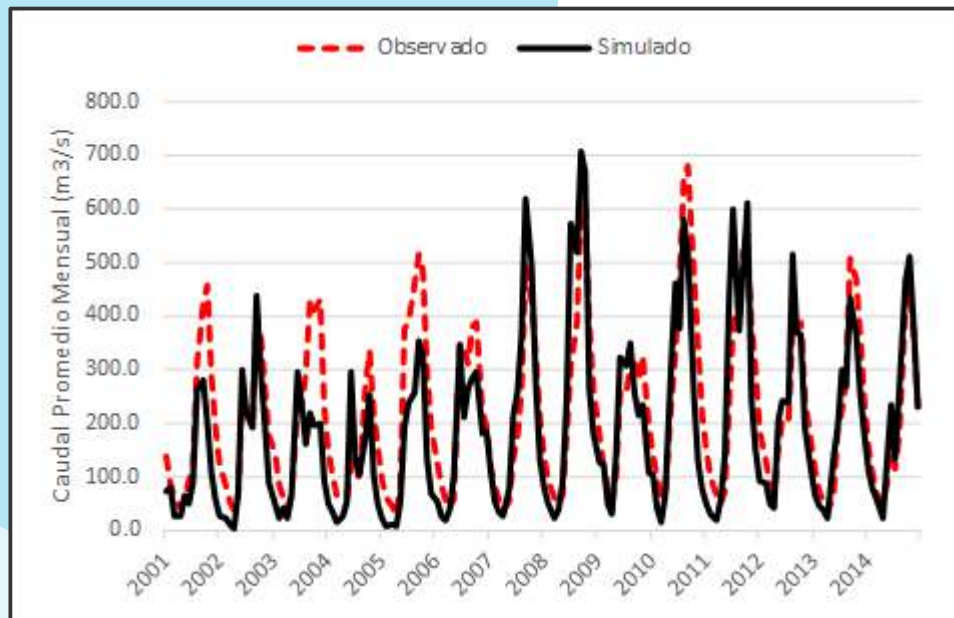


Figura. 3.7. Comparación de los caudales promedio mensuales simulados con los caudales observados en la estación Chinda.

Debido a la falta de estaciones hidrométricas en las subcuencas Yojoa y Morazán, los parámetros de calibración obtenidos para la subcuenca Chinda fueron aplicados para la simulación en las otras dos cuencas. Cabe resaltar, que los volúmenes históricos del embalse Yojoa sirvieron para validar estos parámetros en esta subcuenca. La Figura 3.8, ilustra el buen ajuste entre los volúmenes de almacenamiento histórico del embalse y los modelados por MODSIM en el período de simulación de 2001 - 2014.

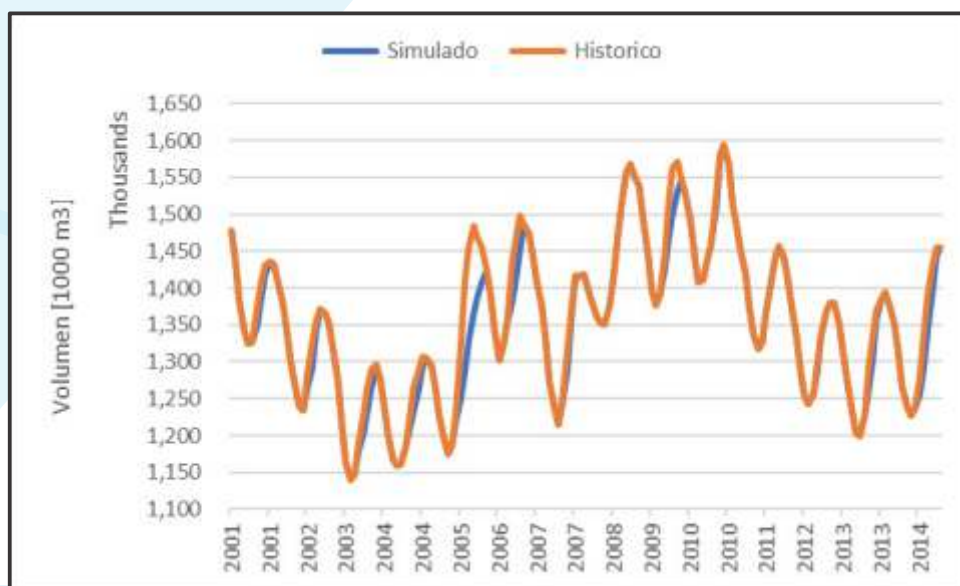


Figura. 3.8. Almacenamiento simulado del Embalse Yojoa comparado con los volúmenes históricos.

3.5. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD Y DÉFICIT HÍDRICO ACTUAL

3.5.1 Oferta Hídrica

Para las condiciones de línea base, la Figura 3.9, muestra la afluencia simulada acumulada por año y la afluencia promedio en cada subcuenca acumulada por mes para las cuencas simuladas en Ulúa. La oferta hídrica anual promedio simulada es del orden de 12.93 Mm³ con un promedio mensual de aproximadamente 1 Mm³. La afluencia en los meses de Junio a Octubre está por encima del promedio, alcanzando 1.70 Mm³ al mes en promedio, mientras que el promedio los otros meses del año alcanza solo 0.57 Mm³. De estas tres subcuencas, la mayor contribución promedio a la oferta proviene de la cuenca Morazán, con 6.58 Mm³ (ffi51%), seguida por la cuenca Chinda con 6.13 Mm³ (ffi47%) y la cuenca Yojoa con aproximadamente el 2%. El año simulado con mayor afluencia es el 2008 con 19.3 Mm³.

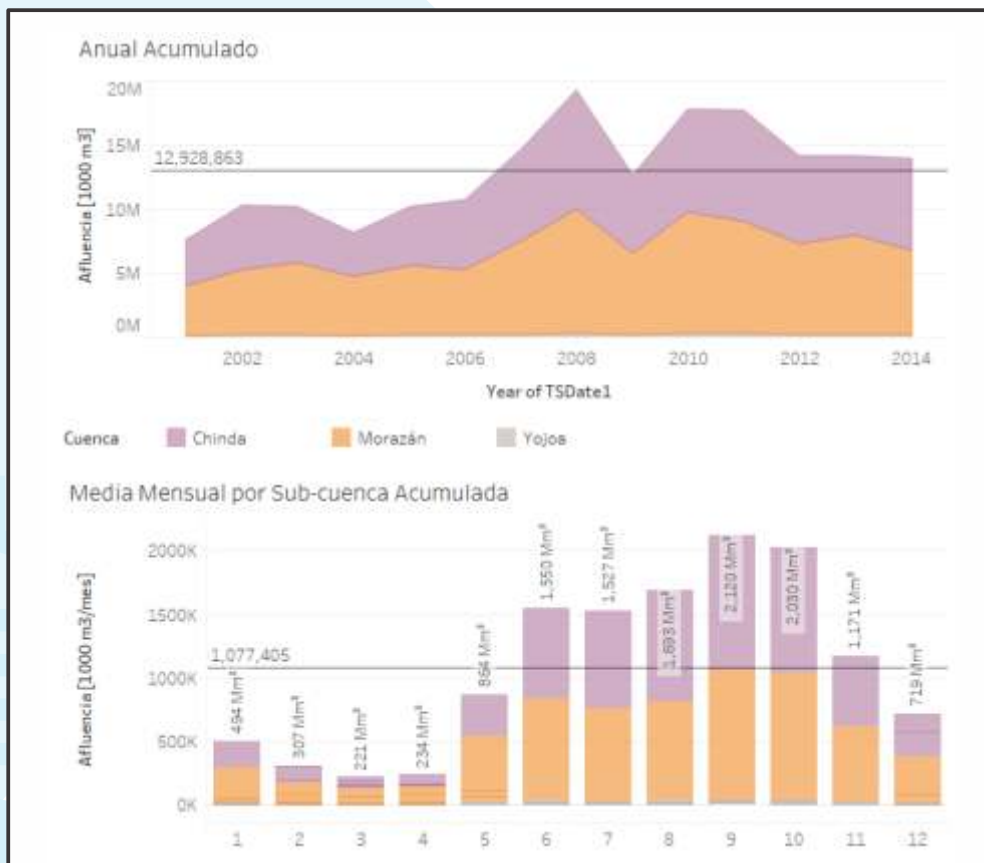


Figura. 3.9. Oferta hídrica anual y mensual simulada en las cuencas de abastecimiento de la cuenca Ulúa.

En este escenario, la oferta hídrica natural es complementada con dos transvases a la cuenca Yojoa que están disponibles para satisfacer la demanda. Para este análisis se asumieron los transvases históricos en el período simulado.

3.5.2 Demanda Hídrica

La demanda de agua en cada cuenca es asumida constante por cada mes para el período simulado. La demanda agrícola en las subcuencas simuladas representa el 56% de la demanda total, y la mayoría está ubicada en la subcuenca de Morazán, donde se encuentran los distritos de riego identificados por la SAG. La demanda poblacional tiene los picos en los meses de abril a septiembre, con un promedio mensual acumulado sobre todo el año de 1.74 Mm³. El patrón de la demanda poblacional es relativamente uniforme mes a mes, así que el patrón demanda total esta mayormente influenciado por el patrón de la demanda agrícola. El volumen promedio mensual del total de agua demandada en las subcuencas simuladas es de 3.97 Mm³, con la mayoría de la demanda entre los meses de Diciembre a Abril (Figura 3.12).

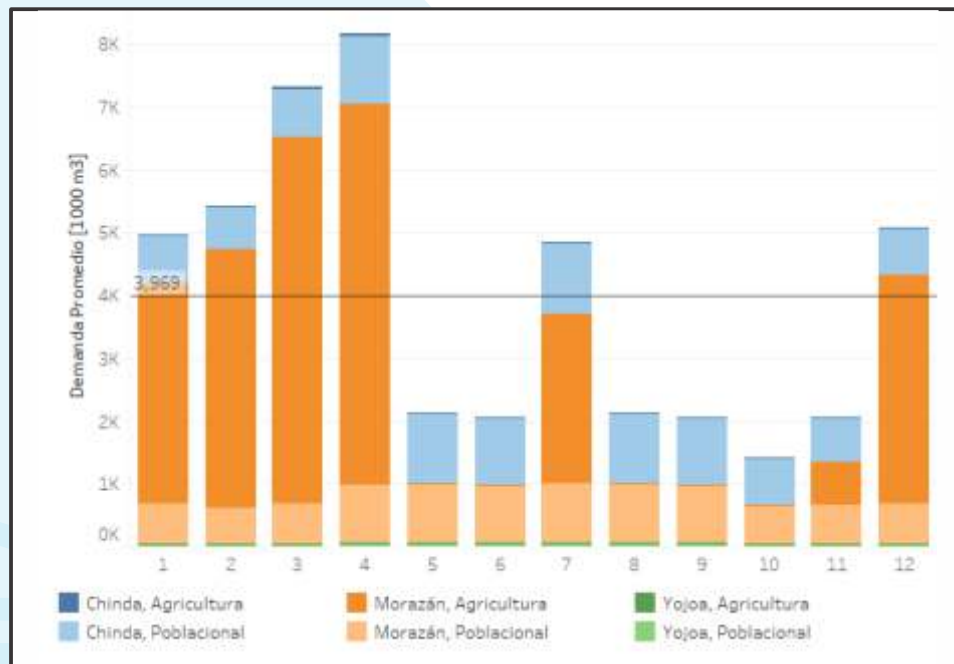


Figura. 3.10. Demanda hídrica mensual promedio acumulada.

3.5.3. Déficit Hídrico

Los resultados muestran deficiencias en el suministro de la demanda actual. Estas deficiencias representan cantidades de agua que históricamente no habrían estado disponibles para suplir la demanda asumida. El suministro anual de las demandas muestra la mayor deficiencia promedio anual en las demandas agrícolas de la subcuenca Morazán, la cual es cercana a los 8 Mm³ al año en promedio, lo que representa el 15% de la demanda anual. La Figura 3.11 muestra el resumen del suministro y la deficiencia a nivel anual en el período simulado. Las deficiencias simuladas en las demandas poblacionales son pequeñas excepto en la cuenca de Yojoa, donde son mayores al 70% en Julio, Agosto y Septiembre. En general, las demandas agrícolas en las tres subcuencas muestran deficiencias en casi todos los años simulados.

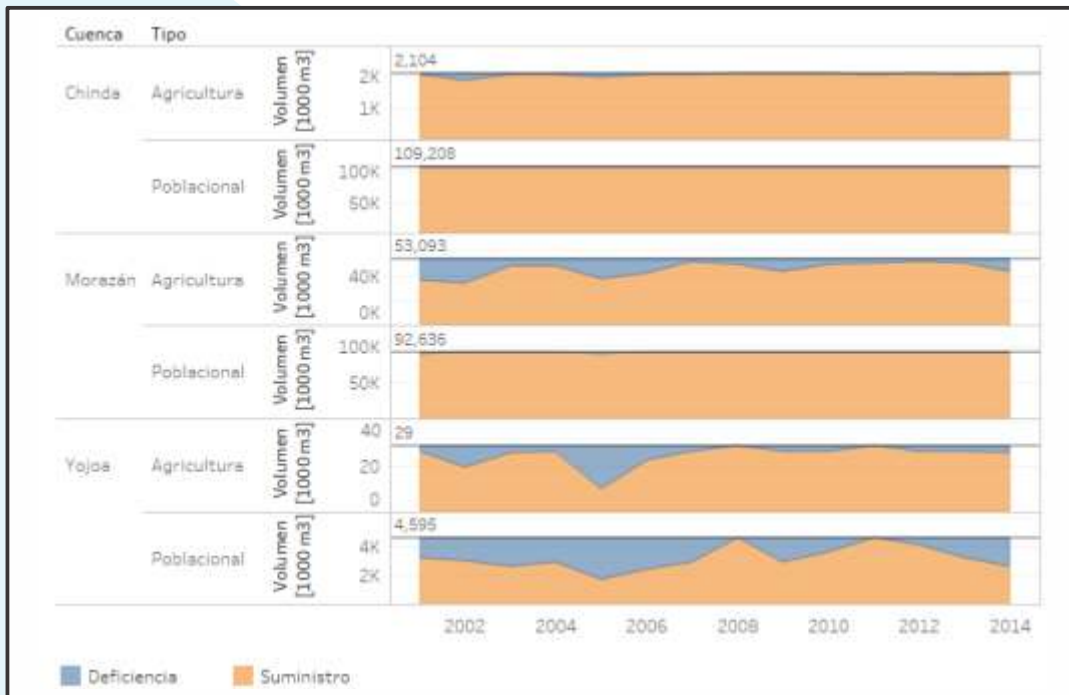


Figura 3.11. Suministro y deficiencia anual simulada en las subcuencas de la cuenca Ulúa.

Para todas las subcuencas simuladas, el promedio de deficiencias mensuales es de aproximadamente 0.37 Mm³. Estas deficiencias son parte de la línea base y son usadas para realizar análisis comparativos con otros escenarios. La Figura 3.12, muestra el porcentaje de la deficiencia en la demanda mensual promedio para cada subcuenca y para los diferentes usos de agua. Las deficiencias porcentuales más pronunciadas se presentan en las demandas agrícolas en la subcuenca de Yojoa. Vale la pena anotar que las demandas en la subcuenca Yojoa fueron simuladas aguas arriba del embalse, y por lo tanto no tienen acceso al caudal regulado del embalse. Estos resultados en la subcuenca Yojoa deben ser entendidos en el contexto de la incertidumbre que se tiene en las demandas históricas en las cuencas y la simulación de escorrentía usando parámetros calibrados de la subcuenca Chinda. Las deficiencias simuladas en la subcuenca de Yojoa son el resultado de las operaciones simuladas en la cuenca para cumplir el volumen histórico en el embalse de Yojoa y caudales mínimos para la generación de energía.

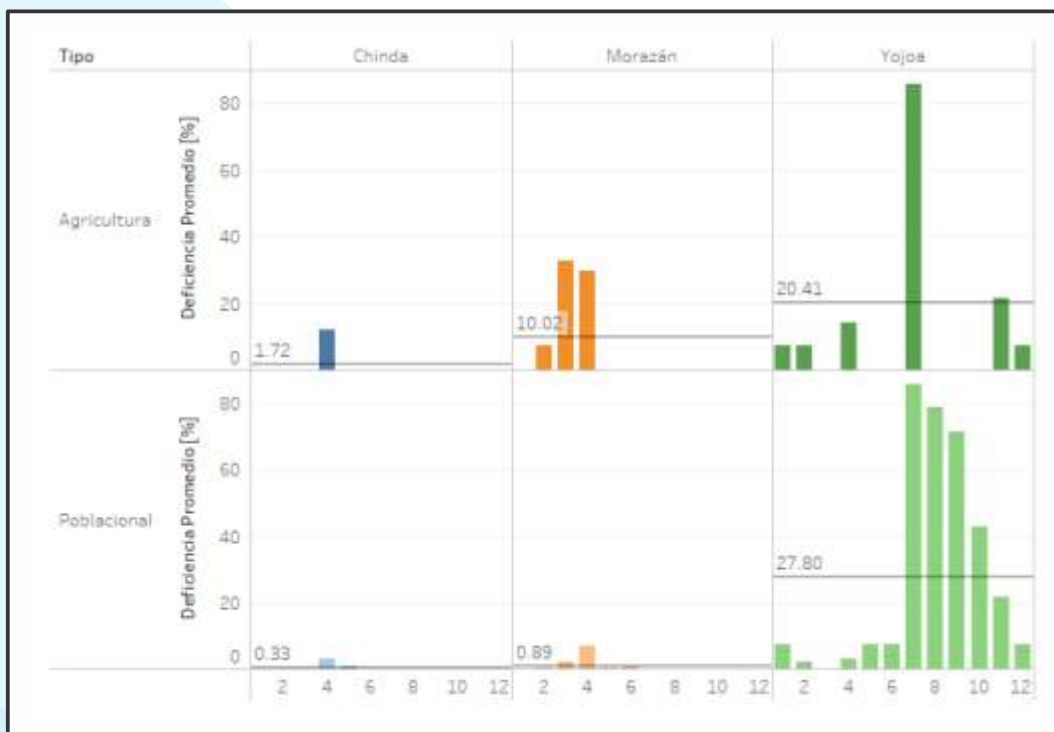


Figura. 3.12. Deficiencias simuladas en el suministro de la demanda por subcuenca.

3.5.4. Disponibilidad Hídrica

Los resultados muestran que en la condición actual hay limitaciones para satisfacer la demanda actual asumida con la hidrología histórica y especialmente en la subcuenca de Yojoa se simulan deficiencias porcentuales significativas. Sin embargo, el agua que no es consumida o almacenada en la cuenca fluye

hacia la cuenca baja, esta agua no capturada en la simulación nos da un indicativo del potencial para abastecer demandas en la parte baja de la cuenca Ulúa o de trasvase para abastecer Tegucigalpa. La Figura 3.13, muestra los volúmenes anuales no capturados en la simulación de la línea base para las tres subcuencas. La subcuenca de Chinda es simulada con el mayor volumen no capturado en promedio, que equivale a 6.10 Mm³, seguida de la subcuenca de Morazán con 2.78 Mm³ anuales en promedio.



Figura 3.13. Resumen de agua no capturada en las subcuencas.

La simulación de este escenario incluye el almacenamiento en embalses existentes. Esta simulación de la regulación de los caudales naturales debe ser incluida en el análisis del potencial de abastecimiento. La subcuenca de Morazán es simulada con almacenamiento mensual promedio de 3,683 Mm³, lo que la hace la subcuenca con el mayor potencial cuando se tiene en consideración las demandas satisfechas, el agua no capturada y el almacenamiento promedio.

A pesar de mostrar las mayores deficiencias porcentuales y, por su tamaño, la menor agua no capturada, la subcuenca Yojoa almacena en promedio 1,349 Mm³ al mes, lo que es un volumen considerable para el potencial de abastecimiento futuro. Esta subcuenca cuenta con trasvases existentes de la subcuenca Morazán, que aumentan su confiabilidad. Por todos los indicativos encontrados en esta subcuenca, consideramos que los resultados de este estudio deberán ser refinados para entender el verdadero potencial de esta subcuenca.

Los siguientes pasos para refinar este análisis deben incluir el balance de las demandas futuras en la cuenca baja de Ulúa y un refinamiento de la evaluación de la oferta con datos locales adicionales, por ejemplo, datos históricos de nivel del embalse de Morazán y caudales de salida de los embalses, para entender mejor el potencial de exportación de agua para Tegucigalpa.

3.6. IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD Y DÉFICIT HÍDRICO FRENTE A UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

En esta sección se compara la simulación de la disponibilidad hídrica para década del 2030 bajo el escenario RCP8.5, con las mismas características regionales asumidas en la cuenca del río Choluteca (ver sección 2.6). En este caso evaluamos las demandas actuales con una hidrología impactada por el escenario de cambio climático.

3.6.1. Oferta Hídrica

Para las condiciones simuladas se observa una disminución general de la oferta hídrica en las subcuencas, con un promedio anual de 12,409 Mm³ y el promedio mensual de oferta en el escenario con cambio climático es de 1,034 Mm³, que corresponde a una reducción de aproximadamente el 4%. La Figura 3.14 muestra mes a mes la oferta hídrica promedio acumulada para los dos escenarios. El efecto del cambio climático no es uniforme, en algunos meses el promedio disminuye, como es el caso de Agosto en el que disminuye 16%, y en otros meses aumenta, como es el caso de Mayo que presenta el máximo aumento de aproximadamente el 11%. Para estos mismos meses extremos el cambio en el volumen de afluencia representa en mayo un incremento de 96 Mm³ y una disminución en agosto de 279 Mm³.



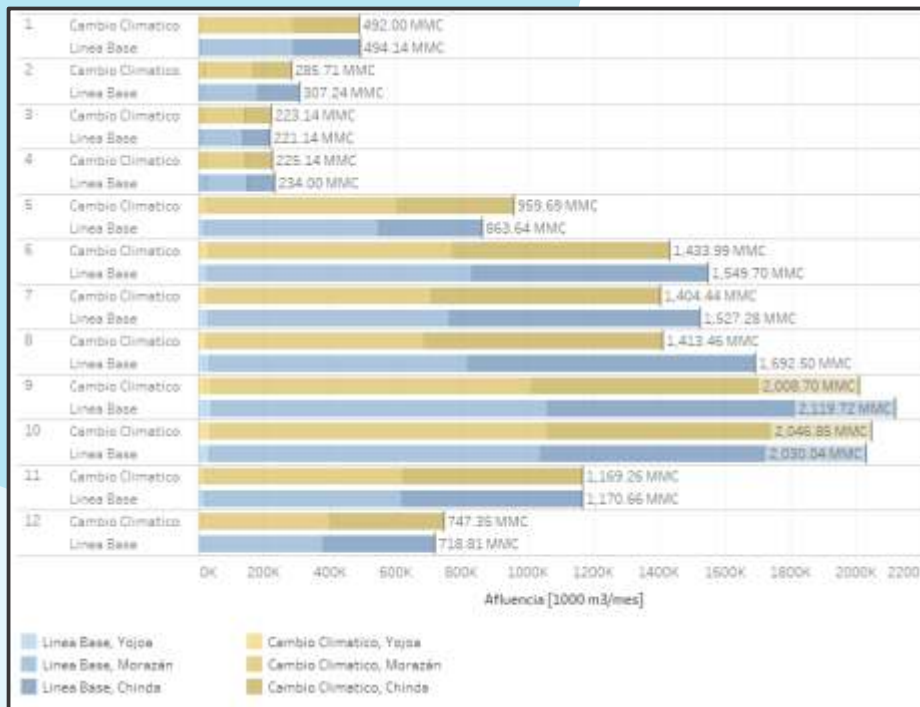


Figura. 3.14. Comparación de la oferta hídrica mensual promedio entre la línea base y el escenario con influencia del cambio climático.

3.6.2. Déficit Hídrico

El déficit hídrico en este escenario lo comparamos con la línea base para entender el efecto del escenario de cambio climático simulado. La Figura 3.15 muestra el porcentaje de déficit mensual en la línea base y en el escenario con cambio climático. La subcuenca de Yojoa tiene los cambios más predominantes con un aumento en la deficiencia, que equivale a una disminución del suministro, alcanzando una deficiencia del 100% en los meses de Agosto y Septiembre en las demandas poblacionales. En esta subcuenca de Yojoa las demandas agrícolas también sufren una disminución del suministro, especialmente en Noviembre y Diciembre. En las otras subcuencas el cambio es relativamente pequeño y aunque es en la mayoría de los meses con demanda, una disminución en la subcuenca de Chinda en la demanda poblacional muestra un pequeño aumento en el suministro.

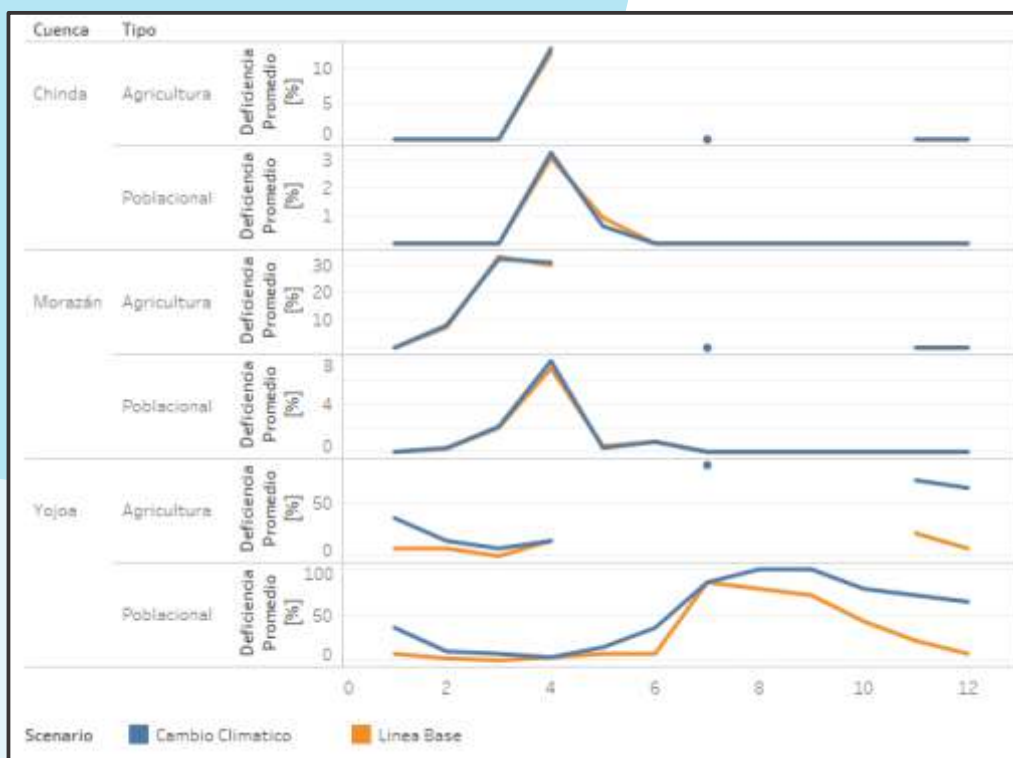


Figura. 3.15. Comparación del porcentaje de deficiencia promedio mensual entre la línea base y el escenario con cambio climático.

3.6.3. Disponibilidad Hídrica

La disponibilidad hídrica en las subcuencas comparada con la línea base muestra un efecto moderado en las condiciones de abastecimiento con el efecto simulado de cambio climático. Esto es debido a que los cambios en el clima muestran incremento y disminución de la precipitación mensual en diferentes meses y la demanda simulada es la misma que en la línea base. El almacenamiento simulado en las subcuencas muestra en general un almacenamiento de magnitud similar a la línea base, excepto algunos años, por ejemplo, el 2005, 2006 y 2009 en Yojoa y el 2002 en Morazán, donde el almacenamiento es menor hacia el final del año. Esto indica que hay años en este escenario con un mayor estrés hídrico y menor disponibilidad de agua. El promedio mensual de almacenamiento acumulado en las cuencas es aproximadamente 4,971 Mm³, que representa el 99% del almacenamiento simulado en la línea base.

La mayor variabilidad multianual se muestra en el agua no capturada/usada en las subcuencas. De la forma como se simula la distribución de agua en las subcuencas, manteniendo el almacenamiento y suministrando el agua disponible a las demandas, muestra los mayores cambios del balance hídrico en el término del agua no capturada. La Figura 3.13, muestra un

resumen del agua no capturada anual en la línea base y en el escenario de cambio climático. En todos los años simulados, el total de agua no capturada en el escenario con cambio climático es menor que en la línea base. La subcuenca Yojoa muestra la mayor disminución promedio en los años simulados, que es aproximadamente 38%. Las otras dos subcuencas muestran una menor disminución del agua no capturada, entre 5% y 10%. El total de agua no capturada se reduce en todos los años simulados y la reducción promedio anual es aproximadamente del 8%, con un máximo del 15% en el 2003 y una reducción mínima del 4% en el 2014.

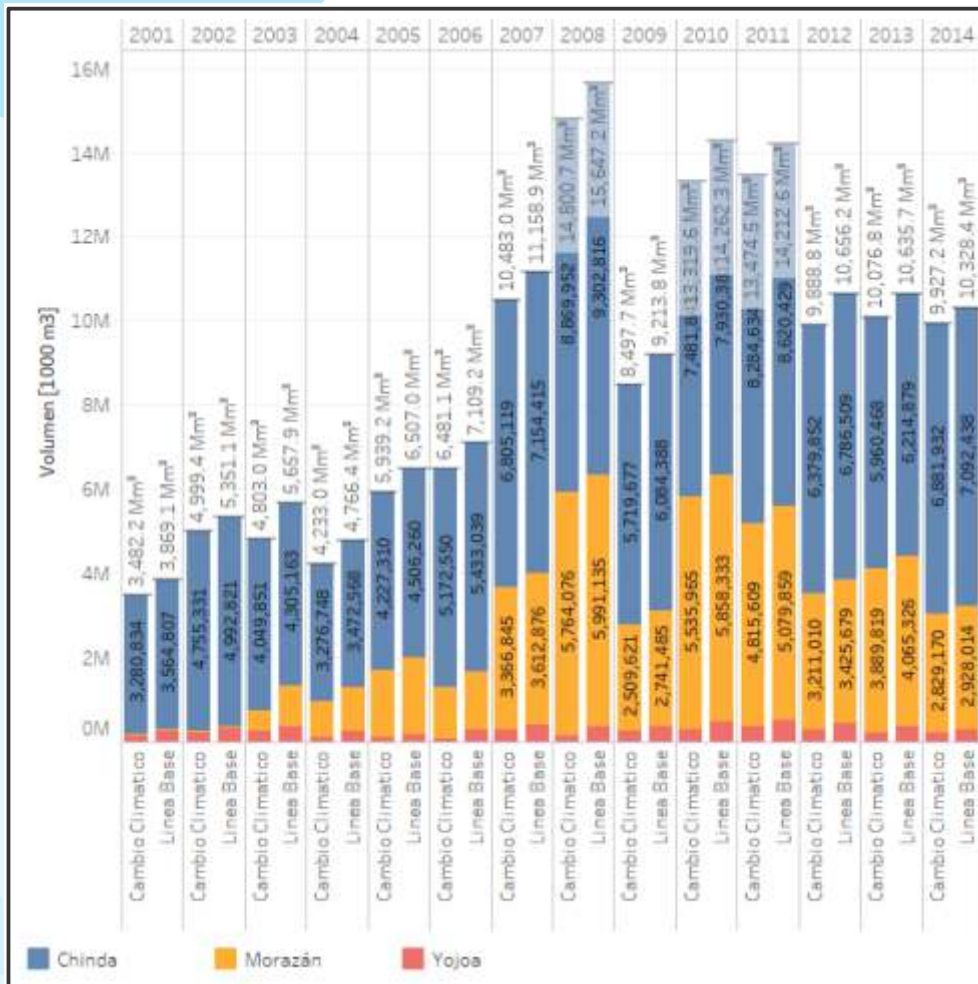


Figura. 3.16. Comparación del agua no capturada acumulada a nivel anual en las subcuencas con el efecto del cambio climático.

En este escenario futuro, a pesar de mostrarse un menor potencial de agua no capturada, el volumen almacenado en las subcuencas simuladas, cercano a los 4,971 Mm³ en promedio mensual, sigue indicando un buen potencial de abastecimiento futuro para demandas en la cuenca de Ulúa o exportes a otras cuencas.

4. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LAS CUENCAS CHAMELECÓN, LEMPA Y MOTAGUA



4.1. OBJETIVOS

En esta sección se presentan los resultados del Estudio para las cuencas del río Chamelecón, Lempa y Motagua. El propósito general de este Estudio en estas tres cuencas es comprender cómo la disponibilidad hídrica varía espacialmente y cómo se podrían ver potencialmente afectada bajo un escenario de cambio climático.

Es importante resaltar que el análisis realizado en estas tres cuencas no contempla aspectos como demandas o extracciones de agua para diferentes usos, como tampoco infraestructura de regulación hídrica, sin embargo, es un gran paso para tener estimaciones actuales de disponibilidad de agua que puedan usarse para informar los planes de cuencas hidrográficas, decisiones de asignación de agua y para desarrollar políticas efectivas. Las estimaciones actuales de disponibilidad de agua son cruciales para la planificación del desarrollo económico del país y para la producción de alimentos y energía, particularmente bajo las variaciones climáticas futuras.

4.2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio para esta fase del proyecto incluyó toda la cuenca del Chamelecón, y las porciones de las cuencas de Lempa y Motagua dentro de Honduras, ya que estas dos cuencas fluyen principalmente en El Salvador y en Guatemala, respectivamente (Figura 4.1).



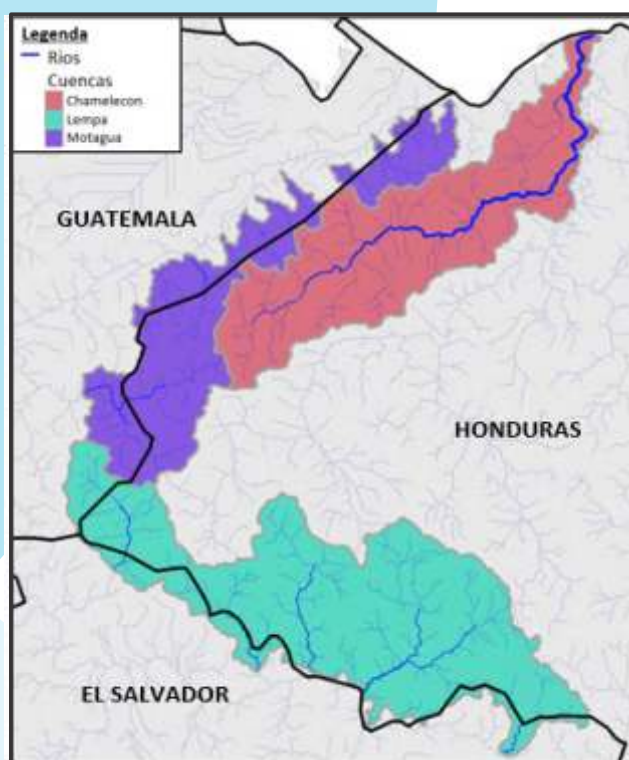


Figura. 4.1. Ubicación de las cuencas simuladas.

4.3. DATOS USADOS PARA EL DESARROLLO DEL ESCENARIO LÍNEA BASE

4.3.1. Clima

Similarmente al proceso usado para la caracterización del clima en la cuenca Ulúa (ver sección 3.3.1), en estas tres cuencas también se utilizaron fuentes de datos externas para representar las condiciones climáticas históricas. Se descargó información meteorológica de la base de datos de la NASA-POWER para un período de 25 años entre 1992 y 2017. Una vez recopilados, los datos climáticos se interpolaron espacialmente para proporcionar series temporales diarias de precipitación y temperatura para cada cuenca. La Figura 4.2 muestra la distribución espacial de la precipitación y temperatura media anual para el área de estudio; los límites de la cuenca se muestran en gris claro y las fronteras nacionales se muestran en negro.

En Honduras, la orientación de la zona montañosa que comprende el parteaguas continental juega un rol importante en el régimen de precipitación, estableciendo diferencias bien marcadas entre el litoral Caribe, la región inter-montaña y el sur del país. En la Figura 4.2 se puede observar que las cuencas pertenecientes a la vertiente del Atlántico, como la cuenca Chamelecón y Motagua, presentan mayor precipitación anual con promedios de hasta 1,384 mm y 1,314 mm, respectivamente, mientras que la cuenca Lempa, perteneciente a la vertiente del Pacífico, presenta precipitaciones promedio anuales de 1,097 mm. Esta distribución

desigual de la precipitación ocasiona que algunas zonas se vean impactadas por las sequias y otras por las inundaciones. En cuanto a la temperatura media de las cuencas, se observa que hay cierta variabilidad entre las partes bajas y altas de las cuencas, siendo las partes bajas donde se registran las temperaturas máximas medias de 26°C.

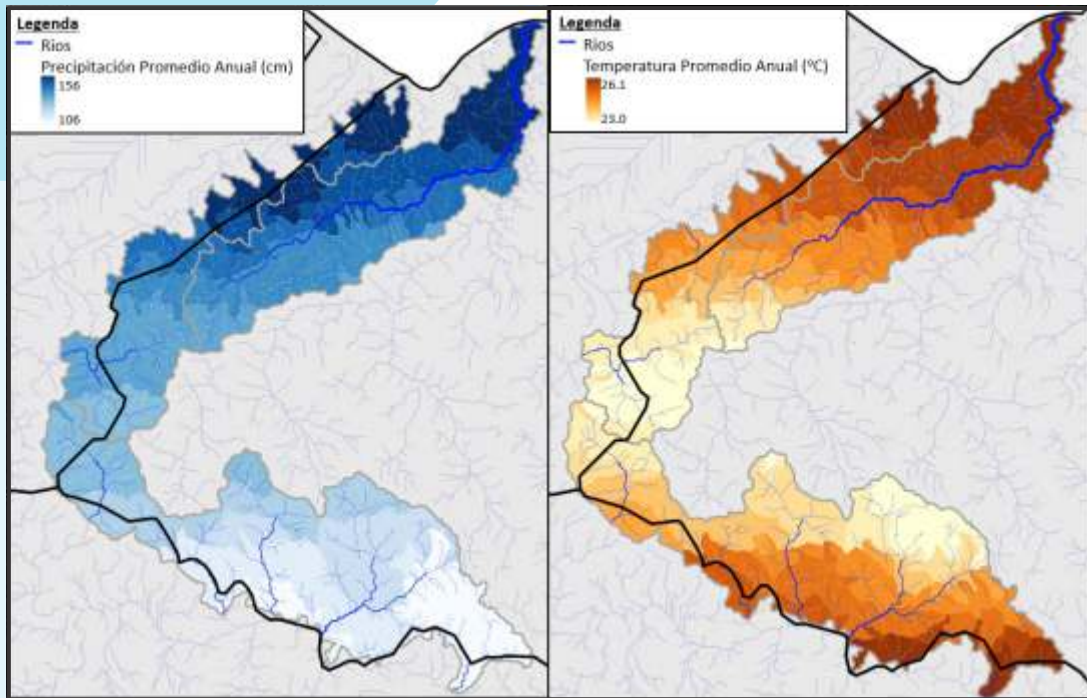


Figura. 4.2. Precipitación promedio anual (izquierda) y temperatura (derecha) para el área de estudio.

4.4. DISPONIBILIDAD HÍDRICA ACTUAL

HydroBID se ejecutó para estimar la disponibilidad hídrica natural de las tres cuencas utilizando parámetros del modelo estimados en la calibración realizada en la cuenca Ulúa (ver sección 3.4.2). El flujo diario de agua se estimó para cada una de las 580 cuencas del área de estudio desde el 1 de Enero de 1992 hasta el 31 de Diciembre de 2017. El primer año de resultados se descartó como parte del proceso de "calentamiento" del modelo HydroBID. El caudal unitario promedio anual generado en cada una de las cuencas simuladas se muestra en la Figura 4.3, donde las áreas en púrpura oscuro generan más flujo en promedio. Los valores se muestran como el flujo medio anual en volumen (metros cúbicos) dividido por el área de captación (metros cuadrados) y convertido a centímetros para permitir la comparación directa del rendimiento del agua en cuencas de diferentes tamaños. El flujo generado se estima como la suma de la escorrentía y el flujo base que contribuye al flujo superficial.

Las subcuencas en la parte norte del área de estudio en los ríos Motagua y Chamelecón generan la mayor cantidad de flujo en relación con las subcuencas de Lempa. Esto se debe en gran medida a la alta precipitación de la zona (Figura 4.2). Otros factores que influyen en la generación del flujo incluyen la cobertura del suelo con áreas vegetativas que extraen agua a través de la evapotranspiración, y las condiciones del suelo que afectan la filtración a la recarga de aguas subterráneas profundas. El caudal unitario promedio anual para la cuenca Chamelecón y para las cuencas de Lempa y Motagua ubicadas dentro del territorio de Honduras es de 85.3 cm, 48.3 cm, y 73.3 cm, lo que equivale a una aportación de agua de 3,774 Mm³, 3,092 Mm³, y 2,403 Mm³, respectivamente.

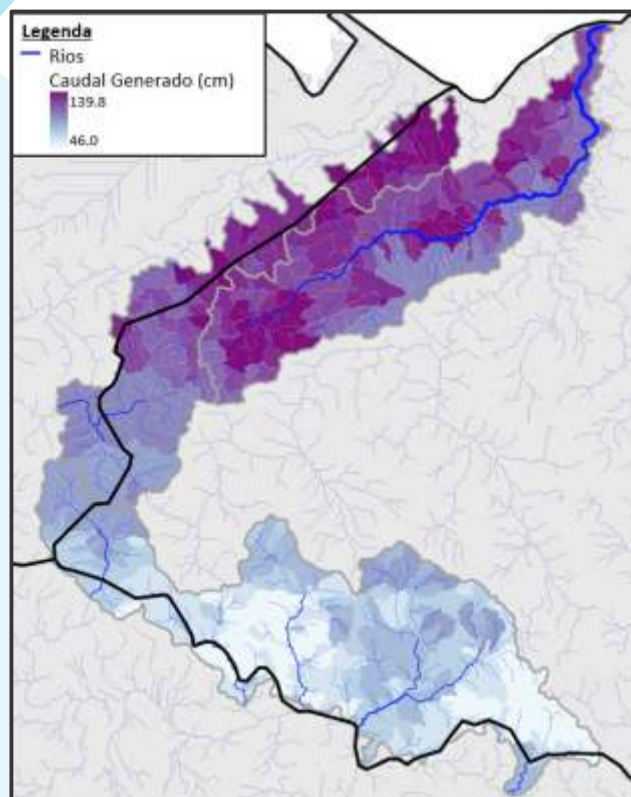


Figura. 4.3. Caudal unitario promedio anual generado normalizado por área (cm).

Las variaciones de un año a otro en la disponibilidad de agua juegan un papel importante en el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos en la mayoría de las regiones. La distribución espacial de los coeficientes de variación (CV) de los flujos anuales se muestran en la Figura 4.4. El CV representa la diferencia esperada en la disponibilidad de agua del flujo promedio en un año determinado. En otras palabras, este coeficiente es la relación entre la desviación estándar de los flujos anuales y el flujo anual promedio. Los valores bajos de CV (por debajo de 0.5) representan áreas que tienen una baja variabilidad interanual en el caudal generado.

Por lo tanto, el rendimiento hídrico en la parte alta de la cuenca Chamelecón y en la mayor parte de Motagua es relativamente estable y no se espera que cambie drásticamente de un año a otro. Por el contrario, los valores de CV muy altos en las cuencas hidrográficas del norte de Chamelecón y la parte Este de Lempa sugieren que las cuencas en esta región están más sujetas a cambios interanuales en la disponibilidad de agua y, por lo tanto, son más vulnerables a las sequías y a años extremadamente húmedos.

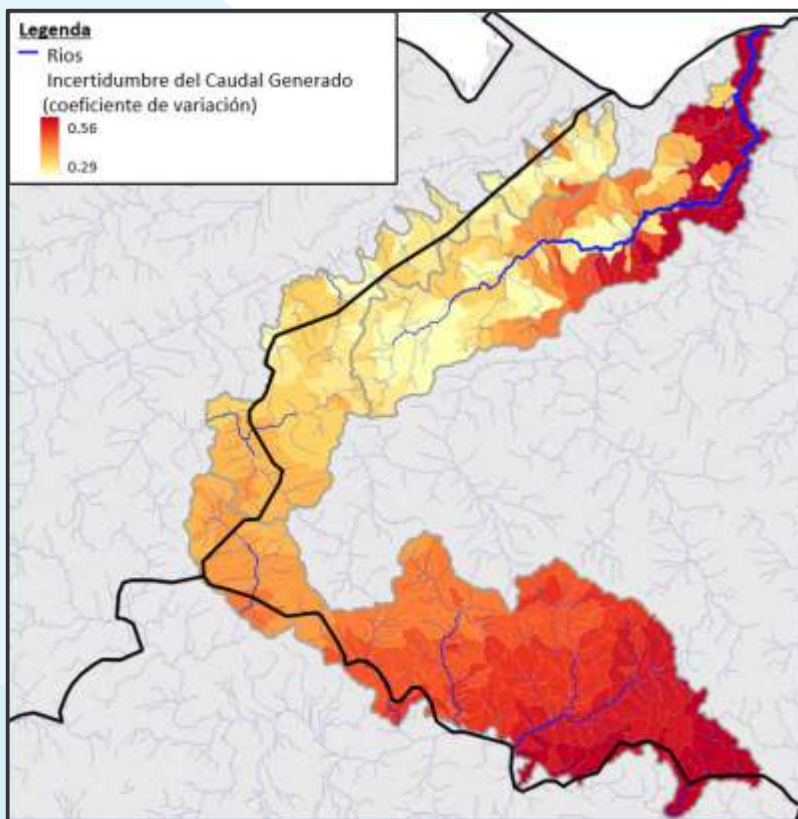


Figura. 4.4. Coeficiente de variación en la generación de flujo anual promedio.

4.5. IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA BAJO UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

La modelación de escenarios climáticos futuros es una de las aplicaciones más comunes de HydroBID para informar la planificación de los recursos hídricos a largo plazo. Para este estudio de caso, se utilizó el escenario RCP8.5 para implementar cambios mensuales en la temperatura y precipitación estimadas para 2030, que en general muestran menos lluvia y temperaturas más altas durante todos los meses (ver sección 2.6.1). Se aplicó el mismo escenario climático en toda el área de modelación, sin embargo, el impacto en la generación del flujo promedio anual varía significativamente, como se muestra en el mapa del lado izquierdo de la Figura 4.5, (las áreas en rojo oscuro ven la mayor magnitud de cambio). En términos generales, el volumen de agua promedio anual aportado se reduciría en un 4.2%, 6.9% y 5.3%, respectivamente para las cuencas Chamelecón, Lempa y Motagua bajo un escenario de cambio climático.

Adicionalmente, el cambio en la variabilidad interanual (expresada como el CV de la generación de flujo unitario anual promedio) se presenta en el mapa del lado derecho de la Figura 4.5. La variabilidad espacial del impacto del cambio climático puede estar potencialmente influenciado por el uso de la tierra, con áreas con vegetación que aumentan la evapotranspiración al tener temperaturas más elevadas y disminución en las precipitaciones. El flujo en las zonas urbanas se reducirá por la disminución de las precipitaciones, pero se verá menos afectado por el aumento de la temperatura debido a las bajas tasas de evapotranspiración. El impacto del cambio climático en las cuencas simuladas presenta patrones espaciales similares tanto para la generación de caudal como para la variabilidad interanual. Las áreas en rojo oscuro en la Figura 4.5, como el noreste de Chamelecón y el oeste de Lempa enfrentarían tasas más bajas de generación de flujo y tasas más altas de variación en el volumen de agua generado de un año a otro. Por el contrario, las áreas en amarillo como la parte alta de Chamelecón y el norte de Motagua tendrían relativamente menos cambios.

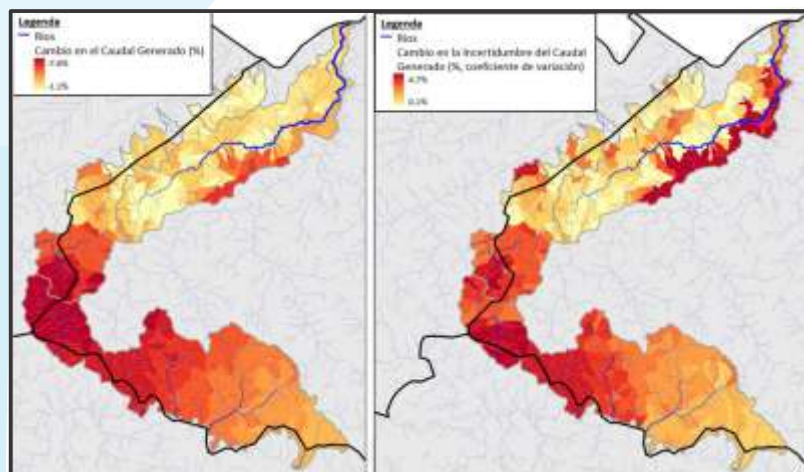


Figura. 4.5. Cambio porcentual en la generación del caudal promedio anual (izquierda) y en la variación interanual (derecha).

5. CONCLUSIONES



A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes del análisis de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Choluteca, Ulúa, Chamelecón, Lempa y Motagua de Honduras.

5.1. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHOLUTECA

El diagnóstico de las condiciones actuales en las cuencas de abastecimiento de agua para la ciudad de Tegucigalpa (parte alta del río Choluteca), consideró una hidrología histórica (entre el periodo del 2009 al 2017) y las demandas agrícolas y municipales para el año 2020. Adicionalmente, para simular de una manera más realista el suministro de agua a la ciudad en tiempos de sequías, se tuvieron en cuenta las restricciones aplicadas a la demanda de agua que actualmente se aplican en Tegucigalpa para regular el suministro en tiempos secos; en este análisis, se asumió que las restricciones se activan cuando el almacenamiento total cae por debajo del 30%. Los resultados de este escenario de línea base muestran que:

- El volumen promedio anual de agua disponible en todas las fuentes de abastecimiento es de 163 Mm³. El 63% del agua disponible anualmente se produce en las cuencas de Concepción (60 Mm³) y Guacerique (43 Mm³).
- El volumen promedio anual de agua demandada en la cuenca se estima de 157 Mm³, donde la demanda en Tegucigalpa representa el 69%, las demandas agrícolas el 30% y las demandas municipales en las cuencas de abastecimiento solo el 1%.
- El agua suministrada a los diferentes usuarios en la cuenca está influenciada por las restricciones para el manejo de sequías impuestas a la demanda de agua de Tegucigalpa, la capacidad de la infraestructura hídrica, y las prioridades de asignación del agua modeladas.
- El promedio anual de agua suministrado en la cuenca es de 114 Mm³, donde 78 Mm³ son suministrados para la ciudad de Tegucigalpa y 34 Mm³ para las actividades agrícolas en las cuencas de abastecimiento. El suministro para Tegucigalpa varía considerablemente durante el período de simulación; durante años húmedos el suministro alcanza a ser un 30% más que el promedio anual, mientras que en el año más crítico el suministro es un 16% menos que el promedio anual.
- A pesar de las restricciones aplicadas a la demanda de Tegucigalpa en periodos críticos, los resultados muestran un déficit promedio anual de agua para la cuenca de 43 Mm³. El 69% de este déficit se presenta en Tegucigalpa y el 30% en las actividades agrícolas. Los años donde se disminuye la demanda por las restricciones aplicadas en época de sequía, es donde se presentan menores deficiencias.

- El almacenamiento promedio mensual simulado en el embalse Concepción fue de 18 Mm³, lo que corresponde al 51% de su capacidad máxima. Solo durante el período entre mediados del 2010 hasta comienzos del 2013, se observa que el embalse alcanza casi su capacidad máxima. En el caso del embalse Laureles, el almacenamiento promedio mensual simulado fue de 3.2 Mm³, lo que corresponde al 29% de su capacidad máxima.
- Observamos que los caudales simulados en la planta de tratamiento de Picacho, que equivalen a su producción histórica, son menores a la capacidad nominal de la planta. Esto se puede deber a las limitaciones en el sistema de captación. Por lo tanto, consideramos importante que en una segunda fase del estudio se tengan en cuenta las limitaciones físicas de las tomas de captación del sistema de acueducto de Picacho.
- Debido a las limitaciones en la infraestructura del sistema de abastecimiento, un volumen promedio de 66 Mm³ de agua producida en las fuentes de agua no es capturado para satisfacer la demanda de agua en Tegucigalpa. Del promedio anual de agua no capturada, el 54% de esta agua se produce en las cuencas de Sabacuante y Tatumbula. La captura y uso de estos volúmenes no capturados se podría lograr aumentando el almacenamiento actual de los embalses Concepción y Laureles o construyendo nuevos embalses, y el aumento de la capacidad de las plantas de tratamiento y del sistema de distribución para que el agua pueda ser llevada y suministrada a las diferentes partes de la ciudad.

El análisis de la disponibilidad y déficit hídrico futuro en esta cuenca incluyó las proyecciones climáticas y las demandas estimadas en Tegucigalpa para un horizonte a corto plazo (2030s). Adicionalmente, se ajustaron las restricciones aplicadas a la demanda de Tegucigalpa para regular el suministro en tiempos secos, asumiendo que la población necesitará un volumen mínimo de agua para satisfacer sus necesidades básicas. Los resultados de este escenario futuro muestran que:

- En esta cuenca, los resultados muestran una tendencia a la disminución del potencial hídrico en el escenario influenciado por el cambio climático. El volumen promedio anual de agua disponible en todas las fuentes de abastecimiento para Tegucigalpa se disminuiría en un 21% con respecto al escenario de línea base. Las reducciones más grandes en la oferta hídrica a nivel mensual podrían estar entre el 26% y el 31%.
- La reducción en el suministro anual promedio para los usuarios de Tegucigalpa podría alcanzar un 23% de la línea base para el 2030 si las proyecciones climáticas se materializan. Este resultado representa una situación de mayor estrés hídrico si se tiene en cuenta que la demanda es mayor y las restricciones en la demanda de agua para manejar el suministro en época de sequía se mantienen al mismo nivel, proporcional a la población, que en el escenario línea base.

- Las deficiencias promedio mensuales proyectadas para la ciudad son de 5 Mm³, representando un aumento del 116% con respecto a las condiciones actuales en la línea base. Las deficiencias en los meses de Febrero, Marzo y Octubre pudieran llegar a ser 4 veces más grandes bajo un escenario de cambio climático.
- El volumen promedio mensual almacenado en el embalse Concepción se reduciría en un 13% bajo las proyecciones climáticas para el 2030, haciendo que su volumen de almacenamiento sea 1/3 de su capacidad máxima. El sistema de Laureles se vería aún más afectado por el cambio climático, con reducciones en el volumen promedio mensual almacenado del 15%, representando un almacenamiento de ¼ de su capacidad máxima.
- Inclusive con la disminución de la oferta hídrica en este escenario, en el caso que no se realicen mejoras en la infraestructura del sistema de almacenamiento, el promedio anual de agua generada en las fuentes que no es capturada por el sistema podría ser 55 Mm³, de la cual el 61% se genera en las cuencas Sabacuante y Tatumbla.

El análisis de las diferentes alternativas consideradas en este Estudio para reducir la escasez hídrica en Tegucigalpa muestra que:

- Un embalse ubicado en la cuenca Sabacuante tendría el mayor potencial para capturar y regular el agua que no puede ser utilizada bajo las condiciones actuales, y mejorar el abastecimiento a la ciudad de Tegucigalpa.
- Para aprovechar el potencial hídrico en la cuenca Sabacuante y la regulación del embalse propuesto, sería necesario explorar la expansión de la conducción y la capacidad de la planta de tratamiento de Miraflores alrededor de 1,500 l/s.
- Con el embalse en la cuenca Sabacuante y la expansión de la planta de Miraflores simuladas, el promedio anual de agua no capturada en esta cuenca (y en la cuenca Tatumbla) para el suministro de Tegucigalpa se reduciría en un 98% aproximadamente.
- Teniendo en cuenta además la expansión del embalse Laureles y el incremento en la capacidad de producción y conducción de la planta de tratamiento, el suministro promedio anual a Tegucigalpa es de aproximadamente de 97 Mm³. Aunque con la incorporación del nuevo embalse en Sabacuante y las mejoras en las plantas de tratamiento aún no se pueden cumplir la totalidad de las demandas estimadas en Tegucigalpa para el 2030, el incremento del suministro es substancial y equivale a aproximadamente el 24% más comparado con el suministro bajo las condiciones actuales y al 61% más bajo un escenario de cambio climático sin la implementación de estos proyectos. Cabe anotar que el análisis del beneficio de estos proyectos se realizó sin restricciones en las demandas en Tegucigalpa en época de sequía, así que, si las mejoras propuestas fueran realizadas, las deficiencias máximas en los años críticos podrían ser aminoradas y la confiabilidad del sistema podría aumentar con la

implementación de restricciones.

- Con los nuevos proyectos simulados, la distribución porcentual del abastecimiento a Tegucigalpa desde las diferentes fuentes se modificaría, reduciendo la dependencia del embalse de Concepción de aproximadamente 72% en promedio anual en la línea base al 45%, e incrementando el abastecimiento marginal a Miraflores (menos del 2%) en la línea base al 36% en promedio anual.
- Adicionalmente, si los proyectos nuevos llegaran a implementarse, el promedio de agua no capturada por año en toda la Cuenca se reduciría en un 70% en comparación a las condiciones actuales en la línea base.

5.2. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS EN LA CUENCA DEL RÍO ULÚA

El análisis en la cuenca del río Ulúa se enfocó en tres subcuencas principales: las subcuencas de los embalses Yojoa y Morazán y la porción Oeste de la cuenca hasta donde aproximadamente se encuentra ubicada la municipalidad de Chinda (referida como la subcuenca de Chinda). Estas tres subcuencas cubren el 81% del área total de la cuenca Ulúa y son las más relevantes para el sector agrícola e hidroeléctrico. El análisis de las condiciones de referencia en las subcuencas consideró una hidrología histórica (entre el periodo del 2001 al 2014) y las demandas agrícolas y poblacionales para el año 2020. La incertidumbre en el análisis de disponibilidad hídrica en estas subcuencas es mayor que en la cuenca del río Choluteca, especialmente en la subcuenca de Yojoa, y consideramos que los resultados deben ser considerados preliminares y primordialmente enfocados a la definición de estudios más detallados. Los resultados de las condiciones de línea base en las subcuencas simuladas muestran que:

- La oferta hídrica anual promedio simulada es del orden de 12.93 Mm³ con un promedio mensual de aproximadamente 1 Mm³. De estas tres subcuencas, la mayor contribución promedio a la oferta proviene de la cuenca Morazán, con 6.58 Mm³ (ffi51%), seguida por la cuenca Chinda con 6.13 Mm³ (ffi47%) y la cuenca Yojoa con aproximadamente el 2%.
- La demanda agrícola en las subcuencas simuladas representa el 56% de la demanda total, y la mayoría está ubicada en la subcuenca de Morazán, donde se encuentran los distritos de riego identificados por la SAG. El volumen promedio mensual del total de agua demandada en las subcuencas simuladas es de 3.97 Mm³, con la mayoría de la demanda entre los meses de Diciembre a Abril.
- Aunque hay algunas limitaciones para satisfacer la demanda actual asumida en la subcuenca de Chinda, el agua que no es consumida o almacenada y que fluye hacia la

parte baja de la cuenca Ulúa, da un indicativo del potencial para abastecer demandas en la cuenca baja o de trasvase para abastecer Tegucigalpa. La subcuenca de Chinda presenta el mayor volumen de agua promedio anual no capturado, que equivale a 6.10 Mm³.

- Con excepción de los resultados de la subcuenca Chinda, la incertidumbre de los resultados e inconsistencias en las otras subcuencas se consideran muy altos para sacar conclusiones numéricas en este análisis. Estos resultados deben ser entendidos en el contexto de la incertidumbre que se tiene en las demandas actuales en las subcuencas y la simulación de escorrentía usando parámetros calibrados únicamente de la subcuenca Chinda.
 - Los resultados muestran deficiencias en el suministro de la demanda actual. El suministro anual de las demandas muestra la mayor magnitud de deficiencia promedio anual en las demandas agrícolas de la subcuenca Morazán. Es recomendado revisar esta condición de suministro con una calibración más detallada del modelo hidrológico e incluyendo la operación del embalse Morazán.
 - Los resultados simulados en la subcuenca Yojoa, muestran inconsistencias entre la oferta hídrica, las demandas asumidas, los trasvases, el almacenamiento y la producción hidroeléctrica. Esta subcuenca pareciera tener mayor potencial hídrico del que se está simulando. Se recomienda un análisis más detallado con información más precisa de las operaciones de almacenamiento, suministro regulado y trasvases.
 - La subcuenca Yojoa almacena en promedio 1,349 Mm³ al mes, lo que es un volumen considerable para el potencial de abastecimiento futuro. Esta subcuenca cuenta con trasvases existentes de la subcuenca Morazán, que aumentan su confiabilidad. Por todos los indicativos encontrados en esta subcuenca, consideramos que los resultados de este estudio deberán ser refinados para entender el verdadero potencial de esta subcuenca.
 - La ubicación y la flexibilidad proporcionada por el tamaño del almacenamiento de la subcuenca Morazán indican un buen potencial hídrico para el suministro de demandas futuras en la cuenca baja de río Ulúa y a Tegucigalpa. Será necesario revisar el potencial de disponibilidad hídrica con datos detallados de operación del embalse y la demanda agrícola.

El análisis de la disponibilidad y déficit hídrico futuro para las tres subcuencas simuladas tuvo en cuenta un escenario de cambio climático para el 2030 y demandas agrícolas y poblacionales actuales. Los resultados de este análisis muestran que:

- Para las condiciones simuladas se observa una disminución general de la oferta hídrica en las subcuencas con relación a la simulación de línea base, con una reducción de aproximadamente el 4% en el escenario de cambio climático. El efecto del cambio climático no es uniforme, en algunos meses el promedio disminuye, como es el caso de Agosto en el que disminuye 16%, y en otros meses aumenta, como es el caso de Mayo que presenta el máximo aumento de aproximadamente el 11%.
- Con base en la subcuenca de Chinda, los resultados indican un cambio general en las deficiencias relativamente pequeño con relación al escenario de línea base, debido al cambio positivo en unos meses y negativos en otros.
- La disponibilidad hídrica con el efecto de cambio climático simulado en las subcuencas muestra un impacto moderado comparada con la línea base. Esto es debido a que los cambios en el clima muestran incremento y disminución de la precipitación mensual en diferentes meses y la demanda simulada es la misma que en la línea base.
- Debido a la forma como se simula la distribución de agua en las subcuencas, suministrando el agua disponible a las demandas, los mayores cambios del balance hídrico se observan en el agua no capturada. En el caso de la subcuenca Chinda, la reducción del agua no capturada/usada en el escenario de cambio climático es de aproximadamente 8% con relación al de la línea base.

5.3. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS EN LAS CUENCAS DEL RÍO CHAMELECÓN, LEMPA Y MOTAGUA

El análisis de en las cuencas Chamelecón, Lempa y Motagua estuvo enfocada a evaluar la distribución espacial de la disponibilidad hídrica natural histórica (para un periodo entre 1993 - 2017), y a estimar los efectos del cambio climático para la década del 2030. El análisis en estas cuencas no contempló aspectos como demandas o extracciones de agua para diferentes usos, como tampoco infraestructura de regulación hídrica, sin embargo, consideramos que es un gran paso para tener estimaciones actuales de la disponibilidad de agua que puedan usarse para informar los planes de cuencas hidrográficas, decisiones de asignación de agua y para desarrollar políticas efectivas. Adicionalmente, el área de estudio incluyó toda la cuenca del Chamelecón, y las porciones de las cuencas de Lempa y Motagua dentro de Honduras.

El análisis de la disponibilidad hídrica natural (entendida como la diferencia entre la precipitación y los procesos de evapotranspiración e infiltración en las cuencas), muestra que:

- Las cuencas Motagua y Chamelecón generan mayor cantidad de flujo en relación con la cuenca de Lempa. Esto se debe en gran medida a que estas cuencas reciben mayor precipitación anualmente. Sin embargo, otros factores que influyen en la generación del

flujo incluyen la cobertura del suelo con áreas vegetativas que extraen agua a través de la evapotranspiración, y las condiciones del suelo que afectan la filtración a la recarga de aguas subterráneas profundas.

- El rendimiento hídrico en la parte alta de la cuenca Chamelecón y en la mayor parte de Motagua es relativamente estable y no se espera que cambie drásticamente de un año a otro. Por el contrario, en las subcuencas del norte de Chamelecón y en la parte Este de Lempa están más sujetas a cambios interanuales en la disponibilidad de agua y, por lo tanto, son más vulnerables a las sequías y a años extremadamente húmedos.

El efecto del cambio climático en la disponibilidad hídrica en estas cuencas muestra que:

- En términos generales, el volumen de agua promedio anual aportado se reduciría en un 4.2%, 6.9% y 5.3% con respecto al escenario línea base, respectivamente en las cuencas Chamelecón, Lempa y Motagua.
- El impacto del cambio climático en las cuencas simuladas presenta patrones espaciales similares tanto para la generación de caudal como para la variabilidad interanual. Las áreas al noreste del río Chamelecón y la zona oeste de Lempa enfrentarían tasas más bajas de generación de flujo y tasas más altas de variación en el volumen de agua producido de un año a otro. Por el contrario, la parte alta de la cuenca Chamelecón y el norte de Motagua tendrían relativamente menos cambios.

5.4. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS CUENCAS SIMULADAS

A continuación, resumimos las áreas en las que consideramos que los resultados presentados en este estudio podrían mejorarse:

- Aumentar el número y la densidad de las estaciones climáticas y de caudal para representar diferentes regiones hidro-meteorológicas.
- Validar los datos climáticos satelitales utilizando factores de corrección derivados de la comparación con los datos registrados en campo.
- Aumentar el número de puntos de calibración para tener una mejor representación de la variabilidad hidrológica en las cuencas y disminuir la incertidumbre de los modelos.
- Regionalizar los parámetros de calibración de acuerdo con las regiones climáticas del país.
- Modelar los efectos del cambio climático a mediano y largo plazo y teniendo en cuenta la variabilidad espacial de las proyecciones.

- Analizar el efecto de otros proyectos planeados para mejorar el suministro de agua en Tegucigalpa, como por ejemplo el segundo embalse en la cuenca del río Guacerique (Quebra Monte modificado).
- Refinar las condiciones de suministro en las subcuencas Yojoa y Morazán y reevaluar su potencial hídrico con una calibración más detallada del modelo hidrológico e incluyendo información más detallada de la operación de cada uno de los embalses y trasvases.
- Realizar un balance integral del agua en las cuencas Chamelecón, Lempa y Motagua, considerando tanto la producción natural de agua como las demandas, concesiones e infraestructura hídrica en las cuencas.



REFERENCIAS

- Coello-Balthasar, Z., Phumpiu, P., Balfors, B. y Gustafsson, J.E. 2011. Assessment of causes leading to an insufficient water supply in Tegucigalpa, Honduras. *Water Resources Management*. 145, 27-37,
- Corrales, J., Triana, E., Moreda, M. y Van Houtven, G. 2019. Nexus Analysis for Water Security Under Severe Water Scarcity in Brasilia (DF) Through the Use of a Hydro-Economic Model: A Case Study in the Upper Descoberto Basin. RTI International. Research Triangle Park, NC.
- Haith, D.A., and Shoemaker, L.L. 1987. Generalized Watershed Loading Functions for Stream Flow Nutrients. *Water Resources Bulletin*, 23(3), 471-478.
- Navarro-Racines, C., Monserrate, F., Llanos-Herrera, L, Obando, D. Córdoba, J. 2018. Desarrollo de los Escenarios Climáticos de Honduras y Módulo Académico de Capacitación. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); Dirección Nacional de Cambio Climático de MiAmbiente. 140p.
- Monserrate, F., Valencia, J., Espinosa, H., Leveron, S., Navarro, C., Llanos, L., y Quintero, M. 2018. Sistema de apoyo a la planificación hídrica local en el Occidente de Honduras. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Dirección General de Recursos Hídricos (DGRH) del Ministerio de Ambiente (MiAmbiente).
- Moreda, F., Miralles-Wilhem, F., and Munoz Castillo, R. 2014. HydroBID: An Integrated System for Modeling Impacts of Climate Change on Water Resources. Part 2. IDB Technical Note-529. Inter-American Development Bank, Washington, DC.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L.. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Procter A., Díaz Briones A., Vignola R., McDaniels T. 2013. Using Forests to Enhance Resilience to Climate Change: Case Study of the role of forests in contributing to adaptation of drinking water system in Tegucigalpa Honduras. Bogor Indonesia: Centre for International Forestry Research. 108 pp.
- Stackouse, P.W., Zhang, T., Wesrberg, D., Barnett, A.J., Bristow, T., Macpherson, B., and Hoell, J.M. (2018). POWER Release 8 (with GIS Applications) Methodology.
- U.S. Department of Agriculture (USDA). 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55. Washington, DC.
- Vignolia, R., Procter, A., Diaz Briones, A., McDaniels, T., Locatelli, B., Rafanoharana, S., y Chandrasekharan Behr, D. 2015. How forest enhance resilience to climate change: The case of drinking water supply in Tegucigalpa. *PROFOR*, 1(1), 1-4.



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

