



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

**“DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO
DE UNA CUENCA UTILIZANDO EL MODELO GR4J”**

TESIS

**Que para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)**

Presenta

SANDRA JANET PALOMARES GARCÍA

Directora

DRA. CLAUDIA ROJAS SERNA

Codirector

DR. JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ VÁZQUEZ

Iztapalapa, Ciudad de México, noviembre de 2020

Resumen

La implementación de fuentes renovables de energía crea la necesidad de evaluar el potencial hidroeléctrico de un país para conocer la magnitud de posibles sitios de emplazamiento de proyectos orientados a pequeña escala. Este trabajo tiene por objetivo estimar el escurrimiento superficial de una cuenca haciendo uso del modelado matemático y herramientas de geoprocésamiento e identificar sitios potenciales para pequeñas centrales hidroeléctricas. La estructura del mismo es la siguiente:

En el Capítulo I se enumeran los objetivos generales y específicos del estudio.

En el Capítulo II se realiza una introducción con las características principales de la hidrogenación y el modelo global de lluvia-escurrimiento GR4J.

En el Capítulo III contiene una clasificación de modelos hidrológicos y se da una reseña de la evolución de las centrales hidroeléctricas en México hasta nuestros días y los últimos estudios desarrollados en la identificación del escurrimiento superficial y la hidrogenación.

El Capítulo IV introduce los principales conceptos en la definición de pequeñas centrales hidroeléctricas PCH y la legislación aplicable en la viabilidad en estos proyectos.

El Capítulo V describe las características físicas de la zona de estudio seleccionada en la Subregión hidrológica Grijalva-Villahermosa en la zona sierra o Bajo Grijalva-Sierra.

El Capítulo VI describe el funcionamiento del modelo global GR4J utilizado en la determinación de flujo superficial.

El Capítulo VII presenta el criterio de eficiencia de Nash y Sutcliffe utilizado como función objetivo en la evaluación de la eficiencia del modelo en los procesos de calibración y validación y se desarrolla el algoritmo de optimización de enjambre de partículas PSO.

El Capítulo VIII aborda la metodología. Se enumeran las estaciones climatológicas e hidrométricas con la información de la precipitación y evapotranspiración potencia dentro de la zona de estudio delimitada con ayuda del modelo digital de elevación DEM obtenido con herramientas de geoprocésamiento. Se describen las condiciones iniciales del modelo GR4J y la metodología utilizada en el proceso de calibración y validación. Para la identificación de los sitios potenciales se presentan los criterios de selección y el método en el cálculo del potencial hidroeléctrico.

El Capítulo IX muestra los resultados obtenidos. Se presenta el caudal ecológico y los caudales calculados con los parámetros validados del modelo de los sitios identificados, trazando la curva de duración de caudales CDC. Con éstas CDC, se identifica el gasto equivalente al 90 % aplicable en la determinación del potencial hidroeléctrico. Se hace un análisis de las simulaciones realizadas con la herramienta HEC-GeoRAS de los sitios identificados.

En el Capítulo X se presentan las principales conclusiones del estudio. La simulación permitió obtener valores de gastos en un rango de 0.28 a 6.05 m³/s. En total se eligieron 13 sitios, con potencial hidroeléctrico global máximo en la cuenca Oxolotán de 3367.79 kW y el mínimo en la cuenca Teapa con 410.99 Kw.

Palabras clave: modelo GR4J, pequeña central hidroeléctrica PCH, potencial hidroeléctrico.

Abstract.

The implementation of renewable energy sources creates the need to assess the hydroelectric potential of a country to know the magnitude of possible sites for the placement of small-scale projects. The objective of this work is to estimate the surface runoff of a basin using mathematical modeling and geoprocessing tools and to identify potential sites for small hydroelectric power plants. Its structure is as follows:

Chapter I lists the general and specific objectives of the study.

Chapter II introduces the main characteristics of hydrogeneration and the global rainfall-runoff model GR4J.

Chapter III contains a classification of hydrological models and provides an overview of the evolution of hydroelectric plants in Mexico to this day and the latest studies carried out in the identification of surface runoff and hydrogeneration.

Chapter IV introduces the main concepts in the definition of small PCH hydroelectric plants and the applicable legislation in the viability of projects.

Chapter V describes the physical characteristics of the selected study area in the Grijalva-Villahermosa or Bajo Grijalva hydrological region.

Chapter VI describes the operation of the GR4J global model used in determining surface flow.

Chapter VII presents the Nash and Sutcliffe efficiency criterion used as an objective function in evaluating the efficiency of the model in the calibration and validation processes and develops the PSO particle swarm optimization algorithm.

Chapter VIII addresses the methodology. The climatological and hydrometric stations are listed with the information of the precipitation and power evapotranspiration within the study area delimited with the help of the DEM digital elevation model obtained with geoprocessing tools. The initial conditions of the GR4J model and the specifications of parameters in the calibration and validation process are described. For the identification of potential sites, the selection criteria and the method for calculating the hydroelectric potential are presented.

Chapter IX shows the results obtained. The ecological flow and the flows calculated with the validated parameters of the model of the identified sites are presented, tracing the flow duration curve with the latter, identifying the expenditure equivalent to 90% applicable in the determination of the hydroelectric potential. An analysis is made of the simulations performed with the HEC-GeoRAS tool of the identified sites.

Chapter X presents the main conclusions of the study. The simulation allowed obtaining cost values in a range of 0.28 to 6.05 m³ / s. In total 13 sites were chosen, with maximum global hydroelectric potential in the Oxolotán basin of 3367.79 KW and the minimum in the Teapa basin with 410.99 KW.

key words: GR4J, rainfall runoff model, Small Hydroelectric Plant SHP, hydropower potential

Índice general

I. Objetivos	8
I.1. Objetivo General.....	8
I.2. Objetivos específicos	8
II. Introducción	9
III. Antecedentes	10
III.1. Modelos hidrológicos	13
III.1.1. Modelos empíricos, conceptuales o basados en la física	14
III.1.2. Modelos deterministas o probabilísticos	15
III.1.3. Modelos globales, distribuidos y semidistribuidos	16
IV. Pequeñas centrales hidroeléctricas	20
IV.1. Potencial Hidroeléctrico Aprovechable	21
IV.2. Marco Normativo	23
IV.2.1. Ley General de Cambio Climático (LGCC).....	23
IV.2.2. Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (LOAPF).....	23
IV.2.3. Ley de la Industria Eléctrica (LIE).....	24
IV.2.4. Ley de Transición Energética (LTE)	24
IV.2.5. Ley de Aguas Nacionales (LAN)	24
IV.2.6. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).....	25
IV.2.7. Ordenamientos Ecológicos.....	25
V. Zona de estudio	25
V.1. Subregión Hidrológica Bajo Grijalva (Sierra)	25
V.2. Fisiografía	27
V.3. Clima	29
V.4. Edafología	29
V.5. Vegetación	30
V.6. Hidrología	31
VI. Modelo GR4J	33
VI.1. Descripción del modelo GR4J	33
VI.2. Descripción de las ecuaciones	35
VII. Calibración y validación	39
VII.1. Función objetivo	40
VII.2. Algoritmo de Optimización	41

VII.2.1.	Algoritmos evolutivos.....	41
VII.2.2.	Optimización por enjambre de partículas (PSO)	41
VIII.	Metodología	43
VIII.1.	Delimitación de la zona de estudio	43
VIII.2.	Datos climáticos e hidrométricos	44
VIII.3.	Homogeneidad e independencia.....	46
VIII.4.	Evapotranspiración potencial (ETP).....	46
VIII.5.	Condiciones iniciales del modelo GR4J	48
VIII.6.	Calibración y validación	48
VIII.7.	Criterios para la identificación de sitios.....	50
VIII.8.	Potencial hidroeléctrico.....	52
VIII.8.1.	HEC-GeoRas.....	53
IX.	Resultados	54
IX.1.	Evapotranspiración potencial (ETP)	54
IX.2.	Caudal ecológico	55
IX.3.	Simulación del modelo GR4J en el proceso de calibración	62
IX.4.	Simulación con el modelo GR4J en el proceso de validación	62
IX.5.	Potencial hidroeléctrico de la cuenca Oxolotán.....	66
IX.6.	Potencial hidroeléctrico de la cuenca Pichucalco.....	70
IX.7.	Potencial hidroeléctrico de la cuenca Puyacatengo	73
IX.8.	Potencial hidroeléctrico de la cuenca Teapa.....	75
X.	Conclusiones.....	79
XI.	Referencias	81
	<i>Anexo A Prueba de Homogeneidad.....</i>	<i>88</i>
	<i>Anexo B Prueba de Independencia de Anderson.....</i>	<i>89</i>

Índice de tablas

<i>Tabla IV.1 Clasificación de PCH (Ortíz Flores, 2011)</i>	20
<i>Tabla VI.1 Parámetros del modelo GR4J</i>	35
<i>Tabla VII.1 Valores de referencia del Criterio de Eficiencia de Nash y Sutcliffe</i>	40
<i>Tabla VIII.1 Estaciones climatológicas en la zona de estudio</i>	45
<i>Tabla VIII.2 Estaciones hidrométricas en la zona de estudio</i>	46
<i>Tabla VIII.3 Sitios potenciales por cuenca delimitada</i>	52
<i>Tabla IX.1 Periodo por cuenca de estudio</i>	54
<i>Tabla IX.2 Objetivo ambiental de las cuencas de estudio</i>	55
<i>Tabla IX.3 Frecuencia de ocurrencia de los regímenes de caudales ordinarios estacionales</i>	56
<i>Tabla IX.4 Volumen anual en hm³/año de acuerdo con el objetivo ambiental clase “B”</i>	57
<i>Tabla IX.5 Volumen anual en hm³/año de acuerdo con el objetivo ambiental clase “A”</i>	57
<i>Tabla IX.6 Criterios de integración de avenidas tipo a partir de sus frecuencias de ocurrencia según los objetivos ambientales</i>	60
<i>Tabla IX.7 Resultado de caudal ecológico para eventos de avenidas para la cuenca Oxolotán</i>	60
<i>Tabla IX.8 Resultado de caudal ecológico para eventos de avenidas para la cuenca Pichucalco</i>	61
<i>Tabla IX.9 Resultado de caudal ecológico para eventos de avenidas para la cuenca Puyacatengo</i>	61
<i>Tabla IX.10 Resultado de caudal ecológico para eventos de avenidas para la cuenca Teapa</i>	61
<i>Tabla IX.11 Resultados en el periodo de calibración</i>	62
<i>Tabla IX.12 Resultados en el periodo de validación</i>	63
<i>Tabla IX.13 Comparación del potencial hidroeléctrico en la cuenca Oxolotán con resultados de la simulación con datos históricos y con presa</i>	67
<i>Tabla IX.14 Comparación de potencial hidroeléctrico en la cuenca Pichucalco con resultados de la simulación con datos históricos y con presa</i>	71
<i>Tabla IX.15 Comparación del potencial hidroeléctrico en la cuenca Puyacatengo con resultados de la simulación con datos históricos y con presa</i>	73
<i>Tabla IX.16 Comparación del potencial hidroeléctrico en la cuenca Teapa con resultados de la simulación con datos históricos y con presa</i>	76
<i>Tabla IX.17 Concentrado de índices hidroenergéticos</i>	78

Índice de figuras

<i>Figura III.1 Capacidad instalada de PCH por región</i>	12
<i>Figura III.2 Países líderes en el desarrollo de PCH</i>	12
<i>Figura III.3 Capacidad instalada por energía limpias en México</i>	12
<i>Figura V.1 Región Hidrológica RH30 Grijalva Usumacinta (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de información topográfica, 2017)</i>	26
<i>Figura V.2 Subcuencas hidrológicas de estudio (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de información topográfica, 2017)</i>	27
<i>Figura V.3 Subprovincias fisiográficas (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de provincias fisiográficas, 2008)</i>	28
<i>Figura V.4 Fisiografía (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de información topográfica, 2008)</i>	28
<i>Figura V.5 Unidades Climáticas (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de unidades climáticas, 2008)</i>	29
<i>Figura V.6 Edafología (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales edafología, 2008)</i>	30
<i>Figura V.7 Vegetación (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, 2017)</i>	31
<i>Figura V.8 Hidrología (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de información topográfica, 2017)</i>	33
<i>Figura VI.1 Modelo GR4J</i>	39
<i>Figura VIII.1 Delimitación de las cuencas de estudio con salida a la estación hidrométrica (elaboración propia, fuente INEGI, datos vectoriales topográficos 2017)</i>	44
<i>Figura VIII.2 Diagrama de flujo del algoritmo PSO (elaboración propia)</i>	50
<i>Figura VIII.3 Sitios con potencial hidroeléctrico (elaboración fuente INEGI datos vectoriales, 2017)</i>	51
<i>Figura IX.1 ETP acumulada por cuenca</i>	54
<i>Figura IX.2 Distribución estadística para identificar la magnitud de las avenidas de las cuencas de estudio</i>	59
<i>Figura IX.3 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Oxolotán</i>	64
<i>Figura IX.4 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Pichucalco</i>	64
<i>Figura IX.5 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Puyacatengo</i>	65
<i>Figura IX.6 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Tapijulapa</i>	65
<i>Figura IX.7 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Teapa</i>	66
<i>Figura IX.8 Comparación del potencial hidroeléctrico en la cuenca Oxolotán con resultados de la simulación con datos históricos y con presa</i>	67
<i>Figura IX.9 Simulación del sitio 696</i>	68
<i>Figura IX.10 Simulación del sitio 1047</i>	68
<i>Figura IX.11 Simulación del sitio 1524</i>	69

<i>Figura IX.12 Simulación del sitio 2084</i>	69
<i>Figura IX.13 Curva de duración de caudales de los sitios seleccionados en la cuenca Pichucalco</i>	70
<i>Figura IX.14 Simulación del sitio 2326</i>	71
<i>Figura IX.15 Simulación del sitio 2610</i>	72
<i>Figura IX.16 Simulación del sitio 3008</i>	72
<i>Figura IX.17 Curva de duración de caudales de los sitios seleccionados en la cuenca Puyacatengo</i>	73
<i>Figura IX.18 Simulación del sitio 625</i>	74
<i>Figura IX.19 Simulación del sitio 925</i>	74
<i>Figura IX.20 Curva de duración de caudales de los sitios seleccionados en la cuenca Teapa</i>	75
<i>Figura IX.21 Simulación del sitio 1060</i>	76
<i>Figura IX.22 Simulación del sitio 1197</i>	77
<i>Figura IX.23 Simulación del sitio 1434</i>	77
<i>Figura IX.24 Simulación del sitio 1591</i>	78

I. Objetivos

I.1. Objetivo General

- I. Determinar el potencial hidroeléctrico de la Subregión Hidrológica del Río Grijalva-Villahermosa Sierra.

I.2. Objetivos específicos

- I. Estimar el escurrimiento superficial diario con el modelo GR4J en las cuencas de la Subregión Hidrológica del Río Grijalva-Villahermosa Sierra.

- II. Identificar los sitios potenciales para pequeñas centrales hidroeléctricas en la Subregión Hidrológica Bajo Grijalva Sierra.

II. Introducción

La disponibilidad de energía eléctrica es un factor estratégico en el desarrollo de los países. A partir del protocolo de Kioto en 1997 se estableció la necesidad de disminuir los gases de efecto invernadero (GEI) lo que impulsa el desarrollo de energías renovables y amigables con el medio ambiente.

Dentro de las medidas para reducir las emisiones de los GEI entre estos el CO₂ producido en gran medida en la generación de energía eléctrica, los gobiernos han propuesto cambios en el sector energético que ayude a disminuir la dependencia de combustibles fósiles, a través de la utilización de energías renovables adoptando un modelo sustentable.

La energía hidroeléctrica se considera limpia, renovable y eficiente, además de ser un medio para generar electricidad en zonas remotas a través de minicentrales hidroeléctricas (Kusre et al., 2010) (Pandey et al., 2015). Para su aprovechamiento se requiere de una planeación a través de la evaluación del recurso hídrico.

Evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca a partir de la precipitación, ayuda en la gestión del recurso hídrico para determinar la disponibilidad del recurso en sus diferentes usos. En el sector energético, el conocimiento de los escurrimientos de una cuenca contribuye en la planeación de proyectos que impulsen el desarrollo en la generación de energía renovable en hidroeléctricas (Meza-Prieto & Aparicio Mijares, 2018).

Para evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca debido a la precipitación, los modelos hidrológicos representan una valiosa herramienta. Un modelo para el análisis del flujo superficial es el GR4J (Génie Rural Journalier a 4 paramètres), perfeccionado por Perrin (2003). Este modelo es resultado de analizar 1111 cuencas ubicadas en Costa de Marfil, Brasil, México, Francia, Estados Unidos y Australia, extrapolándose aún en aquellas no aforadas (Rojas Serna, 2005). Este análisis del modelo en cuencas con características climáticas y físicas diversas ha permitido una aplicación global sin restricciones y ser estadísticamente equivalente a muchos modelos de la literatura.

El presente estudio provee el análisis de sitios potenciales para hidrogenación con almacenamiento a pequeña escala, dentro de la subregión hidrológica Bajo Grijalva o

Grijalva-Villahermosa, donde se ubican los ríos con nacimiento en la Sierra Norte de Chiapas: Pichucalco, de la Sierra, Tacotalpa, Almendro, Puxcatán, Tulijá, Chilapa, Chilapilla, ríos que presentan desbordamientos frecuentes y el mayor número de inundaciones en el país (SEMARNAT, 2010), por lo cual se busca proveer además una alternativa encaminada a colaborar en la mitigación de inundaciones en las zonas vulnerables.

III. Antecedentes

El aprovechamiento de los ríos en la generación de energía se inicia a finales del siglo XIX con la primera hidroeléctrica construida en el continente americano, en Appleton, Wisconsin en 1882 (Ramos-Gutiérrez & Montenegro-Fragoso, 2012). En México, para 1889 se empiezan a utilizar las pendientes de los ríos para abastecer de energía al sector minero. Las plantas hidroeléctricas fueron construidas para satisfacer necesidades de autoconsumo en la industria y alumbrado público, iniciando en la ciudad de Puebla (Ibañez González, 2017).

El aprovechamiento de los recursos hídricos a través de la captación del agua en embalse se tuvo por primera vez en el año de 1900 en el río Necaxa para cubrir las necesidades industriales, aunque derivado del movimiento revolucionario de 1910, muchas actividades como la creación de nuevas hidroeléctricas tuvieron un receso que se reanudó al finalizar este conflicto. Sin embargo, sin legislación en materia energética, las empresas extranjeras eran las principales dueñas de las concesiones del servicio. La empresa American and Foreign Power Company adquirió en 1928 las plantas de energía establecidas en todo el territorio, excepto en el Valle de México, manteniendo el dominio casi total del servicio en el país en conjunto con la Mexican Light and Power Company, Ltd. (Ramos-Gutiérrez & Montenegro-Fragoso, 2012). Al llegar a la presidencia el Gral. Lázaro Cárdenas del Río en 1937 firmó un decreto mediante el cual se crea la Comisión Federal de Electricidad (CFE) encargada de generar, distribuir y comercializar la energía eléctrica en territorio nacional. Finalmente, en 1960 tras la adquisición de la parte mayoritaria de las acciones a las empresas privadas y la adición al art. 27 de la Constitución en materia del servicio energético por parte del Estado sin concesiones a particulares, se nacionalizó el servicio eléctrico (CEMIE-Oceano, 2019).

En el periodo 1946-1952, con la creación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) se abre la participación del gobierno en impulsar los proyectos hidráulicos aprovechando los avances tecnológicos. De esta manera, se inicia la más productiva construcción de obras hidráulicas; en los años cincuenta las plantas hidroeléctricas de Santa Bárbara, Tingambato, Temascal, Cóbano y Oviachic. El Fuerte, Novillo, Santa Rosa, Cupatitzio, Mazatepec, Infiernillo y Malpaso se construyeron en las décadas de los sesenta y para los años setenta las centrales Humaya, Villita y Angostura. Las hidroeléctricas Chicoasén, Caracol, Peñitas, Amistad y Bacurato se finalizaron en la década de los ochentas. Para fines del siglo XX se terminan las centrales hidroeléctricas Agua Prieta, Aguamilpa Solidaridad, Colina, Luis Donaldo Colosio, Fernando Hiriart Balderrama y además se emite la Ley de la Industria Eléctrica, vigente hasta el día de hoy, en diciembre de 1992.

En este siglo existen dos grandes proyectos hidroeléctricos en la cuenca del río Santiago en México, El Cajón que entró en operación en 2007 y La Yesca en 2012, uno de los mayores proyectos en energía hidroeléctrica en el Estado de Nayarit (Ramos-Gutiérrez & Montenegro-Fragoso, 2012). De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL) a 2016, México cuenta con 103 proyectos hidráulicos en los sectores público y privado para generación hidroeléctrica con una capacidad instalada de 12,623 MW (SENER, 2016).

Datos presentados por la International Renewable Energy Agency (IRENA) en 2015, indican que la energía hidroeléctrica a nivel mundial comprende el 70.4% de la generación anual con 3,898,980.88 GWh y el 59.4% de la capacidad instalada con 1,098,279.76 MW (IMTA, 2017). Las pequeñas centrales hidroeléctricas dentro de este análisis, comprenden el 1.9% de la capacidad total de energía, el 7% dentro de las energías renovables y el 6.5% del total de la capacidad hidroeléctrica instalada. La capacidad instalada de PCH por región se indica en la Figura III.1. Algunos países que destacan en generación hidroeléctrica se encuentran China, ocupando el primer lugar con un 51% de la potencia instalada, seguido por Japón, Italia, Noruega y los Estados Unidos de América como indica la Figura III.2 (ONUDI, 2016).

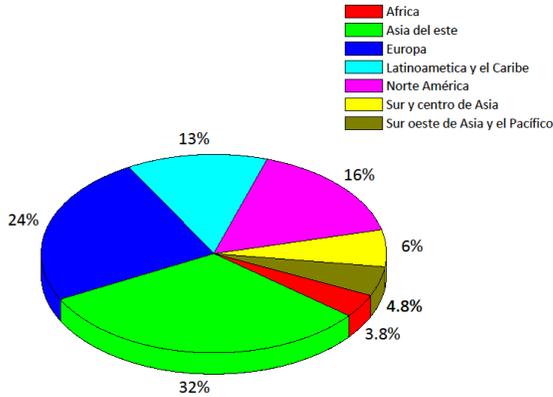


Figura III.1 Capacidad instalada de PCH por región

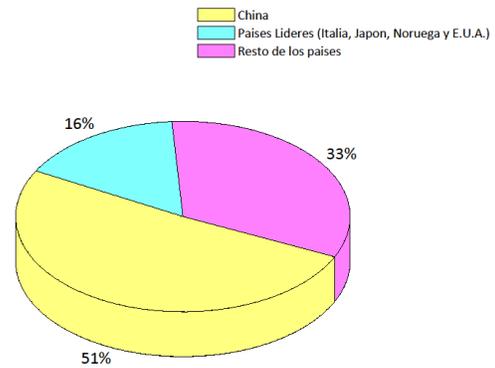


Figura III.2 Países líderes en el desarrollo de PCH

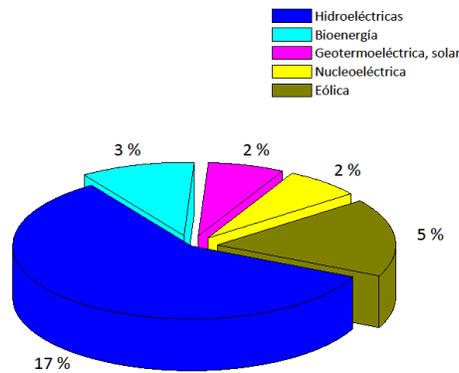


Figura III.3 Capacidad instalada por energía limpias en México

La generación de energía eléctrica proveniente de pequeñas centrales en países europeos como Austria, Italia, Francia, España y Alemania cuentan con una producción mayor a 5000 GWh, lo que indica grandes posibilidades de desarrollo de las pequeñas centrales hidroeléctricas a nivel mundial (Espejo Marín, García Marín, & Aparicio Guerrero, 2017).

En México, de acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional PRODESEN 2017-2031, el 28.8 % de la energía proviene de energías limpias y de ésta el 17% corresponde a la energía hidroeléctrica Figura III.3. La meta para 2024 consiste en tener una capacidad instalada de energías limpias del 35 %, para 2030 del 37.7 % y

finalmente para 2050 del 50 % enmarcada en la Ley de Transición Energética. Con la finalidad de cumplir con los tres objetivos en materia energética en conjunto con la Ley General del Cambio Climático (LGCC) que son: aprovechamientos sustentables de la energía, incremento gradual de las energías limpias y la reducción en la generación de emisiones contaminantes, se ha incrementado la innovación de tecnologías que impulsen el desarrollo en el sector energético y la investigación en las diferentes energías renovables (eólico, solar, geotérmico, hidráulico, oceánico).

Los registros de gastos en una cuenca son básicos en el estudio de proyectos de obras hidráulicas asociadas a periodos de retorno, particularmente en la obtención de avenidas de diseño en el dimensionamiento de obras hidráulicas (Chow, et al. 1994). Cuando no existen estaciones de aforo en los cauces se determinan los escurrimientos utilizando modelos lluvia-escurrimiento después de establecer las variables involucradas que intervienen en la generación de escurrimiento como son: área de la cuenca, las características físicas de la cuenca y la distribución espaciotemporal de la precipitación en la cuenca (Cahuana Andia & Yugar Morales, 2009).

Un modelo lluvia-escurrimiento adecuado permitirá una buena estimación anticipada de los escurrimientos para determinar los caudales que ayuden en la gestión del recurso hídrico, en materia de seguridad hídrica o en la planeación de proyectos hidráulicos que impulsen entre otros el sector energético. Estos modelos han evolucionado desde sus inicios en los años cincuenta, como resultado de un proceso continuo de mejora en los parámetros mínimos, la distribución espacial de la precipitación y la representación física de los componentes del ciclo hidrológico, entre otros que caractericen una cuenca satisfactoriamente y de manera eficiente.

III.1. Modelos hidrológicos

De manera general los modelos de cuenca pueden ser agrupados en dos categorías (Ponce, 1989) (Singh, 2017):

- 1.- Un modelo material como la representación física del prototipo.
- 2.- Un modelo formal que es una abstracción matemática de una situación idealizada que preserva las propiedades estructurales importantes del prototipo, también llamados modelos

matemáticos. Definiendo un modelo matemático como la simplificación de un sistema complejo gobernado por leyes físicas representado por ecuaciones. (Ponce, 1989).

En un proceso de modelación matemática de cuenca, el primer paso consiste en establecer un modelo perceptual, es decir, decidir los principales procesos más relevantes que intervienen en la generación de flujo (características del suelo, evapotranspiración, infiltración, flujo subsuperficial, etc.). El segundo paso consiste en la construcción del modelo conceptual que ayudarán a perfeccionar las relaciones de los elementos del sistema a modelar (Gray & A., 2017). Además, permite establecer los procesos y variables relacionadas por medio de ecuaciones. En el paso tres es necesario simplificar las ecuaciones fundamentales definidas con la finalidad que puedan ser procesadas por un sistema de cómputo, este modelo se denomina modelo procedimental. El cuarto y quinto paso es la prueba del modelo mediante el proceso de calibración y validación respectivamente. (Ponce, 1989) (Cabrera, 2012) (Beven, 2012).

El término modelo conceptual también se utiliza en la literatura para indicar un modelo basado en una colección de elementos de almacenamiento como se describirá más adelante (Beven, 2012).

Los modelos de captación se han clasificado en la literatura de diferentes maneras, dentro de las características principales para distinguirlos destacan (Daniel, et. al, 2011) (Beven, 2012) (Singh, 2017):

- 1.- La naturaleza de los algoritmos empleados (empíricos, conceptuales o basados en la física).
- 2.- El concepto de principios utilizados en la entrada del modelo o la especificación de parámetros (deterministas o estocásticos).
- 3.- Representación espacial (agrupada o distribuida).

III.1.1. Modelos empíricos, conceptuales o basados en la física

Los modelos empíricos o caja negra consisten en una relación significativa entre las entradas y salidas sin describir el funcionamiento interno de los procesos que intervienen (Cabrera, 2012)(Amir, et al., 2013). Utiliza ecuaciones matemáticas derivadas de series de tiempo de

entrada y salida y no de los procesos físicos de la cuenca. Dichos modelos abarcan desde modelos de regresión hasta aquellos basados en hidroinformática (Daniel, et al., 2011) (Devia, Ganasri, & Dwarakish, 2015).

Los modelos conceptuales en hidrología representan una vista conceptual de los procesos involucrados en la transformación lluvia - escurrimiento evaluando los parámetros más relevantes que intervienen en la salida final de flujo (precipitación, evapotranspiración, clima, uso de suelo). Su estructura se basa en una serie de almacenamientos en el que cada uno representa un elemento del sistema hidrológico. Estos almacenamientos se encuentran interconectados a través de un módulo de enrutamiento encargado de distribuir el agua al flujo final de salida. La cascada de reservorios lineales es un ejemplo típico de modelo conceptual (Ponce, 1989) (Pechlivanidis, et al., 2011) (Singh, 2017).

El uso extensivo de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias. De allí que los modelos conceptuales son sustitutos útiles y prácticos para los modelos determinísticos (Ponce, 1989)

En el modelo de base física los procesos físicos involucrados en la transformación de lluvia a escurrimiento se representan de forma determinista mediante las representaciones de los principios de transferencia de masa, momento y energía en la cuenca. que se determinan resolviendo las ecuaciones diferenciales parciales mediante métodos numéricos generalmente por diferencias finita o una discretización espacial de elementos finitos, con condiciones de contorno e iniciales (Daniel, et al., 2011)(Pechlivanidis, et al., 2011) (Singh, 2017).

III.1.2. Modelos deterministas o probabilísticos

Los modelos deterministas se basan principalmente en leyes físicas y/o sus simplificaciones (Singh, 2017). El resultado de estos modelos se puede obtener además de relaciones conocidas entre estados y eventos (Daniel, et al., 2011).

Los modelos probabilísticos se rigen por la probabilidad y son de dos tipos, estadísticos y estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas (por

ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio). El desarrollo de modelos estadísticos requiere el uso de datos a diferencia de los modelos estocásticos, que enfatizan las características estocásticas de los procesos hidrológicos (Ponce, 1989)(Daniel, et al., 2011).

III.1.3. Modelos globales, distribuidos y semidistribuidos

En los modelos globales o agregados se considera a la cuenca como una unidad homogénea sin variación espacial alguna en los que los parámetros y variables que se promedian sobre el área de captación. (Daniel, et al., 2011) (Beven, 2012).

Los semidistribuidos y distribuidos se consideran de acuerdo con el nivel de desagregación de la cuenca, de esta manera las mayormente detalladas en el espacio son los distribuidos. Los modelos distribuidos discretizan el espacio en elementos más pequeños, habitualmente en una malla regular en la cual resuelven las ecuaciones discretizadas para las variables de estado asociadas con cada cuadrícula de elementos. Cada elemento representa el promedio local de almacenamiento y considera la influencia del espacio adyacente (Pechlivanidis, Jackson, & Mcintyre, 2011) (Beven, 2012)(García-Marín, et al., 2014).

En el modelado de cuenca desde sus inicios en 1950 se han construido modelos que continúan mejorando. El primer modelo de cuenca fue el modelo Stanford Watershed, desarrollado en 1966 por Crawford y Linsley. Desde entonces, se han desarrollado numerosos modelos. Algunos de estos son: ADAPT, AnnAGNPS, ANSWERS-2000, APEX, BASINS, CANWET, CASC2D, CREAMS, DWSM, EPIC, HBV, HSPF, el modelo distribuido del Instituto de Hidrología, KINEROS, MIKE 11, MIKE SHE, NTRM, NWSRFS, PRMS, RORB, SIMPLE, SLURP, SPUR-91, SRM, SSARR, SWAT, SWMM, SWRRB, el modelo Tank, THALES, TOPMODEL, el modelo UBC Watershed y el modelo Xinanjiang (Oogathoo, 2006).

Debido a la gran cantidad de modelos existentes, se describirán brevemente los modelos HEC- HMS, SWAT, Hec Ressim y GR4J citados en este trabajo.

El modelo HEC-HMS (Sistema de Modelado Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica) simular procesos hidrológicos (flujo base, transformación precipitación-

escorrentía). Se ha utilizado principalmente para análisis de inundaciones, restauración de arroyos e impactos sobre los cambios en el uso de la tierra (Oogathoo, 2006) (Halwatura & Najim, 2013) (Daniel, et al., 2011). Este es un modelo agrupado y puede ser de base física o empírico, dependiendo del método utilizado para la simulación del hidrograma (Amir, et al., 2013). Otras limitaciones son que cuenta con modelos desacoplados para evapotranspiración-infiltración y procesos de flujo de la base de infiltración (Daniel, y otros, 2011).

Hec-Ressim es un modelo de simulación de embalses que ha sido desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, para ayudar a predecir el comportamiento de un embalse y de acuerdo a esto determinar las salidas de agua durante la operación, está formado de tres Módulos que intervienen en la simulación, cada modelo cuenta con acceso a un tipo específico de datos dentro de una cuenca. Estos módulos son Configuración de cuencas hidrográficas, Red de embalses y Simulación (Klipsch & Evans, 2006).

SWAT es un modelo de cuenca semidistribuidos basado en la física y fue diseñado para predecir el impacto de la gestión en el rendimiento de agua, sedimentos y productos químicos agrícolas en cuencas hidrográficas. El proceso que realiza en la cuenca a modelar, consiste en dividirla en múltiples subcuencas que luego se subdividen en unidades hidrológicas de respuesta HRU que hacen uso homogéneo de la tierra y las características del suelo. SWAT posee componentes que lo convierten en una herramienta para simular dinámicas de calidad del agua en el flujo, destino y transporte de bacterias y de sedimentos. Un estudio en una cuenca ubicada en Georgia, Estados Unidos, mostró que el modelo proporciona buenos resultados mensualmente, pero estimaciones menos precisas en un paso de tiempo diario (Oogathoo, 2006) (Singh, 2018). Además, Daniel, et al. (2011) detectaron que debido a la división en HRU, no simula adecuadamente tormentas de un solo evento.

Perrin (2003) evaluó 19 modelos determinando que utilizar entre tres a cinco parámetros eran suficientes y confiables en su estructura para mejorar su eficiencia, dando como resultado el modelo global diario de precipitación parsimonioso GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) que es un modelo mejorado del GR3J existente. Dentro de sus

características está la de considerar una cuenca como un solo elemento homogéneo, utiliza como variables de entrada se limitan a la serie de precipitaciones y evapotranspiración. También se ha aplicado para la gestión de presas y se ha utilizado para el desarrollo de un método variacional para la predicción del flujo de inundación. El modelo GR4J, en todos los estudios citados ha mostrado ser robusto (Japhet et al., 2018).

La elección del modelo dependerá de la disponibilidad de datos, características de la cuenca y del propósito del estudio. Por ejemplo, los modelos distribuidos son necesarios para la simulación de los patrones espaciales de respuesta hidrológica, mientras que los modelos conceptuales globales se han utilizado con éxito para evaluar la generación detallada de flujo superficial (Ocampo & Vélez, 2014) (Azmat et al., 2015).

El modelo GR4J ha sido calibrado para la cuenca del río Aburrá, en Colombia, con características de clima tropical, en la cual la precipitación es alta y cuenta con desarrollo urbano creciente, permitiendo su aplicación en cuencas con estas características para la determinación de caudales diarios (Carvajal & Roldán, 2007).

Otro análisis con modelos para generación de flujo con datos diarios se utilizó en la cuenca de Attanagalu Oya, usando datos de precipitación diarios en un periodo de 20 años de cinco estaciones climatológicas establecidas dentro del área de influencia de la cuenca y los datos mensuales de precipitación en ese mismo periodo. Los datos diarios del flujo del río de la estación de medición Dunamale de Attanagalu Oya se obtuvieron utilizando dos métodos: el hidrograma unitario de Snyder y el de Clark incluido dentro de la herramienta del programa HEC-HMS 3.4. El hidrograma unitario de Snyder resultó más confiable para simular caudales fluviales que el hidrograma unitario de Clark (Halwatura & Najim, 2013).

Un estudio para determinar el potencial hidroeléctrico en la región montañosa sub-Himalaya de la cuenca hidrográfica Umkhen de la cuenca Kopili en Assam en la India, fue evaluado por Kusre (2010) con el modelo hidrológico SWAT2000, utilizando la herramienta espacial SIG. En los resultados se estimaron 68 sitios potenciales, con un potencial teórico estimado total de 132.67 MW, dividido en microcuencas con potencial < 0.5 MW. La principal limitación encontrada en la simulación estuvo relacionada con la disponibilidad de datos, escasos por la ubicación en un lugar de alta montaña.

Dentro de los estudios que ayudan a evaluar posibles alteraciones en el flujo superficial y la hidrogenación debido al cambio climático, Shrestha et al. (2014) analizaron el cambio en los flujos de los ríos en la cuenca Kulekhani con el modelo HEC-HMS bajo dos escenarios climáticos proyectados a futuro y evaluó su impacto en la generación de energía eléctrica del proyecto Kulekhani Hydropower. Como datos de entrada del modelo hidrológico para estimar la descarga del río, utilizaron datos de precipitación y temperatura diaria de Departamento de Hidrología y Meteorología (DHM) de Nepal y tres estaciones climatológicas cercanas. A partir de ahí simularon la producción de energía hidroeléctrica con el programa Hec-Ressim bajo diferentes tiempos de operación y las proyecciones climáticas con el modelo general atmosférico-oceánico HadCM3 GCM. Encontraron en ambos escenarios, la disminución del flujo en los meses de mayo a septiembre durante la época de lluvias y un aumento en el tiempo de secas en comparación con los datos de referencia. En la simulación para analizar el cambio en la generación de energía, obtuvo una disminución de energía en los dos escenarios proyectados en comparación con datos de referencia.

Otros modelos distribuidos se han utilizado en la evaluación de sitios potenciales para la creación de centrales hidroeléctricas al hilo de agua. Pandey et al., (2015) evaluaron la generación de caudales con el modelo Arc-SWAT en la cuenca del río Mat, al sur de Mizoram, India. Con ayuda de sistemas de información geográfica y teledetección obtuvo resultados para la evaluación del potencial hidroeléctrico mediante la generación de flujo de treinta y tres sitios dentro de la cuenca.

Por su parte, Azmat et al., (2015) calcularon la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca de Mangla, en Pakistán, para analizar su impacto en la operación de la central minihidroeléctrica y del sistema de canales de riego aguas abajo. Utilizaron datos de teledetección de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), información disponible en línea de datos de precipitación diaria y temperatura media de 17 estaciones climatológicas, estimó el flujo diario con el paquete computacional HEC-HMS; en este modelo utilizaron de manera combinada el deshielo de las montañas del Himalaya y la precipitación directa que alimentan los canales de riego aguas abajo e inciden en el potencial hidroeléctrico de minicentrales a lo largo de esta red.

En México, Meza-Prieto y Aparicio (2018) emplearon el modelo hidrológico Soil Moisture Accounting (SMA), para conocer el caudal medio en cuencas no aforadas a partir de la

información climatológica e hidrométrica. Para realizar el procesamiento cartográfico de las cuencas hidrológicas y el cálculo de perfiles longitudinales de cauces recurrieron al programa computacional Arc Gis 10.1. Posteriormente calibraron y validaron el modelo hidrológico SMA usando el software HEC-HMS 4. En este estudio se identificaron 578 sitios factibles de micro, mini y pequeñas centrales hidroeléctricas. Adicionalmente, calcularon los costos del emplazamiento de una pequeña central hidroeléctrica al hilo de agua en la cuenca de Amacuzac.

IV. Pequeñas centrales hidroeléctricas

No existe un conceso general para definir una pequeña central hidroeléctrica. De acuerdo con la European Small Hydropower Association, atendiendo a su potencia que generan, países como Portugal, España, Irlanda, Grecia y Bélgica las clasifican de acuerdo con aquellas centrales con una potencia menor a los 10 MW. En Italia el límite está situado en los 3 MW y en Francia, el límite es de 12 MW (Espejo Marín, et al., 2017). En México se clasifican en micro centrales con una generación menor a 1 MW, minicentrales en el rango de 1 y 5 MW y pequeñas de 5 a 30 MW (IMTA, 2017).

Una clasificación por potencia y caída hidráulica establecida por la OLADE (Ortíz Flores, 2011) se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla IV.1 Clasificación de PCH (Ortíz Flores, 2011)

Tipo	Potencia (KW)	Caída (m)		
		Bajo	Medio	Alto
Picocentral	0.5-5			
Microcentral	5 - 50	$H > 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
Minicentrales	50-500	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
PCH	500-1000	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

Existen centrales hidroeléctricas a pie de presa y construidas al hilo del agua; esta últimas consisten en desviar el caudal hacia la casa de máquinas ubicada en una elevación inferior y retornarlo al cauce aguas abajo, teniendo como ventaja la disminución del impacto ambiental en comparación con las grandes centrales (Pandey et al., 2015) aunque algunas

de sus desventajas es el abastecimiento limitado en horario y no contribuye en la regulación de inundaciones ante avenidas.

Las centrales a pie de presa constituyen los aprovechamientos hidroeléctricos con almacenamiento en la corriente. El objetivo de la construcción de una presa es generar un desnivel considerable elevando la carga hidráulica disponible. La característica principal es que cuentan con la capacidad de regulación de los caudales de salida del agua que será turbinada en los momentos que se precise, principalmente durante las horas pico del consumo, además de tener la capacidad de alternar con las energías renovables intermitentes (IDAE, 2006).

De manera general las centrales hidroeléctricas con almacenamiento, favorecen la seguridad hídrica ya que su uso es no consuntivo, es decir, la actividad no modifica el volumen, permitiendo el aprovechamiento para otras actividades aguas abajo, además de mitigar las inundaciones. Grisales y Vásquez (2016) consideran un beneficio económico adicional al ser favorecido por la compra de bonos de carbono, además de ser consideradas como energía de base. Dentro de otras ventajas que ofrecen las pequeñas centrales hidroeléctricas en comparación con las grandes hidroeléctricas, están los bajos costos de operación y mantenimiento, menor tiempo de construcción y presentan impactos ambientales menores al encontrarse de manera localizada (Morales, Corredor, Paba, & Pacheco, 2014).

IV.1. Potencial Hidroeléctrico Aprovechable

La evaluación del potencial hidroenergético permite distinguir posibles sitios aprovechables además de proporcionar una visión general de la distribución y magnitud de la energía eléctrica en cada cuenca de un país. El proceso de búsqueda para implementar nuevas fuentes de energía hidroeléctrica cuenta con tres niveles de aproximación (Muguerza, 2005):

Potencial Hidroeléctrico Teórico Bruto (PHTB). - Este estudio se realiza a nivel exploratorio; Muguerza (2005), lo define como “la potencia total entregada por el caudal de agua al discurrir por un cauce natural, desde una cota superior a una inferior sin considerar pérdidas de alguna naturaleza” ...

El potencial teórico bruto se obtiene con la expresión (Ortíz Flores, 2011)

$$P= Q*Hb*\rho* 9.81 \quad (1)$$

P: Potencia media, en kW

Q: Gasto medio aprovechable, en m³/s

Hb: Carga hidráulica disponible, en m

P: Densidad del agua 1000 kg/ m³

9.81: Aceleración de la gravedad, en m/s²

Para tener una visión de los aprovechamientos hidroeléctricos es importante crear una comparación de la potencia que se puede generar en un periodo de tiempo, es decir la energía generada es igual al producto de la potencia que produce en un tiempo determinado. Especificando la cantidad de kilowatt / hora en el tiempo especificado (día, año, etc.) (Gardea Villegas, 1990).

Densidad del PHTB. - Este concepto es establecido con dos indicadores, la densidad superficial del PHTB (kW/km² de superficie de la cuenca) y la densidad lineal del PHTB (kW/km de longitud del río). Ambos permiten una visualización general de la calidad de la cuenca para establecer proyectos hidroeléctricos.

Potencial Hidroeléctrico Técnico Aprovechable (PHTA). - Potencial real factible de aprovechamiento. En él, se destina la totalidad del caudal a la producción de energía eléctrica y la utilización de tecnologías para su aprovechamiento sin considerar su pertinencia en la cuenca por factores económicos, sociales o de naturaleza diferente al cálculo.

Como se mencionó anteriormente, el aspecto económico cumple una función en la toma de decisiones para la creación de proyectos de hidrogenación por lo que se define a continuación.

Potencial Económico: Potencia entregada por la corriente, que como su nombre lo indica resulte viable económicamente. A escala mundial, representa un 47% del potencial técnico y un 26 % respecto al teórico (Mancebo & Adrada, 2013). Cabe hacer mención que el análisis económico es otro vértice en la toma de decisión de emplazamientos de hidrogenación,

en el largo plazo el costo-beneficio incluye además dimensiones sociales y medio ambientales.

IV.2. Marco Normativo

Con el objetivo de incrementar la participación de las energías renovables en el sector eléctrico se han creado leyes y reglamentaciones reguladoras en producción y suministro de energía.

En materia de hidroeléctricas se señalan los principales instrumentos de gestión para su planeación.

México, se ha comprometido a reducir un 30% con respecto a la línea base en 2020, así como 50% para 2050 en relación con las emisiones del año 2013 y cumplir con el Acuerdo de París en la reducción del 22% de sus emisiones de gases de efecto invernadero GEI, en cumplimiento del Objetivo 7 Energía Asequible y No Contaminante de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible (SENER, 2016).

IV.2.1. Ley General de Cambio Climático (LGCC)

Tiene como objetivos principales preservar y restaurar el equilibrio ecológico, garantizando un medio ambiente sano. Esta ley se encuentra orientada hacia una economía baja en emisiones de GEI conduciendo a una transición hacia las energías renovables, además de fomentar la educación, innovación tecnológica, la investigación para la mitigación del cambio climático y una transición hacia energías renovables (SENER, 2016).

IV.2.2. Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (LOAPF)

En su art. 33 de esta Ley indica que la Secretaría de Energía (SENER) es la encargada de establecer, conducir y coordinar la política energética del país, dando prioridad a las energías renovables, ahorro energético y protección al medio ambiente, que para su ejecución promoverá programas, estudios e investigaciones en la materia.

IV.2.3. Ley de la Industria Eléctrica (LIE)

Esta ley propone un nuevo marco normativo para la industria eléctrica vinculando las diferentes figuras involucradas en la articulación de los procesos de planeación, control y distribución del servicio. Define las energías limpias en su art 3 fracción XXII como:

...” Aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan” ...

Especificando en su inciso h) la energía proveniente de centrales hidroeléctricas.

IV.2.4. Ley de Transición Energética (LTE)

Tiene como objetivo establecer las bases legales para impulsar una transformación hacia un modelo energético sustentable en el mediano y largo plazo en concordancia con la LIE y la LGCC, busca fomentar la investigación de procesos, tecnologías, materiales y desarrollo científico en materia energética. En materia de centrales hidroeléctricas, las define como aquellas que cuenten con sistemas de generación de capacidad menor o igual a 30 MW.

IV.2.5. Ley de Aguas Nacionales (LAN)

Esta Ley tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. El organismo encargado de establecer las reglas y condiciones para el otorgamiento de concesiones y en su caso el manejo de zonas de veda y supervisar la política hídrica del país es la Comisión Nacional del Agua CONAGUA. En los artículos 38 y 4 esta Ley estipula los estudios técnicos previos por cuenca hidrológica y las necesidades del ordenamiento territorial nacional, regional y local. Podrá decretar el establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o declarar la reserva de aguas, así como declarar o levantar mediante decreto la reserva total o parcial de las aguas nacionales en la generación de energía eléctrica, para servicio público marcados en el art 78.

Hace mención específica en el Art. 120 que no se requerirá de concesión para la explotación, uso o aprovechamiento de agua, en los términos del artículo 80 de la “Ley”, cuando sea para generación de energía hidroeléctrica en pequeña producción y cuya capacidad de

generación no exceda de 30 Megavatios. En todo caso, las corrientes no deben ser afectadas en su calidad o cantidad o ser desviadas. Sólo en caso de requerirse construir obras civiles, se solicitará permiso de la CONAGUA.

IV.2.6. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

Indica los instrumentos legales en proyectos con la finalidad de proteger y preservar las áreas naturales protegidas y de las zonas de restauración ecológica. Definiendo los instrumentos a presentar ante las autoridades en caso que existan actividades que puedan causar desequilibrio ecológico estipulado en sus artículos 28, 30, 81 y 91 para aprovechamientos sustentables del agua.

IV.2.7. Ordenamientos Ecológicos

El Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio (POEGT), es un instrumento de política pública sustentado en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental (LGEEPA). Es de observancia obligatoria y tiene como objetivo regular las actividades productivas, vinculándolas a las variables ambientales, para la conservación, preservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Dentro de estos se encuentran los ordenamientos, generales, regional y local. En este trabajo se utilizan los siguientes:

Acuerdo por el que se expide el Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio (7/09/2012) región ecológica: 18.3 UBA 135. Planicies Aluviales del Occidente de Tabasco, Norte, occidente, sur y centro de Tabasco; región ecológica: 18.20 UBA 78. Sierras del Norte de Chiapas.

V. Zona de estudio

V.1. Subregión Hidrológica Bajo Grijalva (Sierra)

La cuenca del Río Grijalva se localiza en la Región Hidrológica Administrativa Grijalva-Usumacinta RH30 y comprende parte de los estados de Tabasco, Chiapas, Campeche y Oaxaca (Figura V.1). En la Región Hidrológica Grijalva, geográficamente se distinguen cuatro zonas conocidas como Alto Grijalva o Grijalva-La Concordia, Medio Grijalva o Grijalva-Tuxtla Gutiérrez, Bajo Grijalva o Grijalva- Villahermosa (UNAM, 2014).

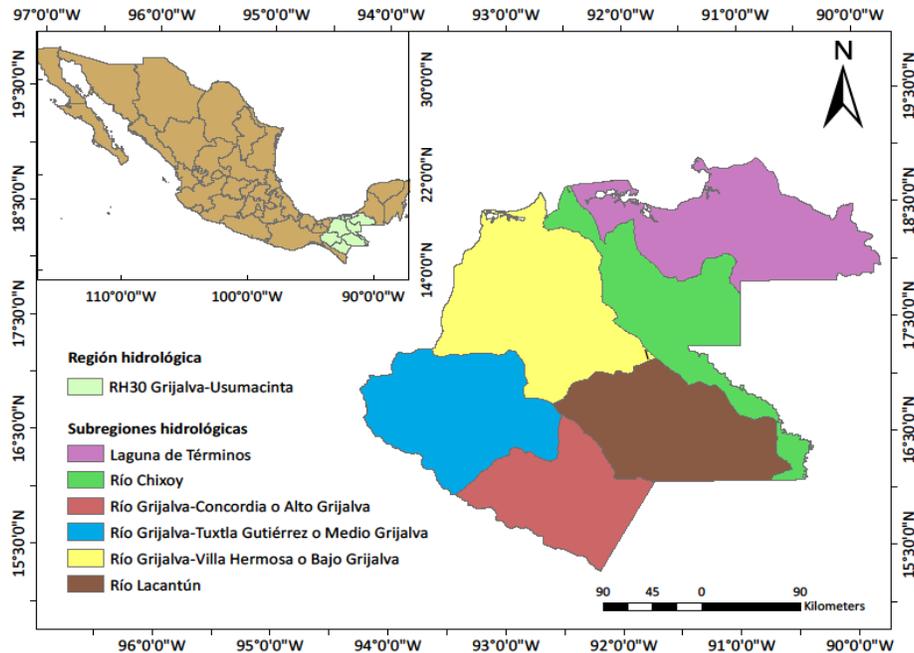


Figura V.1 Región Hidrológica RH30 Grijalva Usumacinta (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de información topográfica, 2017)

La Subregión Bajo Grijalva, se divide a su vez en Bajo Grijalva Planicie y Bajo Grijalva Sierra, esta última integrada por municipios que se encuentran en la Sierra Norte de Chiapas. Cuenta con un área de 9617 km² y presenta escurrimiento alrededor de 1400 Hm³ al año, debido a la baja permeabilidad del suelo y una precipitación media anual de hasta 4000 m, siendo protagonista de inundaciones en la zona baja de la región. Al norte de la cuenca se ubica la subregión Bajo Grijalva-Planicie que abarca los municipios que se localizan en las zonas de Piamonte y en la planicie Tabasqueña (Figura V.2) (SEMARNAT, 2010) (CONAGUA, 2013).

La subregión Bajo Grijalva-Sierra abarca la parte sur de la cuenca y comprende los municipios localizados en la Sierra Norte de Chiapas. En la parte alta de las subcuencas de los ríos de la Sierra: Tulijá y Puxcatán. Al norte de la cuenca se ubica la subregión Bajo Grijalva-Planicie que abarca una superficie de 12,163 km², y comprende los municipios que se localizan en las zonas de Piamonte y en la planicie Tabasqueña. (CONAGUA, 2014).

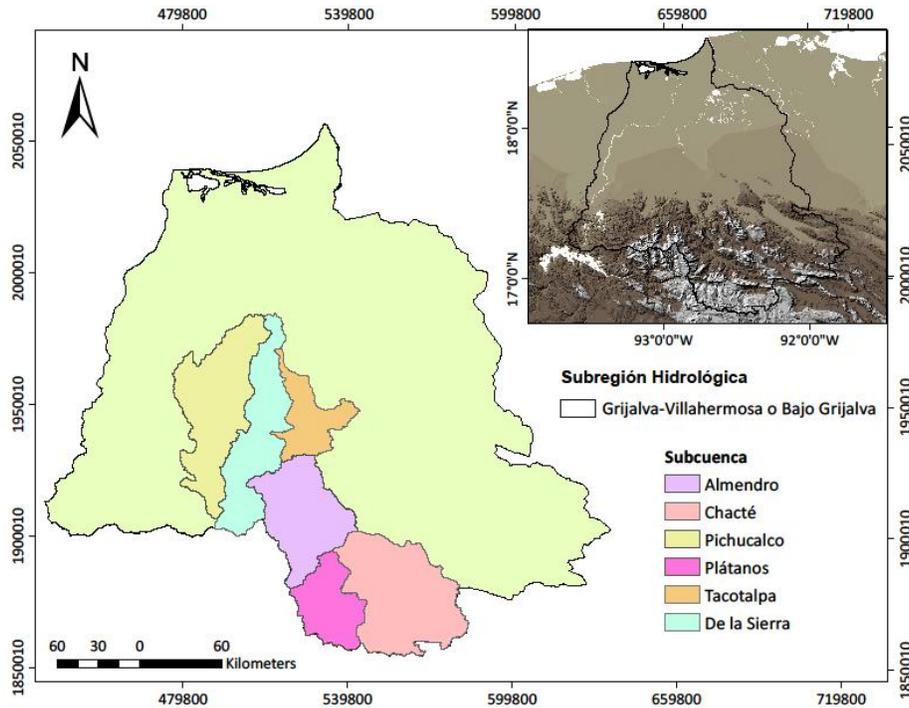


Figura V.2 Subcuencas hidrológicas de estudio (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de información topográfica, 2017)

V.2. Fisiografía

El Bajo Grijalva, se ubica dentro de las subprovincias fisiográficas llanuras y pantanos tabasqueños, sierras del Norte de Chiapas, Lacandona y Altos de Chiapas (Figura V.3.) En la zona más baja, el material es de tipo sedimentario, formando depósitos lacustres, palustres, planicies de inundación y lagunas costeras, predominantemente de areniscas y calizas. Al sur de Tabasco y norte de Chiapas sobresale una serie de valles, lomeríos, cañones y sierras con elevaciones máximas de 1400 a los 1600 msnm. Entre los montes al sur de Tabasco se encuentran La Campana, La Corona, Poaná y el Coconá en Teapa. (UNAM, 2009).

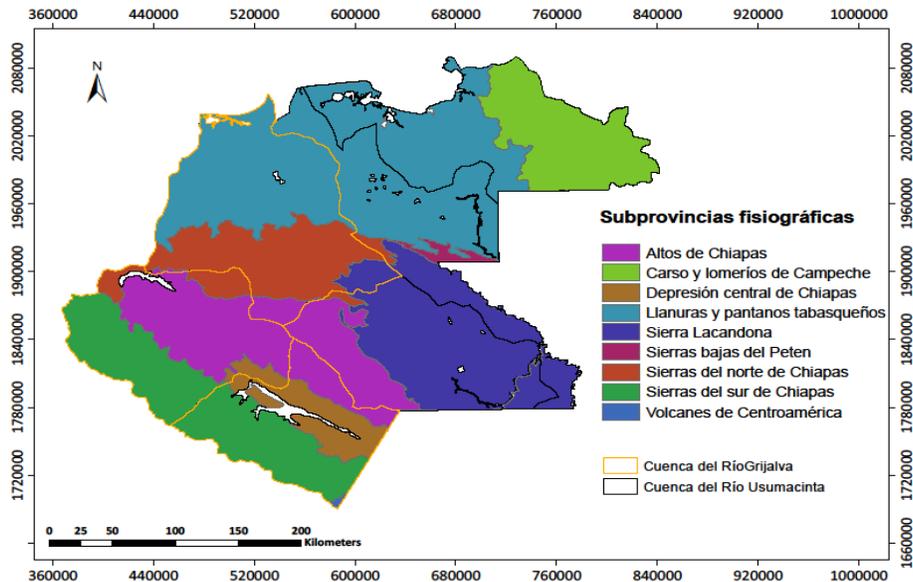


Figura V.3 Subprovincias fisiográficas (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de provincias fisiográficas, 2008)

Las cuencas Chacté, Plátanos y Almendro, presentan una serie de formaciones montañosas determinando la zona de Sierra. La parte alta de las cuencas Pichucalco y de la Sierra nacen en esta zona haciendo una diferencia en su relieve hacia el sur, pasando por una zona de lomeríos hasta la zona de llanura. Sólo la cuenca Tacotalpan (Figura V.4) tiene una variedad de paisaje de valles, llanuras, sierras y lomeríos.

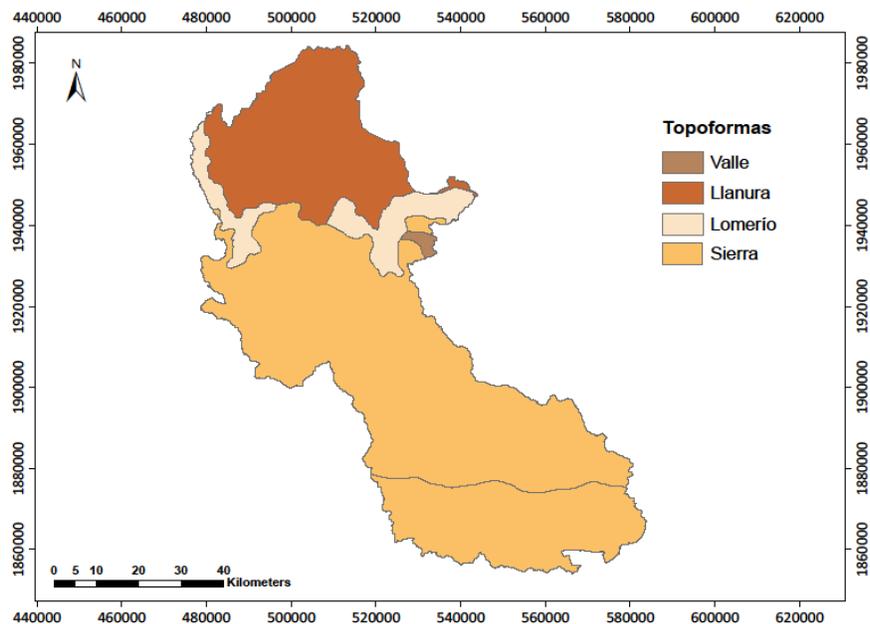


Figura V.4 Fisiografía (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de información topográfica, 2008)

V.3. Clima

La ubicación geográfica de los estados de Tabasco en la zona tropical y Chiapas en la franja intertropical contribuye en la definición del clima (Figura V.5). Tabasco mantiene un clima tropical húmedo con temperaturas que van desde los 15 °C en la temporada de invierno hasta los 42 °C en los meses más calurosos, hacia el sur del estado llega a tener un clima semicálido y mayormente templado conforme se avance al norte con dos estaciones perfectamente definidas en el Alto y Medio Grijalva de lluvia mayo-octubre y de seca noviembre-abril, modificando la temporada de lluvia en el Bajo Grijalva hacia los meses de mayo a febrero. Chiapas, mantiene climas principalmente cálidos, en la parte alta de la zona de estudio, debido a las elevaciones montañosas presenta climas templados (UNAM, 2009) (CONAGUA, 2013).

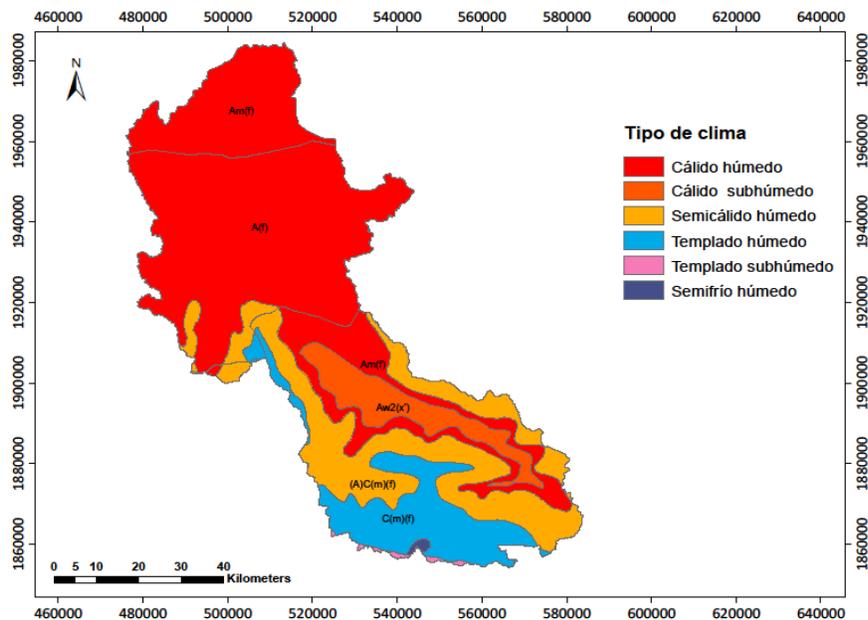


Figura V.5 Unidades Climáticas (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de unidades climáticas, 2008)

V.4. Edafología

La región de Tabasco pertenece al período cuaternario, su composición es de rocas ígneas (extrusivas) y arenas de aluvión, la zona seleccionada en Chiapas se encuentra conformado por serranías, formadas principalmente por rocas calizas y areniscas.

Las unidades de suelo observables en la Figura V.6, que ocupan la mayor parte de la superficie son los lusivoles, enriquecidos con arcillas, presentes en la zona más alta comprendiendo las cuencas Almendro, Chacté, Plátanos y en menor cantidad superada por

los litosoles con un 31 % en la cuenca De la Sierra. El acrisol, caracterizado por ser un suelo arenoso y poco fértil, ocupan el 26 % siendo abundantes en Pichucalco y porción media de todas las cuencas. En la parte alta en los límites con Chiapas, se encuentra el Feozem alto en nutrientes y materia orgánica, su permeabilidad es media en comparación con los suelos luvisol y acrisol que tiene una baja permeabilidad, produciendo grandes escurrimientos. Los gleysoles son suelos con exceso de humedad por drenaje deficiente, característico de las llanuras y pantanos tabasqueños, debido a su enriquecimiento en arcillas. Las rendzinas presentes en regiones templadas y lluviosas conforman pequeñas porciones de las cuencas Plátanos, De la Sierra y Tacotalpa, son suelos ricos en materia orgánica y materiales calcáreos generalmente se les asocia con pendientes abruptas (UNAM, 2009) (SEMARNAT, 2010).

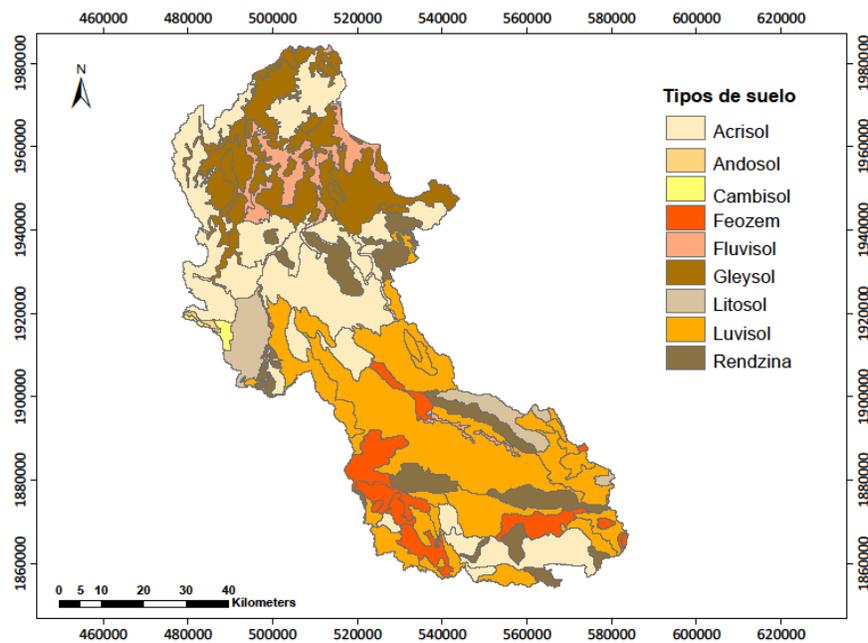


Figura V.6 Edafología (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales edafología, 2008)

V.5. Vegetación

Las áreas ocupadas por bosque de pino y selva incluyen tanto vegetación primaria como secundaria. El pastizal inducido ocupa un porcentaje mayor al 50 % en la zona baja. El resto de la superficie de las cuencas se divide en selva perennifolia y bosque de encino-pino en gran medida en la cuenca Almendro (Figura V.7).

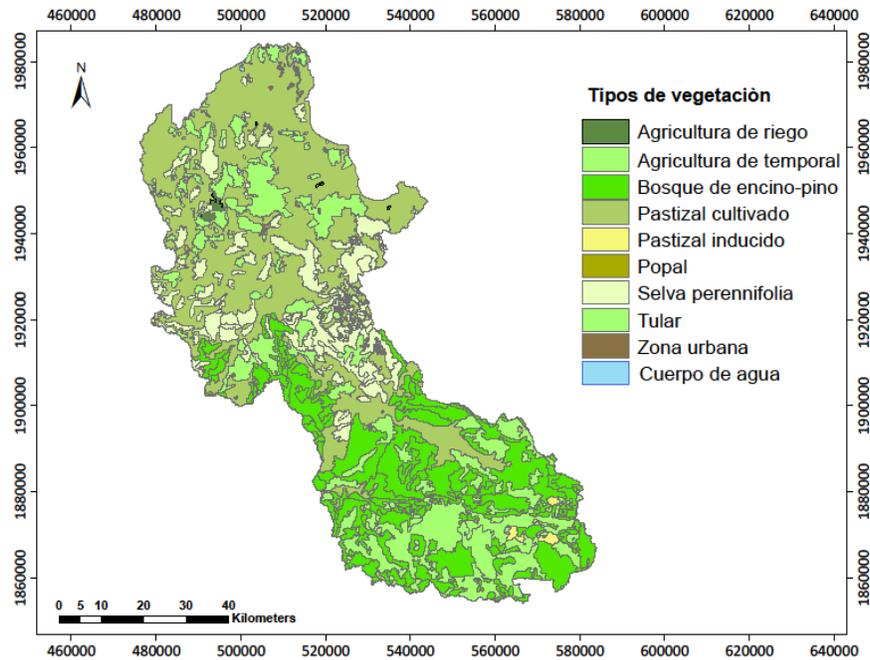


Figura V.7 Vegetación (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, 2017)

V.6. Hidrología

La hidrología superficial es de tipo dendrítica, el cauce principal es el Río Grijalva que tiene una longitud total de aproximadamente 700 kilómetros, nace en la Sierra de Cuchumatanes en Guatemala. Al ingresar al país atraviesa el Valle de Chiapas, recibe las aportaciones en sus márgenes izquierda de los ríos Salinas y La Concordia y derecha los ríos Blanco y Angostura. Después de recibir el aporte del río Dorado modifica su cauce al Noroeste hasta la población de Santa Cruz para posteriormente sumarse a su cauce el río Santo Domingo y sale del Valle de Chiapas por el Cañón del Sumidero, hasta llegar al vaso de la Presa Nezahualcóyotl (Malpaso), nombrado a partir de aquí como Mezcalapa. En este punto bifurca en los ríos Samaria por su margen izquierda y el río Carrizal por su margen derecha, este último tiene como principal afluente al río Pichucalco y al río La Sierra. El río de la Sierra se une con el río Carrizal aguas abajo de la ciudad de Villahermosa para finalmente recibir el nombre de río Grijalva (SEMARNAT, 2010) (UNAM, 2014).

El curso que siguen los ríos de la Sierra (Figura V.8), inicia en la parte central de Chiapas con el río Chacté, recibe las aportaciones del río Plátanos y Zacatic, antes de cruzar el límite de los estados de Tabasco y Chiapas toma el nombre de río Oxolotán, pasa junto a la población de Tacotalpa de donde toma el nombre de río Tacotalpa hasta su confluencia con

el río Teapa, enseguida recibe el nombre de río la Sierra en su trayecto por la comunidad de Tapijulapa, antes de la comunidad de Pueblo Nuevo recibe las contribuciones de los ríos Puyacatengo y Pichucalco. Los ríos Pichucalco, Tacotalpa y Tulijá, afluentes del río Grijalva, contribuyen en las inundaciones en la planicie tabasqueña como indica la Figura V.8 (UNAM, 2009) (Martínez Ruiz, 2010).

Afluente principal de cada cuenca de estudio (SEMARNAT, 2010):

Cuenca hidrológica Pichucalco: su principal afluente es el Río Pichucalco. Con una superficie de 1238.71 km² desemboca en el Río Viejo Mezcalapa.

Cuenca hidrológica De la Sierra: su principal afluente es el Río de La Sierra. Tiene una superficie de 1073.90 km² y desemboca en el Río Viejo Mezcalapa.

Cuenca hidrológica Tacotalpa: se origina cerca de la estación hidrométrica Tapijulapa, cuenta con una superficie de 504.01 km² y desemboca en el Río de la Sierra a la altura de la estación hidrométrica Pueblo Nuevo.

Cuenca hidrológica Almendro: su principal afluente es el Río Almendro que desemboca en el mismo Río Almendro cerca de la localidad Lindavista en la localidad de Amatán y cuenta con una superficie de 1043.27 km².

Cuenca hidrológica Plátanos: su principal afluente es el Río Plátanos que desemboca en la cuenca Almendro. Tiene una superficie de 635.54 km².

Cuenca hidrológica Chacté: su principal afluente es el Río Chacté. El área que drena hacia la cuenca Almendro es de 1489.267 km².

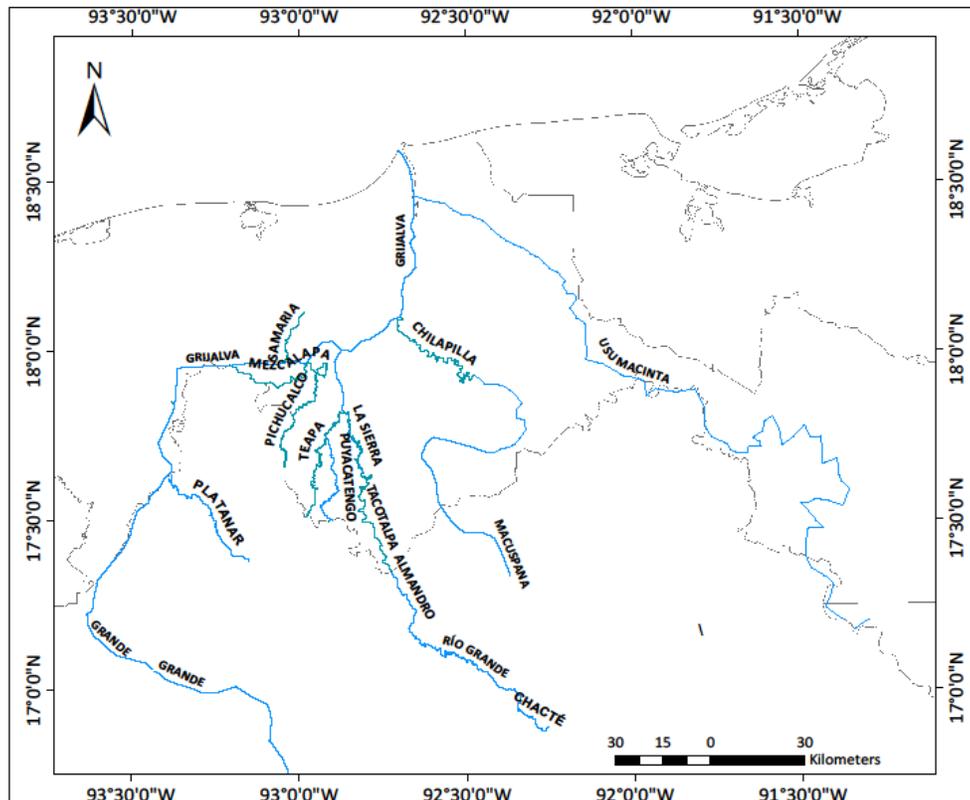


Figura V.8 Hidrología (elaboración propia, fuente INEGI datos vectoriales de información topográfica, 2017)

Se ubican 24 acuíferos totales reportados en la Región Hidrológica 30, 12 de estos se localizan dentro del territorio de las Subregiones Hidrológicas Alto, Medio y Bajo Grijalva: Reforma, Tuxtla, Ocozocoatla, Cintalapa, Fraylesca, La Trinitaria, San Cristóbal Las Casas, Chicomuselo en el estado de Chiapas, Macuspana en el estado de Tabasco y Samaría-Cunaduacán, Centla y La Sierra compartidos por ambos estados (CONAGUA, 2014) (SEMARNAT, 2018).

VI. Modelo GR4J

VI.1. Descripción del modelo GR4J

El modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) es un modelo global de precipitación diaria de cuatro parámetros que conceptualiza los procesos de infiltración, evapotranspiración, flujo subterráneo y flujo superficial en la transformación a flujo final de salida. Este modelo desarrollado por Perrin en 2003 es una versión modificada del modelo GR3J propuesto por Editzano y Michel en 1989.

Es importante decir que el modelo GR4J se considera un modelo conceptual por contar en su estructura con almacenamientos de agua subterránea y de agua superficial. En realidad, es un modelo empírico, ya que se construyó a partir de grandes bases de datos que permitieron construir progresivamente una estructura que reproduce, lo mejor posible, la respuesta de la cuenca ante las lluvias. El modelo GR4J es fiable y robusto por lo siguiente (Perrin et al. 2007):

- Considera una representación global de la cuenca. Es decir que reconoce la heterogeneidad de toda la cuenca, sin embargo, la considera como una sola unidad de estudio.
- El intervalo de tiempo de funcionamiento es diario y requiere de datos continuos de lluvia y de evapotranspiración potencial.
- Es un modelo general que se puede aplicar a cualquier cuenca. Se ha evaluado en cuencas desde 1 km² hasta más de 10000 km² de área con climas diferentes (Perrin et al., 2001).
- La complejidad de su estructura aumentó de manera progresiva partiendo de una estructura simple y se justifica por sus resultados al simular el escurrimiento en grandes muestras de cuencas (Andréassian et al., 2006).
- Se ha evaluado comparado con otros modelos (Perrin et al., 2003).

Siguiendo el esquema del modelo en la Figura VI.1, La primera operación es la sustracción de la evapotranspiración potencial E de la precipitación P para determinar una precipitación neta P_n o una evapotranspiración neta E_n . Esta operación se calcula como si fuera un almacenamiento de intercepción de capacidad cero, esto es, la intercepción de la lluvia está considerada en el cálculo de la capacidad neta de evapotranspiración.

Aunque se tiene una comprensión de algunos procesos que ocurren en la naturaleza, como la intercepción de la lluvia (que depende del tipo de vegetación), la infiltración en suelos homogéneos, todavía no han sido claros acerca de los procesos más importantes del subsuelo que actúan a escala de captación. Hasta ahora, a pesar de la gran cantidad de publicaciones científicas, nadie ha podido predecir la respuesta de una superficie terrestre natural a un evento de lluvia dado. Por lo tanto, el modelo GR4J considera que una primera acción es tratar de determinar cómo funciona una cuenca en su conjunto (Perrin et al. 2003).

Su estructura combina dos depósitos, uno de producción que representa el volumen de agua subterránea definido por el parámetro X_1 , este valor no puede ser mayor a la altura máxima del depósito de almacenamiento de agua subterránea representado por S . La salida del tanque de producción se transfiere a dos hidrogramas, el primer hidrograma HU1, con un 90 % del flujo y tiempo base X_4 y el segundo hidrograma HU2 con el 10 % del flujo y tiempo base $2 X_4$, que representa el flujo directo de lluvia. El caso de la división fija de la lluvia efectiva resulta de los mejores resultados del modelo en muchas condiciones de prueba diferentes realizadas por Perrin (2003).

El hidrograma HU1, se transfiere al segundo depósito de enrutamiento X_3 con una altura máxima que es definida por R . Este valor se actualiza usando el valor de la función $F(X_2)$, donde X_2 es un coeficiente de intercambio que en caso de ser negativo se considera salida y cuando es positivo indica un ingreso de agua a la cuenca. Este contenido actualizado del almacenamiento de enrutamiento se usa para calcular la salida del flujo enrutado Q_r .

Q_1 y $F(X_2)$ se combinan para calcular la escorrentía directa Q_d . El caudal final es la adición de la salida del flujo enrutado Q_r y la escorrentía directa Q_d . La descripción de sus parámetros se muestra en la Tabla VI.1 (Perrin et al., 2003, Carvajal, 2007).

Tabla VI.1 Parámetros del modelo GR4J

x_1	Capacidad máxima del tanque de producción (mm)
x_2	Coefficiente de intercambio de agua subterránea (mm)
x_3	Capacidad máxima de un día del tanque de enrutamiento (mm)
x_4	Tiempo base del hidrograma unitario UH (días)

VI.2. Descripción de las ecuaciones

Determinación de la precipitación y evapotranspiración potencial neta

Considerando la intercepción igual a cero, se calcula la diferencia de la precipitación y evapotranspiración potencial, con la finalidad de determinar la precipitación y evapotranspiración neta de acuerdo con los siguientes criterios:

$$\begin{aligned} \text{Si } P \geq E, \text{ entonces } P_n &= P - E & E_n &= 0 \\ \text{Si } P < E, \text{ entonces } P_n &= 0 & E_n &= E - P \end{aligned}$$

P: precipitación (mm)
 E: evapotranspiración potencial (mm)
 Pn: Precipitación neta (mm)
 En: Evapotranspiración neta (mm)

Si

$P_n \neq 0$

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}{1 + \left(\frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)} \quad (2)$$

Ps: Lluvia que alimenta al primer reservorio (mm)
 S: Altura máxima del tanque de producción (mm)

Si $E_n \neq 0$ se determina una tasa de evaporación como una función del nivel de producción de almacenamiento se evaporará del almacenamiento, descrita por la ecuación 3:

$$E_s = \frac{s \left(2 - \left(\frac{S}{x_1}\right)\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)} \quad (3)$$

Es: Evapotranspiración (mm)

De esta manera se obtiene S' como la precipitación neta que ingresa al tanque de producción, en función del parámetro X_1 el cual nunca excede el valor de S.

$$S' = S + P_n - E_s \quad (4)$$

La cantidad de agua percolada (Perc), ingresa como percolación al tanque de producción.

$$Perc = S' \left(1 - \left(1 + \frac{4 S'}{9 x_1}\right)^4\right)^{-1/4} \quad (5)$$

Perc: cantidad de agua que percola (mm)

El almacenamiento del tanque de producción se actualiza:

$$S'' = S' - Perc \quad (6)$$

Distribución lineal de los hidrogramas unitarios.

Para calcular el volumen total de agua para el enrutamiento (Pr), se utiliza la expresión:

$$Pr = Perc + (Pn - Ps) \quad (7)$$

Pr : La cantidad de agua total que se distribuye a través de los hidrogramas unitarios.

El flujo Pr de la salida del tanque de producción se divide en dos componentes, 90 % para el hidrograma unitario HU1 y 10 % para el hidrograma unitario HU2, mismos que distribuyen la precipitación en intervalos de tiempo en función del parámetro X_4 que representa el tiempo base del hidrograma. Las ordenadas de ambos hidrogramas están definidas por SH1 y SH2, respectivamente como se describe enseguida.

HU1 se calcula de la siguiente manera:

$$t \leq 0, \quad SH1(t) = 0 \quad (8)$$

$$0 < t < X_4, \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (9)$$

$$t \geq X_4, \quad SH1(t) = 1 \quad (10)$$

HU2 se calcula:

$$t \leq 0, \quad SH2(t) = 0 \quad (11)$$

$$0 < t \leq X_4, \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (12)$$

$$X_4 < t < 2X_4, \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (13)$$

$$t \geq 2X_4, \quad SH2(t) = 1 \quad (14)$$

Las ordenadas de UH1 y UH2 se obtiene con las expresiones:

$$UH1_j = SH1_j - SH1_{j-1} \quad (15)$$

$$UH2_j = SH2_j - SH2_{j-1} \quad (16)$$

En cada paso de tiempo k , las salidas Q_9 y Q_1 de los dos hidrogramas corresponden a la convolución de las lluvias previas de acuerdo con la distribución definida por el hidrograma y se calculan por:

$$Q_9(k) = 0.9 \sum_{j=1}^k UH1(j) \cdot Pr(k - j + 1) \quad (17)$$

$$Q1(k) = 0.1 \sum_{j=1}^k UH2(j) \cdot Pr(k - j + 1) \quad (18)$$

Intercambio de agua en la cuenca.

En la captación de agua en el suelo o en el cauce, interviene el término de intercambio entre el agua subterránea y el escurrimiento representado por F. Éste puede ser negativo en caso de pérdidas y positivo si se importa agua al escurrimiento superficial. Se calcula como se indica a continuación y F debe ser menor que el valor absoluto de X_2 en todos los casos.

$$F = \left(x_2 * \frac{R}{x_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (19)$$

R: es el nivel en el depósito de agua superficial.

Almacenamiento de distribución.

Se obtiene el nivel en el tanque de distribución R, adicionando el componente F y la salida de Q9, resultado del UH1:

$$R' = \text{máx} (0; R + Q9 + F) \quad (20)$$

El volumen de salida del tanque de distribución denominado Qr se calcula:

$$Qr = R' \left(1 - \left(1 + \frac{R'}{x_3} \right)^4 \right)^{-1/4} \quad (21)$$

Qr : flujo enrutado (mm)

El volumen de salida Qr siempre es menor que el almacenamiento R. El nivel final de tanque de distribución se calcula como:

$$R'' = R' - Qr \quad (22)$$

El componente de flujo directo Qd , se conforma de la salida de Q1, resultado del UH2, además de adicionar en caso de existir ingreso de agua por el término F:

$$Qd = \text{máx} (0; Q1 + F) \quad (23)$$

Qd : flujo directo (flujo final de salida) (mm)

Finalmente, el gasto total se obtiene:

$$Q = Qr + Qd$$

$$(24)$$

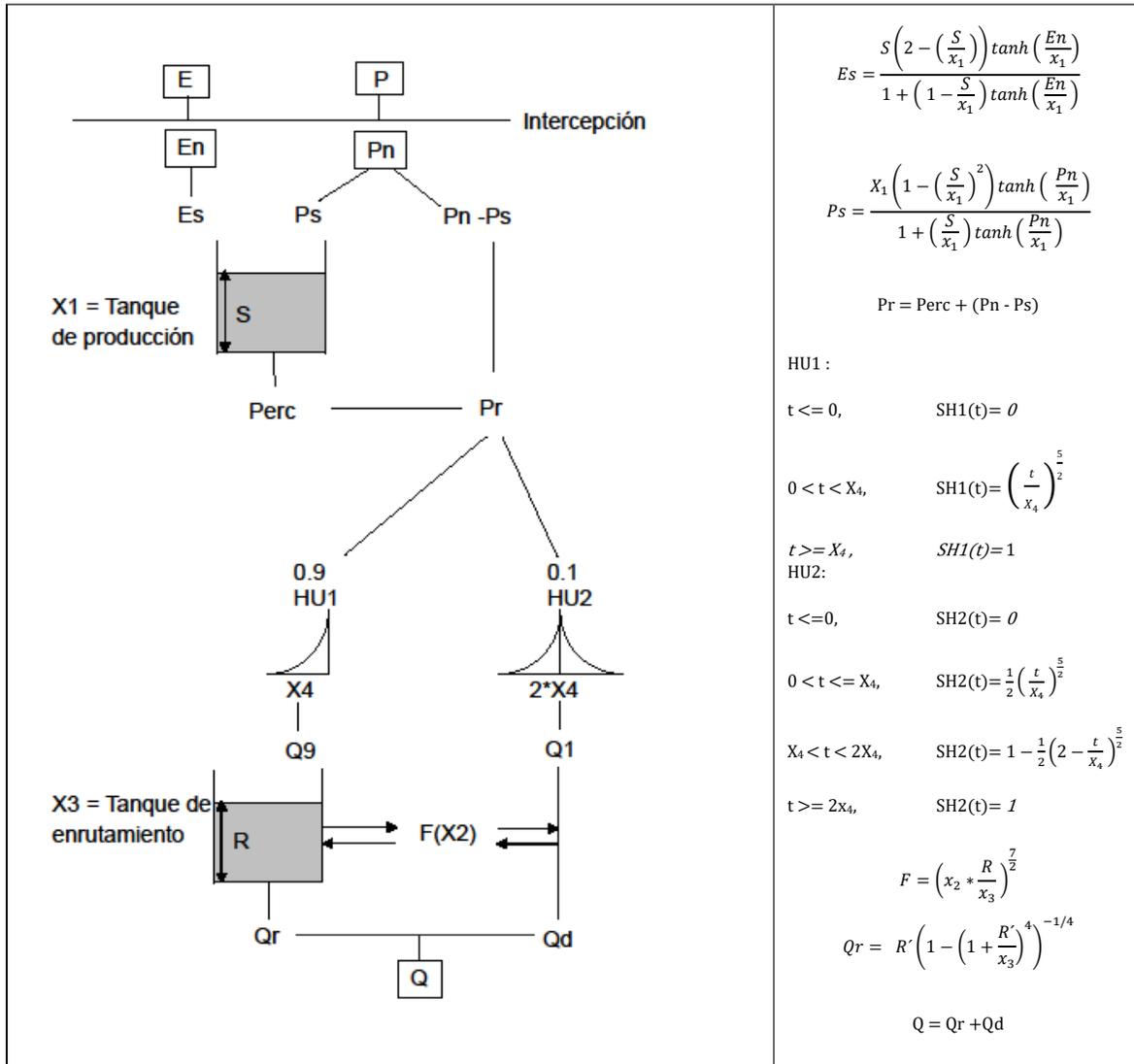


Figura VI.1 Modelo GR4J

VII. Calibración y validación

Los procesos de calibración consisten en la optimización de los valores de los parámetros como resultado de la comparación de valores simulados, de manera iterativa, con los datos observados o disponibles medidos en la cuenca mediante un algoritmo de optimización encaminado a encontrar aquellos valores que tengan el mejor ajuste.

En este proceso la calidad de los datos de entrada evita estimaciones sesgadas en el resultado de la simulación (Beven, 2012).

VII.1. Función objetivo

Como se mencionó, el proceso de calibración es esencial para garantizar que los valores de los parámetros calculados definan la conversión de precipitación a flujo superficial de manera eficiente, considerando como valor de ajuste los caudales observados.

Esta fase consiste en una función que tiene acceso a la serie de datos simulados durante el proceso de optimización y determina el momento de parar la búsqueda al encontrar el mejor ajuste (Beven, 2012). Una función ampliamente utilizada en hidrología es el criterio de eficiencia de Nash y Sutcliffe NSE, definida como (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_1^j ((Q_{obsj}) - (Q_{calj}))^2}{\sum_1^j ((Q_{obsj}) - \underline{Q_{obsj}})^2} \quad (25)$$

Q_{obsj} : gasto observado (mm/día)

Q_{calj} : gasto calculado (mm/día)

$\underline{Q_{obsj}}$: promedio de valores observados (mm/día)

Moriassi (2007) realizó una revisión de la literatura de las técnicas de evaluación de modelos de los rangos de valores publicados para diferentes funciones objetivo para las estadísticas de evaluación de modelos hidrológicos. Una de estas funciones de ajuste correspondió al NSE. Analizó factores como robustez en términos de aplicabilidad a diversos componentes, modelos y condiciones climáticas, su uso común, aceptado y recomendado en la literatura publicada y fortalezas identificadas en la evaluación del modelo. El resultado de su estudio arrojó los valores recomendados de ajuste de NSE indicados en la Tabla VII.1.

Tabla VII.1 Valores de referencia del Criterio de Eficiencia de Nash y Sutcliffe

Valores	Ajuste
$0.75 \geq 1$	Muy bueno
$0.65 \geq 0.75$	Bueno
$0.5 \geq 0.65$	Satisfactorio
≥ 0.5	Insatisfactorio

VII.2. Algoritmo de Optimización

VII.2.1. Algoritmos evolutivos

En la búsqueda espacial de valores óptimos de los parámetros modelo existe el riesgo de encontrar óptimos locales. Por lo que, surge la necesidad de la implementación de métodos que garanticen localizar óptimos globales en el espacio.

Una alternativa son los Algoritmos Genéticos (AG) cuya utilización ha crecido por su capacidad de encontrar estos óptimos globales.

En hidrología, Kuczera calibró un modelo conceptual de lluvia-escorrentía de cinco parámetros y Franchini y Galeati un modelo de lluvia-escorrentía de 11 parámetros haciendo uso de los AG (Beven, 2012).

Dentro de los AG destacan los algoritmos evolutivos. Ellos son considerados herramientas de optimización que pueden resolver problemas complejos disminuyendo el espacio de búsqueda mediante estrategias inspiradas en procesos de la evolución de las especies de Charles Darwin, en la que se propone que sólo sobrevivirán los individuos más aptos, generando individuos que se adaptan mejor a su entorno y optimizando las aptitudes de las especies (Rojas García, 2015). Estos han ido incrementándose en materias diferentes a la inteligencia artificial, en áreas como la biología, las matemáticas aplicadas; pero han permeado en todas las ciencias (Cuevas Jiménez, Oliva Navarro, & Díaz Cortés, 2019).

VII.2.2. Optimización por enjambre de partículas (PSO)

El método PSO por sus siglas en inglés (Particle Swarm Optimization) pertenece a las técnicas estocásticas de cálculo evolutivo, es uno de los más usados por su sencillez de implementación, pues tiene pocos parámetros, además de contar con una convergencia hacia una solución global máxima en un número menor de iteraciones. Requiere solo operadores matemáticos sencillos y es computacionalmente económico en términos de requisitos de memoria y velocidad (Eberhart & Kennedy, 1995) (Kennedy & Eberhart, 1995)

A partir de los algoritmos iniciales de optimización con enjambre de partículas se ha creado una vertiente de técnicas computacionales evolutivas estocásticas, que es la inteligencia de

enjambre. En los últimos años, la PSO se ha utilizado para mejorar la estimación de los parámetros en los modelos hidrológicos (Jakubcová et al., 2015).

Este método fue propuesto por Kennedy y Eberhart en 1995, está basado en el comportamiento social observado en grupos de individuos interconectados para cooperar entre ellos, inicialmente parvadas de pájaros. Su desarrollo conceptual, comenzó como una simulación de pájaros a prueba de colisiones y la intención original era simular gráficamente la coreografía impredecible de una bandada de pájaros, por ejemplo ¿cómo encuentran comida?. Cualquiera que haya puesto un comedero para pájaros sabe que en cuestión de horas una gran cantidad de pájaros probablemente lo encontrarán, aunque no tenían conocimiento previo de su ubicación, apariencia, etc. La estrategia más eficaz para hallar la comida es seguir al ave que se encuentre más cerca de ella y capitalizar el conocimiento de los demás. PSO emula este escenario para resolver problemas de optimización. Los factores estocásticos permiten una búsqueda extensiva de espacios entre regiones en las que se ha encontrado que son relativamente buenas (Eberhart & Kennedy, 1995) (Kennedy & Eberhart, 1995).

En este algoritmo se cuenta con un número de partículas de búsqueda acotado, determinando en cada iteración una nueva posición para cada partícula la cual es evaluada por la función objetivo (fitness). Al definir un espacio para cada individuo (partícula), ajustará su posición al adicionar a su propia experiencia (mejor posición en las iteraciones anteriores) el conocimiento del enjambre (la mejor solución encontrada de la población) (Parrott & Li, 2006). Las topologías definen el entorno de cada partícula individual, y la interacción de las partículas en esta red social (Rojas García, 2015).

Una partícula está compuesta por:

_ Tres vectores:

- El vector X almacena la posición actual de la partícula en el espacio de búsqueda
- El vector pBest almacena la localización de la mejor solución encontrada por la partícula
- El vector V almacena la velocidad en que se moverá la partícula.

_ Dos valores de fitness:

- El x fitness almacena la mejor solución actual (vector X), y
- El p fitness almacena la mejor solución local (vector pBest).

La rapidez de convergencia está dada por la velocidad, la cual comprende tres parámetros, el peso de inercia ω , la mejor posición global y la mejor posición actual de las partículas, información que es incrementada a todas las demás en cada iteración, el componente estocástico se realiza con el producto de números aleatorios en el rango de 0 y 1.

La velocidad y la nueva posición de cada partícula se obtienen con las expresiones:

$$v_{t+1} = \omega(t) + c_1 r (Pbest - x(t)) + c_2 r (Gbest - x(t)) \quad (26)$$

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \quad (27)$$

donde $v(t)$ y $x(t)$ son la velocidad y la posición en el tiempo t , respectivamente. El peso de inercia viene dado por ω mientras que c_1 y c_2 representan los coeficientes cognitivos y sociales respectivamente, siendo r números aleatorios en un rango de 0 y 1. Finalmente, $Pbest$ y $Gbest$ denotan la mejor posición personal y la mejor posición global (Harrison, P., & Ombuki-Berman, 2018).

VIII. Metodología

En la metodología utilizada en este trabajo destacan dos procesos principales: la simulación de modelo y la identificación de puntos potenciales. El primero provee del gasto de los cauces y el segundo proporcionan la carga hidráulica, ambos necesarios para la determinación del potencial hidroeléctrico. Los proyectos de este tipo requieren de varias dimensiones para su implementación.

VIII.1. Delimitación de la zona de estudio

A continuación, se describe la parte inicial de la delimitación de la zona de estudio. En los puntos siguientes se desarrolla de manera detallada cada uno de los dos procesos involucrados en la evaluación del potencial hidroenergético en la zona de estudio. Los algoritmos para el cálculo de la evapotranspiración y simulación del modelo se programaron en lenguaje de Matlab.

Para la delimitación de las cuencas de estudio y los posibles sitios a evaluar el potencial hidroeléctrico se descargaron las cartas topográficas a escala 1:250000 de INEGI de los estados de Tabasco y Chiapas, creando el modelo digital de elevación DEM utilizando la herramienta de geoprocésamiento digital ArcGis 10.5. Se delimitaron las cuencas ubicadas en la zona Sierra del Bajo Grijalva, con salida a las estaciones hidrométricas Oxolotán, Tapijulapa, Teapa, Puyacatengo y Pichucalco.

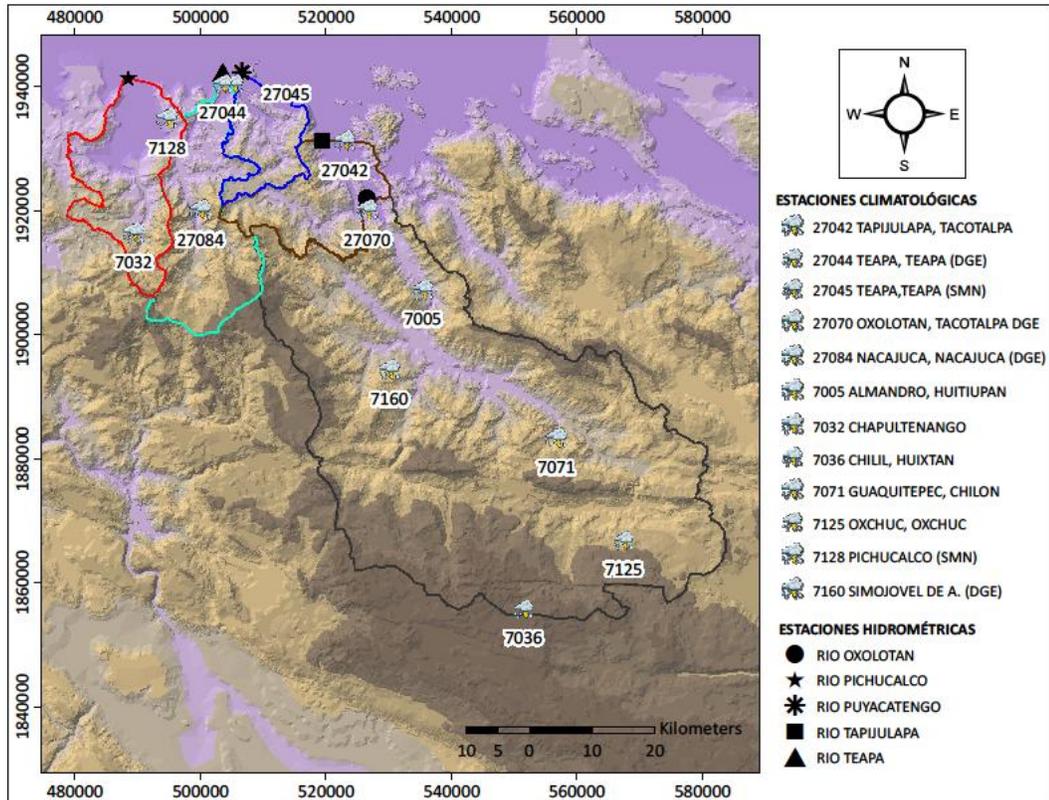


Figura VIII.1 Delimitación de las cuencas de estudio con salida a la estación hidrométrica (elaboración propia, fuente INEGI, datos vectoriales topográficos 2017)

En la figura VIII.1 se observan las cuencas con salida a la estación hidrométrica que le dan nombre. El área total utilizada en la simulación posterior a la delimitación topográfica fue: Oxolotán con 2901 km², Pichucalco con 411 km², Puyacatengo 169 km², Tapijulapa 3219 km² y Teapa 476 km².

VIII.2. Datos climáticos e hidrométricos

CLICOM es un sistema de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLimate COMputing Project. La información es abierta y contiene datos

de precipitación y temperatura de las estaciones climatológicas de todos los Estados de la República Mexicana, la información descargada en línea corresponde a las estaciones climatológicas ubicadas en las cuencas a evaluar (UNAM, 2014).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), cuenta con la información de aforo de las estaciones hidrométricas en todo el país en una base de datos de presas, sedimentos y valores de los principales ríos del país que se encuentra disponible en línea en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). La información consultada corresponde a los valores diarios (m^3/s) de las estaciones hidrométricas ubicadas dentro de la zona de estudio (CONAGUA, 2019).

Debido a que todas las estaciones tienen distintas longitudes de registro, fue necesario seleccionar un periodo de registro que fuera común para cada cuenca y abarcara la mayor cantidad de datos. Las estaciones en las que se consultó la información de precipitación y temperatura se muestran en la Tabla VIII.1 y los datos de las estaciones hidrométricas se muestran en la Tabla VIII.2. En ésta última tabla se indica el periodo definido para analizar en cada una de las cuencas con salida a la estación hidrométrica indicada:

Tabla VIII.1 Estaciones climatológicas en la zona de estudio

No	Clave	Nombre	Estado	Longitud	Latitud
1	7005	Aljandro	Chiapas	-92.6947	17.2833
2	7032	Chapultenango	Chiapas	-93.1016	17.3333
3	7036	Chilil	Chiapas	-92.4913	16.6777
4	7071	Guachitepec	Chiapas	-92.288	17.1447
5	7125	Oxchuc	Chiapas	-92.3388	16.7863
6	7128	Pichucalco	Chiapas	-93.1186	17.5166
7	7160	Simojovel (DGE)	Chiapas	-92.7116	17.1400
8	27042	Tapijulapa	Tabasco	-92.7794	17.4611
9	27044	Teapa (DGE)	Tabasco	-92.9658	17.5488
10	27045	Teapa (SMN)	Tabasco	-92.9827	17.5666
11	27070	Oxolotán	Tabasco	-92.7625	17.3805
12	27084	Nacajuca	Tabasco	-93.0169	18.1658

Tabla VIII.2 Estaciones hidrométricas en la zona de estudio

Clave	Estación hidrométrica	Área (Km ²)	Periodo
30031	Puyacatengo	169	1950-1987
30032	Teapa	476	1979-2011
30057	Pichucalco	411	1956-1977
30093	Tapijulapa	3219	1964-2014
30111	Oxolotán	2901	1974-1995

VIII.3. Homogeneidad e independencia

Con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrológica utilizada se realizó el análisis de homogeneidad y la prueba de independencia de Anderson a las series de datos. Las pruebas estadísticas aplicadas fueron Helmert, t de Student y Cramer (Anexo A). (Escalante & Reyes, 2005).

En la prueba de independencia de Anderson, si el 10% de los valores sobrepasan los límites de confianza, haciendo uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso k, se dice que la serie es independiente (Escalante & Reyes, 2005). (Anexo B).

VIII.4. Evapotranspiración potencial (ETP)

El modelo de Oudin (2005) se empleó para determinar la ETP. Este modelo requiere solo de valores climáticos de temperatura media del aire y la radiación solar que depende de la latitud y del número de día del año. Las eficiencias basadas en este modelo son notables utilizados en modelos de precipitación-escorrentía. Se basa en la radiación incidente solar y ha sido comparado con otros modelos robustos como el de Penman-Monteith. La ecuación que determina la ETP es la siguiente:

$$ETP = \frac{R_c}{\lambda \rho} \frac{T_a + 5}{100} \quad (28)$$

R_c : Radiación extrarrestre $\frac{MJ}{m^2 d}$

λ : calor latente de fusión $\frac{MJ}{kg}$

ρ : densidad del agua $\frac{Kg}{m^3}$

T_a: Temperatura media del aire °C

El ángulo de incidencia de la radiación solar recibida por la atmosfera terrestre se conoce como radiación (solar) extraterrestre, y se determina con la expresión siguiente (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006):

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (29)$$

R_a: radiación extraterrestre ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

G_{sc}: constante solar $0.082 (MJ m^{-2} min^{-1})$

d_r: distancia relativa inversa Tierra – Sol (m)

ω_s: ángulo de radiación a la puesta del sol (rad)

φ: latitud (rad)

δ: declinación solar

Al describir la Tierra una órbita elíptica alrededor del Sol, La distancia media Tierra-Sol es $r_0 = 149.6$ millones de km, por lo que la distancia Tierra-Sol, r , varía de acuerdo con la posición orbital con respecto a su valor medio. La irradiancia solar que llega al exterior de la atmósfera de la Tierra depende del factor de corrección adimensional propuesta por Duffie y Beckman (1980) en una forma matemática simple para evaluar la relación r_0 y r . Este factor de corrección se conoce bajo el nombre de distancia relativa inversa Tierra-Sol d_r y se obtiene con la ecuación 30 (Abal & Durañona, 2013)

$$F_n = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = d_r = 1 + 0.333 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (30)$$

F_n: factor de corrección

r₀: distancia media Tierra – Sol (m)

r: distancia Tierra – Sol (m)

J: día juliano

la declinación solar δ se calcula con la ecuación 31:

$$\delta = 0.409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (31)$$

donde J es el día juliano

El ángulo de radiación se calcula con la expresión:

$$\omega_s = \arccos \arccos [- \tan \tan (\varphi) \tan \tan (\delta)] \quad (32)$$

VIII.5. Condiciones iniciales del modelo GR4J

Los valores iniciales de cada parámetro se utilizan para cualquier cuenca y clima (Perrin et al., (2003); Andréassian et al., (2006), y se determinan de acuerdo con Perrin (2002):

$$x_1 = 400 \text{ mm}$$

$$x_2 = -0.6 \text{ mm}$$

$$x_3 = 0.4(Pmx - Pmn)^{1.1} \text{ mm}$$

$$x_4 = 0.5 + 1.3 \frac{S^{0.16}}{p^{0.64}} \text{ días}$$

Siendo S el área de la superficie de la cuenca en km², Pmx y Pmn representan la precipitación mensual promedio, del mes más lluvioso y del mes menos lluvioso, respectivamente, y P la precipitación media diaria. Los valores reales de los parámetros X₁, X₂, X₃ y X₄ se transformaron con la finalidad de normalizar los incrementos de velocidad dentro del algoritmo de optimización en cada iteración para su calibración y validación (Rojas Serna, 2005). Los valores transformados x₁, x₂, x₃ y x₄ de los parámetros son los siguientes:

$$x_1 = \text{Log}(X_1)$$

$$x_2 = \sinh(X_2)$$

$$x_3 = \text{Log}(X_3)$$

$$x_3 = \text{Log}(X_4) + 0.5$$

VIII.6. Calibración y validación

El resultado de un modelo hidrológico conceptual depende en gran medida de la calidad de la calibración.

El objetivo de la etapa de calibración, es encontrar los valores de los parámetros para los cuales el modelo presenta una mejor concordancia entre los flujos simulados con los datos históricos. Este ajuste se realiza con ayuda de procesos de optimización desarrollados con la finalidad de minimizar las diferencias entre los valores simulados y los observados.

Una restricción en los diferentes procesos de optimización es el espacio de búsqueda, ya que como se mencionó anteriormente, al encontrar la posible solución estos óptimos sean locales, descartando el resto del área de búsqueda para un óptimo global. El método de optimización por enjambre de partículas (PSO), asegura la búsqueda en un dominio con una mayor velocidad de convergencia, ya que son capaces de resolver problemas complejos con un muestreo de búsqueda en el espacio acotado, con una población de soluciones, explorando un espacio mayor y logrando óptimos globales.

Para asegurar la confiabilidad en la predicción del modelo se utilizó el procedimiento de prueba de muestra dividida de Klemes, que consiste en dos etapas de evaluación: calibración y validación, cada una de las cuales requiere de una serie de tiempo independiente, por lo cual la información de cada cuenca se dividió en dos grupos (Perrin, Michel, & Andréassian, 2001).

El primer grupo es utilizado en la calibración, mientras que el segundo en la validación y posteriormente se realiza el proceso contrario. Una vez calibrado el modelo y los parámetros verificados, se continúa con la validación. El criterio de eficiencia de Nash y Sutcliffe cumplió como función objetivo del modelo.

Al existir variantes del algoritmo optimización por enjambre de partículas (PSO), en este trabajo se eligió el algoritmo original, sumado a una topología global, es decir todas las partículas están relacionadas entre sí e influye la mejor posición por sobre la totalidad de las partículas. Los coeficientes de aceleración $c_1 = c_2 = 1.49618$ y el peso de inercia $\omega = 0.7298$ (Rojas García, 2015). El proceso se puede observar en la Figura VIII.2

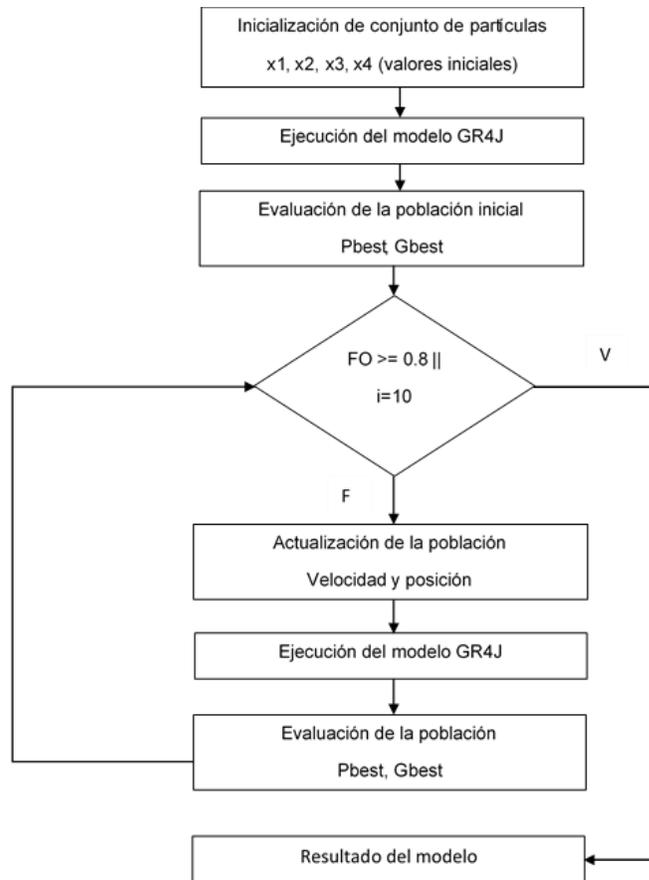


Figura VIII.2 Diagrama de flujo del algoritmo PSO (elaboración propia)

VIII.7. Criterios para la identificación de sitios

Para la selección de los sitios potenciales de hidrogenación a pequeña escala, se adoptó el criterio de Pandey (2015) y Meza-Prieto y Aparicio (2018), considerando exclusivamente las corrientes de tercer orden o mayores, con la finalidad de garantizar la acumulación de flujo para la generación eléctrica de una PCH. Además, Pandey (2015) menciona la longitud del cauce debe ser de 3000 m y una pendiente mayor al 2%.

Se ingresó la red hidrográfica digitalizada de INEGI escala 1:50000 en el programa de geoprocésamiento computacional identificando los puntos potenciales dentro de la red de drenaje ubicados en los tributarios del cauce principal de cada cuenca. Con la red hidrográfica se delimitó de forma manual el área de influencia de la cuenca siguiendo las curvas de nivel y el modelo digital de elevación. En la selección de los sitios se agregaron las capas de ciudades, caminos, carreteras, áreas de protección al medio ambiente y se

eligió aquellos sitios que cubrieran criterios medioambientales factibles y vías de acceso mediante carreteras y caminos cercanas al sitio.

Dentro de la cuenca con salida a la estación Tapijulapa, se distinguió que la totalidad de la zona correspondiente al cauce seleccionado pertenece a un área de conservación de acuerdo con los ordenamientos estatales, además en el resto de las cuencas, se discriminaron las Áreas Naturales Protegidas ANP, zonas de conservación y restauración, reduciendo las superficies a analizar. Los 13 sitios seleccionados se muestran en la Figura VIII.3., especificando sus características de superficie y longitud del cauce en la Tabla VIII.3.

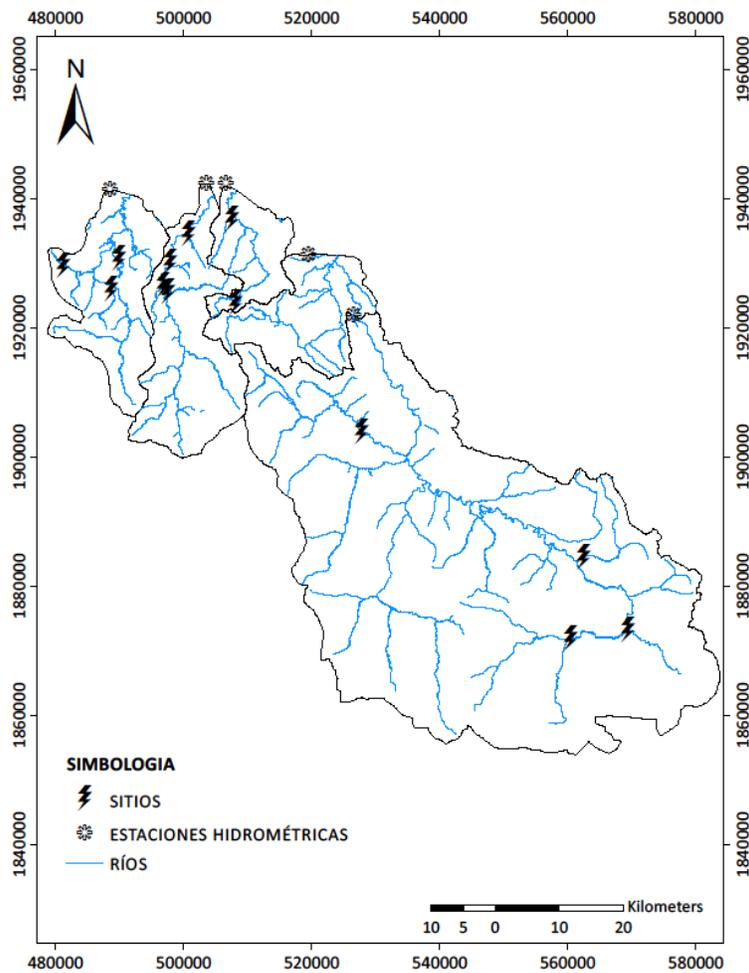


Figura VIII.3 Sitios con potencial hidroeléctrico (elaboración fuente INEGI datos vectoriales, 2017)

Tabla VIII.3 Sitios potenciales por cuenca delimitada

Cuenca	Id Sitio	Área (km ²)	Longitud del cauce (m)
Oxolotán	696	237.22	17305
	1047	88.38	22893
	1524	176.44	20836
	2084	344.32	25822
Pichucalco	2326	14.11	9809
	2610	6.99	4284
	3008	18.61	9776
Puyacatengo	625	21.96	11163
	925	14.14	8037
Teapa	1060	12.51	7770
	1197	16.72	11403
	1434	12.98	7107
	1591	46.83	16074

VIII.8. Potencial hidroeléctrico

Se seleccionó el conjunto de parámetros óptimos obtenidos en la etapa de validación en cada cuenca. Con estos parámetros se aplicó el modelo a cada sitio seleccionado de acuerdo con la cuenca a la que pertenecía. De esta manera se obtuvo el flujo final de salida del modelo para cada uno de los sitios el cual se multiplicó por el área de cada sitio (Tabla VIII.3) obteniendo el caudal diario a modelar para cada subcuenca. Con estos caudales se construyó la curva de duración de caudales para cada sitio seleccionado, Ortiz Flores (2011) hace mención que el gasto equivalente al 90 % se evalúa en la generación de PCH, porcentaje utilizado por Meza-Prieto y Aparicio (2018). Por lo cual a partir de los datos diarios calibrados se determinó la curva de duración de caudales seleccionando el 90 % del caudal que se presenta en el año en la simulación con presa en el programa computacional HEC-RAS.

VIII.8.1. HEC-GeoRas

El software HEC-RAS se desarrolló en el Centro de Ingenieros Hidrológicos HEC, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. y fue diseñado para realizar simulaciones unidimensionales y bidimensionales hidráulicas en ríos, analizar el funcionamiento de estructuras hidráulicas, transporte de sedimentos y análisis de calidad del agua. Dentro de los complementos existentes para este programa computacional se encuentra HEC-GeoRAS, encaminado a facilitar la simulación de archivos georreferenciados importados desde una herramienta de geoprocésamiento.

La importación de archivos de ArcGis a HEC-RAS, para cada sitio disponible realizar el cálculo del potencial hidroeléctrico bajo dos escenarios, con los datos históricos en el primer escenario y en el segundo la simulación se reprodujo con la estructura hidráulica para almacenamiento.

En la evaluación del impacto ambiental se utilizaron los siguientes indicadores hidroenergéticos: la densidad superficial y lineal del potencial hidroeléctrico teórico bruto PHTB. Estos indicadores se evaluaron con los resultados del caudal ecológico y los caudales calculados con el modelo GR4J. Ortiz Flores (2011), señala que los indicadores obtenidos con los datos presentados en el análisis de los sitios deben ser menores de sus correspondientes ambientales. Las ecuaciones (33) y (34) se utilizaron en la evaluación.

$$Lecol = \frac{Phecol}{L} \quad (33)$$

$$Aecol = \frac{Phecol}{A} \quad (34)$$

Lecol: densidad lineal ecológica.

Aecol: densidad superficial ecológica

Phecol: Potencial hidroeléctrico ecológico

L: longitud del cauce

A = Área de inundación

IX. Resultados

IX.1. Evapotranspiración potencial (ETP)

Los datos obtenidos por el Método de Oudin, el cual considera la relevancia de la radiación solar para determinar la evapotranspiración utilizada en las entradas para la modelación se muestran en las Figuras IX.1.

El periodo considerado en la serie de tiempo es la misma aplicada para la precipitación y se indica a continuación:

Tabla IX.1 Periodo por cuenca de estudio

Cuenca	Periodo
Puyacatengo	1950-1987
Teapa	1979-2011
Pichucalco	1956-1977
Tapijulapa	1964-2014
Oxolotán	1974-1995

La ETP acumulada por cuenca se muestra en la Figura IX.1

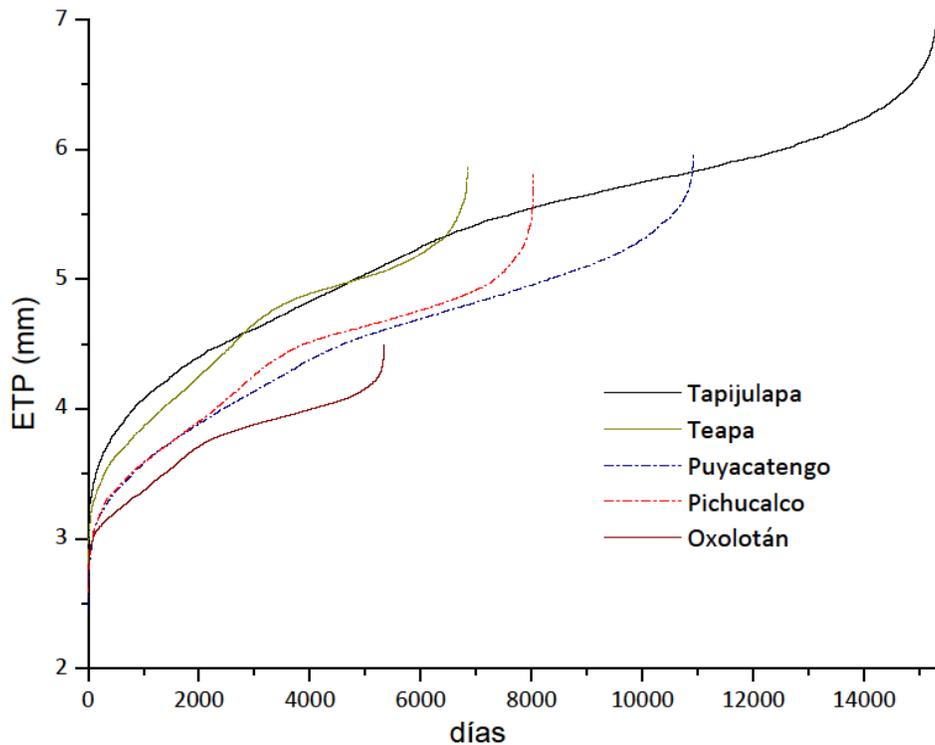


Figura IX.1 ETP acumulada por cuenca

El rango se encuentra entre 2.7 a 7 la máxima para todas las cuencas, ya que dependen de la temperatura media registrada y la radiación incidente influenciada por la latitud y día juliano.

IX.2. Caudal ecológico

De acuerdo con la norma NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas, define al caudal ecológico como "la cantidad, calidad y variación del gasto o agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales" ... (Secretaría de Economía, 2012). El cálculo del caudal se realizó siguiendo la metodología hidrológica para determinar el régimen de caudal ecológico en corrientes o cuerpos de agua nacionales a nivel de cuenca hidrológica. Aproximación metodológica propuesta por la alianza WWF–Fundación Gonzalo río Arronte, I.A.P., especificada en el apéndice normativo D de la norma.

El primer paso consistió en definir el objetivo ambiental de cada cuenca de acuerdo con la Tabla IX.2 (Secretaría de Economía, 2012) quedando de la siguiente manera:

Tabla IX.2 Objetivo ambiental de las cuencas de estudio

RH	Nombre de RH	Nombre de la cuenca	Importancia ecológica	Presión de Uso	Estado de conservación	Objetivo Ambiental
30	Grijalva-Usumacinta	Pichucalco	Alta	Baja	Muy bueno	A
30	Grijalva-Usumacinta	De la Sierra	Alta	Baja	Muy bueno	A
30	Grijalva-Usumacinta	Chacté	Media	Baja	Bueno	B
30	Grijalva-Usumacinta	De los Plátanos	Media	Baja	Bueno	B
30	Grijalva-Usumacinta	Almendo	Media	Baja	Bueno	B

Los registros de las series de tiempo de las estaciones hidrométricas que se utilizaron son de 1956 a 2014 en la cuenca Pichucalco, 1966-2010 en la cuenca Oxolotán y en Teapa y

Puyacatengo el periodo fue de 1951-2014. Para determinar el caudal ecológico, se requieren 20 años de registro mínimos, en caso de contar con un mayor número de años es útil su utilización.

En la metodológica propuesta por la alianza WWF, enumerada en el Apéndice normativo D de la norma NMX-AA-159-SCFI-2012, especifica determinar:

- 1.- Los caudales ecológicos ordinarios estacionales para cada condición (secas, medias, húmedas y muy húmedas)
- 2.- El régimen de avenidas.

Para los caudales ecológicos ordinarios estacionales, se calcularon los percentiles 75, 25, 10 y 0 para el volumen de cada mes de los distintos tipos de años (húmedos, medios, secos y muy secos, respectivamente). De acuerdo con el objetivo ambiental se utilizaron las frecuencias de ocurrencia como se especifica en la Tabla IX.3.

Tabla IX.3 Frecuencia de ocurrencia de los regímenes de caudales ordinarios estacionales

Objetivo Ambiental	Húmedo	Medio	Seco	Muy seco
A	0.1	0.4	0.3	0.2
B	0	0.2	0.4	0.4
C	0	0	0.4	0.6
D	0	0	0	1

Para los diferentes regímenes ordinarios estacionales, se consideró el producto del volumen anual por su correspondiente frecuencia de ocurrencia como se indica la siguiente expresión:

$$VtCoe = (fCoeH * VCoeH) + (fCoeM * VCoeM) + (fCoeS * VCoeS) + (fCoeMS * VCoeMS)$$

VtCoe: Volumen total del caudal ordinario estacional

fCoeH: Frecuencia de ocurrencia de un régimen "i" en donde "i" son las condiciones húmedas (H), medias (M), secas (S) y muy secas (MS).

VCoeH: Volumen del régimen de caudales ordinarios estacionales "i" en donde "i" son las condiciones húmedas (H), medias (M), secas (S) y muy secas (MS).

Los resultados se muestran en las Tablas IX.3 y IX.4.

Tabla IX.4 Volumen anual en hm³/año de acuerdo con el objetivo ambiental clase "B"

Tipo de año		Muy secos	Secos	Medios	Húmedos
Percentil		P0	P10	P25	P75
Vcoe	Oxolotán	827.17	1368.70	1767.54	3457.05
Frecuencia de ocurrencia		0.4	0.4	0.2	0.0
	Oxolotán	330.87	544.59	359.07	0.00
VtCoe	Oxolotán	1234.53			

Tabla IX.5 Volumen anual en hm³/año de acuerdo con el objetivo ambiental clase "A"

Tipo de año		Muy secos	Secos	Medios	Húmedos
Percentil		P0	P10	P25	P75
Vcoe	Pichucalco	256.72	519.87	749.80	1492.93
	Puyacatengo	127.20	260.41	385.31	711.79
	Teapa	220.71	546.57	780.96	1549.37
Frecuencia de ocurrencia		0.2	0.2	0.3	0.4
	Pichucalco	51.34	155.96	299.92	149.29
	Puyacatengo	25.44	81.31	154.12	71.18
	Teapa	44.14	163.97	312.39	154.94
VtCoe	Pichucalco	656.52			
	Puyacatengo	332.05			
	Teapa	675.44			

Régimen de avenidas

La investigación acumulada sobre la relación entre la variabilidad hidrológica y la integridad del ecosistema fluvial sugiere un paradigma de flujo natural, que establece: La variación natural de los regímenes hidrológicos y sus características asociadas de tiempo, duración, frecuencia y tasa de cambio son fundamentales para mantener la biodiversidad y la integridad de los ecosistemas acuáticos (Richter et al., 1997). Estos componentes pueden utilizarse para caracterizar toda la gama de caudales y fenómenos hidrológicos específicos, como inundaciones o caudales bajos, que son fundamentales para la integridad de los ecosistemas fluviales. El régimen de caudal natural organiza y define los ecosistemas fluviales (Poff et al., 1997).

Por ejemplo, la modificación del momento, la frecuencia o la duración de las inundaciones puede eliminar las señales de desove o migratorias de los peces, o reducir el acceso a las áreas de desove o cría, El aumento de la frecuencia o duración de los altos niveles de flujo puede desplazar a los organismos sensibles a la velocidad, como algunos macrófitos de fitoplancton, macroinvertebrados, peces jóvenes y huevos depositados. La integridad del ecosistema acuático y el paradigma del flujo natural permiten a los individuos sobrevivir y reproducirse dentro de un cierto rango de variación ambiental (Richter et al., 1997).

Dentro de los conceptos de los componentes involucrados en la variabilidad hidrológica se mencionan (Poff, et al., 1997):

- La frecuencia de ocurrencia se refiere a la cantidad de eventos en los que se repite un flujo por encima de una magnitud dada durante un intervalo de tiempo específico.
- La duración es el período de tiempo asociado con una condición de flujo específica.
- La tasa de cambio, o lo llamativo, se refiere a la rapidez con que cambia el flujo de una magnitud a otra.

Para el régimen de avenidas se determinaron los caudales máximos anuales de la serie de datos y se utilizaron las distribuciones de frecuencia Normal, como la función más utilizada y de mayor interés en el campo de la estadística y Gumbel, utilizada en el análisis de frecuencia de lluvia y que ha demostrado tener el mejor ajuste en su aplicación. Los periodos de retorno de acuerdo con cada categoría; categoría I = un año, categoría II = 1.5 años y categoría III = 5 años. El mejor ajuste para todas las cuencas fue con la distribución de Gumbel como se observa en la Figura IX.2.

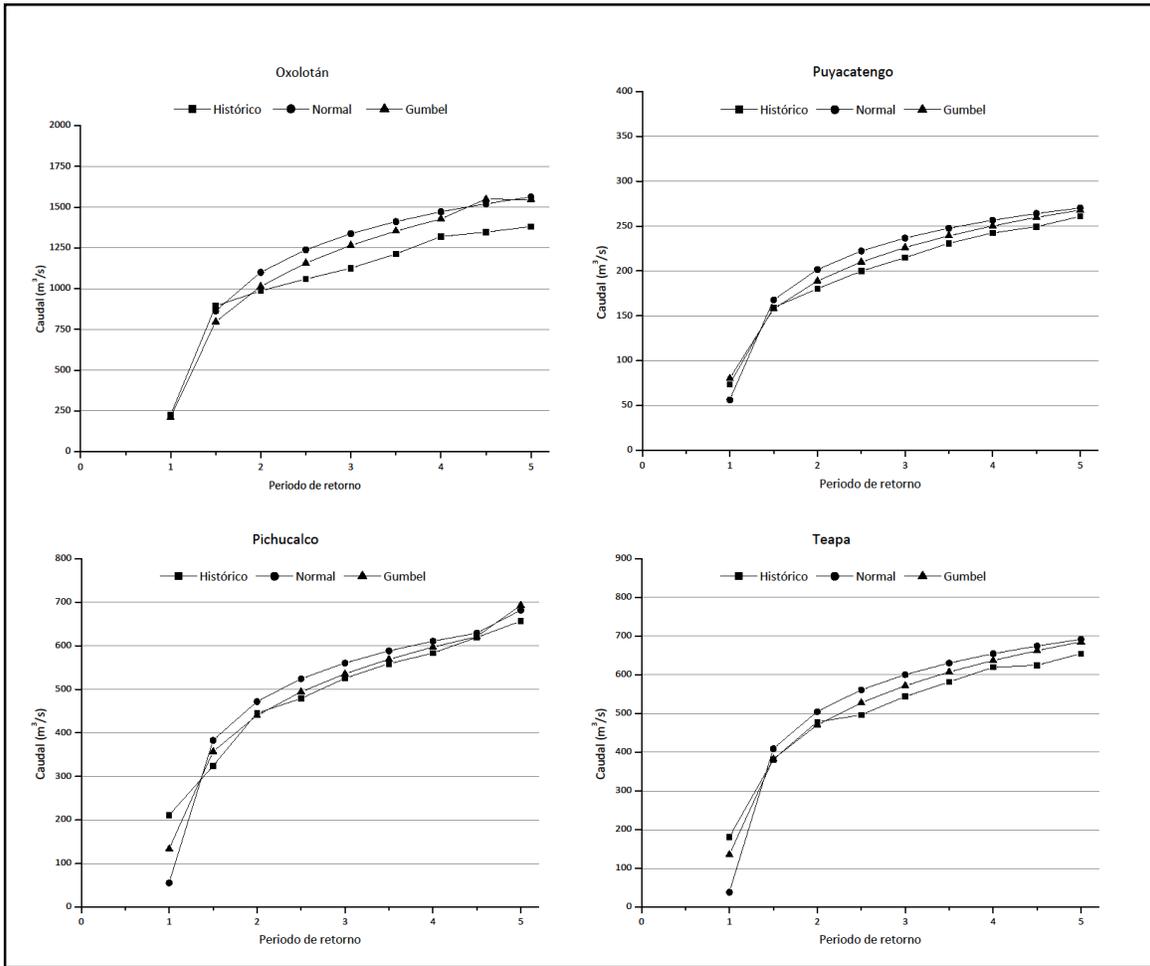


Figura IX.2 Distribución estadística para identificar la magnitud de las avenidas de las cuencas de estudio

Se obtuvo la caracterización de los patrones de duración, momento de ocurrencia y tasa de cambio de los tres tipos de avenidas. Para calcular la tasa de cambio se separaron los días de avenidas, aplicando la ecuación 36 sobre la serie:

$$T_c = (Q_i - Q_{i+1}) / Q_i \times 100 \quad (35)$$

Tc: Tasa de cambio (%);

Qi: Caudal medio en un día “i”

Qi+1: Caudal medio del día siguiente.

Tabla IX.6 Criterios de integración de avenidas tipo a partir de sus frecuencias de ocurrencia según los objetivos ambientales

Objetivo Ambiental	Categoría III	Categoría II	Categoría I
A	2	6	10
B	2	3	5
C	1	2	3
D	1	1	2

Se realizó el ajuste a la propuesta de régimen de avenida a partir de sus respectivas frecuencias de ocurrencia de la Tabla IX.5 y el cálculo el volumen anual de cada tipo de avenida (categoría I, II y III) con la expresión:

$$VtRa = (F_I \times D_I \times V_I) + (F_{II} \times D_{II} \times V_{II}) + (F_{III} \times D_{III} \times V_{III})$$

VtRa = Volumen total del régimen de avenida

F_i: Frecuencia de ocurrencia de una avenida "i", siendo "i" las avenidas tipo I, II y III

D_i: Duración de avenida "i", siendo "i" las avenidas tipo I, II y III

V_i: Volumen de una avenida "i", siendo "i" las avenidas tipo I, II y III

Los resultados se muestran en las Tablas IX.6, IX.7, IX.8 y IX.9.

Tabla IX.7 Resultado de caudal ecológico para eventos de avenidas para la cuenca Oxolotán

Magnitud	Categoría I	Categoría II	Categoría III
m ³ /s	211.41	829.34	1246.72
hm ³ /día	18.27	71.65	107.72
Frecuencia de ocurrencia (días)	5	3	2
Duración (días)	21	6	3
Momento de ocurrencia	Agosto-diciembre		
Tasa de cambio	Ascenso 46.24	Descenso	-35.66
VtRa 10 años	3854.01		
VtRa 1 año	385.4		

$$\text{Caudal ecológico} = 1234.53 + 385.4 = 1619.93 \text{ Hm}^3$$

Tabla IX.8 Resultado de caudal ecológico para eventos de avenidas para la cuenca Pichucalco

Magnitud		Categoría I	Categoría II	Categoría III
	m ³ /s	94.49	369.86	643.58
	Hm ³ /día	8.16	31.96	55.61
Frecuencia de ocurrencia (días)		10	6	2
Duración (días)		5	2	1
Momento de ocurrencia		Septiembre-noviembre		
Tasa de cambio	Ascenso	69.39	Descenso	-83.49
VtRa 10 años		902.88		
VtRa 1 año		90.28		

$$\text{Caudal ecológico} = 656.52 + 90.28 = 746.81 \text{ Hm}^3$$

Tabla IX.9 Resultado de caudal ecológico para eventos de avenidas para la cuenca Puyacatengo

Magnitud		Categoría I	Categoría II	Categoría III
	m ³ /s	50.30	161.43	219.50
	Hm ³ /día	4.35	13.95	18.97
Frecuencia de ocurrencia (días)		5	10	6
Duración (días)		1	2	1
Momento de ocurrencia		Septiembre-noviembre		
Tasa de cambio	Ascenso	49.94	Descenso	-70.64
VtRa 10 años		208.54		
VtRa 1 año		20.85		

$$\text{Caudal ecológico} = 332.05 + 20.85 = 352.91 \text{ Hm}^3$$

Tabla IX.10 Resultado de caudal ecológico para eventos de avenidas para la cuenca Teapa

Magnitud		Categoría I	Categoría II	Categoría III
	m ³ /s	86.91	395.59	554.04
	Hm ³ /día	7.51	34.18	47.87
Frecuencia de ocurrencia (días)		10	6	2
Duración (días)		4	1	1
Momento de ocurrencia		Agosto-diciembre		
Tasa de cambio	Ascenso	52.27	Descenso	-74.13
VtRa 10 años		601.12		
VtRa 1 año		60.12		

$$\text{Caudal ecológico} = 675.44 + 60.12 = 735.55 \text{ Hm}^3$$

IX.3. Simulación del modelo GR4J en el proceso de calibración

El resultado del cálculo de parámetros en el proceso de calibración se muestra en la Tabla IX.11. Se observa que en el segundo periodo de calibración las eficiencias de las cuencas Pichucalco y Puyacatengo tienden a disminuir en comparación con el primer periodo alcanzando valores menores al 50 % durante la segunda fase. La cuenca Oxolotán presentó la misma tendencia al disminuir el valor de 70.34 % en el primer periodo a 60.59 %, aunque obtuvo los mejores índices superiores al 60 % en ambos periodos.

Las cuencas Teapa y Tapijulapa en el proceso inicial alcanzan un índice de 40.02 % y 33.73 % respectivamente incrementándose en la segunda fase a 58.06 % en Teapa y 41.91 % en Tapijulapa. La cuenca que en ambos periodos mostró eficiencias menores es Tapijulapa, alcanzando el máximo valor de 41.91 %.

Tabla IX.11 Resultados en el periodo de calibración

Estación	Periodo	Parámetros del modelo				NSE (%)
		x1 (mm)	x2 (mm)	x3 (mm)	x4 (días)	
Pichucalco	Primero	633.87	-0.09	320.38	2.12	50.74
	Segundo	576.68	0.23	109.02	4.61	45.20
Oxolotán	Primero	789.77	-0.27	120.68	0.93	70.34
	Segundo	612.40	-0.70	54.02	3.99	60.59
Puyacatengo	Primero	337.34	-0.68	226.99	2.98	65.79
	Segundo	522.56	-0.90	337.72	1.73	42.38
Teapa	Primero	1232.50	0.26	688.66	2.64	40.02
	Segundo	496.99	-0.89	135.74	1.68	58.06
Tapijulapa	Primero	1229.90	0.00	164.83	0.22	33.73
	Segundo	373.46	-0.86	216.54	1.50	41.91

IX.4. Simulación con el modelo GR4J en el proceso de validación

Durante esta etapa el rango de eficiencia mejoró incluyendo la cuenca Tapijulapa que alcanzó un índice de 61.46 % en la primera fase. La Tabla IX.12, muestra los resultados durante los dos periodos de validación. En el caso de la cuenca Pichucalco, en la primera fase, se obtuvo una eficiencia del 50.91 %, incrementándose a 69.38 % con el conjunto de parámetros calibrados. El mismo comportamiento se observa en la cuenca Teapa que incrementó de 50.33 % a 63.90 %. En las cuencas Oxolotán, Puyacatengo y Tapijulapa la

tendencia o comportamiento difiere al encontrarse el conjunto de parámetros con eficiencias mayores en el primer periodo con valores de 73.22, 69.07 y 61.46% respectivamente disminuyendo a 70.31 % en Oxolotán y al 50 % en las dos cuencas restantes calculadas en la segunda fase. La cuenca Oxolotán se mantiene con los mayores índices por arriba del 70%.

Tabla IX.12 Resultados en el periodo de validación

Estación hidrométrica	Periodo	Parámetros del modelo				NSE %
		x1 (mm)	x2 (mm)	x3 (mm)	x4 (días)	
Pichucalco	Primero	406.29	-0.15	384.12	0.54	50.91
	Segundo	694.39	0.25	65.07	3.84	69.38
Oxolotán	Primero	386.00	-0.81	214.69	0.44	73.22
	Segundo	926.87	0.29	154.35	0.16	70.31
Puyacatengo	Primero	201.72	-0.71	236.50	2.32	69.07
	Segundo	242.65	-0.61	171.62	1.44	50.39
Teapa	Primero	1072.70	0.30	571.25	0.41	50.33
	Segundo	594.19	-0.06	335.81	5.70	63.90
Tapijulapa	Primero	1016.80	-0.04	271.09	0.61	61.46
	Segundo	1291.30	0.16	595.17	0.12	50.24

Con el conjunto de parámetros que presentaron los índices de eficiencia NSE más altos en el proceso de validación del modelo, se aplicaron al modelo para obtener los caudales diarios de cada una de las cuencas. Al ser un modelo de precipitación diaria, las unidades del modelo GR4J se encuentran en mm/día; para conocer el flujo superficial de cada cuenca se obtuvo del producto del flujo final de salida del modelo por el área a la salida de cada cuenca.

Los resultados de caudal diario en las cuencas de estudio se muestran en las Figuras IX.3, IX.4, IX.5, IX.6 y IX.7.

Se observa que los flujos de valores extremos tienen menor concordancia con los valores observados, mostrando que la simulación tiene un resultado de aproximación más cercano a lo observado en los flujos base.

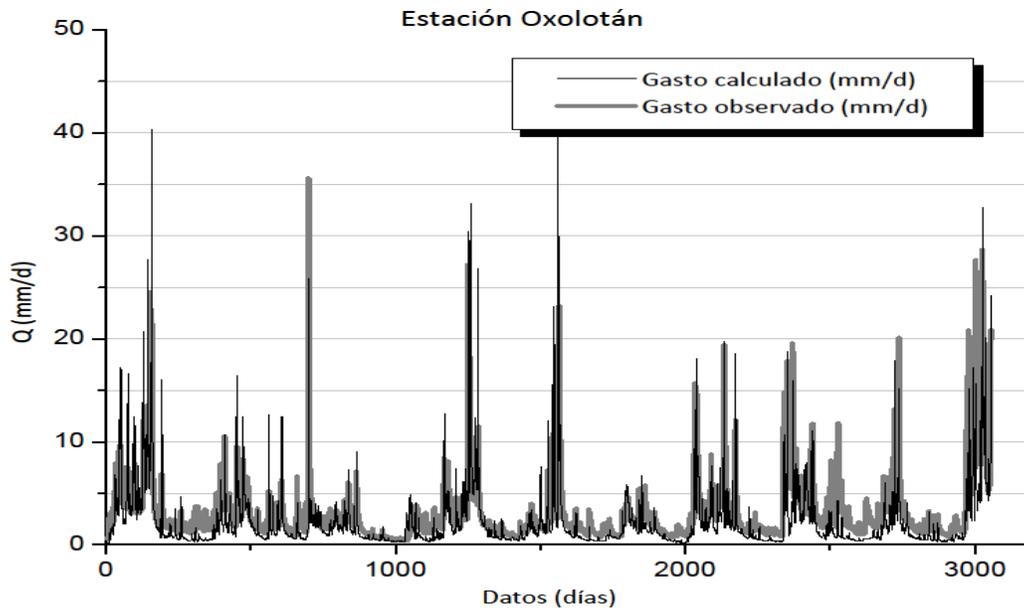


Figura IX.3 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Oxolotán

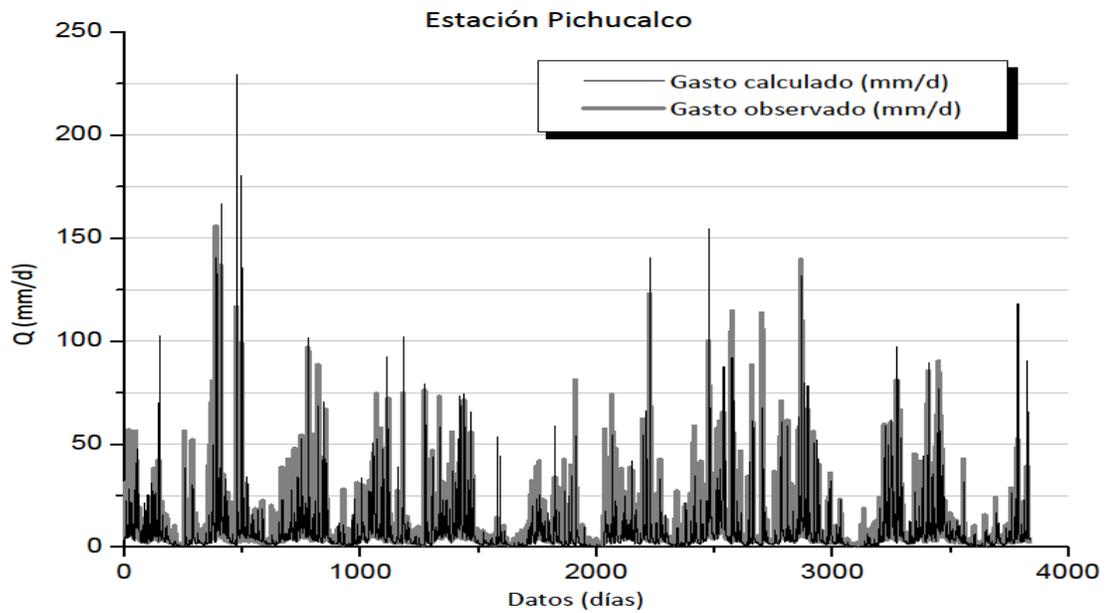


Figura IX.4 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Pichualco

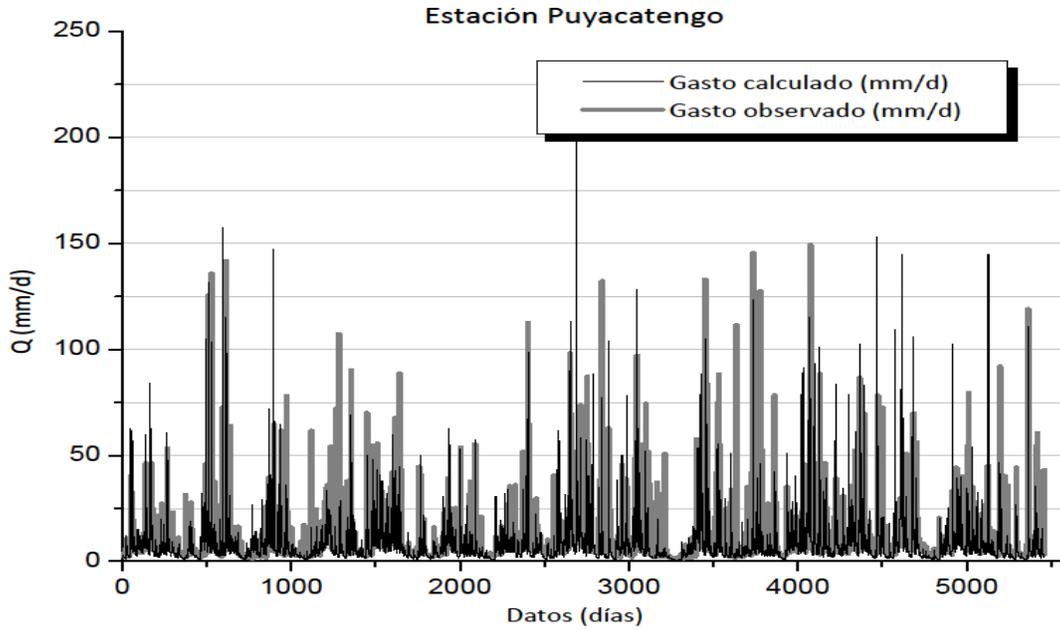


Figura IX.5 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Puyacatengo

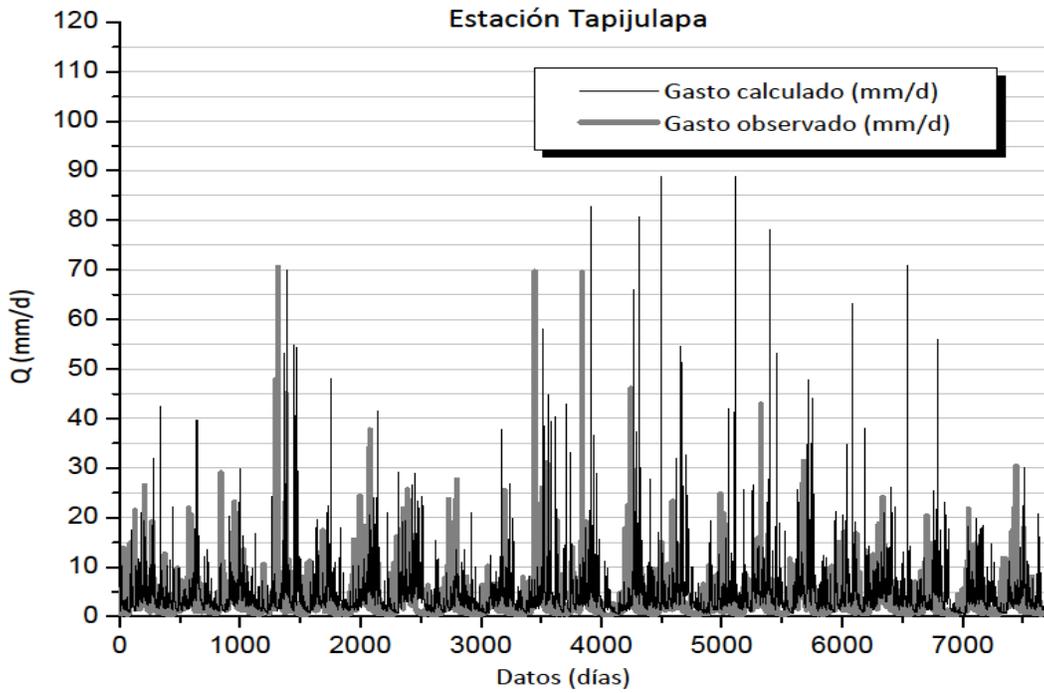


Figura IX.6 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Tapijulapa

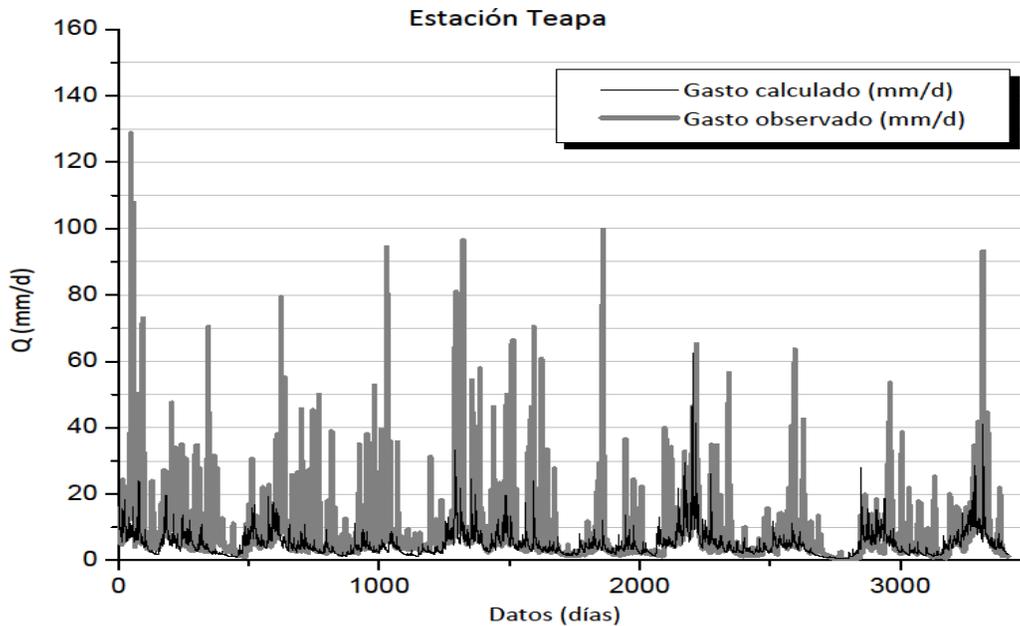


Figura IX.7 Caudales calculados y observados en el proceso de validación de la cuenca Teapa

IX.5. Potencial hidroeléctrico de la cuenca Oxolotán

Las curvas de duración de caudales de los sitios de la cuenca Oxolotán se muestran en la Figura IX.8, el Q_{90} presente es: en el sitio 696, de $4.17 \text{ m}^3/\text{s}$, $3.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en el sitio 1524, el caudal mayor de $6.05 \text{ m}^3/\text{s}$ es en el sitio 2084, y $1.55 \text{ m}^3/\text{s}$ en el sitio 1047.

El resultado de la simulación en Hec-Ras, de los sitios en la cuenca Oxolotán en condiciones naturales y con cortina para determinar la carga hidráulica, así como el potencial hidroeléctrico se presenta en la Tabla IX.13.

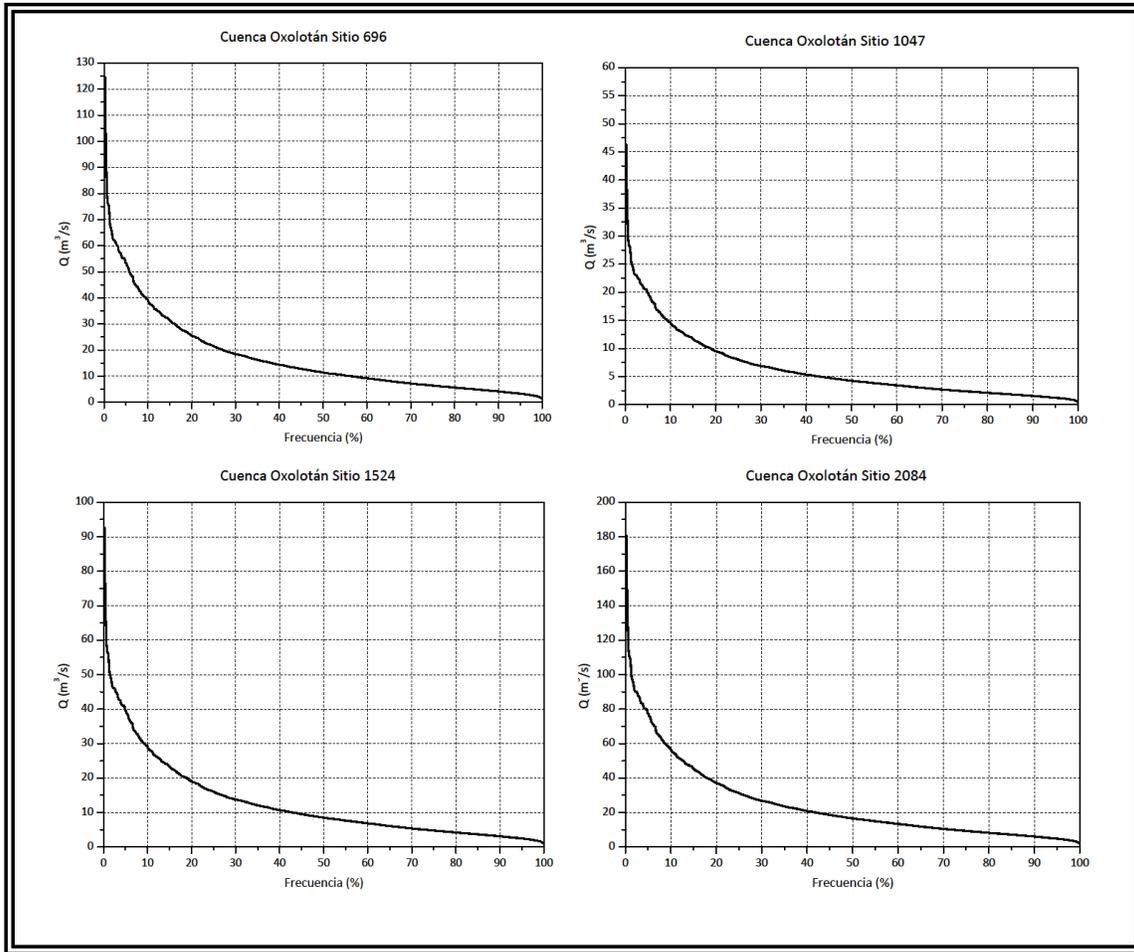


Figura IX.8 Comparación del potencial hidroeléctrico en la cuenca Oxolotán con resultados de la simulación con datos históricos y con presa

Tabla IX.13 Comparación del potencial hidroeléctrico en la cuenca Oxolotán con resultados de la simulación con datos históricos y con presa

Cuenca	Id	Área (km ²)	Hb (m)	Hb Cortina (m)	Q ₉₀ (m ³ /s)	Potencial hidroeléctrico caída natural (kW)	Potencial hidroeléctrico con cortina (kW)	Generación producida con cortina (kWh)
Oxolotán	696	237.22	9	24	4.17	366.79	980.95	18834.22
	1047	88.38	15	35	1.55	231.10	532.99	10233.41
	1524	176.43	10	20	3.10	316.22	608.01	11673.73
	2084	344.31	9	21	6.05	538.20	1245.84	23920.22

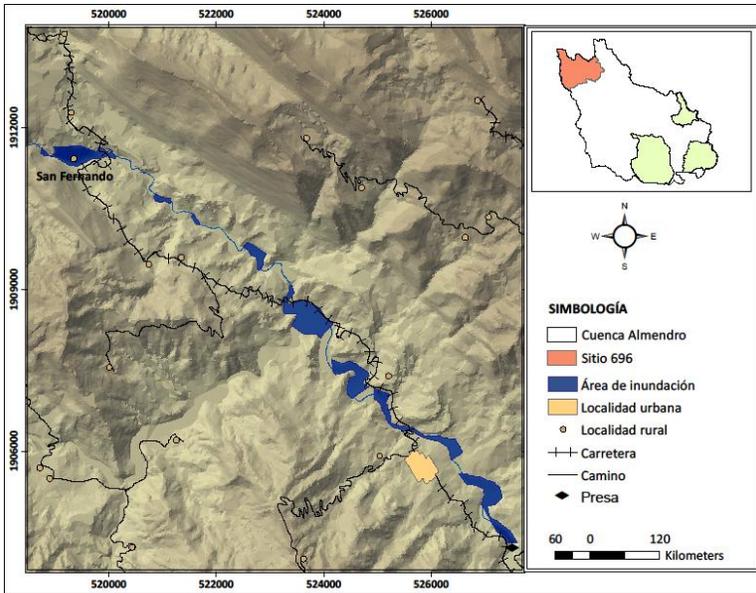


Figura IX.9 Simulación del sitio 696

Con generación de potencia bruta de 18834 kWh con potencial disponible de 980 kW este sitio se coloca en la segunda posición de generación.

En la Figura IX.9 se observa que la extensión de agua llega hasta el poblado San Fernando aguas arriba, siendo descartado como viable.

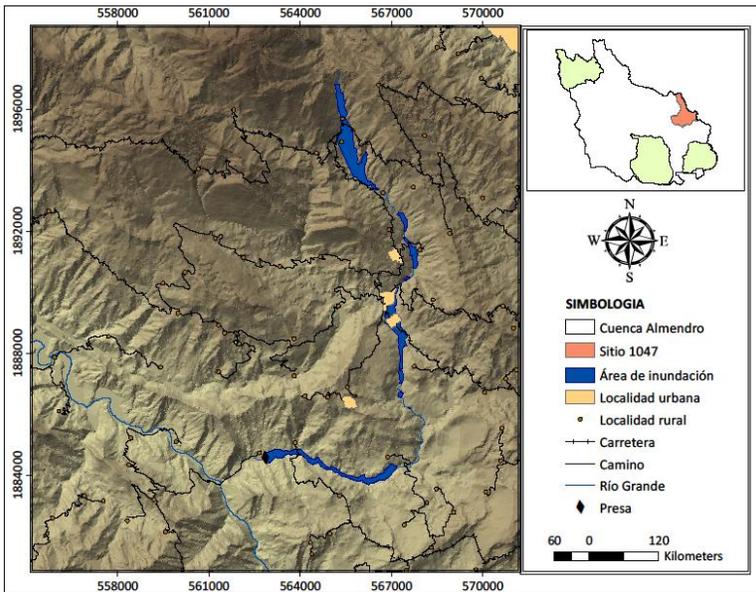


Figura IX.10 Simulación del sitio 1047

La simulación con presa ofrece una potencia de generación bruta (salto bruto), de 10233 kWh; sin embargo, las localidades de Tacuba Nueva y San Juan de la Montaña, en los márgenes del cauce, llegan a cubrirse indicando que no existe viabilidad en este punto. Figura IX.10.

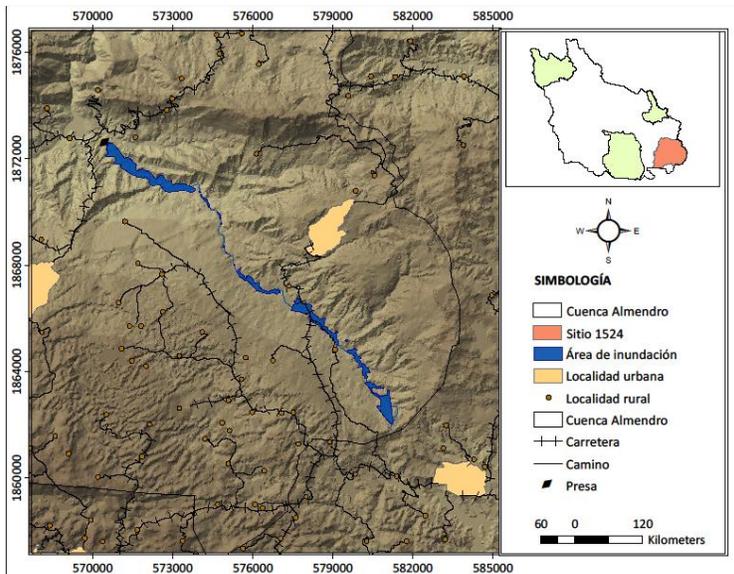


Figura IX.11 Simulación del sitio 1524

La Figura IX.11 muestra el sitio 1524, ubicado en la cuenca Chacté, el lugar destinado cuenta con vías de acceso.

Considerando un radio de 10 km se ubican 52 localidades rurales y San Juan Cancún y Tenango, poblaciones urbanas beneficiadas con una generación 11673 kWh y su potencia disponible de 608 kW.

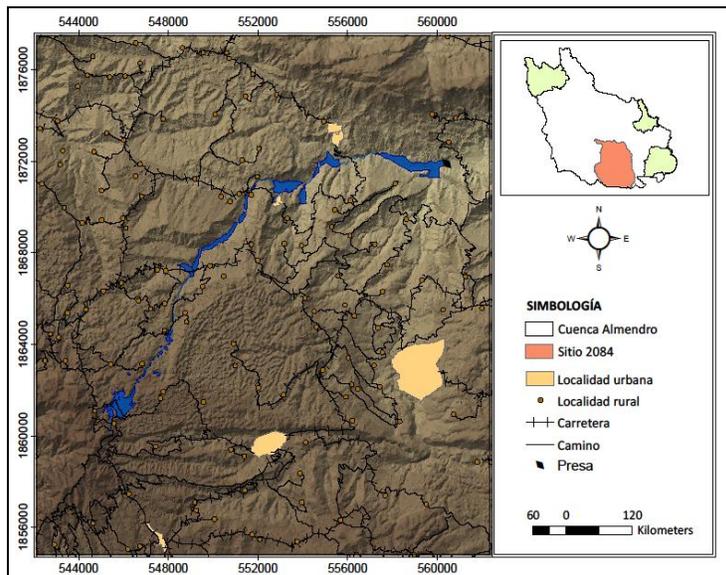


Figura IX.12 Simulación del sitio 2084

Como se muestra en la Figura IX.12, cuenta con una red de caminos que permite tener vías de acceso, además de conectar a más de cien localidades rurales, y cuatro urbanas, Tzeltal, Miguel Utrilla (los Chorros), El Pozo y Yoshiby. Esta subcuenca es la de mayor potencial con 1,245 kW, que se traduce en 23920 kWh.

IX.6. Potencial hidroeléctrico de la cuenca Pichualco

En la cuenca Pichualco el Q_{90} definido para los sitios tiene una variación inferior a $1 \text{ m}^3/\text{s}$, de $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ en la subcuenca 2610, a $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ en el 3008, con el valor intermedio en el sitio 2326 con $0.57 \text{ m}^3/\text{s}$, como se indica en la Figura IX.13.

El concentrado de los valores obtenidos de caudal, carga hidráulica, potenciales hidroeléctrico y generación para estos sitios se presentan en la Tabla IX.14 Comparación de potencial hidroeléctrico en la cuenca Pichualco con resultados de la simulación con datos históricos y con presa Tabla IX.14.

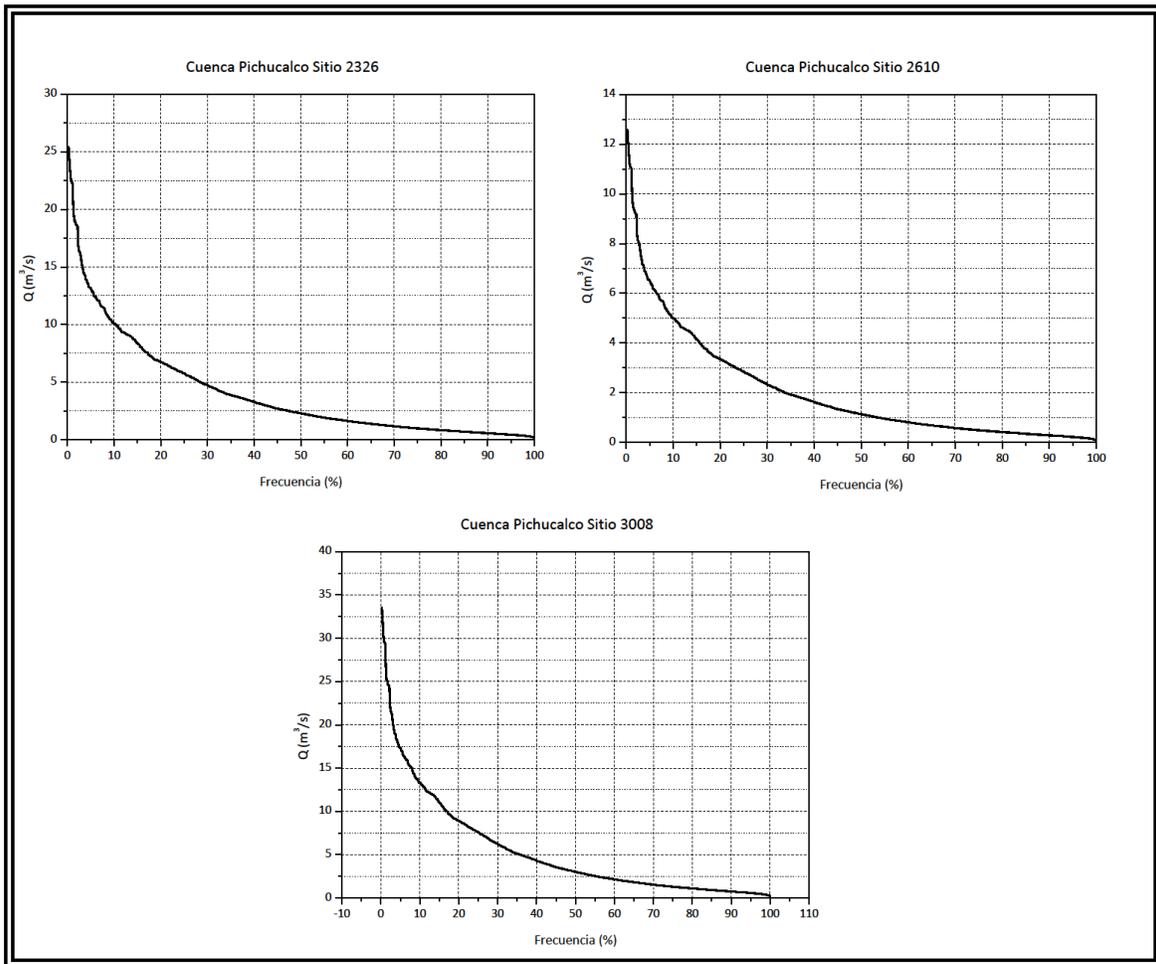


Figura IX.13 Curva de duración de caudales de los sitios seleccionados en la cuenca Pichualco

Tabla IX.14 Comparación de potencial hidroeléctrico en la cuenca Pichucalco con resultados de la simulación con datos históricos y con presa

Cuenca	Id	Área (km ²)	Hb (m)	Hb Cortina (m)	Q ₉₀ (m ³ /s)	Potencial hidroeléctrico caída natural (KW)	Potencial hidroeléctrico con cortina (KW)	Generación producida con cortina (kWh)
Pichucalco	2326	14.10	39	50	0.57	216.83	280.37	5383.11
	2610	6.99	36	40	0.28	99.17	111.12	2133.47
	3008	18.612	27	40	0.75	197.90	295.88	5680.82

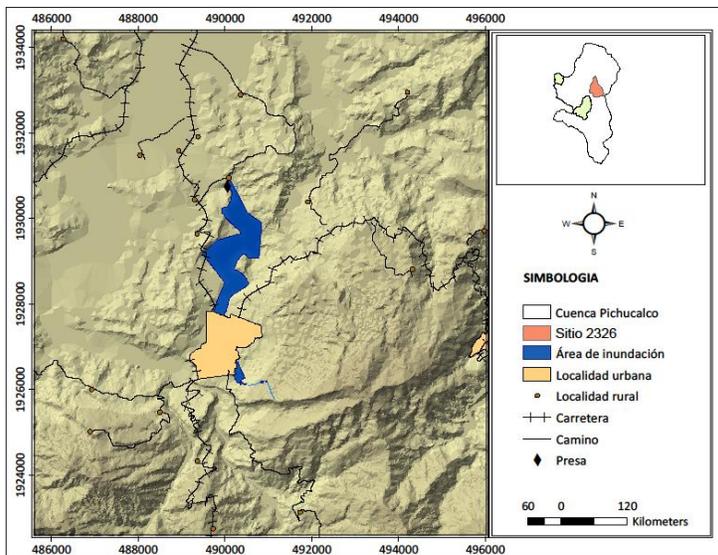


Figura IX.14 Simulación del sitio 2326

El área de inundación como se muestra en la Figura IX.14 se extiende en su margen izquierdo cubriendo parte de la carretera y de la localidad de Ixtacomitán. Aun cuando la potencia disponible es de 280 KW y una generación de 5383 KWH, la viabilidad de este sitio no es factible

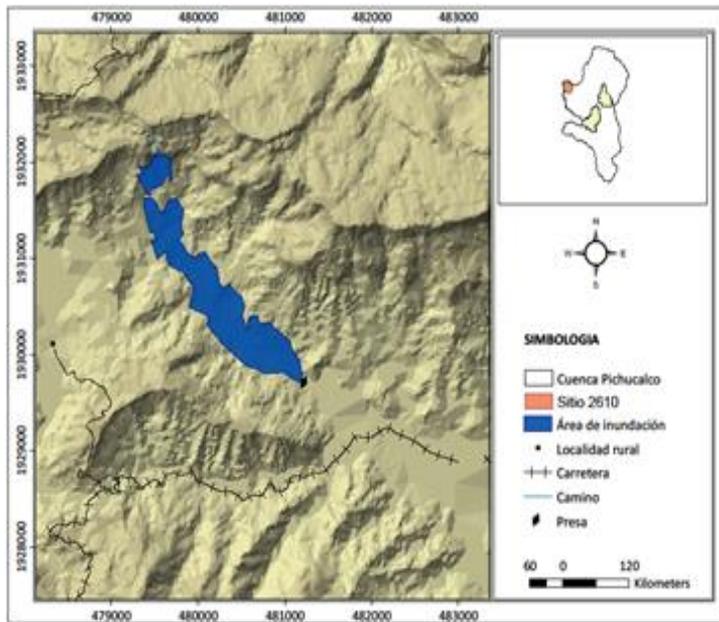


Figura IX.15 Simulación del sitio 2610

Se observa en la Figura IX.15 el acceso por carretera al sitio, y cuenta con alrededor de 40 localidades de tipo rural. Al contar con una de las cortinas de mayor altitud encontradas en la simulación (40 m) su localización permite la extensión del embalse sin afectaciones a comunidades. El potencial hidroeléctrico se ubica en 111 kW y 2,133 kWh de generación.

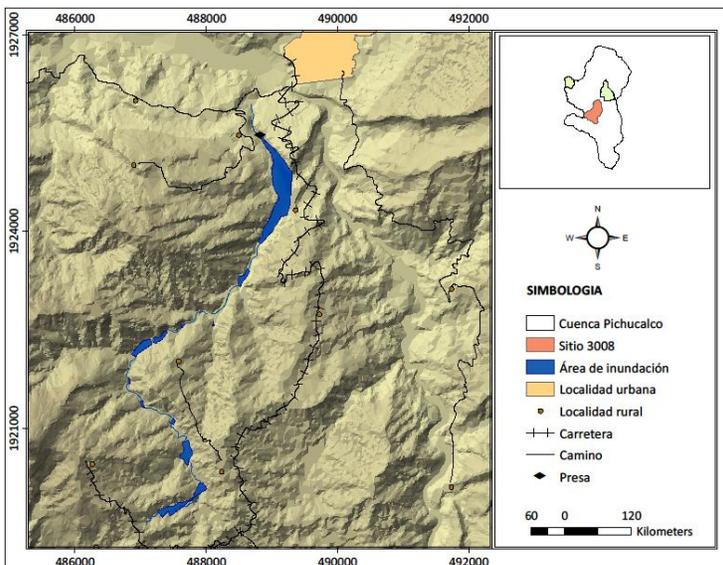


Figura IX.16 Simulación del sitio 3008

Como se observa en la Figura IX.16 el sitio tiene a su alrededor una docena de localidades rurales y el poblado urbano de Ixtacomitán.

La energía generada bruta que alcanza es de 5680 kWh con potencia de 295 kW.

IX.7. Potencial hidroeléctrico de la cuenca Puyacatengo

El Q_{90} del sitio 625 se ubicó en $0.93 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en la subcuenca 925 es de $0.60 \text{ m}^3/\text{s}$ como indica la Figura IX.17. El resultado de la simulación bajo los dos escenarios y el cálculo del potencial hidroeléctrico correspondiente se enlistan en la Tabla IX.15.

Esta cuenca presenta la menor variación entre ambos potenciales debido a que el incremento de la carga por la cortina es inferior que en los otros casos.

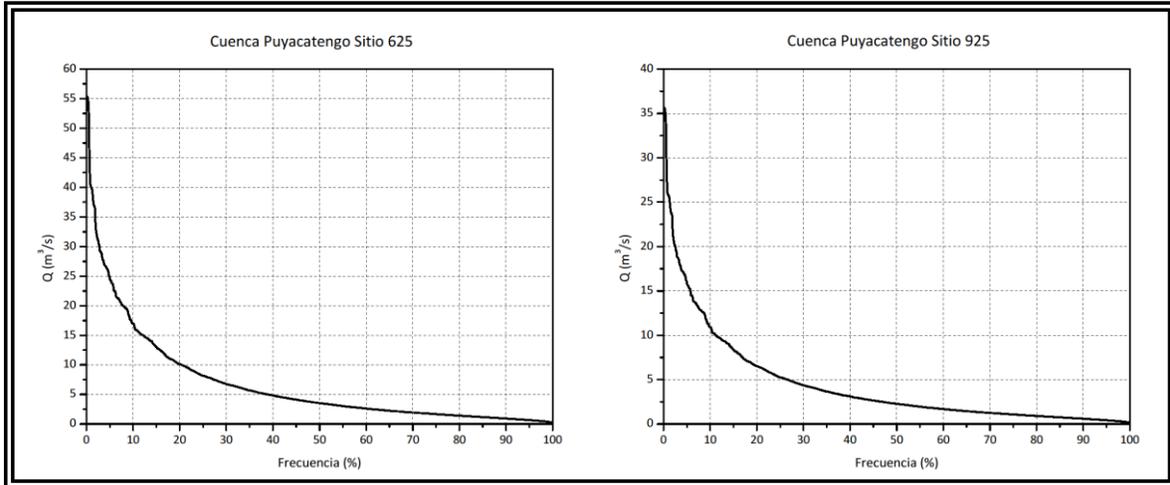


Figura IX.17 Curva de duración de caudales de los sitios seleccionados en la cuenca Puyacatengo

Tabla IX.15 Comparación del potencial hidroeléctrico en la cuenca Puyacatengo con resultados de la simulación con datos históricos y con presa

Cuenca	Id	Área (km ²)	Hb (m)	Hb Cortina (m)	Q_{90} (m ³ /s)	Potencial hidroeléctrico caída natural (KW)	Potencial hidroeléctrico con cortina (KW)	Generación producida con cortina (kWh)
Puyacatengo	625	21.96	38	47	0.93	345.23	428.30	8223.45
	925	14.14	22	30	0.60	129.48	176.05	3380.19

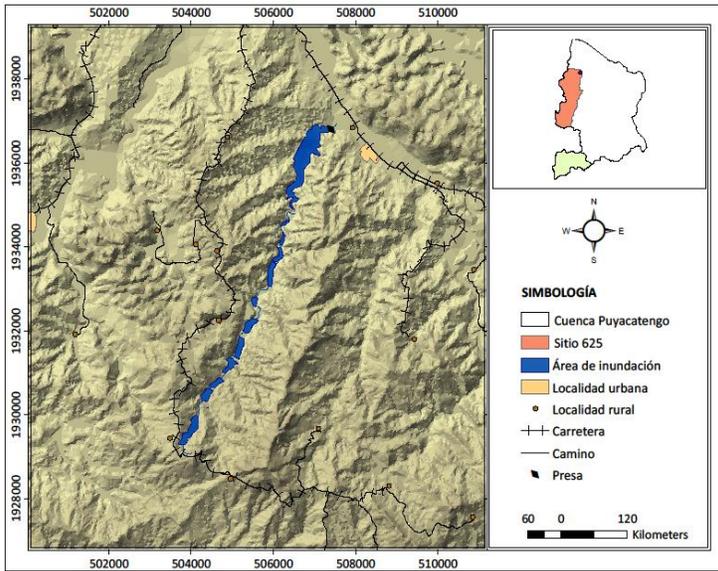


Figura IX.18 Simulación del sitio 625

Con la población de Teapa y 17 localidades de tipo rural al pie de la cortina, cuenta con vías de acceso en carretera, como se presenta en la Figura IX.18.

Este sitio cuenta con el mayor potencial después de la cuenca Oxolotán con 428.30 kW y una generación de 8223 kWh, debido a la elevación de su cortina de 47 m, ya que cuenta con un caudal de 0.93 m³/s.

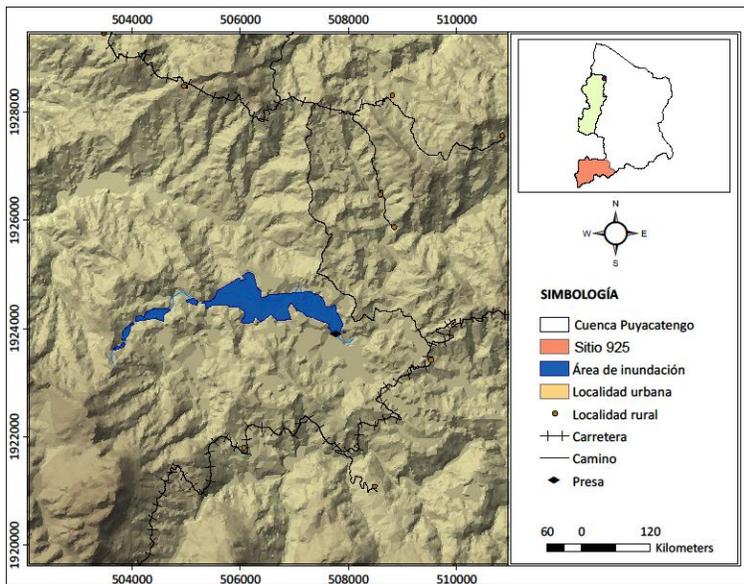


Figura IX.19 Simulación del sitio 925

La localidad urbana más cercana al sitio se encuentra a 11 km, rodeándose de más de 20 poblaciones rurales en un radio de 10 km, con vía de acceso por carretera, como se muestra en la Figura IX.19. Se estima una generación de 3380 kWh con potencia disponible de 176.05 kW.

IX.8. Potencial hidroeléctrico de la cuenca Teapa

En la Figura IX.20, se observa la curva de duración de caudales de los cuatro sitios seleccionados, estos sitios presentan los gastos más pequeños con 0.38 y 0.49 m³/s llegando al máximo de 1.36 m³/s para la subcuenca 1591.

En la Tabla IX.16 se concentra el resultado del potencial disponible en los sitios seleccionados de la cuenca Teapa. Destaca la subcuenca 1591 con una carga hidráulica con presa de 18 m con un incremento notable de potencial hidroeléctrico de 94.13 kW con caída natural hasta 240.61 kW con cortina. Cabe hacer mención que las menores magnitudes de potencia y generación se localizan en esta cuenca.

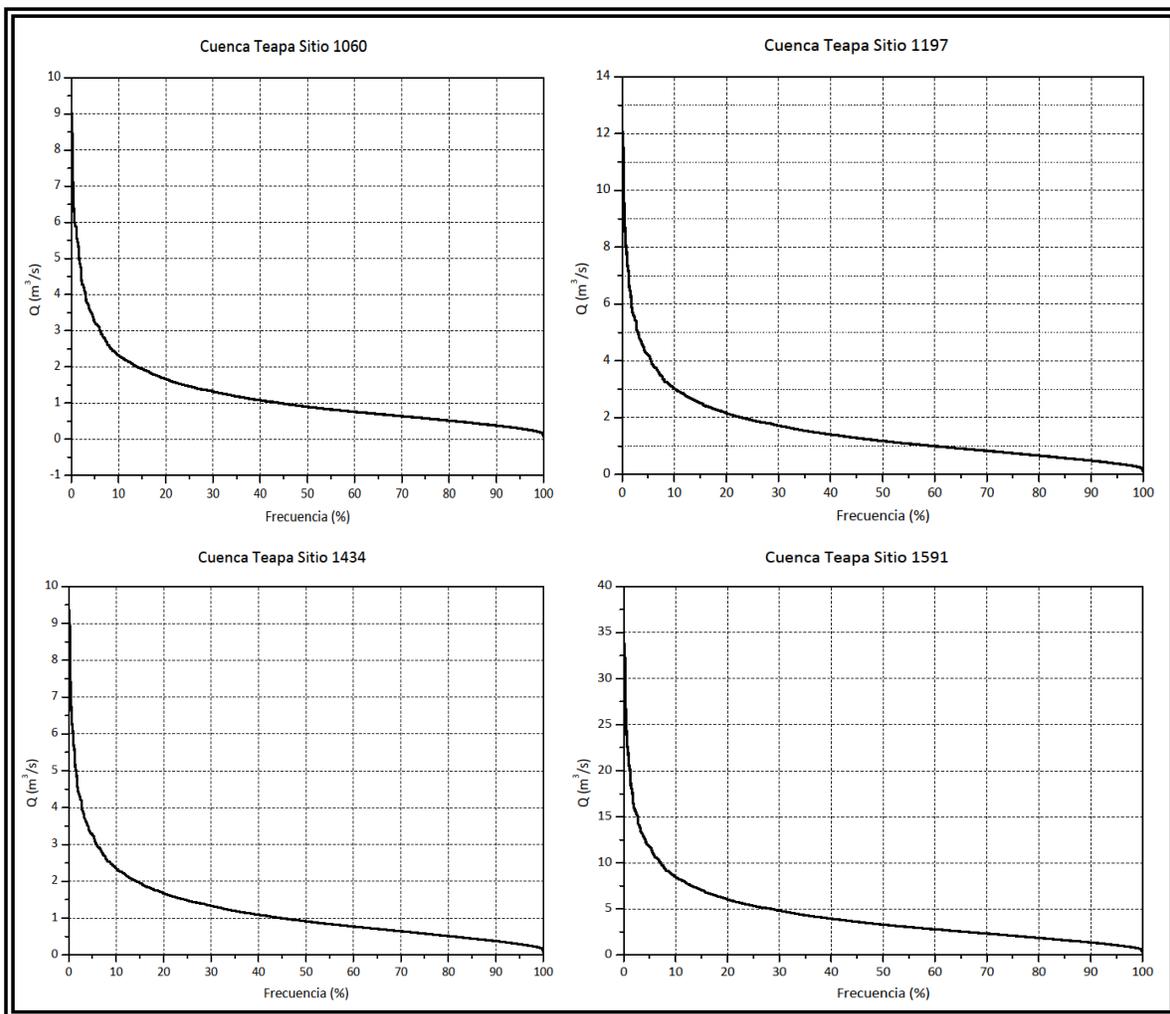


Figura IX.20 Curva de duración de caudales de los sitios seleccionados en la cuenca Teapa

Tabla IX.16 Comparación del potencial hidroeléctrico en la cuenca Teapa con resultados de la simulación con datos históricos y con presa

Cuenca	Id	Área (km ²)	Hb (m)	Hb Cortina (m)	Q ₉₀ (m ³ /s)	Potencial hidroeléctrico caída natural (kW)	Potencial hidroeléctrico con cortina (kW)	Generación producida con cortina (kWh)
Teapa	1060	12.51	11	23	0.38	39.60	85.61	1643.64
	1197	16.72	2	10	0.49	11.09	47.72	916.19
	1434	12.98	3	10	0.38	11.05	37.05	711.34
	1591	46.83	7	18	1.36	94.13	240.61	4619.80

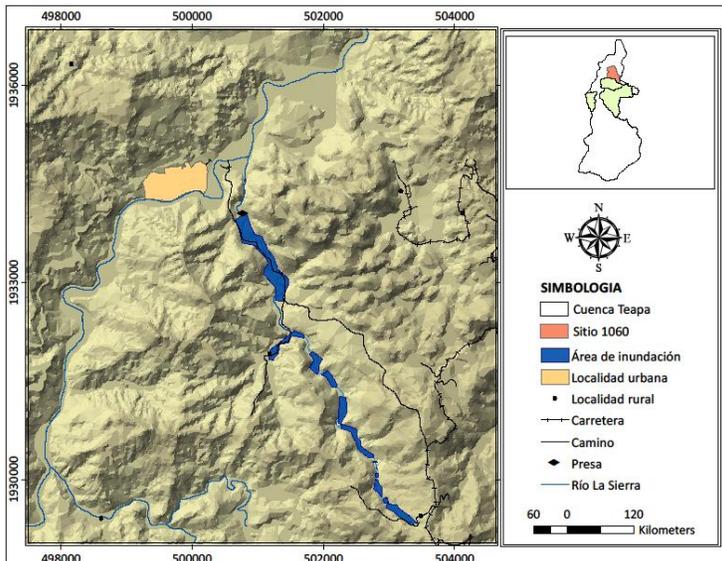


Figura IX.21 Simulación del sitio 1060

Este sitio cuenta con vías de acceso en el margen izquierdo, como se observa en la Figura IX.21. Sin embargo, el espejo de agua se extiende sobre este camino, indicando que no tiene viabilidad.

La potencia disponible y generación alcanzan 85.61 kW y 1643.64 kWh respectivamente.

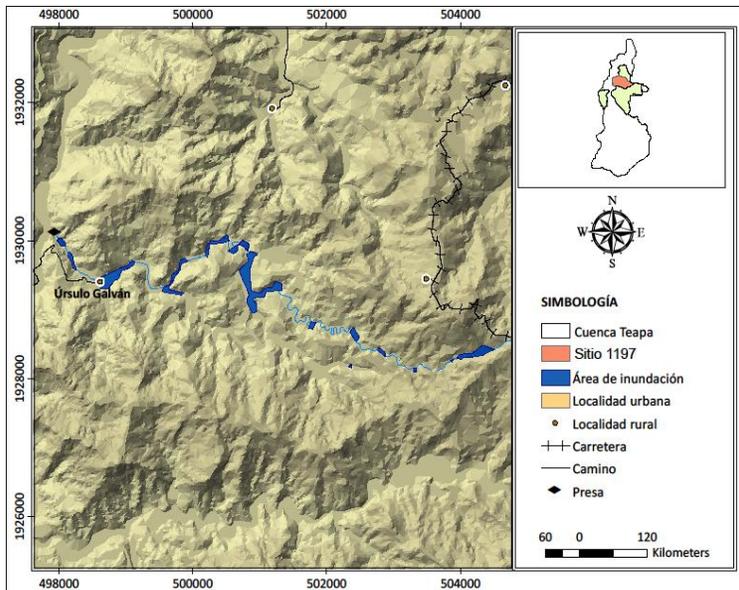


Figura IX.22 Simulación del sitio 1197

En la Figura IX.22 se observa la localidad de Úrsulo Galván en los márgenes de la corriente es alcanzada por el volumen de agua resultado de la simulación, descartando su viabilidad.

La potencia de generación es de 916 kWh con potencial hidroeléctrico de 47 kW, la presa es de las menores y alcanza 10 m.

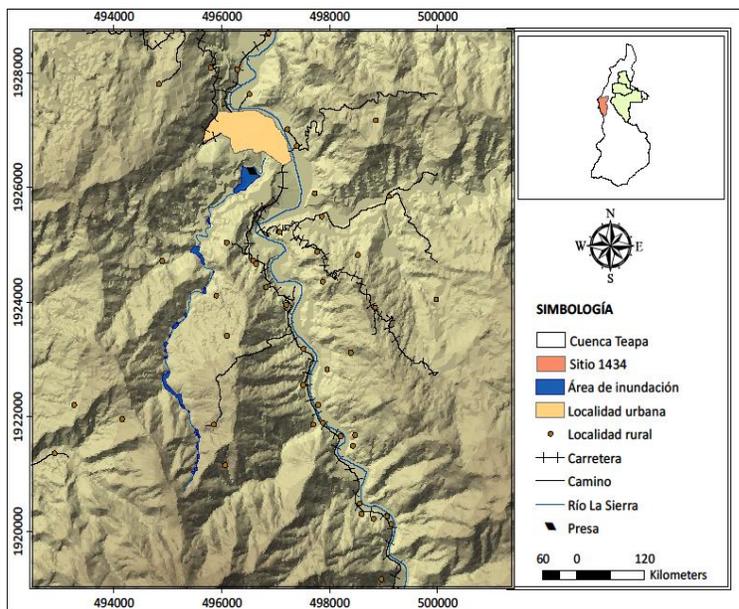


Figura IX.23 Simulación del sitio 1434

Como se observa en la Figura IX.23 el sitio cuenta con alrededor de 20 poblaciones rurales en un radio de 10 km beneficiadas. Con una generación de 711.34 kWh, su potencial hidroeléctrico es de 37 kW. Presenta una de las menores altitudes en la cortina de 10 m

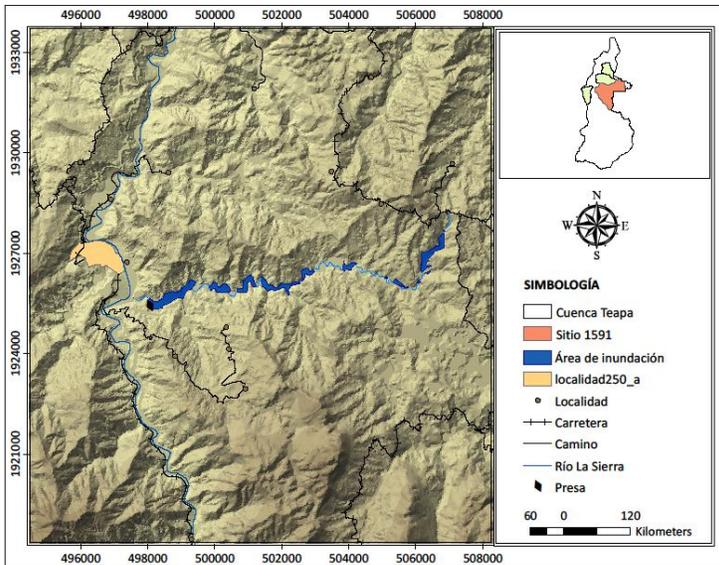


Figura IX.24 Simulación del sitio 1591

La energía de generación bruta de 4619 kWh, con una potencia hidroeléctrica de 240 kW. Como se muestra en la Figura IX.24, tiene alrededor de 10 localidades rurales cercanas y la población urbana Solosuchiapa beneficiadas.

Tabla IX.17 Concentrado de índices hidroenergéticos

Cuenca	Id	Área (km ²)	Longitud (m)	Q _{ecol} (m ³ /s)	Q ₉₀ (m ³ /s)	Densidad superficial _{ecol}	Densidad lineal PH	Densidad lineal _{ecol}	Densidad lineal PH
Oxolotán	696	237.22	30163	4.20	4.17	0.0123	0.0122	0.031	0.031
	1047	88.38	23104	1.56	1.55	0.0101	0.0100	0.023	0.023
	1524	176.44	20711	3.12	3.10	0.0154	0.0153	0.030	0.029
	2084	344.32	25822	6.10	6.05	0.0210	0.0208	0.049	0.048
Pichucalco	2326	14.11	9809	0.81	0.57	0.031	0.022	0.041	0.029
	2610	6.99	4284	0.40	0.28	0.033	0.023	0.037	0.026
	3008	18.61	9776	1.07	0.75	0.029	0.020	0.043	0.030
Puyacatengo	625	21.96	11215	1.45	0.93	0.048	0.031	0.060	0.038
	925	14.14	8037	0.94	0.60	0.025	0.016	0.034	0.022
Teapa	1060	12.51	7755	0.70	0.38	0.009	0.005	0.020	0.011
	1197	16.72	11397	0.94	0.49	0.002	0.001	0.008	0.004
	1434	12.98	7107	0.73	0.38	0.003	0.002	0.010	0.005
	1591	46.83	16074	2.63	1.36	0.011	0.006	0.029	0.015

En la Tabla IX.17 se observa que los indicadores hidroenergéticos calculados en todos los casos son mayores los obtenidos con el Q_{ecol} (caudal ecológico), esto indica que las externalidades en el emplazamiento del embalse tendrán un menor impacto ambiental al disminuir la superficie inundada.

X. Conclusiones

En el análisis del potencial hidroeléctrico en las cuencas en el Bajo Grijalva Sierra se cumplieron los siguientes objetivos:

De acuerdo con la clasificación del criterio de eficiencia de Nash y Sutcliffe en los dos periodos de validación del modelo GR4J expuesta por Moriasi (2007) se encontraron eficiencias dentro del rango del 0.50 considerado como suficiente al 0.73 clasificado como bueno. Las cuencas con indicadores ubicados en las dos fases de validación como suficientes ($0.50 > 0.65$) son Tapijulapa y Teapa, para el resto de las cuencas los índices indican que el resultado es bueno, entre el 0.65 y 0.75, teniendo el máximo índice de 0.73 en la cuenca Oxolotán

El modelo GR4J es sencillo de emplear y una herramienta útil en la transformación de lluvia a flujo superficial mostrando en los resultados que alcanza índices superiores al 50 % en la validación del modelo.

La superficie de análisis con los criterios medio ambientales en uso de suelo para la elección de sitios representa el 60 % del total de la zona de estudio, ya que se excluyeron las zonas de conservación ambiental. En total se seleccionaron 13 sitios potenciales de aprovechamiento.

Mediante la estimación diaria del escurrimiento superficial con el modelo GR4J fue posible el trazo de la curva de duración de caudales. El gasto equivalente en las ordenadas que interseca con el 90 % en las abscisas en la gráfica es aprovechable para hidrogenación.

La simulación con la herramienta computacional HEC-GeoRAS precisó la carga hidráulica con presa, utilizada en la evaluación del potencial teórico bruto de los sitios delimitados. Las estructuras hidráulicas van de los 10 m de altura en la cuenca Teapa, a 50 m de altura máxima en Pichucalco. Para PCH con saltos menores a 25 m identificado se identifican en los sitios 2084, 696, 1524, 1591, 1434, 1060 y 1197. En los sitios 1047, 2326, 2610, 3008, 625 y 925 se presenta una caída media, mayor a 25 m. y menor a 130 m.

Cuenca	Id	Área (km²)	Hb (m)	Q⁹⁰ (m³/s)	Potencial hidroeléctrico (kW)	Energía Producida (kWh)
Oxolotán	2084	344.3	21	6.05	1245.84	23920.21
Oxolotán	1524	176.4	20	3.1	608.01	11673.72
Puyacatengo	625	22	47	0.93	428.30	8223.45
Pichucalco	3008	18.6	40	0.75	295.88	5680.81
Teapa	1591	46.8	18	1.36	240.61	4619.79
Puyacatengo	925	14.1	30	0.6	176.05	3380.19
Pichucalco	2610	7	40	0.28	111.12	2133.46
Teapa	1434	13	10	0.38	37.05	711.33

De los 13 sitios potenciales, los sitios 1060 y 1197 de la cuenca Teapa, 696 y 1047 de la cuenca Oxolotán y 2326 de la cuenca Pichucalco se han descartado debido que la extensión del espejo de agua alcanza a los poblados, carreteras o caminos en los márgenes del río.

La cuenca Oxolotán es privilegiada con la potencia máxima total de 1853 kW y 35,593.94 kWh de generación con los dos sitios 2084 y 1524. La altura de la cortina en ambos sitios es de 20 y 21 m. teniendo una caída pequeña, teniendo impactos localizados.

La cuenca Puyacatengo de sus dos sitios el 625, cuenca con una generación de 8,223 kWh posicionándola en el tercer lugar de generación. En la cuenca Pichucalco se encuentra la cortina más elevada de 50 m en el sitio 2326. El sitio 2610 de 40 m de altura en la cortina, se encuentra encerrado en formaciones geológicas localizando los impactos, aunque con una generación menor que otros sitios de 2133 kWh.

La cuenca Teapa presenta los menores valores en caudal y carga hidráulica entre 10 y 18 m. Este último con generación de 4619 kWh en el sitio 1591, que por su localización cuenta con poblaciones rurales beneficiadas y muestra vía de acceso al sitio perfectamente delimitado por formaciones geológicas altas.

De forma general las potencias disponibles totales por cuenca son: Oxolotán, 3367 kW y

64661 kWh de generación, Pichucalco con 687 kW, alcanzando una generación de energía de 13197 kWh, Puyacatengo se mantiene con los valores mencionados de 604 kW y 11603 kWh, finalmente en Teapa con 277 kW y una generación de 7809 kWh. así como la cuenca Oxolotán se distingue por tener los valores más altos

Los indicadores hidroenergéticos, cumplen con el criterio propuesto por Ortiz (2011), siendo menores los índices obtenidos con los valores simulados que los ecológicos estimados, teniendo influencia en el área de inundación del embalse.

XI. Referencias

- Abal, G., & Durañona, V. (marzo de 2013). *Manual técnico de energía solar térmica. Volumen I: Fundamentos*. Paraguay: Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Obtenido de http://www.energiasolar.gub.uy/documentos/capacitacion/manual_tecnico_solar_termica.pdf
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Estudio FAO Riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie Cuadernos Técnicos*. Roma, Italia: FAO.
- Amir, M. S., Khan, M. M., Rasul, M. G., Sharma, R. H., & Akram, F. (2013). Automatic multi-objective calibration of rainfall runoff model for the Fitzroy basin, Queensland, Australia. *International journal of environmental science and development*, 4, 311-315.
- Andréassian, V., Hall, A., Chahinian, N., & Schaake, J. (2006). Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets?
- Azmat, M., Laio, F., & Poggi, D. (2015). Estimation of Water Resources Availability and Mini-Hydro Productivity in High-Altitude Scarcely-Gauged Watershed. *Water resources management*, 29(14), 5037-5054.
- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling*. Noida, India: John Wiley & Sons.
- Cabrera, J. (2012). *IMEFEN*. Obtenido de Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Civil: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Cahuana Andia, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología civ-233*. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.
- Carvajal, F. L., & Roldán, E. (2007). Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J aplicación: cuenca del Río Aburrá. *Dyna*, 74(152), 73-87.

- CEMIE-Oceano. (2019). *Redes eléctricas: mercado mayorista de electricidad en México*. Campeche: Comité editorial CEMIE-Oceano.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., W. Mays, L., & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia.: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- CONAGUA. (03 de 01 de 2013). *Agua*. Obtenido de Fondo para la comunicación y la educación ambiental: <https://agua.org.mx/biblioteca/consejo-de-cuenca-de-los-rios-grijalva-y-usumacinta-2/>
- CONAGUA. (Octubre de 2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de sequías en el Consejo de Cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99961/PMPMS_CC_R_os_Grijalva_y_Usumacinta.pdf
- CONAGUA. (2019). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Cuevas Jiménez, E. V., Oliva Navarro, D. A., & Díaz Cortés, M. A. (2019). *Optimización, Algoritmos programados con Matlab*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Daniel, E. B., Camp, J. V., J., L. E., Penrod, J. R., Dobbins, J. P., & Abkowitz, M. D. (2011). Watershed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review. *The Open Hydrology Journal*, 5(1), 26-50.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic procedia*, 4, 1001-1007.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1980). *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley.
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science IEEE*, 39-43.
- Escalante, C., & Reyes, L. (2005). *Técnicas Estadísticas en Hidrología*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Espejo Marín, C., García Marín, R., & Aparicio Guerrero, A. E. (septiembre de 2017). El resurgimiento de la energía minihidráulica en España y su situación actual. *Revista de Geografía Norte Grande* (67), 115-143. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30052913007>
- García-Marín, A., Roldan-Cañas, J., Estévez, J., Moreno-Pérez, F., Serrat-Capdevila, A., González, J. Giraldez, J. (2014). Hydrology and its role water engineering. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 1-14.
- Gardea Villegas, H. (1990). *Aprovechamiento Hidroeléctricos y de Bombeo*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México.

- Gray, W. G., & A., G. G. (2017). Models as a framework for study of data. En W. G. Gray, & G. G. A., *modeling, Introduction to environmental* (págs. 26-65). Cambridge: Cambridge University Press.
- Grisales, E. A., & Vásquez, L. A. (2016). Alternativa de las pequeñas centrales hidroeléctricas de Antioquia en el mecanismo de desarrollo limpio. *Ciencias Estratégicas*, 24(35), 73-100.
- Halwatura, D., & Najim, M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software* (46), 155-162.
- Harrison, K. R., P., E., & Ombuki-Berman, B. M. (2018). Self-adaptive particle swarm optimization: a review. *Swarm Intelligente*, 12(3), 187-226.
- Ibañez González, L. A. (2017). *Las primeras grandes plantas hidroeléctricas de México: Echeverría, El Salto y Necaxa. La electrificación y el territorio. Historia y futuro.* Archivo histórico y museo de Minería.
- IDAE. (2006). Manuales de energías renovables. *Minicentrales hidroeléctricas*. Madrid, España: Fondo editorial IDAE.
- IMTA. (2017). *Bases para un Centro Mexicano de Innovación en Energía Eléctrica CEMIE-hidro* (Primera ed.). (A. A. Palacios Fonseca, Ed.) Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2017). *Bases para un Centro Mexicano de Innovación en Energía Eléctrica CEMIE-hidro* (Primera ed.). (A. A. Palacios Fonseca, Ed.) Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI. (2010). *SIATL Simulador de Flujo de Aguas Superficiales*. Obtenido de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl#
- Jakubcová, M., Máca, P., & Pech, P. (2015). Parameter estimation in rainfall-runoff modelling using distributed versions of particle swarm optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-13. doi:10.1155/2015/968067
- Japhet Kodja, D., Mahé, G., Amoussou, E., Boko, M., & Paturel, J. E. (2018). Assessment of the Performance of Rainfall-Runoff Model GR4J to Simulate Streamflow in Ouémé Watershed at Bonou's outlet (West Africa). *Preprints*, 1-18.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks IEEE*, 4, 1942-1948).
- Klipsch, J. D., & Evans, T. A. (2006). Reservoir operations modeling with HEC-Ressim. *In Proceedings of the 3rd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, 1-8.
- Kusre, B., Baruah, D., Bordoloi, P., & Patra, S. (2010). Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Applied Energy*, 87, 298-309. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.07.019

- Mancebo, J., & Adrada, T. M. (2013). Energía minihidráulica. *Capacity Building programme on Renewable Energy (RES)*. Obtenido de <https://www.renenergyobservatory.org/uploads/media/joseManceboR.pdf>
- Martínez Ruiz, S. (2010). *Aplicación de un modelo distribuido lluvia-escurrimiento a las cuencas de los ríos de la Sierra, Tabasco*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Meza-Prieto, B., & Aparicio Mijares, J. (2018). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrimiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 69-87.
- Morales, S., Corredor, L., Paba, J., & Pacheco, L. (abril de 2014). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación. *Dyna*, 81(184), 178-185.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Muguerza, D. (2005). *Micro Centrales Hidroeléctricas. Curso de microturbinas hidroeléctricas*. Obtenido de Universidad Nacional del Noroeste: <http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/fisica/maestría/modulo2/microturbinas/apuntemch.pdf>.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology* (10), 282-290.
- Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58.
- ONU DI. (2016). *Informe Mundial sobre el desarrollo de la pequeña central hidroeléctrica 2016*. Viena y el Centro Internacional para la Pequeña Central Hidroeléctrica, Hangzhou.
- Oogathoo, S. (2006). *Runoff simulation in the Canagagigue Creek Watershed using the MIKE SHE Model, Tesis Doctoral*. Montreal, Canada: McGill University.
- Ortiz Flores, R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Bogota, Colombia: ediciones de la U.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michela, C., Perrin, C., Andréassiana, V., Anctil, F., & Loumagnea, C. (2005). Which potencial evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part-2 Toward a simple and efficient potencial evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hidrology*, 303(1-4), 290-306.
- Pandey, A., Lalrempuia, D., & Jain, S. (2015). Assessment of hydropower potential using spatial technology and SWAT modelling in the Mat River, southern Mizoram, India. *Hydrological Sciences Journal*, 60(10), 1651-1665. doi:10.1080/02626667.2014.943669

- Parrott, D., & Li, X. (2006). Locating and Tracking Multiple Dynamic Optima by a Particle Swarm Model Using Speciation. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 10(4), 440-458.
- Pechlivanidis, I., Jackson, B., & McIntyre, N. (2011). Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*, 13(3), 193-214.
- Perrin, C. (2002). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences*, 84-91.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242(3-4), 275-301.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du génie rural (GR). *Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés*.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Karr, J. R., Prestegard, K. L., D., R. B., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 769-784.
- Ponce, V. M. (1989). *Catchment modeling*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- Ramos-Gutiérrez, L. d., & Montenegro-Fragoso, M. (2012). Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(2), 103-121. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531977007>
- Richter, B., Baumgartner, J. V., Wigington, R., & Braun, D. P. (1997). How much water does a river need? *Freshwater biology*, 37(1), 231-249.
- Rojas García, A. A. (2015). Topología de Optimización por Enjambre de Partículas Basada en Información Mutua (Tesis de Maestría). *Centro de Investigación en Matemáticas A.C. Guanajuato*.
- Rojas Serna, C. (2005). Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit, Ecole National Du Génie Rural, Des Eaux Et Des Forêt, pour obtenir le grade de Docteur de l'engref, Francia.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1 de diciembre de 1992). Ley de Aguas Nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 22-44.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. (28 de enero de 1988). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 23-57.

- Secretaría de Economía. (2012). *NMX-AA-159-SCFI-2012. Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Gobernación. (29 de diciembre de 1976). Ley Orgánica de la Administración Pública Federal. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 1-16.
- SEMARNAT. (29 de abril de 2010). Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de las subregiones hidrológicas Alto Grijalva, Medio Grijalva y Bajo Grijalva de la Región Hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 23-70.
- SEMARNAT. (7 de septiembre de 2012). Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 1-28.
- SEMARNAT. (6 de junio de 2012). Ley General de Cambio Climático. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 1-29.
- SEMARNAT. (10 de 04 de 2018). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Lagartero, Yahahuita, Zacualpa, Papizaca, Presa La Concordia, Selegua, San Miguel, La Concordia, Aguacatenco, Aguzarca. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 3-42.
- SENER. (11 de Agosto de 2014). Ley de la Industria Eléctrica. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 44-101.
- SENER. (24 de diciembre de 2015). Ley de Transición Energética. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 25-53.
- SENER. (31 de diciembre de 2016). *Inventario Nacional de Energías Limpias*. Obtenido de <https://dgel.energia.gob.mx/inel/>
- SENER. (2016). *Prospectivas de energías renovables 2016-2030*. Ciudad de México: Secretaría de energía.
- Shrestha, S., Khatiwada, M., Babel, M. S., & Parajuli, K. (2014). Impact of Climate Change on River Flow and Hydropower Production in Kulekhani Hydropower Project of Nepal. *Environmental processes*, 1(3), 231-250.
- Singh, V. P. (2017). *Handbook of Applied Hydrology* (Second ed.). New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education.
- Singh, V. P. (2018). Hydrologic modeling: progress and future directions. *Geoscience Letters*, 5(15), 1-18. doi:<https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>
- UNAM. (2008). Capítulo 1 Introducción. En *Proyecto Hídrico Integral de Tabasco* (págs. 1-23). Tabasco: UNAM.
- UNAM. (2009). Análisis hidrológico. En *Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), Segunda etapa* (págs. 70-115). Tabasco, Méx: UNAM.

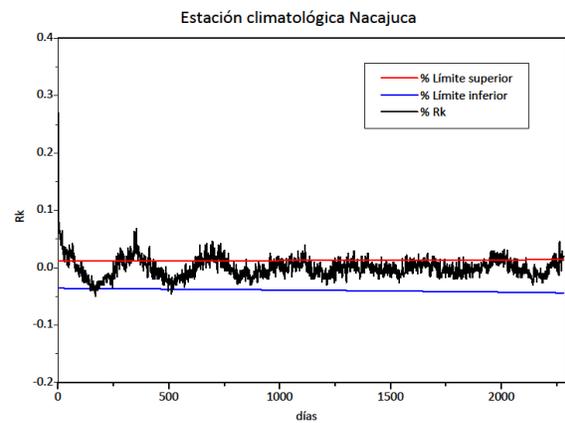
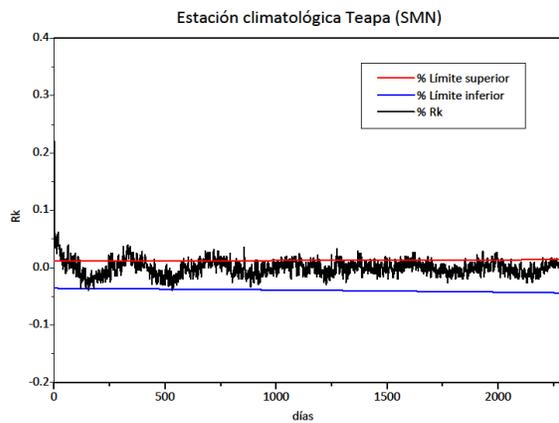
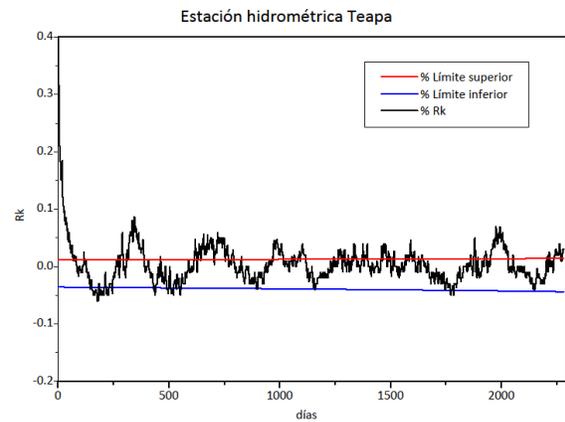
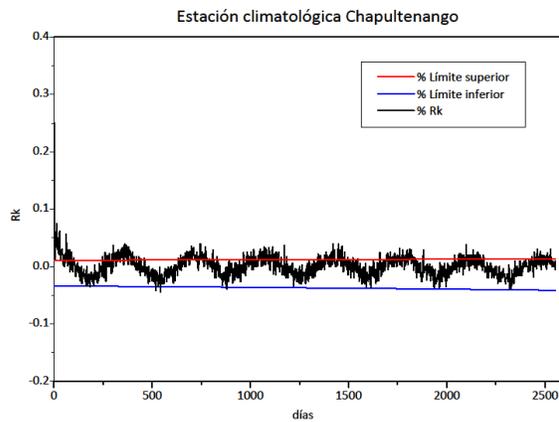
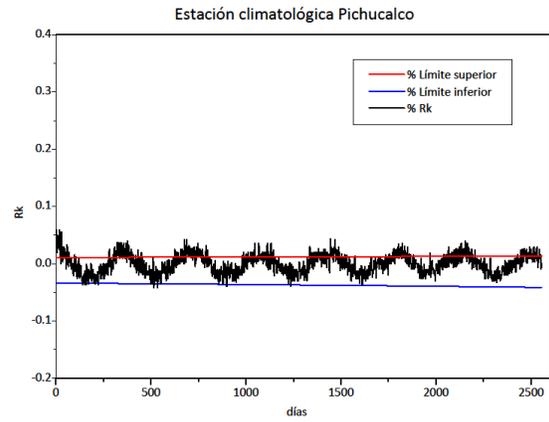
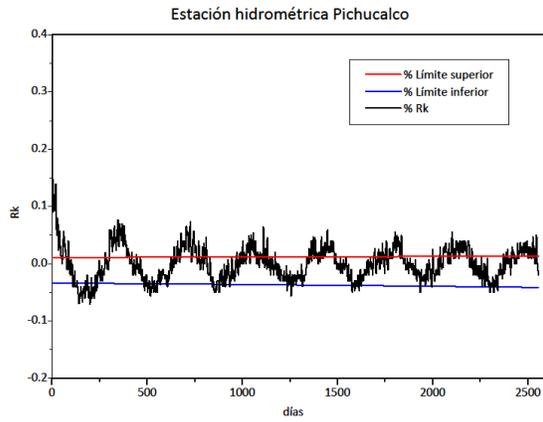
- UNAM. (2009). Manejo integral de seis subcuencas pertenecientes a las cuencas del río Grijalva-Usumacinta. En *Plan Integral Hídrico de Tabasco* (págs. 443-590). Tabasco: UNAM.
- UNAM. (2014). Análisis del funcionamiento del sistema de medición hidrométrica y climatológica. En *Estudio para el proyecto Hidrológico para proteger a la población de inundaciones y aprovechar mejor el agua (PROHTAB)* (págs. 1-76). Tabasco: UNAM.

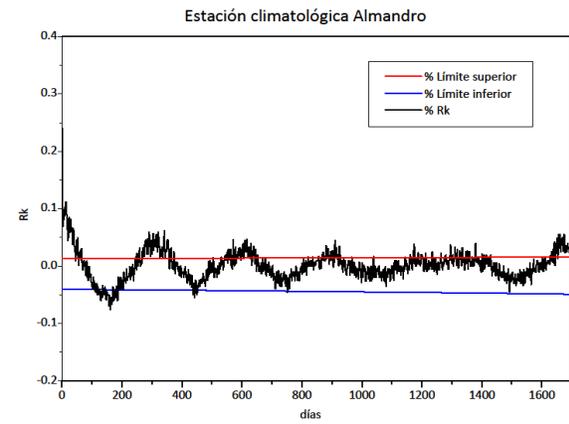
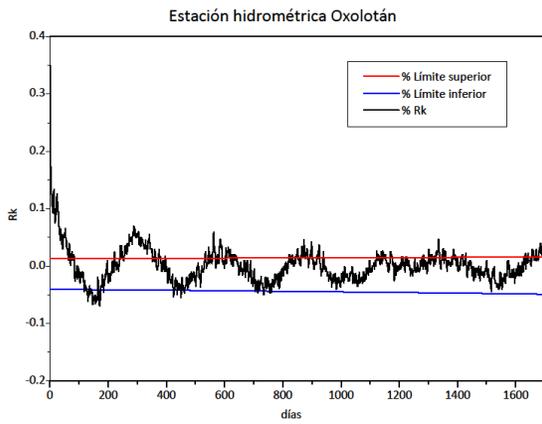
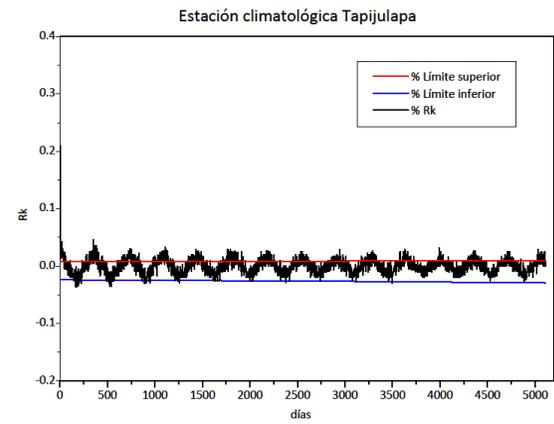
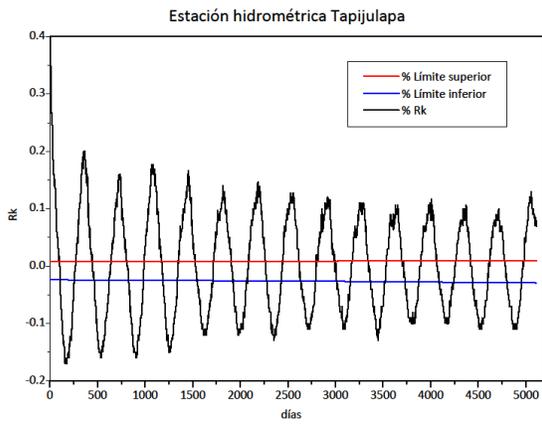
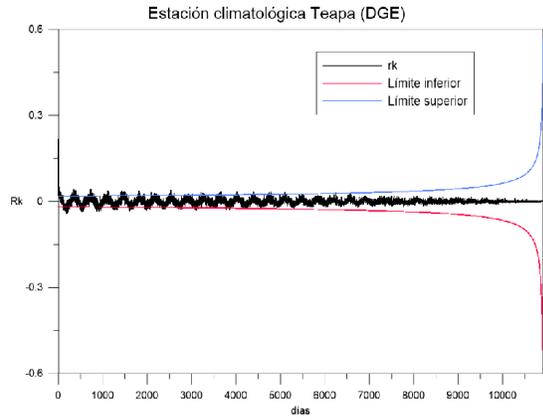
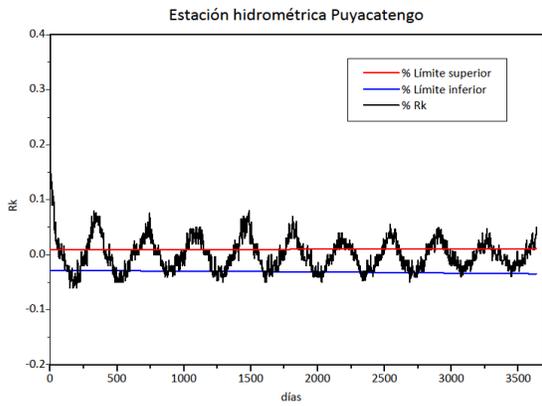
Anexo A Prueba de Homogeneidad

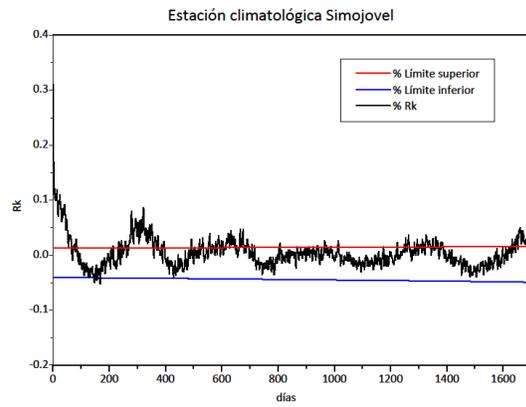
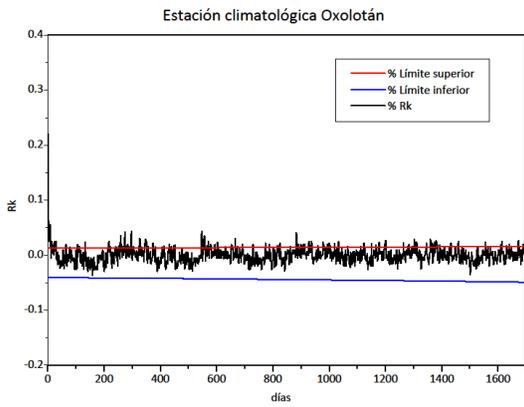
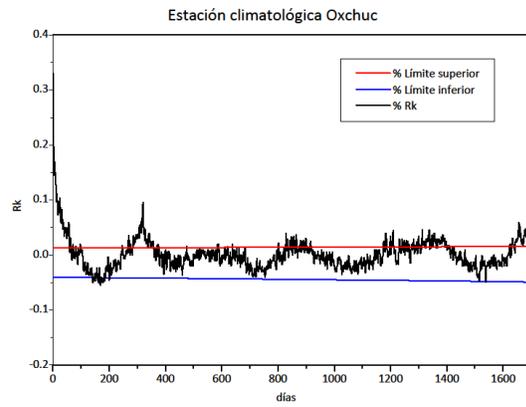
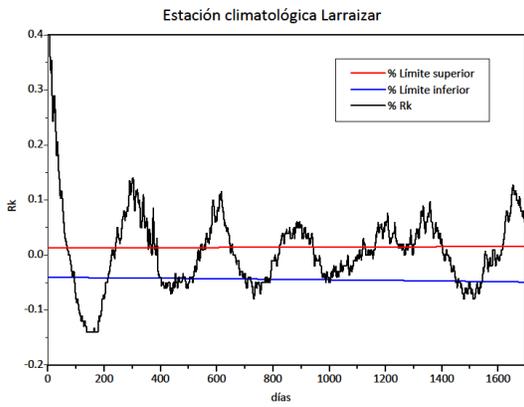
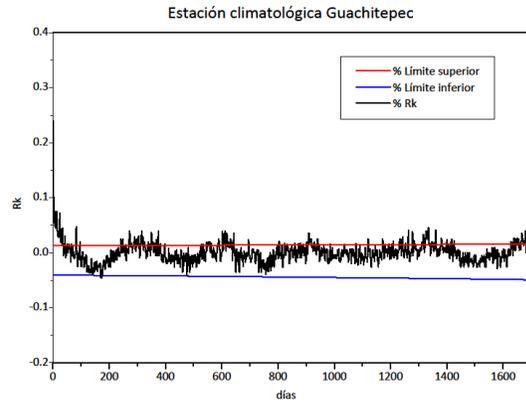
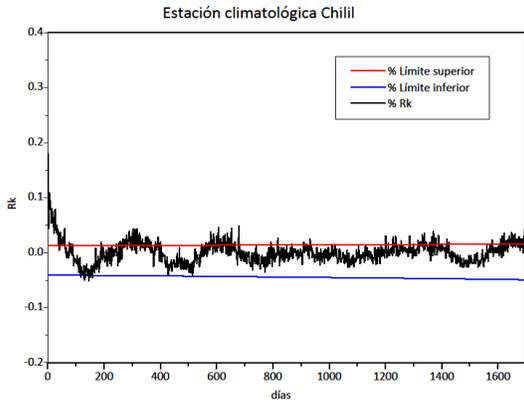
Estaciones hidrométricas	Estado	Longitud	Latitud	t de Student				Helmert		
				Grados de libertad	Valor de t	Td	Td<t	Núm. de secuencias S:	Número de cambios C	Valor de prueba de Helmert
Pichucalco	Tabasco	93°06' 30	17°33' 30	7667	1.96	0.74049	Homogénea	6626	1040	5586
Teapa	Tabasco	92°58' 00	17°34' 00	6843	1.96	0.56450	Homogénea	6049	795	5254
Puyacatengo	Tabasco	92°56' 15	17°34' 00	10916	1.96	-0.11649	Homogénea	9582	1335	8247
Tapijulapa	Tabasco	92°49' 00	17°28' 00	15316	1.96	-0.33329	Homogénea	9582	1335	8247
Oxolotán	Chiapas	92°45' 00	17°23' 00	5341	1.96	0.73975	Homogénea	9582	1335	8247

Estaciones climatológicas	Estado	Longitud	Latitud	t de Student				Helmert		
				Grados de libertad	Valor de t	Td	Td<t	Núm. de secuencias S	Número de cambios C	Valor de prueba de Helmert
Pichucalco	Chiapas	-93.1186	17.5166	7667	1.96	0.055712	Homogénea	6780	886	5894
Chapultenango	Chiapas	-93.1016	17.3333	7667	1.96	- 0.10369	Homogénea	6780	886	5894
Teapa (DGE)	Tabasco	-92.9658	17.5488	6843	1.96	0.021337	Homogénea	5071	1773	3298
Nacajuca	Tabasco	-93.0169	18.1658	6843	1.96	1.058637	Homogénea	5244	1600	3644
Teapa (SMN)	Tabasco	-92.9827	17.5666	10916	1.96	0.476410	Homogénea	7993	2924	5069
Tapijulapa	Tabasco	-92.7794	17.4611	15316	1.96	0.300987	Homogénea	11227	4112	7115
Chilil	Chiapas	-92.49138	16.6777	5341	1.96	-3.783185	Homogénea	4074	1268	2806
Guachtepec	Chiapas	-92.2880	17.1447	5341	1.96	-0.267363	Homogénea	3921	1422	2499
Oxchuc	Chiapas	-92.3388	16.7863	5341	1.96	0.026617	Homogénea	3896	1447	2449
Almendro	Chiapas	-92.6947	17.2833	5341	1.96	0.005703	Homogénea	3916	1427	2489
Larrazar	Chiapas	-92.7116	16.8869		1.96	- 0.024767	Homogénea	3894	1449	2445
Oxolotán	Tabasco	-92.7625	17.3805	5341	1.96	-0.024767	Homogénea	3894	1449	2445
Simojovel (DGE)	Chiapas	-92.7116	17.14	5341	1.96	-0.188259	Homogénea	3894	1449	2445

Anexo B Prueba de Independencia de Anderson









UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 0071
Matrícula: 21-01-000499

Determinación del potencial hidroelectrico de una cascada utilizando el modelo GR4J



SANDRA JANET PALOMARES GARCIA
ALUMNA

REVISÓ

MTRA. ROSALVA SERRIANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

Con base en la Legislación de la Universidad Autónoma Metropolitana, en la Ciudad de México se presentaron a las 11:00 horas del día 18 del mes de noviembre del año 2020 POR VÍA REMOTA ELECTRÓNICA, los suscritos miembros del jurado designado por la Comisión del Posgrado:

DR. FRANCISCO JOSE VALDES PARADA
DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES
M.I. ROBERTO MEJIA ZERMENO
DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO NIJARES

Debajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para promover el Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: SANDRA JANET PALOMARES GARCIA

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de La Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTOR DE LA DIVISION DE CBI

DR. JESÚS ALBERTO OCHOA TAPIA

PRESIDENTE

DR. FRANCISCO JOSÉ VALDES PARADA

VOCAL

DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

VOCAL

M.I. ROBERTO MEJIA ZERMENO

SECRETARIO

DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO NIJARES

El presente documento cuenta con la firma -autógrafa, escaneada o digital, según corresponda- del funcionario universitario competente, que certifica que las firmas que aparecen en esta acta - Temporal, digital o dictamen- son auténticas y las mismas que usan los c.c. profesores mencionados en ella