



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Análisis de las Cuencas que alimentan los acueductos de la ciudad de Tegucigalpa y las cuencas del “Arco Seco” en Honduras: Evaluación Económica

Autores:

Efrain Rueda

Kleber Machado

Serena Emanuel

Mauro Nalesso

1. INTRODUCCIÓN



De los 1,2 millones de habitantes que tiene Tegucigalpa, se registran sólo 160.000 usuarios en el Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados - SANAA (62% de la población), los demás habitantes se abastecen principalmente de pozos y de carros cisterna (sin calidad). El SANAA produce 1,7 m³/s de sus cuatro fuentes principales (Picacho, Los Laureles, Concepción y Miraflores), mientras que la demanda por los servicios es de aproximadamente 4 m³/s en temporada de estiaje, resultando en severos recortes del servicio. En promedio, los usuarios reciben agua una vez cada tres días por 8 horas, aunque en algunas zonas altas reciben hasta 2 veces cada 15 días, convirtiéndola en la capital con mayor índice de intermitencia de Latinoamérica. Según el plan maestro del 2001 (desactualizado), la ciudad debió incorporar dos fuentes nuevas de abastecimiento antes del 2025 para mantenerse al ritmo de la demanda. Sin embargo, la última fuente que se incorporó al suministro de la ciudad fue la represa y planta de tratamiento de Concepción en 1992.

Las cuencas abastecedoras de agua de la ciudad sufren un nivel significativo de deterioro, por el crecimiento de la mancha urbana, la deforestación y por conflictos en el uso del territorio (Lotti/ESA, 2004). El Consejo Nacional de Agua Potable y Saneamiento (CONASA) a través de un análisis multicriterio de cuencas del país determinó que las dos primeras cuencas que deben ser intervenidas a nivel nacional son Chamelecón y el Choluteca, en San Pedro Sula y Tegucigalpa. De acuerdo con González (2011), la falta de acceso A&S hace que Tegucigalpa sufra pérdidas estimadas en US\$181 millones anuales, equivalentes al 1,2% del PIB, afectando rubros como la manufactura por US\$54 millones y la construcción por US\$78 millones.

En ese sentido y bajo ese contexto, las tomas de decisiones sobre la asignación y uso del recurso hídrico requieren no solo de elementos de juicio técnicos (relativos a la cantidad del recurso hídrico), sino también elementos de juicio socioeconómicos (costos y beneficios, reglas de optimización, entre otros).

Una Modelación hidro-económica de una cuenca se refiere a la integración del sistema económico y de los distintos sistemas usuarios del recurso hídrico (agua). Por medio de la integración de estos sistemas, el análisis de la economía de escala puede ayudar a las preguntas y problemas relacionados con el manejo efectivo y eficiente de la asignación de uso de los recursos hídricos (cantidad) en una cuenca y entre diferentes actividades económicas (productivas, ambientales y consumo humano). En particular, tal análisis se puede utilizar para examinar los intercambios económicos relacionados con una gran variedad de decisiones de gestión de uso de agua, tales como el cálculo de los costos y los beneficios de inversiones y diseños en infraestructura de agua alternativos.

Para lograr lo anterior, en el presente estudio se desarrolló una herramienta de análisis hidro-económico que específicamente usa información de caudales generada por el software HydroBID, realiza los balances oferta demanda en cada uno de los puntos donde se utiliza agua para actividades socioeconómicas (que llamaremos nodos de demanda), calcula la cantidad de agua utilizada, y determina los racionamientos dándole valor económico a estos dos aspectos (uso y racionamiento) utilizando la infraestructura y las demandas existentes al año 2020.

Adicionalmente, se elabora el mismo diagnóstico (año 2020) con un escenario de cambio climático al año 2030 para determinar los posibles racionamientos y sus valores económicos. Este mismo ejercicio se realiza para las demandas de Tegucigalpa del año 2030.

Esta herramienta permite conocer los costos sociales y económicos del impacto del cambio climático y permitirá elaborar la evaluación económica (análisis costo beneficio) de proyectos o medidas que tengan como objetivo mitigar o adaptarse a los efectos del cambio climático.



2. OBJETIVO DE ESTUDIO



Los objetivos del estudio son, preparar un estudio complementario al estudio “Modelación Hidro-económica de las Cuencas que alimentan los acueductos de la ciudad de Tegucigalpa y las cuencas del Arco Seco en Honduras” para Tegucigalpa (Honduras) y un estudio para el Corredor Seco en Honduras aplicando herramientas hidro-económicas para evaluar el costo económico que tiene no disponer de agua para usos productivos, analizar escenarios de disponibilidad de agua y evaluar planes de inversión de corto y mediano plazo (priorización y optimización de las inversiones) y de proyectos específicos diseñados para garantizar disponibilidad hídrica



3. METODOLOGÍA



Para lograr lo anterior, es necesario implementar una herramienta de análisis hidro-económico que específicamente utilice información de caudales generada por la herramienta de modelaje HydroBID, la cual será necesaria para realizar un análisis económico con el propósito de diagnosticar y calcular el uso económico de agua superficial en una cuenca específica, analizar el costo-beneficio de infraestructura hídrica necesaria para reducir/prevenir probables racionamientos (según modelo de caudales) y la optimización de los análisis para la asignación de agua y las decisiones de gestión.

Para alcanzar estos objetivos se confrontará las demandas de los diferentes sectores a la disponibilidad del recurso hídrico. Como ésta no es determinística, es necesario utilizar hidrología estocástica o probabilística para determinar los promedios del uso del agua en cada punto donde se utiliza y las probabilidades de que las demandas del año en estudio sean satisfechas. Las metodologías existentes para determinar estas probabilidades son a- la generación de series sintéticas de caudales a lo largo y ancho de toda la cuenca utilizando el método de Montecarlo¹ (implicaría tener un modelo que genere caudales sintéticos en las distintas subcuencas necesarias para el análisis) utilizando el modelo de Matalas² (o similar) y b- utilizar la serie histórica reconstruida con el modelo HydroBID (9 años de caudales superficiales en el área metropolitana de Tegucigalpa y 14 años en las cuncas restantes del Arco Seco) teniendo en cuenta que cada año tiene la misma probabilidad de ocurrencia y es igual a 1/9 (11% de probabilidad de ocurrencia) y 1/14 (. Este segundo método requiere de mucho menos información y menos capacidad computacional.

I MODELO DE SIMULACIÓN

La simulación hidrológica de la cuenca de los ríos que alimentan los acueductos de Tegucigalpa se realizó utilizando dos herramientas, la primera para generar los caudales a partir de la serie de lluvias utilizando el modelo “HydroBID”, y la segunda “WaterALLOC” que realiza los balances oferta demanda utilizando el modelo en cada punto de interés a cuyos resultados se le aplica modelos de beneficios y costos económicos. Los resultados de estos modelos se presentaron en el informe “Análisis de los Recursos Hídricos en Cuencas Prioritarias de Honduras. Casos de Estudio en las Cuencas del Río Choluteca, Ulúa, Chamelecón, Lempa y Motagua”.

II FUNCIONAMIENTO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo recrea cada día el tránsito del agua desde la divisoria de agua hasta llegar al punto de captación. En su recorrido se va entregando el agua en cada nodo que la demanda. Este puede ser una población, una central hidroeléctrica o una toma para distrito de riego. Allí se capta agua hasta copar la capacidad de la demanda. El exceso se transita aguas abajo por el río en cuestión.

¹ Método de Montecarlo: Generación sintética de series estocásticas de caudales. Los caudales aleatorios provienen de una distribución probabilística que la serie histórica de los caudales.

² Matalas N.. 1967. Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology, Water Resources Research 3 (4). pp 937-945.

El agua captada se compara con la demanda y se calcula el racionamiento como la diferencia de la demanda y el agua suministrada. Igualmente se calcula el valor del agua utilizada y el valor de racionamiento si es que este se produce. Cuando el agua transitada llega a un embalse se realiza la operación de embalsamiento o desembalse de acuerdo con la regla de operación, la cual se explica más adelante. Adicionalmente, el agua retorna al cauce del río en caso de desborde de un embalse o en caso de que el nodo que la utilice tenga retornos al río (ej. En las hidroeléctricas luego de su uso retorna el 100%).

El modelo de simulación considera los principales sectores productivos que captan agua de los para sus actividades económicas, correspondientes a los sectores consumo doméstico, hidroeléctrico y agrícola (con riego). Para cada mes, el modelo transita el agua desde aguas arriba (límite de la cuenca en su divisoria de aguas) hacia aguas abajo.



4. TEGUCIGALPA



A partir del diagnóstico presentado en el estudio anterior,³ se proyectó la demanda de agua en la ciudad metropolitana de Tegucigalpa hasta el año 2045, se elaboraron los balances oferta demanda para analizar los posibles proyectos que pueden complementar el sistema actual para disminuir o eliminar los futuros racionamientos del consumo de agua en la ciudad de Tegucigalpa. Como resultados, se obtuvieron la serie de beneficios por cada proyecto. Con esta serie de beneficios se calcularon los indicadores económicos de cada proyecto lo que permitió clasificarlos y elaborar un posible plan de expansión de fuentes hasta el año 2045. A continuación, se detalla el análisis realizado comenzando por la oferta y la demanda utilizadas en el análisis.

Los Nodos y sus Demandas por Agua

En el presente numeral se identifican los nodos o puntos presentes en los ríos en donde se capta agua para su posterior uso, y se resume también las demandas existentes de agua superficial en las cuencas bajo estudio.

Estas demandas se aglutinaron en los nodos de demanda creados para desarrollar un modelo de simulación matemática y poder elaborar los balances oferta demanda por mes. Los nodos de demandas agrícolas agrupan el conjunto de tomas para riego por río, al igual que las demandas para consumo humano.

a. FUENTES: Cuencas que alimentan los acueductos que suministran agua a la ciudad metropolitana de Tegucigalpa y su infraestructura.

La ciudad de Tegucigalpa está alimentada por cuatro sistemas que en total tienen infraestructura para almacenar y distribuir agua por una cantidad de $3,48 \text{ m}^3/\text{seg}$. Sin embargo, en épocas de estiaje solo distribuye una cantidad de $1,7 \text{ m}^3/\text{seg}$. Las cuencas tienen una oferta hídrica natural (agua cruda no regulada) de 163 Mm^3 ($5,17 \text{ m}^3/\text{seg}$) según el estudio “Análisis de los Recursos Hídricos en Cuencas Prioritarias de Honduras” elaborado por RTI para el BID la cual se distribuye entre varios usuarios y mucha de ella se pierde debido a la falta de almacenamiento suficiente. Los cuatro sistemas son: i- el río Concepción cuenta con un embalse de $36,1 \text{ Mm}^3$ que recibe además del río Concepción un transvase del río Ojojona con capacidad de 250 lts y una planta de tratamiento con capacidad de 1.600 lts, ii- el río Guacerique cuenta con un embalse de $10,5 \text{ Mm}^3$ y una planta de tratamiento con capacidad de 720 lts, iii- Sistema El Picacho el cual capta 23 arroyos que nacen en el parque natural La tigre, tiene una capacidad de captación de $2,2 \text{ m}^3/\text{seg}$ y una capacidad de tratamiento de $1,1 \text{ m}^3/\text{seg}$ y iv- sistema Miraflores, la planta tiene una capacidad de tratamiento de 75 lts. En resumen, la infraestructura existente para suplir agua potable en el área metropolitana de Tegucigalpa es:
Los embalses:

³ Modelación Hidro-económica de las Cuencas que alimentan los acueductos de la ciudad de Tegucigalpa y las cuencas del “Arco Seco” en Honduras: Diagnóstico Bajo Condiciones Actuales y Bajo Cambio Climático, BID, Agosto, 2020.

Tabla. 1. Embalses que Alimentan los Acueductos.

Embalse	Capacidad (Mm ³)
Laureles	10,5
Concepción	36,1

Plantas de tratamiento

Tabla. 2. Plantas de tratamiento.

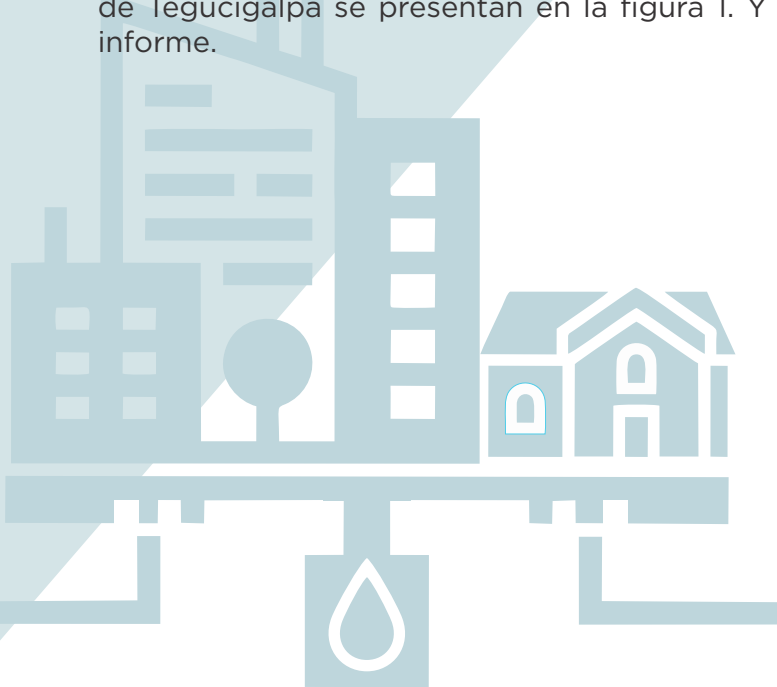
Planta	Capacidad (LTS)
Laureles	720
Concepción	1.600
Picacho	1.100
Miraflores	75

Trasvases

Tabla. 3. Capacidad Trasvases.

Nombre	Capacidad (LTS)
Laureles-Concepción	450
Concepción-Laureles	300
Ojojona-Concepción	250

La localización de las cuencas que alimentan los sistemas, las plantas de tratamiento y la ciudad de Tegucigalpa se presentan en la figura 1. Y su esquematización en la figura 2 al final del informe.



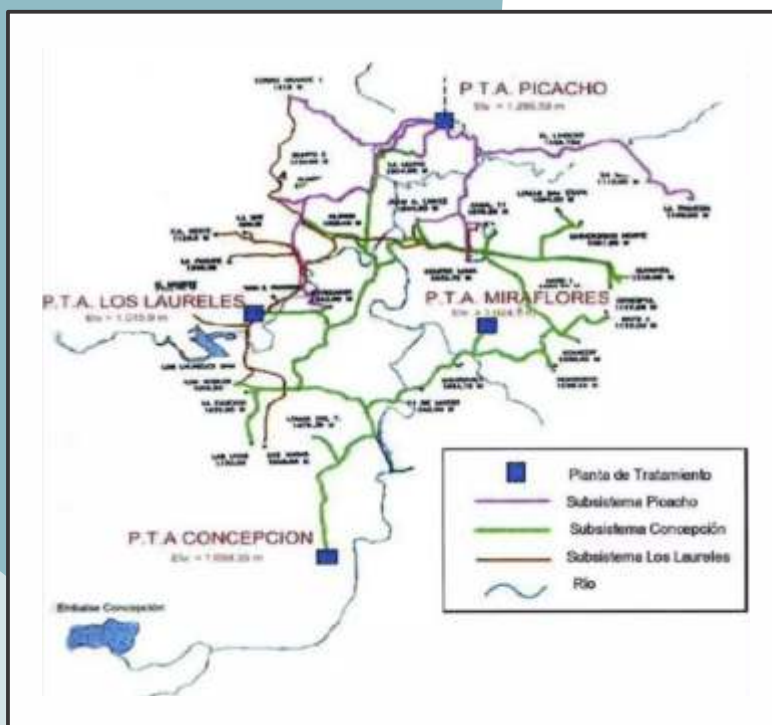


Figura. 1. Mapa de los sistemas de Agua Potable del Área Metropolitana de Tegucigalpa.

b. Demandas

Agrícola

La cuenca de los ríos Concepción y Guacerique, que son la principal fuente de agua para la ciudad metropolitana de Tegucigalpa están altamente intervenidos, especialmente por la agricultura. Según el estudio “Portafolios de Inversión Para la Conservación de Servicios Ecosistémicos, Usando Los Modelos Geoespaciales, en las Subcuencas Guacerique y Concepción⁴”, las cuencas pierden 4,58 MMm³ por uso consuntivo de riego. De acuerdo con el estudio, en la cuenca del río Guacerique se pierden 2,8 MMm³ y en la del río Concepción 1,78 Mm³. Para las simulaciones se utilizaron los valores mensuales de uso consuntivo cuyos valores son:

⁴ Portafolios de Inversión para la Conservación de Servicios Ecosistémicos, usando los Modelos Geoespaciales, en las Subcuencas Guacerique y Concepción, Distrito Central; Jainer Antonio Argeñal Umanzor; Universidad Nacional Autónoma de Honduras; Honduras 2019.

Tabla. 4. Usos Consuntivos Mensuales en las Cuencas Guacerique y Concepción.

Mes	Evapot. mm-mes	Guacerique (m ³ /mes)	Concepción (m ³ /mes)
Uso consunt.	Total Anual	2. 800.000	1.780.000
Enero	111,3	217.387	138.196
Febrero	128,7	251.407	159.823
Marzo	166,5	325.263	206.775
Abril	162,5	317.408	201.780
Mayo	137,1	267.760	170.219
Junio	106,1	207.183	131.709
Julio	113,1	220.983	140.482
Agosto	122,9	240.001	152.572
Septiembre	103,2	201.553	128.130
Octubre	96,7	188.877	120.072
Noviembre	86,5	168.869	107.352
Diciembre	99,0	193.309	122.889

Industrial y doméstica aguas arriba de las captaciones

En el estudio mencionado en el párrafo anterior se presentan las demandas Industrial aguas arriba de los embalses. Estas demandas son:

Tabla. 5. Demandas industrial y doméstica agua arriba de los embalses.

Cuenca	Guacerique	Concepción
Anual (MMm³)	1,23	0,14
Diario (m³)	3.370	384

En resumen, las demandas de los ríos Guacerique y Concepción son:

Tabla. 6. Resumen de las Demandas en los ríos Guacerique y Concepción.

Cuenca	Guacerique	Concepción
Agrícola área regada (has)	2.616	1.708
Uso Consuntivo agrícola Anual MMm³	2,80	1,78
Industrial y otros Anual (MMm³)	1,23	0,14
Uso consuntivo Industrial (MMm³)	0,25	0,03
Uso Consuntivo total	3,05	1,81

Es decir que aguas arriba de las bocatomas para los acueductos del área metropolitana de Tegucigalpa se captan 5 Mm³ al año. Área metropolitana de Tegucigalpa.

La ciudad metropolitana de Tegucigalpa tiene una población al año 2020 de 1,25 millones, que demandan diariamente 260 mil m³ incluyendo la demanda de otros usos como comercial, oficial e industrial. Para obtener la demanda total al sistema, a la demanda se le adicionan el agua no contabilizada la que asciende a 40%, obteniéndose una demanda bruta a los sistemas potabilizadores de 433 mil m³ por día o 158 Mm³ por año. En resumen, la demanda al año 2020 sería:

Tabla. 7. Demanda de agua potable al año 2020⁵.

	Unidad	Valor
Población	Habitantes	1.252.651
Demanda Per cápita	Lhd	200
Demanda doméstica diaria	m ³ /día	250.531
Demanda otros	m ³ /día	9.264
Demanda neta total	m ³ /día	259.795
Agua no contabilizada	%	40
Demanda bruta total	m ³ /día	432.992
Demanda bruta total	Mm ³ /año	158,0

Se elaboró la proyección de la demanda a partir de la proyección de la población, suponiendo que la proporción del consumo de usuarios diferentes al doméstico y el agua no contabilizada permanecen constantes. Las tasas de crecimiento utilizadas son 2,5% entre 2020 y 2025, 2,4% al 2030 y 2,3% hasta el 2040 (Fuente: “Elaboración del plan estratégico municipal de agua potable y saneamiento para el cumplimiento de los ODS”, Banco Interamericano de Desarrollo, junio, 2019). Esta proyección es:

⁵ Fuente: “Elaboración del Plan Estratégico Municipal de Agua Potable y Saneamiento para el cumplimiento de los ODS”, Banco Interamericano de Desarrollo, Junio, 2019.

Tabla. 8. Proyección de la demanda de agua de la ciudad metropolitana de Tegucigalpa.

Año	Población	Demanda Neta	Agua No Contabilizada*	Demanda Total
	(habitantes)	(m³/Año)	(m³/Año)	(m³/Año)
2020	1.252.651	94.825.143	63.216.762	158.041.905
2021	1.283.967	97.195.772	64.797.181	161.992.953
2022	1.316.066	99.625.666	66.417.111	166.042.776
2023	1.348.968	102.116.308	68.077.538	170.193.846
2024	1.382.692	104.669.215	69.779.477	174.448.692
2025	1.417.260	107.285.946	71.523.964	178.809.909
2026	1.451.274	109.860.808	73.240.539	183.101.347
2027	1.486.104	112.497.468	74.998.312	187.495.779
2028	1.521.771	115.197.407	76.798.271	191.995.678
2029	1.558.293	117.962.145	78.641.430	196.603.574
2030	1.595.692	120.793.236	80.528.824	201.322.060
2031	1.632.393	123.571.481	82.380.987	205.952.468
2032	1.669.938	126.413.625	84.275.750	210.689.374
2033	1.708.347	129.321.138	86.214.092	215.535.230
2034	1.747.639	132.295.524	88.197.016	220.492.540
2035	1.787.835	135.338.321	90.225.547	225.563.869
2036	1.828.955	138.451.103	92.300.735	230.751.838
2037	1.871.021	141.635.478	94.423.652	236.059.130
2038	1.914.054	144.893.094	96.595.396	241.488.490
2039	1.958.078	148.225.635	98.817.090	247.042.725
2040	2.003.113	151.634.825	101.089.883	252.724.708

*Se adiciona el agua no contabilizada ya que para poder entregar al consumidor la demanda neta, hay que producir esta demanda más el agua no contabilizada.

La demanda diaria se diferenció por meses para tener en cuenta el factor de caudal máximo diario. Se adoptó un factor de 1,2 y por lo tanto se supuso que en los meses de verano ocurría estos caudales y en los meses de invierno ocurría el fenómeno inverso. Así las cosas, las demandas diarias utilizadas en la simulación para el año 2020 son:



Tabla. 9. Demandas máximas comparadas con la demanda promedio Año 2020.

Demanda	Valor en m³/día
Demanda promedio diaria	432.992
Demanda diaria meses de Verano	519.590
Demanda diaria meses de invierno	346.349

c. Lista de Proyectos a ser analizados

Los proyectos que serán analizados son:

Tabla. 10. Capacidades de los Proyectos en Estudio.

Nombre	Capacidad del Embalse (MMm³)	Capacidad de Planta O de trasvase (M3/s)
Jiniguare	0	0,15 ¹
Reservorio Rancho Viejo	3,35	0
Sabacuante	26,7	1,5
Guacirique	10	0,4
Rio del Hombre VII	124,2	2,0
Nuevo Sabacuante		
1. San José	10,0	0,50
2. Jacalepa	10,0	0,45



En la actualidad hay un trasvase con capacidad $0,25 \text{ m}^3/\text{seg}$ el cual se cambiará a $0,4 \text{ m}^3/\text{seg}$.

El proyecto Sabacuante es excluyente del nuevo proyecto Sabacuante. En la figura 4, que se presenta al final del documento, se esquematizan estos proyectos.

d. Beneficios y costos económicos

Para cada una de las demandas se determinaron los modelos de los beneficios correspondientes por el uso del agua y los costos de racionamiento por no cumplir las demandas. Para el caso de las hidroeléctricas se determinó cuál es el costo de la capacidad ociosa.

Beneficios por Consumo Humano

Los beneficios económicos mensuales por consumo mensual de agua potable y por persona están representados en la disposición a pagar por dicho servicio. En la figura 2, se muestra el modelo económico de la demanda de agua el cual representa dicha disposición a pagar. En la gráfica se representa los beneficios por un consumo de agua Q_1 , en donde P_0 es el costo económico de distribuir agua en carro aljibe y Q_0 es el agua que un ciudadano consumiría del acueducto si la tarifa fuera P_0 . La tarifa actual es P_1 para el cual el usuario consumiría Q_1 . El modelo de la demanda de agua está dado por:

$$Q = \alpha P^e$$

El modelo de beneficios o valor económico por uso de agua es:

$$VA = P_{\text{Aljibe}} * Q_0 + \int P dq \quad (\text{valorada entre } Q_0 \text{ y } Q_1)$$

P en función de Q está dada por:

$$P = (Q / \alpha)^{1/e}$$

De acuerdo con la información suministrada por la SANAA, la tarifa (valores del 2019) de agua más saneamiento P_1 (incluyendo el cargo fijo) es de L 8,58 por m^3 . El consumo diario por persona Q_1 , se estima en 200 lhd es decir un promedio mensual de $6,08 \text{ m}^3/\text{habitante}$ por mes. Los parámetros adicionales de la función de beneficios por consumo de agua potable per cápita son: el precio promedio de camión aljibe (P_{Aljibe}) es L 160 por $(\text{m}^3)^6$ y cantidad de agua consumida al precio P_0 , (Q_0) $1,13 \text{ m}^3$ por mes que es el consumo de subsistencia.

⁶ Fuente: “Elaboración del Plan Estratégico Municipal de Agua Potable y Saneamiento para el cumplimiento de los ODS”, Banco Interamericano de Desarrollo, Junio, 2019.

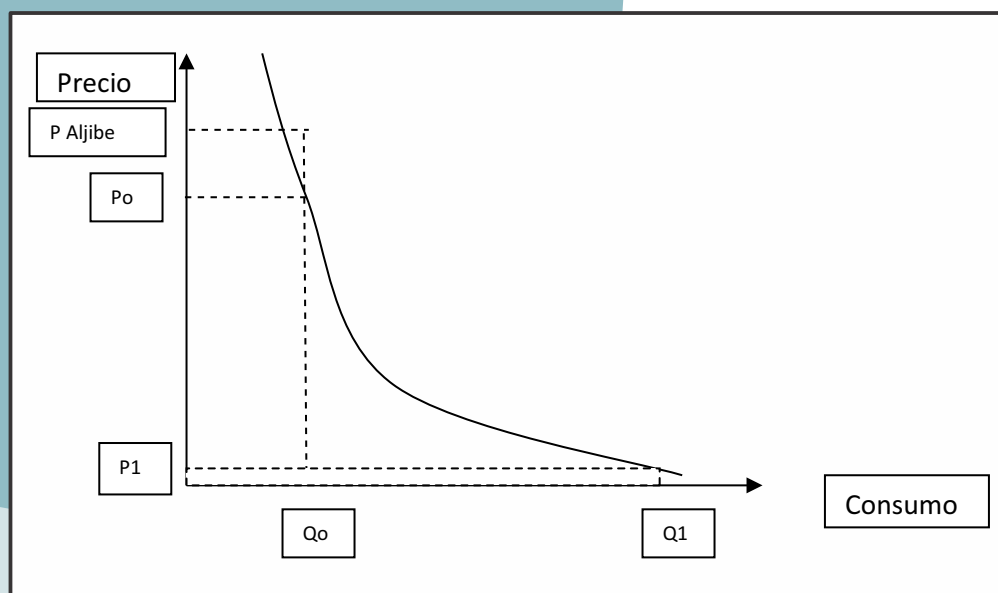


Figura. 2. Modelo de demanda.

e. Evaluación económica de los proyectos.

Como se indicó en el acápite del objetivo del estudio, la oferta del recurso no es determinística y por lo tanto ésta debe ser tratada como una variable probabilística. Para ello, con la herramienta HydroBID, se reconstruyeron 9 años de hidrología virgen (no afectada por las demandas). Esta hidrología de 9 años se confronta con la demanda de cada año que se desea analizar para determinar cuáles serían los posibles racionamientos y sus estadísticos de la demanda de Tegucigalpa (media, varianza, probabilidad de racionamiento, etc).

Los caudales para estas simulaciones fueron obtenidos por la empresa RTI International y presentados en el estudio “Casos de Estudio en las Cuencas del Río Choluteca, Ulúa, Chamelecón, Lempa y Motagua”.

Las simulaciones elaboradas recrean la realidad del uso del agua transitándola desde los nacimientos de los arroyos hasta los embalses donde se trata el agua y se envía a la ciudad metropolitana de Tegucigalpa. En las figuras 3 y 4 que se presenta al final del informe, se esquematiza el sistema hídrico de la región.

Para evaluar cada uno de los proyectos se realizaron simulaciones para los años 2025 y 2040 (únicos años para los que se tiene información de cambio climático). Con estas simulaciones se encontraron la cantidad de agua que el proyecto adicionaba al sistema y posteriormente, dicha agua se valoró en términos económicos. Finalmente, se calculó la serie de beneficios del año 2025 al 2040 interpolando los resultados de dichos años utilizando la serie de demanda que se presenta en el cuadro No. 8.

Para obtener estos resultados se llevaron a cabo 5 simulaciones por intervención con y sin proyecto para determinar el agua adicionada utilizada en el sistema. A esta cantidad de agua utilizada se le obtuvo el valor económico utilizando el modelo presentado en la sección anterior. Finalmente, se obtuvo la serie de beneficios y costos económicos por cada proyecto y se obtuvieron sus indicadores económicos (VPN, TIRE y relación beneficio/costo): Las simulaciones elaboradas fueron: i- año 2020 con la infraestructura actual, con la regla de operación que aplica la empresa de agua la cual raciona agua en los meses secos cuando los embalses descienden por debajo del 50%, ii- dos simulaciones para el año 2025 con la hidrología de cambio climático del respectivo año, la primer con la infraestructura existente y la segunda incluyendo el proyecto a evaluar lo cual permite calcular la reducción del racionamiento debido al proyecto, iii- dos simulaciones para el año 2040 utilizando el mismo procedimiento descrito en el numeral ii.

Para las simulaciones de los años 2025 se supuso que las acciones que está tomando la empresa de agua estarían terminadas. Estas acciones permitirán reducir las pérdidas del 40 al 37% al año 2025 y a 30% al año 2040, aumentan la capacidad de tratamiento de las plantas de Laureles, Concepción y Picacho. Las capacidades serían:

Tabla. 11. Cambios en las capacidades de las Plantas debido a su optimización.

Planta de tratamiento	Capacidad 2020 (LTS)	Capacidad 2025 y 2040 (LTS)
Laureles	720	920
Concepción	1.600	1.800
Picacho	1.100	1.200

La regla de operación que aplica SANAA consiste en que, si la cantidad de agua embalsada cae por debajo del 30% de su capacidad, las plantas de tratamiento de Concepción y Laureles trabajarían a la mitad de su capacidad). A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones.

Escenario año 2020 con regla de manejo de embalses en la estación seca.

Bajo la regla de operación utilizada actualmente por las autoridades del agua, descrita anteriormente, el suministro de agua promedio de los 9 años simulados sería de 46,9 MMm³ y el racionamiento promedio sería de 48,1 MMm³ cuyo valor económico asciende a L. 1.316 millones por año (US\$ 53,7 millones por año). El valor presente de este racionamiento sería de L. 13.108 millones (US\$ 535 millones) utilizando una tasa de descuento del 12%.

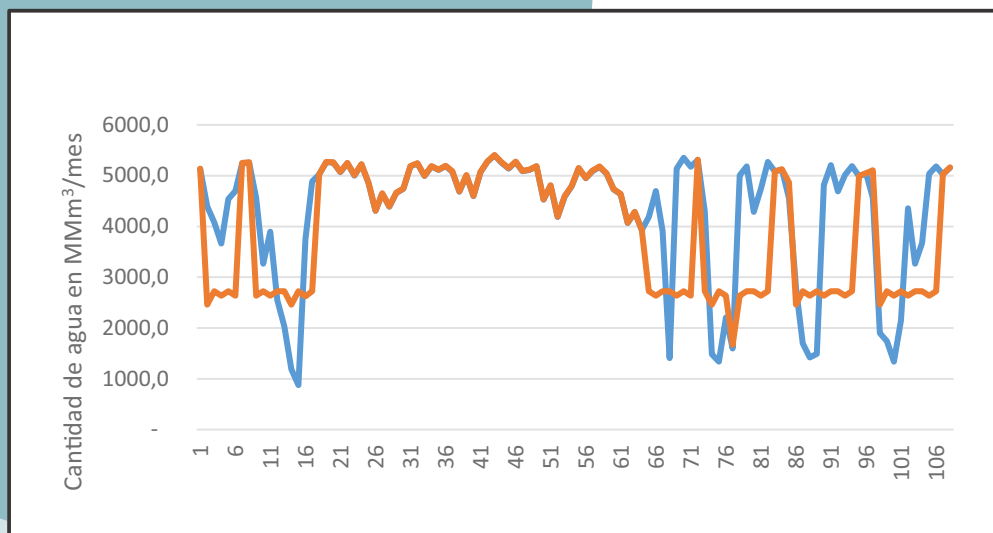


Figura. 3. Suministro de Agua Mensual Escenario Base VS. Regla de Operación.

Se obtuvo la distribución probabilística de los racionamientos la cual es:

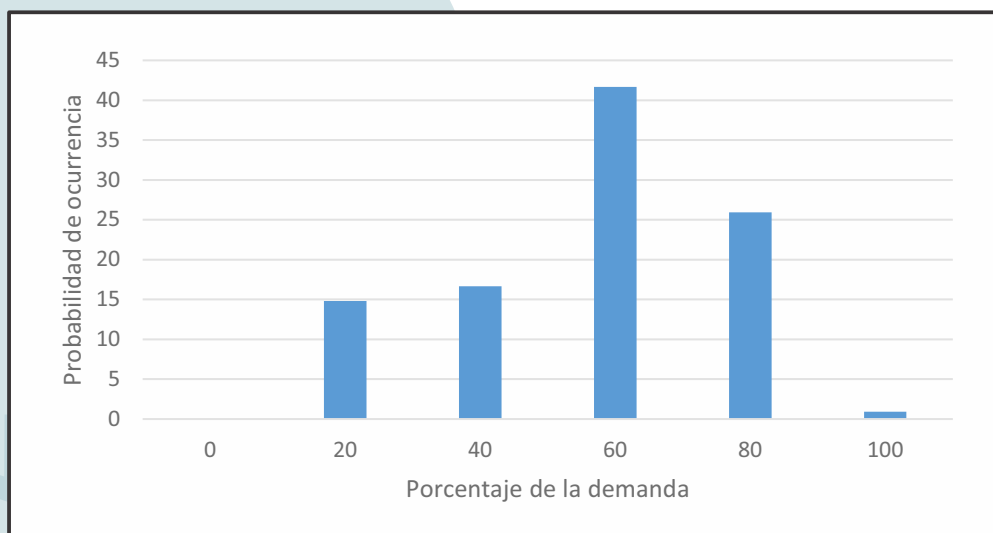


Figura. 4. Probabilidad de Racionamiento.

Esta gráfica muestra que hay un 15% de probabilidad que el racionamiento esté entre 0% y 20% de la demanda mensual. La moda se ubica entre 40% y 60% de la demanda y la probabilidad de que ocurra es de 42%. La probabilidad de que el racionamiento esté entre 80% y 100% de la demanda es 1%, inferior al 6% del escenario base (sin regla de operación) lo cual demuestra la bondad de la regla de operación mediante una mejora considerable del manejo de las sequías. La distribución acumulada sería:

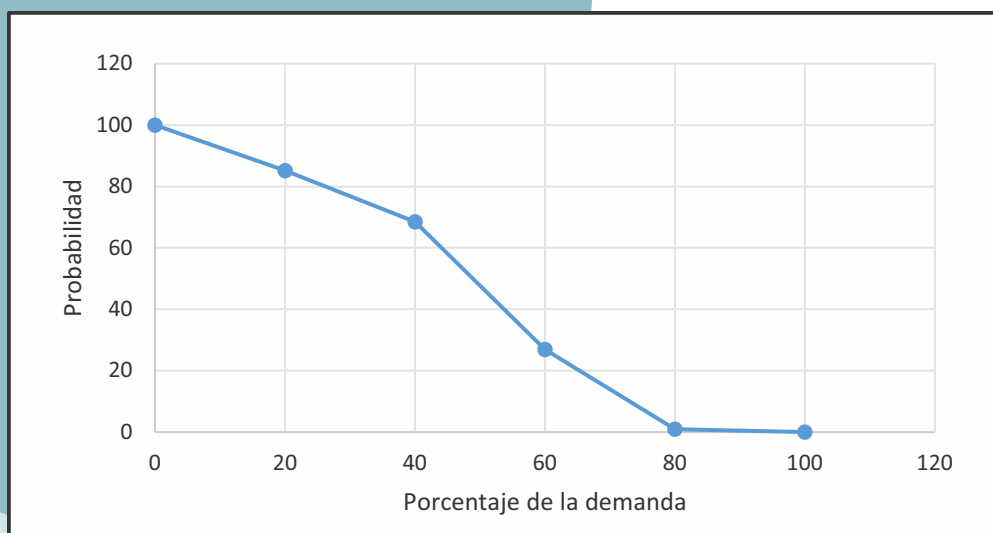


Figura. 5. Probabilidad de excedencia de racionamiento.

Esta gráfica muestra que la probabilidad de que el racionamiento sea mayor a 0 es 100%. Adicionalmente muestra que la probabilidad de que el racionamiento sea mayor al 20% de la demanda es 85% y que sea mayor al 80% de la demanda es del 1%. El racionamiento mensual promedio es del 48% de la demanda.

En este escenario, el valor mensual financiero de racionamiento, que es de 4,0 Mm³, asciende a L 34,3 millones (US\$ 1,4 millones) y el anual es de L 411,8 millones (USD 16,8 millones). El valor económico mensual del racionamiento sería de L 109,7 millones (USD 4,5 millones) o L 1.315,8 millones anuales (US\$ 53,7 millones).

En resumen, los resultados de la simulación base son: Noviembre 2022.



Tabla. 12. Diagnóstico del Año 2020 Escenario: con regla de operación de embalses.

	Volumen Anual
Demanda (1,2 millones de hab.)	95 MMm ³
Agua no Contabilizada (40%)	63 MMm ³
Agua Requerida en Planta	158 MMm ³
Oferta Bruta	78 MMm ³
Agua Consumida	47 MMm ³
Racionamiento en los Usuarios	48 MMm ³
Valor económico del racionamiento (USD)	53,7 MM

Escenario año 2025: Análisis de cada proyecto

Para el año 2025 se realizó una simulación con el escenario base, es decir, con la infraestructura hidráulica existente y un escenario que además de la infraestructura existente tiene el embalse de Río Viejo (RV) y el transvase de Jiniguare. Esta última simulación permite determinar el agua adicional que aporta al sistema este par de proyectos. Esta simulación será el nuevo escenario base ya que estos proyectos se encuentran en proceso de licitación y son un hecho. Para determinar el aporte al sistema de los proyectos Sabacuante, Guacirique y río del Hombre se simularon adicionándolos al nuevo escenario base. El agua suministrada a la ciudad por el sistema actual y por el sistema sumándole el proyecto analizado es:

Tabla. 13. Escenario 2025 Resultados de las simulaciones para cada proyecto (valores por año).

	Escenario Base	Jiniguare + RV	Sabacuante	Guacirique	Río del Hombre	Nuevo Sabacuante
Demanda (1,2 millones de hab.) (en MMm ³)	107,3	107,3	107,3	107,3	107,3	107,3
Agua no Contabilizada (37%) (en MMm ³)	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0
Agua Requerida en Planta (en MMm ³)	170,3	170,3	170,3	170,3	170,3	170,3
Oferta Bruta (en MMm ³)	86,0	87,5	106,2	89,7	145,3	123,8
Agua Consumida (en MMm ³)	54,2	55,1	66,9	56,5	91,6	86,7
Racionamiento en los Usuarios (en MMm ³)	53,1	52,3	40,5	50,9	15,9	32,7
Valor económico del racionamiento (MM USD)	63,8	61,8	44,7	62,4	9,0	19,4

El agua que adiciona cada proyecto al sistema y su valor serían:

Tabla. 14. Escenario 2025 Adicionalidad de cada proyecto (valores por año).

	Jiniguare + RV	Sabacuante	Guacirique	Río del Hombre	Nuevo Sabacuante
Agua cruda adicional (MMm ³)	1,5	18,7	2,2	57,8	36,3
Incremento de consumo debido al proyecto (Mm ³)	0,9	11,8	1,4	36,5	31,6
Disminución del racionamiento (en Mm ³)	0,8	11,8	1,4	36,4	19,6
Valor agregado del proyecto (MM USD)2,0	2,0	19,1	1,4	54,8	44,4

Escenario año 2040: Análisis de cada proyecto

Para el año 2040 se llevaron a cabo simulaciones similares a las realizadas en el año 2025 con la demanda de Tegucigalpa del año 2040 que asciende a 151,8 MMm³, el agua no contabilizada se reduciría a 30% y la hidrología afectada por el fenómeno del cambio climático al año 2040. Al igual que para el año 2025, se realizó una simulación con el escenario base, es decir, con la infraestructura hidráulica existente y un escenario que además de la infraestructura existente tiene el embalse de río Viejo (RV) y el transvase de Jiniguare. Esta última simulación permite determinar el agua adicional que aporta al sistema este par de proyectos. Esta simulación será el nuevo escenario base ya que estos proyectos se encuentran en proceso de licitación y son un hecho. Para determinar el aporte al sistema de los proyectos Sabacuante, Guacirique y río del Hombre se simularon adicionándolos al nuevo escenario base. El agua suministrada a la ciudad por el sistema actual y por el sistema sumándole el proyecto analizado es:

Tabla. 15. Escenario 2040 Resultados de las simulaciones para cada proyecto (valores por año).

	Escenario Base	Jiniguare + RV	Sabacuante	Guacirique	Río del Hombre	Nuevo Sabacuante
Demanda (1,2 millones de hab.) (en MMm ³)	151,8	151,8	151,8	151,8	151,8	151,8
Agua no Contabilizada (30%) (en MMm ³)	65,1	65,1	65,1	65,1	65,1	65,1
Agua Requerida en Planta (en MMm ³)	216,9	216,9	216,9	216,9	216,9	216,9
Oferta Bruta (en MMm ³)	79,8	81,3	98,7	83,1	144,2	117,9
Agua Consumida (en MMm ³)	55,8	56,9	69,1	58,2	101,0	82,6
Racionamiento en los Usuarios (en MMm ³)	96,0	94,9	82,8	93,7	50,8	69,3
Valor económico del racionamiento (MM USD)	119,7	116,5	93,9	117,3	33,9	54,3

El agua que adiciona cada proyecto al sistema y su valor serían:

Tabla. 16. Escenario 2025 Adicionalidad de cada proyecto (valores por año).

	Jiniguare + RV	Sabacuante	Guacirique	Río del Hombre	Nuevo Sabacuante
Agua cruda adicional (MMm ³)	1,5	17,4	1,8	62,9	36,6
Incremento de consumo debido al proyecto (Mm ³)	1,1	12,2	1,3	44,1	25,7
Disminución del racionamiento (en Mm ³)	1,1	12,1	1,2	44,1	25,6
Valor agregado del proyecto (MM USD)2,0	3,2	22,6	2,4	82,6	65,4

Indicadores de Rentabilidad

Los costos tenidos en cuenta fueron los incrementales de inversión, operación y mantenimiento de cada proyecto evaluado. Los costos, año de entrada y el tiempo de construcción de cada proyecto son:

Tabla. 17. Costos de Inversión, O&M y tiempos del proyecto.

Nombre	Año de Entrada	Costo (US\$ Millones)	Costo Anuales O&M (US\$ Millones)	Tiempo de Construcción (Años)
Jiniguare	2021	1,8	0,075	2
Reservorio Rancho Viejo	2022	10,3	0,225	2
Sabacuante	2024	160,0	2,105	3
Guacirique ⁷	2025	35,6	0,900	3
Río del Hombre VII	2027	295,2	12,100	5
Nuevo Sabacuante	2024	122,0	2,100	3

Los proyectos Jiniguare y Rancho viejo se evaluaron como uno solo teniendo en cuenta que los dos están en etapa de adjudicación de contrato de construcción. Adicionalmente, no se evaluó el proyecto Guacirique ya que los resultados muestran una producción muy pobre de agua lo cual está en revisión.

Con la información de las simulaciones para los años 2025 y 2040 se interpolaron los beneficios para cada uno de los años utilizando la demanda anual. Los indicadores económicos por proyecto son:

Tabla. 18. Indicadores de rentabilidad económica.

Nombre	VPN (US\$ Millones)	TIR (%)	Relación B/C
Jiniguare	2,2	14,4	1,3
Reservorio Rancho Viejo	2,2	14,4	1,3
Sabacuante	-41,3	8,2	0,9
Río del Hombre VII	67,8	15,6	1,8
Nuevo Sabacuante	173,8	26,8	3,0

⁷ Incluye Planta de Tratamiento de Concepción por 10,8 millones.

Como se observa en el cuadro, el proyecto mejor proyecto es Nuevo Sabacuate que consta de las presas San José y Sabacuate bajo con una Tasa interna de retorno del 26,8%, un valor presente neto (VPN) de US\$ 173,8 millones y una relación beneficio/costo de 3. El segundo proyecto sería el de Río del Hombre el cual tiene una rentabilidad del 15,6% con un VPN de US\$67,8 millones, menos de la mitad de Nuevo Sabacuate.



5. CUENCA DEL RÍO ULUA



a. Infraestructura Hidráulica

La cuenca del río Ulúa cuenta con los distritos de riego oficiales más grandes de Honduras (5.807 has) y Las Hidroeléctricas oficiales más grandes (431 MW de potencia instalada) alimentadas por los embalses de mayor envergadura del país. En la cuenca habitan 2,4 millones de habitantes, es decir, el 25% de la población total. La cuenca drena en dirección norte desde los límites con El Salvador hasta el mar Caribe. En la figura 6 se muestra la ubicación de la cuenca, así como la ubicación de las hidroeléctricas.

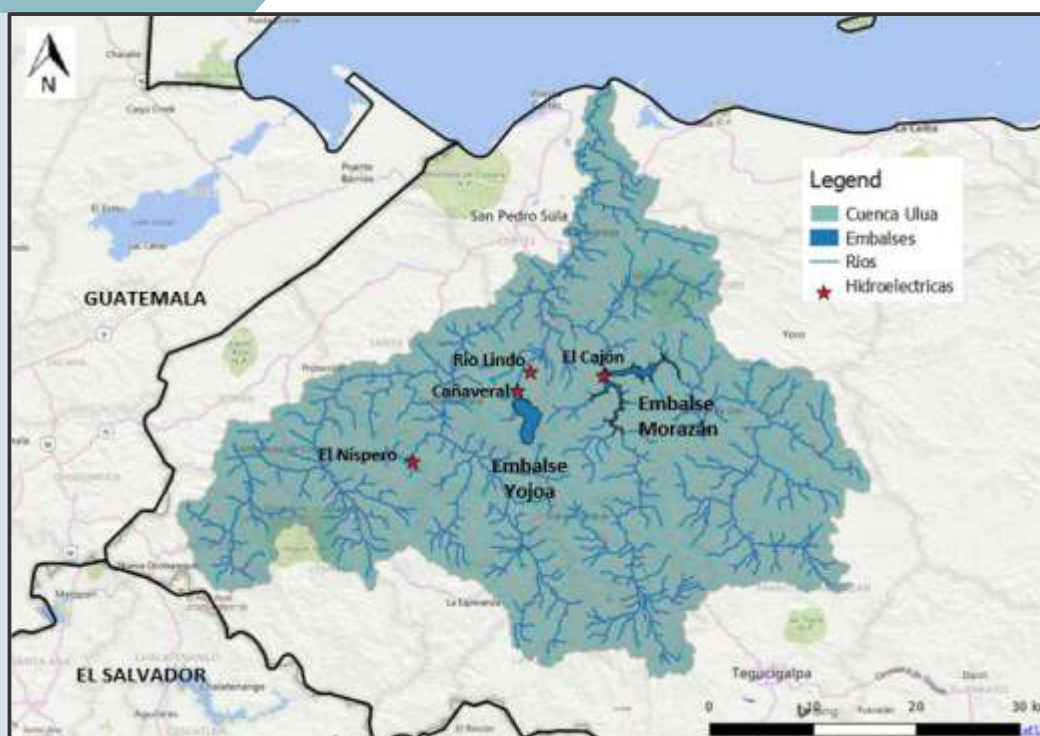


Figura.6. Ubicación de la cuenca del río Ulúa.

Infraestructura

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 la generación de energía. En la tabla No. 16, presenta las características de los embalses e hidroeléctricas incluidos en la simulación.

Tabla. 19. Infraestructura Hidroeléctrica de la cuenca del Ulua.

Nombre	Embalse	Capacidad del embalse (Millones m ³)	Potencia (Mw)	Capacidad (m ³ /seg)	Factor de conversión (GWH/mes) / (m ³ /s)
Francisco Morazán	Francisco Morazán	4.200	300,0	112	1,96
El Níspero	El Níspero	5,5	22,5	17	0,97
Cañaveral	Lago Yojoa	1.400	29,0	23	0,92
Río Lindo			80,0	26	2,25
Santa María			1,2	0,7	1,25

Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).

Adicionalmente, la cuenca cuenta con dos trasvases que alimentan el Lago Yojoa los cuales son:

Tabla. 20. Capacidad de los trasvases.

Origen	Destino	Capacidad (m ³ /seg)
Río Yuré	Lago Yojoa	3,2
Río Varsovia	Lago Yojoa	2,3

b. Demandas de Agua con uso consuntivo

La simulación se elaboró solo hasta la zona de influencia del Arco Seco. En la figura 7, se muestra las tres subcuencas simuladas. Estas son: i- La subcuenca que aquí denominaremos Morazán en la cual se simula el área que drena hasta el embalse de la hidroeléctrica El Cajón, ii- subcuenca del lago Yojoa la cual simula el área hasta la hidroeléctrica Río Lindo y iii- Subcuenca del El Chinda en donde se simula el área del río hasta la localidad de Villa Nueva.

El área simulada se dividió en 938 microcuencas que son las que hacen parte de la base de datos del Hydrobid. Para la simulación de los usos de agua superficial en la cuenca se obtuvo la información de la población y de los distritos de riego por cada una de las microcuencas en que se dividió la cuenca del Ulua. Las características del área estudiada son

Tabla. 21. Características del área estudiada de la cuenca del río Ulua.

Área	21.772 Km ²
Población	2.374.211 hab.
No. de microcuencas	938
Distritos de riego Invest-Honduras o USAID (IH)	113
Distritos de riego Secretaria de Agricultura (SAG)	5
Área de los Distritos de riego IH	1.878 has
Área de los Distritos de riego SAG	5.807 has

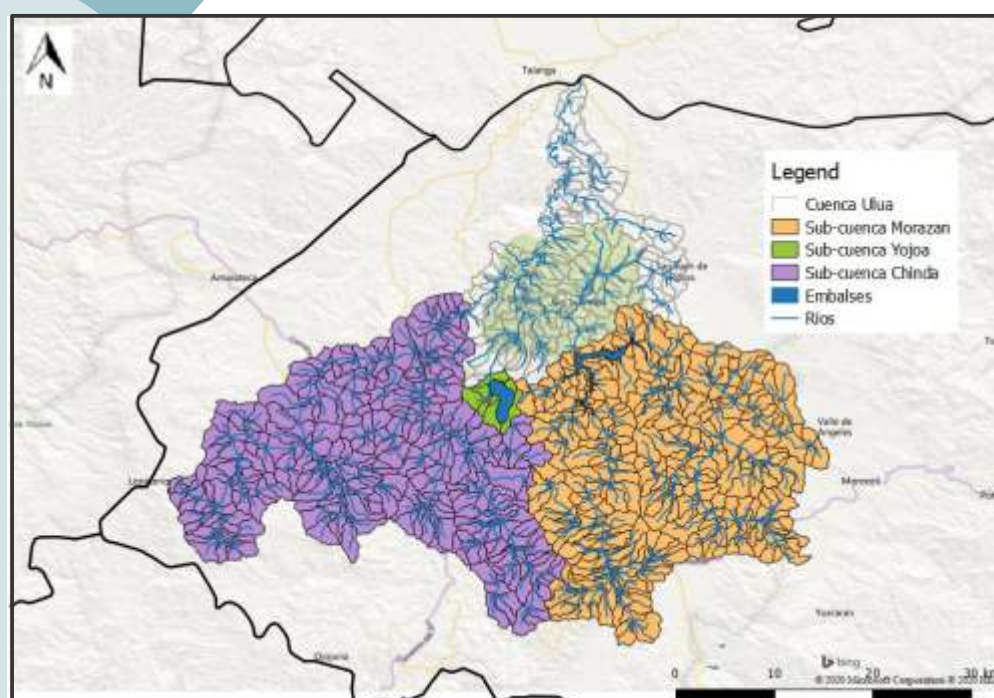


Figura. 7. Subcuencas incluidas en la simulación

Demanda de agua para consumo doméstico

En el presente estudio no se recopiló información de consumo doméstico de cada poblado de la cuenca. Por lo tanto, se supuso que los consumos domésticos son similares a los que se tienen para Tegucigalpa. Los supuestos y los valores utilizados en la simulación son:

Tabla. 22. Cuenca del río Ulua Demanda de agua potable al año 2020⁸.

	Unidad	Valor
Población	Habitantes	2.374.211
Demanda Per cápita	Lhd	200
Demanda doméstica diaria	m ³ /día	474.842
Agua no contabilizada	%	40
Demanda total	m ³ /día	791.404
Demanda Total	Mm ³ /año	288,9

Las 938 localidades con demanda para uso doméstico se agruparon en 27 localidades teniendo en cuenta su cercanía y la dirección de los cursos de agua.

Demanda de agua para riego

La demanda de agua se calculó determinando el requerimiento de agua para una celda típica de cultivos de un distrito de riego de Invest Honduras o de USAID⁹ localizado en el Corredor Seco. Se utilizó un coeficiente de transpiración de cultivo Kc igual a 0,87. La demanda neta de agua en mm/mes utilizada en el cálculo de la demanda bruta de agua para riego es:

Tabla. 23. Demanda neta de agua por mes Corredor Seco.

Mes	ETP mm/día	ETc mm/día	Precipitación efectiva mm/mes	Demanda de agua mm/mes
Enero	2,37	2,06	13	50,9
Febrero	2,78	2,42	7	60,7
Marzo	3,57	3,11	10	86,3
Abril	4,01	3,49	16	88,7
Mayo	3,08	2,68	126	0
Junio	3,23	2,81	112	0
Julio	3,43	2,98	60	32,5
Agosto	2,79	2,43	125	0
Septiembre	2,62	2,28	192	0
Octubre	2,28	1,98	88	0
Noviembre	2,03	1,77	49	4,0
Diciembre	2,44	2,12	13	52,8

⁸ Fuente: “Elaboración del Plan Estratégico Municipal de Agua Potable y Saneamiento para el cumplimiento de los ODS”, Banco Interamericano de Desarrollo, Junio, 2019.

⁹ USAID, Ficha del Sistema de Riego Cofradía, Diciembre 2018.

Para determinar la demanda bruta de los distritos de riego, se utilizó una eficiencia del 30% en los distritos de riego de Invest Honduras y una eficiencia del 50% en los de la SAC, teniendo en cuenta la información suministrada por los técnicos de dichas instituciones. Las demandas mensuales agregadas en cada distrito de riego son:

Tabla. 24. Demandas de agua en los distritos de riego (Valores en m³/mes).

Mes	SAG	Invest HO
Área utilizada en has	5.807	1.005
Enero	7.192.414	731.050
Febrero	8.576.955	871.777
Marzo	12.187.661	1.238.776
Abril	12.523.574	1.272.919
Mayo	0	0
Junio	0	0
Julio	4.591.704	466.709
Agosto	0	0
Septiembre	0	0
Octubre	0	0
Noviembre	562.608	57.184
Diciembre	7.459.084	758.155
Total (m ³ /año)	53.094.000	5.396.570

c. Beneficios

El beneficio económico de generación hidroeléctrica está dado por la energía producida en cada hidroeléctrica, valorada al costo marginal (CMg) de largo plazo. El CMg para Honduras es USD 130,4 por MWH. Este valor se obtuvo de estudio “Evaluación Financiera y Económica de la Rehabilitación y Repotenciación del Complejo Hidroeléctrico Cañaveral – río Lindo” ¹⁰.

Para el modelo de simulación, el valor económico de la energía (**VE_{ij}**) generado en cada hidroeléctrica, i, en el mes, j, el cual se presentó en la conceptualización del modelo de simulación, es

$$VE_{ij} = Q_{ij} * FC_i * Cmg$$

¹⁰ Evaluación Financiera y Económica de la Rehabilitación y Repotenciación del Complejo Hidroeléctrico Cañaveral – Río Lindo, Operación HO-1102, Alberto Brugman, Febrero 2014.

Donde $Q_{i,j}$ es el caudal turbinado en la hidroeléctrica i , FC_i el factor de conversión de la hidroeléctrica i y CMg el costo marginal de largo plazo.

Los beneficios por uso doméstico se supusieron igual a los beneficios de la ciudad de Tegucigalpa. Estos están dados por el consumo multiplicado por el precio cuenta del agua consumida. Este precio cuenta que es equivalente a la disposición a pagar por el agua consumida se calcula utilizando el modelo de demanda por agua potable (ver figura 2).

Los beneficios agrícolas tenidos en cuenta en cada uno de los nodos de demanda son la totalidad de los márgenes netos de cada cultivo del nodo. Se supuso que la distribución de cultivos era similar en cada distrito de riego y por lo tanto, el Ingreso por hectárea.

El margen neto de los cultivos por hectárea es igual a la diferencia de la venta en finca del producto agrícola menos los costos de producción. El producto puede ser lo producido bajo secano o bajo riego. Los costos de producción pueden ser para preparar el terreno para Secano o para riego. En caso de sembrar para riego y no se recibe el agua se supuso que la producción es igual a la de secano. La información para las simulaciones se obtuvo del “Proyecto Integral de Desarrollo Rural (HO-L1201 y HO-L1211)¹¹”. En resumen, los ingresos y costos de producción anual serían:

Tabla. 25. Ingresos y costos agrícolas en la región del Arco Seco (valores en USD/ha por año).

Tipo de siembra	Ingresos	Costos
Secano	1.863,3	410,9
Bajo riego	3.886,3	959,7

El ingreso neto de una hectárea bajo riego sería USD 2.926,6 y la de secano USD 1.453,3. Si el terreno se prepara para riego y no hay racionamiento de agua, se supuso que el ingreso neto sería de USD 903,6 lo cual daría como resultado una pérdida de USD 549,7.

b. Resultados de las Simulaciones, escenario base

Para la cuenca del Ulua se reconstruyeron 14 años de datos hidrológicos y se obtuvieron mediante el modelo HydroBID los caudales de las 938 microcuencas de la cuenca del Ulua. En la zona estudiada se demandan 265,1 Mm³ al año para usos consuntivos de los cuales 206,5 Mm³ (77,9%) son para uso doméstico, 53,1 Mm³ (20%) para los distritos de riego de la SAG y 5,5 Mm³ (2,1%) para los distritos de riego de Invest-Honduras. De acuerdo con las simulaciones, en la cuenca del río Ulua se podrían entregar en promedio 254,2 Mm³ (95,9% de la demanda).

¹¹ Proyecto Integral de Desarrollo Rural (HO-L1201 y HO-L1211), Banco Interamericano de Desarrollo, Diciembre 2019.

Adicionalmente, la cuenca tiene una capacidad instalada en hidroeléctricas por 431,5 Mw que corresponden a tuberías de carga con capacidad de 178 m³/seg (5.613,4 Mm³/año). En promedio, estas hidroeléctricas generarían 4.477,8 Mm³/año de acuerdo con la simulación. A continuación, se presentan los resultados por sector incluyendo su economía.

Sector Hidroeléctrico

El sector hidroeléctrico que tiene una capacidad instalada de 431,5 Mw, generaría 3.150,2 GWH/año en promedio. Esta energía se generó utilizando 4.477,8 Mm³/año. La serie de 14 años se presenta en la figura 8.

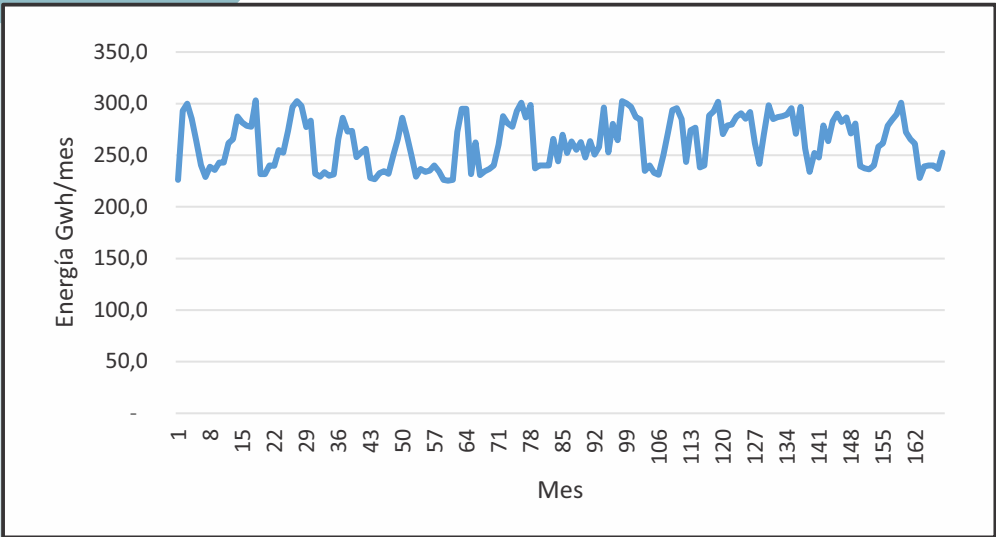


Figura. 8. Generación de Energía Hidroeléctrica.

Adicionalmente se obtuvo la distribución probabilística de la energía producida.

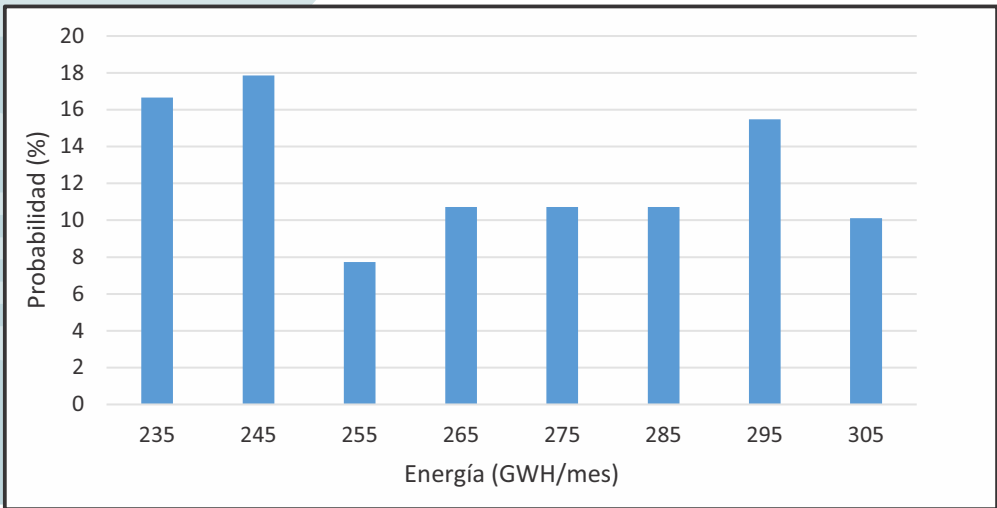


Figura. 9. Frecuencia de uso de la capacidad instalada.

La capacidad máxima de generación del grupo de hidroeléctricas es de 3.949,1 GWH/año que en promedio mensual es 329 GWH/mes. La generación de energía promedio mensual es de 263,5 GWH/mes que es un 80% de la capacidad máxima mostrando una alta utilización del sistema comparado con sistemas hidroeléctricos latinoamericanos. La figura 9, muestra una distribución uniforme entre 235 GWH/mes que es lo mínimo que se genera y 305 GWH-mes.

Esta información también puede apreciarse en forma acumulada en la siguiente figura:

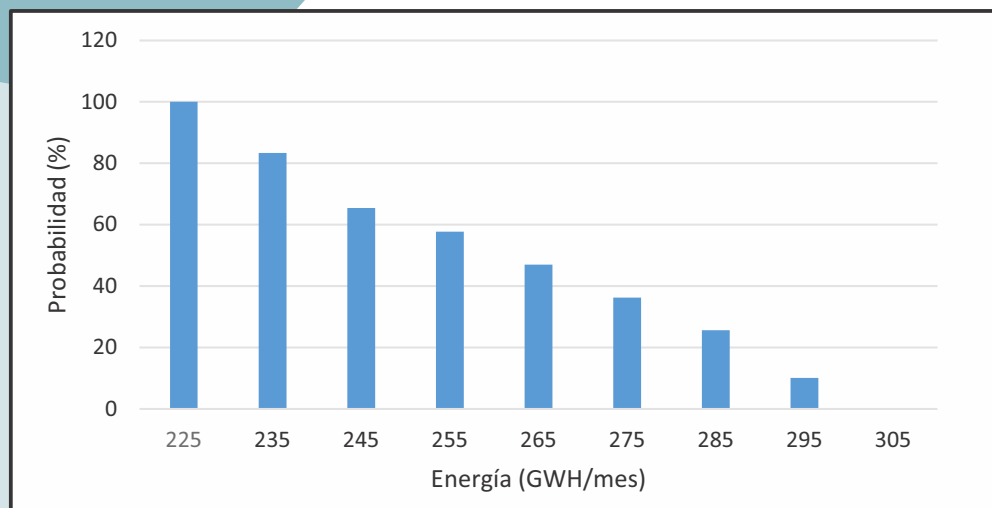


Figura. 10. Probabilidad de excedencia.

En la gráfica se muestra que mensualmente el 100% del tiempo se generaría más de 225 GWH.

En cuanto al valor económico generado en el sector eléctrico, la energía producida en las hidroeléctricas de la cuenca (3.150,2 GWH/año) tiene un valor económico de L 10.064,6 millones (USD 410,8 millones) por año en promedio.

Consumo doméstico

Los 2,4 millones de habitantes demandan al año 206,5 Mm³ al año suponiendo que tienen un patrón de consumo similar al de los habitantes de Tegucigalpa. En la simulación se determinó si la cantidad de agua en los ríos de la cuenca es suficiente para satisfacer dicha demanda. En promedio la cuenca podría suministrar hasta 203,8 Mm³, es decir un 99% de la demanda. A continuación, se presenta la demanda mensual comparada con la capacidad del suministro.

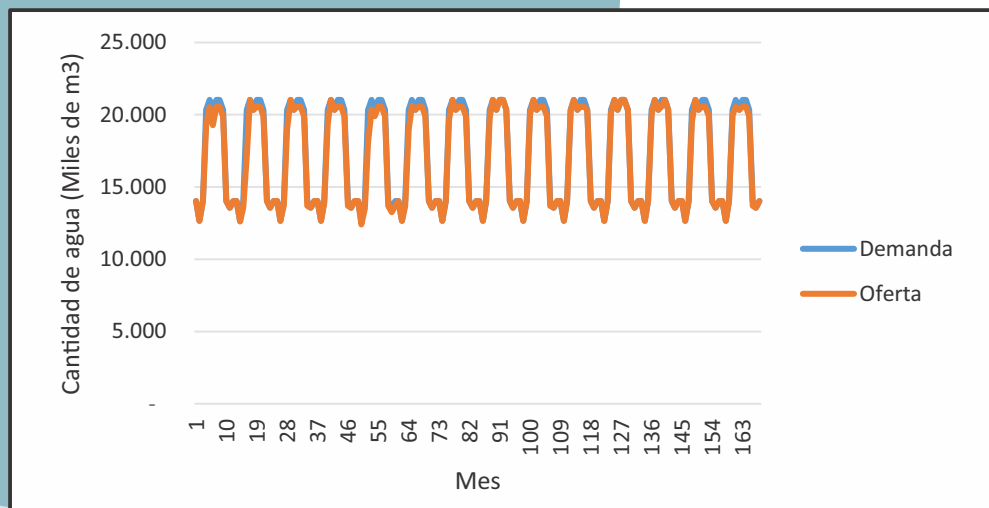


Figura. 11. Demanda de agua para consumo humano.

El racionamiento anual promedio sería de $2,7 \text{ Mm}^3$. Los racionamientos resultantes de los 14 años de simulación se pueden apreciar mejor en la siguiente figura.

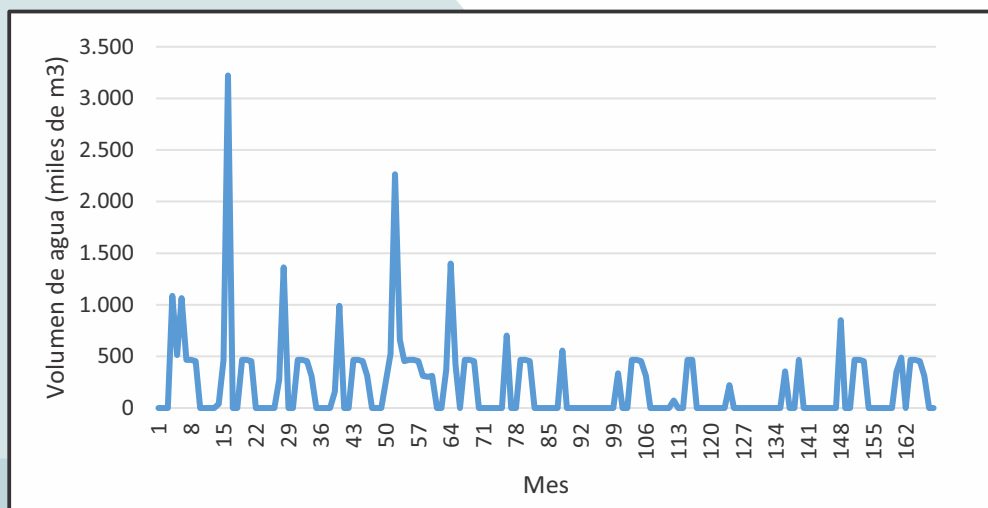


Figura. 12. Racionamientos mensuales del consumo doméstico.

Como se puede apreciar, los racionamientos son mayores en los primeros años simulados (2001 al 2006). Posteriormente se presentan racionamientos en los meses de verano que son los meses de mayor demanda como se puede observar en la figura 11. El mayor racionamiento se produce en el mes 16 (abril de 2002) con un valor de $3,2 \text{ Mm}^3$ que comparado con la demanda ($17,8 \text{ Mm}^3$) alcanza un 18%. La distribución probabilística de racionamientos es:

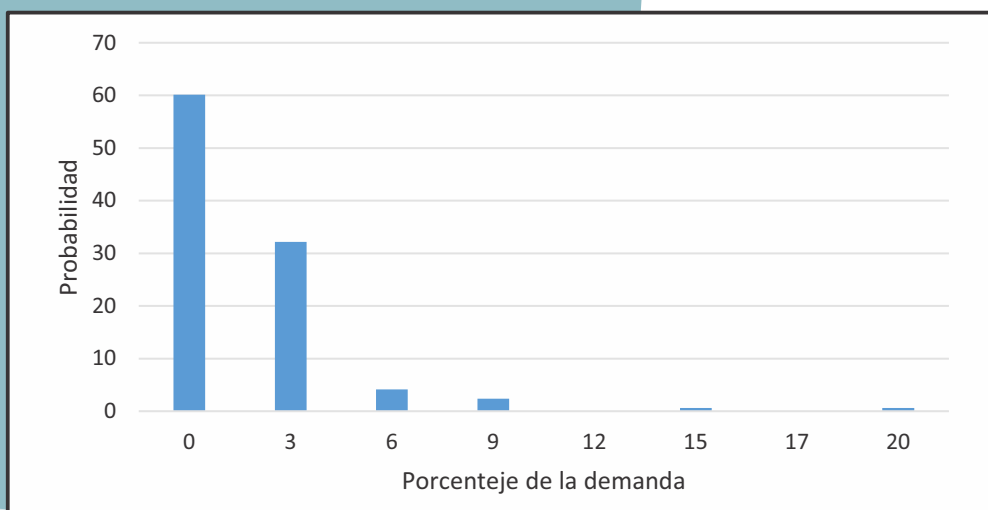


Figura. 13. Probabilidad de racionamiento.

De la figura se deduce que el 60% del tiempo habría agua suficiente para satisfacer la demanda para consumo humano o sea que existiría un 40% de probabilidad de falla. Adicionalmente se ve que el 98% del tiempo los racionamientos serían menores al 10% de la demanda y el 96% del tiempo menor al 6% de la demanda.

En cuanto al valor financiero y económico del uso y racionamiento del agua para consumo humano, la recaudación promedio anual por el suministro de agua sería de L 1.748,6 millones (USD 71,4 millones) y se dejarían de recaudar L 23,2 millones (USD 947 mil) por cuenta del racionamiento. El valor económico del suministro sería L 11.975,6 millones (USD 488,8 millones) y el valor económico del racionamiento de L 15,5 millones (USD 633 mil).

Sector agrícola: Distritos de riego de la SIG

Los distritos de riego de la SIG tienen 5.807 has bajo riego. La demanda media asciende a 53,1 Mm³ por año. De las simulaciones, los ríos de la cuenca que alimentan las bocatomas de los distritos de riego pueden suministrar en promedio 44,9 Mm³ al año. Las series de demanda y de oferta de los 14 años se presenta en la siguiente figura:



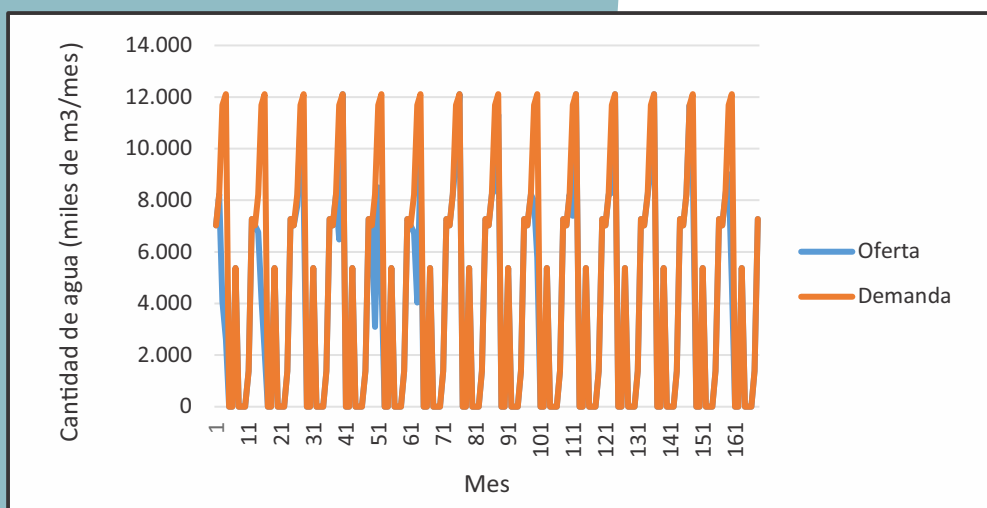


Figura. 14. Demanda para riego SAG.

El déficit medio anual es de 8,2 Mm³. Los déficits resultantes de los 14 años de simulación serían:

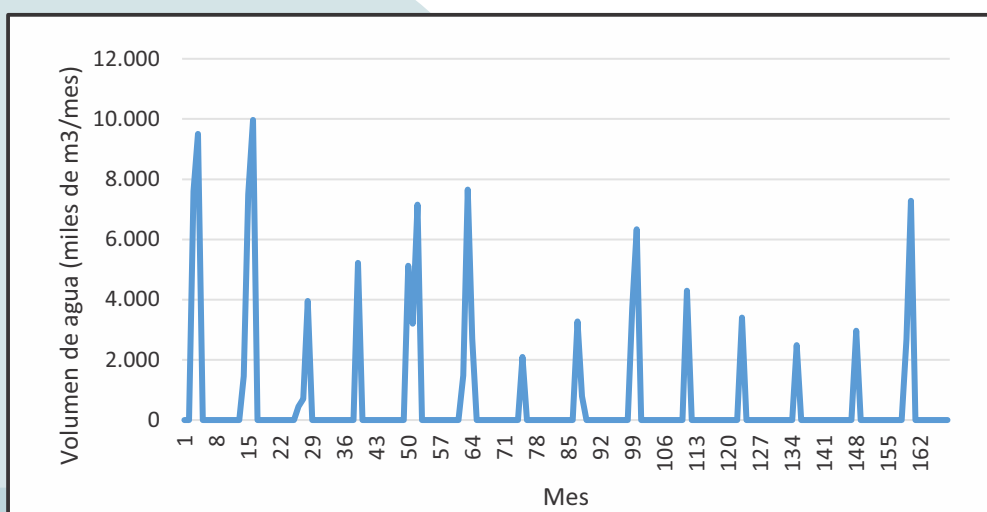


Figura. 15. Deficit del riego de los distritos de la SAG.

Como se ve en la figura 15, los déficit ocurren en los meses de febrero, marzo y abril. En cuanto al costo del racionamiento promedio, este sería de L44,1 millones anuales (USD 1,78 millones) ya que, si se tuviera agua suficiente, los ingresos serían de USD 17 millones y solo se obtienen USD 15,21 millones anuales. Estos valores se calcularon suponiendo que el agua disponible no se distribuye proporcionalmente entre los regantes, sino que se le entrega al área que obtiene agua para satisfacer a la demanda durante todo el año. Este supuesto es conservador ya que si se distribuye uniformemente entre todos los regantes las pérdidas serían menores.

La probabilidad de racionamiento es del 15% y se muestra en la siguiente figura.

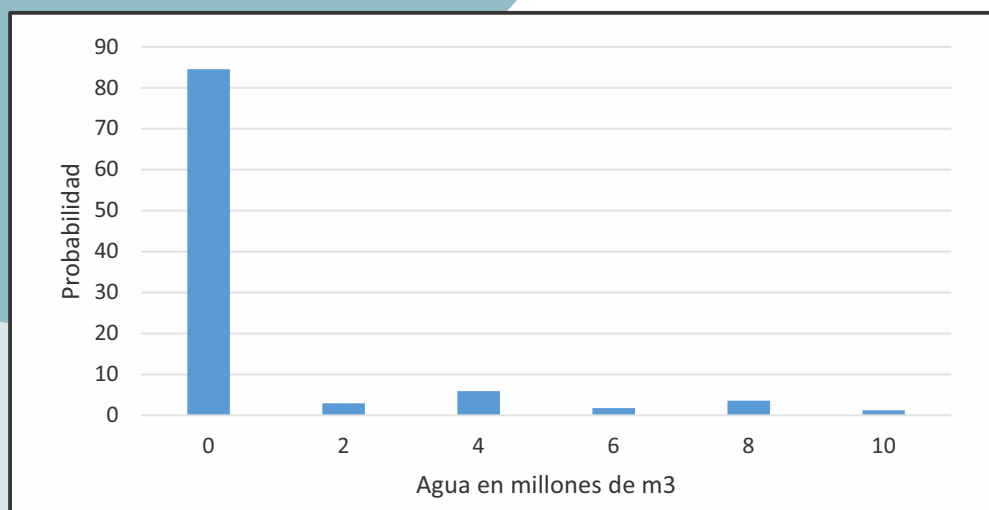


Figura. 16. Probabilidad de racionamiento.

c. Resultados de las Simulaciones, escenario con cambio climático

Para determinar cuál va a ser el impacto del cambio climático, se simularon las demandas del año 2020 pero con la hidrología resultante del impacto del fenómeno en la lluvia y la temperatura en el ciclo hidrológico. Como lo dice el informe de RTI¹², se utilizaron las proyecciones climáticas para la década del 2030 bajo el escenario RCP8.5. La precipitación media anual disminuye un 1 % pero hay meses que ésta disminuye hasta 13%. En cuanto a la temperatura, aumentaría en 1,2 °C lo que aumentaría la evapotranspiración y por ende disminuiría la escorrentía.

12 "Casos de Estudio en las Cuencas del Río Choluteca, Ulúa, Chamelecón, Lempa y Motagua"., RTI international, Marzo 2020.

Tabla. 26. Cambios en la meteorología debido al cambio climático

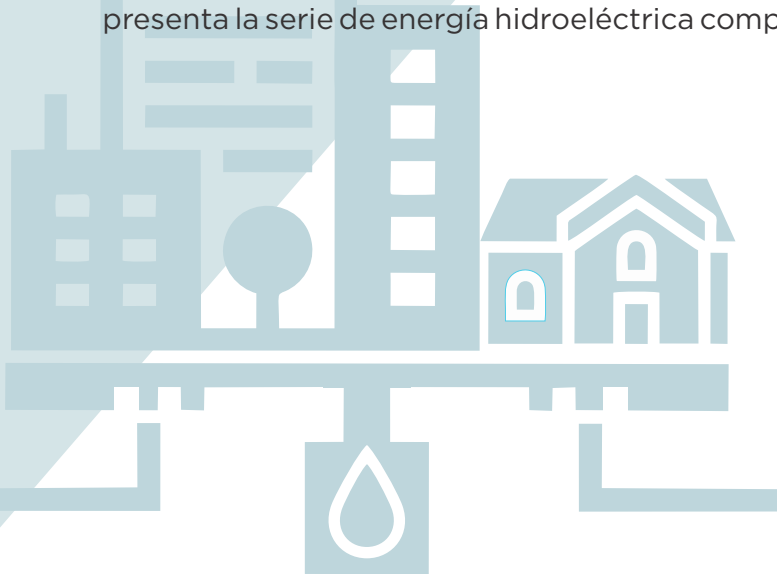
Mes	Precipitación (%)	Temperatura (°C)
Enero	0%	1.13
Febrero	-7%	1.22
Marzo	6%	1.33
Abril	-2%	1.31
Mayo	9%	1.19
Junio	-6%	1.19
Julio	-5%	1.28
Agosto	-13%	1.39
Septiembre	0%	1.31
Octubre	5%	1.16
Noviembre	3%	1.18
Diciembre	10%	1.17

Fuente: “Casos de Estudio en las Cuencas del Río Choluteca, Ulúa, Chamelecón, Lempa y Motagua”, RTI international.

Los resultados muestran que las aguas suministradas a los nodos de demanda disminuirán en 263 Mm³ en las hidroeléctricas, 800 mil m³ para consumo doméstico y 89 mil m³ en los distritos de riego de la SAG.

Energía hidroeléctrica

El impacto del fenómeno del cambio climático en el sector hidroeléctrico reduciría la generación de 3.150 GWH/año (4.478 Mm³ turbinados o 142m³/s) a 2.992 GWH/año (4.215 Mm³ turbinados o 134 m³/s) una reducción del 5 % del escenario original. Esta reducción producirá un descenso de los ingresos de L 10.064,6 millones (USD 410,8 millones) por año en el escenario original a L 9.529,5 millones (USD 389,0 millones), es decir, un 95% de los ingresos esperados originales. Esta reducción produciría un descenso en los ingresos de L 504,8 millones (USD 20,6 millones) (5% de los ingresos originales) que en valor presente serían L 4.207 millones (USD 171,7 millones) utilizando una tasa social de descuento del 12 %. En el siguiente gráfico se presenta la serie de energía hidroeléctrica comparada con el escenario sin cambio climático.



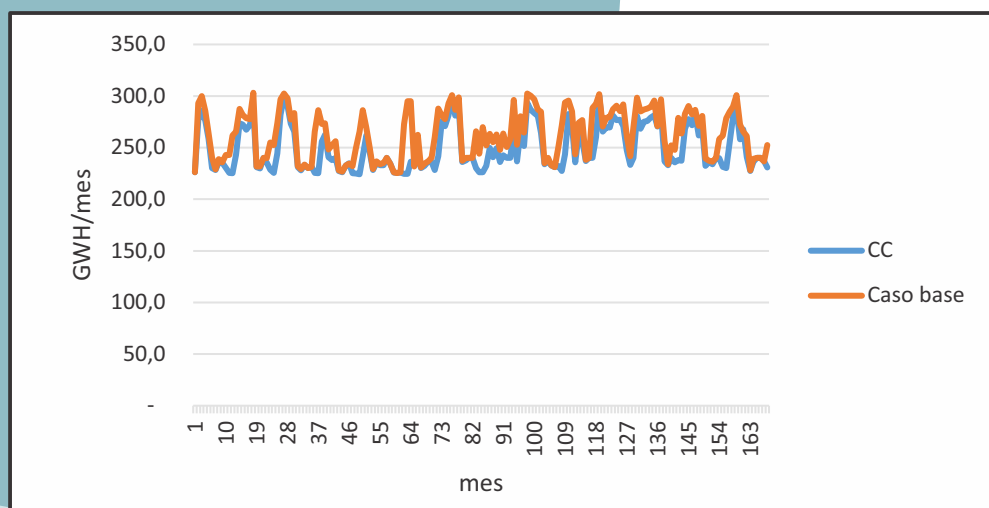


Figura. 17. Energía generada, escenario con cambio climático.

Los valores se visualizan mejor en una gráfica de diferencias la que se presenta a continuación:

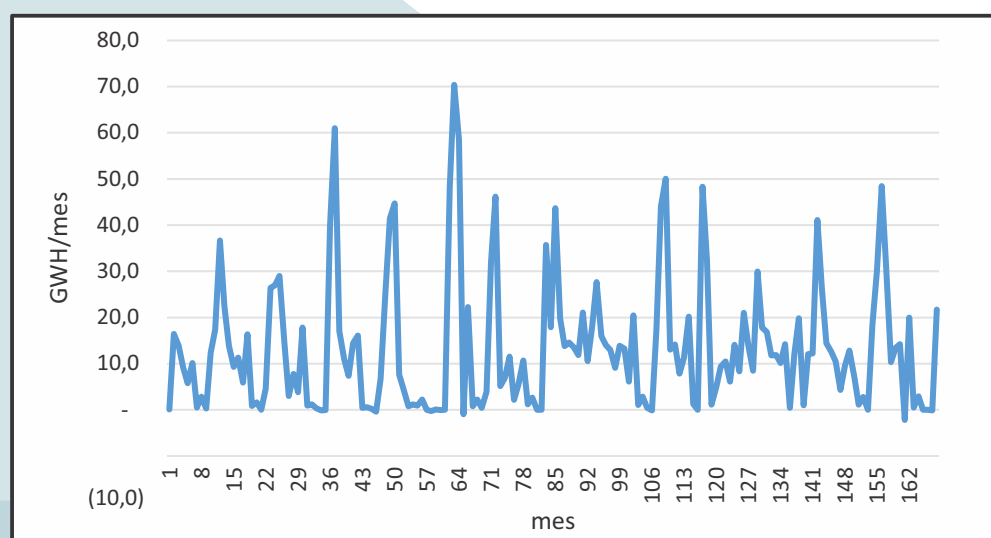


Figura. 18. Diferencia de la energía generada (Caso base - CC).

Consumo doméstico

El impacto del cambio climático en el agua disponible la reduciría en 4 por mil pasando de un suministro promedio de 203,8 Mm³ al año a 203,0 Mm³. Esta reducción producirá un descenso en el bienestar de L 5,7 millones al año (USD235 mil) ya que el racionamiento en términos económicos aumentaría a L 21,2 millones. En el siguiente gráfico se presenta la serie de agua disponible para la demanda en el escenario con cambio climático y se compara con el escenario base.

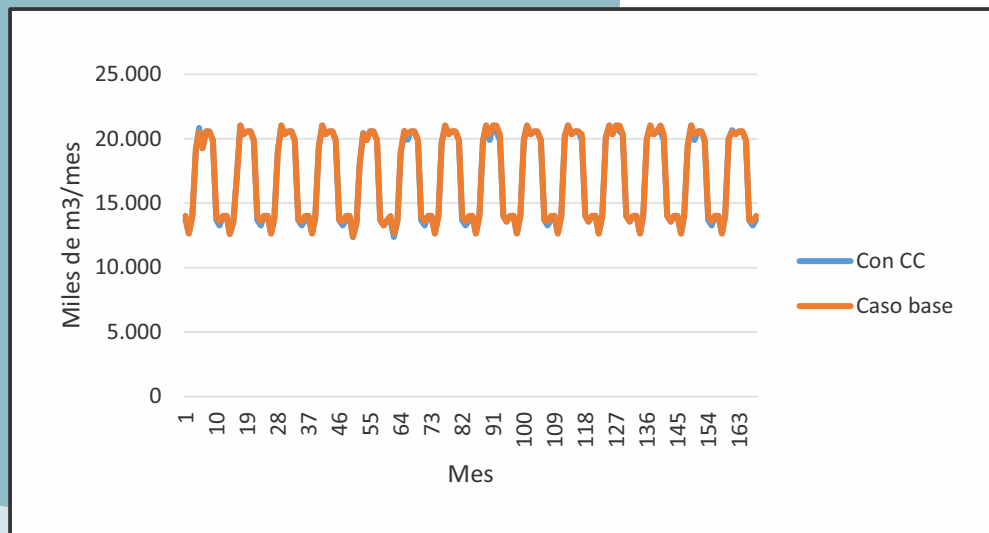


Figura. 19. Agua disponible para uso doméstico (cambio climático).

Teniendo en cuenta que la diferencia entre las dos series es pequeña (4 por mil) se elaboró la serie de las diferencias entre el agua entregada con y sin cambio climático. A continuación, se aprecia dicha serie:

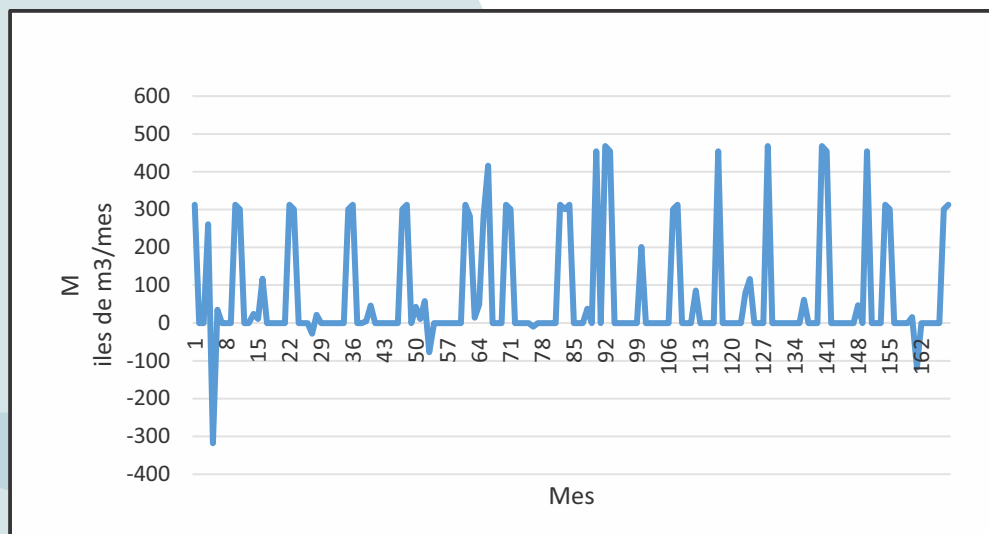


Figura. 20. Diferencia de agua disponible para consumo humano (Caso base - CC).

Sector agrícola: Distritos de riego de la SAG

El impacto de cambio climático en el agua distribuida en los distritos de riego de la SAG se reduciría en 2 por mil pasando de un suministro promedio de $45,02 \text{ Mm}^3$ al año a $44,93 \text{ Mm}^3$. Esta reducción producirá unas pérdidas económicas en los distritos de riego por valor de L 465.500 (USD 19.000) ya que el ingreso neto promedio en finca será de L 372,15 millones anuales (USD 15,19 millones).

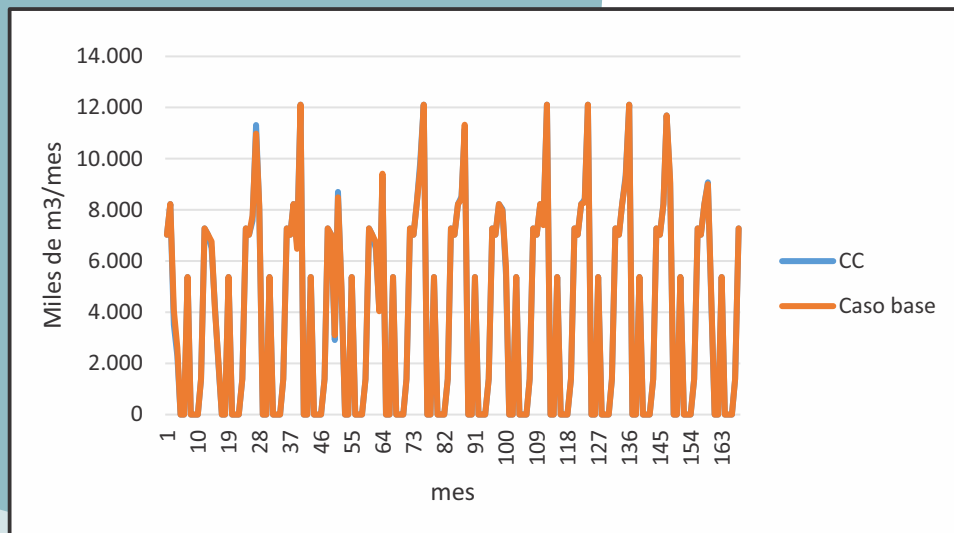


Figura. 21. Diferencia de la energía generada (Caso base - CC).

Teniendo en cuenta que la diferencia entre las dos series es pequeña (2 por mil) se elaboró la serie de las diferencias entre el agua entregada con y sin cambio climático. A continuación, se aprecia dicha serie:

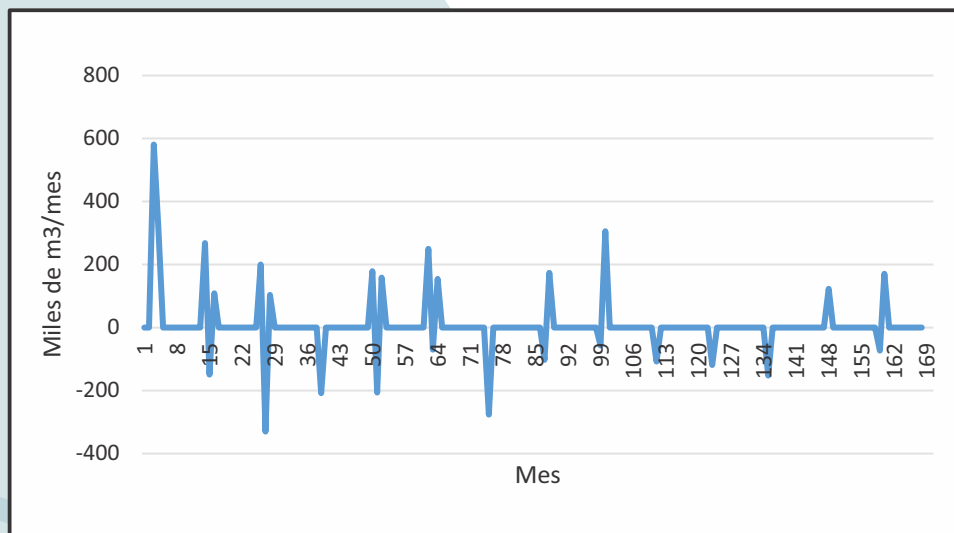


Figura. 22. Diferencia de agua disponible para distritos de riego SAG (Caso base - CC).

d. Conclusiones

Para elaborar el análisis de la cuenca del río Ulua se elaboraron dos escenarios para las demandas del año 2020: i- escenario base el cual se corrió con la hidrología recuperada de los años 2001 al 2014 y ii- escenario con cambio climático con las demandas del año 2020 pero con la meteorología del escenario RCP8.5 del año 2030 la cual tiene un aumento del 1% en la precipitación y un aumento de 1,2°C en la temperatura.

En resumen, las demandas, el suministro de agua y los déficits del escenario base son:

Tabla. 27. Uso del Agua Promedio Anual por sector en (1.000 m³), Escenario Base.

	Demanda	Suministro	Déficit
Agrícola SAG	53.094,0	45.022,9	8.071,1
Consumo Humano	206.451,0	203.812,3	2.638,7
Hidroeléctricas	5.613.408,0	4.477.823,7	

Cuyo valor económico es:

Tabla. 28. Valor Económico Anual por sector en (US\$ 1.000), Escenario Base.

	Ingreso Neto	Costo Racionamiento	Ingreso Sin Racionamiento
Agrícola SAG	15.212	1.783	16.995
Consumo Humano	488.791	651	489.442
Hidroeléctricas	410.786		547.048

El agua demandada y utilizada en el escenario de cambio climático sería:

Tabla. 29. Uso del Agua Promedio Anual por sector en (1.000 m³), Escenario Cambio Climático.

	Demanda	Suministro	Déficit
Agrícola SAG	53.094,0	44.933,7	8.160,3
Consumo Humano	206.451,0	202.961,4	3.489,6
Hidroeléctricas	5.613.408,0	4.215.184,6	



Y su valor económico sería:

Tabla. 30. Valor Económico Anual por sector en (US\$ 1.000), Escenario Cambio Climático.

	Ingreso Neto	Costo Racionamiento	Ingreso Sin Racionamiento
Agrícola SIG	15.193	1.802	16.995
Consumo Humano	488.556	886	489.442
Hidroeléctricas	390.183		547.048

El impacto económico del cambio climático sería:

Tabla. 31. Impacto económico del Cambio Climático (US\$ 1.000).

	Ingreso Base	Ingreso Cambio Climático	Impacto
Agrícola SAG	15.212	15.193	19
Consumo Humano	488.791	488.556	235
Hidroeléctricas	410.786	390.183	20.603

El impacto del cambio climático en los distritos de riego de la SAG sería del 1 por mil, y el del consumo humano menor a este valor. El mayor impacto ocurriría en la generación eléctrica ya que este sector utiliza la totalidad del agua. El sector agrícola utiliza el agua en 7 meses al año y la demanda doméstica tiene agua suficiente en los ríos para cumplir con su demanda.

Adicionalmente, con el cambio climático en los meses de marzo, mayo, octubre, noviembre y diciembre habría más agua disponible. En resumen, el impacto no sería tan grande de acuerdo con escenario utilizado.



6. CUENCAS DE LOS RÍOS CHAMELECÓN, LEMPA Y MOTAGUA



Las cuencas de los ríos Chamelecón, Lempa y Motagua completan el área denominada como corredor seco. Estas cuencas se ubican en el oeste y sur oeste de Honduras y se encuentran en el límite con Guatemala (río Chamelecón y río Motagua) y con El Salvador (río Lempa). Estas se muestran en la siguiente figura. Como el objetivo del estudio es hacer el diagnóstico del Corredor Seco las cuencas se simularon hasta: i- La cuenca del Chamelecón se simuló hasta la localidad La Flecha, incluyendo el distrito de Riego Chiquila; ii- La cuenca del río Motagua hasta el sitio denominado Ruinas de Copán; iii- La cuenca del río Lempa se simuló completa hasta la frontera con El Salvador.

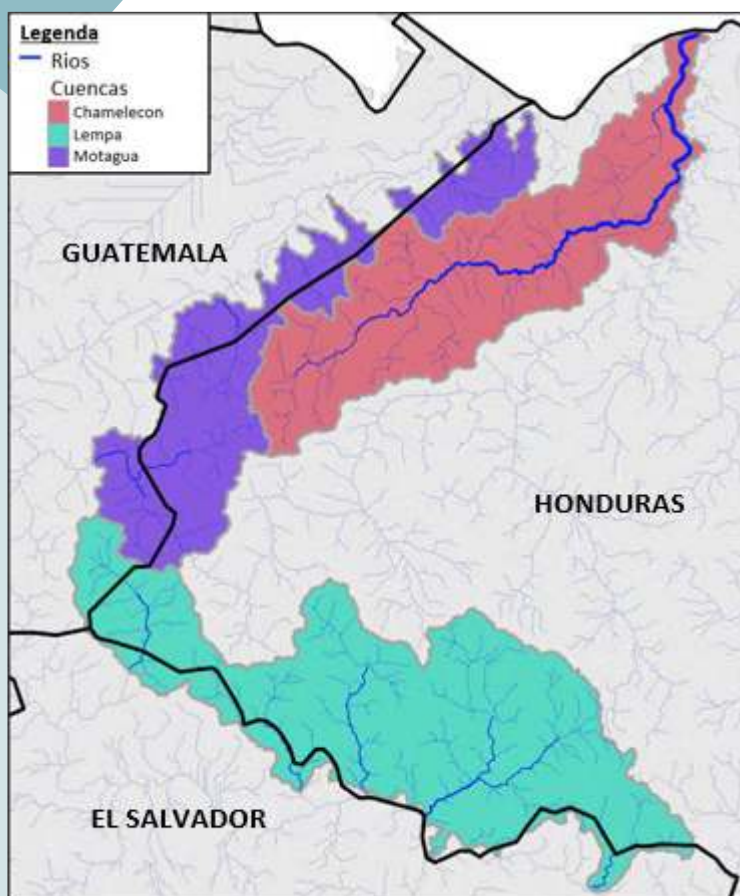


Figura.23. Cuencas Chamelecón, Lempa y Motagua.

Demandas de agua

Para las tres cuencas se tuvieron en cuenta demandas para uso doméstico y demandas para riego. Las características de las cuencas en cuanto a demandas por agua son:

Tabla. 32 . Características de las cuencas de Chamelecón, Motagua y Lempa

Cuenca	Chamelecón	Motagua	Lempa
Población (hab)	1.560.698	141.396	439.836
No. de microcuencas	191	63	279
Distritos de riego Invest-Honduras o USAID (IH)	25	9	125
Distritos de riego Secretaria de Agricultura (SAG)	1	0	0
Área de los Distritos de riego IH (has)	223	77	1.120
Área de los Distritos de riego SAG (has)	610	0	0

Demanda de agua para consumo doméstico

Como se informó en el acápite sobre la cuenca del río Ulua, en el presente estudio no se recopiló información de consumo doméstico de cada poblado de la cuenca. Por lo tanto, se supuso que los consumos domésticos son similares a los que se tienen para Tegucigalpa. Los supuestos y los valores utilizados en la simulación son:

Tabla. 33. Demanda de agua potable al año 2020.¹³

	Unidad	Chamelecón	Motagua	Lempa
Población	Habitantes	1.560.698	141.396	439.836
Demanda Per cápita	Lhd	200	200	200
Demanda doméstica diaria	m ³ /día	312.140	2.827	87.967
Agua no contabilizada	%	40	40	40
Demanda total	m ³ /día	520.233	4.712	146.612
Demanda Total	Mm ³ /año	189,9	1,7	53,5

Demanda de agua para riego

La demanda de agua se calculó determinando el requerimiento de agua para una celda típica de cultivos de un distrito de riego de Invest Honduras o de USAID¹⁴ localizado en el Corredor Seco. Se utilizó un coeficiente de transpiración de cultivo Kc igual a 0,87. La demanda neta de agua en mm/mes utilizada en el cálculo de la demanda bruta de agua para riego es:

¹³ Fuente: "Elaboración del Plan Estratégico Municipal de Agua Potable y Saneamiento para el cumplimiento de los ODS", Banco Interamericano de Desarrollo, Junio, 2019.

¹⁴ USAID, Ficha del Sistema de Riego Cofradía, Diciembre 2018.

Tabla. 34. Demanda neta de agua por mes Corredor Seco.

Mes	ETP mm/día	ETC mm/día	Precipitación efectiva mm/mes	Demanda de agua mm/mes
Enero	2,37	2,06	13	50,9
Febrero	2,78	2,42	7	60,7
Marzo	3,57	3,11	10	86,3
Abril	4,01	3,49	16	88,7
Mayo	3,08	2,68	126	0
Junio	3,23	2,81	112	0
Julio	3,43	2,98	60	32,5
Agosto	2,79	2,43	125	0
Septiembre	2,62	2,28	192	0
Octubre	2,28	1,98	88	0
Noviembre	2,03	1,77	49	4,0
Diciembre	2,44	2,12	13	52,8

Para determinar la demanda bruta de los distritos de riego, se utilizó una eficiencia del 30% en los distritos de riego de Invest Honduras y una eficiencia del 50% en los de la SAC, teniendo en cuenta la información suministrada por los técnicos de dichas instituciones. Las demandas mensuales agregadas en cada distrito de riego son:

Tabla. 35. Demanda neta de agua por mes Corredor Seco.

Mes	Chamelecón	Motagua	Lempa	Chamelecon SAG
Área utilizada en has	223	77	1.120	610
Enero	162.213	56.011	814.702	621.211
Febrero	193.439	66.793	971.533	740.794
Marzo	274.873	94.911	1.380.526	1.052.651
Abril	282.449	97.527	1.418.576	1.081.664
Mayo	-	-	-	-
Junio	-	-	-	-
Julio	103.558	35.758	520.114	396.587
Agosto	-	-	-	-
Septiembre	-	-	-	-
Octubre	-	-	-	-
Noviembre	12.689	4.381	63.728	48.593
Diciembre	168.227	58.087	844.909	644.243

e. Beneficios

Los beneficios por uso doméstico se supondrán igual a los beneficios de la ciudad de Tegucigalpa. Estos están dados por el consumo multiplicado por el precio cuenta del agua consumida. Este precio cuenta que es equivalente a la disposición a pagar por el agua consumida se calcula utilizando el modelo de demanda por agua potable (ver figura 2).

Los beneficios agrícolas a tener en cuenta en cada uno de los nodos de demanda son la totalidad de los márgenes netos de cada cultivo del nodo. Se supuso que la distribución de cultivos era similar en cada distrito de riego y por lo tanto, el Ingreso por hectárea.

El margen neto de los cultivos por hectárea es igual a la diferencia de la venta en finca del producto agrícola menos los costos de producción. El producto puede ser lo producido bajo seco o bajo riego. Los costos de producción pueden ser para preparar el terreno para Secano o para riego. En caso de sembrar para riego y no se recibe el agua se supuso que la producción es igual a la de seco. La información para las simulaciones se obtuvo del “Proyecto Integral de Desarrollo Rural (HO-L1201 y HO-L1211)”¹⁵. En resumen, los ingresos y costos de producción anual serían:

Tabla. 36. Ingresos y costos agrícolas en la región del Arco Seco(valores en USD/ha por año).

Tipo de siembra	Ingresos	Costos
Secano	1.863,3	410,9
Bajo riego	3.886,3	959,7

El ingreso neto de una hectárea bajo riego sería USD 2.926,6 y la de seco USD 1.453,3. Si el terreno se prepara para riego y no hay racionamiento de agua, se supuso que el ingreso neto sería de USD 903,6 lo cual daría como resultado una pérdida de USD 549,7.

f. Resultados de las Simulaciones, escenario base. Cuenca del Río Chamelecón.

Para la cuenca del Chamelecón, se reconstruyeron 35 años de datos hidrológicos mensuales (1980 - 2014) y se obtuvieron los caudales de las 191 microcuencas utilizando el modelo HydroBID (80.000 datos de caudales mensuales). En la cuenca estudiada se demandan 196 Mm³ al año para usos consuntivos de los cuales 189 Mm³ (96,4%) son para uso doméstico, 7 Mm³ (3,6%) para los distritos de riego de la SAG y de Invest-Honduras. De acuerdo con las simulaciones, en la cuenca se podrían entregar en promedio 133 Mm³ (70,4% de la demanda). A continuación, se presentan los resultados por sector incluyendo lo que representan los resultados para la economía.

¹⁵ Proyecto Integral de Desarrollo Rural (HO-L1201 y HO-L1211), Banco Interamericano de Desarrollo, Diciembre 2019.

Consumo doméstico

Los 1,6 millones de habitantes demandan al año $132,3 \text{ Mm}^3$ netos los cuales teniendo en cuenta el 30% de pérdidas demandarían a las fuentes de agua $189,0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ suponiendo que tienen un patrón de consumo similar al de los habitantes de Tegucigalpa. En la simulación se determinó si la cantidad de agua en los ríos de la cuenca es suficiente para satisfacer dicha demanda. En promedio la cuenca podría suministrar hasta $126,4 \text{ Mm}^3$, es decir un 67% de la demanda en fuente. A continuación, se presenta la demanda mensual promedio en fuente comparada con la posibilidad de suministro y el racionamiento respectivo.

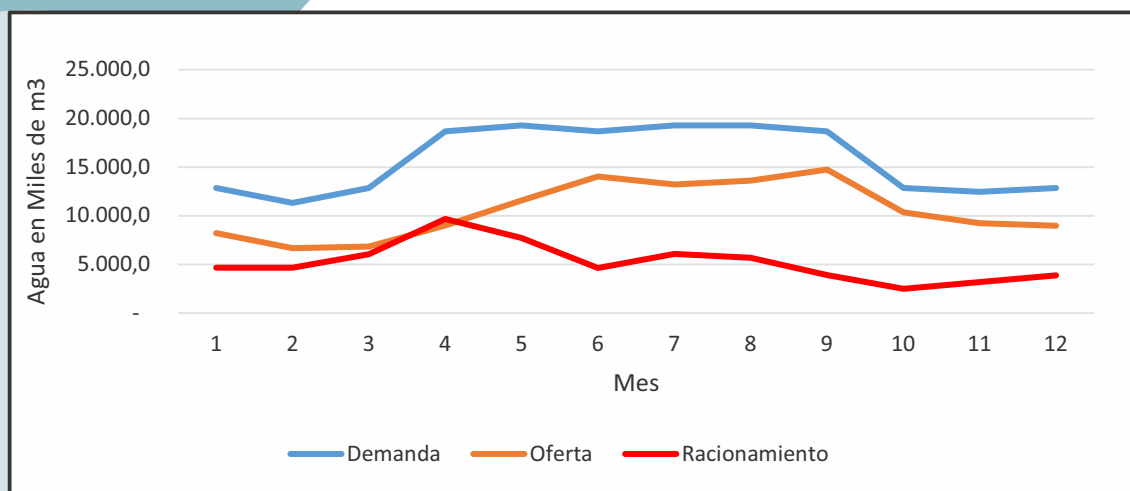


Figura. 24. Río Chamelecón. Demanda Doméstica (Promedio mensual).

El racionamiento anual promedio sería de $62,6 \text{ Mm}^3$ en fuente, es decir, $43,8 \text{ Mm}^3$ netos.

La serie de suministro y los racionamientos en fuente de los 35 años simulados se presentan en la figura 25.



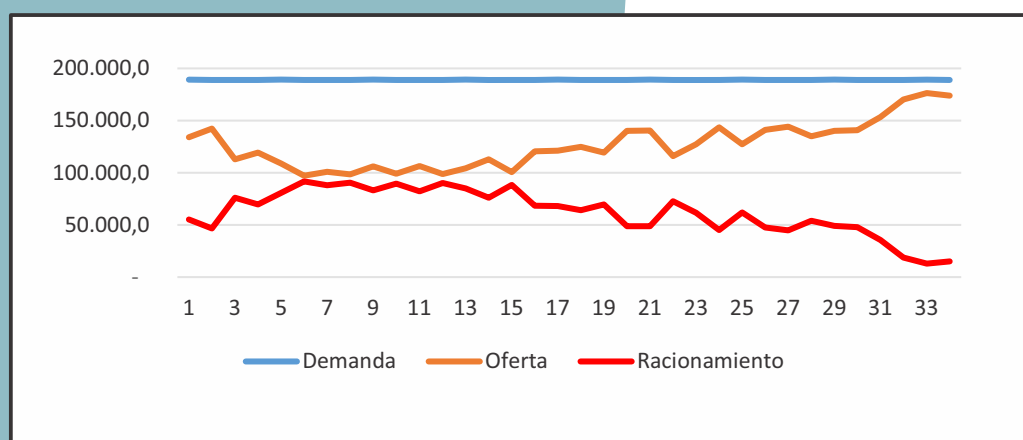


Figura. 25. Simulación de la Demanda doméstica (Año 2020)
Serie histórica de caudales 1980-2014.

Como se puede apreciar, los racionamientos son mayores en los primeros años simulados (1980 al 2006). Sin embargo, los racionamientos se mantienen en todos los años simulados como se observa en la figura 25. El mayor racionamiento se produce en el año 6 con 91,7 Mm³ casi la mitad de la demanda.

En cuanto al valor financiero y económico del uso y racionamiento del agua para consumo humano, la recaudación promedio anual por el suministro de agua debería ser de L 1.135,1 millones (USD 46,3 millones). Sin embargo, debido al racionamiento se dejarían de recaudar L 375,8 millones (USD 15,3 millones) por cuenta del racionamiento. El valor económico anual del suministro sería L 7.842,6 millones (USD 320,1 millones) y el valor económico del racionamiento de L 621,0 millones (USD 25,3 millones).

Sector agrícola

Los distritos de riego de la cuenca del río Chamelecón cuentan para el 2020 con 833 has bajo riego. La demanda media asciende a 6,9 Mm³ por año. De las simulaciones, los ríos de la cuenca que alimentan las bocatomas de los distritos de riego pueden suministrar en promedio 6,7 Mm³ al año es decir el 97% de la demanda. La demanda mensual promedio, el suministro de agua y el racionamiento se presentan en la figura 26. En marzo y abril existe un pequeño racionamiento, pero en los meses restantes se puede suministrar la demanda en su totalidad. La probabilidad de falla mensual (siendo falla el no cumplir con la demanda en 100%) es del 4%.

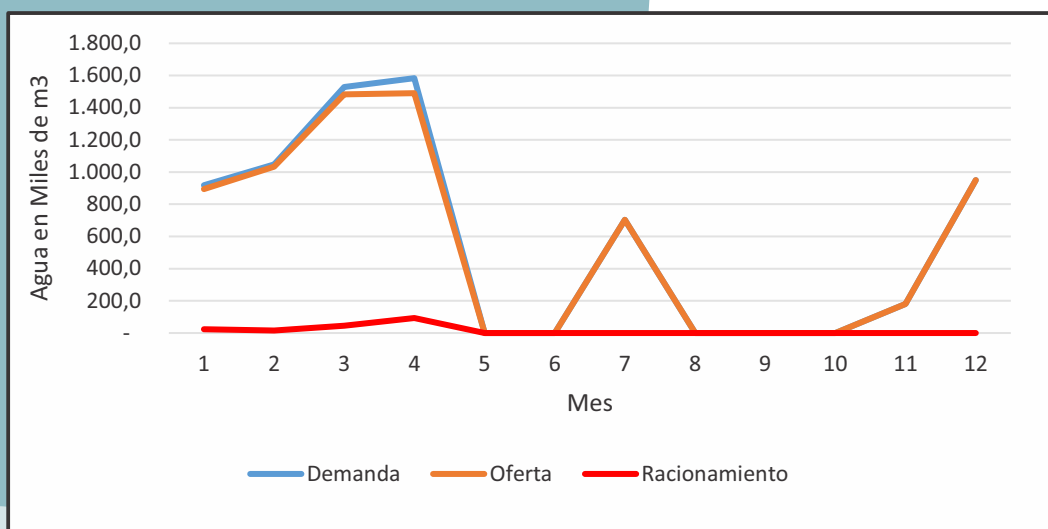


Figura. 26. Río Chamelecón. Demanda para Riego.

Las series de demanda y de oferta de los 35 años se presenta en la siguiente figura 37. Se observa que únicamente en 9 de los 35 años habría racionamiento, es decir, 25,7% de los años, pero con un racionamiento pequeño (el máximo racionamiento anual esperado sería de 1,2 Mm³ que es el 17% de la demanda).

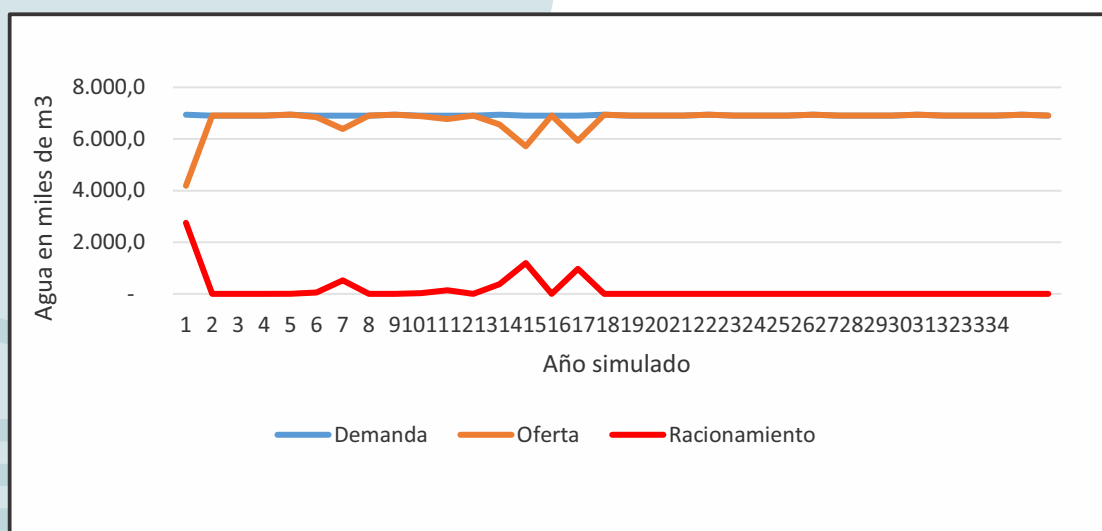


Figura. 27. Simulación de la Demanda para Riego (Año 2020)
Serie histórica de caudales 1980-2014.

En cuanto al costo económico promedio de la producción y el racionamiento, la cuenca tiene un potencial de ingresos de US\$ 3,77 millones al año. Sin embargo, los ingresos esperados serían de US\$ 3,70 millones debido a los racionamientos. Existiría una pérdida promedio de US\$ 66.637 anuales debido a falta de regulación de caudales.

g. Resultados de las Simulaciones, escenario con cambio climático

Para determinar cuál va a ser el impacto del cambio climático, se simularon las demandas del año 2040 pero con la hidrología resultante del impacto del fenómeno en la lluvia y la temperatura en el ciclo hidrológico. Como lo dice el informe de RTI, se utilizaron las proyecciones climáticas para la década del 2030 bajo el escenario RCP8.5. La precipitación media anual disminuye un 1 % pero hay meses que ésta disminuye hasta 13%. En cuanto a la temperatura, aumentaría en 1,2 oC lo que aumentaría la evapotranspiración y por ende disminuiría la escorrentía.

Consumo doméstico

El análisis de cambio climático se realizó utilizando la demanda proyectada al año 2040. Esta demanda se espera que aumente de 132,3 Mm³ en año 2020 a 171,3 Mm³ un aumento de casi del 30%. La demanda bruta (incluyendo 30% de pérdidas) sería de 244,7 Mm³ de los 2,03 millones de habitantes. El agua disponible para el consumo en las poblaciones sería de 154,1 Mm³ es decir 63 % de la demanda. En la figura 28, se presenta la demanda promedio mensual bruta, el agua suministrada y el racionamiento. El racionamiento promedio anual asciende a 90,5 Mm³ (63,4 Mm³ neto) aumentando casi el 50% del promedio para el 2020 muy superior al aumento del 30% de la demanda debido muy posiblemente al efecto del cambio climático.

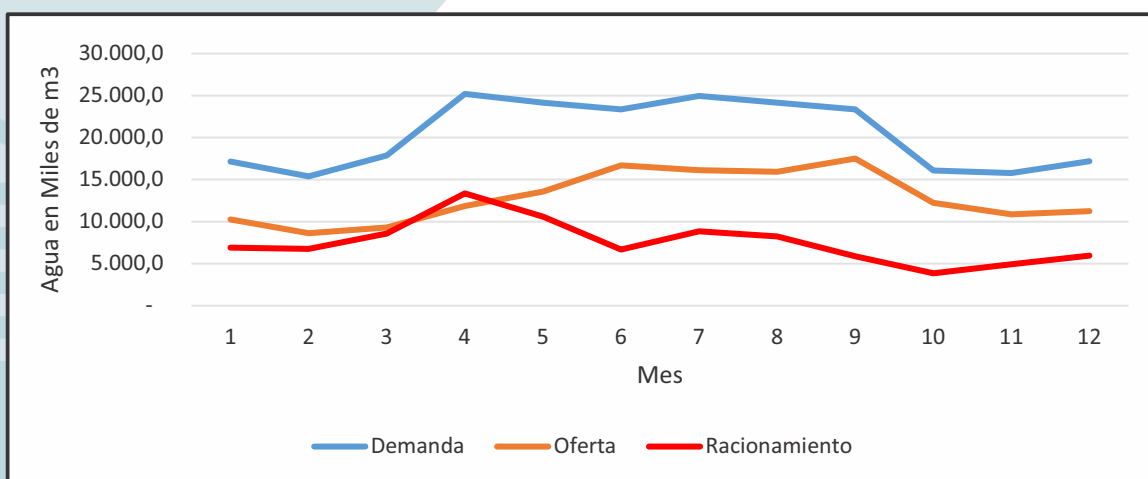


Figura. 28. Chamelecón. CC Demanda Doméstica (Promedio mensual).

La serie del agua que puede ser suministrada y del racionamiento se presenta en la figura 39ción serían:

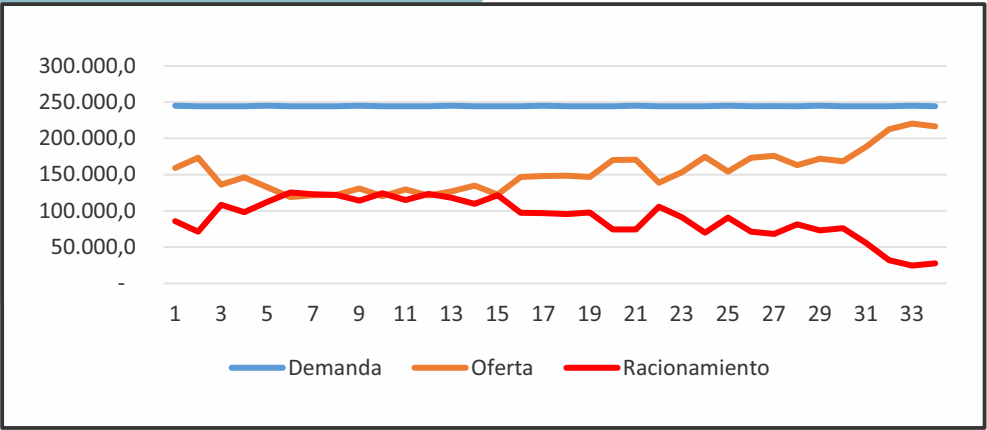


Figura. 29. Simulación de la Demanda doméstica (Año 2040)
Serie de caudales con CC 1980-2014.

En cuanto al valor financiero y económico del uso y racionamiento del agua para consumo humano para el año 2040 en el escenario de cambio climático, la recaudación promedio anual por el suministro de agua debería ser de L 1.469,5 millones (USD 60,0 millones). Sin embargo, debido al racionamiento se dejarían de recaudar L 539,7 millones (USD 22,0 millones) por cuenta del racionamiento. El valor económico anual del suministro sería L 10.256,5 millones (USD 418,6 millones) y el valor económico del racionamiento de L 1.005,9 millones (USD 41,1 millones). El valor del racionamiento aumentaría 62,4%, muy superior al aumento de la demanda debido al efecto del cambio climático.

Sector agrícola

Para el análisis con cambio climático se incluyeron la totalidad de hectáreas que se pueden desarrollar en los distritos de riego actuales. La totalidad de hectáreas disponibles para riego son de 1.515 has. La demanda media por agua asciende a 8,1 Mm³ por año. De las simulaciones, los ríos de la cuenca que alimentan las bocatomas de los distritos de riego podrían suministrar en promedio 7,9 Mm³ al año es decir el 96% de la demanda. La demanda mensual promedio, el suministro de agua y el racionamiento se presentan en la figura 30. En marzo y abril se incrementa un poco el racionamiento con respecto al 2020, pero en los meses restantes se puede suministrar la demanda en su totalidad al igual que en el 2020. La probabilidad de falla mensual aumenta del 4% en el escenario base al 5% al escenario del año 2040.

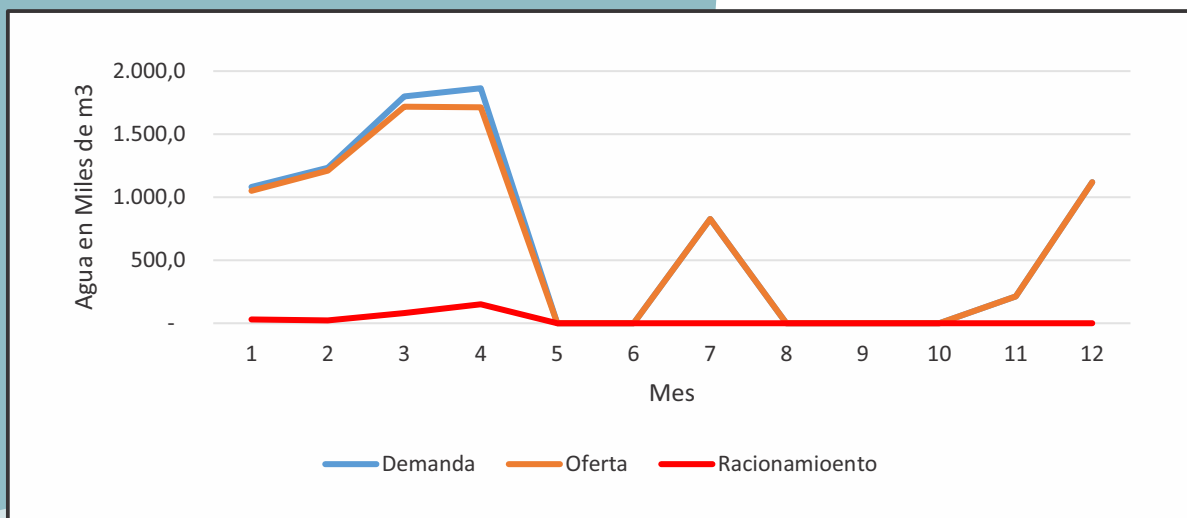


Figura. 30. Chamelecón. CC Demanda para Riego (Promedio mensual).

Las series de demanda y de oferta de los 35 años se presenta en la siguiente figura 31. Se observa que únicamente en 12 de los 35 años habría racionamiento, es decir, 34,3% de los años, pero como en el escenario base, con un racionamiento pequeño (el máximo racionamiento anual esperado sería de 1,7 Mm³ que es el 21% de la demanda).

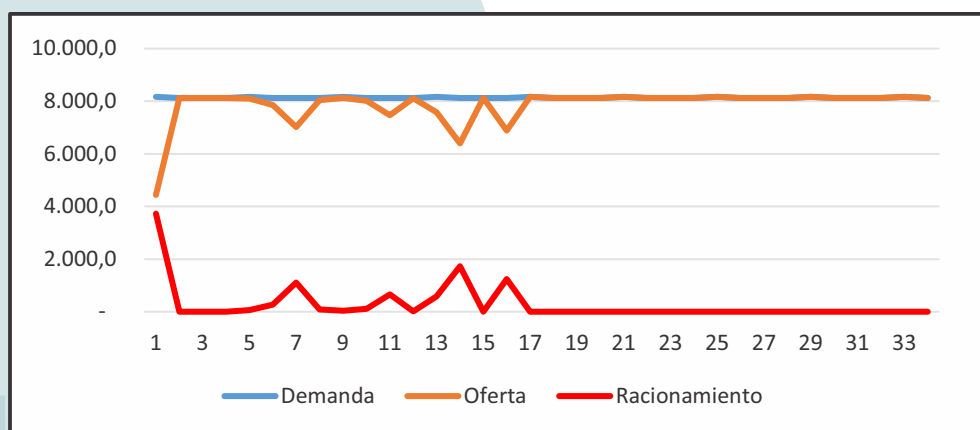


Figura. 31. Serie Anual Demanda Doméstica.

En cuanto al costo económico promedio de la producción y el racionamiento, la cuenca tiene un potencial de ingresos de US\$ 4,43 millones al año. Sin embargo, los ingresos esperados serían de US\$ 4,28 millones debido a los racionamientos. Existiría una pérdida promedio de US\$ 106.410 anuales debido a falta de regulación de caudales.

Demanda doméstica

La demanda doméstica de la cuenca asciende a 51 MMm³ por año. De las simulaciones se encontró que solo se podría entregar en promedio 37,5 MMm³ con lo que se tendría un racionamiento de 13,6. La serie histórica y el balance se muestran en la figura 32.

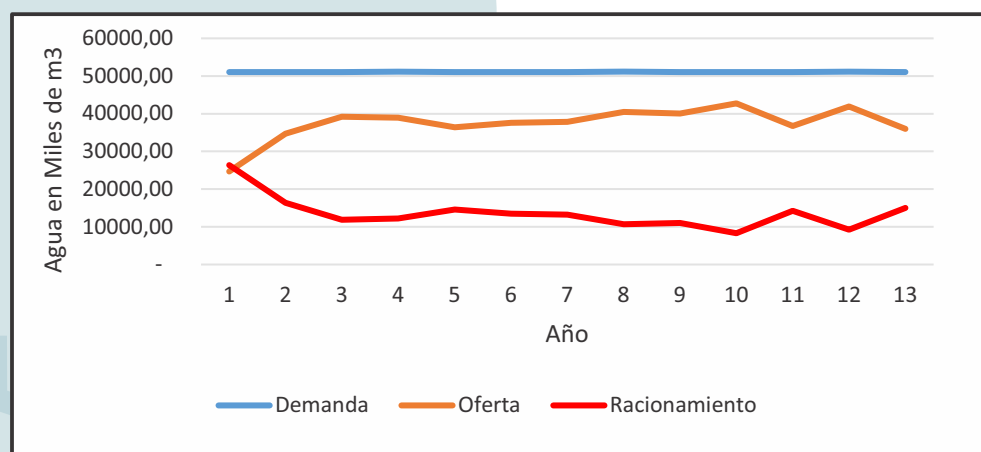


Figura. 32. Simulación de la Demanda para Riego (Año 2040)
Serie histórica de caudales con CC 1980-2014.

La distribución mensual sería:

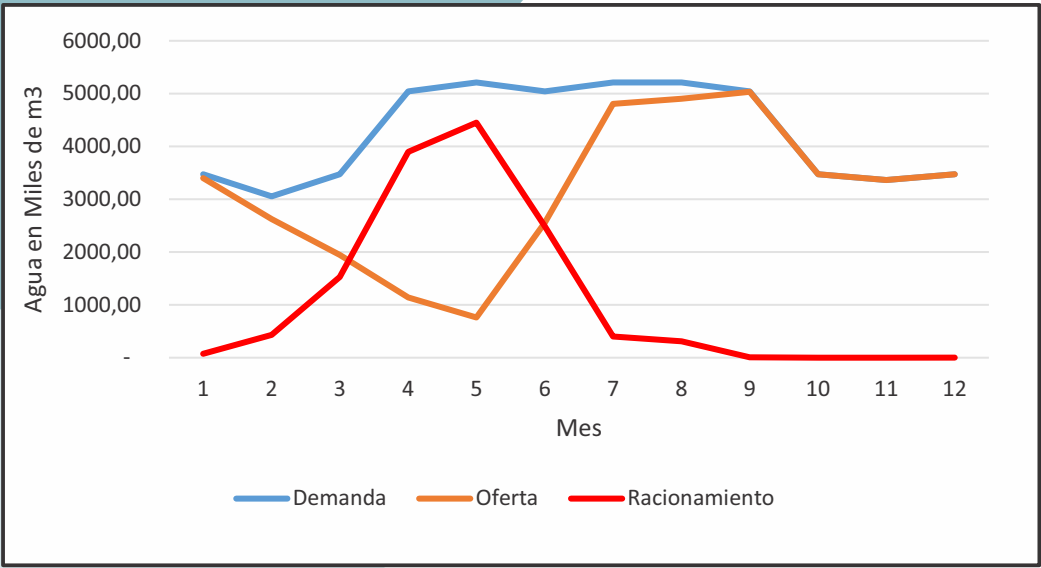


Figura. 33. Demanda Doméstica (promedio mensual).

Los racionamientos se presentan en promedio a partir del mes de febrero, hasta el mes de julio. Los meses de marzo a junio presentan una estación seca para la cual es necesario tener proyectos que permitan guardar el agua de la estación húmeda que va desde julio hasta febrero.



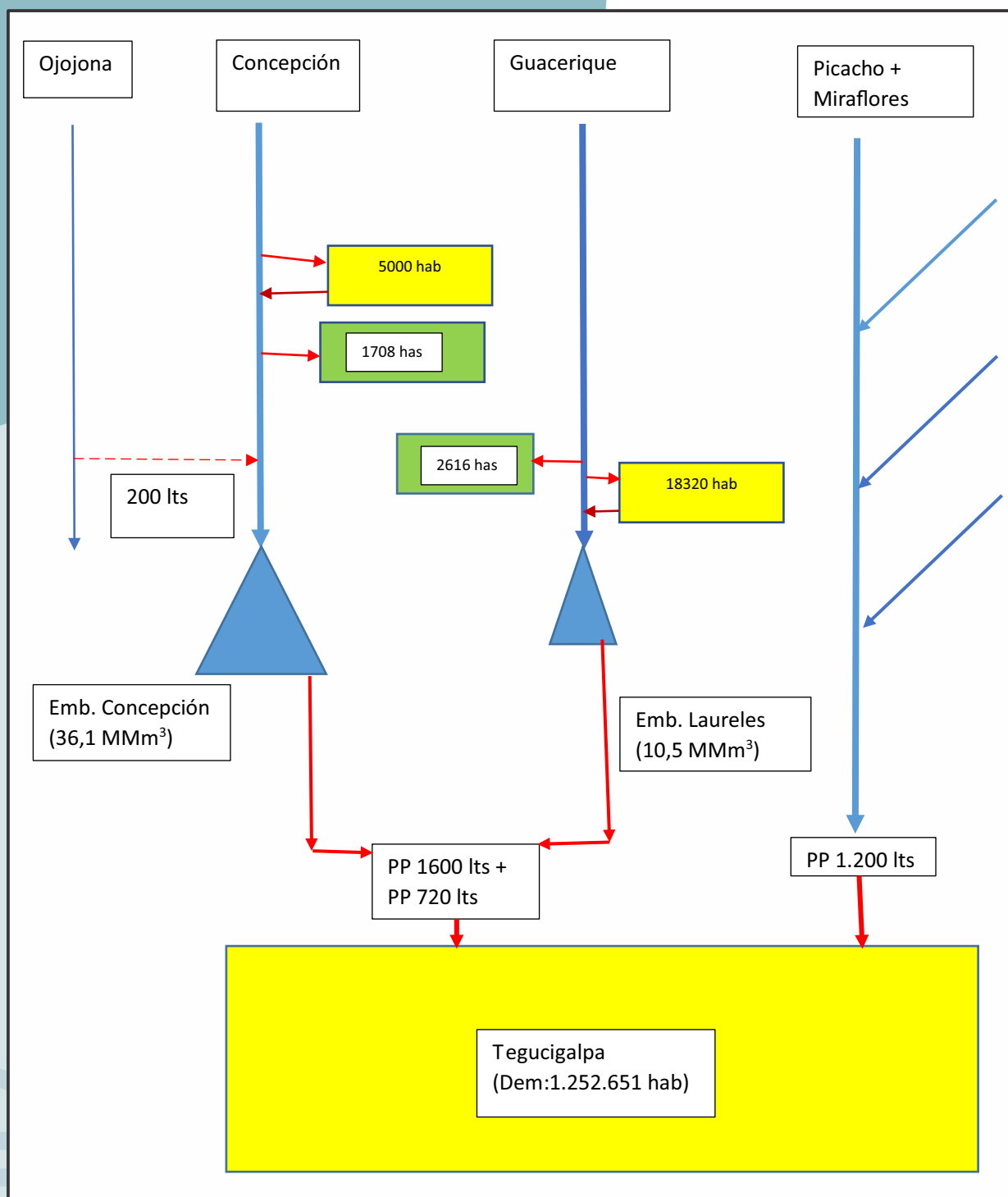


Figura.34. Esquema del servicio de agua potable de Tegucigalpa.

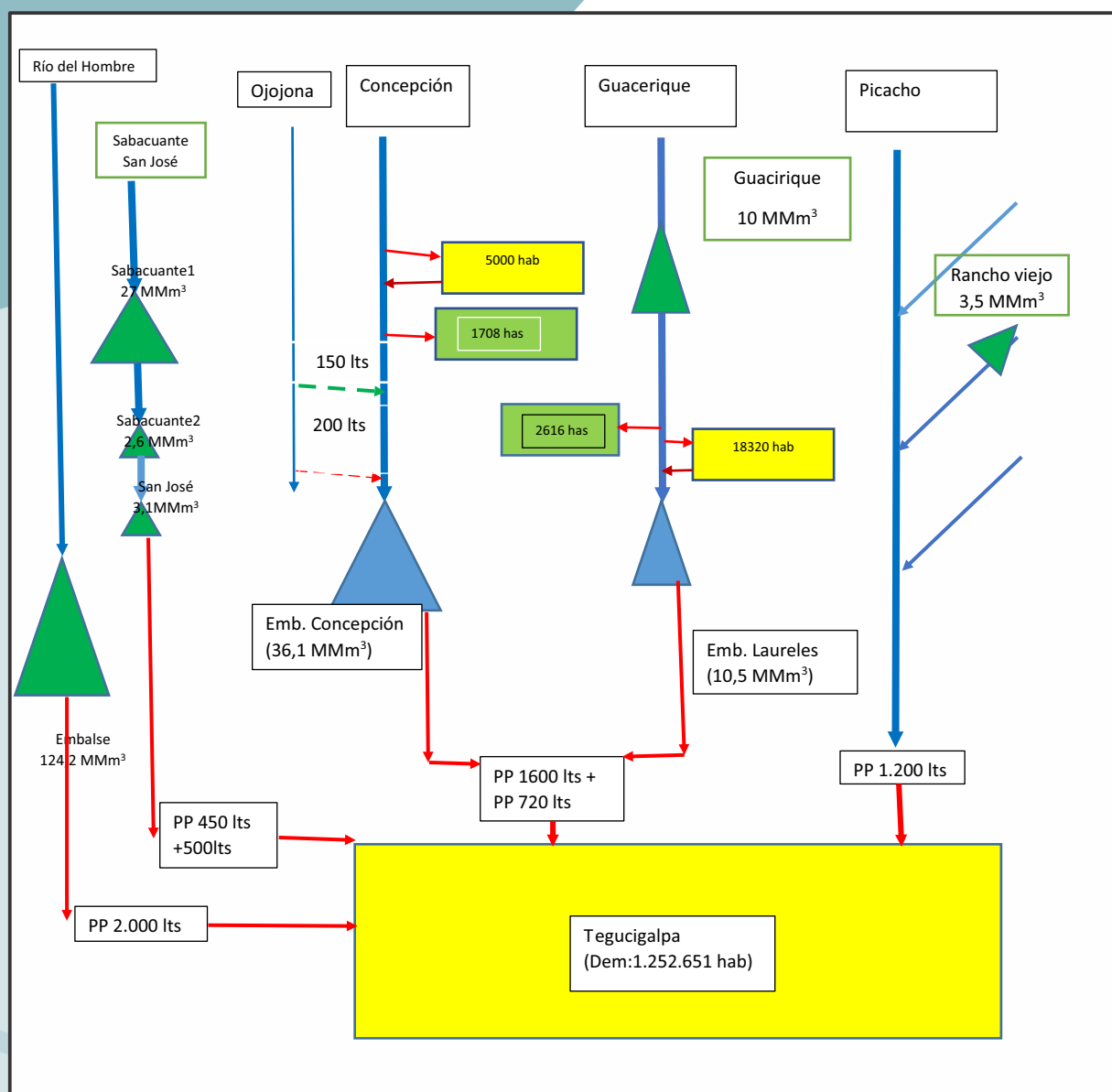


Figura.35. Esquema de los posibles proyectos para dar servicio de Agua Potable de Tegucigalpa.



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

