



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis del potencial hidroeléctrico
en cuencas aforadas de la costa del
estado de Guerrero**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Cristian Mario Avelino Pérez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Agustín Breña Naranjo



Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/011/16

Señor
CRISTIAN MARIO AVELINO PÉREZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. JOSÉ AGUSTÍN BREÑA NARANJO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

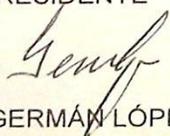
"ANÁLISIS DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO EN CUENCAS AFORADAS DE LA COSTA DEL ESTADO DE GUERRERO"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ANTECEDENTES
- III. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS
- IV. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA
- V. RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 2 de febrero del 2016.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMAN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

AGRADECIMIENTOS

El reconocimiento es para todas esas personas que ayudaron, influenciaron y alentaron mi desarrollo a lo largo de mi vida, en especial a mi familia que sin el apoyo de ellos no estaría alcanzando este gran objetivo. Agradeceré enormemente el privilegio de poder contar con mi familia, ya que he aprendido y aprendo cosas buenas y malas que sirven como experiencias de vida para ser mejor persona y profesionista. A mis padres Angelina Pérez y Mario Avelino, solo tengo palabras de agradecimiento por todo el apoyo brindado a lo largo de mi vida y por las enseñanzas que me han dado para madurar y enfrentar la vida con otra mentalidad; a mi hermana Jessica Avelino agradezco su compañía y los buenos y malos momentos que nos ha tocado vivir. Gracias a los tres, los amo con todo mi corazón.

Agradezco el apoyo y palabras de aliento de todos mis maestros a lo largo de este recorrido, pero en particular a mi tutor de tesis el Dr. José Agustín Breña Naranjo por tener el interés de ayudarme en culminar el proceso de titulación. De igual forma quiero agradecer a Saúl Arciniega por el apoyo y compañerismo brindado durante el desarrollo del presente trabajo; y a mis sinodales el Dr. Enrique César Valdez, el M.I. Rodrigo Takeshi Sepúlveda Hirose, la M.I. Isis Ivette Valdez Izaguirre y el Ing. Marcos Trejo Hernández, por ser parte importante de este momento.

A mi novia Noemi Bailón me queda darle las gracias por toda la ayuda y cariño brindado a lo largo de estos años que hemos convivido, así como por todas las experiencias vividas que nos han hecho crecer juntos, te quiero mucho. A mis amigos de carrera con los que más conviví: Jesús Becerril, Daniel Arriaga, Iván Cortés, Oscar Mateo, Diana Aguilar y Pamela Contreras, les agradezco infinitamente su compañía durante este proceso porque me alentaron y respaldaron en todo momento. De igual manera quiero agradecer a mi amiga Carolina Ortega por la dicha de tener su amistad y por ser una excelente persona que me ayuda a desarrollarme, te quiero.

A todos con los que he tenido la dicha de convivir o entablar alguna conversación les agradezco infinitamente su tiempo y las enseñanzas brindadas.

MUCHAS GRACIAS.

CONTENIDO

INDICE	I
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE GRÁFICAS.....	IV
LISTA DE TABLAS	V
INTRODUCCIÓN	VI

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES	1
1.1 El ciclo hidrológico y la energía hidroeléctrica.....	1
1.2 Energía hidroeléctrica en México	3
1.2.1 Cuencas hidrológicas	4
1.3 Evaluación del potencial hidroeléctrico.....	6
1.3.1 Desarrollo de la energía hidroeléctrica	7
1.4 Clasificación de las centrales hidroeléctricas.....	10
1.4.1 Clasificación según su embalse.....	10
1.4.2 Clasificación según la carga hidráulica.....	12
1.4.3 Clasificación según su potencia	12
1.5 Turbinas en centrales hidroeléctricas	12
2. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS.....	16
2.1 Problemática en la evaluación del potencial hidroeléctrico.....	16
2.2 Objetivos	17
3. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA	18
3.1 Descripción del área de estudio.....	18
3.1.1 Estaciones climatológicas e hidrométricas	19
3.1.2 Medición del caudal.....	21
3.1.3 Localización geográfica	25
3.1.4 Geología, topografía y clima	26
3.1.5 Demografía e indicadores socioeconómicos	28
3.1.6 Recursos hídricos	29
3.2 TopoToolbox	30
3.3 Metodología.....	31
3.4 Evaluación del potencial en las cuencas de estudio	36

4. RESULTADOS	44
4.1 Estimación del escurrimiento	44
4.2 Estimación del potencial hidroeléctrico.....	58
4.3 Limitaciones técnicas	65
5. CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Representación del ciclo hidrológico	2
Figura 1.2 Corte transversal de una planta generadora hidroeléctrica.....	3
Figura 1.3 Regiones hidrológicas de la República Mexicana	5
Figura 1.4 Regiones Hidrológicas Administrativas de la República Mexicana	5
Figura 1.5 Esquema de una turbina Pelton	13
Figura 1.6 Esquema de una turbina Francis	14
Figura 1.7 Esquema de una turbina Kaplan	15
Figura 1.8 Diagrama para la selección de turbinas en función de la carga hidráulica y caudal de diseño.....	15
Figura 3.1 Estaciones climatológicas en el país.....	20
Figura 3.2 Estaciones hidrométricas en el país	20
Figura 3.3 a) Representación de una dovela sobre un río y b) molinete usado en la medición de la velocidad media	24
Figura 3.4 Curva elevaciones-gastos	25
Figura 3.5 Ubicación de las cuencas en los municipios del estado de Guerrero	26
Figura 3.6 Relieve y distribución del clima en el estado de Guerrero	27
Figura 3.7 Precipitación media mensual histórica del estado de Guerrero (1941-2002).....	29
Figura 3.8 Ejemplo del MDE en notación matricial (izquierda) y topográfica (derecha). Los valores centrados en la matriz se refieren a la elevación de celdas y los valores en la parte inferior derecha se refieren a un índice lineal de la celda	30
Figura 3.9 Representación del flujo acumulado dentro del MDE. En la etapa inicial se asigna la unidad de precipitación en cada celda (parte superior izquierda) y esta va cambiando de acuerdo a los gradientes de mayor pendiente para lograr la evacuación de todo el flujo generado en la cuenca (parte inferior derecha)	31
Figura 3.10 Relleno de depresiones en TopoToolbox	32
Figura 3.11 Ubicación de la estación hidrométrica dentro del red fluvial	32
Figura 3.12 Cuenca de aportación de la estación hidrométrica La Unión	33
Figura 3.13 Puntos dentro de la cuenca para ubicar pendientes máximas	34
Figura 3.14 Perfil del cauce 2, que comprende desde la estación hidrométrica hasta la estación 2.....	34
Figura 3.15 Ubicación de la pendiente máxima dentro del cauce 2	35
Figura 3.16 Flujo acumulado en la pendiente máxima (P2) del cauce 2	35
Figura 3.17 Flujo acumulado en la estación hidrométrica	36
Figura 3.18 Puntos dentro de la cuenca hidrológica La Unión	36
Figura 3.19 Ventanas con datos de las pendientes máximas del cauce 2 al cauce 7 de la cuenca La Unión	37
Figura 3.20 Ventanas con datos de las pendientes máximas del cauce 8 al cauce 13 de la cuenca La Unión	38
Figura 3.21 Ventana con datos de la pendientes máxima del cauce 14 de la cuenca La Unión	39
Figura 3.22 Mapas del flujo acumulado al final de la pendiente máxima 2 a la pendiente máxima 7	40
Figura 3.23 Mapas del flujo acumulado al final de la pendiente máxima 8 a la pendiente máxima 13	41
Figura 3.24 Mapa del flujo acumulado al final de la pendiente máxima 14	42
Figura 3.25 Flujo acumulado a la salida de la estación hidrométrica La Unión	42
Figura 4.1 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca La Unión	45
Figura 4.2 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca La Salitrera	46
Figura 4.3 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca San Jeronimito.....	47
Figura 4.4 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Petatlán.....	48
Figura 4.5 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Coyuquilla II.....	49
Figura 4.6 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca San Luis	50
Figura 4.7 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Técpan.....	51
Figura 4.8 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca San Jerónimo.....	52
Figura 4.9 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca San Cristóbal	53
Figura 4.10 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Coyuca de Benítez ..	54
Figura 4.11 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Km 21+000	55
Figura 4.12 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Marquelia.....	56
Figura 4.13 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Quetzala.....	57

Figura 4.14 Niveles de tensión en líneas de transmisión eléctrica 67
Figura 4.15 Sistema Eléctrico Mexicano 67

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1.1 Potencial hidroeléctrico acumulado en México 9
Gráfica 2.1 Número de estaciones hidrométricas activas en la República Mexicana desde 1900 hasta 2012 16

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Centrales hidroeléctricas de México con mayor potencial instalado.....	10
Tabla 3.1 Datos socioeconómicos de las Regiones Hidrológico Administrativas de México	18
Tabla 3.2 Municipios por entidad federativa con grado de marginación.....	19
Tabla 3.3 Estados con mayor crecimiento anual en consumidores de electricidad.....	19
Tabla 3.4 Estaciones hidrométricas analizadas.....	21
Tabla 3.5 Gasto medio anual y desviación estándar de cada estación hidrométrica.....	21
Tabla 3.6 Localización de las estaciones hidrométricas analizadas dentro de los municipios de Guerrero	26
Tabla 3.7 Fisiografía y climas en cuencas analizadas.....	28
Tabla 3.8 Datos sociodemográficos de los municipios donde se localizan las cuencas de estudio.....	28
Tabla 3.9 Mayores pendientes dentro de la cuenca La Unión.....	39
Tabla 3.10 Diferencia de alturas y flujos acumulados de cada cauce	42
Tabla 3.11 Diferencia de alturas y gastos estimados por medio de interpolaciones.....	43
Tabla 3.12 Potencial hidráulico en pendientes máximas	43
Tabla 4.1 Características de los tramos identificados en la cuenca La Unión y su gasto medio anual estimado	45
Tabla 4.2 Características de los tramos identificados en la cuenca La Salitrera y su gasto medio anual estimado	46
Tabla 4.3 Características de los tramos identificados en la cuenca San Jeronimito y su gasto medio anual estimado	47
Tabla 4.4 Características de los tramos identificados en la cuenca Petatlán y su gasto medio anual estimado	48
Tabla 4.5 Características de los tramos identificados en la cuenca Coyuquilla II y su gasto medio anual estimado	49
Tabla 4.6 Características de los tramos identificados en la cuenca San Luis y su gasto medio anual estimado	50
Tabla 4.7 Características de los tramos identificados en la cuenca Técpan y su gasto medio anual estimado	51
Tabla 4.8 Características de los tramos identificados en la cuenca San Jerónimo y su gasto medio anual estimado.....	52
Tabla 4.9 Características de los tramos identificados en la cuenca San Cristóbal y su gasto medio anual estimado	53
Tabla 4.10 Características de los tramos identificados en la cuenca Coyuca de Benítez y su gasto medio anual estimado	54
Tabla 4.11 Características de los tramos identificados en la cuenca Km. 21 + 000 y su gasto medio anual estimado	55
Tabla 4.12 Características de los tramos identificados en la cuenca Marquelia y su gasto medio anual estimado	56
Tabla 4.13 Características de los tramos identificados en la cuenca Quetzala y su gasto medio anual estimado.....	57
Tabla 4.14 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca La Unión.....	58
Tabla 4.15 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca La Salitrera.....	58
Tabla 4.16 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca San Jeronimito	58
Tabla 4.17 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Petatlán	58
Tabla 4.18 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Coyuquilla II	59
Tabla 4.19 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca San Luis	59
Tabla 4.20 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Técpan	59
Tabla 4.21 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca San Jerónimo.....	60
Tabla 4.22 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca San Cristóbal	60
Tabla 4.23 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Coyuca de Benítez.....	60
Tabla 4.24 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Km. 21 + 000.....	60
Tabla 4.25 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Marquelia	61
Tabla 4.26 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Quetzala	61
Tabla 4.27 Características de las pendientes con mayor potencial.....	62
Tabla 4.28 Clasificación de la central hidroeléctrica en las pendientes óptimas de cada cuenca	64
Tabla 4.29 Clasificación y análisis de la variación del potencial bruto (en base a la desviación estándar del caudal).....	65
Tabla 4.30 Distancias desde el punto óptimo de generación de cada cuenca hasta las líneas de alta tensión	69

INTRODUCCIÓN

El estudio y aprovechamiento de los recursos hídricos tiene como finalidad poder diseñar, planear, construir, operar y dar mantenimiento a las obras hidráulicas. El desarrollo de proyectos hidráulicos y en especial aquellos relacionados con la generación de energía hidroeléctrica, ha ido cobrando mayor relevancia en los últimos años debido a las políticas y acuerdos globales en materia de sustentabilidad y combate al cambio climático que promueven el desarrollo y uso de energías limpias en comparación con fuentes de energía convencional, principalmente gas, carbón y petróleo. Asimismo, la aprobación de la reforma energética en México y la implementación de la nueva Ley de Transición Energética implican la diversificación de la producción de energía eléctrica por lo que es necesario actualizar y generar inventarios de los diferentes tipos de energías renovables en México.

A pesar de la controversia que genera la construcción de centrales hidroeléctricas en todo el mundo debido a sus posibles impactos ambientales (reducción del caudal ecológico, retención de nutrientes, pérdida de biodiversidad de flora y fauna endémica) y sociales (desplazamiento de centros de población, pérdida de vestigios históricos y culturales), recientes avances en la ingeniería hidráulica han permitido disminuir dicho impacto mediante el desarrollo de tecnologías que permiten la generación de energía hidroeléctrica a pequeña y micro escala, sin la necesidad de impactar al medio ambiente de manera significativa. Por lo tanto, es pertinente identificar aquellos puntos óptimos, es decir, conocer las posibles opciones existentes para la instalación de centrales hidroeléctricas en cuencas de estudio.

Este trabajo consiste en evaluar el potencial hidroeléctrico en 13 cuencas hidrológicas ubicadas en el estado de Guerrero, mediante el uso de herramientas computacionales que permiten realizar el análisis topográfico de cuencas y de información hidrométrica, y así definir tramos con mayor potencial hidráulico bruto (potencial que aún no es afectado por las pérdidas locales y distribuidas ocasionadas por las tuberías, dispositivos y turbinas que se encuentran desde la obra de toma en el embalse hasta la casa de máquinas de la central hidroeléctrica). Finalmente, en función del caudal promedio y de la caída hidráulica, se realiza una posible clasificación de acuerdo al potencial máximo bruto.

I. ANTECEDENTES

1.1 EL CICLO HIDROLÓGICO Y LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

La disponibilidad del agua en cualquier cuenca o acuífero se encuentra en función de su balance hídrico (volumen de agua que entra menos el volumen que sale para un determinado periodo de tiempo), el cual depende de una serie de procesos que en su conjunto se les conoce como el ciclo hidrológico. La representación del ciclo hidrológico se muestra en la *figura 1.1* y se puede definir como el intercambio de flujos de agua entre el océano, la atmosfera y la superficie terrestre, y cuya magnitud depende de diferentes almacenamientos. En ingeniería civil, la variable hidrológica de mayor importancia ha sido el escurrimiento, el cual es el resultado de la distribución temporal y espacial de la precipitación durante una tormenta, la infiltración de la lluvia en el subsuelo y la saturación del suelo. Una vez que la precipitación llega a su fin, el escurrimiento decrece debido al vaciado gradual del agua almacenada en las laderas de la cuenca y de los mantos acuíferos, así como por el fenómeno de evapotranspiración. Posteriormente, el vapor de agua en la atmosfera se acumula promoviendo la formación de nubes y suscitando la precipitación nuevamente.

Entre los flujos cuantitativos más relevantes del ciclo hidrológico se encuentran la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y el escurrimiento. No obstante, en regiones costeras, la evaporación del agua de mar que posteriormente se condensa y regresa a la superficie terrestre en forma de lluvia puede llegar a tener una contribución importante en el balance hídrico. A nivel global, el flujo hidrológico más importante es la evapotranspiración, la cual representa aproximadamente dos terceras partes de la precipitación media anual, mientras que el resto de la precipitación se reparte entre la infiltración y el escurrimiento.

En México, el ciclo hidrológico presenta grandes variaciones a nivel regional. Por ejemplo, la región norte del país se caracteriza por tener eventos de precipitación de corta duración e intensidad moderada, lo cual se atribuye a una baja cantidad de agua precipitable en la atmosfera y a tasas de evapotranspiración bastante limitadas, ocasionando que las cuencas sean semiáridas y áridas. Mientras que en cuencas ubicadas en el sur y sureste del país, la frecuencia, duración e intensidad de las tormentas tiende a propiciar vegetación abundante que se caracteriza por tener altas tasas de evapotranspiración y humedad del suelo así como láminas de escurrimiento considerables durante todo el año.

Debido a esto, el comportamiento espacial del ciclo hidrológico ha tenido, tiene y seguirá teniendo consecuencias en el uso y aprovechamiento del escurrimiento disponible en las cuencas de México. Históricamente, la baja disponibilidad de agua en las regiones semiáridas y áridas del país ha limitado seriamente la demanda de agua para satisfacer a los principales sectores consumidores de agua (agrícola, industrial y doméstico) mientras que las condiciones hidrológicas en regiones templadas y húmedas han permitido una menor restricción en cuanto al uso del agua superficial.

En cuencas hidrológicas de tipo perenne durante todo el año, el caudal disponible aunado a los gradientes topográficos de la cuenca ofrecen las condiciones propicias para la generación de energía eléctrica mediante una previa evaluación de su potencial hidroeléctrico.

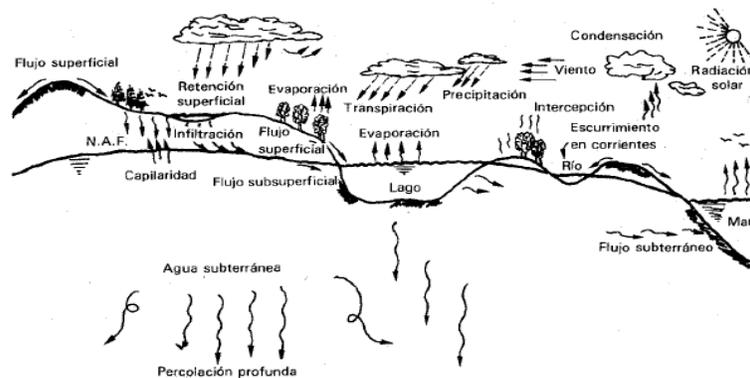


Figura 1.1 Representación del ciclo hidrológico
Fuente: Fundamentos de hidrología superficial, Francisco Aparicio

Es preciso señalar que la energía obtenida durante la evaluación del potencial hidroeléctrico para un cierto tramo o perfil del río se pueda clasificar como energía cinética o como energía potencial. El primer tipo de energía se obtiene por la velocidad que adquiere el caudal debido a la diferencia de alturas en el perfil del cauce, mientras que la energía potencial ocurre en función de la fuerza que puede ejercer el caudal al momento del contacto con la turbina.

El potencial hidroeléctrico responde principalmente a las características del perfil del río y del aporte del caudal de la cuenca, dicho de otra manera, se tendrá un mayor potencial sí se cuenta con un caudal alto y una diferencia de altura considerable en una distancia corta, contrario a lo que ocurriría con un caudal bajo y una caída hidráulica casi nula.

Para poder extraer esta energía (cinética y potencial) y convertirla en energía eléctrica utilizable, es preciso eliminar las pérdidas naturales y crear una obra hidráulica donde el caudal fluya a través de una tubería con pérdidas mínimas hacia las turbinas hidráulicas, las cuales se encargarán de mover los generadores ubicados en la casa de máquinas y de esa manera producir energía eléctrica; el

esquema general de la obra se observa en la *figura 1.2*. El objetivo de una obra de toma es asegurar la generación eléctrica por medio de la caída hidráulica que se genera al acumular un volumen de agua en el vaso, siempre buscando cubrir el caudal de diseño sin importar la variación de flujo durante todo el año.

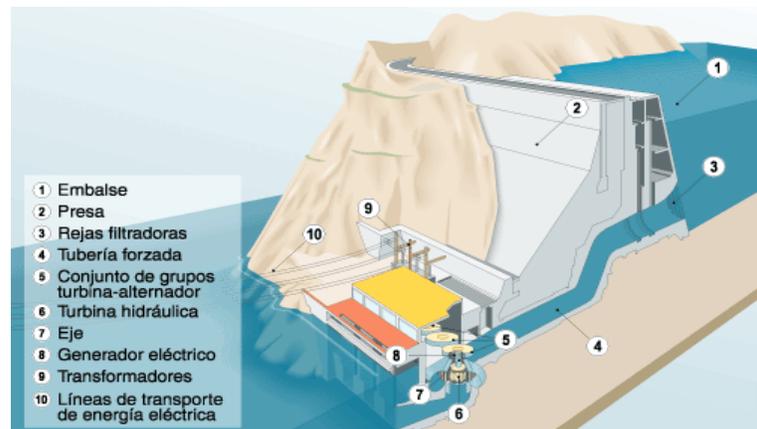


Figura 1.2 Corte transversal de una planta generadora hidroeléctrica

Fuente: <http://www.unesa.es>

El caudal que se utiliza para fines de generación no presenta alteración alguna en sus propiedades físicas o químicas, por lo que posteriormente se incorpora al cauce natural aguas abajo de la cortina para así compensar el impacto de la presa en el caudal ecológico de la cuenca.

1.2 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN MÉXICO

En 1937, el gobierno del presidente Lázaro Cárdenas creó la Comisión Federal de Electricidad (CFE), con ello la generación de electricidad pasó a ser operada por el Estado pues hasta ese momento la tarea le correspondía a dos empresas extranjeras, Mexican Light and Power Company, Ltd. y American and Foreign Power Company. Hoy en día, México cuenta con 64 centrales hidroeléctricas de las cuales 20 de ellas tienen un alto potencial (mayor a 10 MW) y 44 son centrales pequeñas (mayor a 100 KW), sumando un total de 181 unidades generadoras que entregan aproximadamente 11,604 MW o alrededor del 17% del consumo total de electricidad en México. Entre las centrales hidroeléctricas más importantes, se tiene a Manuel Moreno Torres (Chicoasén) en Chiapas con 2,400 MW, Adolfo López Mateos (Infiernillo) en Guerrero con 1,160 MW, Netzahualcóyotl (Malpaso) en Chiapas con 1,080 MW y Solidaridad (Aguamilpa) en Nayarit con 960 MW.

De acuerdo con Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía (CONAE), el país cuenta con un potencial mini-hidroeléctrico estimado en 3,200 MW principalmente en la parte sur, donde la disponibilidad de agua es alta.

México debe tener como directriz la sustentabilidad con base en el uso de recursos renovables; para ello se deberá incrementar sustancialmente la construcción de este tipo de centrales ya que presenta grandes ventajas en relación a otras fuentes de energía, ejemplo de ello es la inagotable energía que se produce debido a que depende 100% del ciclo hidrológico, no realiza contaminación alguna al agua y/o aire, cuenta con bajos costos de mantenimiento y explotación, y por último se puede combinar con otros beneficios como riego, protección contra las inundaciones, suministro de agua, turismo, etc.

La energía hidroeléctrica en México presenta rezagos principalmente por las pocas estaciones hidrométricas establecidas a lo largo de una región, la nula información hidrológica en zonas específicas, y la falta de apoyo por parte del gobierno debido a que es más rentable la generación de energía por medio de combustibles fósiles. Por lo cual, la presente tesis ambiciona ubicar los aprovechamientos hídricos más viables para la generación hidroeléctrica que dependen en gran medida de la topografía de las cuencas y la información hidrométrica disponible.

1.2.1 CUENCAS HIDROLÓGICAS

En México, las cuencas son consideradas las unidades básicas para la administración y gestión de los recursos hídricos. Desde 1997, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizó la agrupación de 731 cuencas hidrológicas en 37 Regiones Hidrológicas (RH) como se muestra en la *figura 1.3*, y estas a su vez se reagruparon en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) (ver *figura 1.4*).

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero



Figura 1.3 Regiones hidrológicas de la República Mexicana. Fuente: CONAGUA



Figura 1.4 Regiones Hidrológicas Administrativas de la República Mexicana. Fuente: CONAGUA

Existen estudios de disponibilidad del agua a nivel de RHA que son actualizados regularmente tal como lo exige la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-2015), a nivel de cuenca hidrológica

no se cuentan con datos de disponibilidad de agua por lo que es necesario realizar estimaciones para fines de planeación hídrica.

1.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO

Para conocer la importancia hidroeléctrica en el mundo, la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) estima que el potencial técnico global para la energía hidroeléctrica es de 1.87 TW. Cabe hacer mención que el potencial es obtenido por medio de la *ecuación 1.1*:

$$P = \gamma QH \quad (1.1)$$

Donde:

P potencial eléctrico (W)

γ peso específico del agua (N/m³)

Q caudal promedio anual (m³/s)

H desnivel entre 2 puntos o la carga hidráulica (m)

El potencial es generado cada año, por lo que para conocer la cantidad de energía bruta se hace uso de la ecuación:

$$E = Pt \quad (1.2)$$

Donde:

E energía (W-hr)

P potencial (W)

t tiempo de generación (hr)

De acuerdo a la *ecuación 1.2*, se tiene una energía disponible de 16,400 TW-hr, sin embargo, esta cifra sobreestima la energía real que puede ser explotada. Existen factores tales como las eficiencias de las máquinas electromecánicas e hidráulicas cuyos valores oscilan entre 80% y 90% dependiendo del tamaño de la instalación, la incertidumbre en la estimación del caudal en diferentes puntos de una cuenca o la falta de datos hidrométricos en cuencas no aforadas que no permiten tener una buena valoración del potencial hidroeléctrico (Viejo, 1977).

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

A nivel regional, se estima que en Latinoamérica se tienen un potencial hidroeléctrico bruto aproximado del 19% del total a nivel global. De esta cifra, alrededor del 70% se encuentra en las regiones tropicales de Sudamérica, 18% en las regiones templadas de la misma región, 11% en Centroamérica y menos del 1% en los países del Caribe (Viejo, 1977).

De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Ramos, 2012) el margen de aprovechamiento que se tiene estimado para México es del 1%, es decir, alrededor de 160 TW anuales.

Una vez determinado el potencial hidroeléctrico en la zona, se debe de conocer la demanda energética debido a que presenta variaciones importantes a lo largo del año (mayor demanda en invierno que en verano) así como durante el día (mayor demanda durante la noche). Ante ello es deseable disponer de centrales generadoras cuya potencia pueda ser regulable en el tiempo, y las centrales hidroeléctricas presentan esa ventaja en comparación a otras centrales como las termoeléctricas o nucleares. Las instalaciones hidroeléctricas se caracterizan por tener un tiempo corto de respuesta ante las fluctuaciones de la demanda, en cuestión de 2 a 5 minutos las turbinas pasan de estar en reposo absoluto a generar la potencia necesaria, mientras que las demás centrales pueden llegar a tardar de 6 a 8 horas, dependiendo de las condiciones en las que se produzca el arranque (UCA).

1.3.1 DESAROLLO DE LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

Es muy probable que el uso de la energía proporcionada por el caudal de los ríos date de la época de la antigua Grecia, cuando los agricultores utilizaban los molinos de agua para triturar trigo y obtener harina, no obstante, fue a partir de la aparición de la turbina en el siglo XIX cuando en diferentes partes del mundo se llevaron a cabo los primeros aprovechamientos de generación eléctrica. Inicialmente la turbina fue desarrollada en Francia por Eourneyron, Jonval y Girard, en Inglaterra por Thomson y en los Estados Unidos por James Francis y Lester Pelton. Este hecho dio paso a la creación de las primeras centrales hidroeléctricas en los países de Europa, Norteamérica y Japón (Viejo, 1977).

Se suele considerar que la primera central hidroeléctrica fue la central de Schoellkopf N°1 que se construyó en 1879 en las cataratas del Niágara, Canadá; pero no fue hasta 1881 cuando la central empezó a operar y cuyo objetivo principal consistió en abastecer a la industria local y a ciertos hogares de familias adineradas. No obstante, fue hasta 1882 en Wisconsin, Estados Unidos donde se dio el primer caso de abastecimiento de energía eléctrica para abastecer a una amplia parte de la población por medio de la central Compañía de la Luz Appleton Edison. En 1884, en un poblado de

los Alpes se construyó la primera línea de transmisión (con una potencia de 5 KW y una longitud de 14 km) que era alimentada por una pequeña central hidroeléctrica.

A finales de la década ya existían más de 200 centrales tan solo en Estados Unidos y Canadá, hecho que sentó precedentes importantes debido a la trascendencia de satisfacer la demanda eléctrica de una gran población, crear empleos y al desarrollo en las tecnologías de la ingeniería civil. En 1925, la capacidad hidroeléctrica instalada era de 26,400 MW con una generación eléctrica anual de 80,000 GW-hr; lo que representaba el 0.6% de la energía consumida mundialmente. En 1971, la generación hidroeléctrica mundial fue de 1,307,000 GW-hr, representando un incremento de 15 veces con respecto a 1925. Después de la segunda Guerra Mundial se siguieron construyendo muchas plantas hidroeléctricas en países subdesarrollados como Egipto, China, Brasil, India, etc. Lo verdaderamente relevante sucedió en los países de Europa, Rusia, Norteamérica, Japón, Oceanía y Sudáfrica, pues estas regiones comprendían el 30% de la población mundial y el 45% de la superficie de la tierra, representando un tercio de los recursos hidroeléctricos del mundo. A esa fecha, el 80% de la producción hidroeléctrica pertenecía a estos países e iba más encaminada a satisfacer las necesidades de la industria (Viejo, 1977). En 1982 se inauguró la central de Itaipú, en el río Paraná (situada entre Brasil y Paraguay), llegando a ser la central de mayor capacidad generadora (con 14,000 MW) del mundo registrada hasta hace un par de años debido a que la central de las Tres Gargantas situada en China la supero con 8,500 MW más.

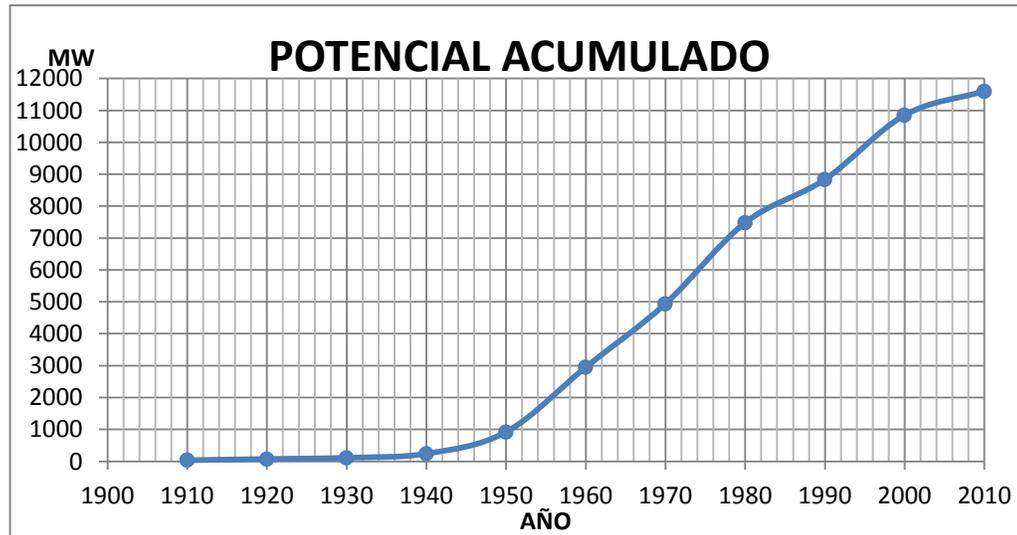
En la actualidad proporciona casi un 20% de la electricidad mundial, mientras que en los países desarrollados este porcentaje se eleva hasta el 33%; dentro de este panorama China es el mejor país que ve hacia su futuro, debido a que opera dos de las diez mayores instalaciones de producción de energía hidroeléctrica del mundo.

A pesar del gran desarrollo hidroeléctrico en el mundo, regiones como África, Asia (excluyendo a China), Oceanía y Latinoamérica solo han explotado el 8%, 20%, 20% y 26% respectivamente, de su potencial hidroeléctrico total (UNESCO, 2014)

Con relación a México, la primera central hidroeléctrica fue construida en el año de 1889 en el municipio de Batopilas, Chihuahua; lugar donde se aprovechó el agua del río Batopilas para generar electricidad en las instalaciones de explotación minera. Sin embargo, el desarrollo de la energía hidroeléctrica se dio de manera gradual a lo largo de los años debido a que las empresas privadas eran las encargadas de suministrar la energía eléctrica a las principales ciudades. No obstante, para el

año de 1900 ya existían por lo menos 15 centrales hidroeléctricas, con una capacidad instalada total de 12,000 KW, que abastecían principalmente al sector industrial.

A partir de los años cuarenta, una vez que la generación de electricidad estuvo bajo el control de la CFE, se crearon varias plantas hidroeléctricas con un mayor potencial instalado tales como Ixtapantongo, Zumpimito, Colotlipa y Colimilla, con una capacidad total de 129 MW. Sin embargo, en los años sesenta se empezaron a construir centrales hidroeléctricas con un alto potencial tales como El Fuerte, Novillo, Mazatepec, Infiernillo y Malpaso, con una capacidad total de 2,032 MW. Posteriormente, en los años setenta se construyeron las plantas de Humaya, Villita y Angostura, con una capacidad total instalada de 1,990 MW y más adelante, en los años ochenta, con la construcción de Chicoasén, Caracol, Peñitas, Amistad y Bacurato, la potencia instalada alcanzó los 2,542 MW (Ramos, 2012). La *gráfica 1.1* muestra el potencial acumulado desde 1910.



Gráfica 1.1 Potencial hidroeléctrico acumulado en México. Fuente: CFE

En la actualidad CFE estima que existe un potencial de alrededor de 53,000 MW por lo que la capacidad hidroeléctrica instalada en México es de apenas el 22%.

En la *tabla 1.1* se muestran las diez centrales hidroeléctricas más grandes en México y su capacidad instalada:

Tabla 1.1 Centrales hidroeléctricas de México con mayor potencial instalado. Fuente: CFE

Nombre de la central	Capacidad efectiva instalada [MW]	Ubicación
Manuel Moreno Torres (Chicoasén)	2,400	Chicoasén, Chiapas
Adolfo López Mateos (Infiernillo)	1,160	La Unión, Guerrero
Netzahualcóyotl (Malpaso)	1,080	Tecpatán, Chiapas
Solidaridad (Aguamilpa)	960	Tepic, Nayarit
Belisario Domínguez (Angostura)	900	Venustiano Carranza, Chiapas
Leonardo Rodríguez Alcaine (El cajón)	750	Santa María del Oro, Nayarit
Alfredo Elías Ayub (La Yesca)	750	La Yesca, Nayarit
Carlos Ramírez Ulloa (El Caracol)	600	Apaxtla, Guerrero
Luis Donald Colosio (Huites)	422	Choix, Sinaloa
Ángel Albino Corzo (Peñitas)	420	Ostuacán, Chiapas

1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo a sus características técnicas (potencia instalada, generación de energía eléctrica, sistema de descarga, obras de toma, turbinas, vertedor, vida útil de proyecto), peculiaridades del asentamiento (vaso de almacenamiento, embalse, cortina, NAMIN, NAMINO, NAMO, NAME) y condiciones de funcionamiento (generación de energía base o generación de energía en periodos). A continuación se describen los factores más importantes de una central hidroeléctrica que permiten su clasificación.

1.4.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU EMBALSE

La clasificación de las centrales hidroeléctricas contempla al caudal y la demanda a cubrir, como los elementos más importantes. La variación del caudal llega a ser muy impredecible durante los diferentes periodos del año ocasionando que en la mayoría de los casos se encuentre por debajo de la demanda necesaria para operar, este hecho ocasiona que se tenga una regulación por medio de un embalse o se prescindiera de él.

a) Centrales a caudal libre sin regulación

Son centrales que utilizan el caudal libre del río, el cual no siempre puede cubrir la demanda. Por tanto no poseen ningún dispositivo de almacenamiento, siendo únicamente la obra de derivación la instalada para regular el flujo a la turbina.

En general, este tipo de instalaciones son de baja potencia, usadas como plantas de apoyo con respecto a otras centrales con mayor potencia, a las cuales se les presta el servicio complementario para cubrir la demanda pico. Debido a que las centrales no están en operación durante la época de estiaje, su rendimiento se considera como económicamente inviable.

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

b) Centrales con embalse o de regulación

En este tipo de clasificación se tiene la posibilidad de almacenar las aportaciones de un río mediante la construcción de una cortina, regulando los flujos de salida para ser turbinados en el momento en que se requiera. En estos casos, la cortina debe ser diseñada para resistir grandes cargas de presión debidas al empuje del agua, además de ser construidas en sitios con relieves y geologías específicas.

Este tipo de centrales pueden operar para cubrir la demanda básica de energía y/o cubrir horas pico de la población, lo que las hace económicamente más rentables.

c) Centrales de acumulación por bombeo

Las centrales disponen de dos embalses situados a diferente elevación. Cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel a lo largo del día, el agua almacenada en el embalse superior, se utiliza para generar energía. Posteriormente, durante las horas del día en que la demanda de energía es menor, el agua es bombeada del embalse inferior al embalse superior para que pueda completarse un nuevo ciclo productivo. Para ello las centrales disponen de turbinas reversibles que pueden funcionar como bombas.

Es importante mencionar que la energía obtenida al turbinar el caudal es menor que la consumida durante el bombeo, debido a las pérdidas de conversión. Por lo tanto, el rendimiento de estas centrales de bombeo será inferior a las centrales hidroeléctricas normales. No obstante, cabe aclarar que este tipo de instalaciones son económicamente viables ya que están diseñadas para producir energía cuando la demanda es alta.

Las centrales además deben de contar con obras principales y accesorios como se enlista a continuación:

- a) Centrales sin embalse: compuertas de derivación, desarenadores, chimenea de equilibrio, tanque de aire, tubería forzada, cámara de carga y válvulas.
- b) Centrales con embalse: cortina, compuertas, obras de desvío, conducción forzada en túnel, cámara de equilibrio o de compensación y válvulas.

1.4.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA CARGA HIDRÁULICA

Esta característica es importante pues determina en gran medida el tipo de instalación hidroeléctrica, es decir, contar o prescindir de algunos elementos como la cortina, canales de derivación, conductos forzados, tipo de turbinas, etc. Es necesario hacer notar que la carga hidráulica está determinada en gran medida por la topografía de sitio. Debido a que no existe una clasificación única sobre la carga hidráulica (H), esta ha sido establecida de la siguiente manera (Torres, 1981):

- Carga de caída baja ($H < 30$ m)
- Carga de caída mediana ($30 \text{ m} < H < 150$ m)
- Carga de caída alta ($150 \text{ m} < H < 300$ m)
- Carga de caída muy alta ($300 \text{ m} < H < 2,000$ m)

1.4.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU POTENCIAL

Las centrales hidroeléctricas son clasificadas con base a la capacidad instalada, lo que ocasiona problemas con la ubicación de los límites porque son relativos a cada región. La clasificación que a continuación se muestra es extensamente aceptada en los EE.UU. y otros países:

- Picocentrales ($P \leq 5$ KW)
- Microcentrales ($5 \text{ KW} \leq P < 100$ KW)
- Centrales de pequeña potencia ($100 \text{ KW} \leq P < 10,000$ KW)
- Centrales de gran potencia ($10,000 \text{ KW} \leq P$)

1.5 TURBINAS EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

La turbina es la máquina con la cual la energía hidráulica se transforma en energía mecánica mediante la conexión directamente con el generador.

Las turbinas pueden agruparse en reacción o de acción. En las primeras, el rodete se mueve siempre sumergido en el agua, es decir, son aquellas en las que el trabajo mecánico se obtiene por la transformación de la energía cinética y de presión del agua a través de las partes giratorias.

En las del segundo tipo, la energía potencial del flujo genera un choque con los elementos giratorios de la turbina sin que exista una diferencia de presiones durante el proceso.

Entre las principales turbinas utilizadas en las centrales hidroeléctricas se encuentran:

TURBINAS PELTON

La turbina Pelton (*figura1.5*) consta de un rodete que sitúa en su periferia álabes; los cuales trabajan al momento de ser impactados en dirección tangencial por una corriente de agua; tal corriente es lanzada a alta velocidad para generar el giro en la turbina. El agua es dirigida y regulada por uno o varios dispositivos llamados inyectores.

Las turbinas que operan bajo este principio son llamadas de impulso o acción.

Las turbinas Pelton trabajan con cargas altas (hasta 1,800 m) y gastos pequeños; debido a esto la velocidad en los inyectores se puede incrementar teniendo como ventaja una generación a menor costo.

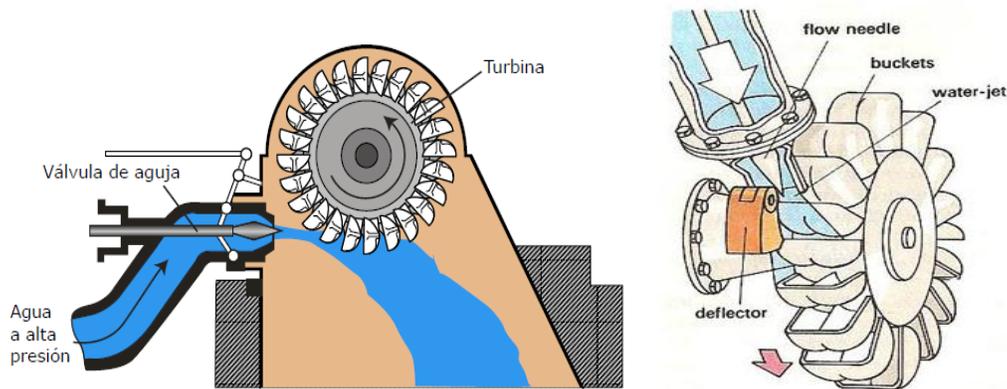


Figura 1.5 Esquema de una turbina Pelton

Fuente: www.energiabase.cl

TURBINAS FRANCIS

Las turbinas Francis (*figura1.6*) se definen como turbinas de reacción y se usan para cargas medianas, aproximadamente entre 30 a 400 m y caudales bastantes grandes (aunque se pueden emplear para caudales moderados). El agua es impulsada a los álabes del rodete de manera perpendicular al eje de giro y expulsada axialmente en dirección paralela a dicho eje gracias a la torsión que presentan los álabes. El rendimiento depende del porcentaje de caudal, en condiciones óptimas de operación este rendimiento puede ser superior al 90%; asimismo, es necesario señalar que el rendimiento de las turbinas de reacción aumenta con el tamaño de las mismas.

Además según sea la carga se puede elegir entre varios tipos de rodetes, es decir, lento, normal, rápido y extra rápido, teniendo como diferencia la orientación de los alabes, el espesor y

velocidad de rotación. Un ejemplo de lo anterior se puede ver con los rodets rápidos, pues se obtienen velocidades de operación más altas para caídas pequeñas mientras que los rodets lentos se utilizan para aprovechar de mejor manera las caídas grandes. Debido a su robusto diseño la vida útil de este tipo de turbinas es mayor con respecto a otras turbinas.

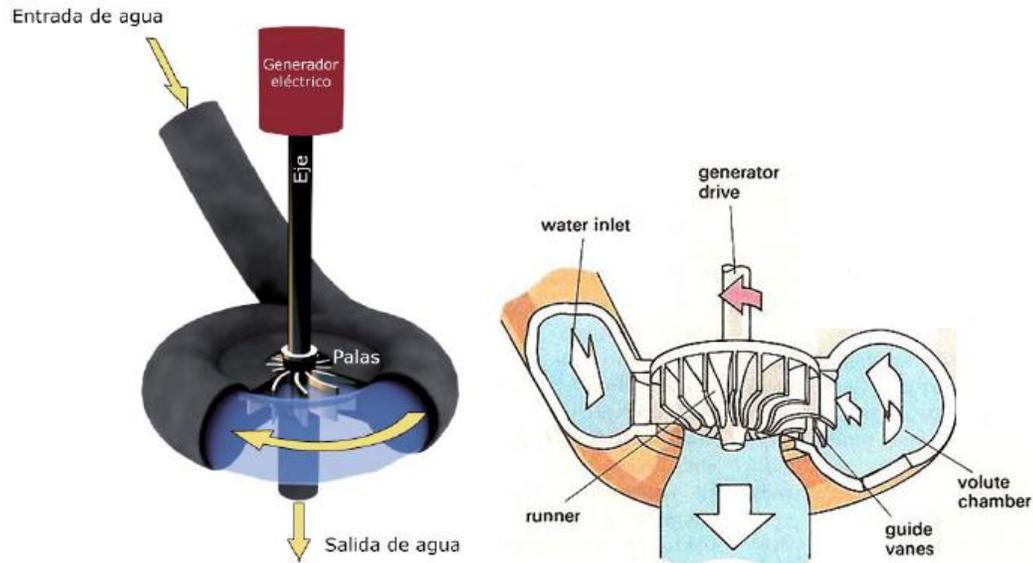


Figura 1.6 Esquema de una turbina Francis
Fuente: www.energiabase.cl

TURBINAS KAPLAN

La turbina Kaplan (*figura1.7*) es una turbina de reacción y su flujo es completamente axial. Este tipo de turbinas se usan para grandes caudales con caídas pequeñas y algunas veces medianas. Las cuatro características esenciales que la hacen insustituible para tales casos son las dimensiones reducidas, velocidad relativamente elevada, alto rendimiento con cargas variables y notable capacidad para sobrecargas. El rodete está compuesto por hélices fijas (turbina hélice) o hélices orientables (turbina Kaplan), en ambos casos las turbinas funcionan en un solo sentido de giro haciéndolas turbinas irreversibles.

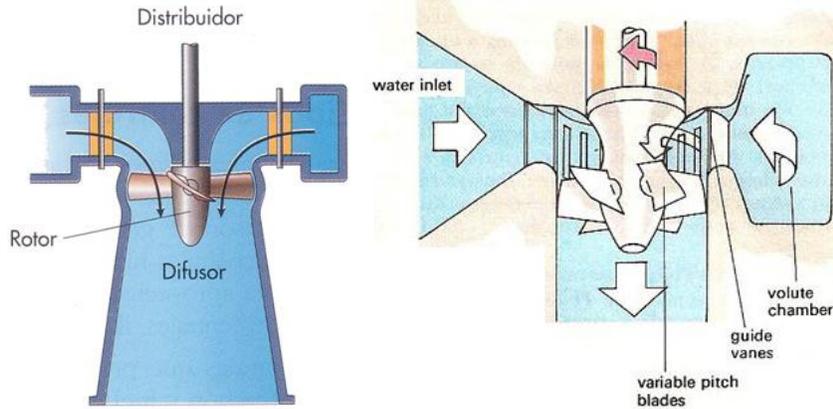


Figura 1.7 Esquema de una turbina Kaplan
Fuente: www.energiabase.cl

El criterio para la selección de una turbina está basado en las características principales del sitio, la carga hidráulica y la variación del flujo, es decir, si la turbina operará en condiciones de gasto medio, mínimo o máximo. Los rangos aproximados de poder aplicable a cada tipo de turbina, carga hidráulica y caudal se resumen a continuación en la *figura 1.8*. Es conveniente recalcar que para un análisis más apropiado es necesario contar con la carga de diseño (H_d), el gasto de diseño (Q_d), conocer el tipo de instalaciones de la obra hidráulica y la cantidad de turbinas a emplear, entre otros aspectos; pero los cuales no se trataran dentro de la tesis.

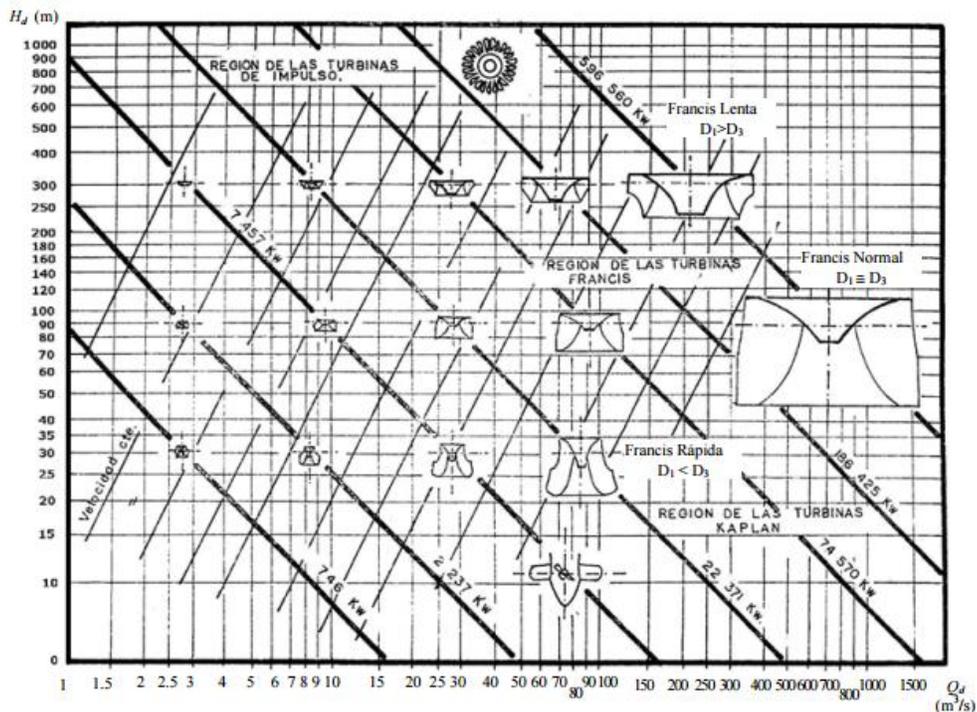


Figura 1.8 Diagrama para la selección de turbinas en función de la carga hidráulica y caudal de diseño
Fuente: U.S.B.R. "Selecting Hydraulic Reaction Turbines"

II. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS

2.1 PROBLEMÁTICA EN LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO

Los principales factores que permiten la evaluación del potencial hidroeléctrico en una cuenca hidrológica, es el caudal que fluye por un cauce y el gradiente topográfico en la zona de estudio. En México, la mayoría de las cuencas hidrológicas y/o sitios factibles para la construcción de presas carecen de registros históricos por lo que es difícil contar con información confiable sobre el caudal promedio anual y su variación en periodos secos y húmedos.

La *figura 2.1* muestra la evolución de las estaciones hidrométricas a partir de 1900.

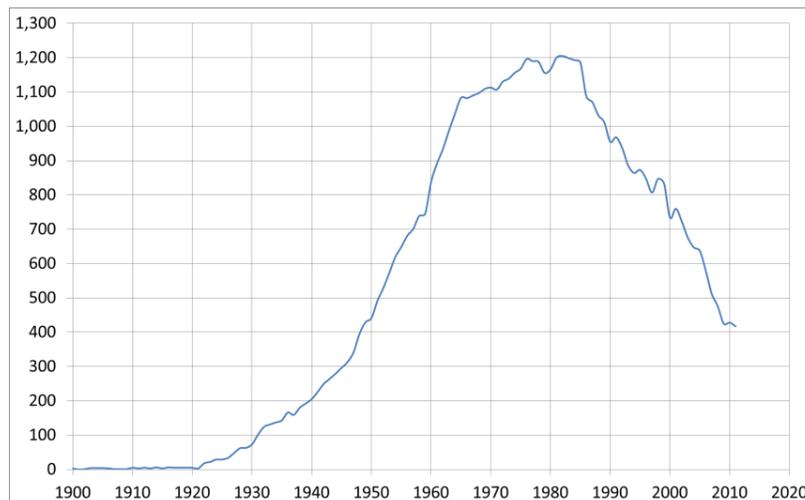


Figura 2.1 Número de estaciones hidrométricas activas en la República Mexicana desde 1900 hasta 2012
Fuente: CONAGUA

Debido a que la falta de datos hidrométricos es un problema global, estudios publicados en el artículo “Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources” del Departamento de Energía de los Estados Unidos, desarrolló metodologías empíricas para la valoración del gasto promedio anual tal como lo indica la *ecuación 2.1*:

$$Q = e^a * A^b * P^c * T^d \quad 2.1$$

Donde:

Q es el gasto medio anual (m^3/s)

e es la base del logaritmo natural

A es el área drenada (km^2)

P es la precipitación anual (mm/año)

T es la temperatura anual ($^{\circ}\text{F}$)

a, b, c, d son exponentes calibrados que dependen únicamente del orden de corriente de las cuencas hidrológicas.

2.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la evaluación del potencial hidroeléctrico en sitios no aforados dentro de 13 cuencas hidrológicas del estado de Guerrero, México. Para cumplir este objetivo, se plantea el uso de datos hidrométricos y de elevación digital, así como TopoToolbox (Schwanghart, 2010) un software libre enfocado al análisis topográfico.

Los objetivos específicos que se proponen cumplir en esta tesis son:

- Estimar el escurrimiento medio anual y su variación temporal en cada cuenca de estudio.
- Identificar aquellos sitios dentro de cada cuenca con el mayor potencial hidroeléctrico.
- Definir el posible tipo de instalación hidroeléctrica (clasificación del tipo de central de acuerdo al potencial y tipo de turbina).

III. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estado de Guerrero se ubica en la costa central mexicana del Océano Pacífico y su extensión territorial es de 63,596 km², esto es aproximadamente el 3.2% del territorio nacional. El estado forma parte de la RHA IV (Balsas) al noroeste y la RHA V (Pacífico Sur) al sureste; el hecho se debe porque el sistema montañoso de la Sierra Madre del Sur lo divide en dos sectores, ocasionando que sus aguas se vierten directamente al Océano Pacífico y las otras al Río Balsas, que finalmente también desemboca al Océano Pacífico.

El análisis se centra en las cuencas de la RHA V, la cual se caracteriza por tener una baja contribución al Producto Interno Bruto (PIB) de México a pesar de ser la tercera RHA con mayor disponibilidad per cápita y la cuarta con mayor disponibilidad total (*tabla 3.1*). La región tiene el potencial necesario para aprovechar sus vastos recursos hídricos con fines de crecimiento económico tales como agricultura o la generación de electricidad.

Tabla 3.1 Datos socioeconómicos de las Regiones Hidrológicas Administrativas de México

Clave	RHA	Superficie continental (km ²)	Agua renovable 2011 (hm ³ /año)	Población a mediados de año 2013 (millones de hab.)	Aportación al PIB nacional 2012 (%)
I	Península de Baja California	145 385	4 999.2	4.29	3.64
II	Noroeste	205 218	8 324.9	2.76	2.86
III	Pacífico Norte	152 013	25 939.1	4.42	2.72
IV	Balsas	119 248	22 898.7	11.56	6.14
V	Pacífico Sur	77 525	32 350.6	4.99	2.39
VI	Río Bravo	379 552	12 757.2	12.00	14.02
VII	Cuencas Centrales del Norte	202 562	8 064.7	4.47	4.36
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	190 367	35 754.0	23.60	18.19
IX	Golfo Norte	127 166	28 114.6	5.19	2.43
X	Golfo Centro	104 790	95 124.5	10.40	6.07
XI	Frontera Sur	101 231	163 845.5	7.48	5.30
XII	Península de Yucatán	137 753	29 856.3	4.43	8.01
XIII	Aguas del Valle de México	16 438	3 468.4	22.82	23.86
	Total	1 959 248	471 497.6	118.40	100.00

Fuentes: CONAPO (2014), INEGI (2014a), CONAGUA (2014).

A pesar de dicho potencial, el grado de rezago social que tiene el estado de Guerrero es muy grave, ya que más de la mitad de sus municipios presentan una marginación importante con respecto a otros estados del país (*tabla 3.2*).

Tabla 3.2 Municipios por entidad federativa con grado de marginación

Entidad federativa	Total	Grado de marginación				
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Nacional	2 456	441	408	944	401	262
Aguascalientes	11	—	—	4	5	2
Baja California	5	—	—	—	—	5
Baja California Sur	5	—	—	—	2	3
Campeche	11	—	2	7	1	1
Coahuila de Zaragoza	38	—	—	5	17	16
Colima	10	—	—	2	4	4
Chiapas	118	48	39	29	1	1
Chihuahua	67	11	3	12	26	15
Distrito Federal	16	—	—	—	1	15
Durango	39	5	—	23	8	3
Guanajuato	46	1	2	30	7	6
Guerrero	81	43	18	16	4	—

Fuente: CONAPO (2011).

Aunado a los problemas anteriores, podemos observar que el estado tiene una demanda eléctrica creciente, ocupando el tercer sitio a nivel nacional (tabla 3.3).

Tabla 3.3 Estados con mayor crecimiento anual en consumidores de electricidad

15 Entidades con mayor crecimiento de usuarios

Entidad Federativa	Total	Crecimiento anual (%)
Campeche	294,952	6.5%
Quintana Roo	573,173	5.2%
Guerrero	1,040,381	5.1%
Querétaro	685,013	4.8%
Estado de México	4,256,676	4.7%
Morelos	698,705	4.1%
Chiapas	1,455,747	3.1%
Tabasco	720,525	3.1%
Tlaxcala	373,893	3.0%
Baja California Sur	262,982	2.9%
Nayarit	440,703	2.9%
Puebla	1,927,140	2.8%
Yucatán	737,967	2.7%
Oaxaca	1,322,034	2.7%
Aguascalientes	434,641	2.7%

Fuente: Dirección de Operación, Comisión Federal de Electricidad. Diciembre 2014.

3.1.1 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS

Para llevar a cabo estudios de diseño y operación hidrológica es indispensable contar con suficientes datos climatológicos e hidrológicos. De esa manera es posible conocer la respuesta hidrológica de la cuenca durante un evento de precipitación (crecidas) así como durante periodos secos (gasto base).

Las estaciones climatológicas miden la temperatura, precipitación, evaporación, velocidad y dirección del viento. En 2013, México contaba con 3,153 estaciones climatológicas oficiales en operación tal como se puede ver en la figura 3.1. En esta misma figura se aprecia una distribución espacial de estaciones climatológicas bastante heterogénea en nuestro país, con una menor densidad en el norte, noroeste y sureste.



Figura 3.1 Estaciones climatológicas en el país. Fuente: CONAGUA

Por otro lado las estaciones hidrométricas miden el caudal (volumen de agua por unidad de tiempo) que fluye en ríos, canales a cielo abierto y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible y su variación temporal. En el 2013, México contaba con 717 estaciones hidrométricas (figura 3.2) según datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS):



Figura 3.2 Estaciones hidrométricas en el país

El desarrollo de esta tesis se basa únicamente en los datos que proporcionan las estaciones hidrométricas, es decir, el caudal aforado en un punto de las cuencas hidrológicas de estudio. Para ello, a continuación se mencionan las 13 estaciones que se utilizan y sus respectivas corrientes principales (tabla 3.4):

Tabla 3.4 Estaciones hidrométricas analizadas. Fuente: BANDAS

	CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	CORRIENTE	CUENCA	RH	COORDENADAS	
						LONGITUD	LATITUD
1	19016	LA UNIÓN	RIO LA UNIÓN	RIO LA UNIÓN	19	-101.8208	17.9917
2	19022	LA SALITRERA	RIO IXTAPA	RIO IXTAPA	19	-101.5833	17.7317
3	19014	SAN JERONIMITO	RIO SAN JERONIMITO	RIO SAN JERONIMITO	19	-101.3417	17.5583
4	19009	PETATLÁN	RIO PETATLÁN	RIO SAN JERONIMITO	19	-101.2833	17.5361
5	19003	COYUQUILLA II	RIO COYUQUILLA	RIO COYUQUILLA	19	-101.0583	17.3750
6	19006	SAN LUIS	RIO SAN LUIS	RIO SAN LUIS	19	-100.8916	17.2708
7	19005	TÉCPAN	RIO TECPAN	RIO TECPAN	19	-100.6208	17.2500
8	19013	SAN JERÓNIMO	RIO ATOYAC	RIO ATOYAC	19	-100.4667	17.1417
9	20022	SAN CRISTÓBAL	RIO SAN MIGUEL	RIO PAPAGAYO	20	-99.9417	17.2792
10	19002	COYUCA DE BENÍTEZ	RIO COYUCA	RIO COYUCA	19	-100.0958	17.0042
11	19008	KM. 21 + 000	RIO DE LA SABANA	RIO DE LA SABANA	19	-99.7931	16.9417
12	20018	MARQUELIA	RIO MARQUELIA	RIO MARQUELIA	20	-98.8250	16.6083
13	20016	QUETZALA	RIO QUETZALA	RIO OMETEPEC	20	-98.5069	16.6583

Los datos necesarios para la evaluación del potencial hidrométrico consisten en gastos medios anuales, esto debido a que el potencial hidroeléctrico se calcula a partir del gasto medio anual de una cuenca. En la *tabla 3.5* se muestra el gasto medio anual por cuenca así como su variabilidad interanual, es decir, su desviación estándar (DE). Los registros de gastos son extraídos del BANDAS y se muestran en los anexos.

Tabla 3.5 Gasto medio anual y desviación estándar de cada estación hidrométrica

Estación (Clave)	Gasto medio anual (m ³ /s)	Desviación Estándar
La Unión (19016)	7.74	4.93
La Salitrera (19022)	7.56	5.15
San Jeronimito (19014)	12.07	4.17
Petatlán (19009)	12.28	3.77
Coyuquilla II (19003)	12.88	5.48
San Luis (19006)	22.06	6.91
Técpan (19005)	33.18	23.24
San Jerónimo (19013)	29.01	9.25
San Cristóbal (20022)	7.95	2.33
Coyuca de Benítez (19002)	30.64	10.25
Km. 21 + 000 (19008)	3.84	2.97
Marquelia (20018)	26.26	12.85
Quetzala (20016)	97.72	25.08

3.1.2 MEDICIÓN DEL CAUDAL

El caudal, gasto o aforo se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo (m³/s) que pasa de manera continua sobre una sección transversal dada, por lo que para medirlo y calcularlo existen diversos métodos. En México se usan básicamente cuatro tipos de métodos para aforar corrientes:

a) SECCIÓN DE CONTROL

El método se define como la relación única entre el tirante y el gasto de una corriente. Para ello existen muchos tipos de sección de control que se pueden usar para aforar una corriente, entre los más comunes son los que producen un tirante crítico y los vertedores.

Se utiliza el tirante crítico cuando la topografía permite disponer de una caída libre, en este caso el gasto se calcula con el tirante medido justo en la caída y empleando la *ecuación 3.1*:

$$Q = 1.65 B y \sqrt{g y} \quad (3.1)$$

Donde:

Q es el gasto en (m^3/s)

B es el ancho del cauce (m)

y es el tirante (m)

g es la gravedad en (m/s^2)

Para los vertedores de pared delgada, lo recomendable es realizar aforos con secciones triangulares con ángulo de 90° para gastos pequeños de 0 a 100 (l/s) y rectangulares para gastos mayores a 100 (l/s).

Usando un vertedor triangular, el gasto se obtiene con la *ecuación 3.2*:

$$Q = C h^{5/2} \quad (3.2)$$

y con un vertedor rectangular, el gasto se obtiene con la *ecuación 3.3*:

$$Q = C L h^{3/2} \quad (3.3)$$

Donde:

Q es el gasto en (m^3/s)

h es la carga sobre la cresta del vertedor (m)

L es la longitud de la cresta del vertedor (m)

C es el coeficiente de descarga del vertedor ($m^{1/2}/s$) y se calcula con la *ecuación 3.4*:

$$C = \left(\frac{8}{15}\right) \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu K \quad (3.4)$$

Donde:

g es la gravedad en (m/s²)

θ es el ángulo en el vértice del vertedor

μ coeficiente experimental

K es un coeficiente que depende de B/h

B es el ancho del cauce (m)

b) RELACIÓN SECCIÓN-PENDIENTE

El método de aforo es para dos puntos de una sección prácticamente recta en donde se busca conocer el caudal máximo de una avenida; para tal situación se requiere de las marcas que deja el nivel del agua para conocer el área hidráulica. Asimismo apoyados en la fórmula de Manning, se puede determinar la velocidad del agua en dicha sección por medio de la *ecuación 3.5*:

$$v = \frac{1}{n} R h^{2/3} S f^{1/2} \quad (3.5)$$

Donde:

v es la velocidad de la corriente (m/s)

n es el coeficiente de rugosidad de Manning que depende del material del lugar de aforo

Rh es el cociente entre el área hidráulica y el perímetro mojado (m)

Sf es la pendiente de la línea específica

Recurriendo a la *ecuación 3.6* que es la ecuación de continuidad, se puede conocer el gasto:

$$Q = vA \quad (3.6)$$

Donde:

Q es el gasto en (m^3/s)

v es la velocidad de la corriente (m/s)

A es el área hidráulica (m^2)

c) RELACIÓN SECCIÓN-VELOCIDAD

Consiste en aforar el cauce en secciones transversales llamadas dovelas (*figura 3.3a*), las cuales tendrán una determinada área (A_i) y diferentes velocidades medias. Para determinar la velocidad media de cada dovela (vm_i) se puede tomar como la medida por el molinete (*figura 3.3b*) a la profundidad de $0.6 y_i$ (aproximadamente) en cada dovela.

Por lo que para conocer el gasto total del cauce se hace uso de la *ecuación 3.7*:

$$Q = \sum_{i=1}^n (A_i vm_i) \quad (3.7)$$

Donde:

Q es el gasto en (m^3/s)

A_i es el área hidráulica (m^2)

vm_i es la velocidad media de la corriente (m/s)

n es el número de dovelas

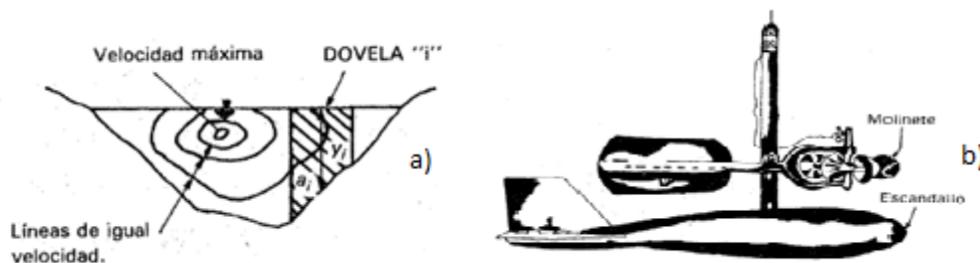


Figura 3.3 a) Representación de una dovela sobre un río y b) molinete usado en la medición de la velocidad media

d) Curva elevación-gasto

Este método es el más usado en México, el cual usa una curva que relaciona la elevación de la superficie libre del agua con el gasto que pasa por la sección. Se construye a partir de una serie de

datos obtenidos con varios aforos, para generar una curva media que describa de mejor manera el comportamiento del río.

En la mayoría de los ríos, la forma de las secciones transversales cambia continuamente debido a los procesos de erosión y sedimentación, por lo que es conveniente realizar aforos con la frecuencia suficiente para contar en cualquier momento con una curva elevaciones-gastos actualizada. En general, puede decirse que es necesario realizarlos por lo menos 5 o 6 veces al mes, aunque algunas dependencias como la CFE especifican un aforo diario.

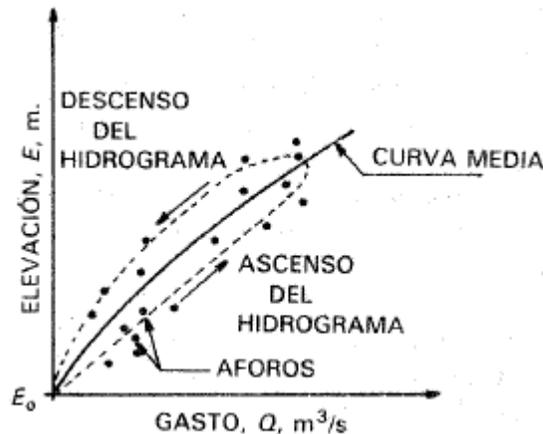


Figura 3.4 Curva elevaciones-gastos

Fuente: Fundamentos de hidrología superficial, Francisco Aparicio

3.1.3 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El Estado de Guerrero cuenta con 81 municipios y su capital se ubica en la ciudad de Chilpancingo de los Bravos. Se sitúa en la zona meridional de la República Mexicana a lo largo de la costa del océano Pacífico y se ubica entre los $16^{\circ}18'$ y $18^{\circ}48'$ de latitud norte y los $98^{\circ}03'$ y $102^{\circ}12'$ de longitud oeste. Limita al norte con el estado de México y Morelos, al noroeste con Michoacán, al noreste con Puebla, al este con Oaxaca y al sur con el océano Pacífico.

Las cuencas analizadas se ubican en municipios de la costa del estado, pero es necesario precisar que la limitación de las cuencas se debe a los sistemas montañosos y no a los límites políticos; por lo que algunas de ellas no se encuentran únicamente en un municipio. A continuación, la *tabla 3.6* enlista las estaciones hidrométricas y su localización, y la *figura 3.5* muestra el mapa con la ubicación de las cuencas en el estado de Guerrero.

Tabla 3.6 Localización de las estaciones hidrométricas analizadas dentro de los municipios de Guerrero

	CLAVE	ESTACIÓN	Municipio principal	Clave	Región de Guerrero																																				
1	19016	LA UNIÓN	LA UNIÓN DE ISIDORO MONTES DE OCA	68	Costa grande																																				
2	19022	LA SALITRERA	ZIHUATANEJO DE AZUETA	38	Costa grande																																				
3	19014	SAN JERONIMITO	PETATLÁN	48	Costa grande																																				
4	19009	PETATLÁN	PETATLÁN	48	Costa grande																																				
5	19003	COYUQUILLA II	PETATLÁN	48	Costa grande																																				
6	19006	SAN LUIS	TÉCPAN DE GALEANA	57	Costa grande																																				
7	19005	TÉCPAN	TÉCPAN DE GALEANA	57	Costa grande </tr <tr> <td>8</td> <td>19013</td> <td>SAN JERÓNIMO</td> <td>ATOYAC DE ÁLVAREZ</td> <td>11</td> <td>Costa grande</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>20022</td> <td>SAN CRISTÓBAL</td> <td>COYUCA DE BENÍTEZ</td> <td>21</td> <td>Costa grande</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>19002</td> <td>COYUCA DE BENÍTEZ</td> <td>COYUCA DE BENÍTEZ</td> <td>21</td> <td>Costa grande</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>19008</td> <td>KM. 21 + 000</td> <td>ACAPULCO DE JUÁREZ</td> <td>01</td> <td>Acapulco</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>20018</td> <td>MARQUELIA</td> <td>MARQUELIA</td> <td>77</td> <td>Costa chica</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>20016</td> <td>QUETZALA</td> <td>OMETEPEC</td> <td>46</td> <td>Costa chica</td> </tr>	8	19013	SAN JERÓNIMO	ATOYAC DE ÁLVAREZ	11	Costa grande	9	20022	SAN CRISTÓBAL	COYUCA DE BENÍTEZ	21	Costa grande	10	19002	COYUCA DE BENÍTEZ	COYUCA DE BENÍTEZ	21	Costa grande	11	19008	KM. 21 + 000	ACAPULCO DE JUÁREZ	01	Acapulco	12	20018	MARQUELIA	MARQUELIA	77	Costa chica	13	20016	QUETZALA	OMETEPEC	46	Costa chica
8	19013	SAN JERÓNIMO	ATOYAC DE ÁLVAREZ	11	Costa grande																																				
9	20022	SAN CRISTÓBAL	COYUCA DE BENÍTEZ	21	Costa grande																																				
10	19002	COYUCA DE BENÍTEZ	COYUCA DE BENÍTEZ	21	Costa grande																																				
11	19008	KM. 21 + 000	ACAPULCO DE JUÁREZ	01	Acapulco																																				
12	20018	MARQUELIA	MARQUELIA	77	Costa chica																																				
13	20016	QUETZALA	OMETEPEC	46	Costa chica																																				

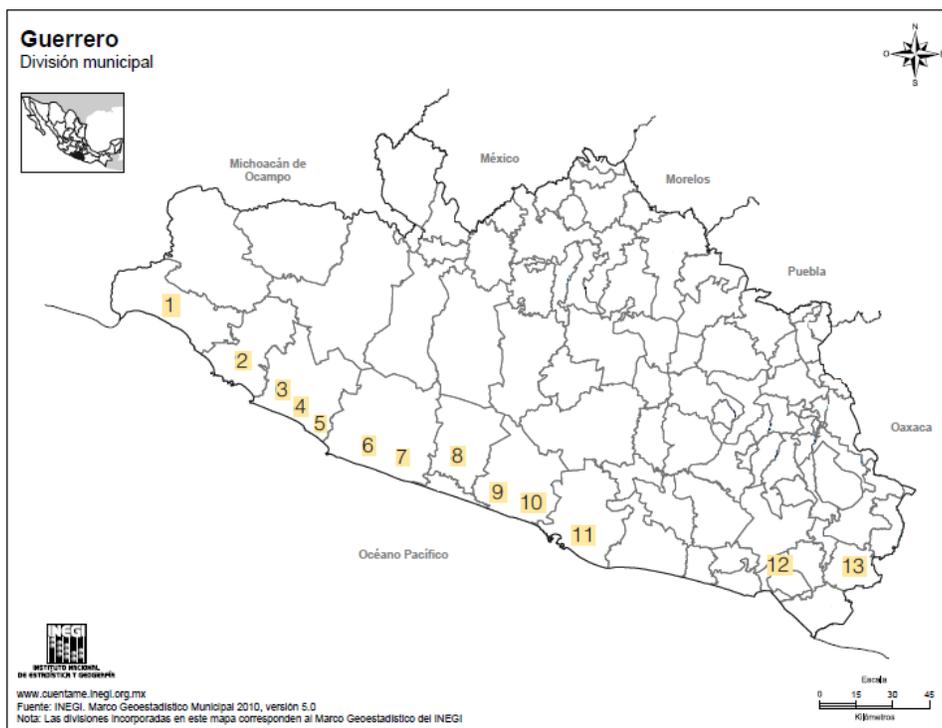


Figura 3.5 Ubicación de las cuencas en los municipios del estado de Guerrero

3.1.4 GEOLOGÍA, TOPOGRAFÍA Y CLIMA

La superficie del estado es una de las más montañosas y complejas debido a la presencia de la Sierra Madre del Sur (figura 3.6). El relieve en su mayoría lo conforman sierras, en donde predominan las rocas de tipo intrusivo (formadas debajo de la superficie de la tierra) y metamórfico (que han sufrido cambios por la presión y las altas temperaturas) en una franja que se extiende del noroeste al sureste junto a la costa. En la parte central y noreste, las rocas son de tipo ígneo extrusivo o volcánico (se

forman cuando el magma o roca derretida sale de las profundidades hacia la superficie de la tierra) y de tipo sedimentario.

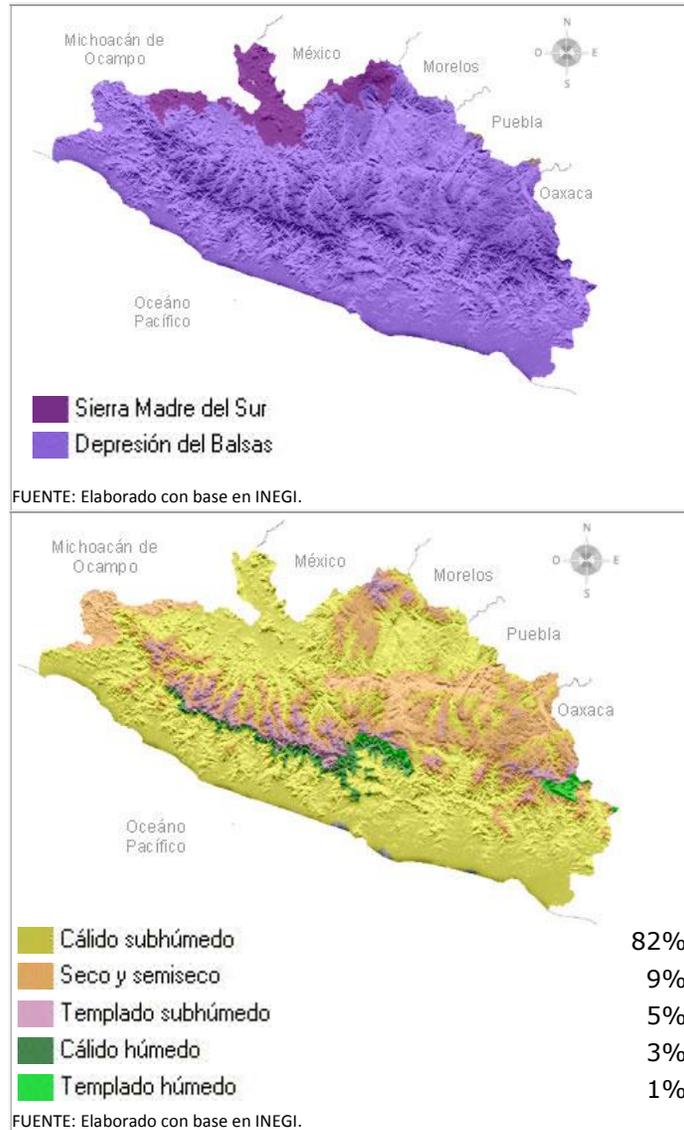


Figura 3.6 Relieve y distribución del clima en el estado de Guerrero

Guerrero cuenta con una gran variedad de condiciones climáticas regidas por la fisiografía del mismo como se puede constar en la parte baja de la *figura 3.6*. Se puede apreciar que el clima dominante es de tipo cálido subhúmedo en la mayoría del territorio mientras que en la sierra y en ciertas regiones al norte, los climas predominantes son de tipo templado subhúmedo y seco/semiseco, respectivamente.

La *tabla 3.7* muestra las características topográficas y geológicas de las cuencas de estudio, de acuerdo a lo expuesto con información geográfica del INEGI:

Tabla 3.7 Fisiografía y climas en cuencas analizadas

	ESTACIÓN	Topografía predominante	Rocas Predominantes	Clima
1	LA UNIÓN	Cordillera costera	Sedimentarias e ígneas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
2	LA SALITRERA	Sierra baja compleja	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
3	SAN JERONIMITO	Sierra baja compleja	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
4	PETATLÁN	Sierra baja compleja	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
5	COYUQUILLA II	Sierra baja compleja	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
6	SAN LUIS	Sierra baja compleja	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
7	TÉCPAN	Sierra baja compleja	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
8	SAN JERÓNIMO	Costa	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
9	SAN CRISTÓBAL	Sierra alta compleja	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
10	COYUCA DE BENÍTEZ	Costa	Ígneas y metamórficas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
11	KM. 21 + 000	Costa	Metamórficas e ígneas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
12	MARQUELIA	Lomerío con llanuras	Metamórficas e ígneas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano
13+	QUETZALA	Sierra alta compleja	Metamórficas e ígneas	Cálido subhúmedo con lluvia en verano

3.1.5 DEMOGRAFÍA E INDICADORES SOCIOECONÓMICOS

La población total del estado de Guerrero consiste en aproximadamente 3,400,000 habitantes, de los cuales 58% vive en áreas urbanas y el otro 42% en zonas rurales. Las ciudades que superan los 100,000 habitantes y que representan a los núcleos urbanos más importantes del estado son: Acapulco, Chilpancingo, Iguala, Chilapa, Zihuatanejo y Taxco. En la *tabla 3.8* se presentan datos de los municipios donde se localizan las cuencas analizadas de acuerdo a datos del INEGI del 2011:

Tabla 3.8 Datos sociodemográficos de los municipios donde se localizan las cuencas de estudio

	ESTACIÓN	Municipio	Población	% con servicio de electricidad	% con servicio de agua	% de la población económicamente activa
1	LA UNIÓN	LA UNIÓN DE ISIDORO MONTES DE OCA	25,712	96.4	24.1	45.5
2	LA SALITRERA	ZIHUATANEJO DE AZUETA	118,211	98.3	51.5	58.1
3	SAN JERONIMITO	PETATLÁN	44,979	96.3	39.4	50.3
4	PETATLÁN	PETATLÁN	44,979	96.3	39.4	50.3
5	COYUQUILLA II	PETATLÁN	44,979	96.3	39.4	50.3
6	SAN LUIS	TÉCPAN DE GALEANA	62,071	96.4	45.8	50.4
7	TÉCPAN	TÉCPAN DE GALEANA	62,071	96.4	45.8	50.4
8	SAN JERÓNIMO	ATOYAC DE ÁLVAREZ	61,316	96.2	38.7	48.7
9	SAN CRISTÓBAL	COYUCA DE BENÍTEZ	73,460	97.4	24.1	48.3
10	COYUCA DE BENÍTEZ	COYUCA DE BENÍTEZ	73,460	97.4	24.1	48.3
11	KM. 21 + 000	ACAPULCO DE JUÁREZ	789,971	99.1	57.1	56.0
12	MARQUELIA	MARQUELIA	12,912	97.7	16.0	52.1
13	QUETZALA	OMETEPEC	61,306	92.4	21.2	50.3

3.1.6 RECURSOS HÍDRICOS

La mayor cantidad de lluvia ocurre en el verano entre los meses de mayo a octubre debido a la presencia de ondas tropicales cerca de las costas. En la *figura 3.7* se muestra la precipitación promedio mensual del estado de Guerrero:

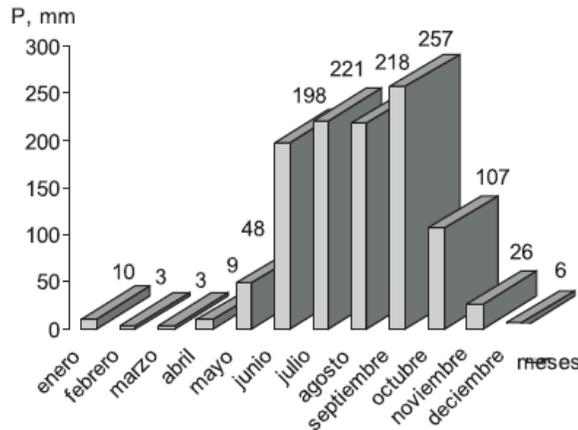


Figura 3.7 Precipitación media mensual histórica del estado de Guerrero (1941-2002)

De acuerdo con los usos específicos del agua a nivel nacional Guerrero se coloca en el 11° lugar en uso doméstico, el 16° en uso público, el 9° en uso agrícola, el 15° en uso industrial y el 2° en hidroeléctrico (después de Chiapas). La distribución del uso consumista dentro del estado es de 96% para agua superficiales y 4% para agua subterráneas.

El territorio del estado se encuentra en tres regiones hidrológicas. La región 18 correspondiente a la cuenca del Río Balsas, de la cual Guerrero ocupa el 31% de la superficie, teniendo como presa más importante a la Presa Infiernillo. La región 19 de la Costa Grande ocupa el 20 % del territorio estatal, con ríos importantes como el Ixtapa, Técpan, Coyuca, La Sabana, Coyuquilla, Petatlán y Atoyac. Por último, la región 20 de la costa chica, la cual ocupa 26.4 % de la superficie de Guerrero, entre los ríos más destacados se encuentran los ríos Nexpa, Ometepec y Papagayo.

De acuerdo con los mapas de aguas superficiales del INEGI y BANDAS Guerrero cuenta con 15 cuencas hidrográficas y un total de 155 estaciones climatológicas y 94 hidrométricas registradas en su territorio. Cabe comentar que sólo 37 de estas últimas estaban en servicio en el año 2000. La distribución espacial de estas estaciones no es homogénea y presenta diferentes problemas en el momento de usar sus datos a escalas menores. Algunas estaciones cubren áreas grandes como es el caso de la parte oriental de la Región Hidrológica 18 y la Región Hidrológica 20, en las cuales existen únicamente dos estaciones hidrométricas en un área de 18,000 km² (Perevochtchikova, 2006).

3.2 TOPOTOOLBOX

TopoToolbox es una herramienta informática de análisis de terreno la cual consiste en un grupo de funciones en Matlab que ayuda al análisis topográfico de cuencas hidrológicas, entre otros aspectos. La información que TopoToolbox requiere es únicamente matrices de datos correspondientes a la elevación de la superficie terrestre (conocidos como Modelos Digitales de Elevación o MDE). Una de las ventajas de TopoToolbox es que el tipo de análisis geoespacial que ofrece tiene funciones similares a un Sistema de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) aunque con una mayor eficiencia de procesamiento. Los algoritmos planteados en el software fueron creados por Schwanghart & Kuhn en 2010.

Como se comentó preliminarmente, un MDE es un conjunto de puntos finitos georeferenciados que contienen la elevación geográfica para representar la superficie del terreno. La malla que contiene estos valores (*figura 3.8*) es procesada por varios algoritmos para estimar distancias, gradientes y acumulación de flujos pendiente abajo.

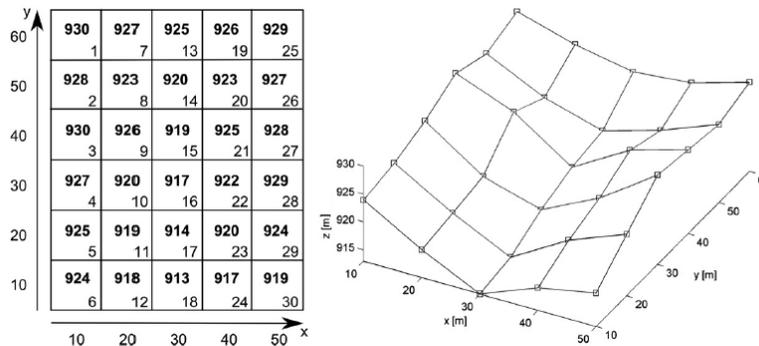


Figura 3.8 Ejemplo del MDE en notación matricial (izquierda) y topográfica (derecha). Los valores centrados en la matriz se refieren a la elevación de celdas y los valores en la parte inferior derecha se refieren a un índice lineal de las celdas

Las celdas por las cuales el flujo escurre se establecen una vez que TopoToolbox simula una precipitación uniforme sobre todas las celdas del MDE, brindando un valor unitario a cada una, como se puede ver en la *figura 3.9*. El flujo o valor se desplaza a lo largo del gradiente de mayor pendiente, acumulando así el flujo de todas las celdas ubicada aguas arriba lo que permite tener un drenaje conectado; tal proceso permite la bifurcación y convergencia del flujo en todas direcciones hasta el final o salida de cualquier cuenca. De esta manera, el flujo acumulado total es igual a la suma de la lluvia efectiva por el área de drenada.

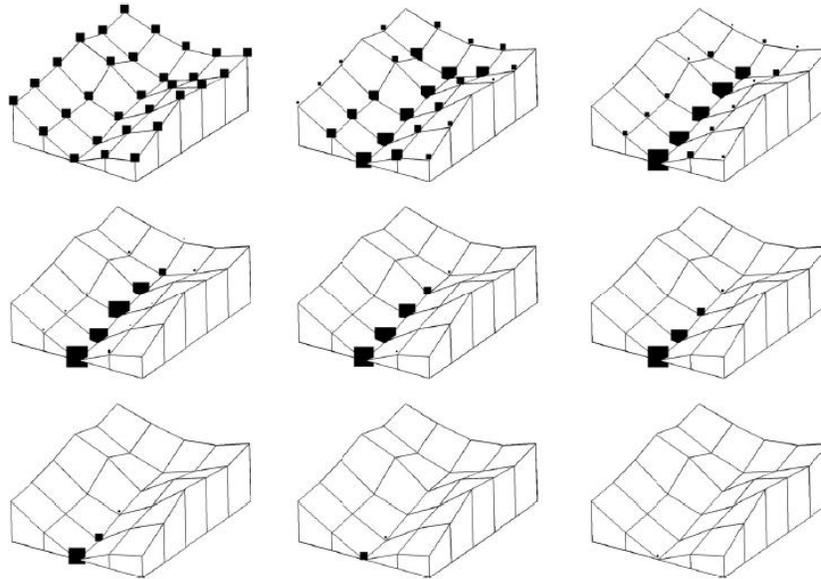


Figura 3.9 Representación del flujo acumulado dentro del MDE. En la etapa inicial se asigna la unidad de precipitación en cada celda (parte superior izquierda) y esta va cambiando de acuerdo a los gradientes de mayor pendiente para lograr la evacuación de todo el flujo generado en la cuenca (parte inferior derecha)

Asimismo, el área drenada por una cuenca se deriva del MDE y su cálculo se basa en la información de la dirección del flujo. De esta manera, TopoToolbox es capaz de estimar el flujo acumulado en cualquier punto de una cuenca (el cual es proporcional al área de aportación) y por lo tanto, su contribución hidrológica a nivel de cuenca (Schwanghart, 2010).

3.3 METODOLOGÍA

La cuenca de aportación aguas arriba de un punto de control (estación hidrométrica), el gasto que circula en las subcuencas y el perfil de los cauces; son los tres elementos a identificar para evaluar el potencial de la zona.

El análisis utiliza MDE con una resolución espacial de 60 m, ya que la resolución de 30 m presenta el inconveniente de procesar una gran cantidad de datos lo que ocasiona problemas en el software.

El primero paso a realizar para conocer el potencial, consiste en rellenar las zonas con depresiones dentro de la cuenca (figura 3.10) y así lograr que la red fluvial trace una ruta adecuada. Posteriormente se obtiene el mapa del flujo acumulado dentro del MDE, el cual traza la ruta del flujo hasta la estación hidrométrica (figura 3.11).

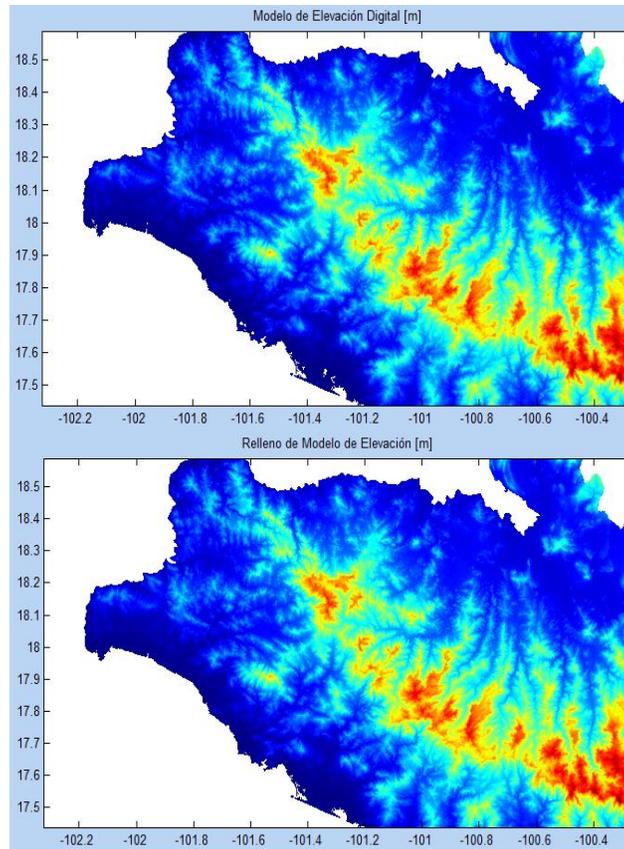


Figura 3.10 Relleno de depresiones en TopoToolbox

La delimitación de la zona de estudio se logra una vez ubicada la estación hidrométrica dentro del MDE, la cual sirve como punto de partida para ubicar y trazar el parteaguas de la cuenca como se muestra en la *figura 3.12*.

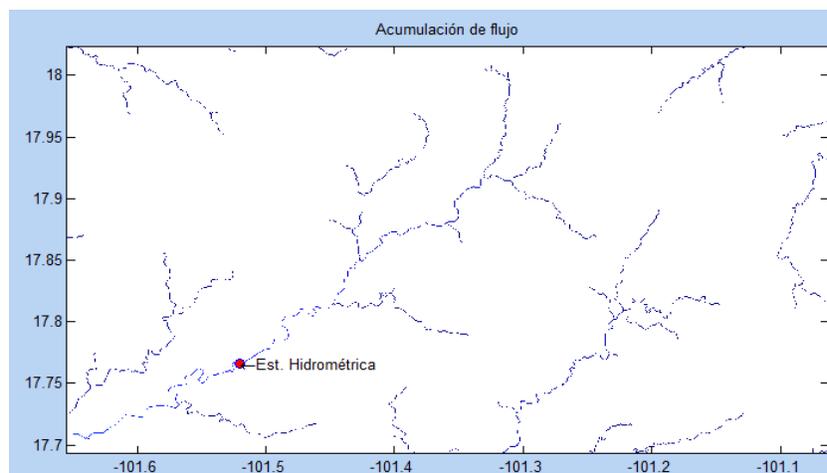


Figura 3.11 Ubicación de la estación hidrométrica dentro de la red fluvial

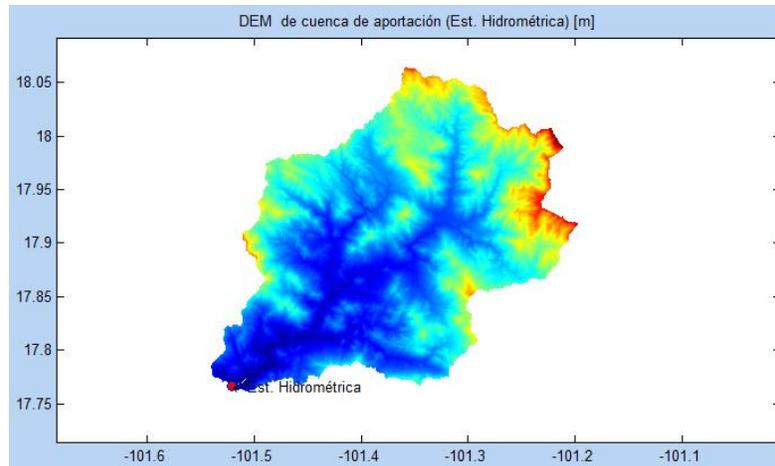


Figura 3.12 Cuenca de aportación de la estación hidrométrica La Unión

El flujo acumulado de la cuenca de aportación tiene dos fines, el primero es conocer el flujo promedio a la salida de la cuenca (que posteriormente se calibrará por medio de interpolaciones con el valor promedio del caudal registrado en la estación hidrométrica) y el segundo es localizar aquellos puntos dentro del MDE con el mayor desnivel (lugar óptimo para la instalación de una central hidroeléctrica). La búsqueda de estos puntos en la red fluvial de la cuenca parte de dos criterios importantes:

- 1) No ubicarlos en regiones altas de la cuenca, debido a que ocasionaría problemas para la instalación de la central y la transmisión de electricidad. Además, de que el escurrimiento generado en estas regiones sería muy bajo lo cual afectaría el potencial hidroeléctrico bruto.
- 2) Ubicarlos en zonas donde se observe un orden de corrientes relativamente grande y/o un tramo largo, principalmente por la necesidad de contar con un gran volumen de agua.

Teniendo en cuenta los criterios antes mencionados, se procede a ubicar puntos (o estaciones ficticias) en los tributarios de la red de drenaje como se muestra en la *figura 3.13*.

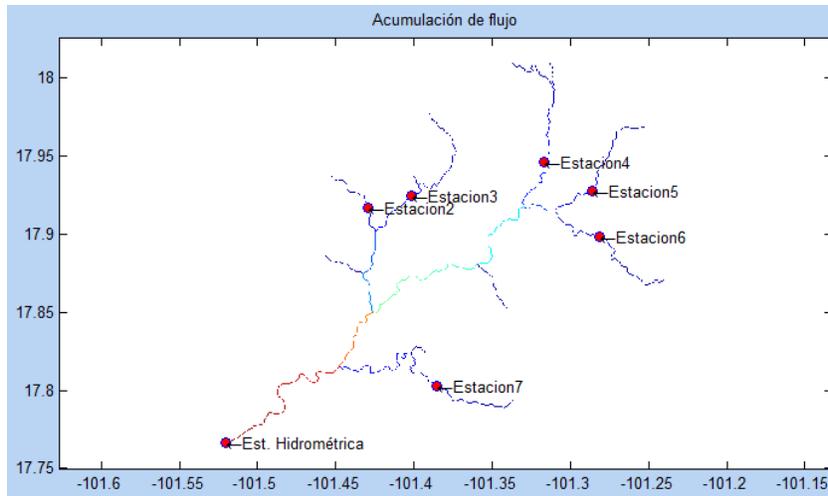


Figura 3.13 Puntos dentro de la cuenca para ubicar pendientes máximas

El programa tiene la posibilidad de trazar el cauce desde la estación hidrométrica a cualquier otra estación ficticia, permitiendo conocer su perfil (figura 3.14). Entre las variables estimadas, se encuentran las coordenadas de las estaciones, altura máxima y mínima del perfil, longitud del cauce, visualización del perfil (elevación vs distancia acumulada), entre otros. Debido a que el objetivo es encontrar aquel tramo dentro de un tributario con el mayor desnivel con respecto a la longitud del tramo, se selecciona el valor máximo de dZ/L .

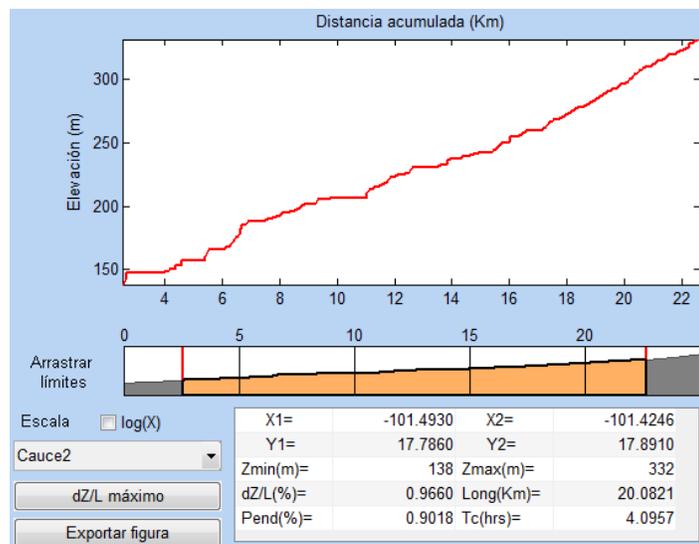


Figura 3.14 Perfil del cauce 2, que comprende desde la estación hidrométrica hasta la estación 2

La figura 3.15 muestra la ventana con información únicamente de la pendiente máxima del perfil ubicada entre la estación hidrométrica y la estación 2 (cauce 2). Estos datos son relevantes debido a que es la variable necesaria para determinar el potencial hidroeléctrico que existe en dicho punto.

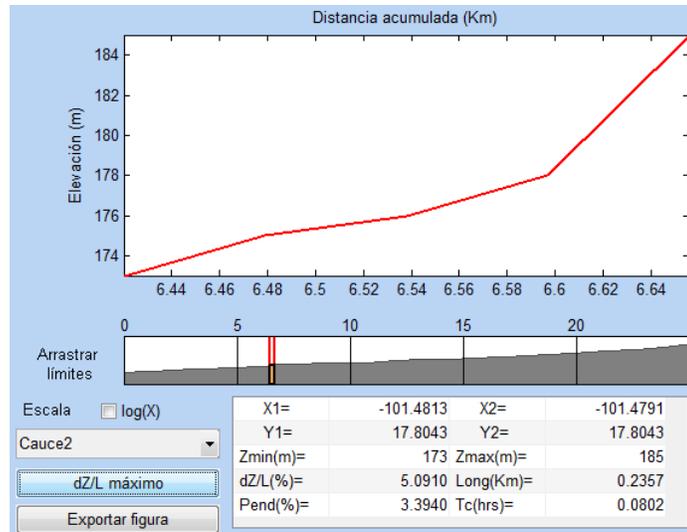


Figura 3.15 Ubicación de la pendiente máxima dentro del cauce 2

Como fue mencionado en el capítulo I, para determinar el potencial es necesario conocer la diferencia de alturas, peso específico del agua (el cual se asume como $1,000 \text{ kg/m}^3$) y el gasto promedio anual.

Para realizar una aproximación del caudal promedio anual en puntos no aforados, se realiza la interpolación lineal entre el flujo acumulado en la pendiente máxima del perfil del cauce, el flujo acumulado en la estación hidrométrica que despliega el programa al realizar el análisis y el dato del gasto observado en esa misma estación. En la figura 3.16 se presenta el valor del flujo en la pendiente máxima dos (P2), el dato buscado se señala en la parte inferior junto con las coordenadas del punto; mientras que el flujo total acumulado a la salida de la cuenca se despliega en la ventana mostrada en la figura 3.17.

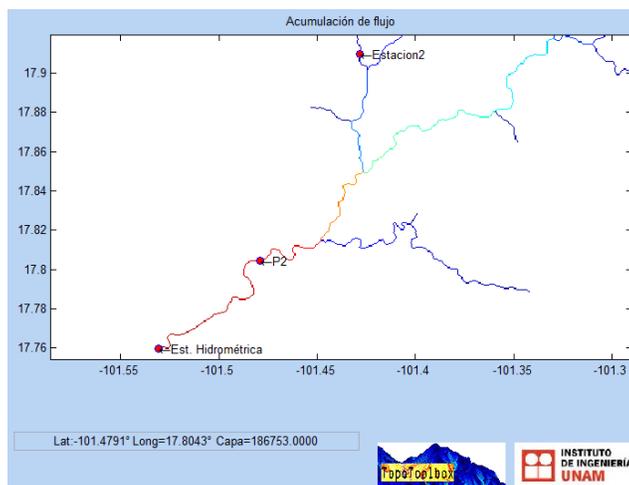


Figura 3.16 Flujo acumulado en la pendiente máxima (P2) del cauce 2

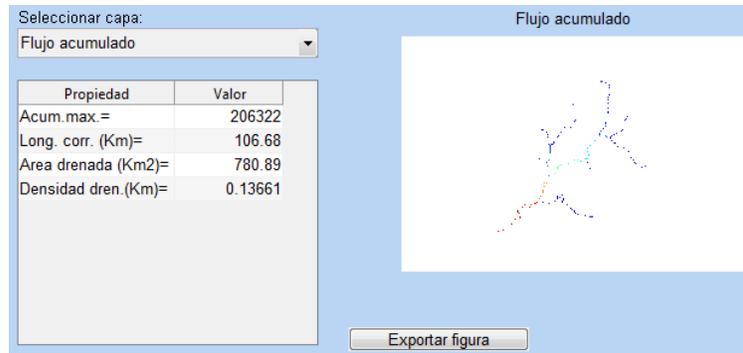


Figura 3.17 Flujo acumulado en la estación hidrométrica

Este procedimiento se repite en función del número de cauces analizados dentro de la cuenca, con el fin de localizar el tramo con el mayor potencial hidroeléctrico.

3.4 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO

El análisis de la cuenca se realiza de forma ascendente a partir de la estación hidrométrica y únicamente se muestran los tramos más importantes de la cuenca de acuerdo a los criterios expuestos con anterioridad.

Para fines de ejemplo se desarrolla el análisis completo de la cuenca hidrológica La Unión, mostrando en la *figura 3.18* los puntos ubicados arbitrariamente aguas arriba de la estación hidrométrica.

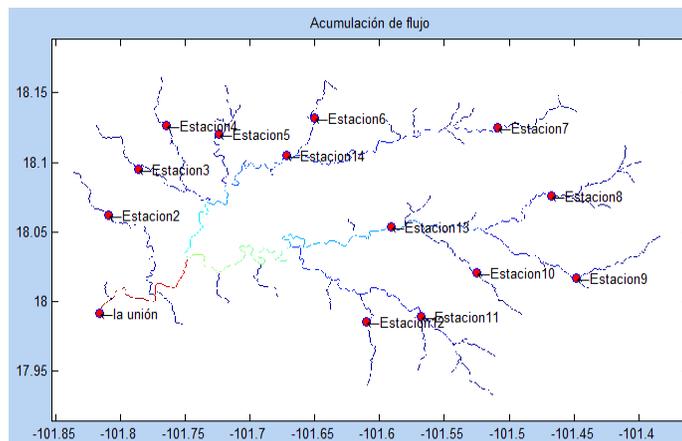


Figura 3.18 Puntos dentro de la cuenca hidrológica La Unión

A continuación se muestran las ventanas con los datos de las pendientes máximas localizadas dentro de la cuenca hidrológica La Unión:

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

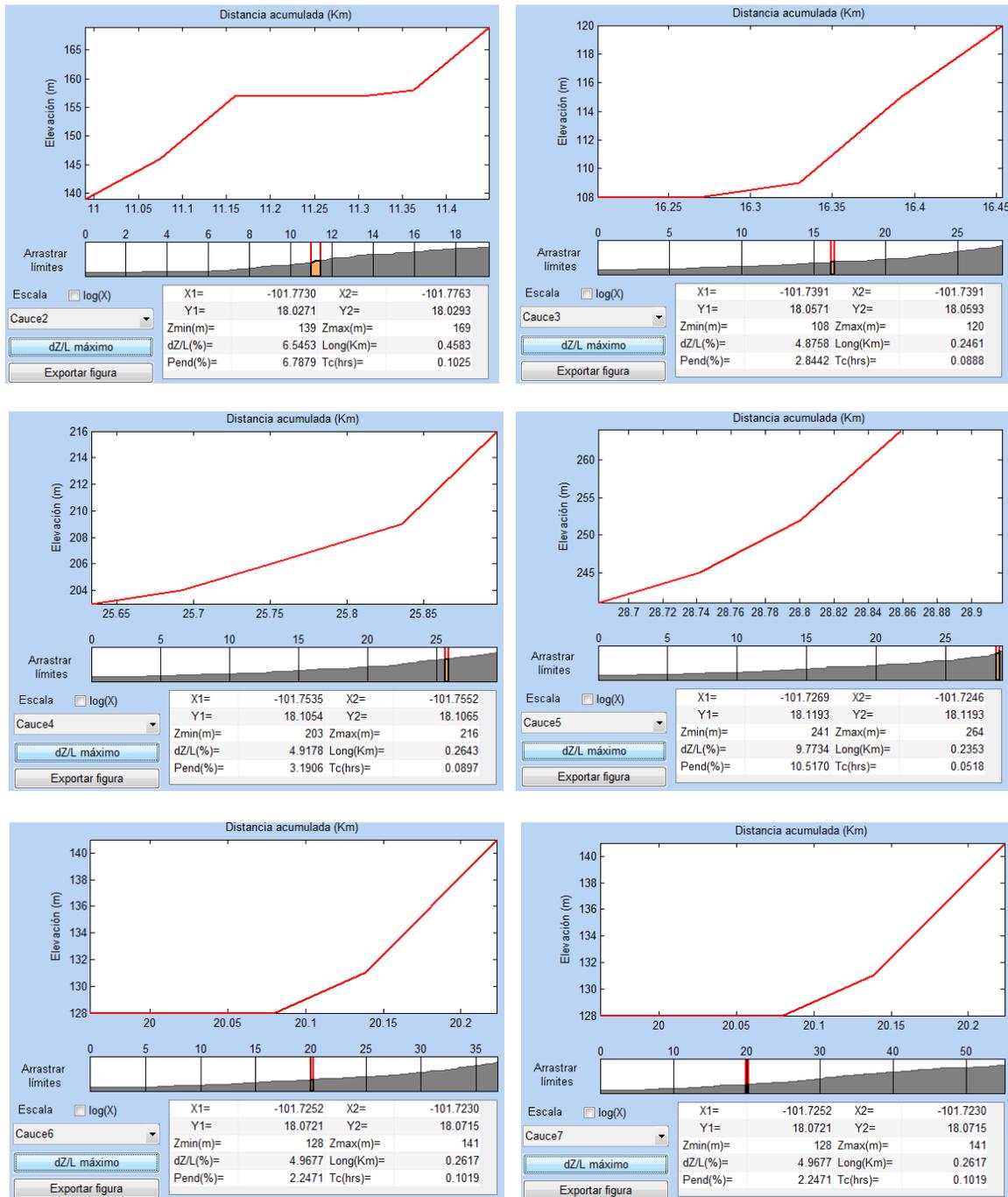


Figura 3.19 Ventanas con datos de las pendientes máximas del cauce 2 al cauce 7 de la cuenca La Unión

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

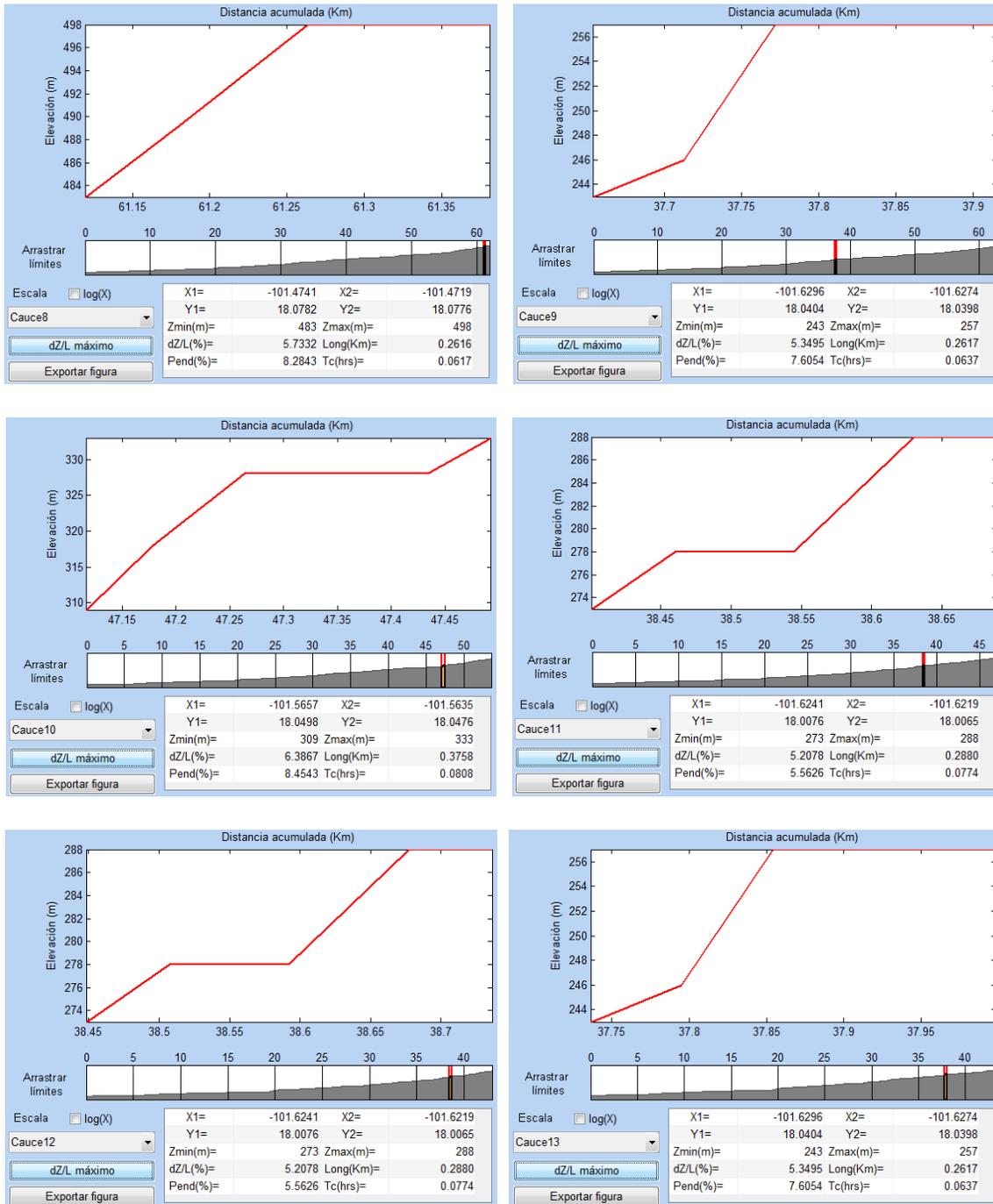


Figura 3.20 Ventanas con datos de las pendientes máximas del cauce 8 al cauce 13 de la cuenca La Unión

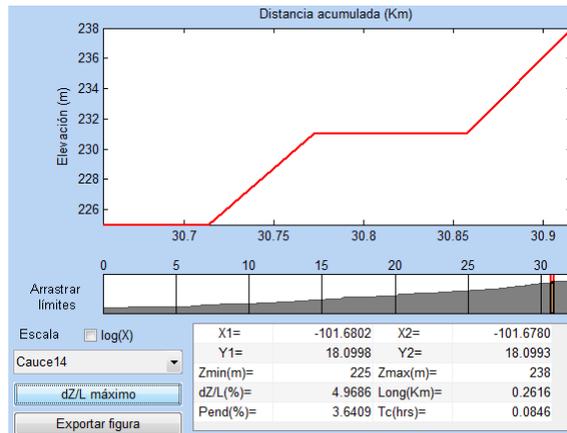


Figura 3.21 Ventana con datos de la pendientes máxima del cauce 14 de la cuenca La Unión

Es necesario hacer mención que se repiten pendientes máximas porque los recorridos que realiza el programa se hacen por las mismas corrientes tributarias o principales para llegar a la estación hidrométrica. La *tabla 3.9* muestra los datos obtenidos en cada pendiente máxima localizada dentro la cuenca La Unión que ayudarán a determinar el potencial y el mejor sitio para ubicar la posible central:

Tabla 3.9 Mayores pendientes dentro de la cuenca La Unión

Coordenadas del punto aguas arriba de la dz/L max							
CAUCE	dz/L max (%)	X ₂	Y ₂	Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)
Cauce 2	6.54	-101.7763	18.0293	0.45	139	169	30
Cauce 3	4.87	-101.7391	18.0593	0.24	108	120	12
Cauce 4	4.91	-101.7552	18.1065	0.26	203	216	13
Cauce 5	9.77	-101.7246	18.1193	0.23	241	264	23
Cauce 6	4.96	-101.7230	18.0715	0.26	128	141	13
Cauce 8	5.73	-101.4719	18.0776	0.26	483	498	15
Cauce 9	5.34	-101.6274	18.0398	0.26	243	257	14
Cauce 10	6.38	-101.5635	18.0476	0.37	309	333	24
Cauce 11	5.20	-101.6219	18.0065	0.28	273	288	15
Cauce 14	4.96	-101.6780	18.0993	0.2616	225	238	13

El siguiente paso para continuar con el análisis es determinar el flujo acumulado en la parte baja de cada pendiente máxima.

Para ello las siguientes ventanas muestran el valor del flujo acumulado (Capa) en cada pendiente máxima localizada con anterioridad:

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

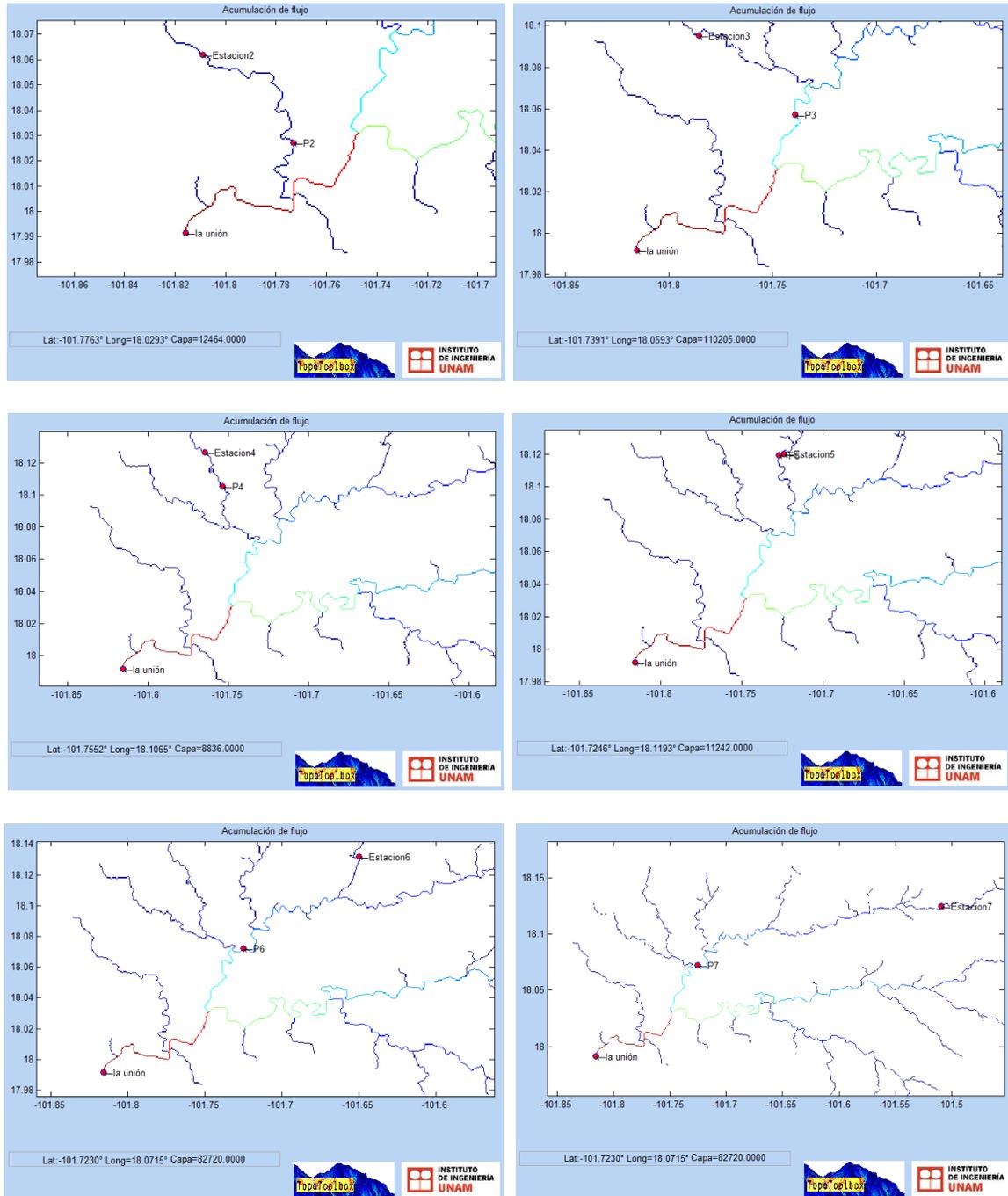


Figura 3.22 Mapas del flujo acumulado al final de la pendiente máxima 2 a la pendiente máxima 7

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

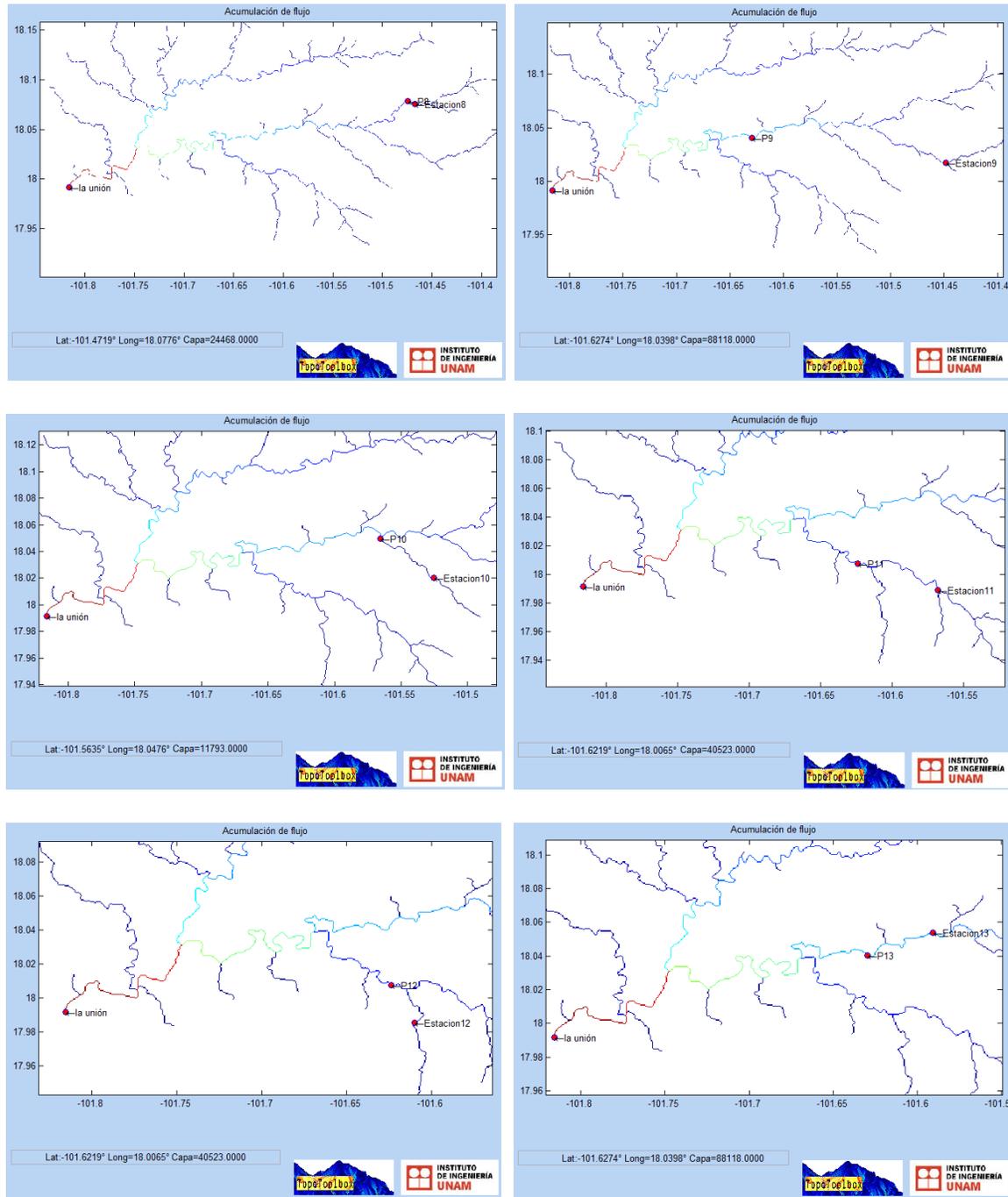


Figura 3.23 Mapas del flujo acumulado al final de la pendiente máxima 8 a la pendiente máxima 13

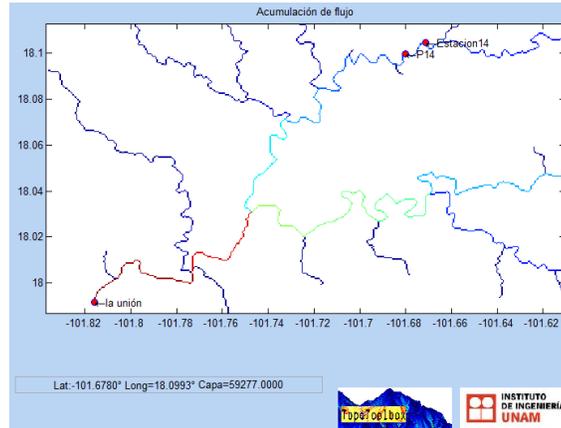


Figura 3.24 Mapa del flujo acumulado al final de la pendiente máxima 14

La tabla 3.10 muestra la diferencia de alturas y flujo acumulado en cada pendiente máxima localizada:

Tabla 3.10 Diferencia de alturas y flujos acumulados de cada cauce

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Flujo Acum.
Pend. 2	30	12,464
Pend. 3	12	110,205
Pend. 4	13	8,836
Pend. 5	23	11,242
Pend. 6	13	82,720
Pend. 8	15	24,468
Pend. 9	14	88,118
Pend. 10	24	11,793
Pend. 11	15	40,523
Pend. 14	13	59,277

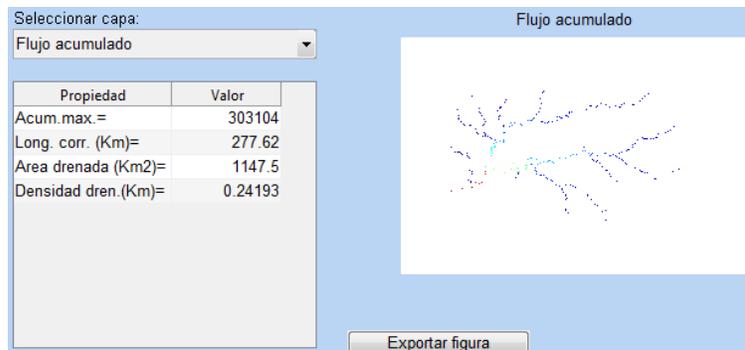


Figura 3.25 Flujo acumulado a la salida de la estación hidrométrica La Unión

Para conocer el escurrimiento en cada pendiente máxima, es necesario que el flujo acumulado obtenido del análisis en la estación hidrométrica de la cuenca (figura 3.25) sea igualado con el gasto promedio anual mostrado en la tabla 3.5, esto permitirá realizar la estimación del gasto medio anual en cada punto ubicado aguas arriba. Para entender de mejor manera, a continuación se muestra lo

hecho con la pendiente máxima 2, así como la *tabla 3.11* con los gastos en cada pendiente máxima de la cuenca:

$$7.74 \text{ (m}^3\text{/s)} \rightarrow 303,104$$

$$x \text{ (m}^3\text{/s)} \rightarrow 12,464$$

Donde x es el gasto desconocido, por lo que despejando el valor resulta de $0.31 \text{ (m}^3\text{/s)}$.

Tabla 3.11 Diferencia de alturas y gastos estimados por medio de interpolaciones

Pend. Máx.	dZ/L max (%)	ΔZ (m)	Gasto medio (m³/s)
Pend. 2	6.54	30	0.31
Pend. 3	4.87	12	2.81
Pend. 4	4.91	13	0.22
Pend. 5	9.77	23	0.28
Pend. 6	4.96	13	2.11
Pend. 8	5.73	15	0.62
Pend. 9	5.34	14	2.25
Pend. 10	6.38	24	0.30
Pend. 11	5.20	15	1.03
Pend. 14	4.96	13	1.51

Para conocer el potencial hidroeléctrico, sustituimos los valores en la *ecuación 1.1*

$$P = \gamma QH \tag{1.1}$$

Para ejemplificar como se obtiene el potencial, se realiza el primer cálculo con los valores de la pendiente máxima 2:

$$P = \gamma QH = 9,810 \text{ N/m}^3 * 0.31 \text{ m}^3\text{/s} * 30 \text{ m} = 93,776.07 \text{ W}$$

La *Tabla 3.12* muestra el valor del potencial en cada sitio.

Tabla 3.12 Potencial hidráulico en pendientes máximas

Pend. Máx.	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	93,776.07	0.09
Pend. 3	331,662.14	0.33
Pend. 4	28,807.95	0.02
Pend. 5	64,846.23	0.06
Pend. 6	269,691.48	0.26
Pend. 8	92,045.61	0.09
Pend. 9	309,389.82	0.30
Pend. 10	70,982.10	0.07
Pend. 11	152,442.54	0.15
Pend. 14	193,260.42	0.19

IV. RESULTADOS

4.1 ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO

Este capítulo muestra las evaluaciones de los caudales para los tramos con desniveles y pendientes máximas.

Como se pudo apreciar existen pendientes máximas que se repiten durante el análisis, esto es debido a que se realizan barridos similares por los cauces analizados en la cuenca, es decir, la exploración del perfil desde las estaciones ficticias (ubicadas aguas arriba) hasta la estación hidrométrica (ubicada aguas abajo) se realiza a veces por las mismas corrientes tributarias o corrientes principales de la red fluvial, localizando la misma pendiente máxima en ambos perfiles.

Por último se muestra la clasificación de la corriente en la cuenca con respecto a la información hidrométrica que nos brinda el BANDAS (continuidad y valores del gasto registrado) e información geográfica del INEGI. Este parámetro es muy importante a tomar porque determina la entrada constante de agua a la central durante todo el año. Las corrientes se clasifican por el tiempo en que transportan agua; y estas pueden ser perennes, intermitentes o efímeras. Una corriente perenne transporta agua durante todo el año y siempre están alimentadas, totalmente o en parte, por el agua subterránea, es decir, son efluentes. Una corriente intermitente transporta agua durante la época de lluvias de cada año, es decir, en época de secas el nivel freático desciende y la corriente no transporta agua. En el caso de las corrientes efímeras o influentes transportan agua inmediatamente después de una tormenta, y en este caso, solo alimentan a los almacenamientos de agua subterránea (Aparicio, 1992).

A continuación se muestra ventanas con mapas desplegados de las cuencas y estaciones hidrométricas analizadas, en donde el primero muestra la delimitación de la cuenca hidrológica en el programa, el segundo la red fluvial de la misma junto con las estaciones ficticias propuestas para el análisis del gasto y el tercero muestra la ubicación de las pendientes máximas encontradas por el programa. Así como tablas de cada cuenca donde se resaltan los datos más importantes arrojados por el software.

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca La Unión, el río La Unión presenta un comportamiento perenne.

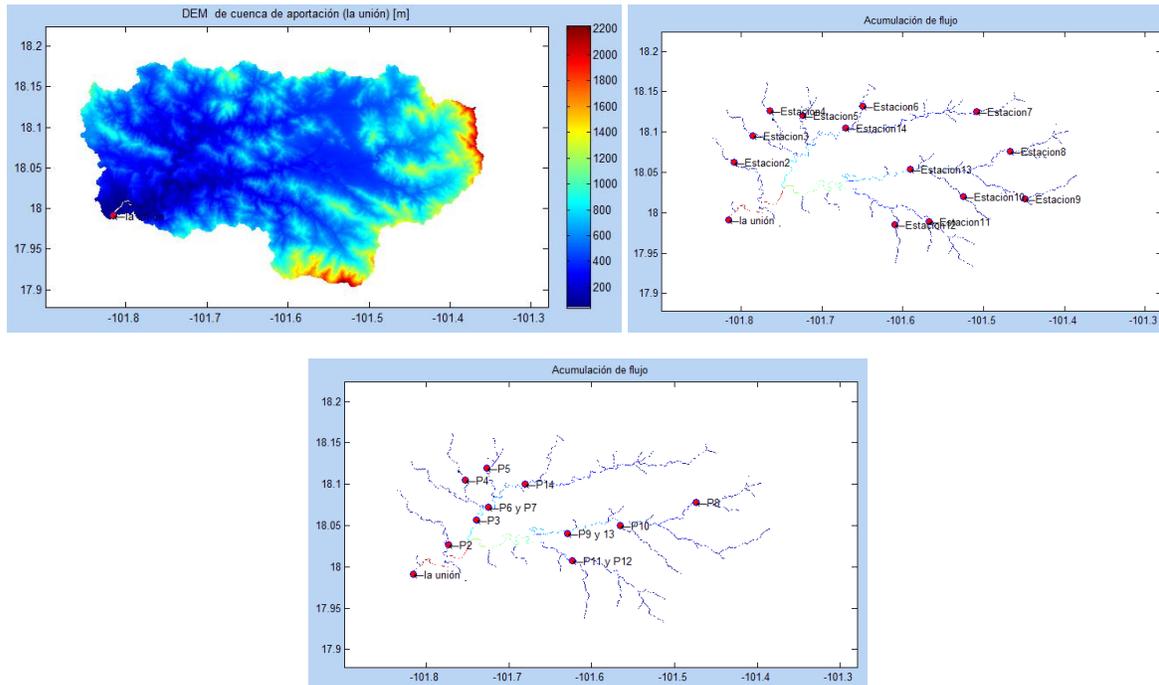


Figura 4.1 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca La Unión

Tabla 4.1 Características de los tramos identificados en la cuenca La Unión y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	303,104
Prom. gasto medio anual (m³/s)	7.74

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m ³ /s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	6.54	-101.7730	18.0271	0.45	139	169	30	12,464	0.31
Pend. 3	4.87	-101.7391	18.0571	0.24	108	120	12	110,205	2.81
Pend. 4	4.91	-101.7535	18.1054	0.26	203	216	13	8,836	0.22
Pend. 5	9.77	-101.7269	18.1193	0.23	241	264	23	11,242	0.28
Pend. 6	4.96	-101.7252	18.0721	0.26	128	141	13	82,720	2.11
Pend. 8	5.73	-101.4741	18.0782	0.26	483	498	15	24,468	0.62
Pend. 9	5.34	-101.6296	18.0404	0.26	243	257	14	88,118	2.25
Pend. 10	6.38	-101.5657	18.0498	0.37	309	333	24	11,793	0.30
Pend. 11	5.20	-101.6241	18.0076	0.28	273	288	15	40,523	1.03
Pend. 14	4.96	-101.6802	18.0998	0.26	225	238	13	59,277	1.51

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca La Salitrera, el río Ixtapa presenta un comportamiento perenne.

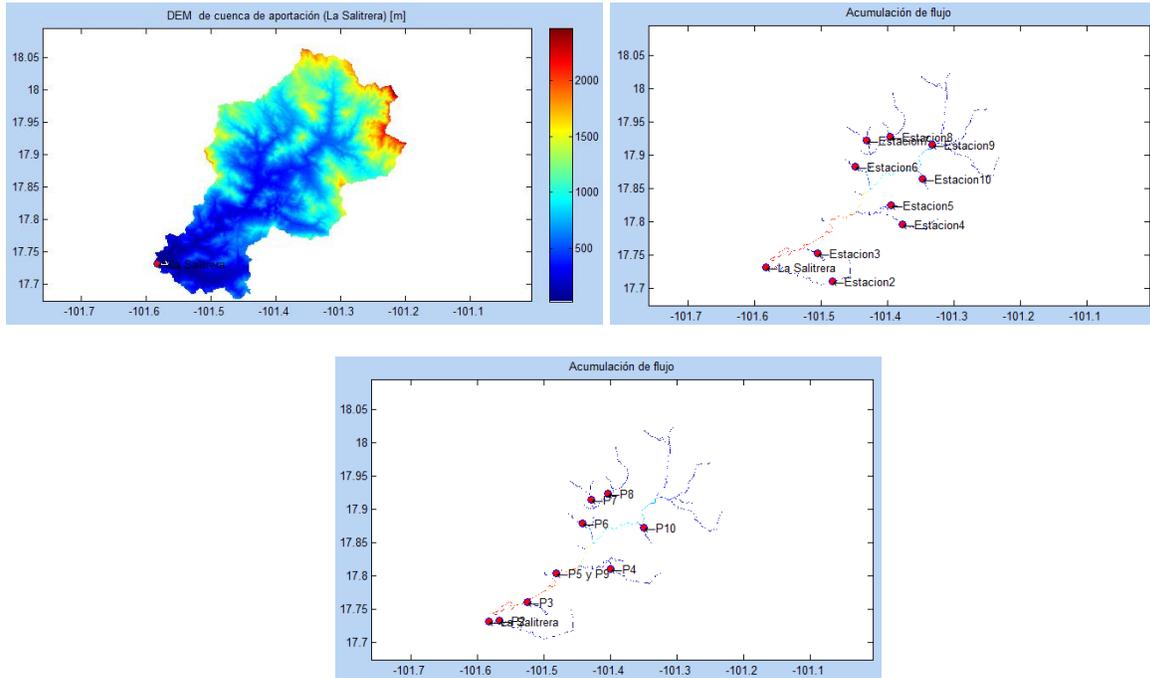


Figura 4.2 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca La Salitrera

Tabla 4.2 Características de los tramos identificados en la cuenca La Salitrera y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	235,671
Prom. gasto medio anual (m³/s)	7.56

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m ³ /s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	3.52	-101.5669	17.7337	0.99	23	35	12	23,165	0.74
Pend. 3	3.81	-101.5246	17.7615	2.69	92	103	11	205,809	6.61
Pend. 4	5.34	-101.4007	17.811	6.49	333	347	14	12,678	0.40
Pend. 5	5.09	-101.4813	17.8043	3.63	173	185	12	186,950	6.00
Pend. 6	5.55	-101.4419	17.8798	6.46	343	359	16	7,606	0.24
Pend. 7	5.19	-101.4296	17.9154	8.11	407	421	14	11,388	0.36
Pend. 8	5.72	-101.4035	17.9237	7.92	439	454	15	21,605	0.69
Pend. 10	7.84	-101.3507	17.8732	5.56	413	436	23	7,847	0.25

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca San Jeronimito, el río San Jeronimito presenta un comportamiento perenne.

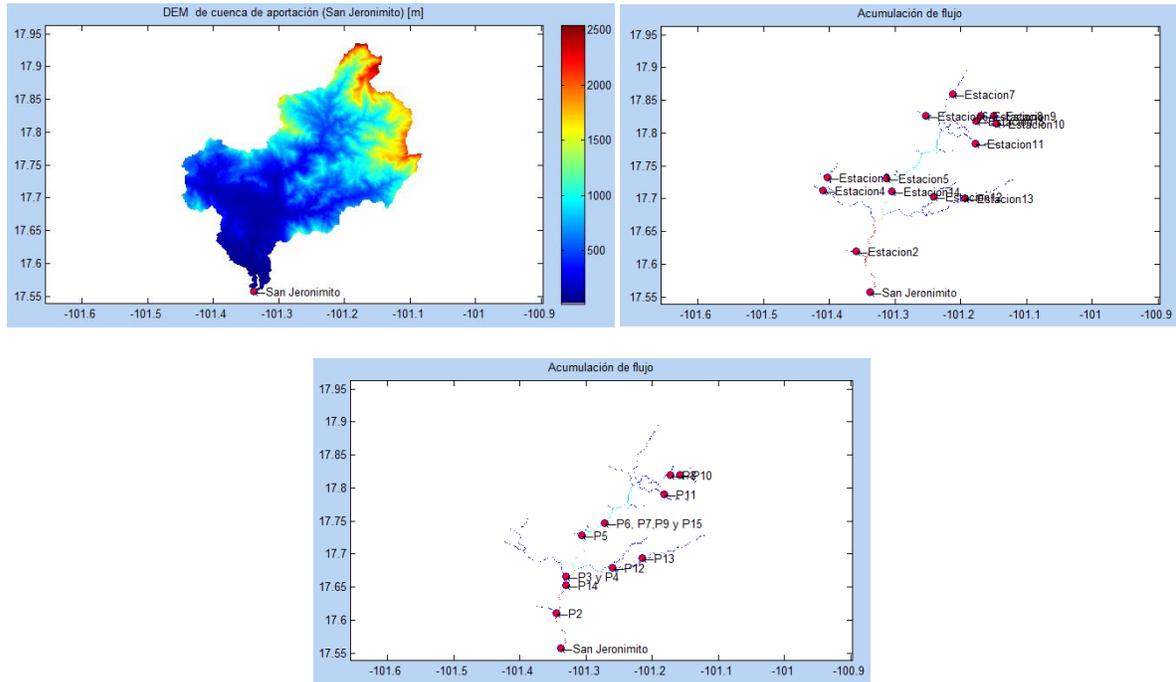


Figura 4.3 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca San Jeronimito

Tabla 4.3 Características de los tramos identificados en la cuenca San Jeronimito y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	204,132
Prom. gasto medio anual (m³/s)	12.07

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m ³ /s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	1.73	-101.3441	17.6110	0.28	38	43	5	5,460	0.32
Pend. 3	2.59	-101.3307	17.6660	0.26	79	86	7	181,162	10.71
Pend. 5	2.86	-101.3069	17.7287	0.31	161	170	9	7,094	0.41
Pend. 6	8.77	-101.2719	17.7471	0.26	228	251	23	79,944	4.72
Pend. 8	13.47	-101.1719	17.8198	0.26	754	790	36	16,516	0.97
Pend. 10	12.19	-101.1585	17.8204	0.24	802	832	30	12,159	0.71
Pend. 11	8.89	-101.1813	17.7910	0.26	732	756	24	6,181	0.36
Pend. 12	5.69	-101.2596	17.6793	0.24	168	182	14	38,026	2.24
Pend. 13	6.57	-101.2152	17.6937	0.24	276	292	16	19,490	1.15
Pend. 14	2.59	-101.3296	17.6526	0.26	66	73	7	186,075	11.00

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca Petatlán, el río Petatlán presenta un comportamiento perenne.

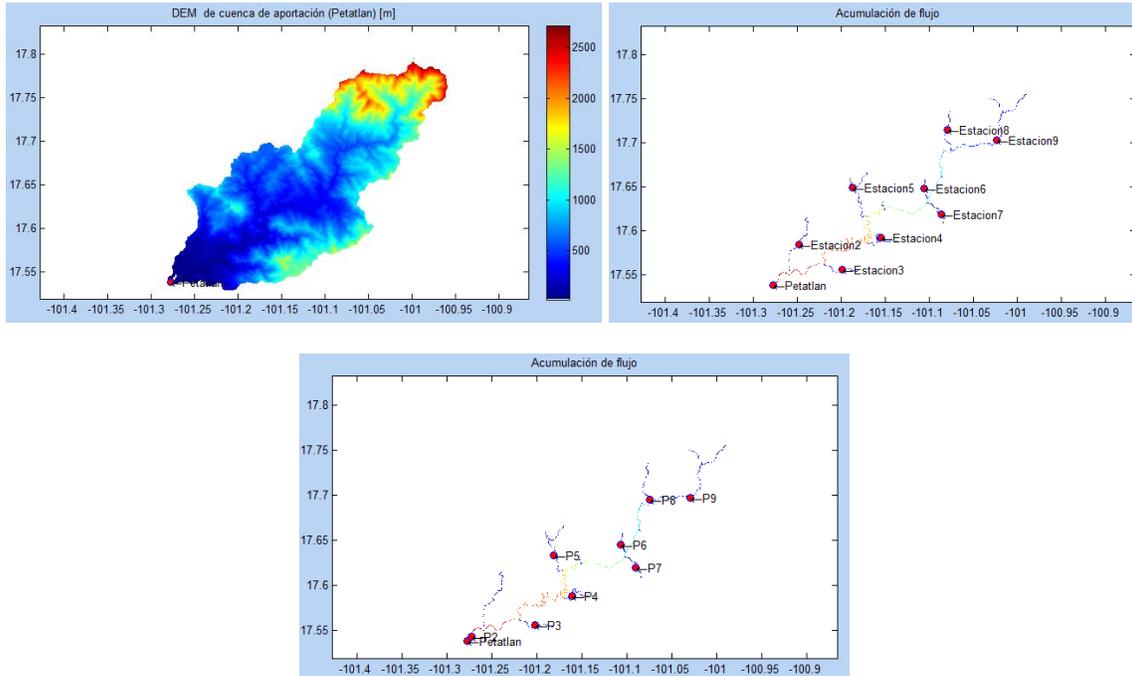


Figura 4.4 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Petatlán

Tabla 4.4 Características de los tramos identificados en la cuenca Petatlán y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	125,960
Prom. gasto medio anual (m³/s)	12.28

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m ³ /s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	1.05	-101.2724	17.5426	6.32	24	91	67	124,962	12.18
Pend. 3	12.96	-101.2019	17.5554	0.26	139	173	34	4,724	0.46
Pend. 4	11.06	-101.1602	17.5882	0.26	266	295	29	7,015	0.68
Pend. 5	5.36	-101.1807	17.6337	0.31	259	276	17	11,599	1.13
Pend. 6	4.47	-101.1063	17.6448	0.24	322	333	11	3,652	0.35
Pend. 7	4.36	-101.0896	17.6198	0.32	354	368	14	5,526	0.53
Pend. 8	10.32	-101.0746	17.6948	0.41	495	538	43	6,238	0.60
Pend. 9	11.06	-101.0291	17.6971	0.26	637	666	29	18,690	1.82

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca Coyoquilla II, el río Coyoquilla presenta un comportamiento perenne.

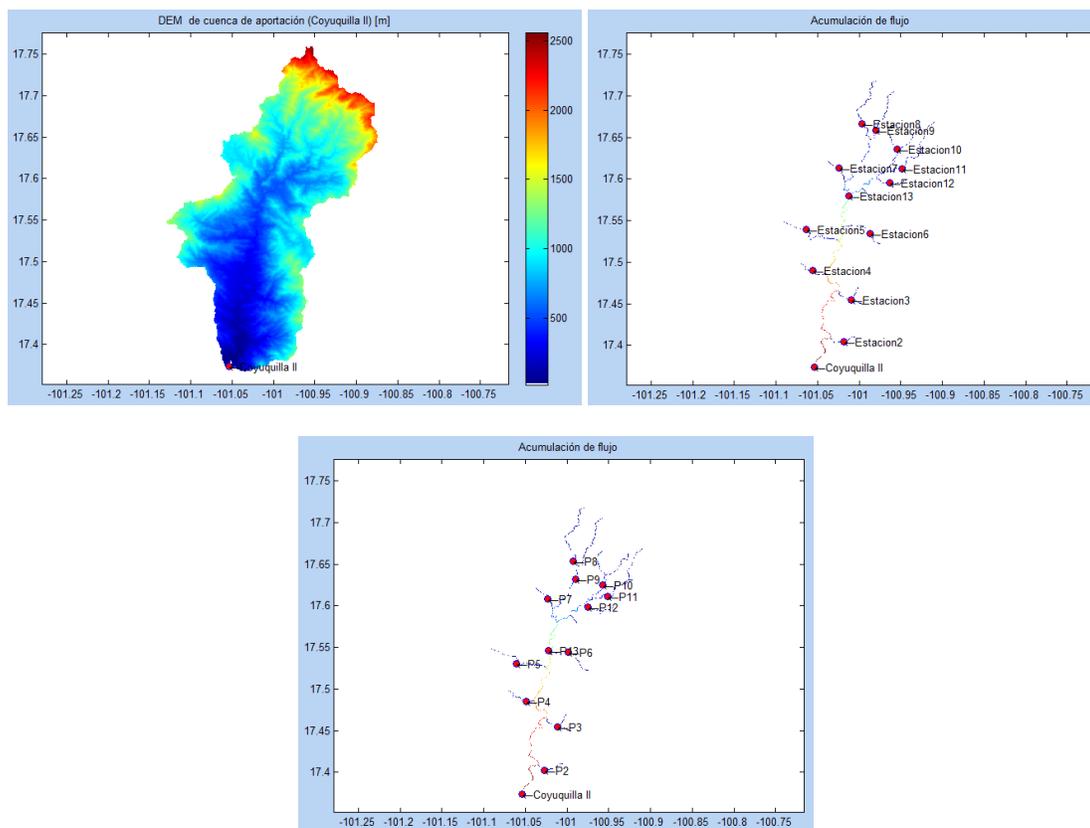


Figura 4.5 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Coyoquilla II

Tabla 4.5 Características de los tramos identificados en la cuenca Coyoquilla II y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	151,747
Prom. gasto medio anual (m³/s)	12.88

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m3/s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	10.80	-101.0269	17.4026	0.31	121	155	34	7,256	0.61
Pend. 3	5.33	-101.0119	17.4548	0.26	279	293	14	8,211	0.69
Pend. 4	6.86	-101.0491	17.4854	0.26	259	277	18	6,024	0.51
Pend. 5	11.24	-101.0607	17.5304	0.29	439	472	33	6,631	0.56
Pend. 6	36.23	-100.9985	17.5443	0.31	599	713	114	5,249	0.44
Pend. 7	54.50	-101.0230	17.6087	0.26	675	822	147	6,292	0.53
Pend. 8	10.25	-100.9924	17.6537	0.39	795	836	41	9,198	0.78
Pend. 9	9.05	-100.9896	17.6315	0.33	689	719	30	19,631	1.66
Pend. 10	17.04	-100.9569	17.6248	0.29	713	763	50	11,462	0.97
Pend. 11	11.44	-100.9513	17.6115	0.26	653	683	30	12,036	1.02
Pend. 12	5.50	-100.9752	17.5987	0.39	567	589	22	7,853	0.66
Pend. 13	5.11	-101.0219	17.5460	0.29	401	416	15	80,853	6.86

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca San Luis, el río San Luis presenta un comportamiento perenne.

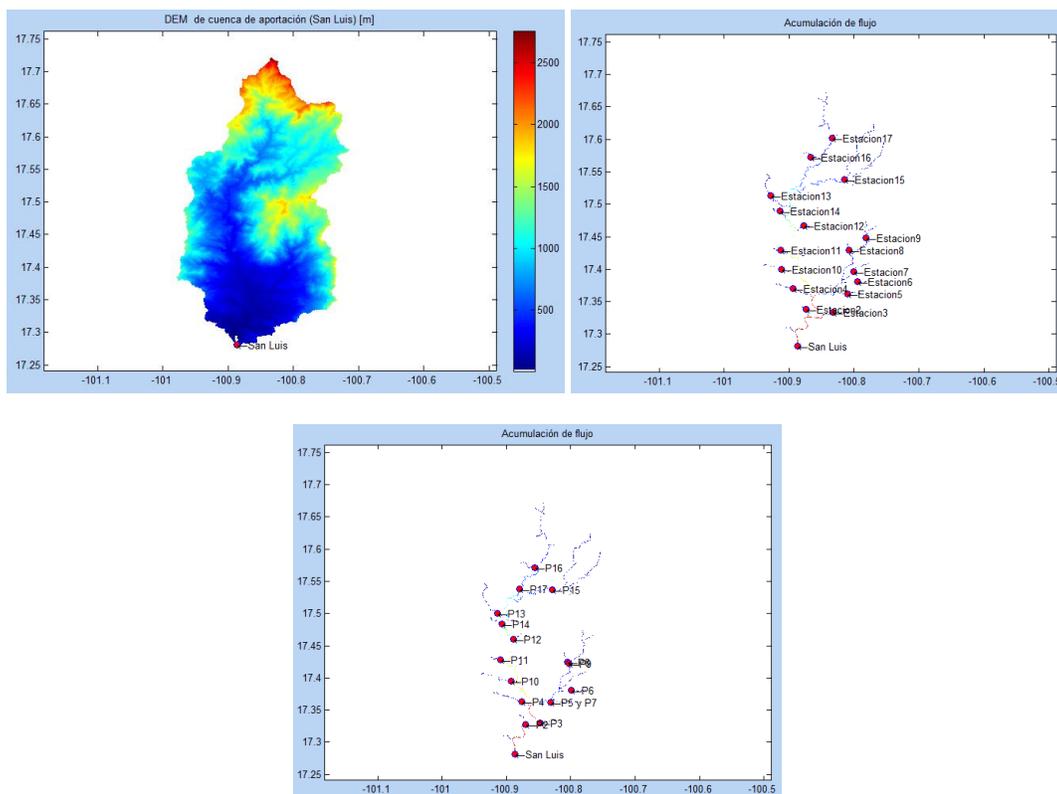


Figura 4.6 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca San Luis

Tabla 4.6 Características de los tramos identificados en la cuenca San Luis y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	237,528
Prom. gasto medio anual (m³/s)	22.06

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m ³ /s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	4.44	-100.8707	17.3271	0.2697	68	80	12	3,932	0.36
Pend. 3	3.38	-100.8474	17.3298	0.2362	87	95	8	21,9249	20.36
Pend. 4	2.77	-100.8763	17.3626	0.2886	143	151	8	6,384	0.59
Pend. 5	5.28	-100.8313	17.3621	0.2460	165	178	13	42,353	3.93
Pend. 6	5.92	-100.7996	17.3804	0.2362	310	324	14	4,674	0.43
Pend. 8	13.41	-100.8057	17.4248	0.2460	470	503	33	4,566	0.42
Pend. 9	16.31	-100.8024	17.4226	0.2697	423	467	44	12,717	1.18
Pend. 10	3.81	-100.8930	17.3954	0.2886	198	209	11	7,078	0.65
Pend. 11	13.16	-100.9091	17.4276	0.2885	325	363	38	3,888	0.36
Pend. 12	11.43	-100.8896	17.4604	0.2361	310	337	27	124,234	11.54
Pend. 13	7.56	-100.9146	17.5004	0.2909	423	445	22	10,823	1.00
Pend. 14	8.76	-100.9074	17.4837	0.2623	367	390	23	4,843	0.44
Pend. 15	6.22	-100.8291	17.5365	0.3212	685	705	20	35,157	3.26
Pend. 16	35.09	-100.8557	17.5715	0.2621	703	795	92	5,993	0.55
Pend. 17	7.62	-100.8802	17.5387	0.2622	482	502	20	42,961	3.99

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca Técpán, el río Técpán presenta un comportamiento perenne.

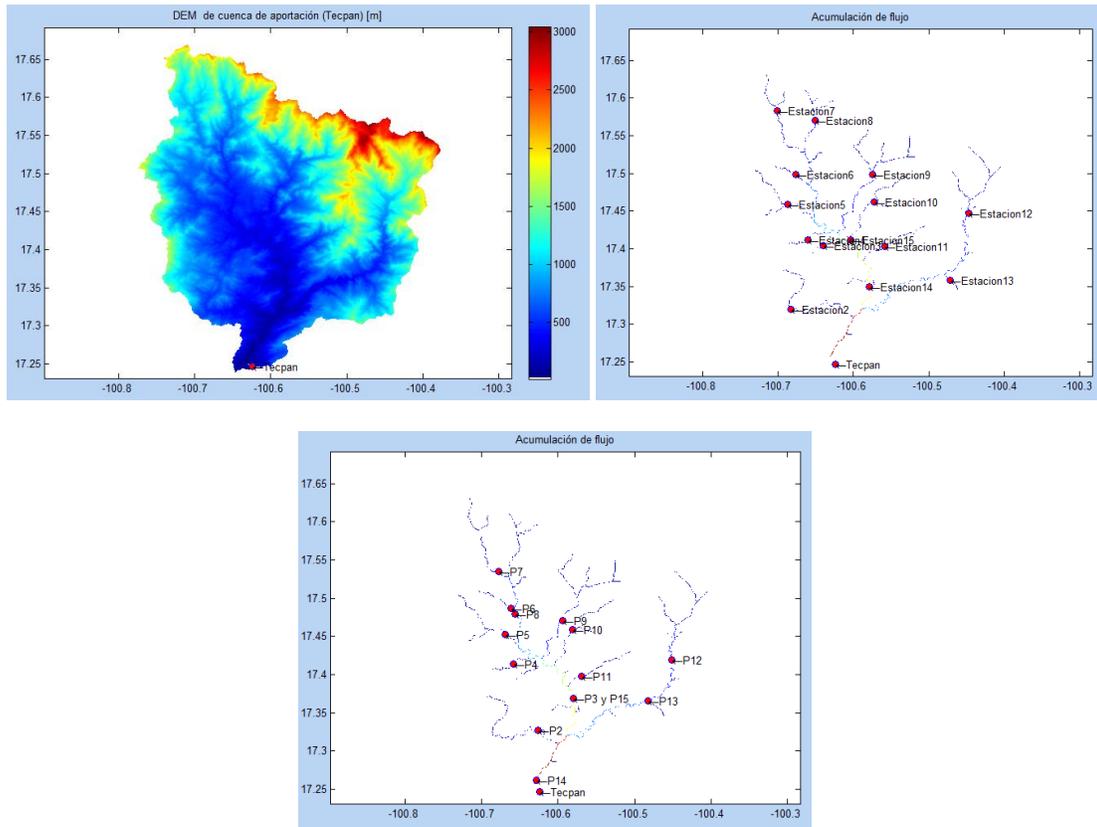


Figura 4.7 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Técpán

Tabla 4.7 Características de los tramos identificados en la cuenca Técpán y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	331,619
Prom. gasto medio anual (m³/s)	33.18

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m³/s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	20.76	-100.6263	17.3271	0.26	218	274	56	21,811	2.18
Pend. 3	5.56	-100.5802	17.3687	0.26	164	179	15	195,404	19.55
Pend. 4	5.99	-100.6585	17.4143	0.31	360	379	19	6,424	0.64
Pend. 5	6.60	-100.6685	17.4526	0.37	408	433	25	19,397	1.94
Pend. 6	12.37	-100.6618	17.4865	0.29	439	475	36	8,972	0.89
Pend. 7	12.71	-100.6780	17.5354	0.23	634	664	30	21,398	2.14
Pend. 8	7.78	-100.6557	17.4793	0.26	406	427	21	63,216	6.32
Pend. 9	10.38	-100.5935	17.4704	0.26	418	446	28	36,103	3.61
Pend. 10	6.93	-100.5813	17.4587	0.28	479	499	20	14,796	1.48
Pend. 11	8.18	-100.5696	17.3976	0.35	304	333	29	10,674	1.06
Pend. 12	12.97	-100.4518	17.4193	0.26	603	638	35	39,781	3.98
Pend. 13	6.35	-100.4824	17.3660	0.23	384	399	15	64,732	6.47
Pend. 14	0.88	-100.6280	17.2615	11.55	35	137	102	327,282	32.74

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca San Jerónimo, el río Atoyac presenta un comportamiento perenne.

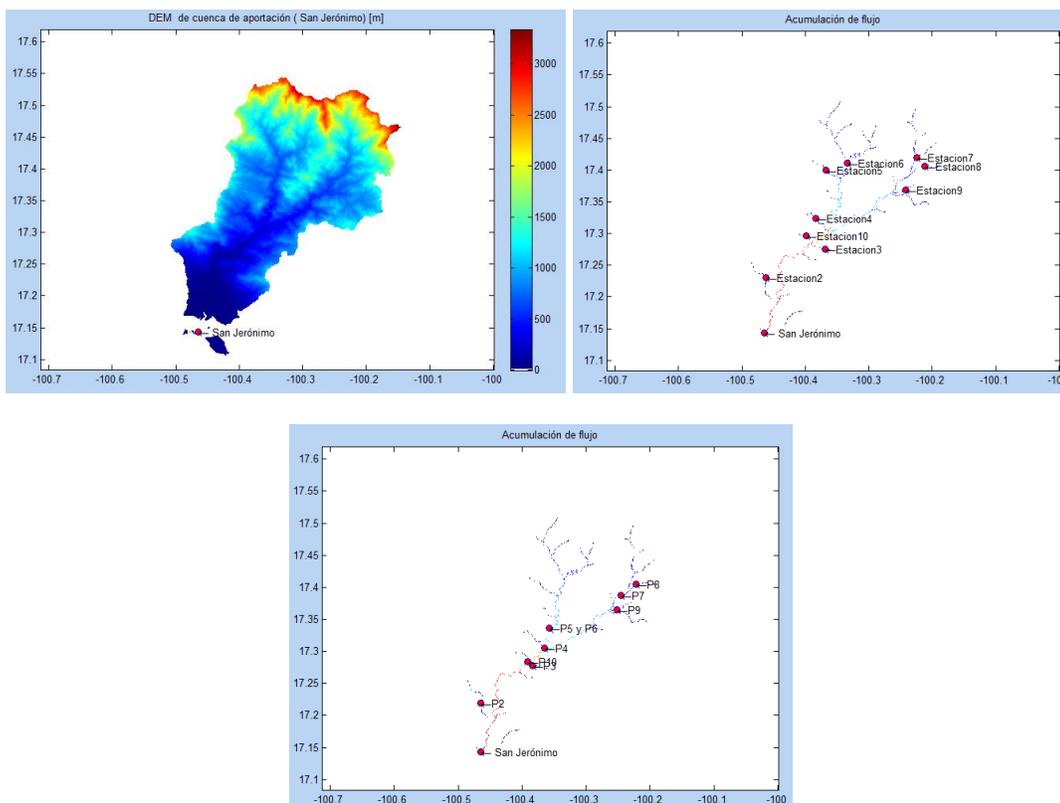


Figura 4.8 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca San Jerónimo

Tabla 4.8 Características de los tramos identificados en la cuenca San Jerónimo y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	227,780
Prom. gasto medio anual (m³/s)	29.01

CAUCE	dz/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dz/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ(m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m ³ /s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	1.85	-100.4641	17.2187	0.26	42	47	5	6,886	0.87
Pend. 3	25.81	-100.3835	17.2782	0.23	184	245	61	5,905	0.75
Pend. 4	19.40	-100.3652	17.3054	0.28	265	321	56	10,569	1.34
Pend. 5	10.88	-100.3574	17.3365	0.32	363	398	35	72,152	9.19
Pend. 7	6.48	-100.2452	17.3871	0.26	640	657	17	36,231	4.61
Pend. 8	24.61	-100.2213	17.4043	0.28	821	892	71	6,334	0.80
Pend. 9	8.89	-100.2513	17.3648	0.31	597	625	28	4,297	0.54
Pend. 10	14.95	-100.3913	17.2843	0.34	149	200	51	6,854	0.87

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca San Cristóbal, el río San Miguel presenta un comportamiento perenne.

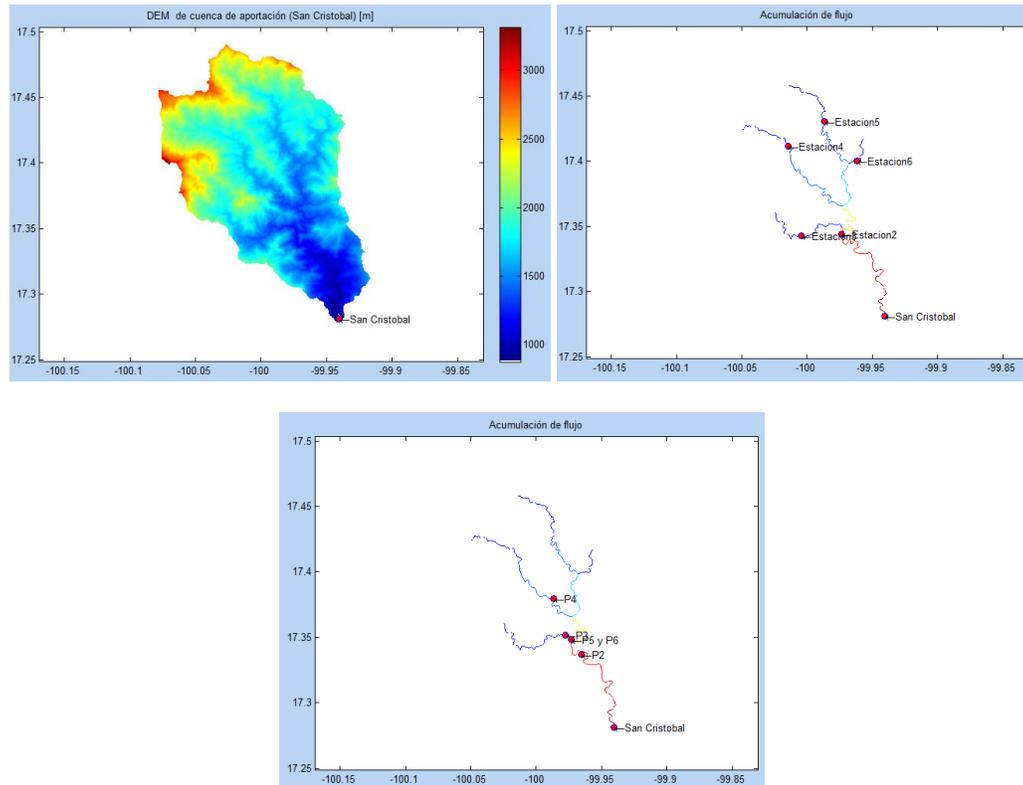


Figura 4.9 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca San Cristóbal

Tabla 4.9 Características de los tramos identificados en la cuenca San Cristóbal y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	62,193
Prom. gasto medio anual (m³/s)	7.95

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m ³ /s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	6.73	-99.9652	17.3371	1.41	1106	1124	95	52,504	6.71
Pend. 3	9.70	-99.9780	17.3515	0.28	1201	1229	28	10,394	1.33
Pend. 4	11.75	-99.9863	17.3793	0.31	1439	1476	37	14,123	1.80
Pend. 5	9.44	-99.9730	17.3482	0.26	1165	1190	25	51,007	6.52

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca Coyuca de Benítez, el río Coyuca presenta un comportamiento perenne.

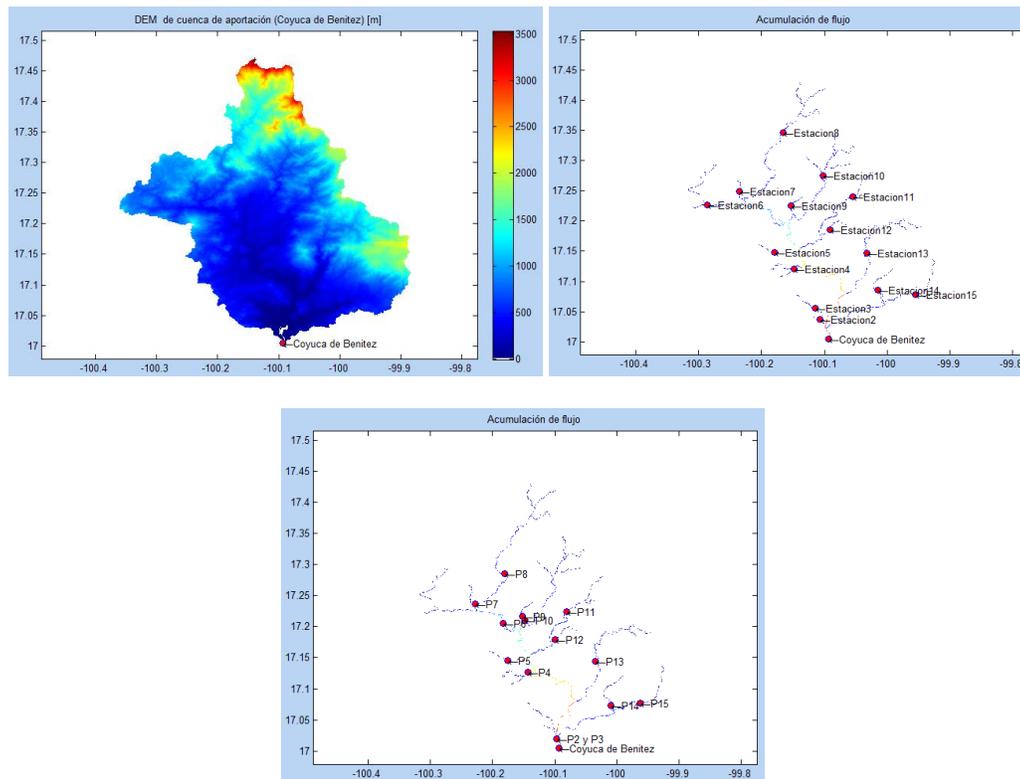


Figura 4.10 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Coyuca de Benítez

Tabla 4.10 Características de los tramos identificados en la cuenca Coyuca de Benítez y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	352,550
Prom. gasto medio anual (m³/s)	30.64

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m³/s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	2.84	-100.0974	17.0198	0.24	-2	5	7	352,066	30.60
Pend. 4	8.18	-100.1430	17.1271	0.37	127	158	31	14,129	1.22
Pend. 5	6.92	-100.1757	17.1460	0.28	217	237	20	5,589	0.48
Pend. 6	7.04	-100.1830	17.2054	0.26	285	304	19	91,942	7.99
Pend. 7	18.36	-100.2274	17.2371	0.28	396	449	53	6,880	0.59
Pend. 8	10.28	-100.1802	17.2854	0.26	692	719	27	41,657	3.62
Pend. 9	9.20	-100.1518	17.2165	0.29	261	288	27	10,271	0.89
Pend. 10	5.79	-100.1480	17.2104	0.29	243	260	17	43,123	3.74
Pend. 11	10.28	-100.0802	17.2237	0.26	383	410	27	19,302	1.67
Pend. 12	5.35	-100.0996	17.1793	0.31	240	257	17	5,890	0.51
Pend. 13	33.21	-100.0346	17.1448	0.26	303	391	88	27,836	2.41
Pend. 14	14.99	-100.0102	17.0732	0.29	158	202	44	12,480	1.08
Pend. 15	13.85	-99.9624	17.0776	0.28	310	350	40	19,265	1.67

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca Km 21+ 000, el río La Sabana presenta un comportamiento perenne.

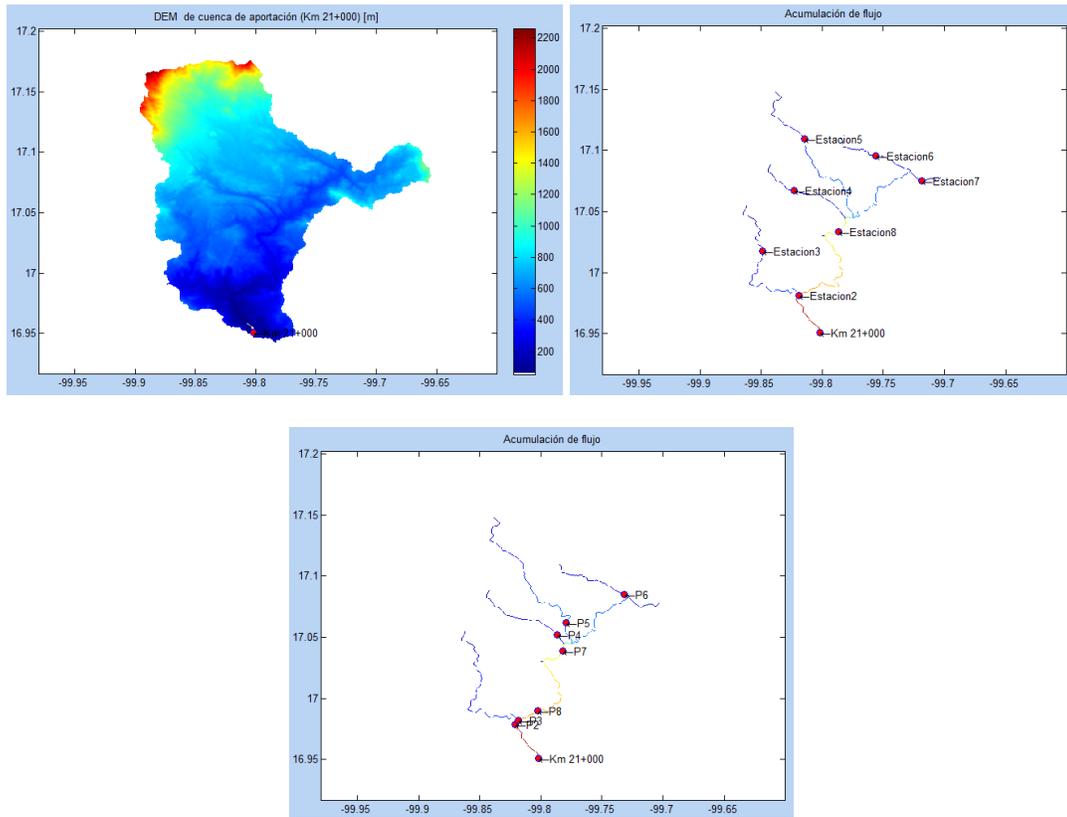


Figura 4.11 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Km 21+000

Tabla 4.11 Características de los tramos identificados en la cuenca Km. 21 + 000 y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	86,483
Prom. gasto medio anual (m³/s)	3.84

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m³/s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	2.72	-99.8207	16.9787	0.29	79	87	8	80,920	3.59
Pend. 3	9.13	-99.8185	16.9821	0.31	90	119	29	80,843	3.58
Pend. 4	7.91	-99.7868	17.0521	0.34	419	446	27	8,121	0.36
Pend. 5	18.17	-99.7791	17.0621	0.26	517	566	49	19,426	0.86
Pend. 6	7.96	-99.7318	17.0854	0.28	481	504	23	8,108	0.36
Pend. 7	7.49	-99.7818	17.0387	0.29	339	361	22	50,380	2.23
Pend. 8	5.04	-99.8024	16.9898	0.31	145	161	16	61,465	2.72

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca Marquelia, el río Marquelia presenta un comportamiento perenne.

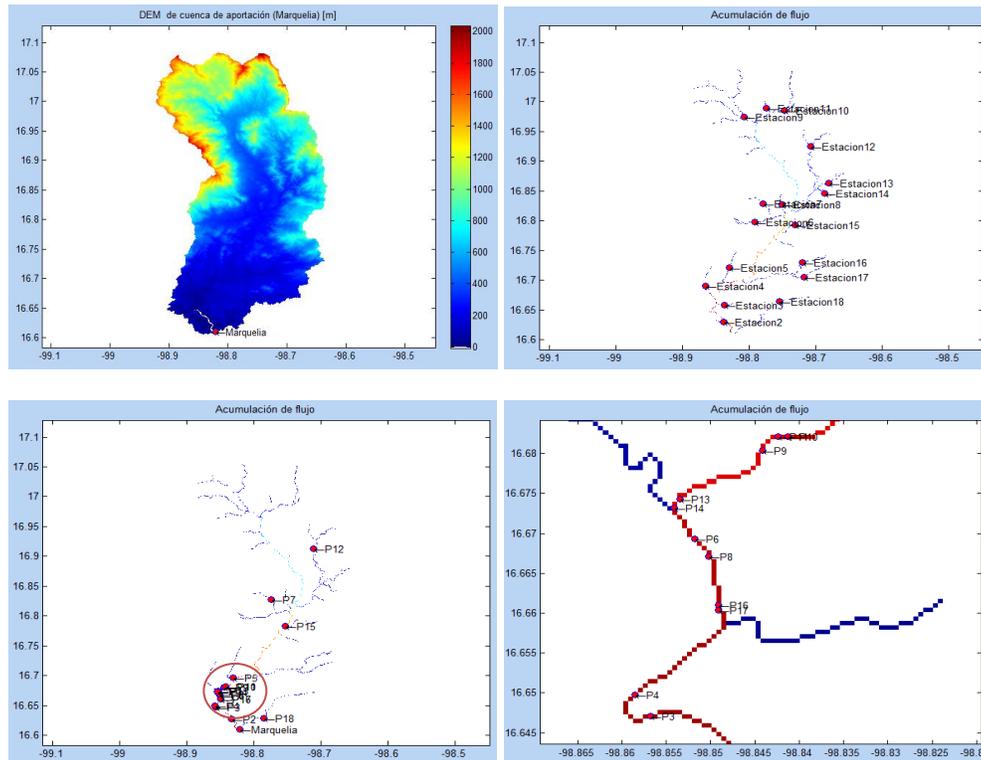


Figura 4.12 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Marquelia

Tabla 4.12 Características de los tramos identificados en la cuenca Marquelia y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	280,351
Prom. gasto medio anual (m³/s)	26.26

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m³/s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	1.98	-98.8330	16.6276	0.60	-8	4	12	3,948	0.36
Pend. 3	5.33	-98.8568	16.6471	0.37	-8	12	20	272,300	25.51
Pend. 4	0.96	-98.8585	16.6498	6.32	14	75	61	271,917	25.47
Pend. 5	5.48	-98.8313	16.6965	0.23	77	90	13	7,767	0.72
Pend. 6	0.83	-98.8518	16.6693	27.43	23	251	228	265,605	24.88
Pend. 7	7.22	-98.7741	16.8271	0.26	343	362	19	7,210	0.67
Pend. 8	0.87	-98.8502	16.6671	25.02	22	240	218	266,644	24.98
Pend. 9	0.91	-98.8441	16.6804	44.48	39	445	406	254,445	23.83
Pend. 10	0.92	-98.8413	16.6821	47.56	45	484	439	254,220	23.81
Pend. 11	0.91	-98.8424	16.6821	46.11	43	466	423	254,229	23.81
Pend. 12	6.57	-98.7107	16.9132	0.28	401	420	19	18,600	1.74
Pend. 13	0.76	-98.8535	16.6743	32.92	29	280	251	255,003	23.89
Pend. 14	0.78	-98.8541	16.6732	31.57	29	276	247	255,014	23.89
Pend. 15	7.29	-98.7524	16.7826	0.31	200	223	23	6,227	0.58
Pend. 16	0.62	-98.8491	16.6610	18.85	17	135	118	266,861	25.00
Pend. 17	0.62	-98.8491	16.6604	17.85	17	128	111	266,866	25.00
Pend. 18	5.06	-98.7852	16.6287	0.29	41	56	15	11,777	1.10

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Dentro de la cuenca Quetzala, el río Ometepec presenta un comportamiento perenne.

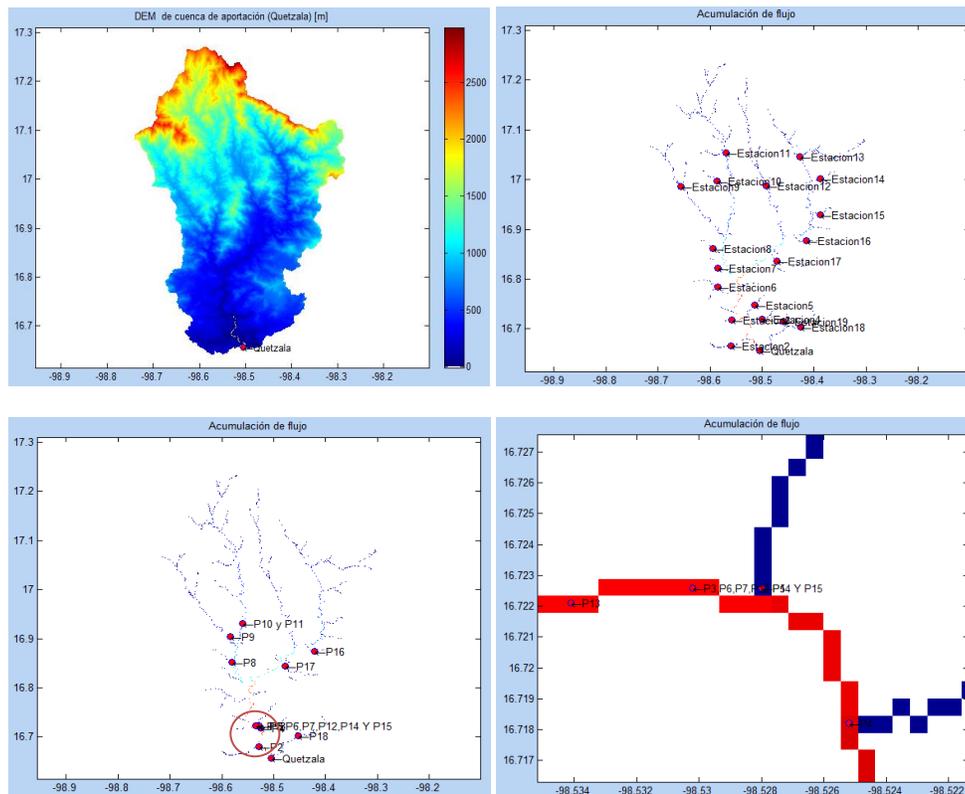


Figura 4.13 Mapas de la cuenca, ubicación de las estaciones ficticias y pendientes dentro de la cuenca Quetzala

Tabla 4.13 Características de los tramos identificados en la cuenca Quetzala y su gasto medio anual estimado

Flujo Acum. Total	543,640
Prom. gasto medio anual (m³/s)	97.72

CAUCE	dZ/L max (%)	Coordenadas de la parte alta dZ/L max		Longitud (km)	Z mín	Z máx	ΔZ (m)	Flujo Acum.	Gasto medio (m³/s)
		X ₂	Y ₂						
Pend. 2	5.98	-98.5291	16.6804	0.31	1	20	19	12,960	2.32
Pend. 3	10.55	-98.5302	16.7226	0.23	5	30	25	477,054	85.75
Pend. 4	12.45	-98.5252	16.7182	0.28	3	39	36	493,448	88.70
Pend. 5	18.90	-98.5280	16.7226	0.26	5	56	51	7,608	1.36
Pend. 8	13.49	-98.5802	16.8526	0.28	310	349	39	175,413	31.53
Pend. 9	10.56	-98.5841	16.9032	0.23	515	540	25	45,624	8.20
Pend. 10	10.98	-98.5607	16.9310	0.23	615	641	26	106,077	19.06
Pend. 13	0.77	-98.5341	16.7221	56.76	32	471	439	477,006	85.74
Pend. 16	10.93	-98.4213	16.8737	0.26	374	403	29	5,233	0.94
Pend. 17	12.28	-98.4785	16.8437	0.31	274	313	39	15,361	2.76
Pend. 18	10.38	-98.4530	16.7026	0.26	219	247	28	14,214	2.55

4.2 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO

Los potenciales hidroeléctricos obtenidos en las pendientes identificadas fueron estimados de acuerdo a la ecuación 1.8 y se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 4.14 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca La Unión

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	30	0.31	93,776.07	0.09
Pend. 3	12	2.81	331,662.14	0.33
Pend. 4	13	0.22	28,807.95	0.02
Pend. 5	23	0.28	64,846.23	0.06
Pend. 6	13	2.11	269,691.48	0.26
Pend. 8	15	0.62	92,045.61	0.09
Pend. 9	14	2.25	309,389.82	0.30
Pend. 10	24	0.30	70,982.10	0.07
Pend. 11	15	1.03	152,442.54	0.15
Pend. 14	13	1.51	193,260.42	0.19

Tabla 4.15 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca La Salitrera

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	12	0.74	87,586.49	0.08
Pend. 3	11	6.61	713,313.79	0.71
Pend. 4	14	0.40	55,924.53	0.05
Pend. 5	12	6.00	706,854.92	0.70
Pend. 6	16	0.24	38,344.21	0.03
Pend. 7	14	0.36	50,234.15	0.05
Pend. 8	15	0.69	102,110.19	0.10
Pend. 10	23	0.25	56,866.31	0.05

Tabla 4.16 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca San Jeronimito

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	5	0.32	15,841.99	0.01
Pend. 3	7	10.71	735,889.15	0.73
Pend. 5	9	0.41	37,049.38	0.03
Pend. 6	23	4.72	1,066,991.51	1.06
Pend. 8	36	0.97	345,028.23	0.34
Pend. 10	30	0.71	211,673.44	0.21
Pend. 11	24	0.36	86,082.96	0.08
Pend. 12	14	2.24	308,927.04	0.30
Pend. 13	16	1.15	180,958.53	0.18
Pend. 14	7	11.00	755,846.00	0.75

Tabla 4.17 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Petatlán

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	67	12.18	8,008,083.20	8.00
Pend. 3	34	0.46	153,625.96	0.15
Pend. 4	29	0.68	194,581.47	0.19
Pend. 5	17	1.13	188,601.55	0.18
Pend. 6	11	0.35	38,423.70	0.03
Pend. 7	14	0.53	73,997.10	0.07
Pend. 8	43	0.60	256,560.40	0.25
Pend. 9	29	1.82	518,421.62	0.51

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Tabla 4.18 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Coyuquilla II

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	34	0.61	205,502.19	0.20
Pend. 3	14	0.69	95,755.63	0.09
Pend. 4	18	0.51	90,322.87	0.09
Pend. 5	33	0.56	182,277.57	0.18
Pend. 6	114	0.44	498,450.11	0.49
Pend. 7	147	0.53	770,453.30	0.77
Pend. 8	41	0.78	314,135.87	0.31
Pend. 9	30	1.66	490,573.35	0.49
Pend. 10	50	0.97	477,387.10	0.47
Pend. 11	30	1.02	300,776.36	0.30
Pend. 12	22	0.66	143,912.51	0.14
Pend. 13	15	6.86	1,010,247.24	1.01

Tabla 4.19 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca San Luis

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	12	0.36	43,000.84	0.04
Pend. 3	8	20.36	1,598,489.60	1.59
Pend. 4	8	0.59	46,544.14	0.04
Pend. 5	13	3.93	501,775.82	0.50
Pend. 6	14	0.43	59,634.68	0.05
Pend. 8	33	0.42	137,319.44	0.13
Pend. 9	44	1.18	509,940.55	0.50
Pend. 10	11	0.65	70,955.39	0.07
Pend. 11	38	0.36	134,645.56	0.13
Pend. 12	27	11.54	3,056,936.65	3.05
Pend. 13	22	1.00	216,996.40	0.21
Pend. 14	23	0.44	101,513.66	0.10
Pend. 15	20	3.26	640,802.22	0.64
Pend. 16	92	0.55	502,474.83	0.50
Pend. 17	20	3.99	783,044.75	0.78

Tabla 4.20 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Técpan

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	56	2.18	1,198,906.12	1.19
Pend. 3	15	19.55	2,877,042.54	2.87
Pend. 4	19	0.64	119,806.59	0.11
Pend. 5	25	1.94	475,988.15	0.47
Pend. 6	36	0.89	317,039.47	0.31
Pend. 7	30	2.14	630,109.47	0.63
Pend. 8	21	6.32	1,303,070.40	1.30
Pend. 9	28	3.61	992,254.08	0.99
Pend. 10	20	1.48	290,466.39	0.29
Pend. 11	29	1.06	303,841.27	0.30
Pend. 12	35	3.98	1,366,675.20	1.36
Pend. 13	15	6.47	953,085.49	0.95
Pend. 14	102	32.74	32,767,542.18	32.76

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Tabla 4.21 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca San Jerónimo

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	5	0.87	43,021.40	0.04
Pend. 3	61	0.75	450,087.81	0.45
Pend. 4	56	1.34	739,553.24	0.73
Pend. 5	35	9.19	3,155,469.16	3.15
Pend. 7	17	4.61	769,620.74	0.76
Pend. 8	71	0.80	561,932.21	0.56
Pend. 9	28	0.54	150,338.74	0.15
Pend. 10	51	0.87	436,779.04	0.43

Tabla 4.22 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca San Cristóbal

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	95	6.71	6,261,685.44	6.26
Pend. 3	28	1.33	365,355.79	0.36
Pend. 4	37	1.80	656,000.14	0.65
Pend. 5	25	6.52	1,600,829.35	1.60

Tabla 4.23 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Coyuca de Benítez

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	7	30.60	2,101,480.09	2.10
Pend. 4	31	1.22	373,487.67	0.37
Pend. 5	20	0.48	95,316.31	0.09
Pend. 6	19	7.99	1,489,603.56	1.48
Pend. 7	53	0.59	310,933.46	0.31
Pend. 8	27	3.62	959,080.16	0.95
Pend. 9	27	0.89	236,471.95	0.23
Pend. 10	17	3.74	625,116.61	0.62
Pend. 11	27	1.67	444,395.06	0.44
Pend. 12	17	0.51	85,382.20	0.08
Pend. 13	88	2.41	2,088,779.77	2.08
Pend. 14	44	1.08	468,242.05	0.46
Pend. 15	40	1.67	657,101.04	0.65

Tabla 4.24 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Km. 21 + 000

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	8	3.59	282,004.38	0.28
Pend. 3	29	3.58	1,021,293.14	1.02
Pend. 4	27	0.36	95,517.57	0.09
Pend. 5	49	0.86	414,657.43	0.41
Pend. 6	23	0.36	81,236.56	0.08
Pend. 7	22	2.23	482,826.21	0.48
Pend. 8	16	2.72	428,408.28	0.42

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Tabla 4.25 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Marquelia

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m³/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	12	0.36	43,541.84	0.04
Pend. 3	20	25.51	5,005,253.53	5.00
Pend. 4	61	25.47	15,244,551.04	15.24
Pend. 5	13	0.72	92,799.38	0.09
Pend. 6	228	24.88	55,656,967.12	55.65
Pend. 7	19	0.67	125,903.35	0.12
Pend. 8	218	24.98	53,424,043.20	53.42
Pend. 9	406	23.83	94,944,191.00	94.94
Pend. 10	439	23.81	102,570,548.57	102.57
Pend. 11	423	23.81	98,835,713.12	98.83
Pend. 12	19	1.74	324,799.22	0.32
Pend. 13	251	23.89	58,825,747.55	58.82
Pend. 14	247	23.89	57,890,782.55	57.89
Pend. 15	23	0.58	131,630.08	0.13
Pend. 16	118	25.00	28,941,135.06	28.94
Pend. 17	111	25.00	27,224,798.15	27.22
Pend. 18	15	1.10	162,358.25	0.16

Tabla 4.26 Potencial hidroeléctrico en los tramos identificados dentro de la cuenca Quetzala

Pend. Máx.	ΔZ (m)	Gasto medio (m³/s)	Potencia (W)	Potencia (MW)
Pend. 2	19	2.32	434,229.43	0.43
Pend. 3	25	85.75	21,031,401.39	21.03
Pend. 4	36	88.70	31,325,972.01	31.32
Pend. 5	51	1.36	684,228.78	0.68
Pend. 8	39	31.53	12,063,881.00	12.06
Pend. 9	25	8.20	2,011,379.54	2.01
Pend. 10	26	19.06	4,863,570.75	4.86
Pend. 13	439	85.74	369,274,249.22	369.27
Pend. 16	29	0.94	267,614.34	0.26
Pend. 17	39	2.76	1,056,439.80	1.05
Pend. 18	28	2.55	701,834.97	0.70

Las tablas anteriores muestran cargas hidráulicas y caudales medios anuales que generan los mayores potenciales hidroeléctricos dentro de las cuencas. Sin embargo, se debe de tomar en cuenta la topografía ya que existe la posibilidad de no desarrollar la central por el tipo de relieve en la zona. Debido a esto, se eligen tres pendientes en cada cuenca tomando el mayor potencial para evaluar por medio de información topográfica digital del INEGI y de Google Earth la opción más factible.

A continuación se muestra una tabla con la descripción de los sitios donde se ubican las pendientes máximas así como una posible clasificación de su embalse, esto con el fin de saber si se puede colocar una cortina sobre el sitio.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Tabla 4.27 Características de las pendientes con mayor potencial

CUENCA	CORRIENTE	PEND. MÁX.	POTENCIAL (MW)	DESCRIPCIÓN DEL SITIO	TIPO DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA
La Unión	Perenne	3	0.33	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Sin regulación
		6	0.26	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Sin regulación
		9	0.30	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Sin regulación
La Salitrera	Perenne	3	0.71	Sierra baja compleja en un margen además de existir un poblado cercano	Sin regulación
		5	0.70	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Regulación
		8	0.10	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
San Jeronimito	Perenne	3	0.73	Llanura costera	Sin regulación
		6	1.06	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Regulación
		14	0.75	Llanura costera	Sin regulación
Petatlán	Perenne	2	8.00	Llanura costera además de existir un poblado cercano	Sin regulación
		8	0.25	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
		9	0.51	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
Coyuquilla II	Perenne	6	0.49	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Sin regulación
		7	0.77	Inicio del cauce con sierra alta compleja en los dos márgenes	Sin regulación
		13	1.01	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Regulación
San Luis	Perenne	3	1.59	Llanura costera	Sin regulación
		12	3.05	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Regulación
		17	0.78	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
Técpan	Perenne	3	2.87	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Regulación
		12	1.36	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
		14	32.76	Lomerío con llanuras	Sin regulación
San Jerónimo	Perenne	4	0.73	Sierra baja compleja en los dos márgenes además de existir un poblado cercano	Sin regulación
		5	3.15	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Regulación
		7	0.76	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
San Cristóbal	Perenne	2	6.26	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
		4	0.65	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
		5	1.60	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
Coyuca de Benítez	Perenne	2	2.10	Llanura costera	Sin regulación
		6	1.48	Llanura costera	Sin regulación
		13	2.08	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
Km. 21 + 000	Perenne	3	1.02	Llanura costera además existen poblados	Sin regulación
		7	0.48	Llanura costera además existen poblados	Sin regulación
		8	0.42	Llanura costera además existen poblados	Sin regulación
Marquelia	Perenne	3	5.00	Lomerío con llanuras	Sin regulación
		4	15.24	Lomerío con llanuras	Sin regulación
		9	94.94	Lomerío con llanuras	Sin regulación
		10	102.57	Lomerío con llanuras	Sin regulación
		11	98.83	Lomerío con llanuras	Sin regulación
		17	27.22	Lomerío con llanuras	Sin regulación
Quetzala	Perenne	3	21.03	Lomerío con llanuras	Sin regulación
		4	31.32	Lomerío con llanuras	Sin regulación
		8	12.06	Sierra baja compleja en los dos márgenes	Regulación
		10	4.86	Sierra alta compleja en los dos márgenes	Regulación
		13	369.27	Lomerío con llanuras	Sin regulación

Como se observa en la tabla anterior la mayoría de los puntos son viables para la generación eléctrica, sin la creación de un embalse. Apoyados en los resultados generados por TopoToolbox y la tabla anterior, a continuación se mencionan los sitios más óptimos:

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Cuenca La Unión: Los tres sitios resultan ser favorables para la implementación de una central hidroeléctrica, sin embargo la pendiente máxima 3 resulta más conveniente por ser el lugar más bajo de la cuenca además de brindar el mayor potencial. El lugar resulta un buen sitio para instalar una central sin regulación debido al pequeño potencial que presenta y que podría servir para cubrir los horarios con demanda pico.
- Cuenca La Salitrera: Las pendientes máximas 3 y 5 representan los sitios más adecuados para colocar la central. Es conveniente mencionar que la pendiente 5 presenta una mayor ventaja porque el sitio cuenta con márgenes en ambos lados del río lo que permitiría colocar una cortina y almacenar agua en época de estiaje.
- Cuenca San Jeronimito: El mejor sitio es aquel ubicado en la pendiente máxima 6 debido al potencial generado y por las condiciones topográficas que facilitan la construcción de una cortina. El inconveniente que puede presentar la selección del sitio es la lejanía con los poblados principales, lo que ocasionaría costos elevados en la construcción de líneas de transmisión eléctrica.
- Cuenca Petatlán: Aunque la pendiente 2 entrega el mayor potencial, el sitio no es el óptimo debido a la llanura que presenta y a los poblados cercanos. El punto más propicio es la pendiente 9, el cual entrega un potencial que puede ser manejado por medio de una central sin embalse.
- Cuenca Coyuquilla II: La pendiente máxima 13 es el lugar ideal para la instalación de una cortina que permita un embalse de almacenamiento.
- San Luis: El mejor sitio está ubicado en la pendiente 12, esto por el potencial que entrega y las condiciones para instalar una cortina. El único impedimento es la gran distancia a los poblados principales.
- Técpan: Aunque el máximo potencial se encuentra en la pendiente 14, las condiciones fisiográficas del sitio no permiten la instalación de una cortina. Ello hace que la pendiente máxima 3 sea el lugar con mayor potencial a explotar mediante la creación de un embalse regulador.
- San Jerónimo: Los resultados apuntan que la pendiente máxima 5 es el lugar óptimo para instalar la central, las condiciones de relieve de ambas márgenes permiten la creación de un embalse de regulación.
- San Cristóbal: El mayor potencial bruto está en la pendiente 2 ubicado en una zona con sierra alta compleja, lo que hace que se tengan los márgenes necesarios para una cortina que permita la regulación.

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

- Coyuca de Benítez: Las tres pendientes analizadas muestran un potencial relativamente alto pero la elección del sitio se valora por medio de sus características topográficas, esto implica que las pendientes 2 y 6 sean descartadas debido a que se presentan dentro de llanuras costeras, lo cual dificultaría la instalación de una cortina. La pendiente 13 es la más adecuada para la creación de un embalse de regulación.
- Km. 21 +000: Los tres sitios se presentan dentro de una llanura costera además de tener poblados cerca de las pendientes máximas, lo que provoca que la instalación de la central no tenga obra de regulación, es decir, es necesario el uso de un canal de derivación. Por lo tanto, la pendiente máxima 3 resulta la más apropiada por el potencial que entrega.
- Marquelia: Todas las pendientes analizadas en esta cuenca se ubican a lo largo de llanuras lo cual impide la creación de un embalse para su regulación. No obstante, se elige la pendiente 4 porque entrega un potencial relativamente alto en una longitud de tramo corta, esto ayuda a la instalación los conductos a la turbina.
- Quetzala: Las pendientes 3, 4 y 13 muestran el mayor potencial pero su fisiografía no es la más óptima para construir un embalse, por lo que la pendiente 8 es la indicada para instalar una cortina que regule el flujo y permita tener una generación constante.

Apoyados de la *figura 1.8* para conocer el tipo de turbina a utilizar en el sitio, se genera un resumen en la *tabla 4.28* con la información más relevante:

Tabla 4.28 Clasificación de la central hidroeléctrica en las pendientes óptimas de cada cuenca

Cuenca	Pend. Óptima	Gasto (m ³ /s)	Embalse	Carga hidráulica (m)	Clasificación	Potencia (MW)	Clasificación	Turbina
La Unión	3	2.81	Sin regulación	12	Baja caída	0.33	Pequeña	Kaplan
La Salitrera	5	6.00	Regulación	12	Baja caída	0.70	Pequeña	Kaplan
San Jeronimito	6	4.72	Regulación	23	Baja caída	1.06	Pequeña	Kaplan o Francis
Petatlán	9	1.82	Sin regulación	29	Baja caída	0.51	Pequeña	Francis
Coyuquilla II	13	6.86	Regulación	15	Baja caída	1.01	Pequeña	Kaplan o Francis
San Luis	12	11.54	Regulación	27	Baja caída	3.05	Pequeña	Francis
Técpan	3	19.55	Regulación	15	Baja caída	2.87	Pequeña	Kaplan o Francis
San Jerónimo	5	9.19	Regulación	35	Mediana caída	3.15	Pequeña	Francis
San Cristóbal	2	6.71	Regulación	95	Mediana caída	6.26	Pequeña	Francis
Coyuca de Benítez	13	2.41	Regulación	88	Mediana caída	2.08	Pequeña	Francis
Km. 21 + 000	3	3.58	Sin regulación	29	Baja caída	1.02	Pequeña	Francis
Marquelia	4	25.47	Sin regulación	61	Mediana caída	15.24	Grande	Francis
Quetzala	8	31.53	Regulación	39	Mediana caída	12.06	Grande	Francis

Las pendientes óptimas se han establecido y el potencial bruto promedio se ha estimado. Sin embargo, para conocer las fluctuaciones se muestra en la *tabla 4.29* la variación del gasto medio y del potencial cuando los datos son afectados por la desviación estándar (DE).

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

En la tabla se muestran dos celdas en las columnas de gasto, potencia y turbina, esto es por la suma y resta de la DE a los valores medios obtenidos con anterioridad.

Tabla 4.29 Clasificación y análisis de la variación del potencial bruto (en base a la desviación estándar del caudal)

Cuenca	Pend. Óptima	Gasto ± DE (m³/s)	Embalse	Carga hidráulica (m)	Clasificación	Potencia (MW)	Clasificación	Turbina
La Unión	3	4.61	Sin regulación	12	Baja caída	0.54	Pequeña central	Kaplan
		1.02				0.12	Pequeña central	Kaplan
La Salitrera	5	10.09	Regulación	12	Baja caída	1.19	Pequeña central	Kaplan o Francis
		1.92				0.23	Pequeña central	Kaplan
San Jeronimito	6	6.36	Regulación	23	Baja caída	1.43	Pequeña central	Francis
		3.09				0.69	Pequeña central	Francis
Petatlán	9	2.38	Sin regulación	29	Baja caída	0.67	Pequeña central	Francis
		1.26				0.35	Pequeña central	Francis
Coyuquilla II	13	9.79	Regulación	15	Baja caída	1.44	Pequeña central	Kaplan o Francis
		3.94				0.57	Pequeña central	Kaplan
San Luis	12	15.15	Regulación	27	Baja caída	4.01	Pequeña central	Francis
		7.92				2.09	Pequeña central	Francis
Técpan	3	33.25	Regulación	15	Baja caída	4.89	Pequeña central	Kaplan o Francis
		5.85				0.86	Pequeña central	Kaplan o Francis
San Jerónimo	5	12.12	Regulación	35	Mediana caída	4.16	Pequeña central	Francis
		6.25				2.14	Pequeña central	Francis
San Cristóbal	2	8.69	Regulación	95	Mediana caída	8.09	Pequeña central	Francis
		4.74				4.42	Pequeña central	Francis
Coyuca de Benítez	13	3.22	Regulación	88	Mediana caída	2.78	Pequeña central	Francis
		1.61				1.38	Pequeña central	Francis
Km. 21 + 000	3	6.37	Sin regulación	29	Baja caída	1.81	Pequeña central	Francis
		0.80				0.23	Pequeña central	Francis
Marquelia	4	37.94	Sin regulación	61	Baja mediana	22.70	Grande central	Francis
		13.00				7.78	Pequeña central	Francis
Quetzala	8	39.62	Regulación	39	Mediana caída	15.16	Grande central	Francis
		23.43				8.96	Pequeña central	Francis

4.3 LIMITANTES TÉCNICAS

Si bien las centrales hidroeléctricas tienen altos costos de inversión e impactos socio-ambientales principalmente provocados por la inundación de poblaciones, tierras productivas y vestigios históricos, entre otros; los problemas de índole técnico como la transmisión eléctrica desde el lugar de origen hasta la red de transmisión nacional es un punto fundamental para la factibilidad del proyecto.

Las líneas de transmisión (LT) son el conjunto de dispositivos para transmitir la energía eléctrica desde un punto de generación a los centros de consumo. Estas son utilizadas normalmente cuando no es costeable producir la energía eléctrica en los centros de consumo (Jiménes, 2006).

El plan de transmisión debe cumplir los análisis de costo mínimo y de rentabilidad, analizando opciones de red para distintos puntos de operación del sistema eléctrico. Para asentar este plan, en el año 2009 la CFE por medio la Subdirección de Programación planteó que se deben seguir tres etapas; definición de escenarios de demanda, determinación de los planes de transmisión para el año horizonte e incorporación de proyectos. Las líneas de alta tensión presentan diferentes características en el sistema de distribución, es decir, puede ser por corriente continua o por corriente alterna. La corriente continua tiene pérdidas por resistencias, no es fácil de transformar y utiliza todo el conductor para su transferencia, por otro lado la corriente alterna tiene frecuencia, presenta una mayor caída de tensión y es más fácil de transformar.

Transportar la potencia de una central generadora a largas distancias ocasiona problema de colapso en el voltaje. El hecho se debe principalmente a la falta de instalaciones de transmisión eléctrica por los altos costos en la adquisición de nuevos derechos de paso y problemas de acceso; por tal razón, el mantener los niveles de voltaje en la red se ha convertido en una fuente importante de vulnerabilidad para muchos sistemas interconectados.

Para que un sistema eléctrico sea estable y pueda soportar cualquier contingencia sin la afectación del voltaje es necesario contar con una reserva de potencia reactiva, es decir, centrales generadoras constantes, equipos de compensación convencionales como capacitores y reactores de derivación que permitan el control en la potencia y reducir perdidas de energía consumidas en el proceso de transmisión a puntos distantes.

La infraestructura instalada en la transmisión eléctrica se extiende a lo largo del país con diferentes niveles de tensión definidos por la CFE como se indica en la *figura 4.14*:

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

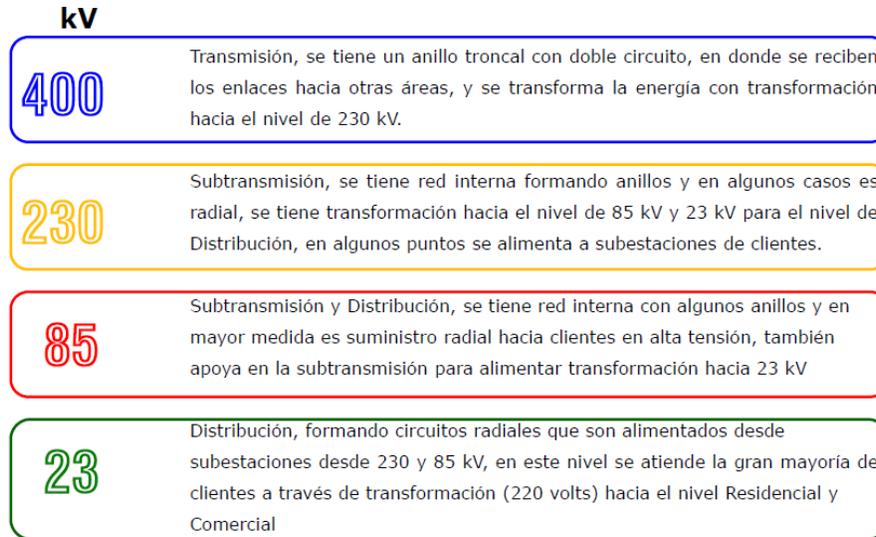


Figura 4.14 Niveles de tensión en líneas de transmisión eléctrica

Las tensiones antes mencionadas son las de mayor predominio, pero existen otras nominaciones de alta tensión como 115 KV y de tensión media como 24 KV. De acuerdo a la Subdirección de Programación de la CFE, el Sistema Eléctrico Mexicano en el año de 2009, contaba con una red de transmisión como se muestra en la figura 4.15.



Figura 4.15 Sistema Eléctrico Mexicano

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

La electricidad producida en el generador alcanza unos 25 KV pero en la planta ese voltaje es elevado a 400 KV para que la electricidad pueda viajar a largas distancias a través de cables de alta tensión. Las líneas de alta tensión son las de mayor longitud dentro del sistema eléctrico y las que manipulan los mayores bloques de potencia. Su función es intercambiar energía entre regiones, por lo que la transferencia de potencia puede ser en ambos sentidos y se caracterizan que a mayor tensión menor intensidad, en consecuencia, menor pérdida energética, lo cual es muy importante si se toma en consideración el hecho de que las líneas de alta tensión suelen recorrer distancias de hasta 200 km.

Para llegar a los valores de tensión de consumo industrial o doméstico, es necesario que la alta tensión se reduzca mediante transformadores eléctricos. Este proceso de transformación se realiza en varios pasos dependiendo de la distancia del punto de generación y de la energía demandada por el centro urbano o industrial. Estas líneas de subtransmisión con longitud de hasta 30 km, se utilizan en zonas geográficas más pequeñas.

Datos de CFE en el 2009 arrojan que 116,840 localidades contaban con electricidad distribuida mediante 275 subestaciones, 40,148 km de líneas de subtransmisión, 5,858 circuitos de distribución con una longitud de 333,295 km, 809,005 transformadores de distribución, 221,079 km de líneas secundarias de baja tensión y 488,132 km de menor voltaje.

En Guerrero las líneas de alta tensión (400 KV y 230 KV) se concentran principalmente en la costa y el centro del estado (Zihuatanejo, Lázaro Cárdenas, Acapulco, Mezcala y el Caracol), las cuales tienen como función principal auxiliar a los centros urbanos de gran auge, las zonas industriales y agrícolas que formarán el Complejo de Desarrollo del Pacífico Sur, propuesto para reordenar y descentralizar la región central (Hernández, 2005).

Tomando en cuenta lo expuesto con anterioridad, se determina que la conexión de energía eléctrica producida en los puntos escogidos como óptimos hasta las líneas de transmisión eléctrica se ven más beneficiados para las cuencas de La Unión, La Salitrera, San Jeronimito, Petatlán, Coyuquilla II, San Luis, Técpan, San Jerónimo, San Cristóbal, Coyuca de Benítez y Km. 21+000 ya que la principal línea de transmisión de la alta tensión pasa por la costa. Un caso contrario sucede con los puntos de Marquelia y Quetzala, los cuales se encuentran alejados de las principales líneas de alta tensión.

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Tabla 4.30 Distancias desde el punto óptimo de generación de cada cuenca hasta las líneas de alta tensión

Cuenca	Pend. Óptima.	Potencia (MW)	Distancia aprox. a las líneas de alta tensión (Km)
La Unión	3	0.33	16
La Salitrera	3	0.71	8
San Jeronimito	6	1.06	18
Petatlán	9	0.51	26
Coyuquilla II	13	1.01	17
San Luis	12	3.05	15
Técpan	3	2.87	15
San Jerónimo	5	3.15	14
San Cristóbal	2	6.26	31
Coyuca de Benítez	13	2.08	10
Km. 21 + 000	3	1.02	2
Marquelia	12	0.32	108
Quetzala	8	12.06	130

La *tabla 4.30* muestra las distancias aproximadas a las principales líneas de alta tensión en la región de Guerrero. Como se mencionó anteriormente la generación de energía en Marquelia y Quetzala se puede conectar a las líneas de transmisión de Acapulco, ya que las líneas de transmisión a Huatulco se encuentran a mayor distancia.

V. CONCLUSIONES

El objetivo del trabajo evaluó el potencial hidroeléctrico en las cuencas hidrológicas de la costa de Guerrero por medio de datos hidrométricos observados e interpolaciones con datos estimados por el programa TopoToolbox. La estimación del potencial tiene la intención de definir aquellos tramos dentro de una cuenca hidrológica con un alto potencial bruto bajo características locales tales como la carga hidráulica y el caudal medio anual disponible, además de contar con corrientes de tipo perenne.

Se proporciona una posible selección de turbinas para la central de generación en cada tramo con características adecuadas del sitio.

Respecto a la información disponible y resultados se concluye lo siguiente:

- Es de vital importancia combinar información hidrométrica y análisis geoespacial para la estimación del potencial hidroeléctrico, ya que esto permite generar estimaciones del potencial en cuencas no aforadas. Debe tomarse en cuenta que dicho análisis es enfocado a cuencas pequeñas o medianas, donde las características de vegetación, tipo de suelo y temperatura no presentan gran variación, esto con el fin de que no llegue a afectar de manera considerable el análisis.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las cuencas, se determinó que:

- Las 11 estaciones ubicadas en la Costa Grande de Guerrero presentan un gasto medio anual menor que las 2 estaciones ubicadas en la Costa Chica de Guerrero, sin embargo, la topografía de la Costa Grande permite la instalación de pequeñas cortinas en los tramos identificados mientras que las planicies y colinas que caracterizan la región de la Costa Chica dificultan la construcción de estructuras de almacenamiento para fines de generación eléctrica durante todo el año.
- La desviación estándar del caudal en las cuencas de la Costa Grande presentan un valor menor que aquellas de la Costa Chica. Ello permite concluir que aunque las regiones de la Costa Chica entregan un mayor potencial, estas presentarían una mayor variación a la hora de operar, por lo que es recomendable usar estas posibles centrales hidroeléctricas como centrales de generación complementaria durante periodos de demanda pico o buscar otros puntos/tramos donde la topografía permita la creación de un embalse. Lo anterior también

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

afecta la posible clasificación de la central (micro o pequeña), el tipo de turbina seleccionada así como el costo total de la obra. Dentro de este aspecto, las cuencas de San Cristóbal, Km. 21+000 y Petatlán son aquellas con el caudal más estable debido a que presentan la menor desviación estándar.

- La inundación del terreno aguas arriba de la cortina de un embalse puede generar impactos sociales y ambientales importantes como es el caso de la estación San Jerónimo, por lo que es recomendable un estudio de impacto ambiental y sociocultural que permita emitir una mejor decisión.
- Se sugiere el uso de generadores síncronos ya sea para centrales con o sin regulación, debido a que de esta manera se promueva un mejor control de los cambios en la carga hidráulica y por ende permite tener un mejor control de la tensión en la red de transmisión. Este tipo de generadores son de mayor eficiencia en las centrales donde lo que se busca es turbinar durante las horas pico.

De acuerdo a las limitantes técnicas, se determinó que:

- La posible instalación de centrales alejadas de centros de demanda/consumo (caso de Marquelia y Quetzala), genera la implementación de un sistema de transmisión de electricidad que significa un aumento de la inversión, así como en los costos de mantenimiento y una mayor pérdida de energía. Por lo que se recomienda llevar esa energía a poblados cercanos de los puntos de generación por medio de nuevas líneas cercanas a la central que permitan abarcar nuevos centros urbanos en crecimiento.
- El tipo y características de la turbina seleccionadas en este trabajo es una aproximación, ya que para definir la turbina adecuada en cada central es necesario conocer algunos aspectos como la carga hidráulica neta, el caudal que fluye a través del rodete, la velocidad de rotación, entre otros. Además, para seleccionar el número y tamaño de las turbinas, intervienen varios factores como es el costo por KW instalado, la velocidad de rotación permisible, la profundidad de excavación y el tamaño de la estructura de cimentación, entre otros. Por lo general, se recomienda instalar pocas unidades pero de capacidad considerable si las condiciones lo permiten.

Por último, se recomienda enfocarse en la costa grande de Guerrero donde se sitúan puntos que pueden proveer electricidad durante todo el año y no solo durante la temporada de lluvias.

BIBLIOGRAFÍA

- APARICIO, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología superficial*. México. Editorial Limusa. 1992.
- CFE (2014) *Informe anual 2014*.
- CONAGUA (2015). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). *Estadísticas del agua en México*. México, Distrito Federal. Edición 2014.
- ESCOBAR, Marisa, FLORES, Francisco y CLARK, Victoria. Stockholm Environment Institute. *Planificación de energía, agua y clima para el desarrollo sin carbono en latinoamérica y el caribe*. Estados Unidos, Somerville, noviembre 2011, pp. 3-6.
- GARCÍA, Héctor y NAVA, Arturo. *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. México. Universidad Nacional Autónoma de México. 2013.
- HERNANDEZ, Alma y MORALES, Fabián. *Diseño de torres de transmisión eléctrica*. Tesis (presentada para el grado de licenciatura en Ingeniería civil). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. 2005.
- INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION, WORLD BANK GROUP. *Hydroelectric power, a guide for developers and investors*. Germany, Stuttgart.
- JIMENES, Obed, CANTU, Vicente y CONDE, Arturo. Universidad Autónoma de Nuevo León. *Líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica*. México, Nuevo León, Abril 2006, pp. 3-16.
- MEIJER, Lourens. *World Hydropower Capacity Evaluation*. Thesis (submitted for the degree of Master of Science). Netherlands, Delft University of Technology, Faculty of civil engineering and geosciences.
- PERVOCHTCHIKOVA, María y GARCÍA, Fermín. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM. *Análisis cualitativo de la red hidrométrica actual del estado de Guerrero, México*. México, marzo 2006, N° 61, pp. 24-37.
- RAMOS, Leonardo y MONTENEGRO, Manuel. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. *La generación de energía eléctrica en México. Tecnologías y ciencias del agua Vol. III*. México, Morelos, octubre 2012, N° 4, pp. 197-211.
- RAMOS, Leonardo y MONTENEGRO, Manuel. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. *Las centrales hidroeléctricas en México: Pasado, presente y futuro. Tecnologías y ciencias del agua Vol. III*. México, Morelos, abril 2012, N° 2, pp. 103-121.
- SANTO, E. *Centrales eléctricas*. España. Editorial Gustavo Gili. 1971.
- SCHWANGHART, Wolfgang and KUHN, Nikolaus. Environmental Modelling and Software. *TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis*. Switzerland, january 2010, pp. 770-781.
- SENER (2012). *Energías renovables*
http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PER_2012-2026.pdf
- SOTELO, Gilberto. *Hidráulica general. En: volumen I Fundamentos*. México. Editorial Limusa. 2011.
- TORRES, Francisco. *Obras hidráulicas*. México, Editorial Limusa. 1981.
- UNESCO (2014). *Agua y energía, datos y estadísticas*.
<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/>.
- UNESCO (2016). *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP)*.
<http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/world-water-cenarios/>
- UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA. *Centrales hidroeléctricas*. Argentina, pp. 1-41.
- UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE, Stockholm Environment Institute. *Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo Weap*. Estados Unidos, Boston, abril 2009, pp. 4-82.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Water energy resources of the United States with emphasis on low head/low power resources*. States United, Idaho, april 2004.
- VIEJO, Manuel y ALONSO, Pedro. *Energía hidroeléctrica turbinas y plantas generadoras*. México. Editorial Limusa. 1977.

ANEXOS

Registros hidrométricos (gasto medio anual) extraídos del BANDAS para cada cuenca analizada.

La Unión 19016	
Año	(m ³ /s)
1962	7.59
1963	6.36
1964	8.74
1965	2.07
1966	6.78
1967	14.74
1968	8.16
1969	6.47
1970	9.97
1971	7.76
1972	4.86
1973	9.18
1974	5.51
1975	
1976	7.02
1977	3.63
1978	10.92
1979	2.99
1980	9.75
1981	21.85
1982	1.47
1983	1.09
1984	24.81
1985	9.39
1986	3.71
1987	8.13
1988	13.44
1989	9.59
1990	4.82
1991	3.47
1992	12.81
1993	10.89
1994	5.42
1995	
1996	
1997	
1998	
1999	
2000	16.61
2001	4.75
2002	6.13
2003	5.60
2004	5.94
2005	5.19
2006	6.12
2007	3.62
2008	5.75
2009	1.78
2010	8.11
Promedio	7.74
DE	4.93

La Salitrera 19022	
Año	(m ³ /s)
1971	17.62
1972	14.44
1973	14.89
1974	16.16
1975	12.08
1976	
1977	4.05
1978	6.40
1979	4.41
1980	3.93
1981	12.56
1982	1.13
1983	7.26
1984	
1985	4.03
1986	2.97
1987	4.92
1988	9.01
1989	5.88
1990	3.16
1991	2.56
1992	3.80
Promedio	7.56
DE	5.15

San Jeronimito 19014	
Año	(m ³ /s)
1961	11.42
1962	18.63
1963	
1964	12.76
1965	6.42
1966	14.82
1967	
1968	12.65
1969	11.64
1970	15.78
1971	12.76
1972	10.74
1973	18.61
1974	9.37
1975	18.12
1976	12.60
1977	5.70
1978	10.74
1979	8.79
1980	8.18
1981	
1982	
1983	
1984	
1985	
1986	5.85
1987	6.92
1988	16.26
1989	17.45
1990	6.27
1991	6.38
1992	13.34
1993	13.96
1994	5.91
1995	
1996	
1997	
1998	
1999	
2000	14.56
2001	6.92
2002	14.72
2003	14.81
2004	13.01
2005	11.85
2006	20.02
2007	14.51
Promedio	12.07
DE	4.17

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Petatlán 19009	
Año	(m ³ /s)
1964	11.75
1965	7.10
1966	12.32
1967	19.05
1968	11.32
1969	10.13
1970	9.98
1971	11.98
1972	18.74
1973	15.68
1974	9.71
1975	14.66
1976	10.51
1977	7.60
1978	10.14
1979	8.77
1980	7.58
1981	
1982	4.67
1983	13.08
1984	18.55
1985	12.18
1986	7.78
1987	9.23
1988	17.88
1989	11.04
1990	12.11
1991	
1992	
1993	14.83
1994	9.79
1995	18.38
1996	10.24
1997	9.94
1998	15.01
1999	10.85
2000	21.34
2001	9.41
2002	15.29
2003	12.93
2004	14.40
2005	10.42
2006	14.67
Promedio	12.28
DE	3.77

Coyuquilla II 19003	
Año	(m ³ /s)
1956	8.19
1957	7.03
1958	10.88
1959	14.30
1960	13.06
1961	18.61
1962	15.29
1963	12.71
1964	11.16
1965	6.06
1966	12.97
1967	
1968	11.52
1969	11.66
1970	11.61
1971	8.77
1972	6.44
1973	7.38
1974	8.06
1975	11.65
1976	8.58
1977	5.34
1978	10.13
1979	10.41
1980	10.47
1981	16.22
1982	6.77
1983	12.68
1984	23.64
1985	16.03
1986	8.24
1987	9.20
1988	18.23
1989	13.53
1990	14.59
1991	7.90
1992	17.04
1993	
1994	9.76
1995	25.29
1996	20.21
1997	13.87
1998	19.29
1999	
2000	15.15
2001	11.44
2002	
2003	14.30
2004	12.15
2005	
2006	
2007	35.00
2008	15.06
2009	10.41
Promedio	12.88
DE	5.48

San Luis 19006	
Año	(m ³ /s)
1958	35.48
1959	31.09
1960	21.94
1961	22.37
1962	23.72
1963	21.68
1964	19.78
1965	10.96
1966	18.29
1967	24.85
1968	20.04
1969	21.58
1970	27.77
1971	19.39
1972	13.22
1973	22.98
1974	20.25
1975	
1976	21.92
1977	13.51
1978	19.38
1979	19.77
1980	20.92
1981	
1982	16.88
1983	18.82
1984	45.05
1985	21.93
Promedio	22.06
DE	6.91

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Técpan 19005	
Año	(m ³ /s)
1953	24.58
1954	
1955	
1956	46.87
1957	
1958	53.96
1959	38.25
1960	23.04
1961	
1962	
1963	29.54
1964	21.44
1965	26.33
1966	28.59
1967	51.62
1968	34.36
1969	0.40
1970	0.39
1971	0.35
1972	0.28
1973	0.29
1974	0.26
1975	34.24
1976	29.38
1977	22.00
1978	26.21
1979	30.46
1980	28.21
1981	43.60
1982	16.91
1983	32.83
1984	59.81
1985	30.90
1986	18.80
1987	26.82
1988	51.36
1989	36.84
1990	29.46
1991	30.63
1992	
1993	45.57
1994	19.58
1995	
1996	
1997	61.77
1998	
1999	
2000	
2001	22.31
2002	122.43
2003	68.22
2004	51.70
2005	72.82
Promedio	33.18
DE	23.24

San Jerónimo 19013	
Año	(m ³ /s)
1959	29.92
1960	19.15
1961	32.62
1962	27.57
1963	25.84
1964	27.12
1965	22.02
1966	26.90
1967	
1968	27.07
1969	32.90
1970	37.43
1971	36.49
1972	26.74
1973	36.72
1974	25.24
1975	1.19
1976	34.55
1977	19.88
1978	27.54
1979	29.91
1980	38.22
1981	53.94
1982	
1983	
1984	
1985	
1986	16.14
1987	19.37
1988	34.10
1989	29.29
1990	27.59
1991	22.32
1992	
1993	
1994	
1995	
1996	
1997	
1998	
1999	
2000	
2001	
2002	
2003	42.12
2004	28.81
2005	23.66
2006	43.13
2007	31.78
Promedio	29.01
DE	9.25

San Cristóbal 20022	
Año	(m ³ /s)
1968	8.53
1969	5.43
1970	6.85
1971	5.45
1972	4.79
1973	5.42
1974	5.21
1975	7.35
1976	5.54
1977	
1978	
1979	7.99
1980	7.16
1981	10.16
1982	4.60
1983	5.80
1984	13.10
1985	7.53
1986	6.32
1987	6.64
1988	11.04
1989	9.06
1990	8.25
1991	9.01
1992	8.81
1993	11.94
1994	5.35
1995	9.97
1996	10.09
1997	
1998	9.91
1999	
2000	9.85
2001	7.57
2002	11.87
Promedio	7.95
DE	2.33

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Coyuca de Benítez 19002	
Año	(m ³ /s)
2000	29.36
2001	18.50
2002	25.30
2003	24.88
2004	25.72
2005	25.19
2006	30.64
2007	31.11
2008	40.62
2009	20.47
2011	54.64
2010	41.25

Promedio	30.64
DE	10.25

Km. 21+000 19008	
Año	(m ³ /s)
1955	2.53
1956	
1957	1.07
1958	
1959	
1960	7.61
1961	8.53
1962	5.57
1963	4.38
1964	2.43
1965	3.08
1966	2.57
1967	
1968	3.05
1969	6.97
1970	9.97
1971	3.08
1972	1.11
1973	6.82
1974	3.74
1975	4.02
1976	4.24
1977	1.28
1978	2.17
1979	2.77
1980	1.25
1981	5.25
1982	0.66
1983	1.26
1984	13.80
1985	1.92
1986	1.13
1987	1.25
1988	9.08
1989	4.29
1990	1.84
1991	1.91
1992	2.31
1993	7.46
1994	1.05
1995	
1996	
1997	
1998	
1999	
2000	3.25
2001	1.34
2002	3.55

Promedio	3.84
DE	2.97

Marquelia 20018	
Año	(m ³ /s)
1963	19.49
1964	28.15
1965	22.84
1966	19.73
1967	
1968	24.15
1969	42.70
1970	46.82
1971	26.68
1972	15.39
1973	27.59
1974	64.11
1975	19.98
1976	18.74
1977	10.56
1978	37.70
1979	27.13
1980	17.86
1981	39.38
1982	10.79
1983	12.74
1984	31.74
1985	
1986	
1987	11.17
1988	22.60
1989	32.21

Promedio	26.26
DE	12.85

Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero

Quetzala 20016	
Año	(m ³ /s)
1960	62.72
1961	77.36
1962	
1963	76.01
1964	80.70
1965	109.98
1966	87.36
1967	
1968	68.74
1969	115.42
1970	129.50
1971	85.77
1972	62.73
1973	103.51
1974	123.43
1975	87.63
1976	77.09
1977	63.45
1978	106.87
1979	82.46
1980	85.99
1981	137.29
1982	70.39
1983	83.45
1984	133.27
1985	91.29
1986	76.09
1987	89.06
1988	126.56
1989	125.93
1990	85.56
1991	81.07
1992	104.51
1993	106.79
1994	68.69
1995	156.40
1996	79.11
1997	125.19
1998	127.01
1999	154.49
2000	105.89
2001	100.77
2002	
2003	
2004	
2005	90.96

Promedio	97.72
DE	25.08