



**Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez**  
**Facultad de Ciencias Técnicas**  
**Centro de Estudios Hidrotécnicos**



# **METODOLOGÍA PARA EL USO SOSTENIBLE DEL AGUA CON FINES HIDROENERGÉTICOS Y AGRÍCOLAS EN LA CUENCA DEL RÍO SUCHIATE DE GUATEMALA**

**Tesis presentada en opción al grado científico de  
Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias**

**Ing. Isaí Álvarez Sevilla, MSc.**

**Ciego de Ávila, 2019**



**Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez**  
**Facultad de Ciencias Técnicas**  
**Centro de Estudios Hidrotécnicos**



# **METODOLOGÍA PARA EL USO SOSTENIBLE DEL AGUA CON FINES HIDROENERGÉTICOS Y AGRÍCOLAS EN LA CUENCA DEL RÍO SUCHIATE DE GUATEMALA**

**Tesis presentada en opción al grado científico de  
Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias**

**Autor: Ing. Isaí Álvarez Sevilla, MSc.**

**Tutor: Ing. Oscar Brown Manrique, Dr.C.**

**Ciego de Ávila, 2019**

## **SÍNTESIS**

Se presentan los resultados de la investigación desarrollada con el objetivo de proponer una nueva metodología para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola en la cuenca del río Suchiate de Guatemala. Esta se estructuró en tres procedimientos principales: diagnóstico, modelación matemática y determinación de indicadores de sostenibilidad. Se comprobó mediante el diagnóstico, que en la cuenca del río Suchiate puede obtenerse un volumen de agua disponible anualmente de 7,97 a 1047,68.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Los valores de caudales comprendidos entre 0,3 a 31 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> y las alturas de los saltos netos de 8 a 458 m pueden generar potencias instaladas de 0,2 a 41 MW, lo que expresa las condiciones favorables de esta cuenca para el desarrollo de centrales hidroeléctricas pequeñas, medianas y grandes. El riego de cultivos como el maíz y el frijol sólo puede realizarse en los meses de febrero y marzo; debido a que en los meses restantes las necesidades netas de los cultivos son inferiores a las precipitaciones efectivas. Se generaron 24 modelos de regresión para la estimación de variables hidrológicas; hidroenergéticas e hidroagrícolas que fueron validados satisfactoriamente por medio del coeficiente de determinación y el Error Porcentual Medio. La efectividad de la metodología quedó demostrada a través de un estudio de caso en la comunidad La Unidad y criterios positivos sobre los impactos en empresas de Guatemala.

## **SUMMARY**

Results of the research developed with the objective of proposing a new methodology for the sustainable use of water for hydroenergy and agricultural purposes in the basin of the Suchiate river of Guatemala are present. This was structured in three main procedures: diagnosis, mathematical modeling and determination of sustainability indicators. It was verified by means of the diagnosis that in the basin of the river Suchiate a volume of water available annually could be obtained from 7,97 to 1047,68,10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Flow rates ranging from 0.3 to 31 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> and net head from 8 to 458 m can generate installed power from 0.2 to 41 MW, which expresses the favorable conditions of this basin for the development of small, medium and large hydroelectric plants. Irrigation of crops such as maize and beans can only be done in February and March; because in the remaining months the net needs of the crops are lower than the effective rainfall. Twenty-four regression models were generated for the estimation of hydrological; hydroenergy and hydroagriculture variables that were satisfactorily validated by means of the coefficient of determination and the Mean Percent Error. The effectiveness of the methodology was demonstrated through a case study in the community La Unidad and positive criteria about impacts on Guatemalan companies.

# INDICE DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>9</b>
1.1 Recursos hídricos en cuencas hidrográficas	9
1.2 Recursos hídricos para la generación hidroeléctrica	14
1.3 Recursos hídricos para la irrigación	16
1.4 Indicadores de sostenibilidad para el uso del agua y la energía	20
1.4.1 Indicadores de sostenibilidad del agua	21
1.4.2 Indicadores de riego	22
1.4.2.1 Indicador Suministro Relativo de Agua	22
1.4.2.2 Indicador Suministro Relativo de Agua de Riego	23
1.4.2.3 Indicador Suministro Relativo de Agua por Precipitación	24
1.4.3 Indicadores de sostenibilidad energética	24
1.5 Modelos para la estimación de variables hidrológicas	27
1.6 Modelos para la estimación de variables hidroenergéticas	38
1.7 Conclusiones parciales	39
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>41</b>
2.1 Localización del área de estudio	41
2.1.1 Relieve	41
2.2 Desarrollo de la metodología	44
2.3 Diagnóstico de los recursos hídricos e hidroenergéticos	45
2.4 Desarrollo de modelos de regresión	47
2.4.1 Variables utilizadas en el estudio	47
2.4.1.1 Variables hidrológicas	48
2.4.1.2 Variables hidroenergéticas	49
2.4.1.3 Variables hidroagrícolas	53
2.4.2 Validación de los modelos de regresión	55
2.5 Indicadores de sostenibilidad para el uso del agua y la energía	56
2.6 Evaluación económica	57

<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>59</b>
3.1	Desarrollo de la metodología	59
3.1.1	Fundamentación de la metodología	59
3.1.2	Objetivo de la metodología	60
3.1.3	Procedimientos de la metodología	60
3.2	Análisis de los resultados del diagnóstico	62
3.2.1	Análisis de las variables hidrológicas	63
3.2.2	Análisis de las variables hidroenergéticas	71
3.2.3	Análisis de las variables hidroagrícolas	78
3.3	Análisis de los modelos de regresión	80
3.3.1	Análisis de los modelos de regresión de las variables hidrológicas	81
3.3.2	Análisis de los modelos de regresión de las variables hidroenergéticas	83
3.3.3	Análisis de los modelos de regresión de las variables hidroagrícolas	85
3.4	Validación de los modelos de regresión	87
3.5	Indicadores de sostenibilidad del agua y la hidroenergía	90
3.5.1	Indicadores de sostenibilidad del agua para riego	90
3.5.2	Indicadores de sostenibilidad para la hidroenergía	95
3.6	Análisis de la efectividad de la metodología	97
3.6.1	Verificación de la validez de los modelos propuestos	97
3.6.2	Aplicación de la metodología en un estudio de casos	97
3.6.3	Evaluación del impacto de la metodología	101
3.7	Análisis de la evaluación económica	101
3.8	Conclusiones parciales	102
	<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>104</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>105</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## INDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
2.1	Puntos de control ubicados en la cuenca Suchiate (subcuencas). 43
2.2	Propiedades hidrofísicas del suelo. 53
2.3	Coefficiente $K_c$ de los cultivos de maíz y frijol. 54
3.1	Superficie, precipitación y evapotranspiración potencial. 63
3.2	Valores promedio de precipitación y evapotranspiración potencial. 66
3.3	Balance hídrico en las subcuencas objeto de estudio. 66
3.4	Coefficiente de transposición y caudal. 68
3.5	Longitud acumulada, longitud real y altura del salto bruto. 72
3.6	Caudal ecológico, caudal de diseño y diámetro de la tubería de presión. 72
3.7	Altura del salto neto, potencia y energía total producida. 73
3.8	Valores promedios de longitud real, caudal de diseño, diámetro, altura del salto neto, potencia y energía total en las diferentes partes de la cuenca Suchiate. 73
3.9	Valores del coeficiente $K_p$ en diferentes partes de la cuenca. 73
3.10	Indicadores de potencia y de costo. 77
3.11	Valores promedio de los índices de potencia y de costo. 78
3.12	Parámetros agronómicos del cultivo de maíz. 79
3.13	Parámetros agronómicos del cultivo de frijol. 80
3.14	Modelos potenciales para estimar la altura del salto bruto. 85
3.15	Criterios para la validación de los modelos hidrológicos. 87
3.16	Criterios para la validación de los modelos hidroenergéticos. 88
3.17	Criterios para la validación de los modelos hidroagrícolas. 89
3.18	Indicador de uso del agua para hidroenergía. 96
3.19	Efecto económico de la aplicación de la metodología propuesta. 102

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>	
1.1	Ábaco del CEDEX para la estimación del caudal específico.	35
2.1	Localización de la cuenca del río Suchiate.	42
2.2	Corte longitudinal de la cuenca del río Suchiate.	42
2.3	Subcuencas del río Suchiate.	44
3.1	Esquema de la metodología para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola en la cuenca del río Suchiate de Guatemala.	61
3.2	Isoyetas medias anuales ( $P_m$ ) en la cuenca del río Suchiate.	64
3.3	Isopletas medias anuales ( $ETP_m$ ) en la cuenca del río Suchiate.	65
3.4	Isolíneas de balance hídrico anual en la cuenca del río Suchiate.	67
3.5	Isolíneas de coeficiente de transposición.	69
3.6	Isolíneas de caudal medio diario anual.	71
3.7	Isolíneas de carga neta.	74
3.8	Isolíneas de potencia.	76
3.9	Coefficiente de transposición $C$ observado y simulado.	82
3.10	Caudal observado y simulado con $Q_m = 3,357 \cdot 10^{-6} A^{0,9895} ETP^{-1,1006}$ .	82
3.11	Nomograma para la estimación del salto bruto.	85
3.12	Indicador $SRP$ en el cultivo del maíz.	91
3.13	Indicador $SRA$ en el cultivo del maíz.	92
3.14	Indicador $SRR$ en el cultivo del maíz.	93
3.15	Indicador $SRP$ en el cultivo del frijol.	94
3.16	Indicador $SRA$ en el cultivo del frijol.	94
3.17	Indicador $SRR$ en el cultivo del frijol.	95
3.18	Estaciones hidrométricas en el área Sibinal-Suchiate.	97
3.19	Precipitación media mensual en el área de estudio.	98
3.20	Precipitación media anual en el área de estudio.	98
3.21	Recorrido por el área de estudio.	99
3.22	Toma de informaciones fisiográficas de la cuenca.	99
3.23	Medición de caudales.	99
3.24	Variación del caudal hasta el sitio de la presa Sibinal.	100
3.25	Variación del caudal hasta el sitio de la presa Confluencia.	100

## RELACIÓN DE ANEXOS

- **ANEXO 1** Aval de la empresa Consultoría en Construcción y Evaluación de Proyectos (CCEP).
- **ANEXO 2** Aval de la empresa Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA).
- **ANEXO 3** Aval de la empresa Equipos, Materiales y Servicios Acuícola (EMASA).
- **ANEXO 4** Aval de la empresa Geología Ambiental & Económica, S.A.
- **ANEXO 5** Aval de la empresa Ecosoluciones Integrales, S.A.
- **ANEXO 6** Aval de la empresa Corporación Multi Inversiones Energía.
- **ANEXO 7** Aval de la empresa TW Solar.
- **ANEXO 8** Aval de la empresa Cementos Progreso.
- **ANEXO 9** Aval de la empresa Geografía y Forestería, S.A.
- **ANEXO 10** Aval de la empresa ENEL GREEN POWER, GUATEMALA, S.A.

## **INTRODUCCION**

El agua es un recurso imprescindible para la vida, que cubre cerca del setenta y uno por ciento de la superficie de la Tierra. Este recurso es de especial importancia para la agricultura, industria, transporte y muchas otras actividades humanas porque ayuda a mantener el clima del planeta; sin embargo, sólo una pequeña fracción de la misma está disponible para la humanidad, y se le desperdicia y contamina sin tomar en cuenta las consecuencias posteriores; por lo que los impactos que se genera a los ecosistemas de agua dulce, demuestran que el mundo se encuentra frente a una crisis inminente del agua (Umbría *et al.*, 2008).

El agua es además una parte esencial de cualquier economía y sociedad, por lo tanto, su manejo sustentable es una condición necesaria para una economía y una sociedad sustentable (Cervera, 2007).

Los impactos del cambio climático global sobre los recursos hídricos constituyen una de las principales preocupaciones en la determinación de los recursos hídricos disponibles en escenarios futuros para orientar la toma de decisiones en cuanto a su utilización racional debido a que las proyecciones climáticas aportan abundante evidencia acerca de la vulnerabilidad de los recursos de agua al cambio climático, con diversas consecuencias para las sociedades humanas y los ecosistemas (González-Zeas *et al.*, 2013).

Las tendencias del clima a la inestabilidad climática se reflejan de diversas formas como el aumento de la temperatura, la evapotranspiración, los períodos de estiaje, la mayor ocurrencia de vientos de más intensidad, las lluvias inesperadas y abundantes, etc., lo que implica grandes riesgos debido al aumento de las demandas por agua, la disminución de su oferta y la disminución de los niveles de

rendimiento de los cultivos agrícolas. Estas situaciones requieren determinadas soluciones en la que el riego y el drenaje adecuado se encuentra entre las más importantes para mitigar la variabilidad climática (IICA, 2015).

Los recursos hidráulicos mundiales representan un potencial de energía por aprovechar que se estima en 36 000 TWh; sin embargo, el margen de aprovechamiento que se tiene estimado es de 15 000 TWh. En este sentido, la tendencia actual es que los países de América Latina direccionen su parque eléctrico hacia el aprovechamiento del uso de recursos renovables; lo cual se justifica al no disponer de grandes reservas de hidrocarburos; por lo que se vislumbra un futuro próximo que depende en un mayor porcentaje de la hidroelectricidad (Ramos y Montenegro, 2012).

El agua generalmente suele considerarse un recurso renovable, debido a que puede utilizarse de manera que no afecte su disponibilidad a largo plazo; sin embargo, la disponibilidad de agua y el acceso al agua dulce serán temas críticos a resolver durante los próximos años (Badii *et al.*, 2008). Es por eso que el panorama sobre la situación de suministro y renovación del agua en el mundo es cada día peor (Agudelo, 2005).

Las cuencas hidrográficas son unidades territoriales donde funciona la combinación de un sistema hídrico que produce agua, simultáneamente con un subsistema económico y social activado por el hombre, el capital, el trabajo y las tecnologías para la producción de bienes y servicios agrícolas, pecuarios, forestales y recreativos; por tal motivo, es necesario reconocer la necesidad de formular planes de manejo integral de la cuenca, basados en un análisis hidrológico (Torres, *et al.*, 2005).

La generación hidroeléctrica y la producción agrícola son actividades económicas consumidoras de agua; pero la agricultura tiene la desventaja de que no restituye a los ríos el líquido utilizado (Editorial Ambientales 45, 2013).

La producción de energía hidroeléctrica juega un papel significativo en la producción total de electricidad en Guatemala; por lo que debe considerarse como un sector estratégico de primer orden; no obstante, el desarrollo de este potencial tropieza usualmente con importantes limitaciones; porque la construcción de centrales hidroeléctricas de tamaño medio o grande entra cada vez más en conflicto con otros importantes usos del agua y el suelo (Espejo y García, 2010).

La modelación hidrológica es la base para la gestión integral del recurso hídrico e involucra una compleja interacción de procesos fisicoquímicos que operan a diferentes escalas espaciales y temporales en la producción de escorrentía en la cuenca. Estos deben ser evaluados para diferentes condiciones ambientales de tipo climáticas, topográficas, suelos y cobertura vegetal (Ocampo y Vélez, 2014) y requieren, además, ser seleccionados de forma objetiva para que puedan predecir con exactitud los caudales y otras variables (Clark *et al.*, 2008).

Guatemala se encuentra según la mayor parte de las previsiones en plena región afectada por los más serios impactos climáticos y se incluye también entre los estados que con mayor debilidad podrán hacer frente a esas amenazas. Esto se debe al riesgo asociado a muchas amenazas meteorológicas; así como a la vulnerabilidad económica, social y ambiental que se agrava progresivamente con las manifestaciones de la variabilidad del clima.

Guatemala posee agua suficiente; sin embargo, es pobre la capacidad para su gestión que se pone de manifiesto en un deficiente manejo de la oferta hídrica disponible y los elevados índices de contaminación del recurso; no obstante, el

país presenta condiciones significativamente altas para la producción hidroeléctrica que representa el 43,3% (IARNA-URL, 2012).

El alto potencial hidroenergético de Guatemala se ubica fundamentalmente en cuencas ubicadas en territorios mayormente habitados por población indígena, con economías campesinas de subsistencia y sin suministro de electricidad, donde el agua y el bosque son una prioridad para las comunidades rurales. Bajo estas condiciones varios proyectos de generación eléctrica han generado una fuerte oposición popular, por temor de los pobladores a perder sus fuentes hídricas, la interrupción de las corrientes de los ríos y el control sobre sus territorios (Skarwan, 2011); es por eso que el manejo sostenible del agua con fines hidroenergéticos debe visualizar la inversión como un potencial para impulsar los procesos de cambio en función del desarrollo sostenible de los territorios.

Lo anteriormente expuesto demuestra que a pesar de la abundancia de recursos hídricos con que dispone Guatemala, existe una crisis del agua que se refleja en los siguientes síntomas: conflictos entre los diferentes usos y usuarios, deterioro por contaminación en la calidad de los cuerpos de agua, riesgos en las aguas subterráneas, escasa o nula inversión para actualizar infraestructuras, desarticulación institucional, poca habilidad del gobierno para controlar y regular el uso sostenible, falta de pago de servicios ligados al agua, impacto los ecosistemas de importancia entre los que se encuentra la cuenca del río Suchiate.

Las investigaciones realizadas en Guatemala no aportan todavía la solución apropiada para la utilización del agua en la generación hidroeléctrica y el riego de cultivos agrícolas a nivel de cuenca hidrográfica en particular en la cuenca de estudio, caracterizada por un abundante régimen pluviométrico, amplia variedad de cultivos como granos básicos, frutales, banano y palma africana entre otros; por tanto, la **situación problemática** que da origen al presente tema de investigación consiste en que actualmente el desarrollo de proyectos

hidroeléctricos en Guatemala a través de las metodologías existentes aplicadas por parte de empresas de energías renovables, no han logrado con éxito el desarrollo completo de proyectos hidráulicos antes del inicio de su etapa de construcción.

Se debe añadir que el uso productivo del agua en las diferentes regiones del país carece de un enfoque integral para la generación hidroeléctrica y el riego de los cultivos; por lo que es necesario el desarrollo de una metodología práctica que contrarreste lo antes dicho y permita además la sistematización en tiempo real de toda la información existente relacionada con la búsqueda de nuevas oportunidades de proyectos hidráulicos.

Teniendo en cuenta los elementos señalados anteriormente, se formula el siguiente **problema científico** a través de la interrogante: ¿Cómo contribuir al uso sostenible del agua para la generación hidroeléctrica y el riego de cultivos agrícolas en la cuenca del río Suchiate de Guatemala?

**Las posibles causas del problema son:**

- Variabilidad climática que afecta la distribución temporal y espacial de las precipitaciones.
- Problemas ambientales que contribuyen al aumento de la vulnerabilidad socioeconómica; así como de la magnitud y frecuencia de las amenazas.
- Política hídrica de tipo sectorial y fragmentada caracterizada por el pobre financiamiento.
- Poca preparación de la población local para aceptar en tiempo real los proyectos hidroenergéticos.
- Pocos estudios sobre las necesidades hídricas de los principales cultivos en Guatemala.

La problemática referida manifiesta la contradicción entre el desarrollo de actividades productivas como la generación de energía hidroeléctrica y el riego los cultivos agrícolas y la necesidad de utilizar el agua de forma sostenible en la cuenca del río Suchiate de Guatemala.

Se define el **objeto de la Investigación** en el uso sostenible de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas y el **campo de acción** en el uso sostenible del agua para la generación hidroeléctrica y el riego de cultivos agrícolas.

El análisis de este problema conllevó al planteamiento de la siguiente **hipótesis**: si se propone una metodología sustentada en la estimación de variables hidrológicas, hidroenergéticas e hidroagrícolas a partir de modelos estadísticos matemáticos e indicadores de sostenibilidad; entonces se podrá contribuir a la utilización sostenible del agua para la generación hidroeléctrica y el riego de cultivos agrícolas en la cuenca del río Suchiate de Guatemala.

Para la solución del problema se traza como **objetivo general** proponer una metodología de sostenibilidad que contribuya a la utilización del agua para la generación hidroeléctrica y el riego de cultivos agrícolas en la cuenca del río Suchiate de Guatemala. Como **objetivos específicos** se formulan las siguientes:

1. Realizar un diagnóstico de la situación que presentan los recursos hídricos de la cuenca del río Suchiate para su utilización en las actividades productivas de irrigación e hidroenergía.
2. Proponer una nueva metodología sustentada en la generación de modelos para la estimación de variables hidrológicas; hidroenergéticas e hidroagrícolas; así como de indicadores de sostenibilidad.
3. Determinar la efectividad de la metodología propuesta.

La **novedad científica** está dada por la estructuración lógico-metodológica entre las diferentes partes que componen la «Metodología para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícolas en la cuenca del río Suchiate de Guatemala» de la cual no se tienen antecedentes.

La **contribución a la teoría** consiste en el establecimiento de nuevas relaciones funcionales entre diferentes variables de tipo hidrológicas, hidroenergéticas e hidroagrícolas verificadas en la cuenca de estudio; estas son:

### **Variables hidrológicas**

- Relación funcional del coeficiente de transposición con el área de la cuenca, la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial media anual.
- Relación funcional del caudal medio diario anual con el área de la cuenca, la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial media anual.
- Relación funcional del caudal medio diario anual con el área de la cuenca y la intensidad media diaria de la lluvia.
- Relación funcional de la intensidad media diaria de la lluvia con caudal medio diario anual.

### **Variables hidroenergéticas**

- Relación funcional del diámetro de la tubería de presión con el caudal de diseño.
- Relación funcional de la pérdida de carga en la tubería de presión con la altura del salto bruto, el diámetro de la tubería de presión y la pendiente de la cuenca.
- Relación funcional de la altura del salto bruto con el diámetro de la tubería de presión.
- Relación funcional de la altura del salto neto con el caudal de diseño, la pendiente del terreno y el área de la cuenca.

- Relación funcional de la potencia de la turbina con el caudal de diseño, la pendiente del terreno y el área de la cuenca.
- Relación funcional de la energía total producida con el caudal de diseño, la pendiente del terreno y el área de la cuenca.

### **Variables hidroagrícolas**

- Relación funcional de la precipitación efectiva media mensual con la precipitación media mensual y la evapotranspiración potencial media mensual.
- Relación funcional de la evapotranspiración del cultivo media mensual con el coeficiente del cultivo.
- Relación funcional de las necesidades netas del cultivo media mensual con la precipitación media mensual y la evapotranspiración potencial media mensual.

La **contribución a la práctica** está dada en que la metodología propuesta constituye una valiosa herramienta práctica para la identificación de los recursos hídricos disponibles en la cuenca del río Suchiate y su utilización en los proyectos hidroenergéticos y de irrigación de forma sostenible. Se ofrece además un coeficiente  $K_p$  para la estimación de la longitud real de la tubería de presión a partir de la longitud acumulada y un nomograma para la estimación del salto bruto a partir del caudal y la potencia de la turbina.

# 1. REVISION BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se exponen los aspectos teóricos y metodológicos de la utilización de los recursos hídricos disponibles en cuencas hidrográficas para la generación de energía eléctrica y la irrigación. Se analizan los impactos del cambio climático sobre determinadas variables del ciclo hidrológico, indicadores para la sostenibilidad del agua y la energía y los modelos empleados para la estimación de variables relacionada con este importante recurso natural.

## 1.1 Recursos hídricos en cuencas hidrográficas

La precipitación se define como la variable clave en los sistemas hidrológicos. En los diferentes estudios de investigación, el punto de partida es la estimación de la precipitación con adecuada resolución espacial y temporal (Tapiador *et al.*, 2004; Schuurmans y Bierkens, 2007; Tapiador *et al.*, 2012). Contar con información exacta de esta variable es de suma importancia para numerosas aplicaciones incluyendo la agronomía, hidrología, meteorología y climatología (Kidd and Levizanni, 2011; Scheel *et al.*, 2011; Hou *et al.*, 2013).

La lluvia como única fuente de alimentación de los procesos hidrológicos en una cuenca hidrológica es sin duda, uno de los componentes más importantes dentro de la ecuación de balance. En este aspecto, los países con un régimen de lluvia netamente estacionario o con amplias zonas desérticas, son propensos a presentar largos períodos de escasez o de exceso (Aparicio, *et al.*, 2006).

Las precipitaciones de las zonas áridas y semiáridas se producen generalmente debido a procesos convectivos que ocasionan aguaceros de corta duración e intensidad relativamente alta en un área limitada; sin embargo, en áreas costeras

las precipitaciones de tipo frontal tienen dos características que afectan adversamente la producción agrícola; la baja cantidad y el bajo nivel de confianza (incertidumbre). Para mejorar la confiabilidad de los datos y la estimación de las necesidades de los cultivos se puede calcular la probabilidad de la precipitación y la porción del agua de lluvia que podría ser utilizada por las plantas, conocida como precipitación efectiva (Van Veenhuizen, 2000).

La atmósfera es uno de los componentes del sistema climático; mientras que el tiempo y el clima son factores ambientales producto de la dinámica de la atmósfera y del sistema climático, respectivamente. En este sentido el modelo conceptual en el área de meteorología es producir información y conocimientos sobre la atmósfera, el tiempo y el clima para garantizar un adecuado grado de certidumbre en la toma de decisiones de política económica, social y ambiental (Rangel, 2011).

La disponibilidad de recursos hídricos en una zona es función del volumen anual promedio del agua que recibe, de la que vuelve a la atmósfera por transpiración y evaporación (en conjunto evapotranspiración) y también de la diferencia de disponibilidad hídrica en las épocas de lluvia, seca y menos lluviosa. Cada una proporciona escenarios muy diferenciados que merecen análisis por separado de los balances hidrológicos (Vega *et al.*, 2015).

La legislación europea valora el plan hidrológico de cuenca como un instrumento clave de aplicación para evitar la contaminación del agua que tiene su origen en distintas fuentes, como los hogares, las instalaciones industriales y la agricultura (Tribunal de Cuentas Europeo, 2015).

La escasez de agua constituye uno de los principales problemas del siglo XXI a la que se ven enfrentadas las poblaciones de todo el mundo. Unas de las principales causas son el acelerado crecimiento demográfico y el estilo de vida moderna, que

han provocado un incremento en la demanda de los recursos hídricos, problemas de deterioro de la calidad y contaminación del agua, aunado a esto se tiene el calentamiento global de las últimas décadas que intensifica el ciclo hidrológico a escala mundial. Esto significa cambios en el régimen de precipitación, en su intensidad, cantidad, humedad del suelo y escurrimiento (Flores, 2014).

La escasez de agua es un concepto relativo y dinámico; puede aparecer a cualquier nivel de suministro o demanda, pero también es una construcción social donde sus causas están relacionadas con la intervención humana en el ciclo del agua. Esta cambia con el tiempo a consecuencia de la variabilidad hidrológica natural; varía aún más en función de los modelos existentes de gestión, planificación y política económica. Se espera que la escasez de agua se intensifique; no obstante, si se identifican correctamente, muchas de sus causas pueden anticiparse, evitarse o mitigarse (FAO, 2016).

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) afirma que los escenarios futuros ante el Cambio Climático estiman un aumento de hasta 5,8 pc en la temperatura promedio global para el año 2100; por lo que se produciría el derretimiento del 30% al 50% de la masa glaciaria y de gran parte de los casquetes polares que afectarían la disponibilidad de agua en todo el mundo. Asimismo, se registraría un incremento del nivel medio del mar y una variación en la temperatura superficial del mismo, originando cambios en los patrones de precipitación y alteraciones en las líneas costeras de todo el mundo, lo que acarrearía cambios en los ecosistemas terrestres y marinos (IGP, 2005a).

Los expertos en la materia han señalado que, para evidenciar la existencia de un cambio climático, es necesario analizar las tendencias de variables climáticas, considerando diferentes escalas de tiempo y espacio. Las tendencias son cambios graduales de incremento o decremento en el tiempo de las variables estudiadas, asociadas comúnmente a factores climáticos (Méndez *et al*; 2008).

La variabilidad y el cambio climático está teniendo fuertes repercusiones sobre diferentes variables meteorológicas; induciendo cambios en el patrón de precipitación que afecta directamente la disponibilidad hídrica, su gestión, las prácticas agrícolas y los ecosistemas. Los métodos más usados para el estudio de la variabilidad y el cambio climático en hidrología y las ciencias atmosféricas, consisten en el estudio de tendencias y efectos en la estacionariedad como mecanismos para encontrar patrones globales en la media y la varianza de las series de tiempo (Puertas *et al.*, 2011).

Centroamérica es una de las regiones más vulnerables al cambio climático y está sujeta a fenómenos hidrometeorológicos cada vez más intensos, que ocasionan inundaciones y sequías, afectando la disponibilidad de agua para los distintos usos. Uno de los sectores que está siendo más afectado, es el agrícola, puesto que en la región entre el 80 al 98% de los rubros agropecuarios dependen de la lluvia (Martínez, 2013).

La agricultura es extremadamente vulnerable al cambio climático. El aumento de las temperaturas termina por reducir la producción de los cultivos deseados, a la vez que provoca la proliferación de malas hierbas y plagas. Los cambios en los regímenes de lluvias aumentan las probabilidades de fracaso de las cosechas a corto plazo y de reducción de la producción a largo plazo (Altieri y Nicholls, 2009; Nelson *et al.*, 2009).

Los impactos más significativos del cambio climático global ocurren en las comunidades más vulnerables y en los ecosistemas frágiles, muchas veces de manera irreversible donde los recursos hídricos son los más impactados debido a la alteración de los regímenes de precipitaciones, generándose mayor incertidumbre en las comunidades que dependen de la lluvia para sembrar y cosechar (Chafloque, 2012).

Las principales causas de la compleja problemática de la gestión del agua están relacionadas con la carencia de recursos para la inversión en proyectos de riego, de agua potable, y de manejo de recursos naturales, entre otros. Muchos de estos proyectos se diseñan y se implementan sin tener en cuenta criterios de sostenibilidad del servicio del agua ni las formas específicas de gestión de los usuarios, lo que contribuyen a generar o agravar los conflictos por el agua (Chafloque, 2012).

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) define las sequías como períodos prolongados sin lluvia en los ciclos climáticos naturales y representan problemas serios para los campesinos que se arriesgan con estos ciclos. Este fenómeno climático está determinado esencialmente por los siguientes factores: el comportamiento del ciclo hidrológico caracterizado por largos períodos de escasa o nula precipitación; la variabilidad pluviométrica estacional, intraestacional e interanual y el balance hidrológico negativo, que se presenta cuando la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación; produciendo una deficiencia hídrica, lo que aunado a períodos consecutivos de disminución o ausencia de lluvias agrava la sequía (IGP, 2005b).

En la cuenca del Tajo ocurre una marcada reducción en la disponibilidad de agua relacionada con las sequías más frecuentes; una marcada disminución de los caudales anuales, de invierno y primavera en la mayoría de las subcuencas ibéricas, especialmente en el sur y una tendencia hacia el aumento de la severidad de la sequía hidrológica en la mayoría de las regiones (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2013). Además, se espera que en la cuenca del Mediterráneo continúe una fuerte disminución en la escorrentía después del 2050 (Sánchez-Gómez *et al.*, 2009).

El suelo y el agua tienen una fuerte relación en las cuencas hidrográficas; es por ello que generalmente en las partes altas de las cuencas las precipitaciones son

más elevadas; sin embargo, en las zonas bajas o depresionadas el contenido de humedad es superior que en las zonas altas; por consiguiente, el contenido de materia orgánica es más alto por la poca oxigenación y los suelos son generalmente grisáceos y oscuros. En cambio, en la parte alta la escorrentía es más rápida, tiene buena oxigenación y por lo tanto el contenido de materia orgánica es más bajo y los suelos son generalmente amarillos o rojos. Este color rojo es un indicador de la presencia predominante de óxidos de hierro y aluminio (Barrantes y Glave, 2014).

El manejo de los desechos líquidos y la conservación de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas puede conllevar a graves problemas cuando ocurre un abandono total por parte de las autoridades y de la población como el deterioro de la calidad del agua donde se pierde no sólo el recurso, sino también un elemento fundamental de la cultura identitaria, debiendo afrontarse elevados costos en el futuro para su recuperación (Navarro *et al.*, 2013).

En los últimos años, en casi todos los países de América Latina y el Caribe se han sucedido reformas en las legislaciones y organizaciones orientadas a la gestión y el aprovechamiento del recurso agua. La diversidad de culturas, climas, así como las actividades políticas y financieras en cada uno de estos países ha ocasionado que cada día se busquen nuevos y mejores procedimientos para llevar a cabo una correcta gestión integrada de los recursos hídricos (Aparicio, *et al.*, 2006).

## **1.2 Recursos hídricos para la generación hidroeléctrica**

Los recursos energéticos renovables son los que tienen la capacidad de regenerarse, si se les aprovecha bien, sin destruirlos ni exterminarlos; pero no se encuentran en cantidades infinitas; por lo que pueden volverse no renovables cuando la velocidad de utilización es mayor que la tasa de renovación; entre estos se encuentran el clima y el agua (Mora y Hurtado, 2004).

La sustentabilidad y renovabilidad de las fuentes energéticas son dos conceptos esenciales utilizados a veces de forma poco claras. La sustentabilidad se refiere a los sistemas energéticos que manejan fuentes renovables, con impactos mínimos o sin ellos en el medio ambiente; sin embargo, la renovabilidad es un término más controvertido; porque un sistema energético basado en flujos naturales puede convertirse en no renovable al ser sobreexplotado o manejado inadecuadamente; por lo que para que los recursos energéticos sean renovables a largo plazo se impone su utilización racional. Esto indica que la renovabilidad es un atributo de la fuente energética y la sustentabilidad un atributo del uso de los diferentes vectores energéticos (Horta, 2005).

La utilización masiva de los recursos hidroenergéticos en pequeña escala para la generación de energía eléctrica, exige la disponibilidad de una muy buena información hidrológica y de una evaluación previa de estos recursos, lo que permite identificar para una región su potencial; no obstante, no todo el potencial puede ser utilizado para generación de energía eléctrica (Ortiz, 2007).

La satisfacción de los requerimientos de energía eléctrica en regiones aisladas no interconectadas al sistema energético es posible en la medida en que se utilicen sus recursos hidroenergéticos en pequeñas centrales hidroeléctricas, (PCH) caracterizadas por tener un impacto ambiental positivo y reducir la dependencia del consumo de combustibles fósiles (Malinin y Ramiro, 2004). De esta forma una PCH de baja caída es estable y eficiente al utilizar turbinas Francis de doble rodete, Francis paralelas o Michel-Banki seccionadas (Mijailov y Feldman, 1989).

La Fundación Solar (FSOLAR), el Proyecto Usos Productivos de la Energía Renovable (PURE), el Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF) y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ofrecen un procedimiento para la estimación del potencial hidrológico de una cuenca hidrológica, el cual está integrado por las aguas superficiales y subterráneas que se pueden aprovechar

para satisfacer las demandas de diferentes usos (FSOLAR/PURE/GEF/PENUD, 2013).

El costo kilovatio hora a nivel mundial para las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) se encuentra entre 2-4 centavos de dólar; el cual usualmente coincide con el precio promedio de venta en el mercado energético (Mijailov y Felman, 1989). Los resultados de la evaluación económica de las PCH indican que los proyectos viables son los de potencia instalada superior a 1 MW, debido a que el costo del kilovatio instalado en una zona aislada puede aumentar de 2-4 veces; sin embargo es necesario tener en cuenta que las PCH generan un impacto ambiental positivo al preservar la cuenca como fuente energética, sustituir energéticos como la leña, las baterías, entre otros (Flórez, 2001) los que se pueden valorar, determinando el costo socioambiental, como el resultado de un balance de los impactos positivos y negativos en la comunidad y en el medio ambiente.

### **1.3 Recursos hídricos para la irrigación**

La agricultura de regadío cubre un área de aproximadamente 280 millones de hectáreas en todo el mundo y produce alrededor del 44% de la producción agrícola total. La tendencia sugiere que el riego representará el 40% de la expansión de la superficie agrícola y aproximadamente el 55% del aumento en la producción de alimentos en el mundo; sin embargo, las únicas dos regiones mundiales con posibilidades de ampliar su área cultivada y de riego de manera sostenible, son África Sub-Sahariana y América Latina donde, pese a la abundancia de recursos hídricos renovables en la región, estimados en 12 929 km<sup>3</sup>, solamente se cuenta con irrigación en el 23% del área adecuada para riego (Beekman, 2015).

La agricultura está llamada a jugar un papel preponderante para el futuro de la humanidad, no solo porque los alimentos, las fibras y gran parte de la energía que se requerirán en el futuro se producirán mediante esa actividad, sino también por

las contribuciones que hará a la conservación de los recursos naturales y de la biodiversidad; sin embargo, Los impactos negativos de la agricultura, también se han manifestado en la pérdida de suelos y en la contaminación del agua. Dada la dependencia que la agricultura tiene del agua, se requiere encontrar nuevos paradigmas para revitalizar la actividad agrícola en un escenario de menor disponibilidad de agua, de mayor competencia por este líquido y de mayor conciencia social sobre la necesidad de proteger ese recurso (Beekman *et al.*, 2014).

El uso de agua sin restricciones ha crecido a nivel global a un ritmo de más del doble del aumento de la población en el siglo XX, hasta tal punto que en muchas regiones ya no es posible el suministro de un servicio de agua fiable. La agricultura es el sector económico en el que la escasez de agua tiene más relevancia debido a que es responsable del 70% de las extracciones de agua dulce y de más del 90% de su uso consuntivo (FAO, 2016).

El recurso agua está sometido a la presión de una demanda cada vez más exigente en cantidad y calidad, condicionada por aspectos sociales, políticos y ambientales. La creciente dificultad para garantizar la satisfacción de las demandas se traduce, por un lado, en una mayor competencia entre los sectores usuarios tradicionales: agricultura, industria y abastecimiento urbano por los escasos recursos disponibles (esta competencia ya está restringiendo las actividades de desarrollo de muchos países) y por otro lado, la creciente escasez de recursos hídricos que está originando una mayor rivalidad entre regiones o países por el acceso a los mismos (Roldán *et al.*, 2010).

El análisis de la demanda de agua para riego requiere de una política de gestión eficiente, sustentada en la evaluación de los procesos agronómicos e hidráulicos, lo que permite el estudio de las necesidades de agua teórica y sus

discrepancias con las demandas reales por parte de los agricultores mediante el uso de indicadores de calidad del riego a escala de parcela (Roldán *et al.*, 2010).

En Uruguay las frecuentes sequías que sufren los productores rurales han motivado al gobierno a diseñar un plan para la creación de un centenar de represas hidroeléctricas de pequeño porte con capacidad entre dos y cinco megavatios, ubicadas en el cauce de pequeños ríos, con el propósito de combinar la presencia de la central hidroeléctrica con la irrigación, para la prevención de las consecuencias de las frecuentes sequías (Últimas Noticias, 2011).

El gobierno uruguayo consideró la necesidad de contar con un sistema de irrigación que dé respuesta al cambio climático e incremente el rendimiento de los cultivos, lo cual es posible, puesto que el costo de las pequeñas represas hidroeléctricas es relativamente bajo si se compara con la construcción de las grandes represas.

En Honduras el gobierno inauguró cinco sistemas de riego con hidroenergía financiado por la Cuenta del Milenio-Honduras e implementada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), con una inversión de más de 20,6 millones de lempiras. El proyecto permite el aprovechamiento eficaz y racionalmente de las fuentes energéticas renovables que ofrece la naturaleza de la zona, para la irrigación aumentando la competitividad de los productores hortícolas de las comunidades indígenas beneficiadas (Cuenta del Milenio, 2009).

Las opciones para afrontar la escasez de agua pueden dividirse en: aumento del suministro y gestión de la demanda. El aumento del suministro contempla el incremento del acceso a fuentes de agua convencionales, la reutilización de aguas de drenaje y de aguas residuales, los trasvases entre cuencas, la desalinización y el control de la contaminación. La gestión de la demanda se dirige hacia la

aplicación de un conjunto de acciones para el control de la demanda, bien aumentando la eficiencia económica general del uso del agua como recurso natural, o bien reasignando los recursos hídricos dentro de cada sector y entre los distintos sectores. En el caso de la agricultura este problema debe verse como un continuo desde la fuente de agua hasta el agricultor y posteriormente el consumidor de productos agrícolas (FAO, 2016).

El incremento de la productividad del agua en la agricultura es esencial para disminuir la presión sobre los recursos hídricos, reducir la degradación ambiental y mejorar las condiciones de seguridad alimentaria; sin embargo, esto no es un proceso sencillo y para lograrlo se requiere mejorar la productividad del agua y la eficiencia en su utilización por parte de las plantas, hasta la manera en que el comercio internacional impacta en su uso y en su productividad (Beekman, 2015).

El uso en la agricultura de agua regenerada es una opción que se está adoptando cada vez más en regiones con escasez de agua, poblaciones urbanas crecientes y con una mayor demanda de agua de riego; pero es necesario la evaluación del uso de este tipo de agua en la agricultura, como parte de un proceso de planificación integral en la asignación de recursos hídricos para lograr una utilización del agua más eficiente y sostenible desde el punto de vista económico (Heinz *et al.*, 2013).

El International Water Management Institute (IWMI) sostiene que la evaluación exhaustiva de la gestión del agua en la agricultura es un análisis crítico de los beneficios, costos y consecuencias de las prácticas de gestión del agua en los últimos 50 años, de los desafíos que actualmente afrontan las comunidades en este campo y de las soluciones que la población ha desarrollado en diversas partes del mundo. Se trata de un proceso llevado a cabo por varias instituciones, con miras a evaluar el estado actual del conocimiento y a estimular la creatividad sobre cómo ordenar los recursos hídricos para satisfacer las necesidades de

producción agrícola, disminuir la pobreza y la inseguridad alimentaria, y contribuir a la sostenibilidad del medio ambiente (IWMI, 2007).

#### **1.4 Indicadores de sostenibilidad para el uso del agua y la energía**

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) considera que la mejor definición de desarrollo sostenible es la proporcionada por la Comisión Brundtland que la expresa como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad para que futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades (OIEA, 2008).

El concepto de desarrollo sostenible se considera como un proceso multidimensional que afecta al sistema económico, ecológico y social pasando a ser una variable a tener en cuenta en las decisiones de política económica para que se alcance el objetivo fundamental que es la sustentabilidad de los sistemas tanto a medio como a largo plazo (Common y Perrings, 1992).

El análisis del desarrollo sostenible y del agua en cuanto a derecho, toma como eje central el agua, que es uno de los componentes fundamentales para el desarrollo sostenible y para la viabilidad de los sistemas ecológicos que soportan la producción actual. Se trata del análisis del tema del agua desde su importancia ambiental, económica, social y su relación con el desarrollo sostenible a escala mundial (Díaz *et al.*, 2009).

La gestión integrada del agua por cuencas y el manejo de cuencas requiere de mecanismos de cooperación que permitan apoyar los procesos de la gestión orientados a la gestión de cuencas en los países de América Latina y el Caribe; no obstante, los organismos de cuenca enfrentan dificultades que son de carácter político, legal, social y financiero, más que técnico, aun cuando también existe una clara deficiencia de materiales y programas educativos de nivel de postgraduado;

por lo que los organismos de cuenca son extremadamente vulnerables políticamente (Dourojeanni y Jouravlev, 2003).

En cuanto al desarrollo sostenible a partir del uso de la energía, es evidente que el actual sistema energético a nivel mundial está basado en la generación de energía a partir de combustibles fósiles como el petróleo, carbón mineral y gas; pero, la generación de energía a partir de estas materias está siendo ampliamente replanteada por varias razones: son recursos limitados, su uso a gran escala está provocando graves efectos sobre el medio ambiente y la salud de los seres humanos, y se están agotando las reservas naturales comprometiendo el futuro de las nuevas generaciones. Hoy en día las energías renovables representan un sector importante de la industria y la economía. En esto hay que tener en cuenta que los avances tecnológicos permiten obtener energía eléctrica en cursos de agua de características muy diversas (Castro, 2006).

Una forma de medir el uso sustentable del agua es a partir del desarrollo de indicadores que reflejen la interacción entre la sociedad y el recurso agua. Los indicadores proveen de información comprensiva acerca de los sistemas que dan forma al desarrollo sustentable y son necesarios para guiar políticas y ayudar en la toma de decisiones en los diferentes niveles de la sociedad (Cervera, 2007).

Todo conjunto de indicadores constituye un sistema de señales que ayudan a la consecución de objetivos y metas determinados; así, los indicadores ambientales permiten objetivizar las principales tendencias de las dinámicas ambientales y los indicadores de desarrollo sostenible contribuyen a la evaluación sobre el progreso de los países y regiones hacia el desarrollo sostenible (Quiroga, 2007).

#### **1.4.1 Indicadores de sostenibilidad del agua**

El Sistema de Indicadores de Sostenibilidad de Bilbao tiene la finalidad de representar de modo sintético la realidad municipal y su avance hacia la

sostenibilidad. Este sistema de indicadores se elaboró a partir de las pautas establecidas por los Indicadores Comunes de Sostenibilidad Local del Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco; consta de 34 indicadores, organizados en 12 categorías (IHOBE, 2003).

El Sistema de Indicadores de Sostenibilidad de Bilbao, tiene como aspecto de interés para esta investigación, el enfoque del indicador 1 referidos al consumo de agua, el cual está compuesto por la cantidad total de agua suministrada en la red de distribución en Litros/personas/día y el consumo doméstico de agua en Litros/personas/día; a pesar de esto, no hace acotación en relación con el consumo de agua para la agricultura.

#### **1.4.2 Indicadores de riego**

Dentro de los indicadores de riego se pueden mencionar los tres siguientes: el Suministro Relativo de Agua (SRA); el Suministro Relativo de Agua de Riego (SRR) y el Suministro Relativo de Agua por Precipitaciones (SRP). Estos indicadores permiten evaluar la gestión agronómica en la zona regable a partir de las necesidades hídricas de los cultivos con datos climáticos que provienen de la estación meteorológica ubicada dentro de la zona regable (Roldán *et al.*, 2010).

##### **1.4.2.1 Indicador Suministro Relativo de Agua**

El indicador Suministro Relativo de Agua (SRA) muestra la relación entre el agua que entra en el sistema (precipitación y riego) y el agua requerida (evapotranspiración y necesidades de lavado) y se calcula como el cociente entre la cantidad de agua disponible o utilizada y la cantidad de agua necesaria para la producción (Levine, 1982).

El análisis del índice SRA permite conocer si la cantidad total de agua (riego y precipitaciones) con la que ha contado el cultivo durante su ciclo de crecimiento ha sido excesiva, suficiente o escasa (Rodríguez, 2002). Este sirve de base para un

estudio comparativo y de análisis en zonas regables de diferentes regiones con distintas características. Los valores del indicador comprendidos entre 0,90 - 1,20 se consideran adecuados. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$SRA = \frac{R + P_e}{ETc} \quad (1.1)$$

Donde  $R$  es el aporte por riego (mm);  $P_e$  la precipitación efectiva (mm);  $ETc$  la evapotranspiración del cultivo (mm).

#### **1.4.2.2 Indicador Suministro Relativo de Agua de Riego**

El indicador Suministro Relativo de Agua de Riego (SRR) relaciona el volumen de agua distribuido para riego a los usuarios durante la campaña agrícola, con el volumen de agua de riego necesario por el cultivo a lo largo de su ciclo de vida (Perry, 1996) e informa sobre la calidad del riego aplicado al relacionar la cantidad de agua demandada con las necesidades netas de agua, ya que evidencia si el agricultor ha tenido en cuenta la evapotranspiración del cultivo y los requerimientos de lixiviación al usar un determinado volumen de agua.

El valor óptimo del indicador estará en torno a la unidad, lo que significa que se satisfacen las necesidades hídricas no cubiertas con el agua de lluvia. Un valor por debajo de la unidad marcará un déficit de riego (Roldán *et al.*, 2010). La ecuación utilizada para la determinación del indicador fue la siguiente:

$$SRR = \frac{R}{ETc - P_e} \quad (1.2)$$

Los indicadores SRA y SRR aportan información sobre la condición de escasez o exceso de agua y de cómo se ajusta el agua aplicada con la demandada (Molden *et al.*, 1998).

El indicador más importante es el SRR ya que es el que permite interpretar el manejo del riego que realiza el agricultor. Este indicador con un valor medio en torno a 0,60 muestra que los riegos son deficitarios. Los valores del indicador SRA son más elevados, alrededor de 0,80 y normalmente por encima de este valor, por lo que se puede considerar que la gestión del riego es adecuada ya que es suficiente para satisfacer la demanda evaporativa durante el ciclo de desarrollo del cultivo, aunque valores próximos a 0,80 indican que el cultivo puede sufrir estrés hídrico en algún momento de su vida (Roldán *et al.*, 2010).

#### **1.4.2.3 Indicador Suministro Relativo de Agua por Precipitación**

El Indicador Suministro Relativo de Agua por Precipitaciones (SRP) sólo tiene en cuenta el aporte de agua por lluvia. De esta manera, se puede conocer en qué cuantía se satisfacen las necesidades hídricas del cultivo de forma natural (Pérez *et al.*, 2005). Cuando su valor es igual al de SRA en el mismo período significa que toda el agua que se aporta al cultivo es por precipitación y no existe riego. Este indicador puede estimarse como:

$$SRP = \frac{P_e}{ET_c} \quad (1.3)$$

#### **1.4.3 Indicadores de sostenibilidad energética**

El debate sobre la crisis y el futuro energético aún no ha incorporado un análisis sobre la relación entre la demanda energética, los modelos productivos, los derechos de la población y la sustentabilidad en el uso de los recursos y los territorios. La sustentabilidad energética implica considerar y satisfacer las necesidades de la sociedad en su conjunto, entendidas no sólo como la condiciones para la subsistencia física, sino también como el ejercicio de los derechos económicos, sociales, políticos, culturales y ambientales para una vida digna (Bertinat, 2011).

Los indicadores trascienden a la estadística básica para promover un entendimiento más a fondo de los principales problemas o arrojar luz sobre relaciones valiosas que no son evidentes si solo se emplean estadísticas básicas. La importancia relativa de los indicadores para el desarrollo energético sostenible varía de un país a otro, en función de sus condiciones específicas, las prioridades energéticas nacionales y de los criterios de sostenibilidad y desarrollo; por tanto, cada país tendrá su propia manera de usar los indicadores energéticos del desarrollo sostenible (OIEA, 2008).

La OIEA (2008) propone una relación de 30 indicadores que conforman la base de los indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) clasificados en las dimensiones social económica y ambiental; sin embargo para los propósitos de esta investigación resultan interesantes tres indicadores de los cuales dos corresponden a la dimensión económica y uno de la dimensión ambiental; estos son: uso per cápita de la energía; intensidad energética del sector agrícola y emisiones de contaminantes atmosféricos.

Diferentes instituciones como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE); la Agencia Internacional de Energía (AIE) y la Oficina Estadística de las Comunidades Europeas (EUROSTAD) utilizan el indicador energía generada por fuentes primarias (EGFP), el cual se refiere a la cantidad de energía que genera un volumen dado de fuentes energéticas primarias, llamadas así, por ser extraídas u obtenidas directamente de la naturaleza y por la posibilidad de ser usadas sin requerir ningún tipo de transformación. Las fuentes primarias de energía, obtenidas de esta manera son hidroenergía, leña, energía solar, petróleo, carbón mineral, gas natural y geoenergía; también se incluye la energía que se genera a partir de residuos de otros procesos de producción, como el bagazo y la recuperación (OCDE/AIE/EUROSTAD, 2007).

Para calcular este indicador se toma la información de los Balances Energéticos Nacionales correspondiente a “producción de energía primaria” por fuente energética y se realiza el procedimiento definido en la fórmula de cálculo, de manera que para la unidad espacial de referencia  $j$  y el período  $t$ , se realiza la sumatoria de “producción de energía primaria” de las fuentes petróleo, gas natural, carbón mineral, residuos, hidroenergía, leña y bagazo. El indicador puede tomar cualquier valor mayor o igual a cero ( $x \geq 0$ ). La ecuación para el cálculo del indicador es la siguiente:

$$EGFP = EGp_{jt} + EGgn_{jt} + EGc_{jt} + EGr_{jt} + EGh_{jt} + EGl_{jt} + EGb_{jt} \quad (1.4)$$

Donde  $EGFP_{jt}$  es la cantidad de energía que genera el volumen explotado de las fuentes primarias de energía en la unidad espacial de referencia  $j$ , en el período  $t$ ;  $EGp_{jt}$  la cantidad de energía que genera el volumen de petróleo que ha sido extraído en la unidad espacial de referencia  $j$ , en el período  $t$ ;  $EGgn_{jt}$  la cantidad de energía que genera el volumen de gas natural que ha sido extraído en la unidad espacial de referencia  $j$  (menos el gas reinyectado), en el período  $t$ ;  $EGc_{jt}$  la cantidad de energía que genera el volumen de carbón mineral que ha sido extraído en la unidad espacial de referencia  $j$ , en el período  $t$ ;  $EGr_{jt}$  la cantidad de energía que genera el volumen de residuos aprovechado en la unidad espacial de referencia  $j$ , en el período  $t$ ;  $EGh_{jt}$  la cantidad de energía que genera la hidroenergía aprovechada en la unidad espacial de referencia  $j$ , en el período  $t$ ;  $EGl_{jt}$  la cantidad de energía que genera el volumen de leña aprovechado en la unidad espacial de referencia  $j$ , en el período  $t$ ;  $EGb_{jt}$  la cantidad de energía que genera el volumen de bagazo aprovechado en la unidad espacial de referencia  $j$ , en el período  $t$ .

La interpretación de este indicador debe realizarse a través de comparaciones entre los datos de la serie de tiempo disponible para la unidad espacial de referencia estudiada, permitiendo de esta forma la identificación de tendencias

respecto de la cantidad de energía generada por el volumen aprovechado de las fuentes de energía primaria. Su principal limitación es que no muestra por sí solo la proporción de energía primaria que es generada por cada fuente energética renovable o no renovable, pero constituye un marco de referencia que permite evaluar la situación de los recursos energéticos. La posible aplicación de este indicador en esta investigación partiría de la forma simplificada de su expresión considerándose solo el término producción de energía hidroeléctrica (PEH).

### **1.5 Modelos para la estimación de variables hidrológicas**

Los modelos son representaciones simplificadas de la realidad, de un sistema complejo, bajo una forma física o matemática, con un gran número de factores que lo componen. Estos se han convertido en la herramienta esencial del hidrólogo y del planificador de recursos hídricos, sobre todo en el dominio de la estadística y de la investigación operacional (Llamas, 1993).

La modelación matemática de la hidrología de cuenca tiene gran importancia en la interpretación de las interacciones dinámicas producidas entre los sistemas climáticos, terrestres, edafológicos, litológicos e hidrosféricos. La modelación se ha convertido en una componente fundamental del manejo integral del recurso hídrico y del medio ambiente. Como se demuestra, los modelos hidrológicos han sido aplicados de manera creciente para la solución de numerosos problemas sociales y de desarrollo que incluyen agua, energía, medio ambiente y ecología (Fattorelli y Fernández, 2011).

Los modelos de predicción se pueden categorizar en modelos dinámicos orientados por procesos y modelos estadísticos orientados por datos. Los modelos dinámicos modelan los procesos físicos involucrados; mientras que los modelos estadísticos se basan en la identificación de una vinculación estadística directa entre el predicando (variable dependiente) y ciertos predictores externos que se

consideren adecuados; básicamente son modelos que no consideran explícitamente los procesos físicos subyacentes (Talento, 2011).

Las técnicas de regresión son uno de los procedimientos más utilizados en la modelación; por medio de esta se obtienen las fórmulas matemáticas para deducir una variable de interés, lo cual se inicia midiendo la asociación lineal entre dos variables (Pedregal *et al.*, 2009). Cuando estas variables no presentan una relación lineal satisfactoria, se puede resolver este problema por medio de polinomios, o simplemente por ajuste de los parámetros mediante regresiones no lineales (OMM, 1994).

Cuando se utilizan datos no paramétricos, como los caudales, no es necesario suponer que la población sigue una distribución normal; por lo que no se requiere del tipo de cálculos que suelen necesitarse al momento de asumir una curva normal, como por ejemplo probar la heterocedasticidad, la autocorrelación y otros (Caro, 2001). Éste es el caso de la ecuación de regresión que recurre a procedimientos no paramétricos cuando los supuestos que fundamentan su análisis no se cumplen (González, 2008). Por otro lado, si el objetivo del modelo es únicamente la estimación puntual de un valor; no es necesario que se cumplan los supuestos clásicos de regresión (Pavez, 2004).

La construcción de un modelo matemático atraviesa por cuatro fases: Identificación, calibración, validación y límites de aplicación. Las etapas más importantes son la calibración y la validación. La calibración es la etapa en que se evalúan y estiman los parámetros del modelo a través de criterios deductivos y la ayuda de observaciones anteriores sobre las solicitudes y respuestas. La validación es la etapa donde se compara una respuesta teórica obtenida mediante solicitudes experimentales, versus la misma respuesta obtenida por observaciones directas (Balocchi, 2008).

La descripción espacial y temporal de variables climáticas es de gran utilidad para comprender el funcionamiento de procesos bio-físicos. La precipitación es una de las principales variables climáticas requeridas para la estimación de balances hídricos, recargas de frontera en la modelación de flujos de agua subterránea, evaluar procesos de erosión así como para definir las condiciones climáticas actuales; sin embargo, la representación espacial fiable de la precipitación, es particularmente difícil en zonas montañosas con escasa disponibilidad de estaciones climáticas en donde el efecto orográfico es grande (Huade *et al.*, 2005).

La disponibilidad de información climática de calidad es importante para el desarrollo de investigación en distintas disciplinas como la Hidrología, Agronomía, Climatología y Ecología (Leal-Nares, 2009); sin embargo, la falta de calidad en la información climática y la falta de homogeneidad en los métodos para registrarla dificulta la disponibilidad de información meteorológica para toda la cuenca (Mendoza, 2002).

La determinación de series de caudales mensuales medios en cuencas que no dispongan de estaciones hidrométricas e hidrográficas es posible mediante la aplicación de metodologías que permita la determinación de los aportes hídricos (Sarango, *et al.*, 2012).

En la actualidad se han desarrollado técnicas que permiten la aplicación de métodos estadísticos de regresión simple y múltiple combinados con los sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de obtener información climática continua en áreas donde no existen datos de estaciones meteorológicas con predicciones precisas y mínima varianza espacial (Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Pesquer *et al.*, 2007).

Cuando existe una carencia de datos pluviométricos se pueden aplicar diversos métodos para su completamiento, entre estas se encuentra la metodología para la

elaboración del balance hídrico de América del Sur (Pizarro *et al.*, 2009) y el uso de programas estadísticos y otras metodologías más complejas (Ramesh y Chandramouli, 2005). La calidad de los resultados de estos estudios es altamente dependiente de la calidad de la información disponible por los pluviómetros (Scheel *et al.*, 2011).

Los modelos digitales de precipitación (MDP) tienen diversos usos, entre otros, planificación a largo plazo, establecimiento de escenarios de cambio climático, previsiones hidrológicas, modelos hidro-químicos y estudios de impacto ambiental. Aunque algunos MDP se derivan a partir de observaciones por satélite o radar, los datos precisos suelen hallarse únicamente en localizaciones específicas, en las estaciones meteorológicas. Como resultado, el establecimiento de recursos hídricos se basa normalmente en la interpolación de estos datos puntuales (Portalés *et al.*, 2008).

En la generación de mapas de precipitación mediante métodos globales de interpolación que permiten el procesamiento de datos topográficos y geográficos han sido ampliamente utilizados en diversas partes del mundo. Estos métodos se basan en el uso de modelos estadísticos multivariados que permiten evaluar las relaciones de los datos climáticos con las variables geográficas y topográficas de las estaciones climáticas y su correlación espacial (Agnew y Palutikof, 2000; Daly *et al.*, 2002; Brown y Comrie, 2002; Ninyerola *et al.*, 2005).

La elección de métodos de interpolación para realizar los mapas de precipitación y evapotranspiración de gran utilidad en el cálculo de la recarga por infiltración mediante balance hídrico presenta el problema de la escasez de pluviómetros con series largas de datos; sin embargo, en los últimos años, diversos trabajos han demostrado los beneficios para la interpolación de datos climáticos del uso de variables geográficas relacionadas, como la altura, la cual se ha utilizado para la construcción de mapas de precipitación debido a la aparición de modelos digitales

de elevación de calidad y la característica de la precipitación que en general se incrementa con la altitud, lo que contribuye a la correlación entre ambos factores (Izquierdo y Márquez, 2006).

La predicción espacial de la precipitación media histórica de la cuenca del río Conchos fue realizada por Núñez *et al.* (2014) para cada uno de los meses del año se realizó mediante el ajuste de un modelo de regresión lineal múltiple (MRLM). Los resultados indicaron que los modelos de los meses que comprenden el período de verano (junio-septiembre) fueron los que obtuvieron coeficientes de determinación mayores con valores superiores a 0,760. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$P = \beta_0 + \beta_1 LON + \beta_2 LAT + \beta_3 ELEV + \beta_4 DEN + \varepsilon \quad (1.5)$$

Donde  $P$  es la precipitación media mensual (mm);  $LON$  la longitud;  $LAT$  la latitud representadas en el sistema de coordenadas Cónica Conforme Lambert;  $ELEV$  la elevación sobre el nivel medio del mar (m);  $DEM$  la distancia Euclidiana a la zona marítima (m);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  los parámetros de ajuste del modelo;  $\varepsilon$  el error aleatorio del MRLM.

En el pronóstico estacional se debe considerar la relevancia de las precipitaciones en el período estival, su variación tanto geográficamente como temporalmente. En caso de que esta variable continúe aportando a la generación de escorrentía en los meses de verano; entonces debe ser considerada en el balance hidrológico (Barría, 2010).

Los modelos *Altura-Área-Duración* (AAD) de precipitaciones han utilizado siempre por los hidrólogos en la planificación de proyectos de los recursos hídricos. Estas relaciones han sido muy importantes para el diseño de las estructuras hidráulicas y aún se usan actualmente porque pueden aplicarse con datos fácilmente

disponibles. En los últimos años dichos modelos han adquirido especial relevancia debido al creciente énfasis que ha tomado la planificación y manejo de las fuentes no puntuales de contaminación de la escorrentía (Guevara, 2003).

El propio autor señala que en la mayoría de las cuencas no se cuenta con suficientes estaciones de medición por lo que el hidrólogo está obligado a utilizar la poca información disponible y llevar a cabo estudios de regionalización para estimar la lluvia media sobre el área de la cuenca de interés aplicando factores de reducción de la lluvia puntual (Guevara y Cartaya, 1991).

$$P_A = P_p - \frac{[P_p \cdot A \cdot D^m]}{[a + bA]} \quad (1.6)$$

$$R_D = 100 \frac{P_A}{P_p} = m \cdot e^{-\frac{A}{n}} \quad (1.7)$$

Donde  $P_A$  es la lluvia media (mm);  $P_p$  la lluvia puntual en el centro de la tormenta (mm);  $A$  el área cubierta por la tormenta ( $\text{km}^2$ );  $D$  la duración de la tormenta ( $h$ );  $DR_D$  es el factor de reducción;  $e$  la base de los logaritmos neperianos;  $a$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$  parámetros regionales de ajuste.

El modelo de regresión lineal múltiple para la estimación de la precipitación ( $P$ ) en la cuenca del Duero a partir de la altitud ( $h$ ); la laplaciana de la altitud ( $\Delta h$ ), la distancia al mar en dirección Norte ( $D_N$ ); la distancia al mar en dirección Noroeste ( $D_{NO}$ ) mostró un coeficiente de determinación alto con valor de 0,868 (Egido *et al.*, 1985). La función matemática que relaciona las variables antes mencionadas es:

$$P = 410,79 + 0,85h - 1,26D_N - 0,95D_{NO} \quad (1.8)$$

Los modelos de regresión de parámetros de cuenca no son válidos en general para ser generalizados a otras cuencas ya que pueden presentar comportamientos muy distintos. Estos son válidos para aplicarlos individualmente, sobre la base de las características propias de cada cuenca (Potenciano, 2004).

Los caudales máximos de diseño son básicos en el dimensionamiento o revisión hidrológica de las obras hidráulicas. En sitios de interés sin información hidrométrica, su estimación se lleva a cabo con métodos regionales que permiten dimensionar con base en el caudal máximo medio anual ( $Q_{ma}$ ), el cual se estima mediante ecuaciones de regresión potencial que relacionan los valores observados de  $Q_{ma}$  con diversas características fisiográficas de las cuencas. Debido a la importancia que tiene la estimación del  $Q_{ma}$ , se justifica la búsqueda de tales regresiones con diversos planteamientos y las mejores técnicas de obtención de sus parámetros de ajuste (Campos-Aranda, 2013).

Los modelos de regresión al ser validados permiten establecer una formulación o método de cálculo para la estimación de caudales máximos de avenida, que puede servir de complemento a otros métodos hidrológicos e hidrometeorológicos ya existentes para un mejor conocimiento del funcionamiento de las cuencas fluviales, teniendo en cuenta la integración de factores geomorfológicos, litológicos y climáticos (Potenciano y Garzón, 2005). El modelo de regresión lineal múltiple que incluye la relación de relieve, la longitud del cauce principal, la impermeabilidad y la precipitación define adecuadamente el funcionamiento de las cuencas estudiadas en cuanto a la generación de caudales máximos, tanto para cuencas de tamaño pequeño y mediano. Este se escribe como:

$$Q_T = a + b.R_r + c.L_c + d.I_p + e.P_T \quad (1.9)$$

Donde  $Q_T$  es el caudal máximo para el período de retorno  $T$ ;  $R_r$  la relación de relieve;  $L_c$  la longitud del cauce principal;  $I_p$  la impermeabilidad de la cuenca;  $P_b$  la

precipitación máxima para los diferentes períodos de retorno (10, 25, 100 y 500 años).

Diferentes investigadores como Santi, Zapata, Quijano, Gete-Oncins, Fuller y CEDEX propusieron modelos empíricos potenciales del tipo  $Q_T = aA_c^b$  y  $Q_T = (c + a \cdot \log T)A_c^b$  para el cálculo de caudales de avenida en función del área de la cuenca y del período de retorno (Cea, 2008). Estos son respectivamente:

$$Q_{100} = 35.A_c^{0.5}; \quad Q_{500} = 50.A_c^{0.5} \quad (1.10)$$

$$Q_{100} = 21.A_c^{0.6}; \quad Q_{1000} = 50.A_c^{0.5} \quad (1.11)$$

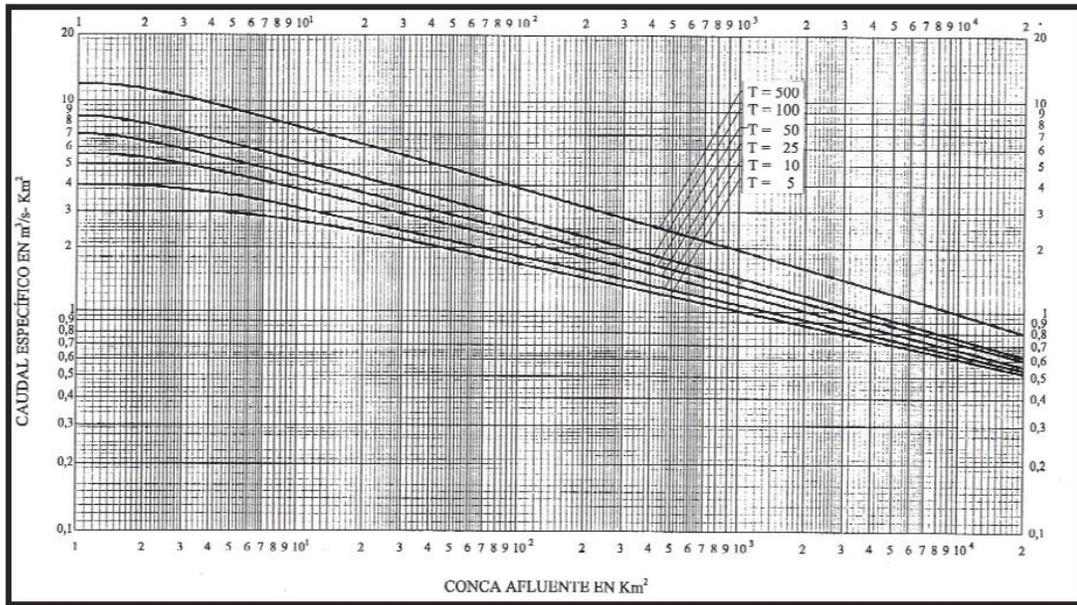
$$Q_{100} = 17.A_c^{0.666} \quad (1.12)$$

$$Q_T = (4 + 16 \log T)A_c^{0.5} \quad (1.13)$$

$$Q_T = Q_m (1 + 0,8 \log T)A_c^{0.5} \quad (1.14)$$

$$Q_T = Q_{esp} \cdot A_c \quad (1.15)$$

Donde  $Q_T$  es el caudal de avenida ( $m^3 s^{-1}$ ) para un período de retorno  $T$  (años);  $Q_m$  la media de los caudales diarios de cada año ( $m^3 s^{-1}$ );  $A_c$  área de la cuenca ( $km^2$ );  $Q_{esp}$  caudal específico ( $m^3 s^{-1} km^{-2}$ ). Este puede obtenerse en la figura 2.1 para valores de área de cuenca comprendidos entre 1 y 20 000  $km^2$  y valores de período de retorno  $T$  entre 5 y 500 años.



**Figura 1.1** Ábaco del CEDEX para la estimación del caudal específico.

La estimación del caudal de avenida para un período de retorno determinado en función del área de la cuenca y de la precipitación máxima diaria de la zona de estudio puede realizarse a través de la ecuación de Tamez. Estas expresiones matemáticas son más complejas que las anteriores; pero siguen utilizándose con frecuencia en cálculos que no requieran mucha precisión (Cea, 2008).

$$Q_T = 0,03P_T \cdot A_c^{0,75} \log T \quad (1.16)$$

Donde  $Q_T$  es el caudal punta de avenida ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $P_T$  la precipitación máxima diaria (mm) asociada a un período de retorno  $T$  (años);  $A_c$  es el área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

La estimación de los cuantiles  $Q_T$  correspondientes a diferentes períodos de retorno puede realizarse con el modelo desarrollado por Álvarez *et al.* (2001) a partir del método del Índice de Avenida. Este modelo se obtuvo por aproximación de la función de distribución mediante la Ley General de Valores Extremos (GEV) y ajuste de sus parámetros por el método de los momentos ponderados probabilísticamente a escala regional. Se comprobó su efectividad al ser utilizado

en una región de las Rías Baixas (Galicia). Los resultados fueron satisfactorios y demostraron su aplicabilidad en cuencas donde no se disponga de información hidrométrica. Los cuantiles  $Q_T$  se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_T = X_T \cdot Q_m \quad (1.17)$$

Donde  $Q_T$  es el caudal de avenida ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) para un período de retorno  $T$  (años);  $X_T$  el índice de avenida de la curva regional de frecuencia y  $Q_m$  el valor medio de las series máximas anuales ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en la cuenca considerada.

El desarrollo de investigaciones que permitan predecir el comportamiento de las crecidas resulta esencial con la finalidad de tener un mayor conocimiento de las mismas y entregar un nivel de alerta, sobre todo cuando hay riesgo de vidas humanas (González, 2008). En este sentido la predicción de crecidas se convierte en un instrumento importante en la gestión de recursos hídricos y de riesgos.

La modelación del proceso precipitación–escurrimiento (PPE) es necesaria cuando se deben estimar los recursos hídricos de un río y para ello, se puede establecer un modelo del PPE a nivel mensual. En otras situaciones como en el pronóstico de crecientes o en la estimación del impacto de descargas contaminantes, resulta indispensable la modelación del PPE a nivel diario e incluso horario (Campos-Aranda, 2014).

Existe una estrecha relación entre las precipitaciones y el caudal de un arroyo (Remenieras, 1974); pero esto no significa que ante una precipitación de intensidad determinada le corresponda un caudal igual, dado que este último está condicionado por muchos factores como la precipitación, evaporación, interceptación, transpiración, infiltración y almacenamiento directamente sobre el caudal; por lo tanto, los caudales pueden ser muy diferentes ante años de

precipitaciones semejantes; asimismo, factores de naturaleza humana influyen en la escorrentía superficial (Torrero *et al.*, 2016).

Una estrategia utilizada actualmente para la predicción de caudales mensuales o estacionales es la usualmente denominada downscaling híbrido a partir de la cual el proceso de pronóstico se realiza en dos etapas en las que se entremezclan el enfoque puramente estadístico con el puramente dinámico (Goddard *et al.*, 2001).

El volumen de agua disponible en un río y su distribución temporal son variables de gran interés para los hidrólogos y para quienes aprovechan estos recursos en sus actividades económicas, tales como; la generación hidroeléctrica y el desarrollo agropecuario. Estas variables son el producto final de todos los procesos del ciclo hidrológico; pero es necesario tener en cuenta que este ciclo depende fuertemente de las características de la zona en que se estudie la disponibilidad del recurso, pues determina que variables serán influyentes y cuáles no (Barría, 2010).

Las técnicas del balance hídrico constituyen uno de los principales objetivos en hidrología, por ser un medio para solucionar importantes problemas hidrológicos teóricos y prácticos. A partir de estos es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre. El conocimiento de la estructura del balance hídrico de lagos, cuencas superficiales y cuencas subterráneas, es fundamental para conseguir un uso más racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo. El balance hídrico ayuda en la predicción de las consecuencias debidas a cambios artificiales en el régimen de ríos, lagos y cuencas subterráneas (Sokolov y Chapman, 1981).

El ciclo hidrológico determina el estado actual del recurso hídrico; así como la presión por la demanda del mismo, teniendo en cuenta su distribución espacial y temporal, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, y que

sirva de base a los usuarios del recurso y planificadores para considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros (Ordoñez, 2011).

La variabilidad climática, el cambio climático y la variabilidad hidrológica son fenómenos diferenciados cuyos efectos sobre los recursos hídricos pueden significar, entre otras consecuencias, modificaciones en las condiciones originalmente supuestas en el diseño hidrológico de una obra hídrica. La variabilidad hidrológica se verifica cuando ocurren alteraciones sobre las principales entradas y salidas de un sistema hidrológico como precipitación, evapotranspiración y caudales (Paoli y Malinow, 2010).

### **1.6 Modelos para la estimación de variables hidroenergéticas**

La operación de una central hidroeléctrica en el corto plazo puede realizarse mediante un modelo no lineal de optimización, considerando la eficiencia técnica de las unidades de generación para el cálculo de la potencia generada. Se involucran las principales variables y restricciones de operación del sistema, se realiza un análisis de regresión estadístico para representar la eficiencia técnica de una turbina Francis como una función cuadrática de la carga neta y el caudal turbinado, se estima la relación carga-volumen para el embalse. El modelo es útil para la toma de decisiones con respecto al caudal turbinado con el objetivo de optimizar el aprovechamiento de los recursos hídricos mediante una operación eficiente (Javier y Andrés, 2009).

Este propio autor afirma que la eficiencia de la turbina puede representarse como una función, no lineal, de dos variables: la carga neta ( $H_n$ ) y el caudal turbinado ( $Q$ ) donde el procedimiento estadístico consiste en la formulación de una regresión no lineal múltiple que permite la obtención del modelo de eficiencia. La carga neta del embalse como una función cuadrática de su volumen ( $V$ ) puede representarse mediante la aplicación de un modelo de regresión polinómica de segundo grado (Javier y Andrés, 2009). Ambos casos se representan a continuación:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 H_n + \beta_2 Q + \beta_3 H_n^2 + \beta_4 Q^2 + \beta_5 H_n \cdot Q \quad (1.18)$$

$$H_n = a + b.V + c.V^2 \quad (1.19)$$

Donde  $\beta_i$ ,  $a$  y  $b$  son parámetros de ajustes de las funciones estadísticas.

Los modelos de pronóstico tradicionales han sido ampliamente usados para la toma de decisiones a nivel de producción, finanzas y energía, como se ha mencionado; tal es el caso de los modelos ARIMA, desarrollados en los años 70 por George Box y Gwilym Jenkins, los cuales incorporan características del pasado de la misma serie, acorde con su autocorrelación (Makridakis *et al.*, 2011).

También se han utilizados los modelos ARIMA estacionales multiplicativos para efectuar pronósticos a corto plazo; el modelo SARIMA y una técnica bayesiana (regresión gaussiana con simulación Monte Carlo por Cadenas de Markov). Estos modelos fueron validados mediante la medición del indicador de error absoluto medio y porcentual con datos de ajuste y de pronóstico (Andrieu *et al.*, 2003; Martin *et al.*, 2013).

### 1.7 Conclusiones parciales

- Las precipitaciones representan la única fuente de escorrentía en una cuenca hidrológica; por lo que la escasez de agua tiene una tendencia a intensificarse en el futuro, repercute de forma negativa en la disponibilidad de recursos hídricos y en la producción de alimentos en la agricultura, la cual constituye el sector más vulnerable por los efectos del cambio climático.
- La variabilidad y el cambio climático influyen fuertemente en las variables meteorológicas; induciendo alteraciones en el patrón de precipitación y en los ecosistemas de numerosos países como los de Centroamérica considerada una de las regiones más vulnerables; por lo que la gestión integrada de los

recursos hídricos constituye un elemento fundamental en el aprovechamiento de los recursos hídricos en el contexto de desarrollo sostenible.

- La productividad del agua en la agricultura es esencial para disminuir la presión sobre los recursos hídricos y mejorar las condiciones de seguridad alimentaria, las cuales puede beneficiarse con el uso de agua regenerada en la agricultura como una opción ante la escasez de agua.
- El aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos para el riego y la generación de energía eléctrica requiere de información hidrológica confiable y de una política de gestión eficiente de los procesos agronómicos, hidráulicos y energéticos basada en el uso de indicadores de sostenibilidad que incluya los aspectos relacionados con el agua en la agricultura.
- Los indicadores de sostenibilidad constituyen herramientas para el análisis de la gestión del agua, la energía y otros recursos naturales; sin embargo, todavía no existen todos los indicadores requeridos a nivel de cuencas hidrográficas; por lo que es necesario su adecuación, en función de las condiciones específicas de cada localidad, en particular las que tienen una fuerte actividad agropecuaria.
- Los modelos hidrológicos son herramientas esenciales para el manejo integral del recurso hídrico; particularmente los de regresión simple, múltiple, potencial, polinómica, multivariada y no lineal que son los más utilizados en combinación con los sistemas de información geográfica.
- La utilización práctica de los modelos estadísticos permite la generación de series de caudales mensuales en cuencas que no disponen de estaciones hidrométricas e hidrográficas y la predicción de la precipitación; pero deben ser validados antes de su aplicación.

## **2. MATERIALES Y METODOS**

En el capítulo se presentan los aspectos metodológicos relacionados con el desarrollo de la investigación. Se realiza la explicación de los procedimientos esenciales de la propuesta de una metodología para el uso sostenible del agua, la generación de diferentes modelos asociados a variables hidrológicas, hidroenergéticas e hidroagrícolas y se explican los criterios utilizados para su validación.

### **2.1 Localización del área de estudio**

La investigación se realizó en la cuenca del río Suchiate que es una corriente internacional con una longitud de 81 km, curso rápido y profundidad variable en su paso por el departamento de San Marcos en Guatemala y el estado de Chiapas en México hasta desembocar en el Océano Pacífico (figura 2.1). Este sirve de límite entre México y Guatemala con una cuenca transfronteriza que posee una extensión de 1287 km<sup>2</sup> de la cual 1064 km<sup>2</sup> están en territorio guatemalteco y 336 km<sup>2</sup> en territorio mexicano. Sus coordenadas geográficas son las siguientes: 14°31'48" de Latitud Norte y 92°13'36" de Longitud Oeste.

#### **2.1.1 Relieve**

La cuenca del río Suchiate está constituida por tres regiones con características diferentes; la zona alta se ubica entre los 4220 y 470 msnm; la zona media se extiende entre los 470 y 27 msnm y la zona baja parte de 27 hasta los 0 msnm. La fisiografía del área se clasifica como terrenos ligeramente inclinados a planos como se observa en la figura 2.2 que muestra el corte longitudinal de la cuenca del río Suchiate.



Figura 2.1 Localización de la cuenca del río Suchiate.

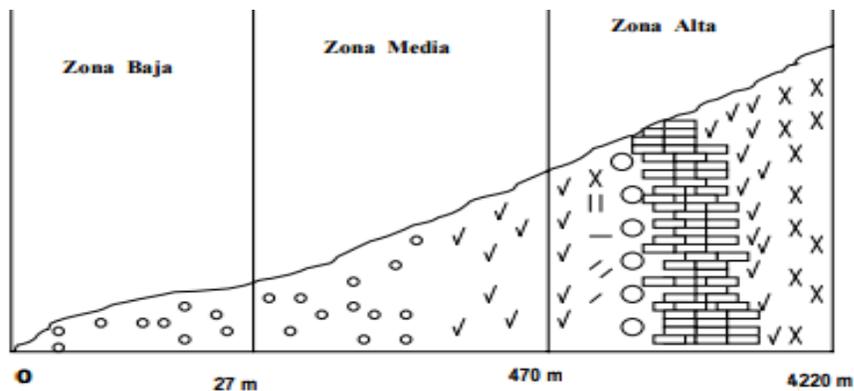


Figura 2.2 Corte longitudinal de la cuenca del río Suchiate.

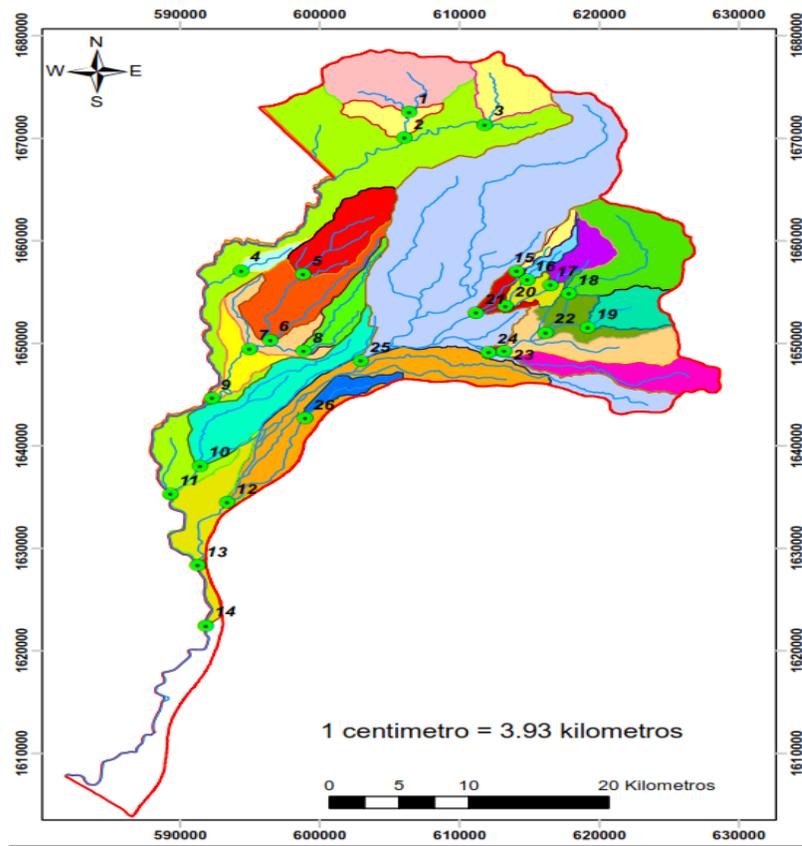
La red de drenaje se caracteriza por tener un cauce inestable que tiende a modificarse al escurrir violentamente grandes volúmenes de agua en cierta época del año impactando el suelo arenoso que compone sus márgenes sobre todo en la planicie costera.

Para lograr mayor precisión en la investigación se estudiaron un total de 26 puntos de control ubicados dentro de las tres zonas señaladas; generándose 26 subcuencas las cuales se muestran en la tabla 2.1 y figura 2.3.

**Tabla 2.1** Puntos de control ubicados en la cuenca Suchiate (subcuencas).

<b>Puntos</b>	<b>Subcuencas</b>	<b>Puntos</b>	<b>Subcuencas</b>
1	Confluencia Sibinal Sin Nombre.	14	Estación X Tecún Umán.
2	Confluencia Sibinal – Suchiate.	15	Chibuj.
3	Confluencia Suchiate – Nacimiento.	16	Las Gradadas.
4	Estacion X Malacatán.	17	Paty II.
5	Confluencia Petacalapa Sin Nombre 2.	18	Goritzia II.
6	Confluencia Petacalapa – Ixpil.	19	El Niagara.
7	Confluencia Petacalapa Sin Nombre.	20	Confluencia Río Negro Sin Nombre.
8	Confluencia Río Sin Nombre.	21	Confluencia Río Negro Sin Nombre 2.
9	Confluencia Petacalapa – Suchiate.	22	Confluencia Cabuz – Gramal.
10	Confluencia Nicá – Ixben.	23	Chayen.
11	Confluencia Suchiate – Ixben.	24	Confluencia Cabuz – Mapá.
12	Confluencia Cabuz – Gramal.	25	Malacatán.
13	Confluencia Suchiate – Cabuz.	26	Estación X Catarina.

Las áreas de estas subcuencas se construyeron mediante el proceso de delimitación cartográfica a detalle con el paquete informático ARCGIS 10.2.1 y dentro de este los programas ARCMAP, ARCCATALOG Y ARCSCENE.



**Figura 2.3** Subcuencas del río Suchiate.

## 2.2 Desarrollo de la metodología

La metodología para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola se desarrolló a partir de los resultados que se alcanzaron en este trabajo de investigación experimental. Esta consistió en la obtención de información climática, edafológica y fisiográfica existente dentro de la cuenca del río Suchiate en Guatemala; generación de la información faltante; desarrollo de modelos de regresión para las variables hidrológicas, hidroenergéticas y hidroagrícolas; así como la aplicación de la metodología en algunos casos específicos para evaluar su pertinencia y efectividad.

### 2.3 Diagnóstico de los recursos hídricos e hidroenergéticos

El diagnóstico como técnica de adquisición de información cuantitativa y cualitativa se realizó mediante diferentes herramientas con el propósito de encontrar referencias útiles para la investigación. Los métodos utilizados fueron los siguientes:

- **Análisis documental:** se consultaron diversos documentos como mapas de isoyetas, isopletras, balances hídricos, uso de la tierra (González, 1990, Herrera, 2002, IARNA-URL, 2015); cartas topográficas, edafológicas e hidrográficas digitales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50000; ortofotos correspondiente a la cuenca Suchiate del IGN a escala 1:10000; atlas climatológico e hidrológico digitales del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) a escala 1:1000000; atlas edafológicos y de uso de suelo digitales del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA) a escala 1: 1000000; Información de la base de datos climatológica del MEM; características de los suelos de Guatemala (Simmom *et al.*, 1959; Duro *et al.*, 2006; Tobías y Duro, 2013); plan de desarrollo municipal del MAGA dentro de la cuenca del río Suchiate; plan maestro de riego y drenaje agrícola de Guatemala (González, 1991; MAGA, 2013); cartera de proyectos existentes en el Instituto Nacional de Energía (INDE).
- **Métodos analíticos:** se utilizaron numerosas ecuaciones matemáticas para el cálculo de diferentes parámetros como coeficiente de transposición; longitud del tramo sobre el cauce principal del río; cota del punto de control; desnivel topográfico; pendiente del terreno; longitud real; coeficiente de proporcionalidad para estimar la longitud real; diámetro de la tubería de presión; pérdidas de carga; altura del salto bruto; altura del salto neto; potencia de la turbina; energía total producida por la central hidroeléctrica; caudal de diseño; caudal ecológico; indicador de potencia por unidad de longitud;

indicador de potencia por unidad de área; indicador de costo por unidad de área; precipitación efectiva; lámina de riego; lámina de riego neta; lámina de riego bruta; frecuencia de riego; número de riegos; indicador Suministro Relativo de Agua; indicador Suministro Relativo de Agua de Riego; indicador Suministro Relativo de Agua por Precipitaciones; indicador Uso Hidroenergético del agua respecto al Volumen de Riego e indicador Uso Hidroenergético del agua respecto al Volumen total disponible.

- **Métodos geomáticos:** se utilizaron varias herramientas como el ARCGIS 10.2.1 con sus programas ARCMAP, ARCCATALOG, ARCSCENE, *Interpolate Shape*, además del *Google Earth*, las cuales permitieron la generación de diferentes representaciones como el mapa general de la cuenca Suchiate, el mapa de la red hidrográfica, el mapa con las 26 subcuencas, el mapa con isolíneas de precipitación, el mapa de evapotranspiración potencial, el mapa de caudales de escorrentía, el mapa de coeficiente de transposición, el mapa de potencia hidráulica y el mapa de energía total producida.
- **Método de registro fotográfico:** se utilizó esta técnica sugerida por Gallego y Cid (2002) por ser de gran utilidad en la investigación de campo, porque le permite al científico la obtención de imágenes fotográficas durante el desarrollo del proceso investigativo y de nuevos conocimientos aplicados a la investigación. Este método formó parte del proceso de validación de la metodología mediante la toma de secuencias de fotografías que divulgan diferentes actividades como recorrido por la cuenca, obtención de datos fisiográficos, localización de fuentes de agua y medición de caudales para la confirmación del potencial hidráulico y energético existente en una determinada zona de estudio.
- **Análisis de la efectividad de la metodología:** se realizó para la comprobación de su eficacia a partir de la demostración de la capacidad para

la resolución de problemas relacionados con variables hidrológicas e hidroenergéticas en la cuenca del río Suchiate a partir de tres procedimientos: verificación de la validez de los modelos propuestos sustentado en pruebas de bondad de ajuste; aplicación práctica de la metodología (estudio de caso) y evaluación del impacto de la aplicación práctica de la metodología mediante avales suministradas por empresas guatemaltecas y mexicanas.

El estudio de caso correspondió al proyecto hidroenergético Sibinal-Suchiate, realizados por Sevilla (2015) en la comunidad La Unidad, del municipio de Tajumulco, Departamento de San Marcos, en respuesta a la solicitud efectuada por esta a la empresa *Enel Green Power Guatemala S.A.*, para la evaluación del potencial hidroenergético de los cauces que cruzan frente a dicha comunidad. El estudio se realizó en el cauce principal, cuyas cuencas están circunscritas a la cuenca del río Suchiate con un aprovechamiento que se extiende desde la estación 0+000 hasta la estación 0+540,00.

## **2.4 Desarrollo de modelos de regresión**

Los modelos de regresión se generaron para la estimación de las variables necesarias en el aprovechamiento sostenible del agua dentro de la cuenca del río Suchiate de forma rápida, sencilla y confiable.

### **2.4.1 Variables utilizadas en el estudio**

En la investigación se utilizaron tres grupos de variables que fueron clasificadas como: variables hidrológicas, variables hidroenergéticas y variables hidroagrícolas. Estas conformaron una serie de 32 años comprendida en el período de 1983 a 2015. La homogeneidad de las series se comprobó mediante la prueba de hipótesis a través del *test F de Fisher* para varianzas de dos submuestras según sugerencias de González *et al.* (2007).

### 2.4.1.1 Variables hidrológicas

Las variables hidrológicas estuvieron formadas por la precipitación, la evapotranspiración, la intensidad de las precipitaciones y el caudal de escorrentía, las cuales se relacionaron funcionalmente con el área de la cuenca en cada uno de los 26 puntos dentro de la cuenca Suchiate y conformaron una serie de 32 años de observaciones sistemáticas. De esta serie los datos faltantes se generaron de forma sintética con el programa *Windowgrapher*, versión 1.50 del año 2012.

Los valores de precipitación se obtuvieron de la base de datos climatológica del Ministerio de Energía y Minas (MEM); mientras que la evapotranspiración potencial se estimó por el método de Hargreave que está generalizado en Guatemala y América Central. Con esta información se calculó la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial media anual a partir de los mapas de isoyetas e isoplejas respectivamente con la utilización de las ecuaciones siguientes:

$$P_m = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{\sum A_i} \quad (2.1)$$

$$ETP_m = \frac{\sum A_i \cdot ETP_i}{\sum A_i} \quad (2.2)$$

$$I_{md} = \frac{P_{md}}{24h} \quad (2.3)$$

Donde  $P_m$  es la precipitación media anual de la subcuenca (mm);  $ETP_m$  la evapotranspiración media anual de la subcuenca (mm);  $P_i$  la precipitación media anual de en cada punto de estudio (mm);  $ETP_i$  la evapotranspiración media anual de en cada punto de estudio (mm);  $A_i$  el área de la subcuenca correspondiente a cada punto de estudio (km<sup>2</sup>);  $P_{md}$  la precipitación media diaria de la subcuenca (mm);  $I_{md}$  la intensidad media diaria de la lluvia en la subcuenca (mm d<sup>-1</sup>).

El caudal en cada una de las subcuencas se estimó a través del coeficiente de transposición Ortiz (2011), el cual se utiliza como factor de ajuste para la estimación del caudal en cada subcuenca estudiada. Se asumió como estación índice la de Malacatán por tener mayor tiempo de información y captar escorrentía del 73% de las subcuencas. Las ecuaciones empleadas fueron las siguientes:

$$Q_i = C_i \cdot Q_{ind} \quad (2.4)$$

$$C_i = \frac{A_i}{A_{ind}} \left( \frac{P_i - ETP_i}{P_{ind} - ETP_{ind}} \right) \quad (2.5)$$

Donde  $Q_i$  es el caudal diario medio anual en cada punto de estudio ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $P_i$  la precipitación media anual en cada punto de estudio (mm);  $ETP_i$  la evapotranspiración media anual en cada punto de estudio (mm);  $P_{ind}$  la precipitación media anual en la estación índice (mm);  $ETP_{ind}$  la evapotranspiración media anual en la estación índice (mm);  $A_i$  el área de la subcuenca correspondiente a cada punto de estudio ( $\text{km}^2$ );  $A_{ind}$  el área de la subcuenca correspondiente a la estación índice ( $\text{km}^2$ ).

#### **2.4.1.2 Variables hidroenergéticas**

Las variables hidroenergéticas fueron: diámetro de la tubería de presión, pérdidas de carga, altura del salto bruto, altura del salto neto, potencia de la turbina y energía total producida por la central hidroeléctrica.

#### **Determinación de la altura del salto bruto**

La obtención de los saltos brutos se realizó siguiéndose el procedimiento siguiente: determinar la longitud del tramo sobre el cauce principal del río y construir el perfil longitudinal en tres dimensiones con el paquete informático ARCGIS 10.2.1 y dentro de este los comandos *Interpolate Shape*.

El perfil obtenido se ordenó de forma decreciente y se discretizó para desniveles de 10 m en correspondencia con las longitudes parciales, lo que permitió determinar los valores acumulados de los desniveles que constituye la altura del salto bruto ( $H_b$ ). Las ecuaciones empleadas fueron las siguientes:

$$\Delta L_i = L_{i+1} - L_i \quad (2.6)$$

$$Lac_i = L_i - \Delta L_i \quad (2.7)$$

$$\Delta H_i = H_{i+1} - H_i \quad (2.8)$$

$$Hac_i = H_i - \Delta H_i = H_b \quad (2.9)$$

Donde  $L_i$  es la longitud del tramo sobre el cauce principal del río (m);  $\Delta L_i$  la longitud parcial (m);  $\Delta Lac_i$  la longitud parcial acumulada (m);  $H_i$  la cota del punto de control (m);  $\Delta H_i$  el desnivel topográfico (m);  $\Delta Hac_i$  el desnivel acumulado (m).

### **Determinación de la longitud real**

La longitud real se obtuvo a partir del procedimiento siguiente: ubicación de los sitios de cámara de carga y cámara de máquina sobre cartas topográficas digitales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50000; medición de la longitud real entre la cámara de carga y la cámara de máquina respetando el salto bruto definido previamente, determinación de la pendiente que corresponde a la tubería de presión y cálculo de un coeficiente de proporcionalidad propuesto en la investigación para la determinación de la longitud real de forma analítica. Las ecuaciones utilizadas se muestran seguidamente:

$$S_o = \frac{H_b}{L_{ac}} \quad (2.10)$$

$$K_p = \frac{L_{real}}{L_{ac}} \quad (2.11)$$

$$L_{real} = K_p \cdot L_{ac} \quad (2.12)$$

Donde  $S_o$  es la pendiente del terreno ( $\text{mm}^{-1}$ );  $H_b$  la altura del salto bruto (m);  $L_{ac}$  la longitud acumulada (m);  $L_{real}$  la longitud real (m);  $K_p$  el coeficiente de proporcionalidad para estimar la longitud real.

### **Determinación del diámetro en la tubería de presión**

El diámetro en la tubería de presión se estimó mediante la ecuación de Bondschú (Ortiz, 2011) la cual se escribe como:

$$D = 1,27 \frac{Q_D^{0,4268}}{1,3H_b^{0,1423}} \quad (2.13)$$

$$Q_D = Q_m - Q_E \quad (2.14)$$

$$Q_E = 0,10Q_m \quad (2.15)$$

$$H_n = H_b - h_f \quad (2.16)$$

Donde  $D$  es el diámetro de la tubería de presión (m);  $H_b$  la altura del salto bruto (m);  $H_n$  la altura del salto neto (m);  $Q_D$  el caudal de diseño ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $Q_m$  el caudal medio del río ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $Q_E$  el caudal ecológico del río ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $h_f$  las pérdidas de carga por fricción en la tubería (m).

### **Determinación de la potencia de la turbina y la energía total producida**

La potencia hidráulica estimada en kilovatios de la turbina se obtuvo según BUNCA (2002) a través de la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q_D \cdot H_n \cdot \eta}{1000} \quad (2.17)$$

Donde  $N$  es la potencia de la turbina (MW);  $\gamma$  el peso específico del agua ( $\text{kN m}^{-3}$ );  $Q_D$  el caudal de diseño ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $\eta$  la eficiencia de la turbina con un valor de 0,85

según Ortiz (2011);  $H_n$  la altura del salto neto (m), estimada entre el cinco y el ocho por ciento de  $H_b$  según Castro (2006).

La energía total producida por la central hidroeléctrica se determinó a partir de la ecuación siguiente:

$$E_T = \frac{8760N}{Perc(1 - F_d)/1000} \quad (2.18)$$

$$F_d = (1 - F_{ind}) \quad (2.19)$$

Donde  $ET$  es la energía total producida por la planta hidroeléctrica (MWh);  $N$  la potencia de la turbina (MW);  $perc$  el percentil según la curva de duración de caudales (100%);  $F_d$  el factor de disponibilidad;  $F_{ind}$  el factor de indisponibilidad igual al 5% acorde con las condiciones del lugar y el criterio de Ortiz (2011).

### **Determinación de indicadores de potencia**

Se determinaron tres indicadores: el indicador de potencia por unidad de longitud, el indicador de potencia por unidad de área según Ortiz (2011) y el indicador de costo por unidad de área que es un nuevo indicador propuesto en esta investigación; para ellos se utilizaron las ecuaciones siguientes:

$$IP_L = \frac{N}{L} \quad (2.20)$$

$$IP_A = \frac{N}{A} \quad (2.21)$$

$$IC_A = \frac{I_F \cdot N}{A} \quad (2.22)$$

Donde  $IP_L$  es indicador de potencia por unidad de longitud ( $MW\ km^{-1}$ );  $IP_A$  el indicador de potencia por unidad de área ( $MW\ km^{-2}$ );  $IC_A$  el indicador de costo por unidad de área ( $M\$ km^{-2}$ );  $I_F$  es un índice de costo ( $M\$ MW^{-1}$ ).

### 2.4.1.3 Variables hidroagrícolas

Las variable hidroagrícolas consistieron en: evapotranspiración del cultivo de referencia, precipitación efectiva, lámina de riego, lámina de riego neta, lámina de riego bruta, frecuencia de riego, número de riegos, volumen de agua para el riego. Estas se generaron a través del estudio realizado en la subcuenca “Confluencia Negros-Sin Nombre1” (punto 8). En esta zona el área destinada para la actividad agrícola ocupa una superficie total de 18,41  $km^2$  donde los cultivos fundamentales son café (85%), hule (10%), pastos cultivados (2%), maíz (2,7%) y frijol (1,3%); pero el riego sólo se realiza en estos dos últimos cultivos y se emplea el riego por gravedad con una eficiencia de 40% según Avendaño, (2007).

En la subcuenca el suelo predominante es el de la serie Suchitepéquez (Sx) que ocupa el 67% del área. Este tipo se correlaciona con un Alisol de la WRB (IUSS, 2007). Sus propiedades hidrofísicas fundamentales se presentan en la tabla 2.2 según estudios realizados en Guatemala por González (1991).

**Tabla 2.2** Propiedades hidrofísicas del suelo.

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad del suelo, $\rho$ ( $g\ cm^{-3}$ )	1,43
Capacidad de campo, $CC$ (% bss)	26,7
Punto de marchites permanente, $PMP$ (% bss)	12,6
Nivel de agotamiento Permisible, $NAP$ (%)	55,0

La lluvia efectiva se determinó por medio de la ecuación empíricas propuesta por la (FAO, 1993), la evapotranspiración del cultivo de referencia por el método de Hargreave (Herrera, 2002; Herrera y Brown, 2011) por ser la más representativa de Guatemala, la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) mediante la ecuación de

(Allen *et al.*, 1998) y el nivel de descenso tolerable acorde con las sugerencias de OCW UPM, (2007).

En el caso del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) por la carencia de información sobre este parámetro fue necesario analizar los resultados encontrados por Erazo (2005); De León y Antón (2007) y González (2012) en estudios realizados por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales del Salvador, la Universidad de San Carlos y la Universidad Agrícola Panamericana Zamorano en los departamentos de Jutiapa, Escuintla, Petén, Cobán, Quetzaltenango, Zacapa y Huehuetenango. Estos se exponen en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Coeficiente  $K_c$  de los cultivos de maíz y frijol.

<b>Cultivo</b>	<b><math>K_{cini}</math></b>	<b><math>K_{cdes}</math></b>	<b><math>K_{cmed}</math></b>	<b><math>K_{cfin}</math></b>
Maíz	0,50	0,80	1,15	0,70
Frijol	0,40	0,80	1,05	0,35

Las ecuaciones utilizadas en la determinación de las necesidades hídricas del cultivo fueron las siguientes:

$$P_e = 0,60P - 10 \quad \text{si } P \leq 75 \text{ mm} \quad (2.23)$$

$$P_e = 0,80P - 25 \quad \text{si } P > 75 \text{ mm}$$

$$L_r = \frac{NAP \cdot (CC - PMP) \rho \cdot P_r}{10} \quad (2.24)$$

$$L_n = L_r - P_e \quad (2.25)$$

$$L_b = \frac{L_r}{\eta} \quad (2.26)$$

$$F_r = \frac{L_r}{ET_c} \quad \text{Si } P_e \geq L_r; \quad L_n = 0 \quad (2.27)$$

$$N_r = \frac{d_m}{F_r} \quad \text{Si } F_r = 0; \quad N_r = 0 \quad (2.28)$$

$$V_R = \left( \frac{\sum L_b}{1000} \right) N_r \cdot A_c \quad (2.29)$$

Donde  $P$  es la precipitación media mensual (mm);  $P_e$  la precipitación efectiva (mm);  $L_r$  la lámina de riego (mm);  $NAP$  el nivel de agotamiento permisible (0,55-0,80);  $CC$  la capacidad de Campo (%bss);  $PMP$  el punto de marchitez permanente (%bss);  $\rho$  la densidad del suelo (g cm<sup>3</sup>);  $P_r$  la profundidad de raíces (cm);  $L_n$  la lámina de riego neta (mm);  $L_b$  la lámina de riego bruta (mm);  $\eta$  la eficiencia del sistema (%);  $F_r$  la frecuencia de riego (días);  $N_r$  el número de riegos;  $d_m$  el número de días en el mes;  $V_R$  el volumen de agua para el riego (m<sup>3</sup>);  $A_c$  el área de riego del cultivo (m<sup>2</sup>).

#### 2.4.2 Validación de los modelos de regresión

A partir de las variables obtenidas se generaron diferentes modelos de regresión con la utilización de los programas informáticos CurveExpert 1.34; SAMS Versión 2009 e HidroEsta 2 Versión 2012 (Villón, 2012). La validación se realizó con datos utilizados para la estimación de los modelos (período 1983-2015) y el pronóstico con datos del año 2016, mediante el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) que es el indicador más recomendado para medir la fiabilidad del modelo (Vicente-Serrano et al., 2003; Ninyerola et al., 2005) y el Error Porcentual Medio ampliamente utilizado para medir el desempeño de los modelos (Zúñiga y Jordán, 2005). Este se define como:

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{obs} - y_{sim})^2}{y_{obs}} 100 \quad (2.30)$$

Donde  $EPM$  es el Error Porcentual Medio (%);  $n$  el número de datos de la serie;  $y_{obs}$  la variable observada;  $y_{sim}$  la variable simulada.

## 2.5 Indicadores de sostenibilidad para el uso del agua y la energía

Los indicadores de sostenibilidad para el uso del agua en la irrigación fueron los siguientes: Suministro Relativo de Agua por Precipitaciones; Suministro Relativo de Agua y Suministro Relativo de Agua de Riego según (Roldán *et al.*, 2010).

$$SRP = \frac{P}{ETc} \quad (2.31)$$

$$SRA = \frac{L_b + P}{ETc} \quad (2.32)$$

$$SRR = \frac{L_b}{ETc - P} \quad (2.33)$$

Donde *SRP* el indicador Suministro Relativo de Agua por Precipitaciones; *SRA* el indicador Suministro Relativo de Agua; *SRR* el indicador Suministro Relativo de Agua de Riego;  $L_b$  la lámina de riego bruta (mm);  $P$  la precipitación (mm);  $ETc$  la evapotranspiración del cultivo (mm).

La gestión del riego a partir de estos indicadores se clasificó según Roldán *et al.* (2010) para cada cultivo en tres categorías: deficitaria ( $> 0,80$ ), adecuada ( $0,80 - 1,0$ ) y en exceso ( $> 1,0$ ).

Se propusieron además dos nuevos indicadores para evaluar el uso del agua en la generación de hidroenergía: denominado índice del Uso Hidroenergético del agua respecto al Volumen de Riego y Uso Hidroenergético del agua respecto al Volumen total disponible. Estos se calcularon como:

$$UHR = \frac{V_H}{V_R} \quad (2.34)$$

$$UHT = \frac{V_H}{V_T} \quad (2.35)$$

$$V_H = Q_D \cdot T_f \quad (2.36)$$

$$T_f = 86400 \cdot N_R \quad (2.37)$$

$$V_T = P \cdot A_c \quad (2.38)$$

Donde  $UHR$  es el indicador Uso Hidroenergético del agua respecto al volumen de Riego;  $UHT$  el indicador Uso Hidroenergético del agua respecto al volumen Total disponible;  $V_H$  el volumen de agua para la generación hidroeléctrica ( $m^3$ );  $Q_D$  el caudal de diseño ( $m^3 \text{ s}^{-1}$ );  $T_f$  el tiempo de funcionamiento de la central hidroeléctrica (s) en el tiempo similar en que funciona el sistema de riego;  $P$  la precipitación (m);  $A_c$  el área de riego del cultivo ( $m^2$ ).

## 2.6 Evaluación económica

La evaluación económica se basó en la determinación del efecto económico que generó la aplicación de la metodología propuesta (MP) respecto a la metodología tradicional (MT) acorde con la ley 81 del medio ambiente de Cuba. Se consideraron siete gastos fundamentales que intervinieron en el estudio: gasto por medición de variables hidrológicas y meteorológicas ( $G_{med}$ ); gasto por trabajo de gabinete ( $G_{gab}$ ); gasto por información temática y geoespacial ( $G_{tg}$ ); gasto por uso de bases de datos ( $G_{dat}$ ); gasto por uso software profesionales ( $G_{soft}$ ); gasto por visitas de campo ( $G_{camp}$ ); gasto por consumo de combustible y lubricante ( $G_{cl}$ ). De esta manera el gasto total se determinó con la ecuación siguiente:

$$GT = G_{med} + G_{gab} + G_{tg} + G_{dat} + G_{soft} + G_{camp} + G_{cl} \quad (2.39)$$

Siendo:

$$G_{med} = N_{obs} \cdot S_{obs} \quad (2.40)$$

$$G_{gab} = S_{gab} \cdot T_{gab} \cdot G_{imp} \cdot G_{dp} \quad (2.41)$$

$$G_{ig} = G_{dib} + G_{hc} + G_{atl} + G_{ortof} + G_{MET} \quad (2.42)$$

$$G_{camp} = S_{camp} \cdot T_{camp} + S_{viat} \quad (2.43)$$

$$G_{cl} = COST_{comb} \cdot V_{comb} + COST_{lub} \cdot V_{lub} \quad (2.44)$$

$$V_{comb} = IC_{comb} \cdot D \quad (2.45)$$

$$V_{lub} = 0,03 \cdot V_{comb} \quad (2.46)$$

Donde:  $N_{obs}$  ese número de observadores;  $S_{obs}$  el salario devengado por un los observadores en el período de estudio (\$);  $S_{gab}$  el salario horario devengado por el profesional en el trabajo de gabinete (\$ h<sup>-1</sup>);  $T_{gab}$  el tiempo utilizado en el trabajo de gabinete (h);  $G_{imp}$  gasto por impresión (\$);  $G_{dp}$  gasto por derecho profesional (\$);  $G_{dib}$  gasto por dibujo (\$);  $G_{hc}$  gasto por hojas cartográficas (\$);  $G_{atl}$  gasto por atlas (\$);  $G_{ortof}$  gasto por ortofotos (\$);  $G_{MET}$  gasto por modelo de elevación del terreno (\$);  $S_{camp}$  el salario horario devengado por el profesional en el trabajo de campo (\$ h<sup>-1</sup>);  $T_{gab}$  el tiempo utilizado en el trabajo de campo (h);  $S_{viat}$  el salario devengado por el profesional por concepto de viático (\$);  $COST_{comb}$  el costo del combustible (\$ L<sup>-1</sup>);  $COST_{lub}$  el costo del lubricante (\$ L<sup>-1</sup>);  $IC_{comb}$  el índice de consumo de combustible (L km<sup>-1</sup>);  $V_{comb}$  el volumen de combustible (L);  $V_{lub}$  el volumen de lubricante (L);  $D$  la distancia recorrida en el trabajo de campo (km).

La determinación del efecto económico (EE) se realizó a partir de la aplicación de la ecuación sugerida por Aspiolea (2007) y Casanova (2007) la cual al ser adaptada a las características de la investigación se reescribió como:

$$EE = GT_{MT} - GT_{MP} \quad (3.39)$$

Donde  $GT_{MT}$  y  $GT_{MP}$  son los gastos correspondientes a la metodología tradicional y la metodología propuesta respectivamente.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSION**

En este capítulo se exponen los resultados fundamentales de la investigación, los cuales comprenden el desarrollo de una nueva metodología para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola en la cuenca del río Suchiate de Guatemala. Se analizaron los resultados del diagnóstico a partir de la información existente y la generada mediante el cálculo analítico. Se propusieron 24 modelos de regresión de tipo polinomial de tercer orden, lineal simple, lineal múltiple, potencial y potencial múltiple, se determinaron indicadores de potencia y de costo por unidad de área; así como Indicadores de sostenibilidad del agua y la hidroenergía. Finalmente se demostraron que la metodología propuesta es pertinente para su aplicación en empresas de Guatemala con resultados satisfactorios.

#### **3.1 Desarrollo de la metodología**

La metodología desarrollada proporciona a los especialistas y decisores de una herramienta que permite el uso eficiente del agua; su sostenibilidad a corto, mediano y largo plazo; la lucha contra la escasez de agua; la protección de los ecosistemas y el mejoramiento del ambiente; lo que da una respuesta acertada a la carencia de una metodología con enfoque de integralidad a nivel de cuenca hidrográfica.

##### **3.1.1 Fundamentación de la metodología**

La metodología propuesta se fundamenta en el hecho que el agua es un recurso natural renovable que desempeña un papel básico en el mantenimiento de los ecosistemas con desequilibrios y carencias de criterios de sostenibilidad como ocurre en la cuenca del río Suchiate en Guatemala; por otra parte, la demanda de

agua en esta cuenca hidrográfica está condicionada por diferentes procesos productivos entre los que se destacan el abastecimiento de agua potable, la seguridad alimentaria y la generación hidroenergética. Teniendo en cuenta que en el área de estudio existen abundantes recursos hídricos que favorece la producción agrícola e hidroeléctrica; pero la vulnerabilidad socioeconómica y ambiental, la pobre gestión de los recursos hídricos y los impactos negativos debido a la variabilidad del clima, no contribuyen al uso integral y sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola.

### **3.1.2 Objetivo de la metodología**

El objetivo de la metodología es utilizar de forma sostenible los recursos hídricos de la cuenca del río Suchiate en el riego agrícola y la producción hidroenergética.

### **3.1.3 Procedimientos de la metodología**

La metodología propuesta está estructurada en tres procedimientos principales los cuales mantienen una relación dinámica y sistémica para la utilización sostenible de los recursos hídricos de la cuenca del río Suchiate en el riego agrícola y la producción hidroenergética (figura 3.1). Los procedimientos antes señalados son los siguientes:

- I. Diagnóstico.
- II. Modelación de variables hidrológicas, hidroenergéticas e hidroagrícolas.
- III. Indicadores de sostenibilidad.

#### **I: Diagnóstico**

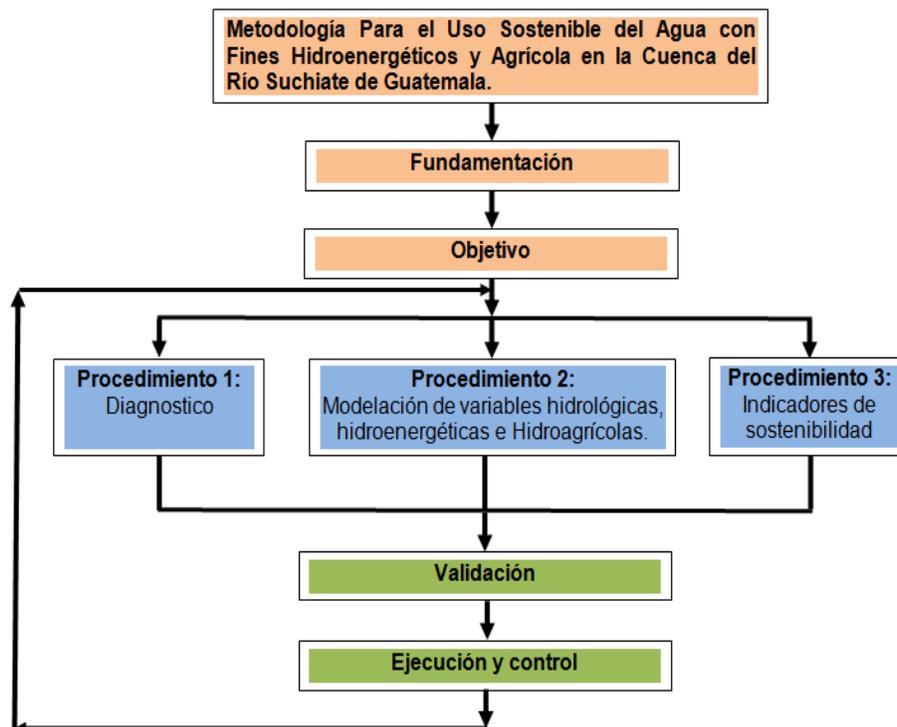
Este procedimiento es fundamental para la obtención de la información existente y la generación de nuevos datos relacionados con el recurso hídrico y su utilización productiva en la cuenca hidrográfica. Es la parte que permite generar las series de variables para su posterior aplicación en el desarrollo de modelos estadísticos matemáticos.

## II: Modelación de variables hidrológicas, hidroenergéticas e hidroagrícolas

Este procedimiento consistió en el desarrollo de modelos de regresión mediante técnicas estadísticas con el propósito de estimar las variables necesarias que permitan el aprovechamiento sostenible del agua en el riego de los cultivos y la generación de hidroenergía sin provocar conflictos en su aprovechamiento productivo. Constituye el núcleo base de la metodología propuesta por que genera una familia de modelos asociados a variables de tipo hidrológicas, hidroenergéticas e hidroagrícolas.

## III: Indicadores de sostenibilidad

En este procedimiento se determinaron indicadores que justifican el uso sostenible del recurso hídrico basado en el aprovechamiento eficiente del agua para el riego y la generación hidroenergética.



**Figura 3.1** Esquema de la metodología para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola en la cuenca del río Suchiate de Guatemala.

La metodología propuesta cuenta además con la fase de validación; así como ejecución y control, las cuales permiten el perfeccionamiento continuo de la metodología a través de la aplicación de instrumentos para la comprobación de los impactos producto como resultado de su aplicación práctica y el cumplimiento de las normas establecidas para el uso del agua en cuencas hidrográficas con fines de irrigación y generación de energía eléctrica.

La comparación de la metodología propuesta con otras existentes como la de Aparicio *et al.* (2006), del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, revela que existen puntos de similitud en la parte diagnóstica en cuanto al aprovechamiento de la información existentes a partir del uso de cartas digitales de tipo topográficas, edafológicas, uso de suelo; así como de la información climatológica e hidrométrica para el desarrollo del cálculo del balance de agua superficial, la evaporación y el escurrimiento.

La diferencia radica en que de la metodología de Aparicio *et al.* (2006) a pesar de sustentarse en un balance hídrico integrado, presenta un enfoque fundamental hacia la determinación del volúmenes de agua para el consumo, las pérdidas en redes de agua potable, el balance de agua subterránea, la infiltración y la recarga de lluvia; sin embargo, no tiene en cuenta el volumen de agua para las actividades de irrigación y la generación de hidroenergía; así como la utilización de indicadores para la evaluación de la sostenibilidad del agua en cuencas hidrográficas.

### **3.2 Análisis de los resultados del diagnóstico**

El diagnóstico realizado en la investigación permitió estimar y sistematizar datos necesarios los cuales se integraron en la metodología propuesta para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola en la cuenca del río Suchiate de Guatemala.

### 3.2.1 Análisis de las variables hidrológicas

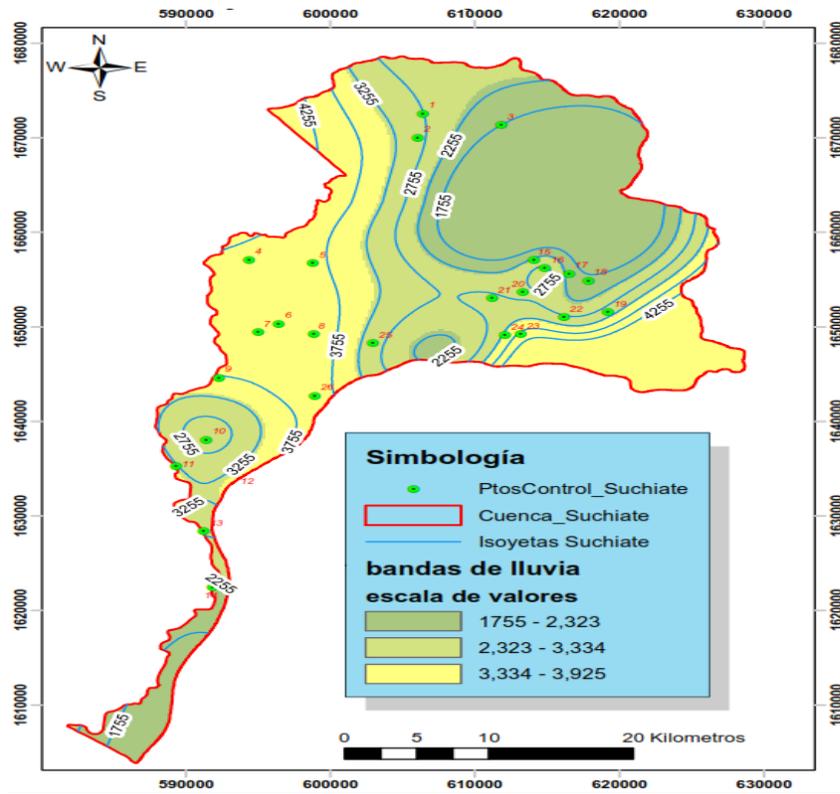
En las tablas 3.1 se muestra la superficie, la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial media correspondiente a las 26 subcuencas estudiadas en la cuenca del río Suchiate, las cuales ocupan un área total de 4459,6 km<sup>2</sup>, donde la subcuenca de menor tamaño es la de Chibuj (punto 15) con 5,5 km<sup>2</sup> y la más extensa la Estación X Tecún Umán (punto 14) con 1017,1 km<sup>2</sup>.

En esta área el valor promedio de la precipitación y la evapotranspiración potencial es de 3066,2 mm y 1255,3 mm respectivamente con una desviación estándar de 693,7 y 270,7 mm respectivamente con un coeficiente de variación de 22,6% y 21,5% respectivamente, los cuales se consideran aceptables para estas variables; pues en otras localidades como la de Bahía Blanca en Argentina se han encontrados valores entre 62 y 110% (Mormeneo y Díaz, 2003).

**Tabla 3.1** Superficie, precipitación y evapotranspiración potencial.

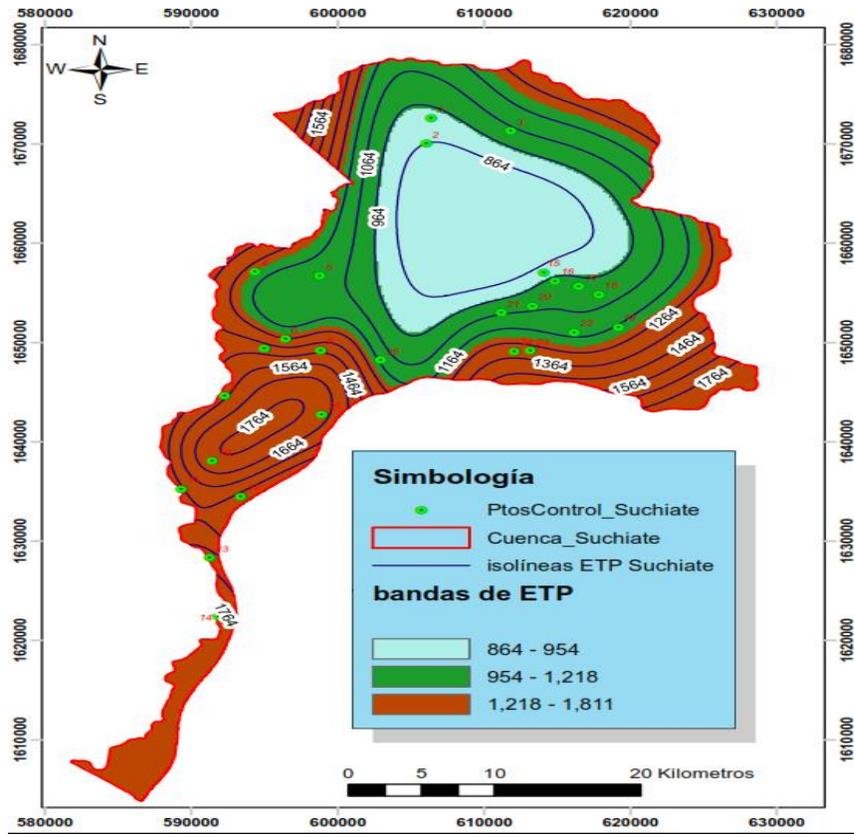
Puntos	A (km <sup>2</sup> )	P <sub>m</sub> (mm)	ETP <sub>m</sub> (mm)	Puntos	A (km <sup>2</sup> )	P <sub>m</sub> (mm)	ETP <sub>m</sub> (mm)
1	46,8	2766,6	926,9	14	1017,1	2155,2	1811,2
2	57,8	2898,4	863,7	15	5,5	2361,5	913,12
3	24,6	1755,3	1043,2	16	6,0	2807,0	982,9
4	6,3	4101,4	1217,0	17	14,4	2104,0	992,5
5	34,4	3865,9	1107,2	18	53,2	1892,4	1018,5
6	72,9	3925,0	1274,5	19	19,4	3024,3	1175,6
7	109,4	3915,3	1409,7	20	29,9	2698,1	1042,8
8	18,5	3987,9	1436,7	21	42,8	2812,6	1052,6
9	126,1	3717,5	1551,0	22	91,8	2832,8	1139,7
10	52,8	2570,9	1723,1	23	123,4	3863,4	1300,0
11	435,4	3295,3	1451,8	24	33,0	3333,2	1317,9
12	549,1	3341,8	1433,8	25	467,2	2994,5	1147,00
13	1012,7	2827,0	1604,9	26	9,1	3874,2	1700,0

En la figura 3.2 se comprueba que los valores más elevados de precipitación se encuentran en la parte media de la cuenca; sin embargo, en la parte baja la precipitación puede descender en algunos puntos hasta valores inferiores a 1800 mm.



**Figura 3.2** Isoyetas media anuales ( $P_m$ ) en la cuenca del río Suchiate.

En la figura 3.3 se presenta el comportamiento de la evapotranspiración potencial. Se observa que los valores más elevados se presentan en la parte baja de la cuenca. Esto ocurre también en una franja muy estrecha que bordea la parte media y alta. En la parte media aparecen valores intermedios que van de 954 hasta 1218 mm. En la cabecera de la cuenca se manifiestan los menores valores que como promedio llega a ser de 864 mm.



**Figura 3.3** Isopletas media anual ( $ETP_m$ ) en la cuenca del río Suchiate.

El análisis puntual del comportamiento de las variables precipitación y evapotranspiración potencial en las tres partes de la cuenca Suchiate se muestra en la tabla 3.2, donde se observa que la precipitación se incrementa desde la parte baja con 2774,6 mm hacia la parte media con 3536,5 mm; luego desciende hasta 2592,1 mm en la parte alta. En el caso de la evapotranspiración potencial se produce un incremento notable desde la parte alta con 1006,6 mm hacia la parte baja de la cuenca donde alcanza un valor de 1665,3 mm. La comparación entre estas dos variables del ciclo hidrológico indica que la precipitación supera a la evapotranspiración en 2,6; 2,5 y 1,7 veces en las partes y alta, media y baja de la cuenca respectivamente por lo que hay superávit hídrico.

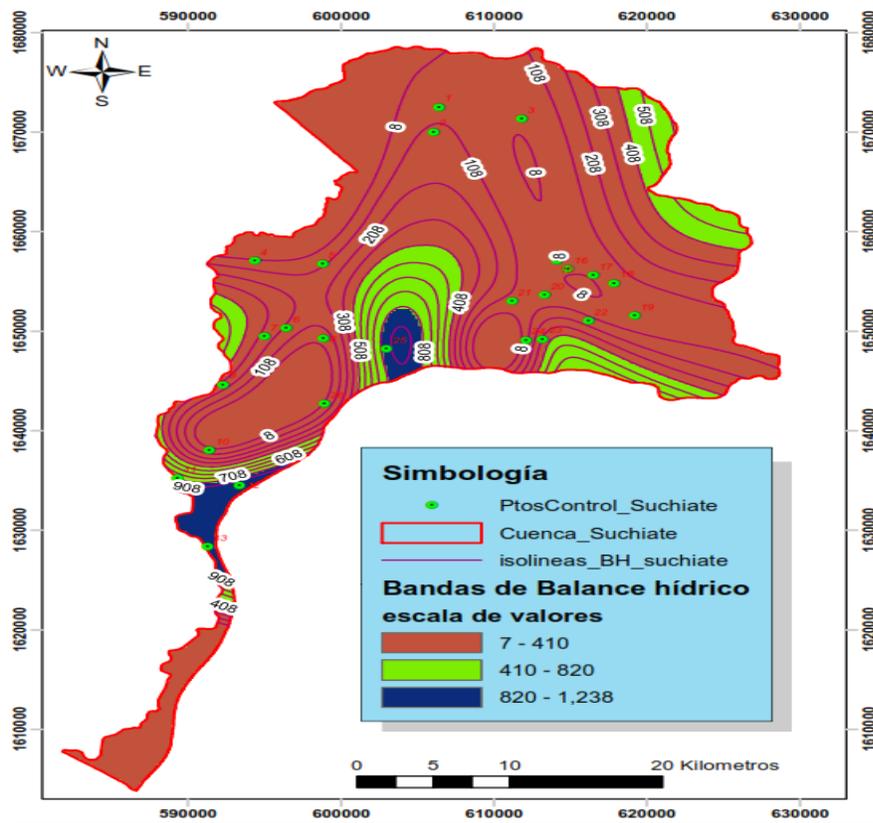
**Tabla 3.2** Valores promedio de precipitación y evapotranspiración potencial.

<b>Parte de la cuenca</b>	<b><math>P_m</math> (mm)</b>	<b><math>ETP_m</math> (mm)</b>
Alta	2592,1	1006,6
Media	3536,5	1392,3
Baja	2774,6	1665,3

En la tabla 3.3 se presenta el balance hídrico en las 26 subcuencas analizadas en el río Suchiate, el cual permite la obtención del volumen de agua disponible para su utilización productiva. Este varía entre 7,97 a 1047,68 millones de metros cúbicos anualmente, donde los volúmenes más elevados se encuentran focalizados en dos puntos de la parte baja y media en un rango de 820 a 1238.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (figura 3.4), los volúmenes medios representan también un porcentaje pequeño en la parte media y alta de la cuenca en el entorno de 410 a 82010<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Los volúmenes más bajos de agua disponible están en la parte alta, media y baja con valores comprendidos entre 7 a 410.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> y constituye más del 80% del volumen total.

**Tabla 3.3** Balance hídrico en las subcuencas objeto de estudio.

<b>Puntos</b>	<b><math>B_H</math> (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Puntos</b>	<b><math>B_H</math> (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	86,09	<b>14</b>	349,88
<b>2</b>	117,61	<b>15</b>	7,97
<b>3</b>	17,52	<b>16</b>	10,94
<b>4</b>	18,17	<b>17</b>	16,01
<b>5</b>	94,90	<b>18</b>	46,49
<b>6</b>	193,22	<b>19</b>	35,86
<b>7</b>	274,11	<b>20</b>	49,49
<b>8</b>	47,20	<b>21</b>	75,33
<b>9</b>	273,20	<b>22</b>	155,43
<b>10</b>	44,76	<b>23</b>	316,32
<b>11</b>	802,66	<b>24</b>	66,50
<b>12</b>	1047,68	<b>25</b>	863,15
<b>13</b>	1237,62	<b>26</b>	19,79



**Figura 3.4** Isolíneas de balance hídrico anual en la cuenca del río Suchiate.

Este volumen de agua disponible en la cuenca debe ser manejado de forma sostenible; pues la cantidad de agua requerida para el riego de los cultivos agrícolas o para la generación hidroenergética es el recurso limitante que indicará cuando, cuanto y como debe ser aprovechado el recurso disponible para que la actividad productiva se desarrolle de forma adecuada sin causar daños en el ecosistema.

En relación con el estudio del balance hídrico Sokolov y Chapman (1981); así como Ordoñez (2011) confirmaron la importancia de esta variable para la evaluación cuantitativa de los recursos de agua y su uso más racional en el espacio y en el tiempo, lo que permite mejorar el control y la redistribución de los mismos.

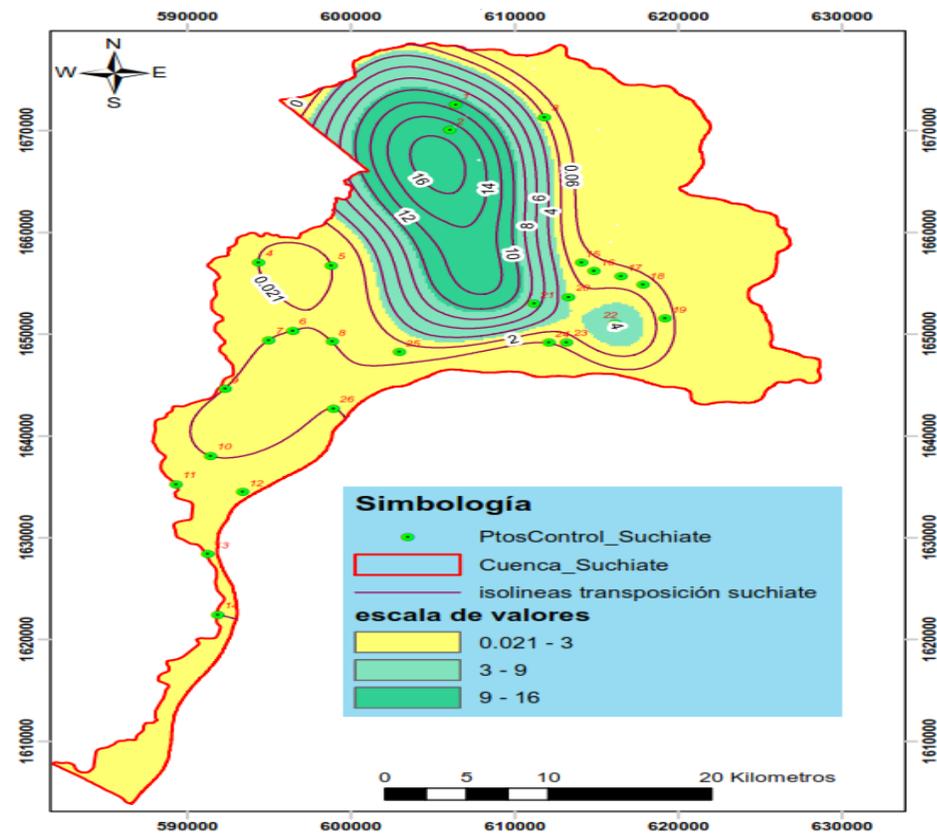
En la tabla 3.4 se exponen los valores del coeficiente de transposición. Se observa que aparecen valores unitarios en los puntos 15, 16, 17, 18, 19, 23 y 25 que corresponden a las estaciones hidrométricas de Chibuj, Las Gradadas, Paty II, Goritzia II, El Niágara y Malacatán. En estas no fue necesario la determinación de este coeficiente porque disponen de suficiente información multianual.

En la figura 3.5 se observa que este coeficiente alcanzó valores de 0,021 a 10,92; correspondiendo los más elevados a la parte alta y media de la cuenca en el entorno de 9 a 16 y de 3 a 9. El área restante que es mayoritaria, el valor de C está entre 0,021 a 3.

Estudios realizados por Duitama y Moreno (2015) permitieron la estimación del caudal en la cuenca media del río Magdalena de forma acertada a partir del coeficiente de transposición que alcanzó valores entre 0,53 y 6,40 en función de las características fisiográficas y climáticas del lugar.

**Tabla 3.4** Coeficiente de transposición y caudal.

<b>Puntos</b>	<b>C</b>	<b>Q<sub>m</sub> (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Puntos</b>	<b>C</b>	<b>Q<sub>m</sub> (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>
1	10,920	2,7	14	0,405	8,6
2	15,400	3,9	15	1,000	0,3
3	2,220	0,6	16	1,000	0,5
4	0,021	0,5	17	1,000	0,6
5	0,110	2,3	18	1,000	1,8
6	0,224	4,8	19	1,000	0,9
7	0,318	6,8	20	3,084	1,8
8	0,055	1,2	21	6,864	3,2
9	0,317	6,8	22	4,341	4,0
10	0,052	1,1	23	1,000	4,5
11	0,930	19,8	24	0,344	1,5
12	1,214	25,9	25	1,000	21,3
13	1,434	30,6	26	0,023	0,5



**Figura 3.5** Isolíneas de coeficiente de transposición.

En la propia tabla 3.4 se muestran los valores del caudal en los diferentes puntos de la cuenca Suchiate, en la que se observa que el valor máximo es de  $30,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y el mínimo de  $0,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; su valor promedio es de  $6,02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  con una desviación estándar de  $8,46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; por lo que el coeficiente de variación es elevado con 140,5%. Este comportamiento es similar al encontrado por Martínez *et al.* (2012) en estudios realizados en el río Aconcagua de Chile Central, donde demostró la existencia de una alta variabilidad en el comportamiento histórico de los caudales con fluctuaciones importantes entre los valores mínimos y máximos históricos; así como entre períodos estacionales.

Por su parte Lauro *et al.* (2016) encontraron la presencia de no homogeneidad en las series de caudales en cuencas de la región de Cuyo, Argentina la cual está

asociada a múltiples factores de origen natural o antrópicos, lo cual ayuda a la detección de cambios en el régimen de escurrimiento a largo plazo que es fundamental para la planificación de los recursos hídricos.

En ese mismo sentido Serrano *et al.* (2010) en estudios realizados sobre la respuesta hidrológica de la cuenca de San Salvador relacionado con los distintos procesos que intervienen en la generación de crecidas, encontraron que esta variable hidrológica presentó una marcada estacionalidad con valores picos que oscilan entre  $0,20 \text{ L s}^{-1}$  y  $470 \text{ L s}^{-1}$ .

En la figura 3.6 se comprueba que esta variable presenta un comportamiento lógico acorde con el funcionamiento de la cuenca en términos de captación hídrica. Los valores más elevados se alcanzaron en la parte media y baja de la cuenca.

Este resultado permite caracterizar el comportamiento del caudal y aporta al mismo tiempo una valiosa información sobre la cantidad de agua que fluye por el sistema de drenaje desde el punto de vista espacial y temporal en la cuenca del río Suchiate. Estudios sobre el caudal desarrollados por Montelongo *et al.* (2008) en la cuenca del río Tula en México confirmaron que esta variable hidrológica permite el manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos y contribuye a promover la conservación del agua y del medio natural e impulsa además su utilización adecuada en sectores que necesitan del recurso hídrico para poder desarrollarse.

El estudio presentado sobre el caudal confirma la necesidad de conocer el comportamiento de esta variable; debido a que la mayoría de los ríos presentan un alto grado de alteración por las presiones antropogénicas a las que se han sometido, como resultado del manejo inadecuado y desordenado de la cuenca (De la Lanza *et al.*, 2012).

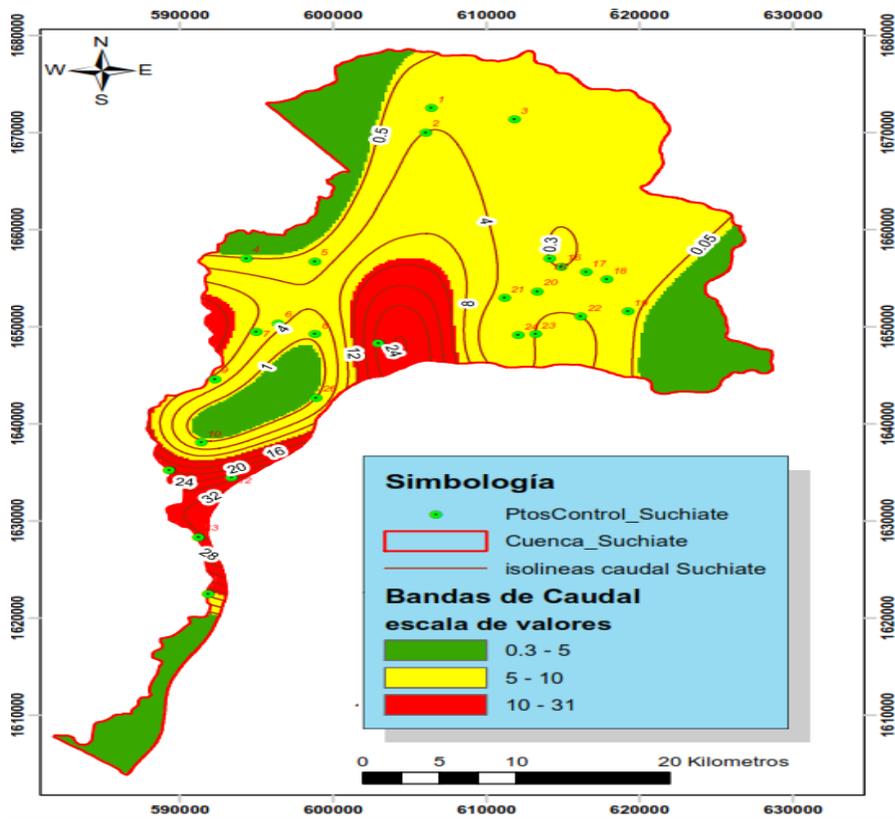


Figura 3.6 Isolíneas de caudal medio diario anual.

### 3.2.2 Análisis de las variables hidroenergéticas

En las tablas 3.5, 3.6 y 3.7 se presentan los valores de las principales variables utilizadas en la generación de modelos para la estimación de variables hidroenergéticas. Se observa que las alturas de salto bruto están comprendidas entre 8,3 a 465,0 m, las longitudes reales de tuberías entre 832 y 11 600 m con diámetros que fluctúan entre 0,23 y 2,94 m. Estas variables son necesarias para la estimación posterior de la potencia que puede ser instalada en los proyectos hidroeléctricos.

En la tabla 3.8 se evidencia que la longitud real necesaria para transportar el agua desde el punto de ubicación de la cámara de carga hasta la cámara de maquina se incrementa desde la parte alta hacia la media y la baja con valores de 3,3; 5,4 y 6,8 km respectivamente.

En la tabla 3.9 se presentan los resultados del coeficiente de proporcionalidad para la estimación de la longitud real ( $K_p$ ). Se comprobó que en la cuenca de estudio el valor promedio general es de 0,626 con un valor mínimo de 0,345 y un valor máximo de 0,948; no obstante, para lograr mayor exactitud en la determinación de la longitud real se realizó un estudio más detallado en las diferentes partes de la cuenca; encontrándose que este coeficiente tiene una relación directamente proporcional con la pendiente de la cuenca; pues su valor se reduce en la media que disminuye la pendiente.

**Tabla 3.5** Longitud acumulada, longitud real y altura del salto bruto.

Punto	$L_{ac}$ (m)	$H_b$ (m)	$L_r$ (m)	Punto	$L_{ac}$ (m)	$H_b$ (m)	$L_r$ (m)
1	3491,6	300,0	2311,4	14	19847,5	12,0	9903,9
2	7966,6	366,0	5273,9	15	5625,6	465,0	3724,1
3	5104,2	293,6	3379,0	16	3368,2	302,1	2229,7
4	3274,2	130,2	2043,1	17	4237,5	316,6	2805,2
5	8992,9	147,0	5611,6	18	4611,2	275,6	3052,6
6	2019,3	10,6	1260,0	19	3840,3	347,6	2542,3
7	8265,0	71,4	5157,4	20	2612,1	143,7	1729,2
8	5201,3	64,8	3245,6	21	11321,7	403,4	7495,0
9	11386,6	109,9	7105,2	22	3960,4	183,2	2621,8
10	3819,7	31,1	2383,5	23	1256,9	47,5	832,1
11	8837,7	27,1	5514,7	24	1790,9	323,6	1117,5
12	8585,3	39,4	4284,1	25	18591,2	290,7	11600,9
13	6220,9	9,0	3104,2	26	11671,3	155,9	7282,9

**Tabla 3.6** Caudal ecológico, caudal de diseño y diámetro de la tubería de presión.

Punto	$Q_E$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$Q_D$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$D$ (m)	$h_f$ (m)	Punto	$Q_E$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$Q_D$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$D$ (m)	$h_f$ (m)
1	0,3	2,4	0,63	24,0	14	0,900	7,7	1,64	1,0
2	0,4	3,5	0,72	29,3	15	0,043	0,3	0,23	37,2
3	0,1	0,5	0,33	23,5	16	0,100	0,5	0,31	24,2
4	0,1	0,5	0,35	10,4	17	0,100	0,5	0,33	25,3
5	0,2	2,1	0,66	11,8	18	0,200	1,6	0,54	22,0
6	0,5	4,3	1,30	0,8	19	0,100	0,8	0,39	27,8
7	0,7	6,1	1,15	5,7	20	0,200	1,6	0,59	11,5
8	0,1	1,1	0,56	5,2	21	0,300	2,9	0,65	32,3
9	0,7	6,1	1,08	8,8	22	0,400	3,6	0,80	14,7
10	0,1	1,0	0,60	2,5	23	0,500	4,1	1,02	3,8
11	2,0	17,8	2,09	2,2	24	0,200	1,4	0,49	25,9
12	2,6	23,3	2,22	3,2	25	2,100	19,2	1,54	23,3
13	3,1	27,5	2,94	0,7	26	0,100	0,5	0,34	12,5

**Tabla 3.7** Altura del salto neto, potencia y energía total producida.

Punto	$H_n$ (m)	$N$ (MW)	$E_T$ (MWh)	Punto	$H_n$ (m)	$N$ (MW)	$E_T$ (MWh)
1	276,0	5,6	9797999,0	14	11,0	0,7	1248337,6
2	336,7	9,9	17266251,6	15	427,8	1,0	1687433,2
3	270,1	1,2	2130883,3	16	277,9	1,0	1827145,4
4	119,8	0,4	787468,8	17	291,3	1,3	2297812,2
5	135,2	2,3	4089757,4	18	253,6	3,4	6000730,1
6	9,8	0,4	615459,5	19	319,8	2,2	3784204,9
7	65,7	3,4	5872993,2	20	132,2	1,8	3128827,7
8	59,6	0,5	940607,9	21	371,1	8,9	15614865,4
9	101,1	5,2	9039803,2	22	168,5	5,1	8864165,0
10	28,6	0,2	413814,3	23	43,7	1,5	2585583,1
11	24,9	3,7	6490630,0	24	297,7	3,4	5871541,6
12	36,2	7,0	12343785,3	25	267,4	42,8	74899170,3
13	8,3	1,9	3331319,7	26	143,4	0,5	942906,2

**Tabla 3.8** Valores promedios de longitud real, caudal de diseño, diámetro, altura del salto neto, potencia y energía total en las diferentes partes de la cuenca Suchiate.

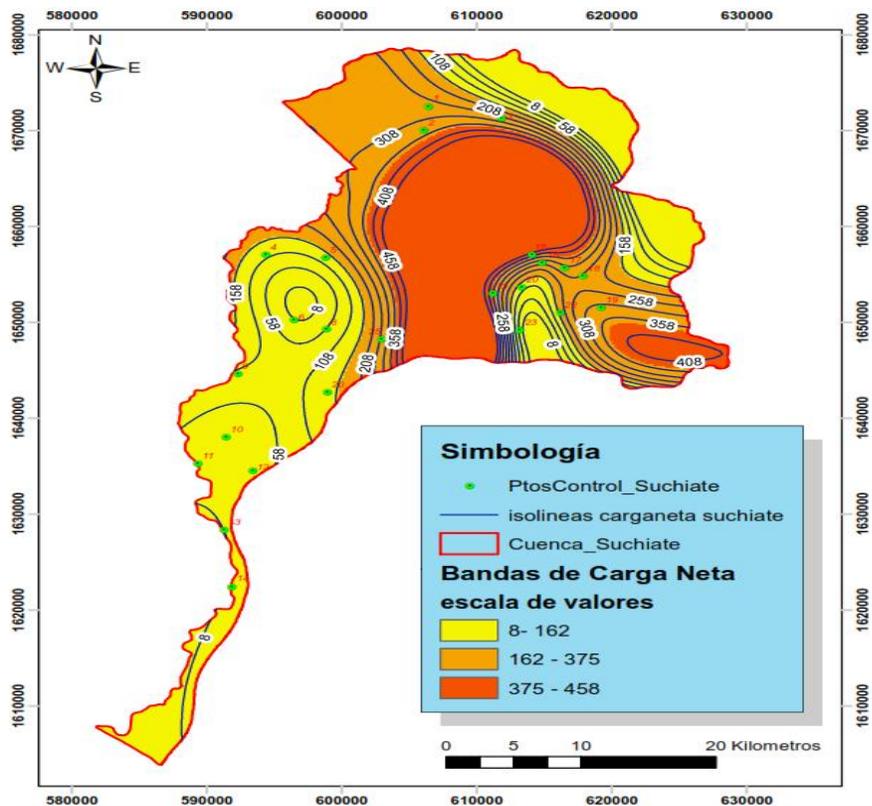
Parte de la cuenca	$L_r$ (m)	$Q_D$ (m)	$D$ (m)	$H_n$ (m)	$N$ (MW)	$E_T$ (MWh)
Alta	3329,161	2,0	0,55	274,1	4,2	7409787,2
Media	5353,619	6,0	0,88	152,1	8,8	15384594,7
Baja	6799,025	16,6	1,64	16,6	2,6	4542945,1

**Tabla 3.9** Valores del coeficiente  $K_p$  en diferentes partes de la cuenca.

Parte de la cuenca	Pendiente (m/m)	$K_p$	Ecuación
Alta	0,046 – 0,091	0,662	$L_r = 0,662.L_{ac}$
Media	0,0031 – 0,055	0,624	$L_r = 0,624.L_{ac}$
Baja	0,0006 – 0,0015	0,499	$L_r = 0,499.L_{ac}$

El caudal de diseño de la central hidroeléctrica varía de forma incremental de la parte alta a la parte baja de 2,0 a 16,6  $m^3 s^{-1}$ ; por lo que en esa misma dirección el diámetro de la tubería de presión aumenta de 0,55 a 1,54 m.

En la figura 3.7 se observa que los valores de la altura del salto neto superiores a 162 m se encuentran en la parte media y alta de la cuenca; mientras que los valores inferiores se encuentran en su porción baja. Estos resultados indican que los proyectos hidroenergéticos con posibilidad de ser instalados en algunos de los puntos de la cuenca Suchiate pueden ser acorde con la clasificación dada por Harper (2012) en función de la altura del salto neto del tipo central de pequeña altura (12%); central de mediana altura (15%) y central de gran altura (73%).



**Figura 3.7** Isótopos de carga neta.

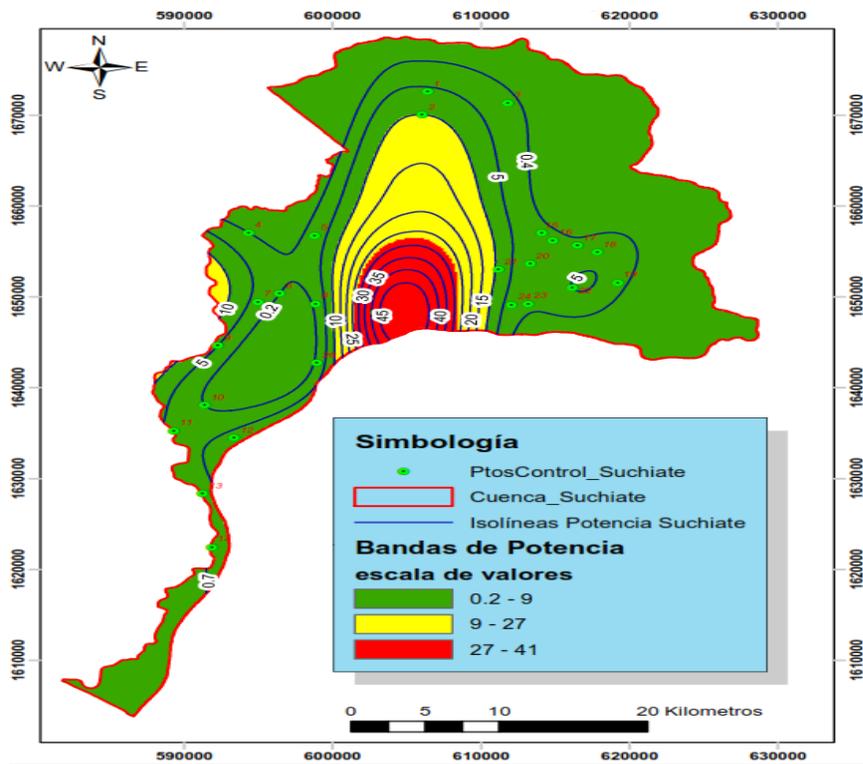
Estudios realizados por Blanco (2012) en el Río Copinula en el Salvador, le permitió afirmar que el aprovechamiento de los caudales y los saltos de los ríos representa una alternativa para la generación de electricidad, la cual fomenta el desarrollo de las comunidades cercanas al sitio de instalación de la central; siendo

imperante el proceso de investigación para la estimación de la potencia teórica que podría obtenerse en un río en particular.

Por su parte Cardozo (2011); Morales *et al.* (2014) y Tarazona (2015) demostraron que los estudios de viabilidad para el aprovechamiento hidroenergéticos se basan en el análisis de las informaciones existentes relacionadas con la meteorología, la pluviometría, la fluviometría, la sedimentación y la topografía entre otras, donde los estudios hidrológicos indican los niveles de aprovechamiento de la cuenca completa y parten desde donde el río inicia su curso, hasta donde se tiene previsto la entrada del reservorio, determinando principalmente su longitud y el declive.

En las subcuencas estudiadas la mayor potencia promedio se presenta en la parte media de la cuenca con 8,8 MW generada por una altura del salto neto promedio de 152,1 m; lo que permite obtener una energía total de  $15,38 \cdot 10^{-6}$  MWh. Este comportamiento ocurre de forma secuencial en la parte media y finalmente en la parte baja de la cuenca, donde el salto neto promedio de 16,6 m genera 2,6 MW y  $4,5 \cdot 10^{-6}$  MWh.

En la figura 3.8 se confirma que las potencias más elevadas se pueden obtener en la parte media de la cuenca por lo que si se aplica la clasificación dada por Cardozo (2011) con base en la potencia, se obtiene que los proyectos hidroenergéticos que pueden ser instalados en las diferentes subcuencas del río Suchiate pueden ser del tipo central de pequeña potencia (31%); central de mediana potencia (65%) y central de gran potencia (4%).



**Figura 3.8** Isolíneas de potencia.

Estos resultados confirman según Sierra *et al.* (2011) que la tecnología de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) representan soluciones energéticas sencillas, que perduran en el tiempo, con un mínimo impacto ambiental, bajos costos, permiten satisfacer la creciente demanda energética y contribuye a generar un desarrollo económico; pero su implementación está sujeta a que se disponga de los recursos hídricos suficientes.

Blanco (2012) al referirse a las PCH, esclarece que la selección de los posibles lugares considerados como adecuados para la instalación de centrales hidroeléctricas deben caracterizarse por ser una zona de altas precipitaciones que garantice en los ríos los caudales que posean potenciales hidráulicos elevados, sin dejar de lado el salto hidráulico, ya que la combinación de estas dos características de los ríos contribuye en gran manera a la generación de potencia eléctrica.

En ese mismo sentido La Junta de Andalucía (2011), confirma que en las zonas con potencialidades hidroenergéticas, el aprovechamiento eficiente de los recursos existentes debe lograrse mediante la integración de los procesos productivos basados en la renovación natural que no genere emisiones contaminantes.

En las tablas 3.10 se exponen los valores del indicador de potencia por unidad de longitud ( $IP_L$ ) e indicador de potencia por unidad de área ( $IP_A$ ). Se comprobó que los valores límites de estos indicadores estuvieron comprendidos entre 0,00009 - 0,0031 y 0,003 - 0,19 con valores promedios de 0,001 y 0,07 respectivamente. Estos indicadores han sido utilizados por Ortiz (2011) en la determinación del potencial hidroenergético en zonas no interconectadas del litoral pacífico colombiano donde se determinó un valor de 17079 MW de los cuales solo 5123,9 MW cumplen las restricciones socio ambiental.

**Tabla 3.10** Indicadores de potencia y de costo.

<b>Punto</b>	<b><math>IP_L</math> (MW km<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>IP_A</math> (MW km<sup>-2</sup>)</b>	<b><math>IC_A</math> (M\$ km<sup>-2</sup>)</b>	<b>Punto</b>	<b><math>IP_L</math> (MW km<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>IP_A</math> (MW km<sup>-2</sup>)</b>	<b><math>IC_A</math> (M\$ km<sup>-2</sup>)</b>
1	0.00242	0.119	0.329	14	0.00007	0.001	0.002
2	0.00187	0.171	0.469	15	0.00026	0.175	0.482
3	0.00036	0.049	0.136	16	0.00047	0.174	0.478
4	0.00022	0.071	0.196	17	0.00047	0.091	0.250
5	0.00042	0.068	0.187	18	0.00112	0.064	0.177
6	0.00028	0.005	0.013	19	0.00085	0.111	0.306
7	0.00065	0.031	0.084	20	0.00103	0.060	0.164
8	0.00017	0.029	0.080	21	0.00119	0.208	0.573
9	0.00073	0.041	0.113	22	0.00193	0.055	0.152
10	0.00010	0.004	0.012	23	0.00177	0.012	0.033
11	0.00067	0.009	0.023	24	0.00300	0.102	0.279
12	0.00164	0.013	0.035	25	0.00369	0.092	0.252
13	0.00061	0.002	0.005	26	0.00007	0.059	0.163

El indicador de costo por unidad de área ( $IC_A$ ) es un nuevo indicador propuesto en la investigación que introduce un índice de costo determinado a partir del análisis de siete proyectos hidroeléctricos entre los años 2010-2014 (Cahabón I, Cahabón

II, La Campana, El Sisimite, San Cristóbal, Jobo y San Pedro y San Andrés) obteniéndose un valor promedio de 2,75 M\$ MW<sup>-1</sup>. El valor del indicador de costo por unidad de área fluctuó entre 0,007 - 0,52 con un valor promedio de 0,20.

En la tabla 3,11 se muestra el comportamiento promedio de estos indicadores en la parte alta media y baja de la cuenca Suchiate; pudiéndose confirmar que la parte alta es la que presenta mayor potencial hidroenergético por unidad de superficie; pero como es lógico de esperar el indicador de costo también se incrementa por unidad de área, debido al requerimiento de una mayor inversión para el aprovechamiento del potencial hidroenergético. En la parte baja de la cuenca ocurre un comportamiento inverso al presentarse un menor potencial para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos en la producción de hidroenergía.

**Tabla 3.11** Valores promedio de los índices de potencia y de costo.

<b>Parte de la cuenca</b>	<b><i>IP<sub>L</sub></i> (MW km<sup>-1</sup>)</b>	<b><i>IP<sub>A</sub></i> (MW km<sup>-2</sup>)</b>	<b><i>IC<sub>A</sub></i> M\$ km<sup>-2</sup>)</b>
Alta	0,0011	0,104	0,29
Media	0,0013	0,055	0,15
Baja	0,0006	0,004	0,01

Los tres indicadores evaluados en la investigación tuvieron en cuenta la selección de las alturas de carga neta y las longitudes reales de la tubería de presión según las características del relieve de la cuenca y la conservación del caudal ecológico en el proceso de generación hidroeléctrica, lo cual asegura el menor impacto ambiental por la adopción de proyectos hidroenergéticos.

### **3.2.3 Análisis de las variables hidroagrícolas**

En la tabla 3.12 se muestran los resultados fundamentales del diseño agronómico para el cultivo del maíz sembrado en los meses de febrero a mayo. En esta etapa la precipitación fue de 760,8 mm, la precipitación efectiva de 515,4 mm y la evapotranspiración del cultivo de 413,9 mm. Estas dos últimas variables

representaron el 67,7% y el 54,4% respecto al total de lluvia media hiperanual que ocurre en la zona de estudio durante el ciclo del cultivo.

**Tabla 3.12** Parámetros agronómicos del cultivo de maíz.

PARÁMETROS	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Días del mes, $d_m$	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
P (mm)	36.4	40.9	76.8	195.3	447.8	669.9	505.0	544.9	735.8	508.6	169.7	56.9	3987.9
$ET_o$ (mm)	111.5	110.2	138.1	135.3	132.4	120.3	130.0	128.2	114.5	111.8	102.4	102.0	1436.7
$K_c$ (adim)	0.00	0.50	0.80	1.15	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$P_e$ (mm)	0.0	14.5	36.4	131.2	333.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	515.4
$ET_c$ (mm)	0.0	55.1	110.5	155.6	92.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	413.9
$ET_c$ (mm/d)	0.0	2.0	3.6	5.2	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.7
$N_n$ (mm)	0.0	40.6	74.1	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	139.0
$L_n$ (mm)	57.8	43.3	21.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	122.5
$L_b$ (mm)	144.5	108.2	53.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	306.1
$F_r$ (días)	0	29	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$N_r$ (mm)	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Las necesidades netas del cultivo son de 139 mm y se presentan en los tres primeros meses del ciclo vegetativo; debido a que la evapotranspiración es mayor que la precipitación efectiva; sin embargo, a partir de mayo que es el cuarto mes del ciclo del cultivo, las precipitaciones se incrementan notablemente desde 447,8 mm hasta 735,8 mm en el mes de septiembre y 508,6 mm en el mes de octubre. Estos valores pluviométricos tan elevados impiden el desarrollo de riego durante el segundo ciclo del cultivo, que en Guatemala es de agosto a noviembre. En general se observa que el número de riego para este cultivo durante el ciclo febrero-mayo es tres y se produce cuando el valor de las precipitaciones es inferior a 76,8 mm.

Este resultado confirma lo expuesto por Pereira *et al.* (2010); Kremer y Seguel (2009) y Puiatti *et al.* (2014) en relación a que el riego solo debe suministrarse para compensar la pérdida de agua por evapotranspiración cuando la lluvia es insuficiente y las láminas a aplicar y sus frecuencias deben ser a partir del cálculo del balance hídrico.

En este mismo sentido Frenken y Gille (2012) afirman que las precipitaciones y en concreto su fracción efectiva, aportan parte del agua que los cultivos necesitan para satisfacer sus necesidades de transpiración; por lo que en climas húmedos este mecanismo es suficiente para garantizar un crecimiento satisfactorio de los cultivos.

En la tabla 3.13 se presentan los resultados del diseño agronómico para el cultivo del frijol para las mismas condiciones edafoclimáticas. Se observa que las necesidades netas totales del cultivo son de 114,4 mm y corresponden a los meses de febrero, marzo y abril; por lo que fue necesario aplicar un total de tres riegos para cubrir el déficit de evapotranspiración del cultivo. En este cultivo también los elevados valores de precipitaciones interrumpen la actividad de riego durante el segundo ciclo del cultivo.

**Tabla 3.13** Parámetros agronómicos del cultivo de frijol.

PARÁMETROS	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Días del mes, $d_m$	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
$P$ (mm)	36.4	40.9	76.8	195.3	447.8	669.9	505.0	544.9	735.8	508.6	169.7	56.9	3987.9
$ET_o$ (mm)	111.5	110.2	138.1	135.3	132.4	120.3	130.0	128.2	114.5	111.8	102.4	102.0	1436.7
$K_c$ (adim)	0.00	0.40	0.80	1.05	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$P_e$ (mm)	0.0	14.5	36.4	131.2	333.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	515.4
$ET_c$ (mm)	0.0	44.1	110.5	142.0	46.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	343.0
$ET_c$ (mm/d)	0.0	1.6	3.6	4.7	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4
$N_h$ (mm)	0.0	29.6	74.1	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	114.4
$L_h$ (mm)	57.8	43.3	21.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	122.5
$L_b$ (mm)	144.5	108.2	53.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	306.1
$F_r$ (días)	0	37	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$N_r$ (mm)	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

### 3.3 Análisis de los modelos de regresión

En la investigación se generaron un total de 24 modelos de regresión de tipo polinomial de tercer orden, lineal simple, lineal múltiple, potencial y potencial

múltiple, de los cuales cuatro se utilizan en la estimación de variables hidrológicas; catorce para variables hidroenergéticas y seis en variables hidroagrícolas.

### 3.3.1 Análisis de los modelos de regresión de las variables hidrológicas

En la investigación se desarrollaron cuatro modelos de regresión que permiten la estimación del caudal, el coeficiente de transposición, y la intensidad media diaria. Estas variables son de gran interés para el aprovechamiento de los recursos existentes en las subcuencas, especialmente para el desarrollo de proyectos de irrigación y de plantas hidroeléctricas donde el manejo del agua con estos propósitos es fundamental.

Las ecuaciones encontradas para la obtención del caudal y el coeficiente de transpiración en función del área, la precipitación y la evapotranspiración son del tipo potencial múltiple con tres variables independientes (3V) las cuales se muestran a continuación:

$$C = 1,63 \cdot 10^{-7} A^{0,9892} P_m^{2,1528} ETP_m^{-1,1037} \quad (3.1)$$

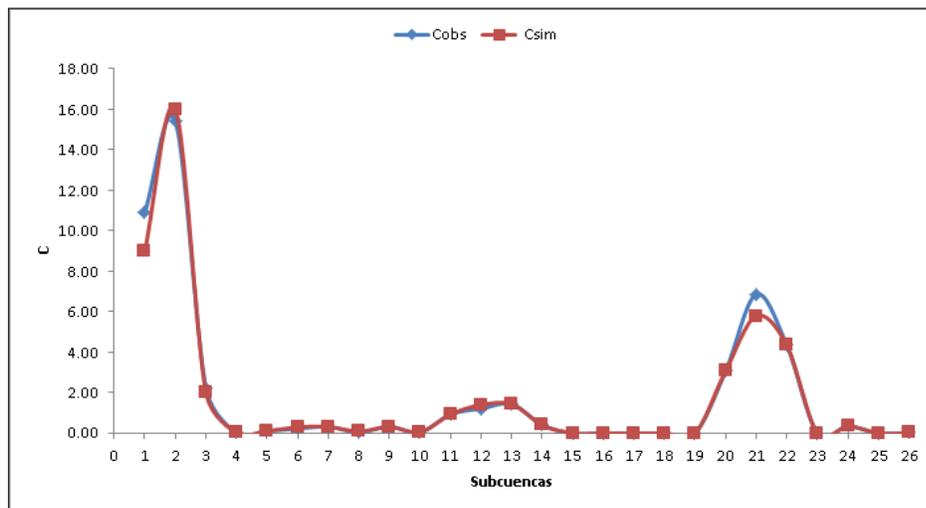
$$Q_m = 3,357 \cdot 10^{-6} A^{0,9895} P_m^{2,1541} ETP_m^{-1,1006} \quad (3.2)$$

Donde  $C$  es el coeficiente de transposición;  $Q_m$  el caudal medio anual de la subcuenca ( $m^3 s^{-1}$ );  $A$  el área de la subcuenca correspondiente a cada punto de estudio ( $km^2$ );  $P_m$  la precipitación media anual de la subcuenca (mm);  $ETP_m$  la evapotranspiración media anual de la subcuenca (mm);

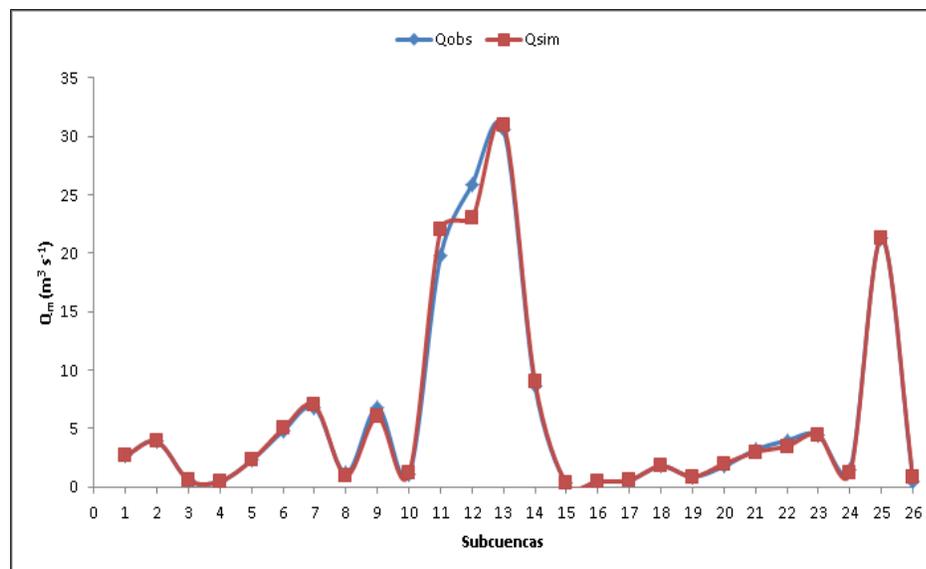
El coeficiente de transposición resultó importante en la estimación del caudal en los puntos de la cuenca sin datos de aforo. Este está determinado principalmente por relaciones adimensionales en la que interviene el grupo de variables mencionadas anteriormente; es decir, el área de la subcuenca, la precipitación y la evapotranspiración. Cuando la relación entre estas es muy fuerte como resultó en

este caso, su utilización práctica es muy precisa para la obtención de la escorrentía.

En las figuras 3.9 y 3.10 se muestra la comparación grafica entre los valores observados y simulados de las variables hidrológicas coeficiente de transposición (C) y caudal ( $Q_m$ ) en cada punto seleccionado en la cuenca del rio Suchiate.



**Figura 3.9** Coeficiente de transposición C observado y simulado.



**Figura 3.10** Caudal observado y simulado con  $Q_m = 3,357 \cdot 10^{-6} A^{0,9895} ETP^{-1,1006}$ .

Duitama y Moreno (2015) encontraron ecuaciones de regresión del tipo potencial simple con una variable independiente para la estimación del caudal de esorrentía en la parte media del río Magdalena en Colombia con coeficientes de determinación comprendidos entre los valores de 0,8187 y 0,8425.

El caudal también se estimó en función del área de la cuenca y la intensidad media diaria de la lluvia; pero no solo para la cuenca Suchiate; si no que se utilizaron datos de otras cuencas vecinas pertenecientes a las estaciones Retalhuleu, Labor Ovalle, Santiago Atitlán y Suchiate por lo que debe trabajarse con las aéreas físicas de esas cuencas hidrográficas y su alcance se extiende a toda la región hidrológica I de la vertiente del pacífico. Los modelos encontrados son del tipo potencial múltiple con dos variables independientes (2V) y el modelo de Richards con una variable independiente (1V). Estos se escriben como:

$$Q_m = 0,00000365A^{2,0516} I_m^{-0,9631} \quad (3.3)$$

$$I_{md} = \frac{0,227}{[1 + \exp(5,876 - 0,513Q_m)]^{1/5,06}} \quad (3.4)$$

Donde  $Q_m$  el caudal medio diario anual de la subcuenca ( $m^3 s^{-1}$ );  $A$  el área de la cuenca ( $km^2$ );  $I_{md}$  la intensidad media diaria de la lluvia ( $mm d^{-1}$ ).

### 3.3.2 Análisis de los modelos de regresión de las variables hidroenergéticas

En la investigación se obtuvieron catorce modelos de regresión de tipo polinomial y lineal múltiple con dos y tres variables independientes para la estimación de las variables hidroenergéticas.

El diámetro de la tubería de presión responde satisfactoriamente bien a un modelo polinomial de tercer orden; mientras que las pérdidas de carga de dicha tubería se

estimaron mediante un modelo lineal múltiple con dos variables independientes y tres variables independientes:

$$D = 0,0005Q_D^3 - 0,0221Q_D^2 + 0,3539Q_D + 0,2462 \quad (3.5)$$

$$h_f = -2,1524 + 0,7124H_b + 1,063D - 1601,0201S_o \quad (3.6)$$

$$h_f = -0,0128 + 0,7105H_b - 1615,7440S_o \quad (3.7)$$

Donde  $D$  es el diámetro de la tubería de presión (m);  $S_o$  la pendiente del terreno ( $m\ m^{-1}$ );  $Q_D$  el caudal de diseño ( $m^3\ s^{-1}$ );  $H_b$  la altura del salto bruto (m).

Las alturas de los saltos brutos y netos que se presentan en la cuenca de estudio; así como la potencia de las turbinas que pueden ser instaladas y la generación de energía total responden favorablemente a un modelo potencial múltiple con dos y tres variables independientes.

$$H_b = 2370,0211Q_D^{-0,0024} S_o^{0,7886} \quad (3.8)$$

$$H_n = 1290,8316Q_D^{-0,1388} S_o^{0,8333} A^{0,0896} \quad (3.9)$$

$$H_n = 1599,1392Q_D^{-0,0578} S_o^{0,8129} \quad (3.10)$$

$$N = 110730,6828Q_D^{0,8612} S_o^{0,8333} A^{0,0896} \quad (3.11)$$

$$N = 13293,6441Q_D^{0,9422} S_o^{0,8129} \quad (3.12)$$

$$E_T = 4700,3907Q_D^{0,8612} S_o^{0,8333} A^{0,0896} \quad (3.13)$$

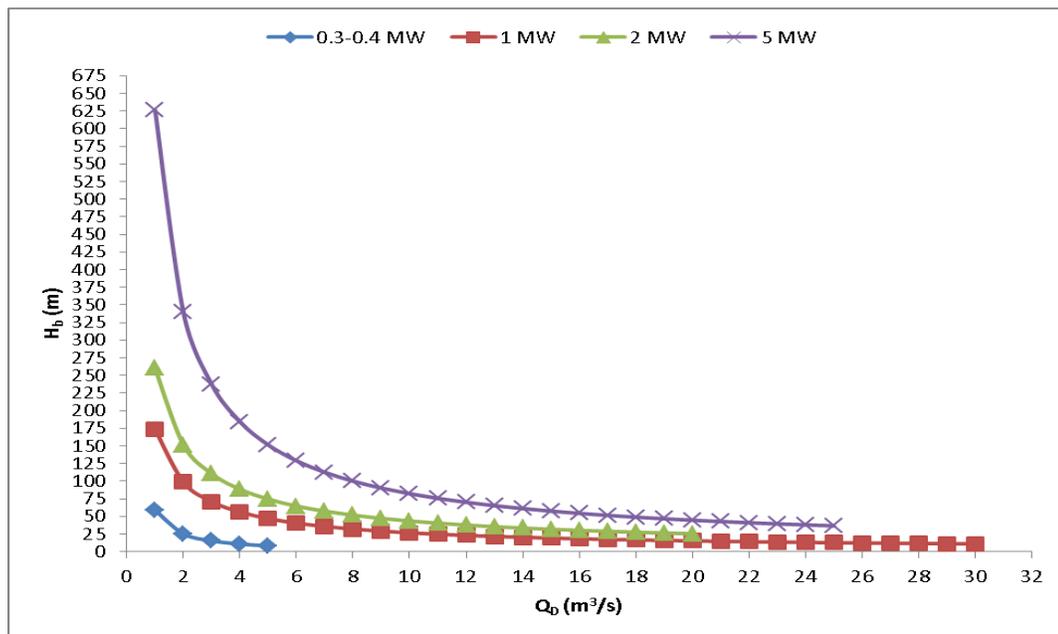
$$E_T = 58226,1611Q_D^{0,9422} S_o^{0,8129} \quad (3.14)$$

Donde  $H_b$  es la altura del salto bruto (m);  $Q_D$  el caudal de diseño ( $m^3\ s^{-1}$ );  $S_o$  la pendiente del terreno ( $mm^{-1}$ );  $A$  el área de la subcuenca correspondiente a cada punto de estudio ( $km^2$ );  $N$  la potencia de la turbina (MW);  $E_T$  la energía total producida por la planta hidroeléctrica (MWh).

En la tabla 3.14 se demuestra que la relación funcional entre la altura del salto bruto y el caudal de diseño se representa apropiadamente mediante un modelo exponencial, los cuales responden a diferentes niveles de potencia y rangos de caudales. Los resultados expuestos en esta tabla permitieron la construcción del nomograma que se muestra en la figura 3.11 el cual, para los efectos prácticos del diseño de centrales hidroeléctricas, representa un instrumento valioso para la estimación rápida de la potencia de la turbina a partir del caudal de diseño.

**Tabla 3.14** Modelos potenciales para estimar la altura del salto bruto.

$Q_D$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$N$ (MW)	Modelo
0 - 5	0,3 - 0,4	$H_b = 58,943 Q_D^{-1,219}$
0 - 30	1	$H_b = 173,62 Q_D^{-0,813}$
0 - 20	2	$H_b = 260,00 Q_D^{-0,777}$
0 - 25	5	$H_b = 626,30 Q_D^{-0,882}$



**Figura 3.11** Nomograma para la estimación del salto bruto.

### 3.3.3 Análisis de los modelos de regresión de las variables hidroagrícolas

Los resultados de la investigación permitieron generar seis modelos de regresión del tipo potencial múltiple con dos variables independientes a través de los cuales

es posible la estimación de la precipitación efectiva, la evapotranspiración del cultivo y sus necesidades netas.

Estas ecuaciones responden al comportamiento de las variables antes mencionadas durante el primer ciclo de febrero a mayo en que se siembran los cultivos de maíz y frijol en Guatemala; pues como ya se explicó anteriormente los elevados valores de lluvia a partir del mes de mayo imposibilitan la actividad de riego durante el segundo ciclo para estos cultivos en los meses comprendido de agosto a noviembre. Las ecuaciones encontradas para el cultivo del maíz son las siguientes:

$$P_e = 0,0708P^{1,2686} ET_o^{-0,1446} \quad (3.15)$$

$$ET_c = 163,6880P^{-0,0378} K_c^{1,3450} \quad (3.16)$$

$$N_n = 0,0091P^{-4,6719} ET_c^{6,3501} \quad (3.17)$$

Las ecuaciones obtenidas para el cultivo del frijol se escriben como:

$$P_e = 0,0054P^{0,6729} ET_o^{1,2734} \quad (3.18)$$

$$ET_c = 100,6554P^{-0,0637} K_c^{1,1221} \quad (3.19)$$

$$N_n = 9,0694P^{-3,3593} ET_c^{3,5828} \quad (3.20)$$

Donde  $P$  es la precipitación media mensual (mm);  $P_e$  la precipitación efectiva (mm);  $K_c$  coeficiente del cultivo;  $ET_o$  la evapotranspiración de referencia media mensual (mm);  $ET_c$  la evapotranspiración media mensual del cultivo (mm);  $N_n$  las necesidades netas del cultivo (mm).

### 3.4 Validación de los modelos de regresión

En la tabla 3,15 se observa que la variable caudal de escorrentía y coeficiente de transposición pueden estimarse mediante un modelo potencial múltiple; mientras que la intensidad de la lluvia media diaria respondió satisfactoriamente a un modelo de tipo Richards el cual a pesar de ser muy utilizado para estudiar el crecimiento de los organismos vivos (Trinidad, 2014). Se demostró, en este caso que puede ser empleado para expresar la relación entre el crecimiento del caudal respecto al aumento de la intensidad de la lluvia. En todos los casos se alcanzaron coeficientes de determinación elevados con valores comprendido entre 0,8765 a 0,9980.

**Tabla 3.15** Criterios para la validación de los modelos hidrológicos.

<b>Parámetros</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>EPM</b>
$C = f(A, P, ETP)$	Potencial múltiple (3V)	0,9901	10,2
$Q_m = f(A, P, ETP)$	Potencial múltiple (3V)	0,9903	10,4
$Q_m = f(A, I_{md})$	Potencial múltiple (2V)	0,8765	17,4
$I_{md} = f(Q_m)$	Richards (1V)	0,9980	8,9

Varios autores como Vicente-Serrano *et al.* (2003); Ramesh y Chandramouli (2005) y Pesquer *et al.* (2007) utilizaron técnicas estadísticas de regresión simple y múltiple combinados con sistemas de información geográfica para la obtención de datos con predicciones precisas y mínima varianza espacial en áreas donde no existen estaciones meteorológicas.

Por su parte Egido *et al.* (1985) demostraron que el modelo de regresión lineal múltiple mostró un coeficiente de determinación alto con valor de 0,868 para la estimación de variables hidrológicas en la cuenca del Duero.

En la tabla 3.16 se muestra que las variables diámetro y pérdidas de carga alcanzaron un elevado coeficiente de determinación comprendido entre 0,79 y 0,87 respectivamente; mientras que el resto de las variables analizadas: altura del

salto bruto, altura del salto neto, potencia de la turbina y energía total producida alcanzaron un coeficiente de determinación entre los valores de 0,72 y 0,79, los cuales se consideran según Mondragón (2014) con una correlación considerable.

**Tabla 3.16** Criterios para la validación de los modelos hidroenergéticos.

<b>Parámetros</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>EPM</b>
$D = f(Q_D)$	Polinomial de orden 3	0,8791	10,2
$h_f = f(H_b, D, S_o)$	Lineal múltiple (3V)	0,7923	13,6
$h_f = f(H_b, S_o)$	Lineal múltiple (2V)	0,7922	15,1
$H_b = f(Q_D, S_o)$	Potencial múltiple (2V)	0,7982	14,4
$H_n = f(Q_D, S_o, A)$	Potencial múltiple (3V)	0,7839	16,5
$H_n = f(Q_D, S_o)$	Potencial múltiple (3V)	0,7830	15,9
$N = f(Q_D, S_o, A)$	Potencial múltiple (2V)	0,7229	18,4
$N = f(Q_D, S_o)$	Potencial múltiple (3V)	0,7218	17,3
$E_T = f(Q_D, S_o, A)$	Potencial múltiple (2V)	0,7229	16,7
$E_T = f(Q_D, S_o)$	Potencial múltiple (3V)	0,7218	15,3
$H_b = aQ_D^b$	Exponencial (0 - 5 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0,9783	4,2
$H_b = aQ_D^b$	Exponencial (0 - 30 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0,7698	13,9
$H_b = aQ_D^b$	Exponencial (0 - 20 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0,9769	8,6
$H_b = aQ_D^b$	Exponencial (0 - 25 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0,9965	4,7

La variable altura del salto bruto con la utilización del modelo exponencial alcanzó valores de R<sup>2</sup> muy elevados superiores a 0,97 excepto para la potencia de 1 MW que fue de 0,76. Estos modelos son sólo válidos para determinados rangos de caudales de diseño y potencia; por lo que de acuerdo con Potenciano (2004) deben ser empleados individualmente sobre la base de las características propias de la cuenca y los límites que restringe su aplicación.

Los resultados de la capacidad predictiva que tienen los modelos hidroenergéticos propuestos en esta investigación confirman la aplicación creciente que han tenido los modelos de regresión para la solución de numerosos problemas relacionados con el agua, la energía, el medio ambiente y la ecología (Fattorelli y Fernández, 2011).

En la tabla 3,17 se comprueba que las variables precipitación efectiva, evapotranspiración media mensual del cultivo y necesidades netas del cultivo

pueden estimarse mediante el modelo potencial múltiple con dos variables independientes. El coeficiente de determinación fue perfecto de acuerdo con Mondragón (2014) al lograr valores superiores a 0,99 en todos los casos.

**Tabla 3.17** Criterios para la validación de los modelos hidroagrícolas.

<b>Parámetros</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>EPM</math></b>
$P_e = f(P, ET_o)$	Potencial múltiple (2V)	0,9967	5,2
$ET_c = f(P, K_c)$	Potencial múltiple (2V)	0,9909	7,7
$N_n = f(P, ET_c)$	Potencial múltiple (2V)	0,9871	8,4
$P_e = f(P, ET_o)$	Potencial múltiple (2V)	0,9986	3,8
$ET_c = f(P, K_c)$	Potencial múltiple (2V)	0,9926	6,3
$N_n = f(P, ET_c)$	Potencial múltiple (2V)	0,9988	3,1

Quevedo y Sánchez (2013) usaron el coeficiente de determinación como indicador de la bondad del ajuste de los modelos de regresión encontrados para estimar variables climáticas como evapotranspiración referencial, temperatura y radiación solar en estudios auspiciados por el SENAMHI y el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú.

Vázquez y Solano (2013) encontraron un modelo polinomial de segundo orden para estimar la precipitación y la evapotranspiración de referencia para períodos decadales, mensuales y anuales en toda la república de Cuba con coeficientes de determinación que oscilaron entre 0,72 y 0,97.

Quevedo y Sánchez (2013) encontraron modelos de regresión lineal simple para la estimación de la evapotranspiración referencial con coeficientes de determinación comprendidos entre 0,70 a 0,89 en estudios realizados en un área que corresponde a todo el territorio del Perú, el cual representa áreas con fisonomías distintas en costa, sierra y selva.

En general los resultados demuestran que los coeficientes de determinación oscilaron en el rango de 0,72 a 0,99; lo que se corresponde con coeficientes de

correlación de Pearson entre 0,85 y 0,99 clasificándose como correlaciones positivas de considerable a perfecta. Esto significa según Gordon y Camargo (2015) que el valor de  $R^2$  como proporción de varianza compartida entre las variables dependientes e independientes involucradas en los modelos encontrados, explican del 72% al 99% de los resultados debido a la relación entre estas variables.

El Error Porcentual Medio empleado también como criterio de validación de los modelos de regresión alcanzó valores comprendido entre el 3,1% y 18,4% por lo que se considera aceptable. Potenciano y Garzón (2005) afirman que los modelos de regresión al ser validados constituyen herramientas útiles que pueden servir de complemento a otros métodos hidrológicos e hidrometeorológicos ya existentes; por lo que contribuye a un mejor conocimiento del funcionamiento de las cuencas, teniendo en cuenta la integración de factores geomorfológicos, litológicos y climáticos.

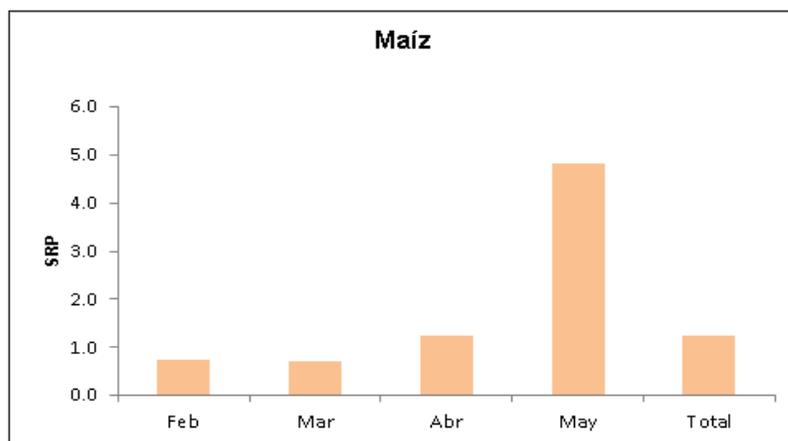
### **3.5 Indicadores de sostenibilidad del agua y la hidroenergía**

El aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica constituye un aspecto estratégico para alcanzar la viabilidad de los proyectos de irrigación e hidroenergéticos, para ello en esta metodología se estudiaron diferentes indicadores para evaluar la gestión del agua en las actividades de riego agrícola y la generación de hidroenergía; estos fueron:

#### **3.5.1 Indicadores de sostenibilidad del agua para riego**

En las figuras 3.12; 3.13 y 3.14 se muestran los resultados de los indicadores de sostenibilidad para el uso del agua en el riego del cultivo del maíz. En la figura 3.12 se observa que el indicador Suministro Relativo de Agua por Precipitaciones (*SRP*) contribuye mediante la precipitación pluvial a la gestión sostenible del agua en la cuenca; pues en los meses de febrero y marzo se cubre el 70% de los requerimientos hídricos del cultivo y en los meses de abril y mayo el aporte de las

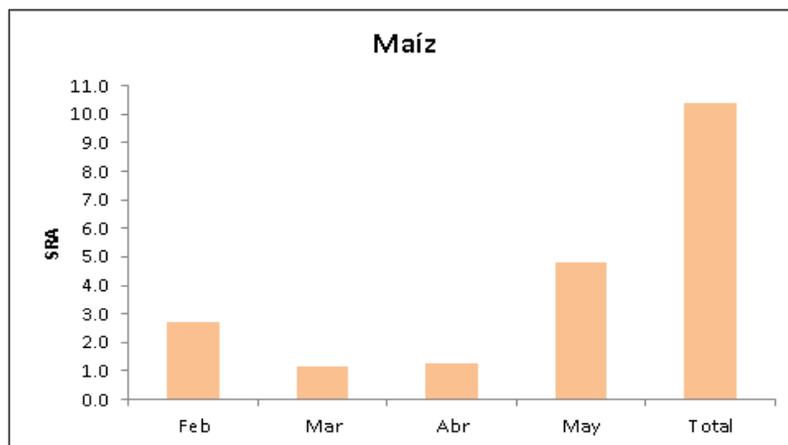
lluvias cubre el 100% de las necesidades de agua y se produce un exceso de 1.3 y 4.8 veces respecto a la demanda del cultivo.



**Figura 3.12** Indicador *SRP* en el cultivo del maíz.

El análisis del indicador para el ciclo vegetativo del cultivo expresa una gestión en exceso, lo que se corresponde con lo expresado por Pérez *et al.* (2005) en relación con la importancia de este indicador en el conocimiento de la satisfacción de las necesidades hídricas del cultivo de forma natural.

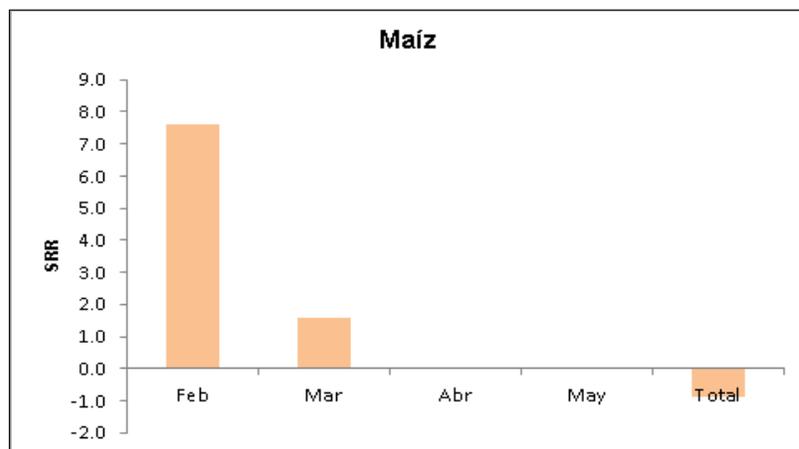
En la figura 3.13 se presentan los resultados del índice Suministro Relativo de Agua (*SRA*) el cual varío de 1,2 a 4,8 entre los meses de febrero a mayo, con un valor general de 10,4 para todo el ciclo vegetativo del cultivo. Estos valores superan la unidad, por lo que la gestión del agua se clasifica como excesiva. Si se relacionan los valores de este indicador con el *SRP* reflejado en el gráfico anterior, se puede explicar que la causa del exceso de agua en los meses de febrero y marzo es el riego deficiente que contribuye a que se aporten de 2,0 a 0,5 veces más agua que la requerida por el cultivo respectivamente.



**Figura 3.13** Indicador SRA en el cultivo del maíz.

En los meses de abril y mayo no es necesaria la aplicación de riegos, debido a que las precipitaciones son elevadas con valores de 195,3 mm y 447,8 mm respectivamente; por lo que la gestión en exceso se debe absolutamente a la magnitud del aporte pluvial. Pérez *et al.* (2009) demostraron en investigaciones realizadas en España, que el indicador SRA es útil para conocer la forma en que se adecuan los aportes de agua a las necesidades de los cultivos en un período diario, mensual y estacional acorde con la duración del ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo.

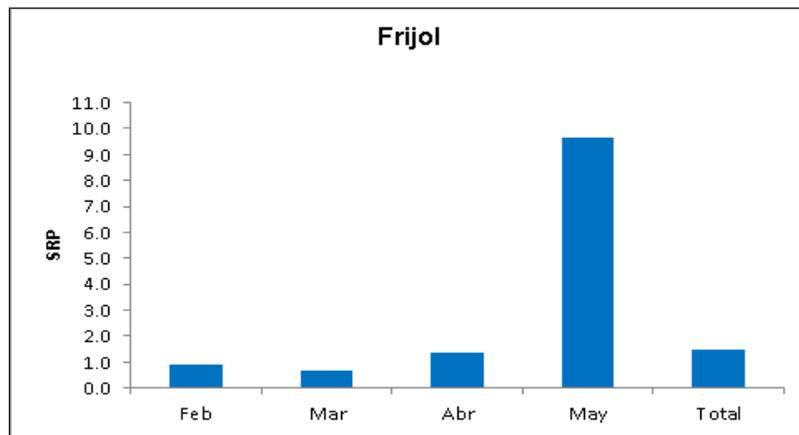
En la figura 3.14 se exponen los resultados del índice Suministro Relativo de Agua de Riego (SRR) para el cultivo del maíz. Se observan valores superiores a la unidad en los meses de febrero y marzo, lo cual indica una gestión del riego en exceso debido a los valores relativamente altos de las láminas de riego como consecuencia de la baja eficiencia del sistema. En los meses de abril y mayo los valores del indicador SRR se hacen cero; porque las lluvias satisfacen plenamente la demanda hídrica del cultivo y no es necesaria la aplicación de agua al cultivo mediante la irrigación.



**Figura 3.14** Indicador *SRR* en el cultivo del maíz.

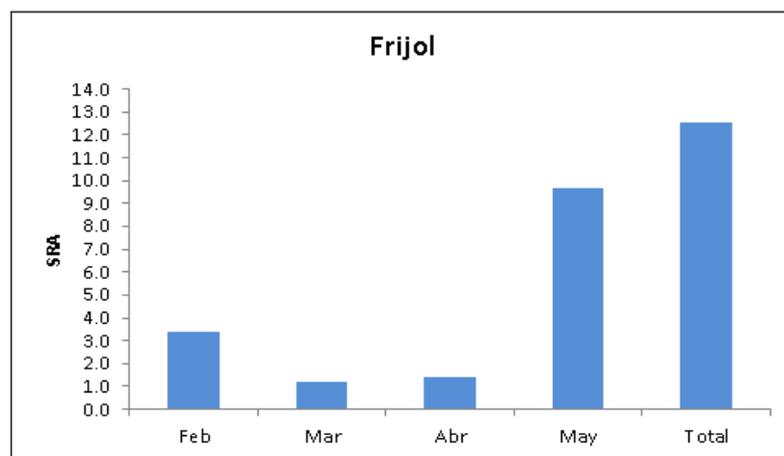
El valor general del indicador *SRR* en todo el ciclo del cultivo es negativo debido a que la diferencia entre *ETc* y *P* presenta también este signo; lo que indica que las precipitaciones son superiores a las demandas evapotranspirativas del cultivo. Según Roldán *et al.* (2010) el indicador más importante es el *SRR* ya que permite interpretar el manejo del riego que realiza el agricultor; pero sólo sirve cuando hay riegos y las precipitaciones no son abundantes; de lo contrario los valores obtenidos son erróneos.

En las figuras 3.15; 3.16 y 3.17 se presentan los resultados de los indicadores de sostenibilidad para el uso del agua en el riego del cultivo del frijol. De forma similar al caso anterior, se observa en la figura 3.15 que el indicador Suministro Relativo de Agua por Precipitaciones (*SRP*) aporta una cantidad notable de agua en los meses de febrero y marzo para garantizar entre el 70 y el 90 % de las necesidades de agua de los cultivos y el 100% en los meses de abril y mayo con un exceso de 1.2 a 3.4 veces la demanda del cultivo. Este indicador presenta una gestión en exceso para el cultivo del frijol.



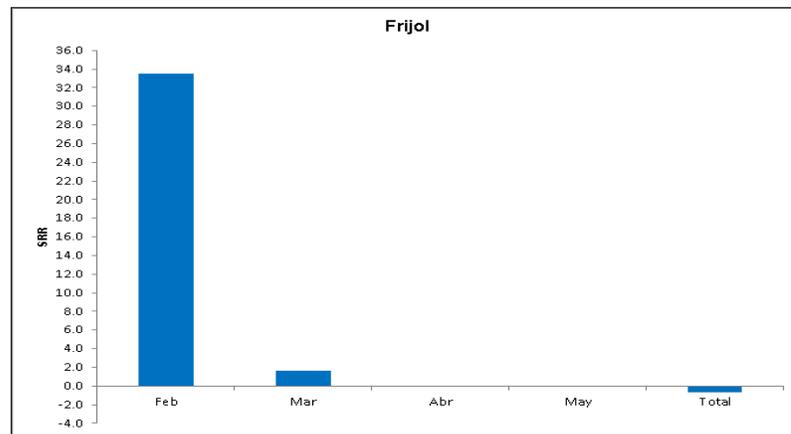
**Figura 3.15** Indicador *SRP* en el cultivo del frijol.

En la figura 3.16 se muestran los resultados del índice Suministro Relativo de Agua (*SRA*) el cual alcanza valores entre 1,2 a 9,7 en los meses comprendidos de febrero a mayo, con un valor total de 12,5 correspondiente al ciclo vegetativo del cultivo. En este caso la gestión del agua es excesiva por tener el indicador valores superiores a la unidad. Este comportamiento se debe al riego deficiente de los cultivos que obliga a los regadores a suministrar láminas adicionales superiores a la requerida por el cultivo. En los meses de abril y mayo las precipitaciones son aún más elevadas por lo que la gestión del agua para riego es también en exceso, pero utilizándose solo el agua de lluvia.



**Figura 3.16** Indicador *SRA* en el cultivo del frijol.

En la figura 3.17 se observa que el indicador Suministro Relativo de Agua de Riego (*SRR*) para el cultivo del frijol rebasa la unidad en los meses de febrero y marzo, lo cual indica una gestión del riego en exceso debido a que las láminas de riego aplicadas son mayores que las necesarias para suplir las necesidades de agua del cultivo. En los meses de abril y mayo no hay suministro de agua de riego, por lo que el indicador *SRR* vale cero. El valor general del indicador *SRR* en todo el ciclo del cultivo es también negativo a causa del valor elevado de las precipitaciones durante el ciclo vegetativo del cultivo.



**Figura 3.17** Indicador *SRR* en el cultivo del frijol.

La determinación de estos indicadores permite evaluar la gestión del agua y la utilización que hacen los agricultores de este recurso en el riego de los cultivos; pues en la medida en que su valor se aproxime a la unidad se estará contribuyendo a la sostenibilidad; mientras que valores por debajo o por encima indican que la gestión es deficitaria o en exceso respectivamente.

### 3.5.2 Indicadores de sostenibilidad para la hidroenergía

Con un caudal de diseño de  $1,10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y un tiempo correspondiente a tres días de riego, se obtiene un tiempo de funcionamiento de la turbina de  $2,59 \cdot 10^5 \text{ s}$ , y un volumen de agua de  $2,85 \cdot 10^5 \text{ m}^3$  que se requiere utilizar para la producción hidroenergética.

Para regar el cultivo de maíz y frijol de forma separada se debe utilizar un volumen de agua de  $0,517 \cdot 10^6$  y  $0,221 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> respectivamente y si es necesario regarlo al mismo tiempo el volumen se incrementaría a  $0,738 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>. A partir de este análisis es posible mostrar apoyado en la tabla 3,18 que cuando se riega de forma independiente los valores del índice UHR es de 0,6 y 1,3 para el cultivo del maíz y el frijol respectivamente.

**Tabla 3.18** Indicador de uso del agua para hidroenergía.

<b>Cultivo</b>	<b><math>V_H</math> (<math>10^6</math> m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>V_R</math> (<math>10^6</math> m<sup>3</sup>)</b>	<b><i>UHR</i></b>
Maíz	0,285	0,517	0,6
Frijol		0,221	1,3
Total		0,738	0,4

Lo anterior indica que el agua que se utiliza para hidroenergía representa el 60% y el 130% respecto al volumen de riego empleado en el cultivo del maíz y el frijol respectivamente; sin embargo, en caso de ser necesario regar ambos cultivos al unísono, el indicador *UHR* es de 0,4 y expresa que para la generación hidroenergética el agua que se debe emplear es el 40% en relación al volumen requerido por ambos cultivos.

A partir de los resultados de la tabla 3.2 donde se determinó que en el punto 8 de la cuenca Suchiate la capacidad hídrica es de  $47,20 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>, se puede asegurar que el volumen de agua disponible no interfiere en ninguna de las dos actividades productivas analizadas; porque el indicador *UHT* tiene un valor muy bajo de 0,6%; por tanto, en este caso lo importante sería el aprovechamiento racional del agua a través del mejoramiento de la eficiencia del sistema de riego y el adecuado diseño y operación del proyecto hidroeléctrico sobre la base del respeto de los parámetros ambientales y de sostenibilidad.

### 3.6 Análisis de la efectividad de la metodología

La validación de la metodología para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola en la cuenca del río Suchiate de Guatemala que ha sido propuesta en esta investigación, se sustentó en la comprobación de su eficacia a partir de la demostración de la capacidad de la metodología para dar respuestas satisfactorias a la problemática del uso productivo del agua bajo las condiciones específicas de la cuenca del río Suchiate.

#### 3.6.1 Verificación de la validez de los modelos propuestos

El análisis del epígrafe 3.4 relacionado con la verificación de la validez de los modelos propuestos mediante pruebas de bondad de ajuste demostró que los 24 modelos matemáticos presentan exactitud y precisión, por lo que su eficacia es acertada y admite su aplicación en la estimación de variables hidrológicas, hidroenergéticas e hidroagrícolas.

#### 3.6.2 Aplicación de la metodología en un estudio de caso

En el desarrollo del proyecto hidroenergético Sibinal-Suchiate, se utilizaron a nivel hidrológico datos de precipitación de las estaciones Catarina, San Luis Malacatan, El Pensamiento y Las Merceditas, así como información de la estaciones Malacatan, Goritzia II, Chayen, Pati II, Las Gradadas, El Niagara y Chibuj (figura 3.18, 3.19 y 3.20).

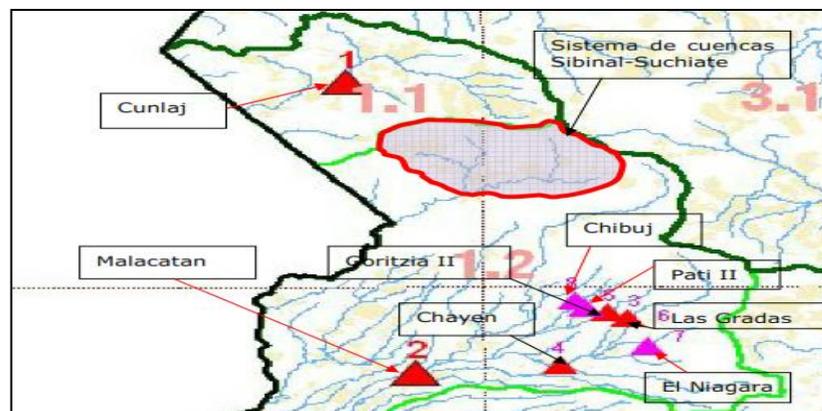
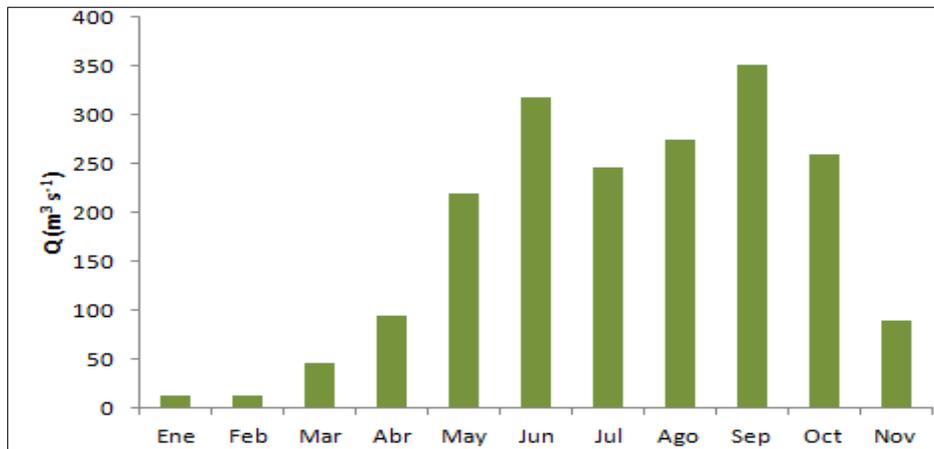
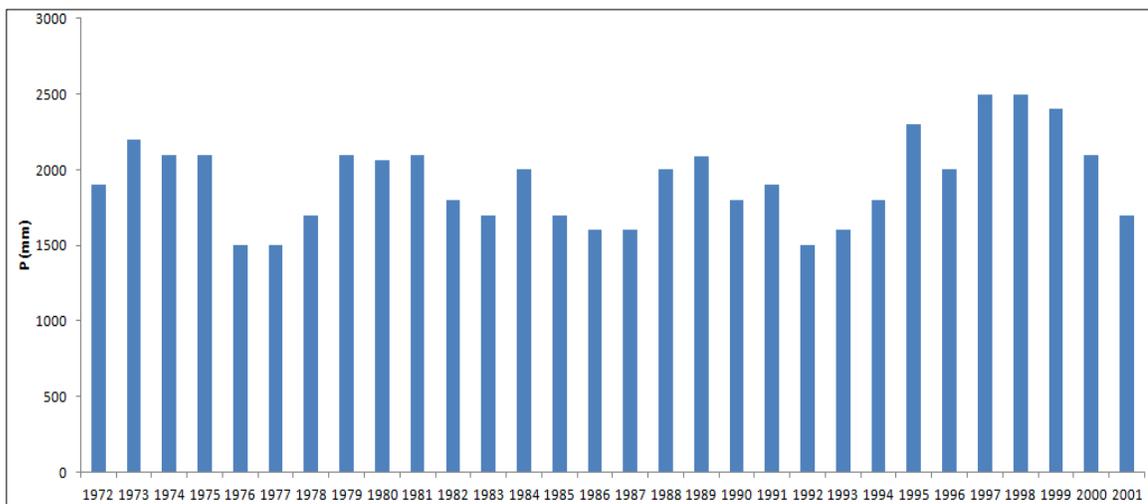


Figura 3.18 Estaciones hidrométricas en el área Sibinal-Suchiate.



**Figura 3.19** Precipitación media mensual en el área de estudio.



**Figura 3.20** Precipitación media anual en el área de estudio.

En las figuras 3.21, 3.22 y 3.23 se muestran los recorridos por la zona y las mediciones de campo realizadas para mejorar la calidad de la información, sobre todo la de los caudales hasta el punto de control (sitio de emplazamiento de la presa). Los resultados de esta variable según los coeficientes de transposición obtenidos desde la estación hidrométrica Malacatan con el modelo potencial múltiple de dos variables independientes verificado de manera práctica en el lugar antes mencionado se muestran en las figuras 3.24 y 3.25.



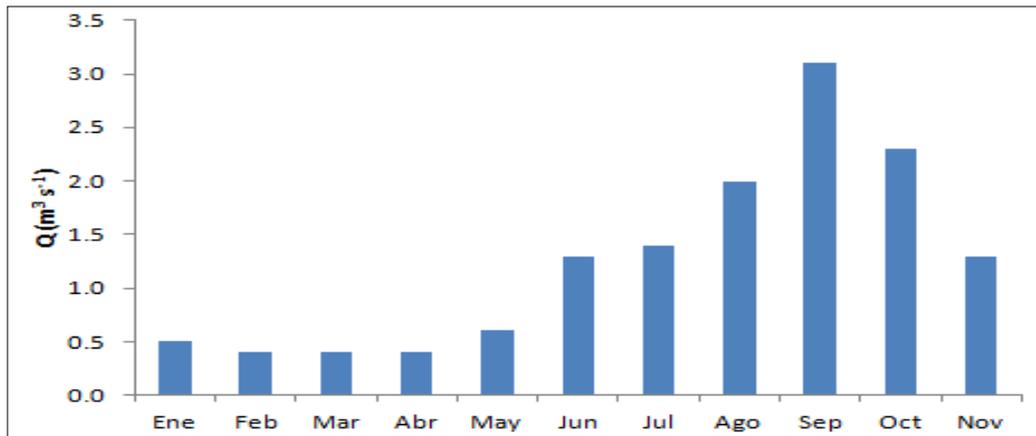
**Figura 3.21** Recorrido por el área de estudio.



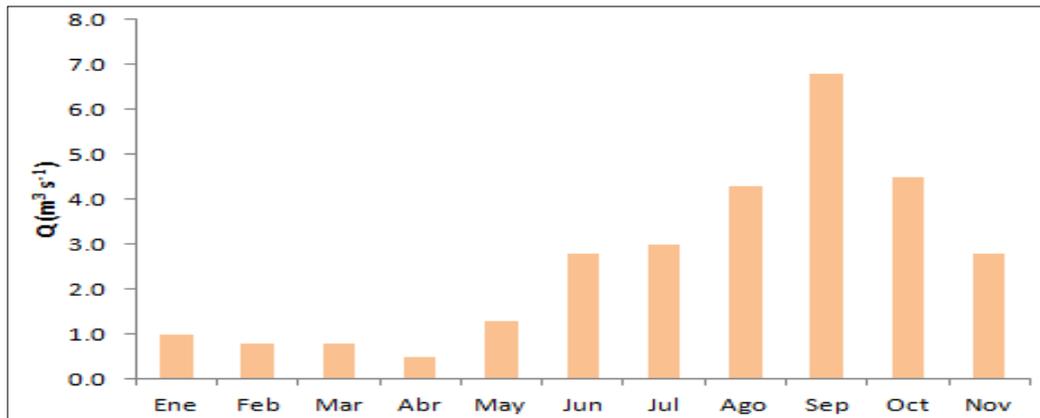
**Figura 3.22** Toma de informaciones fisiográfica de la cuenca.



**Figura 3.23** Medición de caudales.



**Figura 3.24** Variación del caudal hasta el sitio de la presa Sibinal.



**Figura 3.25** Variación del caudal hasta el sitio de la presa Confluencia.

Con la utilización del modelo potencial de tres variables independientes se determinó una potencia instalada comprendida entre los 0,5 y 1,0 MW lo que demuestra que es posible el desarrollo de un proyecto para generar electricidad a partir de los recursos hidroenergéticos de la cuenca.

El análisis de las precipitaciones, los caudales, la altura de los saltos y las longitudes reales determinan que la propuesta sobre el sitio confluencia es mucho más atractiva que la propuesta sobre el río Sibinal ya que acarrea mayor área de drenaje y mayor gasto en ruta; pero el tamaño de la presa en confluencia resultaría ser mucho mayor que el caso de la presa en el río Sibinal.

### **3.6.3 Evaluación del impacto de la metodología**

La aplicación práctica de la metodología propuesta ha producido impactos positivos en las Empresas Consultoría en Construcción y Evaluación de Proyectos (CCEP), Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA), Materiales y Servicios Acuícola (EMASA), Geología Ambiental & Económica, S.A., Ecosoluciones Integrales, S.A., Corporación Multi Inversiones Energía, TW Solar, Cementos Progreso, Geografía y Forestería, S.A., ENEL GREEN POWER, GUATEMALA, S.A. (Anexos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10), en las cuales se ha logrado la introducción de los resultados de esta investigación de forma parcial o total.

Los resultados del proceso de validación de la metodología propuesta en la cual se comprobó la validez de los modelos propuestos, su aplicabilidad y los impactos positivos que ha producido en el contexto empresarial de Guatemala permiten confirmar que la misma puede ser empleada con seguridad como un instrumento para el uso sostenible de los recursos hídricos de la cuenca y además, puede ser generalizada para estudios similares en otras cuencas hidrográficas a partir de las condiciones específicas de cada lugar desde el punto de vista hidrológico y fisiográfico.

### **3.7 Análisis de la evaluación económica**

En la tabla 3.19 se muestra los resultados fundamentales de la evaluación económica, los cuales fueron obtenidos como consecuencia de la aplicación de la metodología propuesta en esta investigación en el proyecto hidroenergético Sibinal-Suchiate. Se pudo comprobar que el efecto económico respecto a la metodología tradicional fue de 6439,65 dólares debido a que no fue necesario la erogación de dinero por: pago de mediciones de variables hidrológicas y meteorológicas; pago por visitas a campo y pago por combustible y lubricante. Esto representó una reducción del gasto total en un 17,68%.

**Tabla 3.19** Efecto económico de la aplicación de la metodología propuesta.

Parámetros	Metodología Tradicional	Metodología Propuesta	Parámetros	Metodología Tradicional	Metodología Propuesta
$N_{obs}$	2	0	$G_{soft}$ (\$)	<b>1430,00</b>	<b>1430,00</b>
$S_{obs}$ (\$)	1730,77	0	$S_{camp}$ (\$ h <sup>-1</sup> )	13,36	0,00
<b><math>G_{med}</math> (\$)</b>	<b>3461,54</b>	<b>0,00</b>	$T_{camp}$ (h)	120,00	0,00
$S_{gab}$ (\$ h <sup>-1</sup> )	13,36	13,36	$G_{viat}$ (\$)	1153,85	0,00
$T_{gab}$ (h)	480,00	480,00	<b><math>G_{camp}</math> (\$)</b>	<b>2757,05</b>	<b>0,00</b>
$G_{imp}$ (\$)	92,31	92,31	$COST_{comb}$ (\$ L <sup>-1</sup> )	0,71	0,00
$G_{dp}$ (\$)	96,15	96,15	$COST_{lub}$ (\$ L <sup>-1</sup> )	6,41	0,00
<b><math>G_{gab}</math> (\$)</b>	<b>6601,26</b>	<b>6601,26</b>	$IC_{comb}$ (L km <sup>-1</sup> )	0,07	0,00
$G_{dib}$ (\$)	641,03	641,03	$D$ (km)	3500,00	0,00
$G_{hc}$ (\$)	14,10	14,10	$V_{comb}$ (L)	245,00	0,00
$G_{atla}$ (\$)	74,36	74,36	$V_l$ (L)	7,35	0,00
$G_{ortof}$ (\$)	115,39	115,39	<b><math>G_{cl}</math> (\$)</b>	<b>221,06</b>	<b>0,00</b>
$G_{MDT}$ (\$)	57,69	57,69	<b><math>G_T</math> (\$)</b>	<b>36430,48</b>	<b>29990,83</b>
<b><math>G_{tg}</math> (\$)</b>	<b>902,57</b>	<b>902,57</b>	<b><math>EE</math> (\$)</b>	---	<b>6439,65</b>
<b><math>G_{dat}</math> (\$)</b>	<b>21057,00</b>	<b>21057,00</b>	<b><math>Red G_T</math> (%)</b>	---	<b>17,68</b>

NOTA: la unidad monetaria utilizada fue el dólar (USD).

### 3.8 Conclusiones parciales

- El diagnóstico realizado demostró que el valor promedio de la precipitación en la cuenca del río Suchiate es de 3066,2 mm con una desviación estándar de 693,7 y un coeficiente de variación de 22,6%. Los valores más elevados se encuentran en la parte media y alta de la cuenca. En cuanto a la evapotranspiración potencial, el valor promedio es de 1255,5 mm con una desviación estándar de 270,7 mm y un coeficiente de variación de 21,5%. Los valores más elevados se presentan en las partes más bajas de la cuenca.
- Se estimaron los coeficientes de transposición para los 26 puntos seleccionados de la cuenca Suchiate los cuales alcanzaron valores de 0,021 a 10,92; correspondiendo los más elevados a la parte alta y media de la cuenca de 9 a 16 y de 3 a 9 respectivamente. En el área restante el valor está entre 0,021 y 3. Estos coeficientes permitieron la estimación del caudal medio diario con valor máximo de 30,6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>; valor mínimo de 0,3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>; valor promedio de 6,02 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> y desviación estándar de 8,46 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.
- Se confirmó que los indicadores evaluados para la sostenibilidad del agua en la actividad de riego: Suministro Relativo de Agua por Precipitaciones (*SRP*),

Suministro Relativo de Agua (*SRA*) y Suministro Relativo de Agua de Riego (*SRR*) alcanzaron valores superiores a la unidad, por lo que la gestión del agua se clasifica como excesiva; sin embargo, se demuestra la contribución de la precipitación pluvial a la gestión sostenible del agua en la cuenca.

- Se demostró que los indicadores evaluados para la sostenibilidad del agua en la generación de hidroenergía indican que el agua que se utiliza para la generación hidroeléctrica representa del 60 al 130% respecto al volumen de riego empleado en el cultivo del maíz y el frijol de forma individual o simultánea y el 40% en relación con el volumen de agua total disponible en la subcuenca.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Se demostró mediante el diagnóstico que los valores de precipitaciones y evapotranspiración potencial producen un balance hídrico favorable en la cuenca del río Suchiate que permite la obtención de un volumen de agua disponible de 7,97 a 1047,68 millones de metros cúbicos de agua anualmente.
- Se comprobó que con valores de caudales comprendidos en el rango de 0,3 a 31 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> y alturas de salto neto de 8 a 458 m se pueden obtener potencias instaladas de 0,2 a 41 MW, lo que expresa la existencia de condiciones favorables en la cuenca para el desarrollo de centrales hidroeléctricas.
- Se confirmó que el riego de cultivos como el maíz y el frijol sólo es posible realizarse en los meses de febrero y marzo según las épocas de siembras establecidas en Guatemala; debido a que las necesidades netas de los cultivos son superiores a la precipitación efectiva.
- Los modelos matemáticos de regresión obtenidos experimentalmente permiten la estimación de variables hidrológicas; hidroenergéticas e hidroagrícolas con acertada confiabilidad.
- La nueva metodología propuesta contribuye a la utilización de los recursos hídricos de la cuenca sin que sucedan conflictos entre estas actividades productivas.
- La validación de la efectividad de la metodología propuesta demostró su utilidad para la evaluación del potencial hidráulico y el desarrollo de proyectos hidroenergéticos con impactos positivos en empresas de Guatemala.
- La utilización de la metodología propuesta produjo un efecto económico de 6439,65 dólares, que representa una reducción en los gastos totales de 17,68%.

## **RECOMENDACIONES**

- Aplicar la metodología propuesta en el diagnóstico, modelación de variables hidrológicas, hidroenergéticas e hidroagrícolas y la determinación de indicadores de sostenibilidad para el uso sostenible del agua con fines hidroenergéticos y agrícola en las cuencas hidrográficas; siendo necesario la calibración previa de los modelos de regresión acorde con las características climáticas, fisiográfica, edafológicas y de los cultivos específicos del lugar.
- Considerar otros indicadores de sostenibilidad como el abastecimiento de agua a la población, a la industria y la contaminación de los recursos hídricos.
- Divulgar mediante cursos de capacitación y otras vías efectivas los resultados obtenidos en esta investigación que permita a los profesionales encargado del manejo de los recursos hídricos lograr el uso sostenible para las diversas actividades productivas que se dan a nivel de cuenca hidrográfica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGNEW, M. D. AND PALUTIKOF, J. P.: "GIS-based construction of base line climatologies for the Mediterranean using terrain variables", *Climate Research* No.14, pp.115-127, ISSN: 1616-1572, United Kingdom, 2000.
2. AGUDELO, R. M.: "El agua, recurso estratégico del siglo XX", Universidad de Antioquia, *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, Vol.23 No.1, ISSN: 0120-386X, Medellín, Colombia, 2005.
3. ALLEN, R. G; PEREIRA, L. S; RAES, D; SMUTH, M.: *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO. 301p. Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
4. ALTIERI, M. A; NICHOLLS, C. I.: "Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas", Asociación Ecológica, Tecnológica y Cultural de los Andes, Fundación ILEA, LEISA revista de agroecología, Vol.24, No.4, pp. 5-8, ISSN: 1729-7419, Lima, Perú, 2009.
5. ÁLVAREZ, M. A., PUERTAS J., DÍAZ-FIERROS F.: "Análisis regional de avenidas en la zona atlántica de Galicia Noroeste de España", *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. 16, No.2, pp. 67-76, ISSN: 0044-6890, México, 2001.
6. AVENDAÑO, C.: "Conservación de los recursos naturales con un enfoque comunitario en Chelemhá, Alta Verapaz, Guatemala", Universidad de San Carlos de Guatemala, Proyecto FODECYT No.11-2003, pp.43, Guatemala, 2007.
7. ANDRIEU, C; DOUCET, A; FITZGERALD W. J.: "An Introduction to Monte Carlo Methods for Bayesian Data Analysis", Kluwer Academic Publishers, *Machine Learning*, Vol.50, pp.5-43 ISSN: 0885-6125, The Netherlands, 2003.
8. APARICIO, J; LAFRAGUA, J; GUTIÉRREZ, A; MEJÍA, R; AGUILAR, E.: "Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas", IMTA, Documento Técnico del PHI – LAC, N° 4, ISBN: 92-9089-090-8, pp.36, México, 2006.
9. ASPIOLEA, M. E.: "Análisis del efecto económico en variantes de innovación", curso de Finanzas y Costos, Maestría de Ciencias Económicas, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba, 2007.

10. BADII, M. H; LANDEROS, J; CERNA, E.: "El recurso de agua y sustentabilidad", Daena: International Journal of Good Conscience, Vol.3, No.1, pp. 661-671, ISSN: 1870-557X, México, 2008.
11. BALOCCHI, F.: "Modelación de caudales recesivos para períodos estivales en la cuenca del estero Upeo, Región del Maule", Universidad de Talca. Tesis de Ingeniería Forestal, pp.97, Talca, Chile, 2008.
12. BARRANTES, R; GLAVE, M.: "Amazonía peruana y desarrollo económico", Primera edición en español. IIEP-GRADE. ISBN: 978-9972-51-467-8, pp.23, Lima, Perú, 2014.
13. BARRÍA, P. A.: "Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua", Universidad de Chile, Tesis de Ingeniería Civil, pp.167, Santiago de Chile, Chile, 2010.
14. BEEKMAN, G.: "Agua y seguridad alimentaria", Proceso Regional de las Américas Sub-región América del Sur, VII Foro Mundial del Agua. Editor: CAF, ISBN: 978-980-7644-90-7, pp.29, Corea, 2015.
15. BEEKMAN, G; CRUZ, S; ESPINOZA, N; GARCÍA, E; HERRERA, C; MEDINA, D; WILLIAMS, D; GARCÍA-WINDER, M.: "Agua, alimento para la tierra", Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), ISBN: 978-92-9248-512-2, pp.106, San José, Costa Rica, 2014.
16. BERTINAT, P.: "Reflexión y acción para la sustentabilidad en América Latina", Licencia Creative Commons Atribución 2.5 de Argentina, Energía y Equidad, Año 1, No.1, pp.32, ISSN: 1853-5089, Rosario, Argentina, 2011.
17. BLANCO, E. A.: "Estimación de la potencia eléctrica teórica disponible en Río Copinula, Jujutla, Ahuachapán", Editorial Universidad Don Bosco, Reporte de Investigación, ING-NOVACIÓN, Año.2, No.4, pp.33-50, ISSN: 2221-1136, San Salvador, El Salvador, 2012.
18. BROWN, D. P; COMRIE, A. C.: "Spatial modeling of winter temperature and Climate Research", No.22, pp.115-128, ISSN: 1616-1572, United Kingdom, 2002.
19. BUN-CA: "Manuales sobre energía renovable: Hidráulica a pequeña escala", Primera edición, pp.40, ISBN: 9968-9708-8-3, San José Costa Rica, 2002.
20. CAMPOS-ARANDA, D. F.: "Estimación de la creciente media anual en la Región Hidrológica Núm. 10 de México con base en ecuaciones de regresión potencial", Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol.14, No.4, pp.563-574, ISSN: 1405-7743, UNAM, México, 2013.

21. CAMPOS-ARANDA, D. F.: "Modelación del proceso precipitación-escorrentía mensual por medio de regresiones", UNAM, Ingeniería Investigación y Tecnología, vol.15, No.4, pp.625-636, ISSN: 1405-7743, UNAM, México, 2014.
22. CARDOZO, C. M.: "Centrales hidroeléctricas Componentes Básicos de un Proyecto Hidroeléctrico", Curso de Centrales Hidroeléctricas, Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Itaipu Binacional, 2011.
23. CARO, J.: "Modelación de caudales recesivos para la cuenca del Río Purapel, estación Nirivilo", Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Tesis Ingeniería Forestal, pp.121, Chile, 2001.
24. CASANOVA, D.: "Metodología para el aprovechamiento sostenible del agua subterránea en empresas agrícolas de Ciego de Ávila", Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuaria, Cuba, 2007.
25. CASTRO, A.: "Minicentrales hidroeléctricas", Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), pp. 175, Madrid, España, 2006. Disponible en: [http://dl.idae.es/Publicaciones/10374\\_Minicentrales\\_hidroelectricas\\_A2006.pdf](http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Minicentrales_hidroelectricas_A2006.pdf); consultado el 18-01-2017.
26. CEA, L.: "Cálculo hidrológico de procesos de lluvia-escorrentía mediante un modelo de aguas someras 2D", Proyecto Técnico, Universidad de la Coruña, Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Galicia, España, 2008.
27. CERVERA, L. E.: "Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua", Estudios Fronterizos, Vol.8, No.16, pp.9-41, ISSN: 0187-6961, 2007.
28. CHAFLOQUE, A. E.: "Oferta Hídrica Actual y Futura en la microcuenca Huacrahuacho-Cusco", Serie de Investigación microcuenca Huacrahuacho, No 2. Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC), pp.41, Perú, 2012.
29. CLARK, M. P; SLATER, A. G; RUPP, D. E; WOODS, R. A; VRUGT, J. A; GUPTA, H. V; WAGENER, T; HAY, L. E.: "Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models", Water Resources Research, Vol.44, pp.1-14, ISSN: 0043-1397, USA, 2008.
30. COMMON, M. Y PERRINGS, CH.: "Towards an ecological economics of sustainability", Ecological economics, No. 6, pp. 7-34, ISSN: 0921-8009, United Kingdom, 1992.

31. CUENTA DEL MILENIO (2009) "Inaugurados cinco Sistemas de Riego con Hidroenergía", Disponible en: <http://www.mcahonduras.hn>, consultado el 17 de Enero de 2015.
32. DALY, C.; GIBSON, W. P.; TAYLOR, G. H.; JOHNSON, G. L. AND PASTERIS, P.: "A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate", Climate Research, No.22, pp.99-113, ISSN: 1616-1572, United Kingdom, 2002.
33. DE LA LANZA, G; CARBAJAL, J. L; SALINAS, S. A; BARRIOS, J. E.: "Medición del caudal ecológico del río Acaponeta, Nayarit, comparando distintos intervalos de tiempo", Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, No.78, pp. 62-74, ISSN: 0188-4611, México, 2012.
34. DE LEÓN. W. E; ANTÓN, A.: "Eficiencia del uso del agua en la producción agrícola en Guatemala", Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA), Guatemala, 2007, disponible en: <http://webarchiv.ethz.ch/lcm2007/440.pdf>, consultado el 01-02-2017.
35. DÍAZ, A. P; CHINGATÉ, N; MUÑOZ, D. P; OLAYA, W. R; PERILLA, C; SÁNCHEZ, F; SÁNCHEZ, K.: "Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia", Estudios Socio Jurídicos, Vol.11, No.1, pp.84-116, ISSN 0124-0579, Bogotá, Colombia, 2009.
36. DOUROJEANNI, A; JOURAVLEV, A.: "Informe del cuarto taller de Gerentes de Organismos de Cuenca en América Latina y el Caribe", CEPAL - SERIE Seminarios y Conferencias. Publicación de las Naciones Unidas, ISBN: 92-1-322171-1, pp.54, Santiago de Chile, Chile, 2003.
37. DUITAMA, F. D; MORENO, L. M.: "Estimación de caudales en la cuenca media del río magdalena, empleando el método de transposición de caudales", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, Tesis en opción al título de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia, 2015.
38. DURO, J. M; VÁSQUEZ, R; ORDÓÑEZ, N; AVILA, E.: "Mapa de taxonomía de suelos y capacidad de uso de la tierra a escala 1: 50,000 de la República De Guatemala (Fase I y II)", Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), IGACING – IGAC, pp.50, Guatemala, 2006.
39. EDITORIAL AMBIENTALES 45: "Consumo de agua en Costa Rica", Escuela de Ciencias Ambientales, Revista Ambientales 45, No.4, pp.3-4, ISSN: 1409-2158, Costa Rica, 2013.
40. EGIDO, A; DE PABLO, F; EGIDO, M; GARMENDÍA, J.: "Distribución de la precipitación en la cuenca del Duero", Universidad de Salamanca, Revista de Meteorología, A.M.E., pp.13-24, España, 1985.

41. ERAZO, A. M.: "Balance hídrico integrado y dinámico en el Salvador", Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), Procedimientos y Avances, El Salvador, 2005, disponible en: <http://www.snet.gob.sv/>, consultado el 01-02-2017.
42. ESPEJO, C; GARCÍA, R.: "Agua y energía: producción hidroeléctrica en España", Instituto Interuniversitario de Geografía, Universidad de Alicante, Investigaciones Geográficas, No.51, pp.107-129, ISSN: 0213-4691, España, 2010.
43. FAO: "CROPWAT. Programa de ordenador para planificar y manejar el riego", Estudio Riego y Drenaje, No.46, ISSN: 0254-5284, Roma, 1993.
44. FAO: "Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria". Informe sobre temas hídricos 38, ISBN 978-92-5-307304-7, Roma, Italia, 2016.
45. FATTORELLI, S; FERNANDEZ, P. C.: "Diseño Hidrológico", Segunda Edición en español, ISBN: 978-987-05-2738-2, pp.531, 2011.
46. FLORES, M. A.: "Gestión integrada de los recursos hídricos, de la cuenca hidrológica del río Papagayo, Estado de Guerrero", Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias y Tecnología del Agua, IMTA, Jiutepec, Morelos, México, 2014.
47. FLÓREZ, O.: "Pequeñas Centrales Hidroeléctricas", Mac Graw Hill, ISBN: 978-958-8675-99-2, pp.384, Ecuador, 2001.
48. FRENKEN, K; GILLE, V.: "Irrigation water requirement and water withdrawal by country", FAO, AQUASTAT Reports, pp.263, Roma, Italia, 2012.
49. FSOLAR/PURE/GEF/PENUD: "Medición del potencial hidrológico para generación de energía renovable, La experiencia de la Fundación Solar en Guatemala", Energías Renovables, Serie técnica 5, Tritón Imagen & Comunicaciones, pp.47, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2013.
50. GALLEGO, J; CID, T.: "La reproducción fotográfica como fuente para la investigación histórico-artística", Tratamiento digital de la imagen, Universidad de León, Primeras jornadas: imagen, cultura y tecnología, Universidad Carlos III, Editorial Archiviana, pp.131-142, ISBN: 84-95933-06-3, Getafe, España, 2002.
51. GONZÁLEZ, A.: "Construcción de modelos matemáticos para la predicción del comportamiento de las crecidas en las cuencas del río Maule y del río Mataquito", Universidad de Talca, Tesis de Ingeniería Forestal, pp.172, Talca, Chile, 2008.

52. GONZÁLEZ .; MARRERO N; JORGE M. DEL C; MARTÍNEZ J. B.: “Temas de Hidrología Superficial para Ingenieros”. Editorial Félix Varela, pp. 21-24, ISBN: 978-959-07-0310-2, Ciudad de La Habana, Cuba, 2001.
53. GODDARD, L; MASON, S. J; ZEBIAK, S. E; ROPELEWSKI, C. F; BASHER, R; CANE, M. A.: “Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions”, International Journal of Climatology, No.21, pp.1111-1152, ISSN: 1097-0088, Great Britain, 2001.
54. GONZÁLEZ, O. A.: “Caracterización hidroclimática de Guatemala con fines de riego”, Plan maestro de riego y drenaje, Documento No.1, Proyecto PNUD/OSP/GUA/88/003/ Componente de riego, pp.60, Guatemala, 1990.
55. GONZÁLEZ, O. A.: “Desarrollo del riego y drenaje agrícola en Guatemala”, Plan maestro de riego y drenaje, Documento No.3, Proyecto PNUD/OSP/GUA/88/003/ Componente de riego, pp.67, Guatemala, 1991.
56. GONZÁLEZ, A. E.: “Diseño de un sistema de riego por goteo para maíz y soya en Zamorano, Honduras”, Tesis de Grado, Ingeniero Agrónomo, Universidad Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras, 2012.
57. GONZÁLEZ-ZEAS, D; LUIS GARROTE, L; IGLESIAS, A.: “Análisis hidrológico de los escenarios de cambio climático en España”, Memoria Investigaciones en Ingeniería, No.11, ISSN: 2301-1092, 2013.
58. GORDÓN, R; CAMARGO, I.: “Selección de estadísticos para la estimación de la precisión experimental en ensayos de maíz”, Agronomía Mesoamericana, Vol.26, No.1, pp.55-63, ISSN: 2215-3608, Costa Rica, 2015.
59. GUEVARA, E.: “Un Modelo de Altura-Área-Duración (AAD) de tormentas en Venezuela”, Universidad de Carabobo, Revista Ingeniería UC, Vol.10, No.1, pp.47-51, ISSN: 1316-6832, Venezuela, 2003.
60. GUEVARA E; CARTAYA H.: “Hidrología. Una introducción a la hidrología aplicada”, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 1991.
61. HARPER, G. E.: “El ABC de las energías renovables en los sistemas eléctricos”, Grupo Noriega Editores, Editorial Limusa, pp.320, ISBN: 978-607-05-0454-9, México, 2012.
62. HEINZ, I; KOO-OSHIMA, S; SALGOT, M; COLLADO, J; HERNÁNDEZ, F; TORRICELLI, R.: “Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?”, FAO, pp.124, ISBN: 978-92-5-306578-3, Roma, Italia, 2013.

63. HERRERA, I. I.: "Hidrogeología Práctica", Primera edición, Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, pp.345, Guatemala, 2002.
64. HERRERA, I. R; BROWN, O.: "Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol.20, No.4, pp.48-52; ISSN: 1010-2760, Cuba, 2011.
65. HOU, A. Y; KAKAR, R; NEECK, S; AZABARZIN, A; KUMMEROW, C; KOJIMA, M; OKI, R; NAKAMURA, K; IGUCHI, T.: "The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission", Bull. Am. Meteorol. Soc. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1> (e-View), 2013.
66. HORTA, L. A.: "Perspectivas de sostenibilidad energética en los países de la Comunidad Andina", Publicación de las Naciones Unidas, Serie 3, Recursos naturales e infraestructura, pp. 73, ISBN: 1680-9017, Santiago de Chile, Chile, 2005.
67. HUADE, G; WILSON, J. L; MAKHNIN, O.: "Geostatistical mapping of mountain precipitation incorporating autosearched effects of terrain and climatic characteristics", Journal of Hydrometeorology, No.6, pp.018-103, ISSN: 1525-755X, 2005.
68. IARNA-URL: "Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012. Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo", Instituto de Agricultura, Recursos Naturales, Universidad Rafael Landívar, Serie Perfil Ambiental 12, pp.440, ISBN: 978-9929-587-71-7, Guatemala, 2012.
69. IARNA-URL: "Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo", Instituto de Agricultura, Recursos Naturales, Universidad Rafael Landívar, Serie textos para la educación y el cuidado de la vida 6, pp.65, Guatemala, 2015.
70. IGP: "Atlas climático de precipitación y temperatura del aire en la Cuenca del Río Mantaro", Editado por el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), Primera edición, ISBN: 9972-824-13-6, pp.34, Perú, 2005a.
71. IGP: "Diagnóstico de la cuenca del Mantaro bajo la visión de cambio climático", Volumen II, Editor Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), ISBN: 9972-824-14-4, pp.90, Perú, 2005b.

72. IHOBE, S. A.: "Guía Metodológica para el Cálculo de Indicadores de Sostenibilidad Local en la Comunidad Autónoma del País Vasco", Serie Programa Marco Ambiental, Nº 20, Bilbao, España, 2003.
73. IICA: "Innovación y gestión del agua para el desarrollo sostenible en la agricultura", Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, pp.45, ISBN: 978-92-9248-581-8, San José, Costa Rica, 2015.
74. IUSS: "Base Referencial Mundial del Recurso Suelo", Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos, Grupo de Trabajo WRB, Primera actualización. No.103, pp.134, ISBN: 1020-430X, FAO, Roma, Italia, 2007.
75. JAVIER, F; ANDRÉS, F.: "Modelo No Lineal para la Óptima Generación Hidroeléctrica a Máxima Eficiencia. Un enfoque a Corto Plazo", Sistemas, Cibernética e Informática, Vol.6, No.1, pp.10-16, ISSN: 1690-8627, Medellín, Colombia, 2009.
76. JUNTA DE ANDALUCÍA: "Andalucía renovable", Agencia Andaluza de Energía, pp.247, ISSN: 978-84-694-0270-2, España, 2011.
77. IWMI: "Evaluación exhaustiva del manejo del Agua en Agricultura", Agua para la Alimentación, Agua para la Vida, Earthscan y Colombo, ISBN 978-92-5-306020-7, pp.47, Londres, UK, 2007.
78. IZQUIERDO, T; MÁRQUEZ, A.: "Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias)", Geogaceta, 40, pp.307-310, ISSN: 0213683X, Móstoles, Madrid, España, 2006.
79. KIDD, C; LEVIZZANI, V.: "Status of satellite precipitation retrievals", Hydrology and Earth System Sciences, Vol.15, pp.1109-1116, ISSN: 1027-5606, Germany, 2011.
80. KREMER, C; SEGUEL, O.: "Riego en hortalizas", Boletín Informativo No.6, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, Chile, 2009.
81. LAURO, C; VICH, A; MARIS, S.: "Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo", Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, GEOACTA, Vol.40, No.2, pp.28-51, ISSN: 1852-7744, 2016.
82. LEAL-NARES, O. A; MENDOZA, M. E; CARRANZA, E.: "Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México", Universidad Nacional Autónoma de México, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, ISSN: 0188-4611, México, 2009.

83. LEVINE, G.: "Relative Water Supply: An explanatory variable for irrigation systems", Technical Report, N° 6, Cornell University Ithaca, New York, USA, 1982.
84. LLAMAS, J.: "Hidrología general, principio y aplicaciones", Servicio Editorial Universidad del País Vasco, pp.635, 1993, España.
85. LORENZO-LACRUZ, J; MORÁN-TEJEDA, E; VICENTE-SERRANO, S. M; LÓPEZ-MORENO, J. I.: "Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns", Hydrology and Earth System Science, Vol.17, No.1, pp.119-134, ISSN: 1027-5606, 2013.
86. MAGA: "Política de Promoción del Riego 2013-2023", Directorio Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación Administración 2012-2016, USAID, contrato AID-520-TO-11-00001, Guatemala, 2013.
87. MALININ, N. K; RAMIRO O. F.: "Evaluación de los recursos hidroenergéticos en pequeña escala", IEEE Latin America Transactions, Vol.2, No.1, pp.43-47, ISSN: 1548-0992, USA, 2004.
88. MAKRIDAKIS, S; HIBON, M; MOSER, C.: "Accuracy of Forecasting: An Empirical Investigation of Forecasting", Journal of the Royal Statistical Society, Vol.142, No.2, pp.97-145, ISSN: 1552-6763, United Kingdom, 2011.
89. MARTIN, A. D; QUINN, K. M; HEE, J.: "Markov Chain Monte Carlo in R", Journal of Statistical Software, Vol.42, No.9, pp.1-21, ISSN: 1548-7660, Austria, 2011.
90. MARTÍNEZ, M. A.: "Tecnologías para el uso sostenible del agua: una contribución a la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático", ISBN: 978-92-5-307930-8, pp.46, Tegucigalpa, Honduras, 2013.
91. MARTÍNEZ, C; FERNÁNDEZ, A; RUBIO, P.: "Caudales y variabilidad climática en una cuenca de latitudes medias en Sudamérica: río Aconcagua, Chile Central (33°S)", Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, No.58, pp.227-248, ISSN: 0212-9426, España, 2012.
92. MÉNDEZ, J; NÁVAR, J. J; GONZÁLEZ, V.: "Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México", Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, No. 65, pp.38-55, ISSN: 0188-4611, 2008.
93. MENDOZA, M. E.: "Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo", Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM, México, 2002.

94. MIJAILOV L. P; FELDMAN, B. N.: "Pequeña Hidroenergía", (en ruso), Moscú, Rusia, 1989.
95. MOLDEN, D; SAKTHIVADIVEL, R; PERRY, C. J; DE FRAITURE, C; KLOEZEN, W.: "Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems", Research report 20, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka 1998.
96. MONDRAGÓN, M. A.: "Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia", Corporación Universitaria Iberoamericana, Movimiento Científico, Vol.8, No.1, pp.98-104, ISSN: 2011-7191, Colombia, 2014
97. MONTELONGO, R; GORDILLO, A. J; OTAZO, E. M; VILLAGÓMEZ, J. R; ACEVEDO O. A; PRIETO, F.: "Modelación de la calidad del agua del río Tula, estado de Hidalgo, México", Dyna, Año 75, No.154, pp.5-18, ISSN: 0012-7353, Medellín, Colombia, 2008.
98. MORA, D. C; HURTADO, J. M.: "Guía para el estudio de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos", Pontificia Universidad Javeriana, Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia, 2004.
99. MORALES, S; CORREDORI L; PABA, J; PACHECO, L.: "Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación", DYNA, Vol.81, No.184, pp.178-185, ISSN: 0012-7353, Medellín, Colombia, 2014.
100. MORMENEO, I; DIAZ, R.: "Metodos para clasificar la anomalia de las lluvias", Revista Brasileira de Agrometeorologia, Vol.11, No.1, pp.159-167, ISSN: 0104-1347, Santa María, Brasil, 2003.
101. NAVARRO, J. R; REGALADO, J; TORTOLERO, A.: "Reseñas Bibliográficas", Políticas públicas y participación ciudadana, Universidad de Guadalajara-ATMACSIC, Agua y Territorio, No.2, pp.124-139, ISSN: 2340-8472, Guadalajara, México, 2013.
102. NELSON, G. C; ROSEGRANT, M, W; KOO, J; ROBERTSON, R; SULSER, T; ZHU, T; RINGLER, C; MSANGI, S; PALAZZO, A; BATKA, M; MAGALHAES, M; VALMONTE-SANTOS, R; EWING, M; LEE, D.: "Cambio Climático El impacto en la agricultura y los costos de adaptación", Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI). ISBN: 0-89629-537-0, ISBN: 978-0-89629-537-7, pp.123, Washington, D.C. USA, 2009.

103. NINYEROLA, M.; PONS, X; ROURE, J. M.: "A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques", *International Journal of Climatology*, 20:1823-184, ISSN: 1097-0088, 2005.
104. NÚÑEZ, D; JAVIER, E; REYES, V. M; MUÑOZ, C. A; AGUIRRE, C. A; JIMÉNEZ, J.: "Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Vol.5, No. 2, pp. 201-213, ISSN: 2007-9230, México, 2014.
105. OCAMPO, O. L; VÉLEZ, J. J.: "Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná", *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, Vol.13, No.24, pp.43-58, ISSN: 1692-3324, Medellín, Colombia, 2014.
106. OIEA: "Indicadores energéticos del desarrollo sostenible", ISBN: 978-92-0-306108-7, pp.183, Viena, Austria, 2008.
107. OCDE/AIE/EUROSTAD: "Manual de Estadísticas Energéticas", pp.208, Paris, Francia, 2007.
108. OMW UPM: "Climatología aplicada a la ingeniería y el medio ambiente", Tema 9, necesidades netas, España, 2007, Disponible en [http://www.bom.gov.au/hydro/wr/wmo/guide to hydrological](http://www.bom.gov.au/hydro/wr/wmo/guide%20to%20hydrological), Consultado el 26 de enero de 2017.
109. OMM: "Guía de Prácticas hidrológicas", Quinta edición. Capítulo 41, pp.581-617, Disponible en [http://www.bom.gov.au/hydro/wr/wmo/guide to hydrological](http://www.bom.gov.au/hydro/wr/wmo/guide%20to%20hydrological), 1994, consultado el 25 de abril de 2009.
110. ORDOÑEZ, J. J.: "Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico", *Ciclo Hidrológico*, Cartilla Técnica, Editado por: Sociedad Geográfica de Lima, ISBN: 978-9972-602-77-1, pp.56, Lima, Perú, 2011.
111. ORTIZ, R.: "Método para la evaluación de los recursos Hidroenergéticos en pequeña escala", *Universidad del Valle*, *Revista Energía y Computación*, Vol.15, No.1, pp.15-20, ISSN: 958-41-0165-X, Bogotá, Colombia, 2007.
112. ORTIZ, R.: "Pequeñas centrales hidroeléctricas. Construcción paso a paso", Primera edición, Editorial Ediciones de la U, pp.384, ISBN: 978-958-8675-99-2, Bogotá, Colombia, 2011.

113. PAOLI, C. U; MALINOW, G. V.: "Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes", Universidad Nacional del Litoral, Publicación de trabajos del taller, Primera Edición, ISBN: 978-987-657-371-9, pp.76, Santa Fe, Argentina, 2010.
114. PAVEZ, M.: "Determinación gráfica y matemática de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en seis estaciones pluviográficas de la Región del Maule", Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Tesis Ingeniería Forestal, pp.151, Chile, 2004.
115. PEDREGAL, D. J; RIVAS, R; FELIU, V; SÁNCHEZ, L; LINARES, A.: "A non-linear forecasting system for the Ebro River at Zaragoza, Spain", Environmental Modelling & Software (24), pp.502-509, ISSN: 1364-8152, Amsterdam, The Netherlands, 2009.
116. PEREIRA, L. S; DE JUAN, J. A; PICORNELL M. R; TARJUELO, J. M.: "El riego y sus tecnologías", Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, pp.295, ISBN: 13:978-84-692-9979-1, Albacete, España, 2010.
117. PÉREZ, L; CAMACHO, E; RODRÍGUEZ, J. A; LÓPEZ, R.: "Gestión sostenible del agua de riego", X Premio Unicaja de Investigación Agraria, Analistas Económicos de Andalucía, pp.129, ISSN: 978-84-92443-04-8, Málaga, España, 2009.
118. PÉREZ, L; RODRÍGUEZ, J. A; CAMACHO E; IBÁÑEZ M; DELTELL, G.: "Análisis estacional y espacial del uso del agua en una zona regable", XXIV Congreso Nacional de Riegos, Elche, pp. 241-242, España, 2005.
119. PERRY, C. J.: "Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems", International Irrigation Management Institute, pp.173, Colombo, Sri Lanka, 1996.
120. PESQUER, L; MASÓ, J; PONS, X.: "Integración S.I.G. de regresión multivariante, interpolación de residuos y validación para la generación de rásters continuos de variables meteorológicas", Revista de Teledetección, 28, pp.69-76, ISSN: 1133-0953, Barcelona, España, 2007.
121. PIZARRO, R; AUSENSI, P; ARAVENA, D; SANGÜESA, C; LEÓN, L; BALOCCHI, F.: "Evaluación de métodos Hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región de Maule, Chile", Revista Aqua-LAC, Vol.1, No.2, pp.172-185, ISSN 1688-2881, Chile, 2009.
122. PORTALÉS, C; BORONAT-ZARCEÑO, N; PARDO-PASCUAL, J. E; BALAGUER-BESER, A.: "Un nuevo método para el cálculo de precipitaciones medias mediante técnicas de interpolación geestadística

considerando las características geográficas y topográficas del territorio”, Universidad Politécnica de Valencia, Congreso Internacional de Geomática y Topografía, Valencia, España, 2008.

123. POTENCIANO, A.: “Las inundaciones históricas en el centro-sur de la Península Ibérica. Condicionantes geomorfológicos y Climáticos”, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, pp.273, Madrid, España, 2004.
124. POTENCIANO, A; GARZÓN, G.: “Parámetros geomorfológicos y regresión múltiple en el comportamiento hidrológico de caudales en las cuencas altas de los ríos Tajo y Guadiana”, UCM, Geogaceta, 38, pp.259-262, ISSN: 0213683X, Madrid, España, 2005.
125. PUIATTI, J. M; RIVETTI, A. R; SCHMALZ, J. H.: “Riego complementario en maíz (zea mays l.) en la región de río cuarto empleando el pronóstico climático extendido de 72 horas”, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Río, pp.8, Argentina, 2014.
126. PUERTAS, O. L; CARVAJAL, Y; QUINTERO, M.: “Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia”, Dyna, año 78, Nro. 69, pp.112-120, ISSN: 0012-7353, Medellín, Colombia, 2011.
127. QUEVEDO, K; SÁNCHEZ, K.: “Atlas de evapotranspiración referencia”, Ministro del Ambiente (MINAM), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), pp.110, Lima, Perú, 2013.
128. QUIROGA, R.: “Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe”, División de Estadística y Proyecciones Económicas, CEPAL - Serie Manuales 55, pp.228, ISSN: 1680-886X, Santiago de Chile, Chile, 2007.
129. RAMESH S.V; CHANDRAMOULI, V.: “Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records”, Journal of Hydrology, Vol.312, Issues 1-4, pp.191-206, ISSN: 0022-1694, Amsterdam, Holland, 2005.
130. RAMOS, L. J; MONTENEGRO, M.: “Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro”, Tecnología y Ciencias del Agua, Vol.3, No.2, pp.103-121, ISSN: 0187-8336, México, 2012.

131. RANGEL, E.: "Generación de Información sobre clima y precipitación. Proyecto Agua Cepal", Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, IDEAM, pp.37, Bogotá, Colombia, 2011.
132. REMENIERAS, G.: "Tratado de Hidrología Aplicada", Segunda edición, Editores Técnicos Asociados, ISBN: 84714602849, pp.515, Barcelona, España, 1974.
133. ROLDÁN, J; PÉREZ, R; DÍAZ, M; FÁTIMA; M. F.: "Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego", Universidad de Córdoba, Revista de la FCA UNCuyo, Tomo 42, No.1, pp.107-124, ISSN: 1853-8665, Mendoza, Argentina, 2010.
134. RODRÍGUEZ, J. R.: "Caracterización de la demanda de agua de riego en la zona regable del Genil-Cabra (sectores II-III y IV-VII)", Trabajo profesional fin de carrera. Universidad de Córdoba, pp.124, España, 2002.
135. SÁNCHEZ-GÓMEZ, E; SOMOT, S; MARIOTTI, A.: "Future changes in the Mediterranean water budget projected by an ensemble of regional climate models", Geophysical Research Letters, Vol.36, No.21, L21401, ISSN: 0094-8276, Washington, D.C., USA, 2009.
136. SARANGO, D. D; ROZAS, G. A; SALVADOR, B; VELÁSQUEZ, T. O; SULLCA, J; MANSILLA, J. J.: "Determinación del rendimiento hídrico en la cuenca alta del río Grande en Puno", Revista de Investigación de Física, 121502601, Vol.15, No.2, pp.1-8, ISSN 1605-7724, Lima, Perú, 2012.
137. SCHEEL, M. L. M; ROHRER, M; HUGGEL, C; SANTOS, D; SILVESTRE, E; HUFFMAN, G. J.: "Evaluation of TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution", Hydrology and Earth System Sciences, Vol.15, No.8, pp.2649-2663, ISSN: 1027-5606, Germany, 2011.
138. SCHUURMANS, J. M; BIERKENS, M. F.: "Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model", Hydrology and Earth System Sciences, Vol.11, pp.677-693, ISSN: 1027-5606, Germany, 2007.
139. SERRANO, P; REGÜÉS, D; NADAL, E.: "La variabilidad temporal de la respuesta hidrológica en una pequeña cuenca mediterránea forestada del pirineo central", Pirineos, Revista de Ecología de Montaña, Vol.165, pp.193-213, ISSN: 0373-2568, 2010.
140. SEVILLA, I.: "Evaluación técnica PH la unidad, río Suchiate", Enel Green Power Guatemala S.A, pp.21, Guatemala, 2015.

141. SIERRA, F. E; ADRIANA FERNANDA SIERRA, A. F; GUERRERO, C. A.: “Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica”, Informador Técnico, Edición 75, pp.73- 85, Colombia, 2011.
142. SIMMON, C; TARANO, J; PINTO, J. H.: “Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala”, Instituto Agropecuario Nacional, SCIDA, IAN, Editorial Ministerio de Educación, Primera Edición, pp.1000, Guatemala, 1959.
143. SKARWAN, D.: “Las Hidroeléctricas deben contribuir para un desarrollo territorial sostenible! Una revisión de perspectivas, contradicciones y opciones urgentes para territorios rurales en Guatemala”, Revista Iberoamericana de Economía Ecológica, Vol.16, No.17, pp.65-81, ISSN: 13902776, 2011.
144. SOKOLOV, A. A; CHAPMAN, T. C.: “Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos”, Versión española: Rafael Heras. Instituto de Hidrología de España/UNESCO, pp.183, ISBN: 84-500-5081-2, Madrid, España, 1981.
145. TALENTO, S.: “Bases para un sistema de predicción de Caudales de aporte a Rincón del bonete y Salto Grande”, Universidad de La República, Tesis para optar al Título de Magíster en Ingeniería Matemática, pp.99, Montevideo, Uruguay, 2011.
146. TAPIADOR, F; KIDD, C; LEVIZZANI, V; MARZANO, F.: “A neural networks-based fusion technique to estimate half-hourly rainfall estimates at 0.1° resolution from satellite passive microwave and infrared data”, Journal of Applied Meteorology, Vol.43, No.4, pp.576–594, ISSN: 0894-8763, USA, 2004.
147. TAPIADOR, F; TURK, F. J; PETERSEN, W; HOU, A; GARCÍA-ORTEGA; E; MACHADO, L; ANGELIA, C; SALIO, P; KIDD, C; HUFFMAN, G; DE CASTRO; M.: “Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications”. Atmospheric Research, pp.104-105, 70-97, ISSN: 0169-8095, Netherlands, 2012.
148. TARAZONA, G.: “La necesidad de legislar la identificación de un proyecto hidroeléctrico”, VOX JURIS, Vol.30, No.2, pp.203-21, ISSN: 1812-6864, Lima, Perú, 2015.
149. TOBÍAS, H; DURO, J. M.: “Estudios del recurso suelo en Guatemala”, USAC-MAGA, 2013, disponible en: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/GSP/docs/Central America WS/G UATEMALALA.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/docs/Central America WS/G UATEMALALA.pdf), consultado el 03-02-2017.

150. TORRERO, M. P; AGOSTA, E. A; ARANEO, D. C.: "Características de la circulación troposférica asociada a las variaciones interanuales del caudal del río Tecka-Gualjaina, Argentina", Publicación semestral del Centro Argentino de Meteorólogos, Revista Meteorología, Vol.41, No.1, pp.3-19, ISSN: 1850-468X, Buenos Aires, Argentina, 2016.
151. TORRES, E; MEJÍA, E; CORTÉS, J; PALACIOS, E; EXEBIO, A.: "Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México", Colegio de Postgraduados, Agrociencia, Vol.39, No.5, pp.481-490, ISSN: 1405-3195, México, 2005.
152. TRIBUNAL DE CUENTAS EUROPEO: "Calidad del agua en la cuenca hidrográfica del Danubio: se ha avanzado en la aplicación de la Directiva Marco sobre el agua, pero queda camino por recorrer", Oficina de Publicación. ISBN 978-92-872-3773-6, pp.82, Luxemburgo, Bélgica, 2015.
153. TRINIDAD, A.: "Modelo de crecimiento en biología, su significado biológico y selección del modelo por su ajuste", Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, Tesis de Master en Ciencias Matemáticas Aplicadas e Industriales, pp.101, México, 2014.
154. ULTIMAS NOTICIAS: "Uruguay: gobierno estudia construir más de 100 mini hidroeléctricas", Disponible en: <http://www.hidroenergia.net>, consultado el 02 de Enero de 2015, Uruguay, 2011.
155. UMBRÍA, I; TREZZA, R; JÉGAT, H.: "Uso, manejo y conservación del agua un problema de todos", Conservación del Agua, ACADEMIA, Vol.7, No.14, pp.18-26, ISSN: 1690-3226, Trujillo, Venezuela, 2008.
156. VAN VEENHUIZEN, R.: "Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia experiencias en América Latina", Serie: Zonas Áridas y Semiáridas No.13, Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, pp.194, Santiago, Chile, 2000.
157. VÁZQUEZ, R. J; SOLANO, O. J.: "Modelación espacial de la lluvia y la evapotranspiración teniendo en cuenta parámetros geográficos", Ciencias de la Tierra y el Espacio, Vol.14, No.1, pp.80-90, ISSN: 1729-3790, 2013.
158. VEGA; M. B; ESCARRÉ, A; PERALTA, J. L; QUINTERO, A; GONZÁLEZ, J. I.: "Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos", Cujae, Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol.36, No.2, pp. 94-108, ISSN: 1815-591X, Cuba, 2015.
159. VICENTE-SERRANO, S. M.; SAZ-SÁNCHEZ, M. A.; CUADRAT, J. M.: "Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley

(Spain): application to annual precipitation and temperature”, Climate Research, 24:161-180, USA, ISSN: 1616-1572, United Kingdom, 2003.

160. VILLÓN; M. G.: “HidroEsta 2. Manual del usuario”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Ediciones CDMB, pp.384, ISSN: 978-9968-514-16-3, Cartago, Costa Rica, 2012.
161. ZÚÑIGA, A; JORDÁN, C.: “Pronóstico de caudales medios mensuales empleando Sistemas Neurofuzzy”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Revista Tecnológica ESPOL, Vol.8, No.1, pp.17-23, ISSN: 1390-3659, Mantua, Ecuador, 2005.