



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE AFLUENTES QUE ALIMENTAN EL EMBALSE DE
HIDROELÉCTRICA CHIXOY Y SU IMPACTO EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DE
GUATEMALA**

Ing. Mauro Fernando Santizo Hernández

Asesorado por MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Guatemala, marzo de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE AFLUENTES QUE ALIMENTAN EL EMBALSE DE
HIDROELÉCTRICA CHIXOY Y SU IMPACTO EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. MAURO FERNANDO SANTIZO HERNÁNDEZ
ASESORADO POR MSC. ING. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS

GUATEMALA, MARZO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

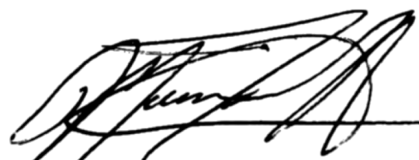
DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Alfredo Boj de León
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE AFLUENTES QUE ALIMENTAN EL EMBALSE DE
HIDROELÉCTRICA CHIXOY Y SU IMPACTO EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DE
GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 09 de marzo del 2020.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Mauro Santizo', with a stylized flourish at the end.

Ing. Mauro Fernando Santizo Hernández

LNG.DECANATO.OI.129.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE AFLUENTES QUE ALIMENTAN EL EMBALSE DE HIDROELÉCTRICA CHIXOY Y SU IMPACTO EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DE GUATEMALA**, presentado por: **Ing. Mauro Fernando Santizo Hernández**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, marzo de 2024

JFGR/gaoc



Guatemala, marzo de 2024

LNG.EEP.OI.129.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE AFLUENTES QUE ALIMENTAN EL
EMBALSE DE HIDROELÉCTRICA CHIXOY Y SU IMPACTO EN LA
MATRIZ DE GENERACIÓN DE GUATEMALA”**

presentado por **Ing. Mauro Fernando Santizo Hernández**
correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados
eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 25 de octubre de 2023

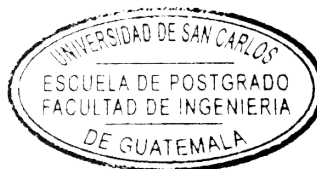
M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE AFLUENTES QUE ALIMENTAN EL EMBALSE DE HIDROELÉCTRICA CHIXOY Y SU IMPACTO EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DE GUATEMALA** del estudiante **Mauro Fernando Santizo Hernández** quien se identifica con número de carné **201122754** del programa de Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



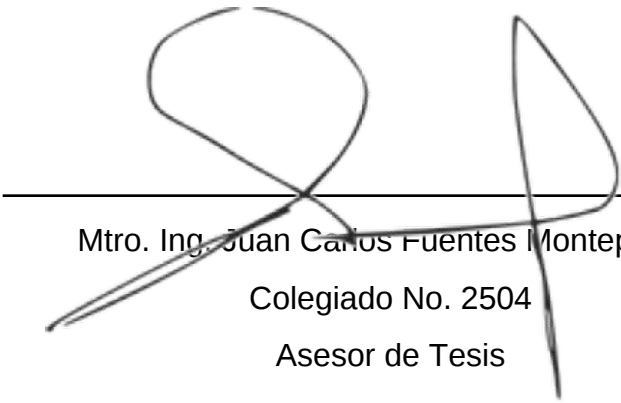
Guatemala, 25 de octubre de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE AFLUENTES QUE ALIMENTAN EL EMBALSE DE HIDROELÉCTRICA CHIXOY Y SU IMPACTO EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DE GUATEMALA"** de el/la estudiante **Mauro Fernando Santizo Hernández** del programa de **Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados** identificado(a) con número de carné 201122754.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Colegiado No. 2504
Asesor de Tesis

Ing. Juan Carlos Fuentes M.
M Sc Recursos Hidráulicos
M.Sc. Hidrología
Col. # 2,504

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Mi creador, señor que me guía hacia el éxito.

Mis padres

Ernesto Santizo y Haydeé Hernández, por su apoyo a lo largo de toda mi vida no importando el momento

Mi hermana

Fiorella Santizo, por su apoyo y ejemplo de perseverancia y responsabilidad.

Mis abuelas

Berta Silva y Adelfa Catalán, quienes han sido un gran ejemplo de vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Mi casa de estudios, por la oportunidad de continuar preparándome en un nivel superior

Mi asesor

M.Sc. Ing. Juan Carlos Fuentes, por su apoyo y seguimiento a mi trabajo de graduación.

Primera Cohorte

Compañeros de estudio, grupo unido y variado con disponibilidad de apoyo y compartir conocimientos.

Mi novia

Por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XI
OBJETIVOS.....	XV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Generación hidráulica.....	7
2.1.1. Proceso de generación.....	8
2.1.2. Clasificación de hidroeléctricas.....	9
2.1.3. Régimen de flujo de agua.....	9
2.1.4. Altura de salto.....	10
2.2. Cambio climático	11
2.2.1. Indicadores de cambio climático.....	16
2.2.2. Vulnerabilidad	16
2.2.3. Efecto precipitación pluvial	18
2.3. Recurso hídrico en Guatemala.....	19
2.3.1. Legislación guatemalteca	20
2.4. Hidroeléctrica Chixoy.....	31
2.4.1. Generalidades	31

2.4.2.	Cuenca del río Chixoy	34
2.5.	Mercado Eléctrico Guatemalteco	35
2.5.1.	Matriz energética Guatemala	38
2.5.2.	Lista de mérito.....	39
2.5.3.	Informe de post despacho	40
2.6.	Fundamento estadístico	40
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	47
3.1.	Análisis del precio de oportunidad de la energía a partir de la tendencia de aporte de hidroeléctrica Chixoy.....	47
3.2.	Análisis de confiabilidad de hidroeléctrica Chixoy.....	50
3.3.	Efectos de la producción energética de Guatemala a partir de la tendencia de aporte de hidroeléctrica Chixoy.....	56
3.4.	Ciclos estacionales de generación de Hidroeléctrica Chixoy a través del tiempo y analizar la dependencia de dos variables climatológicas en su proceso de producción.....	58
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
4.1.	Análisis interno	63
4.2.	Análisis externo	70
	CONCLUSIONES.....	75
	RECOMENDACIONES	77
	REFERENCIAS	79
	ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Variación de Temperatura	13
Figura 2.	Histórico GEI	15
Figura 3.	Relación precipitación pluvial	17
Figura 4.	Marco legal del subsector eléctrico guatemalteco	36
Figura 5.	Estructura del subsector eléctrico guatemalteco	37
Figura 6.	Matriz de generación Guatemala.....	38
Figura 7.	Correlación SPOT – Aporte	48
Figura 8.	Regresión SPOT - Aporte.....	49
Figura 9.	Relación SPOT -Aporte	50
Figura 10.	Correlaciones variables hidrológicas	51
Figura 11.	Precipitación pluvial región Norte	52
Figura 12.	Caudal reportado operación Chixoy	53
Figura 13.	Cotas declaradas Chixoy	54
Figura 14.	Pronóstico precipitación pluvial región Norte.....	55
Figura 15.	Correlaciones variables de mercado	56
Figura 16.	Histórico demanda energética Guatemala.....	57
Figura 17.	Histórico de generación Hidroeléctrica Chixoy	58
Figura 18.	Histórico precipitación pluvial región Norte Guatemala	59
Figura 19.	Histórico aporte generación Chixoy	60
Figura 20.	Correlaciones variables hidrológicas - aporte.....	61

TABLAS

Tabla 1.	Operativización de variables	XVIII
Tabla 2.	Gases efecto invernadero	12
Tabla 3.	Generalidades hidroeléctrica Chixoy	32
Tabla 4.	Características hidroeléctrica Chixoy	32
Tabla 5.	Coordenadas cuenca del río Chixoy	33
Tabla 6.	Delimitación cuenca del río Chixoy	33
Tabla 7.	Estaciones meteorológicas e hidrométricas Chixoy	34
Tabla 8.	Modelos de series de tiempo	42

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
GWh	Giga vatio hora
MWh	Megavatio hora
m^3/s	Metro cúbico por segundo
m s.n.m.	Metro sobre el nivel del mar
mm	Milímetro por metro cuadrado

GLOSARIO

AMM	Administrador del mercado mayorista.
ARIMA	Modelo autorregresivo integrado de media móvil.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Correlación	Medida que indica grado de relación entre dos variables.
GEI	Gases de efecto invernadero.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Lista de Mérito	Se refiere al orden de clasificación de fuentes de energía disponibles en el mercado eléctrico.
LIUNG-BOX	Prueba estadística que permite determinar si las variables observadas son aleatorias o independientes.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
MER	Mercado Eléctrico Regional.

Mercado	Conjunto de transacciones o procesos de intercambio, para el presente estudio se tomarán transacciones económicas derivadas de venta de energía y potencia.
PLP	Programación a largo plazo.
Regresión	Proceso estadístico cuyo objetivo es determinar relación entre variables.
Ruido Blanco	Proceso para comprobación estadística de ausencia de correlación serial.
SEGEPLAN	Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia.
SPOT	Precio de oportunidad de la energía.
Siderúrgico	Sector industrial encargado del procesamiento del hierro y sus derivados.

RESUMEN

El propósito del presente trabajo de investigación es analizar el aporte energético de Hidroeléctrica Chixoy y la variación que existe según la estación del año con la finalidad determinar las consecuencias en el mercado eléctrico nacional en caso de una reducción en la producción e inyección de energía de esta.

El objetivo general fue analizar la relación que existe entre las variables climatológicas y del mercado, localizando ciclos estacionales a través del tiempo para determinar la dependencia que tiene la matriz energética del país con esta planta de generación eléctrica.

El problema de la investigación radica en los efectos que puede causar la dependencia de la generación de Hidroeléctrica Chixoy en la matriz de generación de Guatemala y su impacto en el precio de la energía del mercado. El análisis se realiza a través de la correlación de variables cuantitativas en pronósticos de modelos *Autoregressive Integrated Moved Average*.

Derivado del análisis se identifica relación entre las variables hídricas, generación y el precio de oportunidad. La metodología empleada para realizar el presente trabajo consistió en el análisis de correlación mediante ARIMA para determinar si existe alguna relación entre las variables descritas.

En conclusión, se confirmó que el efecto de la generación de Chixoy coincide con las variaciones en el precio de oportunidad de la energía, sin

embargo, no es factor determinante para la estimación de este. También que esta planta generadora tiene recursos hídricos para seguir aportando.

Para futuros estudios relacionados con el tema se recomienda hacer un estudio específicamente para el campo de generación hidroeléctrica separando las de regulación diaria y de regulación anual (de filo de agua y de embalse), esto por el costo variable de generación resultante.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este apartado se definirá el problema en base al contexto al que se aplica el estudio, a través del planteamiento del problema en forma de preguntas de investigación con énfasis en la importancia de la implementación de la propuesta de investigación y la delimitación de ésta.

- Contexto General

La matriz de generación eléctrica de Guatemala es abastecida en un porcentaje considerable de hidroeléctricas, según datos de la página de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), consultada del día 11 de agosto de 2019, se observa que la generación a partir de recurso hídrico participó en un 31.8 % para este día, siendo temporada no tan favorable para las mismas por la poca precipitación que se tiene, sin embargo, Guatemala presenta condiciones positivas para la construcción de centrales que utilicen este tipo de tecnología debido a la abundancia de recurso hídrico.

La central más importante de este tipo por la generación suministrada es Hidroeléctrica Chixoy, ubicada en Pueblo Viejo, San Cristóbal Verapaz, Alta Verapaz, que se abastece del recurso hídrico por río Chixoy, cabe mencionar que no es la única hidroeléctrica que se encuentra en Alta Verapaz, habiendo en esa región otros complejos, que también representan una cuota de aporte de generación hidroeléctrica importante.

Una vez comprendida la importancia que se tiene con este tipo de generación, la ubicación y el suministro de esta tecnología a la oferta energética

de Guatemala, es necesario plantearnos la siguiente interrogante: cuál sería la estructura de la matriz energética y del mercado eléctrico local sin la central hidroeléctrica Chixoy, y todos los efectos que causaría la no existencia de la misma, siendo esta premisa el punto de partida para poder realizar un análisis de todos los efectos que aporta Chixoy, partiendo desde el punto de vista socio-económico, tecnológico y el impacto en el Mercado Eléctrico Regional (MER) dada la participación de Guatemala en este mercado regional.

Para ello es necesario analizar las causas de la dependencia de esta central hidroeléctrica, y que podría causar una salida inesperada de la misma, siendo el cambio climático un factor importante y que se abordará en el presente estudio, para analizar una reducción de afluentes que alimentan su embalse, complementándola con otros factores ya que no solo el cambio climático será determinante para un desabastecimiento del recurso hídrico que alimenta el embalse, sino que también se puede ver afectada por deforestación de bosques que sean necesarios el proceso de escorrentía de agua que alimenta directamente el embalse.

- Descripción del problema

Como nación es obligación según la Constitución Política de la República de Guatemala, brindar un servicio de calidad y cobertura de energía eléctrica para los usuarios, también asegurar y atraer inversión al país. Según Congreso de la República de Guatemala, 1985, fundamenta en la constitución en su sección décima, “obligación del estado promover el desarrollo económico del país” Constitución Política de la República de Guatemala, 1985, artículo 119), también especifica que se “declara de urgencia nacional la electrificación del país” (Constitución Política de la República de Guatemala, 1985, artículo 129). Por ello se debe tener un panorama claro de los factores que pueden mermar dicha

generación, Guatemala al ser considerado un país rico en cuanto a recursos naturales para generación de energía limpia, ya que según información obtenida del MEM, 2023, en su reporte estadístico del año 2021, “De los 12,228.53 GWh generados en el parque de generación nacional, el 71.37 % fue a partir de fuentes renovables”, (Ministerio de Energía y Minas [MEM], 2021, p. 156). se tiende a dejar por un lado el cuidado de los recursos.

- Formulación del problema

Para la formulación del problema, se formulan las siguientes preguntas:

- Pregunta Central

¿Se cumplen los ciclos de generación según las estaciones del año, cuál es la variable determinante para el suministro de agua en hidroeléctrica Chixoy?

- Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es la variación de precio de la energía cuando se reduce la generación por parte de hidroeléctrica Chixoy, es significativa en el mercado eléctrico nacional?
- ¿Son apreciables los efectos en los cambios de temperatura y lluvias en la región norte del país, existe tendencia a la baja en las cotas declaradas a lo largo del período estudiado, 2010 al 2019?

- ¿Cuál es el efecto en la matriz de generación dada la creciente demanda energética del país, los efectos del cambio climático y sus efectos en la generación de la hidroeléctrica Chixoy?
- Delimitación del problema

El problema se centraliza en la generación de la Hidroeléctrica Chixoy, cuáles son las variables que afectan de manera directa su generación, analizando el efecto del cambio climático en general sobre esta y los efectos de en la matriz de Generación en el Mercado Eléctrico del país.

OBJETIVOS

General

Determinar los ciclos estacionales de generación de Hidroeléctrica Chixoy a través del tiempo de análisis y analizar la dependencia de las variables de temperatura y precipitación pluvial en su proceso de producción.

Específicos

1. Analizar el efecto en el precio de la energía ante una reducción en cuanto a capacidad de generación por parte de Hidroeléctrica Chixoy según la temporada en que se encuentre.
2. Estimar la confiabilidad de Hidroeléctrica Chixoy, desde el punto de vista de suministro de agua a su embalse.
3. Identificar los efectos en la producción energética de Guatemala, a partir de la tendencia de aporte de hidroeléctrica Chixoy.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El presente trabajo se realizó con un enfoque mixto, debido a que la investigación se realizó por medio de conceptos teóricos que generan análisis cualitativo y cuantitativo porque se analizaron de datos a través de métodos estadísticos.

El diseño es no experimental debido a que no se manipularon variables de laboratorio, únicamente se procesó y analizó datos históricos para todas las variables.

El tipo de estudio que se empleó un estudio descriptivo correlacional ya que la presente investigación se desarrolló mediante el análisis de dos grupos de variables, separándolas en hídricas para observar la confiabilidad de la hidroeléctrica Chixoy a través del suministro de la garantía en el suministro del que llamaremos en este caso su *fuentes de energía de generación*, posterior a esto se analizan las variables de mercado cumpliendo con los objetivos de determinar si existe una relación en el precio de la energía derivado del aporte de esta central hidroeléctrica.

El alcance empleado fue longitudinal dado que se analizaron datos a través de un intervalo de tiempo establecido, para los datos climatológicos se trabajaron datos del año 2010 al 2019, mientras que para las variables de mercado se procesaron datos de octubre del 2015 hasta agosto del 2020. Es un análisis descriptivo ya que a partir de los resultados presentados se pueden proponer diferentes temas de investigación para futuros trabajos y estudios que se puedan realizar sobre el tema. También es de carácter cuantitativo ya que los

datos numéricos analizados tienen como objetivo establecer el impacto económico en las variables del mercado.

Las variables e indicadores son de carácter cuantitativas numéricas, mediante variables continuas, aplicando esta clasificación para todas las analizadas en períodos anuales, estas fueron obtenidas de bases de datos históricas de clima y de mercado siendo las siguientes precipitaciones pluvial, temperatura, cotas del embalse, caudal declarado, aporte de generación de hidroeléctrica, demanda energética, generación total y precio de oportunidad de la energía, SPOT.

Tabla 1.

Operativización de variables

Objetivos	Variable	Dimensiones	indicadores
Determinar los ciclos estacionales de generación de Hidroeléctrica Chixoy a través del tiempo y analizar la dependencia de dos variables climatológicas en su proceso de producción	Caudal, Cotas, Precipitación, aporte y temperatura	m^3/s , $^{\circ}C$, GWh $m.s.n.m.$,	Períodos de Generación
Analizar el efecto en el precio de la energía ante una reducción en capacidad de generación por parte de Hidroeléctrica Chixoy	Aporte y SPOT	GWh , \$	Precio de energía
Analizar la confiabilidad de Hidroeléctrica Chixoy, desde el punto de vista de suministro de agua a su embalse	Precipitación, cotas y generación	mm , $m.s.n.m.$, GWh	Generación y cotas

Continuación tabla 1.

Identificar los efectos en la producción energética de Guatemala, a partir de la tendencia de aporte de hidroeléctrica Chixoy	Aporte, demanda y generación total	GWh	Precio de energía
---	------------------------------------	-----	-------------------

Nota. Descripción de variables según operativización. Fuente elaboración propia.

Técnicas de investigación, los datos analizados fueron procesados inicialmente mediante software Excel, posterior a ello se importaron a RStudio. Las técnicas de análisis de información empleadas fueron las siguientes: gráficos de series de tiempo, se buscó observar el comportamiento de estas y determinar su estacionariedad. Series Logarítmicas: con ello se buscó convertir la serie en estacionaria. Diferencias en series de tiempo: se buscó convertir la serie en estacionaria. Prueba de Dickey y Fuller para una raíz unitaria: se corroboró la estacionariedad de las series temporales. Función de autocorrelación (ACF): indica el número de medias móviles que se tienen en las diferencias de series, para modelo *Autorregresive Integrated Movil Average*.

Se analizó también mediante gráfico. Función de autocorrelación parcial (*Partial Autocorrelation Function*): indica el número de autorregresivos que se tienen en las diferencias de series, para modelo ARIMA. Se analizó también mediante gráfico. Prueba de *Ljung-Box*: para verificar que exista ruido blanco que para este estudio se tomará como la ausencia de correlación serial en las series de tiempo, el error tiene media igual a cero, varianza constante y que los errores no están correlacionados. Pronósticos: se pronosticó un período equivalente a 36 meses, los datos obtenidos fueron con un 80 % y 95 % de confianza. Gráficos de dispersión: se emplearon para analizar relación entre variables.

Unidad de Análisis, la muestra para la unidad de análisis fueron los informes de post despacho del AMM desde octubre del 2015 hasta agosto del 2020, así como los datos históricos del INSIVUMEH del mismo período de tiempo.

- Fases del estudio
 - Fase 1: revisión documental

En esta se refinó el marco teórico, el cual nos brindó información cualitativa que permite una comprensión adecuada de las variables analizadas. La recolección de datos se concluyó con las variables mencionadas al inicio de este capítulo, sin priorizar datos hidrológicos puntuales de la hidroeléctrica sujeta de estudio, debido a la unidad de estudio en la que se desarrolla el presente análisis, que tiene un enfoque de mercado energético.

- Fase 2: recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante investigación de datos históricos de las variables presentadas anteriormente, para las variables de mercado se descargó desde el sitio web del Administrador del Mercado Mayorista, en su sección de resultados de la operación. Mientras que, para los datos de precipitación pluvial y temperatura, se realizó solicitud al área de información de la página del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, logrando obtener datos de 3 estaciones de relevancia para el presente estudio siendo Cobán, Panzós y Santa María Cahabón.

- Fase 3: análisis de información

Se seleccionaron las variables de interés para el estudio, debido a que los datos históricos se obtuvieron por medio de horario diario, se refinó la base de datos mediante promedios diarios y posterior a esto, mediante promedios mensuales.

Dado que los datos históricos fueron obtenidos con diferentes años de antigüedad se procedió a separar los datos en dos grupos, siendo los datos hidrológicos (caudal, cotas, precipitación y temperatura) y los de mercado (matriz de generación, demanda nacional, aporte hidro Chixoy y precio de oportunidad de la energía), para los primeros se analizó la información de promedios mensuales obtenidos con anterioridad a partir del año 2010, mientras que para los datos de mercado el análisis se realizó a partir del octubre del 2015.

Los datos de precipitación pluvial y temperatura, dado que se tenía información de tres estaciones meteorológicas (Cobán, Panzós y Santa María Cahabón), se procedió a realizar un análisis mediante gráficas de estas tres, se refinaron los datos y se obtuvo el promedio mensual, unificando los datos.

Se procedió a ordenar los datos finales de promedios mensuales con el año de inicio mencionado anteriormente para cada una de las variables y se importaron a software RStudio para obtener series de tiempo de cada una de estas y sus respectivas proyecciones.

- Fase 4: Interpretación de la información

Con base en los resultados obtenidos de las correlaciones de datos, regresión lineal, series de tiempo y aplicación de modelo *Autoregressive Integrated Movil Average* se procedió a interpretar los efectos de cada una de las variables, su relación dependencia y efectos que resultarían en el mercado, mediante la discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones.

- Fase 5: redacción del informe final

Se redactó el informe final, iniciando con el desarrollo de la fase 1 mediante el refinamiento del marco teórico agregando información que se consideró útil mientras se realizaba el procesamiento de datos y el análisis de la información. Hasta llegar a la fase número 4 en la que se realizó el análisis e interpretación de series de tiempo y proyecciones para obtener los resultados, discutirlos y brindar conclusiones y recomendaciones.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación es una sistematización porque incita al análisis de la matriz de generación eléctrica de Guatemala que según datos del informe estadístico del Ministerio de Energía y Minas del año 2020, “la generación hidroeléctrica representa 52 % de la generación total del país” (MEM, 2021, p. 109). Por ello, una reducción de esta generación conlleva incidencias directas en los resultados de operación del mercado eléctrico y los precios de este.

El estudio se deriva del aporte significativo de centrales hidroeléctricas en la matriz energética de Guatemala, y se delimita a Chixoy ya que según datos de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de agosto del 2019 la participación fue de 31.8 % y durante los años ha disminuido su aporte, esto se relaciona directamente con las temporadas y efectos del clima a los cuales está expuesto el país. La generación hidráulica es considerada de costo variable cero, sin embargo, la Hidroeléctrica Chixoy se clasifica como central con embalse de regulación anual y el costo del agua será calculado por el Administrador del Mercado Mayorista y varía según la disponibilidad de agua, por lo que se pueden presentar períodos de tiempo en estación seca con lluvia donde este costo pueda bajar al costo mínimo establecido para las hidroeléctricas.

La importancia de realizar estudios como este se da debido a la capacidad instalada de generación de este tipo de tecnología, hidroeléctricas de embalse, ya que los costos asociados para su producción y los efectos en el precio final de la energía pueden ser de carácter crítico, por lo que es necesario plantear escenarios donde el suministro de agua se vea afectado por la falta de lluvias,

deforestación de la zona u otros factores que deriven en situaciones de temporadas secas prolongadas.

La metodología de investigación utilizada fue de enfoque mixto cuantitativo por el procesamiento y análisis de datos realizados, con un diseño no experimental, el alcance fue correlacional donde las variables fueron relacionadas para comprender el impacto en el mercado buscando cualquier tipo de anomalía.

En los resultados se determinó la relación que existe entre las variables climatológicas a partir de la correlación de temperatura, precipitación, aporte, cotas y caudal. Posterior a ello se correlacionó el aporte con el precio de oportunidad de la energía, para determinar la confiabilidad de Chixoy relacionando la precipitación y el caudal. Siendo este el aporte del estudio, se consideró el efecto causado en el precio de oportunidad de la energía y la relación de estas dos variables a través un modelo de regresión.

La investigación se desarrolló en cinco capítulos, partiendo desde la conceptualización del problema.

Capítulo Uno, la problemática analizada en el presente estudio se desarrolló a través del análisis primeramente interno de Guatemala y de la región analizada, y se comparó con las situaciones similares en países de América Latina con características climáticas, hidrológicas y de mercado similares.

Eventos en los que estudios de cambio climático han permitido analizar la tendencia del clima y los efectos en el suministro de agua para una hidroeléctrica, como es el caso del Mollejón en Belice, así como la dependencia de una cuenca

que alimenta un alto porcentaje de hidroeléctricas, como es el caso de Venezuela con el río Caroní.

En el Capítulo Dos se presenta el fundamento teórico de la investigación, el cual incluye conceptos de la generación hidráulica, inclusión del cambio climático como problemática del estudio, legislación aplicable, conceptos del mercado eléctrico y el procedimiento estadístico empleado para la obtención de resultados.

En el Capítulo Tres desarrollan los resultados de la investigación de acuerdo con los objetivos planteados demostrando inicialmente los ciclos estacionales de generación apoyándonos en una serie de tiempo y la correlación que existe en las variables hidrológicas.

Siguiendo con la línea de la investigación se analizó el efecto en el precio de la energía ante una reducción de capacidad de generación, determinando la correlación de las variables del aporte y precio *SPOT*, observando a través de una serie de tiempo períodos de tiempo que coinciden con las temporadas o estaciones de lluvia y la variabilidad del precio.

La confiabilidad de la hidroeléctrica Chixoy se determinó a través del estudio de las cotas, caudal y precipitación pluvial, siendo valores que también por estar ligados a los temas climáticos varían según las estaciones del año, terminando con la realización de un pronóstico de lluvias hasta el año 2024.

Los efectos causados por las estaciones determinadas al inicio de los resultados se pueden observar en el último resultado donde se relacionó la generación con la demanda de la energía según datos obtenidos del mercado, lo

que nos permite conocer el impacto que puede llegar a tener en cuanto al suministro de energía y el precio de esta según un período de tiempo.

El Capítulo Cuatro presenta la discusión de los resultados, detallando los efectos observados de los diferentes modelos estadísticos, buscando con ello comprender la relación entre variables y los efectos resultantes en el mercado eléctrico de Guatemala.

1. MARCO REFERENCIAL

Guatemala es un país considerablemente rico en recursos renovables para la generación de energía, que según datos de Ministerio de Energía y Minas Guatemala, afirma que no se han aprovechado de manera aceptable, por medio de un estudio que determina se ha cuantificado el aprovechamiento en un 23.1 %, resultando que de los posibles 6,000 MW generables, es estarían generando aproximadamente 1,386MW. Según Rodríguez (2018):

Para el año 2017 se tenía un porcentaje del 50.18 % de generación Hidro.

Gran parte de la generación se basa en Chixoy, el cual es alimentado por diferentes ríos, y se han realizado estudios de precipitación pluvial en río Chixoy (p. 9).

Instalándose en diferentes puntos, estaciones hidrométricas por parte del Instituto Nacional de Electrificación, las cuales sirven para obtener datos de precipitación, según estos estudios que se han realizado en período de datos de 1979 al 2016 se han obtenido promedios mensuales de precipitación y por ende el efecto que causa en el caudal que alimentan el embalse de esta hidroeléctrica.

Parte del estudio se basa en el concepto de manejo de cuencas en el país, que según el *Informe nacional sobre la situación de manejo de cuencas en Guatemala 2002*. Se define como:

El proceso de participación de los interesados de una cuenca, gestionando acciones sobre el medio natural y estructura social, económica, institucional y legal para alcanzar objetivos específicos de la sociedad, teniendo como criterios de clasificación de estudios: sistemas de drenaje, grado de concentración de red de drenaje, de acuerdo con su pendiente y relieve. (p.18)

Lo que permite conocer las características generales de una cuenca, y las variables que pueden afectarla, sirviendo como guía del objetivo general y el específico que nos permite desarrollar la confiabilidad de la hidroeléctrica estudiada.

Uno de los estudios planteados por el Ministerio de Energía y Minas se basó en lineamientos que según Castellanos y Guerra (2009):

Los lineamientos de Política Energética 2008-2015, mencionados en El Cambio Climático y sus efectos sobre el desarrollo Humano en Guatemala. En el cual se analiza que el objetivo es dar líneas generales de trabajo que orienten un adecuado y mejor funcionamiento del sector energético nacional, a pesar de ello no se tiene ningún apartado en el que se le dé la importancia que requiere el cambio climático, sin embargo, en sus líneas de análisis menciona diversificar la matriz energética del país priorizando las energías renovables, en otra menciona específicamente las generadas a partir de energía hidráulica, geotérmica, solar y los biocombustibles,

información útil en el desarrollo del análisis económico en el sector eléctrico. (p. 41)

Según el análisis institucional realizado por la Organización de las Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Desarrollo Sostenible, (2012) indica una tendencia de incremento de la demanda energética, esto claramente marcado por el crecimiento exponencial de la población en Guatemala. La matriz energética en Guatemala se ha diversificado desarrollando fuentes de generación a partir de diferentes tipos de tecnologías renovables, sin embargo, presentan intermitencia en el proceso de generación por lo que se deben complementar con generación convencional o no renovable cuyo valor depende de los precios de combustibles de mercados internacionales y que se verá reflejado en la factura del consumidor final.

Problemática que no solo es perceptible en nuestro país, sino que también en países de la región Latinoamericana como Venezuela presentan casos similares, ya que según, Quiroz (2016):

Desde el año 2000 el territorio venezolano ha sido afectado por sequías recurrentes que han causado una merma significativa en las reservas hídricas almacenadas en sus grandes embalses. Es bien sabido que Venezuela es un país con abundantes reservas de petróleo, sin embargo, el 65 % de la demanda eléctrica nacional es cubierta con fuentes hídricas. Una circunstancia agravante es el hecho de que la cuenca del río Caroní, situada al sureste del territorio venezolano, genera el 90 % de la energía hidroeléctrica nacional.

Esto significa, que las sequías sobre esta región del país pueden mermar la generación hidroeléctrica y, por consiguiente, causar la paralización parcial o total de múltiples subsectores estratégicos (ej. Siderúrgico, zonas industriales, entre otros.) lo anterior evidencia la complejidad del fenómeno de la sequía sobre el ámbito social y a la globalidad de los sectores hídrico, hidroeléctrico y agrícola en Venezuela. (p. 72)

En Centroamérica, es posible observar casos de relevancia de este tipo para centrales de generación como el caso del Mollejón en Belice, Esquivel, et. Al. (2016)

La Central Hidroeléctrica Mollejón, localizada en la cuenca del río Macal, es una central a filo de agua que cuenta con cuatro turbinas. Las series climáticas empleadas para el desarrollo de este caso de estudio comprendido entre 1980 y 2010, se han utilizado para la confección de su modelo hidrológico de transformación de lluvia en escorrentía.

Este proceso ha permitido la obtención de las aportaciones hídricas correspondientes a la situación actual, que han servido de base para estimar las aportaciones correspondientes al período de proyección considerado. A partir de esta información, así como de los datos extraídos de los modelos de cambio climático, se deduce una pequeña tendencia

decreciente en las aportaciones hídricas hasta 2030, existiendo un punto temporal (2050) que caracteriza un brusco aumento de dicha tendencia, con un importante descenso de la precipitación (3.0 %) y aumento reseñable de la temperatura (+17 °C).

Todo esto produce un descenso significativo de las aportaciones hídricas en la central (-17.9 %), datos que se ven agravados hacia las proyecciones finales del siglo XXI, respecto de la situación actual. (p. 44)

Por su parte Honduras también presenta estudio similar:

Aprovechamiento El Cajón Honduras, se localiza en los departamentos de Comayagua, Francisco Morazán, La Paz y Yoro. La información es resultante por el efecto del cambio climático, se ha estudiado la generación de la producción anual y la potencia firme de la central. Al igual que lo sucedido con los recursos hídricos tratados anteriormente se observa que para el escenario siguiente, en el año horizonte 2030, se produce una reducción del 22 % en la producción anual, respecto al período de observación. “Los efectos derivados de la sedimentación suponen una variación máxima de 2.2 GWh/año para el mismo escenario” (Esquivel, et al, 2016, p. 47).

2. MARCO TEÓRICO

La matriz de generación de Guatemala se ha diversificado a lo largo del tiempo permitiendo el desarrollo de tecnologías consideradas como renovables, siendo la hidráulica el punto de análisis de conceptos del presente capítulo, complementándose con información del mercado eléctrico nacional.

2.1. Generación hidráulica

Generación de energía que se realiza a partir del uso de agua como fluido para la transformación de energía potencial en energía eléctrica, usando turbinas como base de esta. A las centrales que realizan este tipo de generación se les llama centrales hidroeléctricas. dichas centrales según el Ministerio de Energía y Minas (MEM 2018):

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones que permiten aprovechar, mediante una diferencia de alturas, la energía potencial contenida en la masa de agua que transportan los ríos para convertirla en energía eléctrica. El agua al ser conducida por túneles y tuberías transforma su energía potencial en cinética, es decir adquiere velocidad que al llegar a las turbinas actúa sobre los alabes del rotor haciéndolo girar, el que, unido a un generador, produce energía eléctrica. Guatemala, gracias a su riqueza de recursos hídricos tiene potencial para este tipo de generación.

En nuestro país es considerado un tipo de generación renovable ya que la materia prima, no causa gases de tipo invernadero. (p. 3)

También se considera que es un sistema de generación amigable con la naturaleza ya que según Ortiz Flórez (2011):

Es un energético limpio dentro de los energéticos renovables que aporta una quinta parte de la energía eléctrica producida en el mundo; distinguiéndose a su vez por su carácter multipropósito que le permite integrarse a otras actividades como: el regadío, el agua potable, el turismo, la pesca, la navegabilidad, la reducción de inundaciones entre otros. Esto hace evidente que la energía hidroeléctrica tiene un papel importante por desempeñar en el futuro, tanto en términos de suministro de energía y aprovechamiento de los recursos hídricos. Los cuales se deben realizar en armonía con el desarrollo social, el medio ambiente y el avance técnico económico. (p.15)

2.1.1. Proceso de generación

Para generar energía a partir de esta tecnología se dice que se emplea energía gravitacional, la cual convierte energía potencial en cinética a través de la caída de masas de agua y seguido a ello la convierte en energía mecánica por medio del movimiento de palas de turbinas, teniendo como resultado la conversión de energía eléctrica (Ortiz, 2011).

Por lo tanto, según Echeverría, et. al. (2013)

La cantidad de potencia y energía disponible en el agua de un río o una quebrada está relacionada directamente a la altura o caída disponible, así como de la cantidad de agua que se trasiega (caudal), Para ello se construyen plantas de generación en ríos con caudales que cumplan las condiciones mínimas necesarias para poder aprovechar la energía, buscando la mayor caída o altura disponible y de esta manera usar la cantidad mínima de agua que se requiere para satisfacer las necesidades de energía y potencia. (p. 9)

2.1.2. Clasificación de hidroeléctricas

La clasificación analizada en el presente estudio se basará en el principio de funcionamiento, según Juela (2017) son la “Energía potencial gravitatoria del agua, energía cinética del agua, energía mecánica y energía eléctrica producida, teniendo como fuente un río. Esta clasificación se da según el régimen de flujo de agua y por la altura de salto” (p. 23).

2.1.3. Régimen de flujo de agua

Centrales de Pasada o Fluyente: para este tipo de central el agua no se acumula, es únicamente filtrada a través de un ducto, este debe contemplar una rejilla para guardar la integridad de la turbina. Para este tipo de generación debe existir un flujo constante del caudal ya que la

turbina funcionará con las variaciones que se tengan de él. (Juela, 2017, p. 24)

Centrales de Embalse o regulación: tipo de hidroeléctrica generalizado en el país en el que se aprovecha la energía potencial, ya que se tiene una desviación a partir de un embalse que se tiene a mayor altura o nivel, el agua fluye hasta llegar a casa de máquinas y donde se encontrará con la turbina. (Juela, 2017, p. 25)

Centrales de Bombeo Reversible: para esta central se tendrán dos embalses a diferente nivel y se tendrá una casa de máquinas en un punto inferior, el objetivo de este tipo de central es realizar un mejor uso del agua, ya que cuando se tiene una demanda pico mayor se genera a través del embalse con mayor nivel, ocurriendo lo contrario si la demanda es menor, ya que se utiliza el agua del embalse de menor nivel. (Juela, 2017, p. 26)

2.1.4. Altura de salto

Para esta clasificación la principal variable será la altura o salto hídrico que se tenga, así como el caudal de salida de estas. Siendo los siguientes: Alta Caída: son las que tienen salto hídrico mayor o igual a los 200 metros, los caudales de salida son de un rango de $20m^3/s$ por cada máquina de generación. Media Caída: tienen salto en intervalo de 200 a 20 m, se

utilizan en valles amplios. Sus caudales son de $200m^3/s$. Baja Caída: altura de salto menor a 20 m. en ella se generan caudales para turbina de $300m^3/s$. (Juela, 2017, p. 27)

2.2. Cambio climático

Dadas las circunstancias ambientales del momento se desarrollan diferentes definiciones para el cambio climático y todas convergen en que es el resultado de diferentes procesos suscitados en períodos en los que participa el ser humano como un ente pensante modificando su entorno, siendo más destructivo a partir de la revolución industrial del siglo XIX, y se acentúa en nuestra época. Estas modificaciones del entorno que afectan al ambiente que nos rodean permiten que se realicen alteraciones del estado del clima. Esta variación produce calentamiento de la superficie del planeta debido a los gases de efecto invernadero. Siendo el efecto invernadero un fenómeno que afecta la atmósfera, está dado por diferentes gases que se encuentran presentes en ella, cuyo objetivo es la retención de energía que proviene del suelo del planeta. (Vargas, 2009, p.3)

Los siguientes gases se encuentran componen los GEI (Gases Efecto Invernadero):

Tabla 2.

Gases efecto invernadero

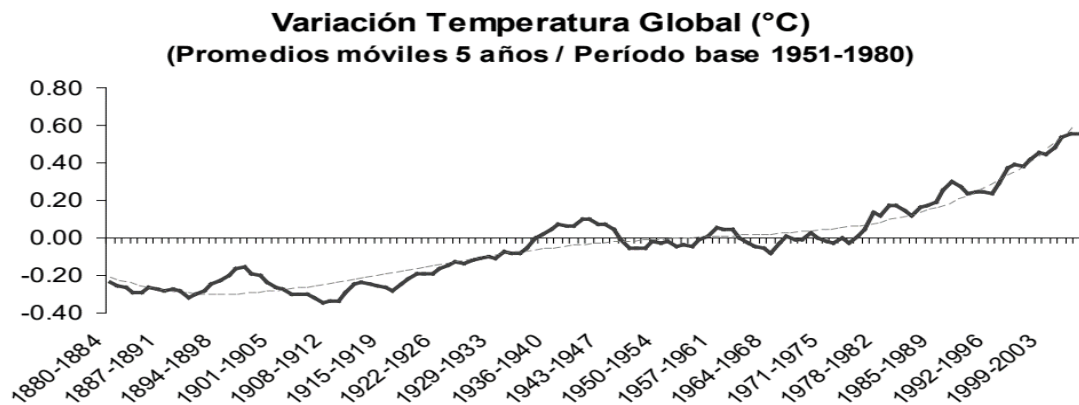
Gas	Nomenclatura
Vapor de Agua	H ₂ O
Dióxido de carbono	CO ₂
Metano	CH ₄
Óxido de nitrógeno	N ₂ O
Ozono	O ₃
Clorofluorocarburos	CFC

Nota. Gases de efecto invernadero Adaptado de P. Vargas. (2009). *El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú.* ([chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2009/Documento-de-Trabajo-14-2009.pdf](https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2009/Documento-de-Trabajo-14-2009.pdf)), consultado el 15 de mayo del 2020. De dominio público.

A continuación, se demuestra el cambio en grados de temperatura en un resumen histórico partiendo del año 1880 hasta el año 2003.

Figura 1.

Variación de Temperatura



Nota. Promedios móviles 5 años/ Período base 1951-1980. Adaptado de P. Vargas. (2009). *El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú*. (<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2009/Documento-de-Trabajo-14-2009.pdf>), consultado el 15 de mayo del 2020. De dominio público.

Los resultados en la región de Centroamérica, han evidenciado que existen variaciones para fenómenos hídricos, partiendo de análisis que se han realizado en regiones fuentes hídricas importantes como los valles que alimentan el Motagua, Pacífico de Guatemala, oeste de El Salvador, así como el Pacífico de Costa Rica, determinando que: para el año 2050 el 50 % de las tierras agrícolas de la región se verán afectadas por la salinización y la desertificación (IDRC y DFID, 2008) lo que impactará la producción de maíz, arroz y otros cultivos Debido al aumento del nivel del mar se prevén consecuencias adversas en las zonas costeras bajas de El

Salvador, Nicaragua y Honduras, incluyendo inundaciones, salinización y degradación de ecosistemas, para 2015 se proyectó un incremento de entre 10 % y el 23 % de las enfermedades gastrointestinales de transmisión vectorial y respiratorias. (Gutiérrez y Espinosa, 2010, p. 10)

Evidencia:

“Incremento de la temperatura global: según la NASA; la temperatura promedio global superficie-océano aumentó en promedio 0,01°C al año en el período de 1900-2007. Así, al 2007 la temperatura global promedio habría aumentado en 0.66°C respecto al año 1900” (Vargas, 2009, p.13).

“Aumento del nivel de los océanos mundiales: 2 milímetros promedio al año en el período 1961 al 2003” (Vargas, 2009, p.13).

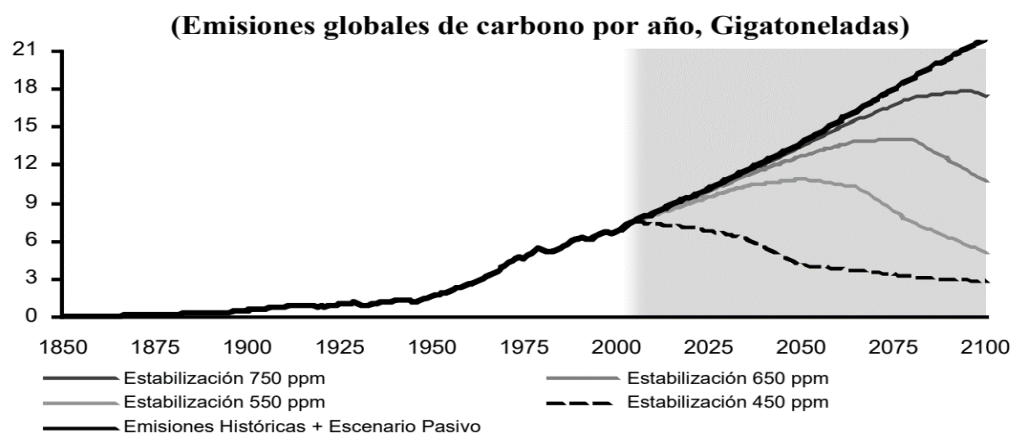
“Deshielo generalizado de nevados, glaciares y mantos polares: las mediciones satelitales revelan que los glaciares de Groenlandia y la Antártida están perdiéndose a un ritmo de 125 mil millones de toneladas al año” (Vargas, 2009, p.13).

Mayor Variabilidad de las precipitaciones: el calentamiento global produce una mayor evaporación de la superficie del océano, intensificando el ciclo hidrológico y aumentando las precipitaciones de manera variable. Así, se prevé que aumentan en latitudes altas y disminuirán en las bajas. (Vargas, 2009, p. 13)

Siguiendo la línea de la información anterior, se deduce que es evidente un aumento en la temperatura y que viene relacionada con el aumento de los efectos de gases invernadero.

Figura 2.

Histórico GEI



Nota. Emisiones de GEI históricas y proyectadas para escenario pasivo y metas de estabilización alternativas. Adaptado de P. Vargas. (2009). *El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú*. ([chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2009/Documento-de-Trabajo-14-2009.pdf](https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2009/Documento-de-Trabajo-14-2009.pdf)), consultado el 15 de mayo del 2020. De dominio público.

En la actualidad se han realizado diferentes estudios y es que, a partir de la firma del protocolo de Kioto, el concepto de cambio climático ha tomado relevancia y ha sido y seguirá siendo objeto de estudios. Para la región de Mesoamérica se ha determinado que es un área vulnerable, no contando Guatemala por su ubicación geográfica. Se han realizado investigaciones y publicado las mismas a través del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), demostrando que las precipitaciones pluviales:

2.2.1. Indicadores de cambio climático

Déficit ecológico, que se define como la diferencia entre la huella ecológica y la biocapacidad de la tierra, refiriéndose a la capacidad de nuestro planeta para procesar todos nuestros desechos ya que para cada actividad humana existe un remanente que es trabajo del ambiente degradarlo, refiriéndose a la huella ecológica, mientras que el poder de abastecimiento de recursos naturales para proveer cada uno de los materiales de los que proceden las actividades humanas se les denomina biocapacidad de la tierra (Vargas, 2009, p. 40).

2.2.2. Vulnerabilidad

Se han identificado las siguientes consecuencias:

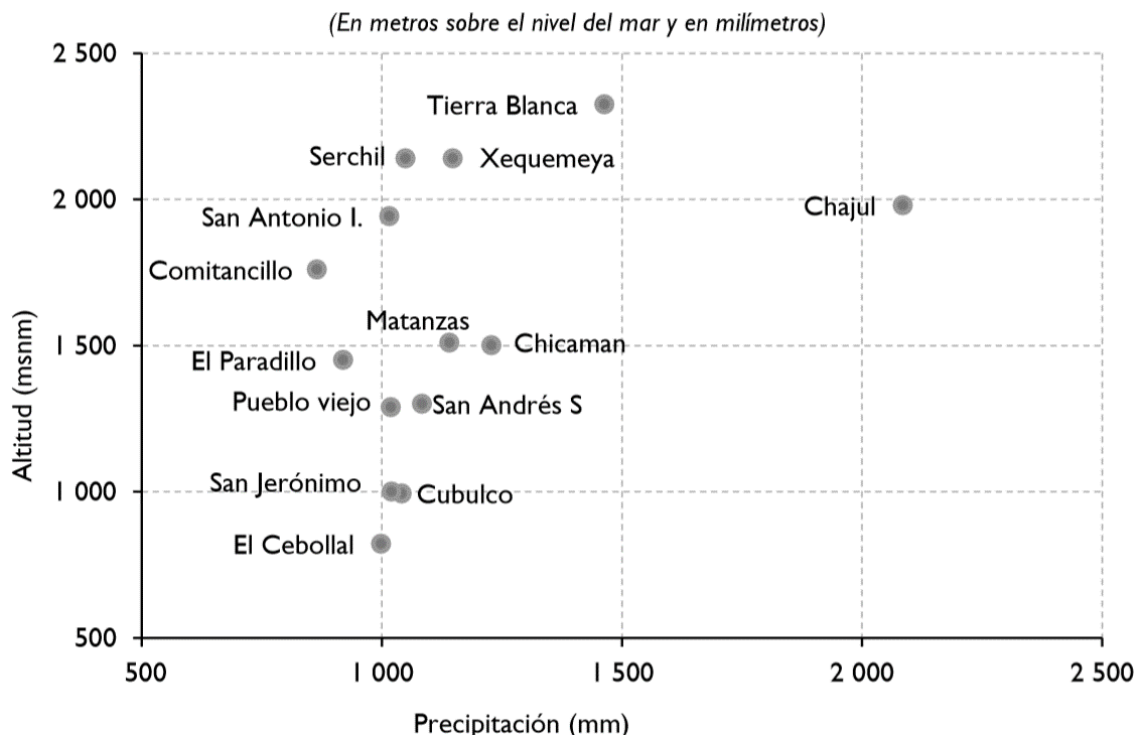
Aumento del nivel del mar en zonas costeras y temperatura que producirá daños entre años 2050 y 2100, incluidos inundaciones, salinización, desplazamientos poblacionales, erosión y degradación de manglares.

Los ecosistemas y bosques, el panorama no es tan alentador ya que se prevé un aumento de la sequedad del ambiente, las cuales propician incendios forestales y los eventos climáticos también tenderán a ser más violentos o drásticos. (Gutiérrez y Espinosa, 2010, p. 51)

Hidroelectricidad: siguiendo con la línea de estudios se observó que se tenían regímenes variables de precipitación pluvial e históricamente han existido períodos de racionamiento de electricidad en Guatemala, esto a consecuencia de temporadas extremadamente secas según proyecciones de Caballero (2018) concluye los siguientes resultados de relación de precipitación pluvial.

Figura 3.

Relación precipitación pluvial



Nota. Guatemala: Relación precipitación-altitud de la cuenca del río Chixoy, 1979-2008 Adaptado de K. Caballero. (2008). *La Economía del Cambio Climático en Guatemala*. (chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43725/1/S1800650_es.pdf), consultado el 16 de mayo del 2020. De dominio público.

2.2.3. Efecto precipitación pluvial

Siguiendo con esta línea de investigación y los informes presentados se tienen 3 posibles escenarios para Guatemala, contruidos a partir de hipótesis del crecimiento de población, economía, producción y consumo de energía. Como resultado de estas hipótesis se determinó que el clima variará en un rango de 0.5 a 4°C para el año 2050. Como se puede observar esta variación en la temperatura presentará una amenaza en cambios de temperatura que se podrán acentuar más dependiendo de la estación y mes del año. Lo cual será sensible aún más en los cambios de precipitación ya sea aumento o disminución dependiendo de la región del país. (Castellanos y Guerra, 2009, p. 16)

En el área hídrica, analizando en particular el recurso hídrico se tiene que: existirá un agotamiento para este recurso en el este de Centroamérica. El Istmo Centroamericano podría experimentar una declinación de entre 10% y el 20% de la esorrentía. Es muy probable que se reduzca el nivel del agua de los acuíferos, principalmente por la reducción de los totales anuales de precipitación (10% y 20%) y de los volúmenes acumulados durante los meses del período canicular (julio-agosto). Lo anterior combinado con el aumento de las áreas de riego y de la población, pondrá en riesgo su reparto equitativo. (Gutiérrez y Espinosa, 2010, p. 25)

2.3. Recurso hídrico en Guatemala

Guatemala ha sido considerado durante mucho tiempo un país con una riqueza invaluable en cuanto a sus recursos naturales, sin embargo, a lo largo del tiempo estos recursos naturales se han visto mermados por diferentes factores como la deforestación por el cambio de uso de suelo.

La ubicación geográfica del país es muy importante ya que está en el centro de América, su geografía montañosa y su posición intertropical, tiene diferentes microclimas en un mismo espacio físico. Según datos del Instituto de Incidencia Ambiental de URL:

Según estudios de Universidad Rafael Landívar:

La precipitación promedio anual es de aproximadamente 2,000 mm con variaciones que van desde 700 mm en las regiones secas de oriente (Jalapa, Jutiapa, Chiquimula y Zacapa), hasta 5,000 mm en la zona norte y occidente (Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz y Baja Verapaz). Generalmente se observan dos estaciones: la lluviosa y la seca. La lluvia se concentra en los meses de junio y septiembre, con una canícula o período de menor precipitación, entre julio y agosto. En las regiones secas, la estación sin lluvias es de seis meses, que comprenden de noviembre a abril, mientras que, para las regiones más húmedas, se reduce a dos o tres meses sin llegar a definirse. Guatemala cuenta con siete lagos, diecinueve lagunas costeras, cuarenta y nueve lagunas, ciento nueve lagunetas, siete embalses y tres lagunas temporales. (URL, 2005, p. 5)

Según el Instituto de Incidencia Ambiental, Universidad Rafael Landívar (URL, 2005):

En Guatemala se tiene un escurrimiento superficial entre 1,760 y 3,190 m^3/s , en su mayoría concentrado en cuatro meses en las zonas más secas y con distribución más uniforme en las regiones húmedas. El 55% del territorio lo forman cuencas de repercusión internacional cuyas aguas en un 47.5% van hacia México, 7% a El Salvador, 6% hacia Belice, y una mínima fracción 0.5% hacia Honduras. Los ríos más caudalosos son el Usumacinta (1,800 m^3/s), Motagua (240 m^3/s), Polochic (161 m^3/s), Sarstún (172 m^3/s) e Ixcán (165 m^3/s). En la costa sur el río Suchiate (28 m^3/s) es el de mayor caudal. Se estima que el volumen de las aguas subterráneas es de 33,699 millones de metros cúbicos por año. (p.17)

2.3.1. Legislación guatemalteca

En Guatemala no se cuenta con una ley vigente que administre y vigile el uso adecuado del recurso hídrico, sin embargo, el régimen jurídico se compone por diferentes elementos, leyes y reglamentos que a pesar de no estar en un solo documento legal tienen el objetivo de cuidar los recursos. Las diferentes instituciones del Gobierno partiendo del Congreso de la República de Guatemala, a través de la Constitución Política de Guatemala norman y legislan según su nivel de injerencia.

Siendo este un gran defecto ya que no hay una estructura administrativa específica que audite y vele por el correcto uso de las cuencas y recursos hídricos. Según Universidad Rafael Landívar (URL 2009):

El Instituto de Incidencia Ambiental en su documento técnico Situación Actual del Recurso Hídrico en Guatemala: la legislación vigente el agua es considerado como un recurso abiótico, económico y es considerado como patrimonio del Estado y de los particulares; y social, al mandar la constitución se organice su uso en función del interés social; por tratarse de un bien con obvia capacidad de satisfacer unos de interés general, puede ser expropiada y al igual que otros bienes y derechos conforme la Ley de Expropiación (1945) vigente; y los estudios y obras necesarios para su aprovechamiento, contratados con el sector privado conforme la Ley de Contrataciones del Estado.

Que también en su documento técnico Situación Actual del Recurso Hídrico en Guatemala: La normativa prevista para la administración del agua aplica el criterio de los usos sectoriales del agua, el control de la oferta mediante la medición y la protección del elemento abiótico, a través de estrategias de protección y de estudios de evaluación de impacto ambiental, sin incluir el criterio administrativo de manejo integrado de los recursos hídricos, situación aún prevalente para el año 2003, ni contar con sistema de monitoreo y control. El término mencionado anteriormente de

administrar dicho recurso es introducido en la Ley Forestal del año 1925 y continuó vigente hasta que fue reiterado en el año de 1970. (p. 9)

Existen diferentes anteproyectos e iniciativas de ley, que no han tenido ningún tipo de dictamen favorable. La legislación vigente para el cuidado de este recurso cuenta con diferentes instrumentos como:

“Leyes Generales, Leyes Específicas, Acuerdos Gubernativos, Acuerdos Ministeriales, Normas técnicas, Reglamentos y ordenanzas municipales” (Mijangos y Camó, 2011, p. 66).

Sin embargo, la Constitución Política de la República de Guatemala, en su artículo 127, se establece: “Todas las aguas son bienes del dominio público, inalienables, e imprescriptibles. Su aprovechamiento, uso y goce se otorgan en forma establecida por la ley, de acuerdo con el interés social” (Congreso de la República de Guatemala, 1986, p. 26).

También se observan diferentes decretos y reglamentos concernientes al tema, según Universidad Rafael Landívar (URL 2005):

- Decreto 74-96 del Congreso de la República de Guatemala, Ley de Fomento de la Educación Ambiental.
- Decreto 4-89 del congreso de la República de Guatemala, cuya aplicación corresponde al Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), incorpora genéricamente las aguas como parte de procesos ecológicos esenciales y sistemas naturales vitales.

- Decreto 68-86 del Congreso de la República de Guatemala, Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, cuya aplicación corresponde al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
- Reglamento de las descargas y Uso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006.
- Reglamento de las Descargas de Aguas Residuales en la Cuenca del Lago de Atitlán, Acuerdo Gubernativo 12-2011.
- El código civil de Guatemala también se hace una clasificación dependiendo del tipo de uso que se le dé al agua, ya que lo divide en uso común y aprovechamiento especial, a su vez el de uso común lo divide en navegación y doméstico sin fines comerciales, ambas el requisito será cumplir disposiciones administrativas. Mientras que para el aprovechamiento especial tenemos que será el uso exceptuando el de navegación y doméstico sin fines de lucro.
(p. 7)

Según INDE (2010) en su artículo 4 “También encontramos que se tienen normas para hacer uso del agua, partiendo de la clasificación del tipo de uso: Normas para agua de uso agrícola, uso doméstico, uso minero y de hidrocarburos, uso para la navegación y energético” (p. 10).

Las instituciones del Gobierno encargadas de velar por la protección del agua son las siguientes:

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Ministerio de Educación (MINEDUC), Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), Ministerio de Energía y minas (MEM), Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS), Ministerio de Comunicaciones, Transporte, Obras Públicas y Vivienda, Municipalidades, Autoridades de Cuencas (Congreso de la República de Guatemala, 1986).

Según el Congreso de la República de Guatemala (1986):

El Estado de Guatemala a través de los años, ha ido avanzado en legislar los temas relacionados al recurso del agua. La Constitución Política de la República de Guatemala” establece en el Artículo 2 Deberes del Estado. Es deber del Estado garantizarles a los habitantes de la República la vida, la libertad, la justicia, la seguridad, la paz y el desarrollo integral de la persona. Así mismo, en el Artículo 97 Medio ambiente y equilibrio ecológico. El Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga la contaminación del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico. Se dictarán todas las normas necesarias para garantizar que la utilización y el aprovechamiento de la fauna, de la flora, de la tierra y del agua, se realicen racionalmente, evitando su depredación.

(p. 8)

También es se aprecia la inclusión de disposiciones legales que protegieran el uso de recursos renovables. La Constitución Política, según Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA 1999):

Contempla el aprovechamiento de las aguas de los lagos y ríos, especialmente, para fines agrícolas, agropecuarios, turísticos o de otra naturaleza y para su utilización prioritaria al servicio de las comunidades y no de personas particulares, obligando a los usuarios a reforestar sus riberas, cauces y lugares aledaños a fuentes de agua. (p. 33-34)

Según, Congreso de la República de Guatemala (1985) “en la Constitución Política se deriva Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente con base en el Artículo 97, mencionado anteriormente” (p. 73).

La Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, Decreto Número 68-86 del Congreso de la República, establece que en ausencia de un marco jurídico-institucional que permita normar, asesorar, coordinar y aplicar la política nacional y las acciones tendientes a la prevención del deterioro ecológico y mejoramiento del medio ambiente, se hace necesario emitir el correspondiente instrumento legal especial y crear una entidad específica para el logro de estos propósitos. A su vez, que la situación de los recursos naturales y el medio ambiente en general en Guatemala ha alcanzado niveles críticos de deterioro que inciden directamente en la calidad de vida de los habitantes y ecosistemas del país. La aplicación de

esta le fue otorgada al Organismo Ejecutivo, en conducto de la Comisión Nacional del Medio Ambiente en el año de 1986 al crearse dicha Ley, posteriormente dicho ente fue sustituido por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (PNUMA, 1999, p. 36)

La Ley de Protección del Mejoramiento del Medio Ambiente, en su artículo 1 indica que:

El Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional, propiciarán el desarrollo social, económico, científico y tecnológico que prevenga la contaminación del medio ambiente y mantenga el equilibrio ecológico. Por lo tanto, la utilización y el aprovechamiento de la fauna, de la flora, suelo, subsuelo y el agua, deberán realizarse racionalmente. Indica el Artículo 6 que el suelo, subsuelo y límites de aguas nacionales no podrán servir de reservorio de desperdicios contaminantes del medio ambiente o radioactivos. Aquellos materiales y productos contaminantes que esté prohibida su utilización en su país de origen no podrán ser introducidos en el territorio nacional. (Congreso de la República de Guatemala, 1986, p. 2)

A su vez, contiene un capítulo específico sobre el recurso hídrico en donde enuncia que:

El Gobierno debe velar por el mantenimiento de cantidades de agua para el uso humano y otras actividades. El Artículo 12 inciso f y h regula que, dentro de los objetivos específicos de la ley, se encuentra El uso integral y manejo racional de las cuencas y sistemas hídricos y Salvar y restaurar aquellos cuerpos, de agua, que estén amenazados o en grave peligro de extinción, respectivamente. (Congreso de la República de Guatemala, 1986, p. 4)

En el artículo 15 de la misma ley de Protección enuncia que:

El Gobierno velará por el mantenimiento de la cantidad del agua para el uso humano y otras actividades cuyo empleo sea indispensable, por lo que emitirá las disposiciones que sean necesarias y los reglamentos correspondientes para: a) Evaluar la calidad de las aguas y sus posibilidades de aprovechamiento, mediante análisis periódicos sobre sus características físicas, químicas y biológicas, b) Ejercer control para que el aprovechamiento y uso de las aguas no cause deterioro ambiental, c) Revisar permanentemente los sistemas de disposición de agua servidas o contaminadas para que cumplan con las normas de higiene y saneamiento ambiental y fijar los requisitos; d) Determinar técnicamente los casos en que debe producirse o permitirse el vertimiento de residuos, basuras, desechos o desperdicios en una fuente receptora, de acuerdo a las normas de calidad del agua; e) Promover y fomentar la investigación y el

análisis permanente de las aguas interiores, litorales y oceánicas, que constituyen la zona económica marítima de dominio exclusivo; f) Promover el uso integral y el manejo racional de cuencas hídricas, manantiales y fuentes de abastecimiento de aguas; g) Investigar y controlar cualquier causa o fuente de contaminación hídrica para asegurar la conservación de los ciclos biológicos y el normal desarrollo de las especies; h) Propiciar en el ámbito nacional e internacional las acciones necesarias para mantener la capacidad reguladora del clima en función de cantidad y calidad del agua; i) Velar por la conservación de la flora, principalmente los bosques, para el mantenimiento y el equilibrio del sistema hídrico, promoviendo la inmediata reforestación de las cuencas lacustres, de ríos y manantiales; j) Prevenir, controlar y determinar los niveles de contaminación de los ríos, lagos y mares de Guatemala; k) Investigar, prevenir y controlar cualesquiera otras causas o fuentes de contaminación hídrica. (Congreso de la República de Guatemala, 1986, p. 5-6)

La Ley de Áreas Protegidas en su Artículo 13 establece que:

Se crea el Subsistema de Conservación de los Bosques Pluviales, de tal manera de asegurar un suministro de agua constante y de aceptable calidad para la comunidad guatemalteca. Dentro de él podrá haber reservas naturales privadas. Dicha tarea constituye una especial misión para el Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP), es decir, el

ente que vela por cumplir los objetivos de la Ley de Áreas Protegidas.
(Congreso de la República de Guatemala, 1989, p. 4)

La Guatemala, Ley Forestal (1996), en su decreto 101-96 y a través de su reglamento, en el Artículo 35 que obliga al Instituto Nacional de Bosques a:

Identificar las áreas de recarga hídrica que sea necesario conservar y restaurar, para lo cual deberá asignar recursos financieros del Fondo Forestal Privativo a fin de implementar proyectos de manejo y restauración de cuencas para reconocer a los propietarios de bosques, los servicios ambientales generados por los ecosistemas forestales. (p. 14)

El Acuerdo Gubernativo Número 137-2016 en su artículo No. 1 contiene:

Los lineamientos, estructura y procedimientos necesarios para apoyar el desarrollo sostenible del país en el tema ambiental, estableciendo reglas para el uso de instrumentos y guías que faciliten la evaluación, control y seguimiento ambiental de los proyectos, obras, industrias o actividades, que se desarrollan y los que se pretenden desarrollar en el país. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales MARN es el ente encargado de velar por la correcta aplicación de dicho acuerdo. (Gobierno de Guatemala, Organismo Ejecutivo, 2016, p. 2)

El Código Civil indica en el Decreto Ley 106, contiene normas generales sobre el uso y aprovechamiento de las aguas y las principales restricciones sobre su uso. El Código Municipal, Decreto 58-88, contiene normas para el uso de las aguas en las jurisdicciones de cada gobierno local, y asimismo el Código de Salud que norma lo relativo a saneamiento del medio, también contienen regulaciones sobre ellas, e incluso faculta al Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social a declarar de utilidad pública los ríos, lagos, lagunas, riachuelos para fines de abastecimiento de agua potable (Gobierno de Guatemala , 1963).

Finalmente, las autoridades autorizadas en administrar, usar, vigilar, proteger y controlar el recurso del agua según el Congreso de la República de Guatemala 68-1986 será “la Comisión Nacional del Medio Ambiente, los Ministerios de Salud Pública y Asistencia Social y Agricultura, Ganadería y Alimentación; el Consejo Nacional de Áreas Protegidas y las Municipalidades. (Gobierno de Guatemala, 1963, p.3)

Así como, el Instituto Nacional de Bosques el Instituto de Fomento Municipal, la Dirección de Límites y Aguas Internacionales, la Comisión Nacional para el Manejo de Cuencas Hidrográficas, CONAMCUEN y el Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica y Panamá, CAPRE. (Argueta, 2007, p. 23)

2.4. Hidroeléctrica Chixoy

Propiedad de Instituto Nacional de Electricidad (INDE), y desde su construcción suministra un importante bloque de energía para el país, según datos de Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), el despacho promedio para los meses de agosto a octubre 2019 se tiene 245 MW. Esta se ubica en San Cristóbal, Alta Verapaz. y forma un lago artificial de 14 kilómetros cuadrados, su capacidad de almacenamiento en metros cúbicos es de 313,000,000.00, inicia operaciones en el año de 1983 con un volumen de embalse de 390 millones de metros cúbicos. (Rodríguez, 2018, p. 11)

2.4.1. Generalidades

Para el presente informe es necesario conocer más a detalle las características de la hidroeléctrica Chixoy.

Tabla 3.*Generalidades hidroeléctrica Chixoy*

Datos Generales	
Presa	Pueblo Viejo
Entidad Propietaria	EGEE del INDE
Clasificación de la presa	Muy alta consecuencia
Ubicación	Alta Verapaz
Municipio	San Cristóbal Verapaz
Latitud	15°16'52.15"N
Longitud	90°29'27.38"O
UTM-USO	15 P
UTM Este	769461.72
UTM Norte	1690978.7

Nota. Coordenadas hidroeléctrica Chixoy. Obtenido de INDE Guatemala (2019). *Información General.* (<https://www.inde.gob.gt/informacion-publica/>), consultado el 25 de octubre del 2019. De dominio público.

Tabla 4.*Características hidroeléctrica Chixoy*

Datos Generales	
Caída bruta (m)	433
Crecida milenaria	5200
Caudal para turbinar	75
Tipo de Turbina	Pelton
Potencia total placa (MW)	300
Potencia efectiva (MW)	280.983
Inicio Operación	nov-83
Tipo de Presa	Materiales sueltos con núcleo de arcilla
Uso de la presa/embalse	Embalse regulación anual
Altura de presa (m)	110
Volumen de embalse (m3)	300,000,000
Altitud de la corona (msnm)	705

Nota. Características de hidroeléctrica Chixoy. Obtenido de INDE Guatemala (2019). *Información General.* (<https://www.inde.gob.gt/informacion-publica/>), consultado el 25 de octubre del 2019. De dominio público.

Tabla 5.*Coordenadas cuenca del río Chixoy*

Cuenca del Río Chixoy	Vertiente: Golfo de México	
Inicio	15°65'54"N	90°29'27"W
Fin	15°16'13"N	91°24'49"O

Nota. Coordenadas cuenca del río Chixoy. Obtenido de A. Rodríguez (2018). *Efectos del fenómeno “El Niño” en los recursos hídricos de la cuenca del río Chixoy.* ([187153049.pdf](#) [core.ac.uk](#)), consultado el 2 de octubre del 2009. De dominio público.

Tabla 6.*Delimitación cuenca del río Chixoy*

Departamento	Municipio
Huehuetenango	Aguacatán
Quiché	Canillá
	Cunén Sacapulas
	San Andrés
	Sajcabajá
	San Pedro Jocopilas
	Uspantán
Baja Verapaz	Cubulco
Alta Verapaz	Cobán
	San Cristóbal Alta Verapaz
	Santa Cruz Verapaz

Nota. Delimitación de cuenca del río Chixoy. Obtenido de A. Rodríguez (2018). *Efectos del fenómeno “El Niño” en los recursos hídricos de la cuenca del río Chixoy.* ([187153049.pdf](#) [core.ac.uk](#)), consultado el 2 de octubre del 2009. De dominio público.

Tabla 7.*Estaciones meteorológicas e hidrométricas Chixoy*

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
1	La Capellanía	INDE	PL	15°24'41"	91°26'06"	3150
2	Totoncapán	INDE	ME	14°54'25"	91°22'27"	2405
3	Tierra Blanca	INDE	ME	15°06'49"	91°30'25"	2325
4	Santa Cruz del Quiché	INDE	PL	15°01'33"	91°09'32"	2010
5	Xequemayá	INDE	ME	15°04'49"	91°09'59"	2002
6	San Antonio Ilotenango	INDE	ME	15°03'17"	91°13'26"	1960
7	Nebaj	INSIVUMEH	ME	15°23'53"	91°08'32"	1906
8	Huehuetenango	INSIVUMEH	ME	15°19'02"	91°30'11"	1870
9	Comitancillo	INDE	PL	15°13'43"	91°14'22"	1775
10	El Paradillo	INDE	ME	15°15'31"	91°19'01"	1745
11	Serchil	INDE	ME	15°14'10"	91°24'25"	1635
12	Serchil	INDE	HI	15°14'07"	91°24'25"	1630
13	La Estancia	INDE	LI	15°20'50"	91°16'26"	1585
14	Pacaranat	INDE	HI	15°14'53"	91°18'50"	1505
15	El Paradillo	INDE	HI	15°15'57"	91°19'31"	1455
16	Chuitinamit	INSIVUMEH	ME	15°17'18"	91°05'10"	1180
17	Chisiguan	INDE	PL	15°17'42"	91°04'16"	1175

Nota. Estaciones meteorológicas e hidrométricas Chixoy. Obtenido de J. Figueroa (2016). *Análisis de la variabilidad e Hidrometereología en la parte alta de la cuenca del río Chixoy*. Consultado el 28 de octubre del 2019. De dominio público.

2.4.2. Cuenca del río Chixoy

“Cuenca que se alimenta de río Negro, y este a su vez se alimenta de río Blanco, Río Naranjo y Río Amarillo, los cuales llegan hasta el embalse Chixoy” (Mijangos y Camó, 2011, p. 16).

2.5. Mercado Eléctrico Guatemalteco

Ferney Moreno define al mercado eléctrico como:

Un lugar físico en el que existen intercambio de bienes y servicios, buscando una remuneración económica que será equitativa para ambas partes, ahora bien, para el sector eléctrico los bienes y servicios que se tranzarán serán directamente los relacionados a la energía y potencia eléctrica. (Ferney, 2012, p. 31)

El ente regulador será según la Ley General de Electricidad Gobierno de Guatemala, (1996):

Comisión Nacional de Energía Eléctrica, se definirá como el rector del subsector eléctrico guatemalteco. Entre sus atribuciones encontramos que son las de cumplir y hacer cumplir la ley y sus reglamentos, velar por el cumplimiento de las obligaciones y proteger los derechos de los usuarios, definir las tarifas, solucionar problemas siendo el intermediario, emitir las normas técnicas correspondientes, emitir disposiciones y normativas. (p. 4)

Estas funciones y todo lo relacionado con el mercado eléctrico guatemalteco, lo encontramos en la Ley General de Electricidad la cual nos da los lineamientos y directrices para el correcto funcionamiento de

todos los engranajes que componen el mercado, esta a su vez se apoya en reglamentos como Reglamento de la Ley General de Electricidad (RGLE), Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista (RAMM). (Ferney, 2012, p. 4)

Figura 4.

Marco legal del subsector eléctrico guatemalteco



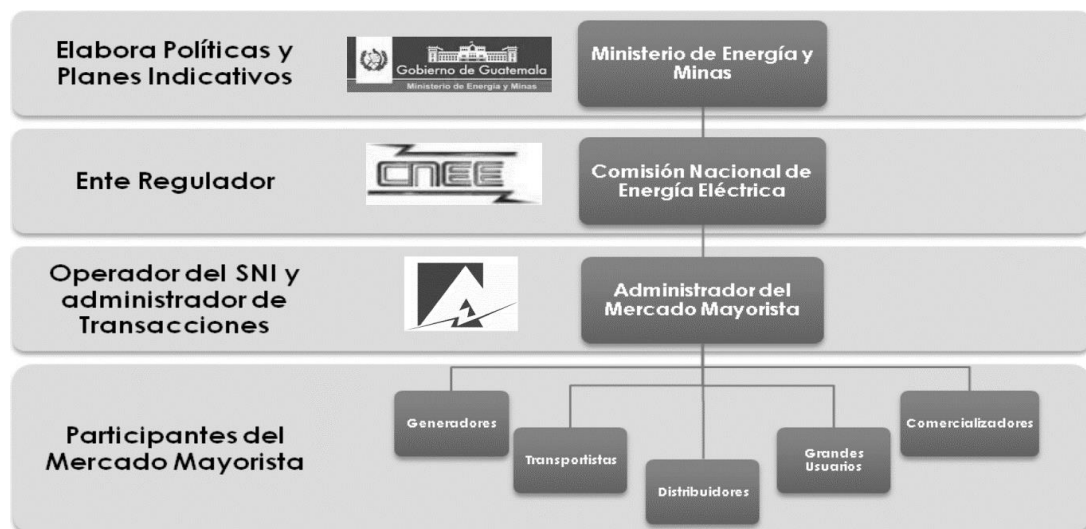
Nota. Marco legal del subsector eléctrico guatemalteco. Obtenido de CNEE (2020). Comisión Nacional de Energía Eléctrica Guatemala. [*Ley General de Electricidad, Guatemala*]. (<http://www.cnee.gob.gt/pdf/informacion/GuiadelInversionista2015.pdf>), consultado el 25 de mayo del 2020. De dominio público.

Los entes que se encargan de dar forma a esta estructura de mercado y que participan de forma activa se les denomina Agentes del Mercado,

entre estos agentes encontraremos a todos los involucrados en la generación del servicio hasta el consumo, y serán los siguientes: Generador, que son las empresas encargadas de generar energía que se comercializará posteriormente. Transportista, encargados de realizar el transporte de energía en alta tensión. Distribuidor, encargados de distribuir la energía en media y baja tensión y que están delimitados por áreas geográficas. Comercializador, encargados de realizar transacciones de bloques de energía, compra venta de esta. (Vargas, Palma y Moya, 2001, p. 1)

Figura 5.

Estructura del subsector eléctrico guatemalteco



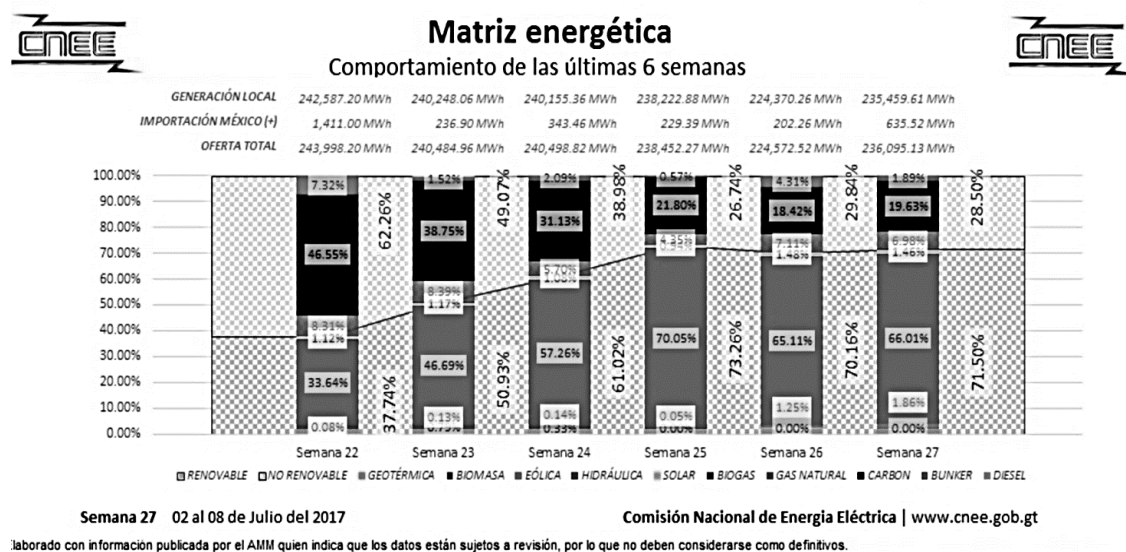
Nota. Estructura del subsector eléctrico guatemalteco. Obtenido de CNEE (2020). Comisión Nacional de Energía Eléctrica Guatemala. [Ley General de Electricidad, Guatemala]. (<http://www.cnee.gob.gt/pdf/informacion/GuiadelInversionista2015.pdf>), consultado el 25 de mayo del 2020. De dominio público.

2.5.1. Matriz energética Guatemala

Matriz Energética: para la construcción de esta definición nos basaremos en el significado de la palabra matriz el cual nos indica que es una relación de números que pueden aportar o restar para un todo, para el caso de la matriz energética de Guatemala, tal y como lo podemos observar en la información que se comparte en la página web de la Comisión nos brinda información acerca de los tipos de energía que aportan el total de la producción energética del país.

Figura 6.

Matriz de generación Guatemala



Nota. Semana 27, Comportamiento de las últimas 6 semanas al 08 de julio del 2017. Obtenido de CNEE (2020). Comisión Nacional de Energía Eléctrica Guatemala. [Matriz de Generación energética Guatemala]. ([Chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cnee.gob.gt/pdf/monitor-mercadeo/2017/MonitoreoSemana%2027-2017.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cnee.gob.gt/pdf/monitor-mercadeo/2017/MonitoreoSemana%2027-2017.pdf)), consultado el 25 de mayo del 2020. De dominio público.

2.5.2. Lista de mérito

Para el despacho de la energía o carga se buscará que la generación con la demanda sea balanceada, siempre que se tenga cierta reserva para cualquier contingencia, como cualquier mercado el objetivo de cualquier tarea que se realice será hacerla de una manera óptima con el menor uso de recursos posible. El Administrador del Mercado Mayorista (AMM) será el encargado de realizar la programación de este despacho y lo hará de manera diaria, apoyándose de elementos como disponibilidad de generadoras, costos variables de generación, energía de contratos y reservas de operación, información. Esta información está contenida y resumida para operación en según una lista llamada: lista de mérito, la cual es empleada para el despacho de unidades a medida que se requiera la entrada de estas.

Siguiendo en la línea de que el objetivo del despacho es optimizar precios y recursos, las primeras unidades generadoras en entrar serán las de menor costo siendo las renovables, englobando generación eólica, solar, generación a partir de gas e hidráulica para el mercado guatemalteco, seguidas por las generadoras térmicas. El precio de oportunidad según será establecido por: la unidad generadora con mayor costo variable que generó por los últimos 15 minutos de la hora en la que

se está determinando el precio de oportunidad. A esta unidad se le conoce como unidad generadora marginal. (Gómez, 2016, p. 78)

2.5.3. Informe de post despacho

Este informe es presentado por el Administrador del Mercado Mayorista de forma diaria y de forma al cierre del periodo mensual, en el cual se muestran parte de las transacciones de potencia y energía eléctrica.

En este informe el mercado integra los precios de la energía dados de forma horaria en el mercado de oportunidad, esto como resultado de la producción de energía dada durante el día o de forma mensual, de acuerdo con la apelación de las diferentes tecnologías que integran la matriz de generación del mercado mayorista.

En este informe también se integra la carga horaria diaria que se dio durante los diferentes periodos de oferta, de igual forma se integra los pronósticos de los caudales de las tecnologías hídricas.

2.6. Fundamento estadístico

Series temporales

Para la evaluación de datos obtenidos a lo largo del tiempo es necesario emplear modelos ya establecidos que se adapten a las características de su tendencia a lo largo del tiempo, dado esto, encontramos que para los datos analizados existe una dependencia de variables desarrolladas a lo largo del

tiempo, razón por la cual, empleamos modelos de series temporales, existiendo para estas diferentes definiciones y según Alonso (2001):

Una serie temporal, es una sucesión de observaciones de una variable tomadas en varios instantes de tiempo, o una sucesión de observaciones de una variable tomadas en varios instantes de tiempo. Estas observaciones provienen de una distribución que puede ser diferente en cada instante del tiempo. Estas se clasifican en estacionarias y no estacionarias, siendo la primera una serie en la cual la media y la variabilidad se mantienen constantes a lo largo del tiempo, mientras que, para las segundas, lo contrario. Entre las características a destacar y que serán de utilidad para el presente estudio encontramos que las series no estacionarias pueden mostrar lo siguiente: cambios de varianza, una tendencia y efectos estacionales. (p.1)

Las series de tiempo contienen por lo menos uno de los siguientes cuatro componentes: 1) tendencia secular; 2) variación estacional; 3) variación cíclica; 4) variación irregular, o aleatoria.

Para el análisis de una tendencia la variación secular, o simplemente la tendencia, es la conducta a largo plazo de la variable durante un período de longitud prolongada. Las fluctuaciones estacionales son patrones que tienden a ocurrir de nuevo, regularmente, durante el período, aunque se

piensa que estas ocurren regularmente cada año. Variación cíclica, que son variaciones como de onda en el nivel general de la actividad comercial durante un período relativamente prolongado, para ello se observa que un ciclo contiene cuatro fases que son las siguientes: 1) Alza o expansión, durante la cual el nivel de actividad comercial se acelera; 2) el pico o punto más alto; 3) el descenso, o contracción; 4) la depresión, que es cuando la actividad está en su punto mínimo. (Webster, 2001, p. 413-415)

Los métodos empleados con mayor frecuencia para el análisis de una serie de tiempo, según Gustavo Aneiros (2008) “se seleccionarán para el análisis de datos de manera que este sea capaz de aglutinar las principales características (observadas en el gráfico de secuencia) de la serie de estudio, son los siguientes” (p.15).

Tabla 8.

Modelos de series de tiempo

Modelo	Fórmula
Aditivo	$X_t = T_t + S_t + a_t$
Multiplicativo puro	$X_t = T_t \times S_t \times a_t$
Multiplicativo mixto	$X_t = T_t \times S_t + a_t$

Nota. Modelos de series de tiempo. Obtenido de G. Aneiros (2008). *Series de Tiempo*. (<https://docplayer.es/3691712-Series-de-tiempo-german-aneiros-perez-master-en-tecnicas-estadisticas-curso-2008-09-departamento-de-matematicas-universidade-da-coruna.htm>), consultado el 28 de octubre del 2019. De dominio público.

Modelos empleados cuando “la magnitud de las fluctuaciones estacionales de la serie crece y decrece proporcionalmente con los crecimientos y decrecimientos de la tendencia.” (Aneiros, 2008, p. 17).

- Modelo ARIMA

Según Santiago (2019):

Este modelo fue desarrollado por *Box y Jenkins*, toma en cuenta la dependencia de entre datos para observaciones en momentos dados, su nombre genérico ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*), este nos permite describir un valor como una función lineal de datos anteriores y errores debidos al azar, además puede incluir un componente cíclico o estacional. Para este se recomiendan al menos 50 observaciones de una serie temporal. Este modelo se resume en cuatro fases: 1) identificar el modelo ARIMA que sigue la serie, los órdenes p y q de su estructura autorregresiva y media móvil; 2) fase de estimación, donde los parámetros AR (autorregresivos) y MA (medias móviles), se estiman por máxima verosimilitud y se obtienen sus errores estándar y los residuos del modelo; 3) diagnóstico, se comprueba que los residuos no tienen estructura de dependencia y siguen un proceso de ruido blanco, si los residuos muestran esta estructura se modifica el modelo para incorporarla y se repiten las etapas anteriores hasta obtener un modelo adecuado. 4) predicción, una vez obtenido un modelo adecuado se realizan predicciones de este.

Un modelo ARIMA (0, d, 0) es una serie temporal que se convierte en ruido blanco (proceso puramente aleatorio), después de ser diferenciada d veces. Se expresa mediante

Ecuación 1

$$(1 - B)^d X_t = a_t$$

El modelo ARIMA (p, d, q), denominado proceso autorregresivo integrado de medias móviles de orden p, d, q, toma la expresión:

Ecuación 2

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d X_t = (1 - v_1 B - v_2 B^2 - \dots - v_q B^q) a_t \quad (p. 1)$$

Metodología de Box-Jenkins (BJ)

Empleado para según Gujarati (2010):

Definir si el modelo de la serie de tiempo se adecúa a un proceso de AR puro, *Moved Average* puro, *Autoregressive Moved Average*, o *Autoregressive Integrated Moving Average*, este considera cuatro pasos:

1) identificación de valores p, d, q, para ello es necesario observar la correlación o correlación parcial; 2) Estimación, posterior a identificar estos valores se debe estimar los parámetros de los términos autorregresivos y de promedios móviles incluidos en el modelo; 3) diagnóstico, se debe

comprobar que se adapta al modelo *Autoregressive Integrated Moved Average*, este se realiza por medio de pruebas que determinen si son de ruido blanco; 4) pronóstico, la fiabilidad de este modelo para realizar pronósticos lo ha hecho popular, siendo usados para pronósticos de corto plazo. (p. 774)

Según Gujarati (2010) la “Autocorrelación parcial (FACP): mide la correlación entre observaciones (series de tiempo) separadas k períodos y mantiene constantes las correlaciones en los rezagos intermedios. Y_t y Y_{t-k} ” (p. 778).

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

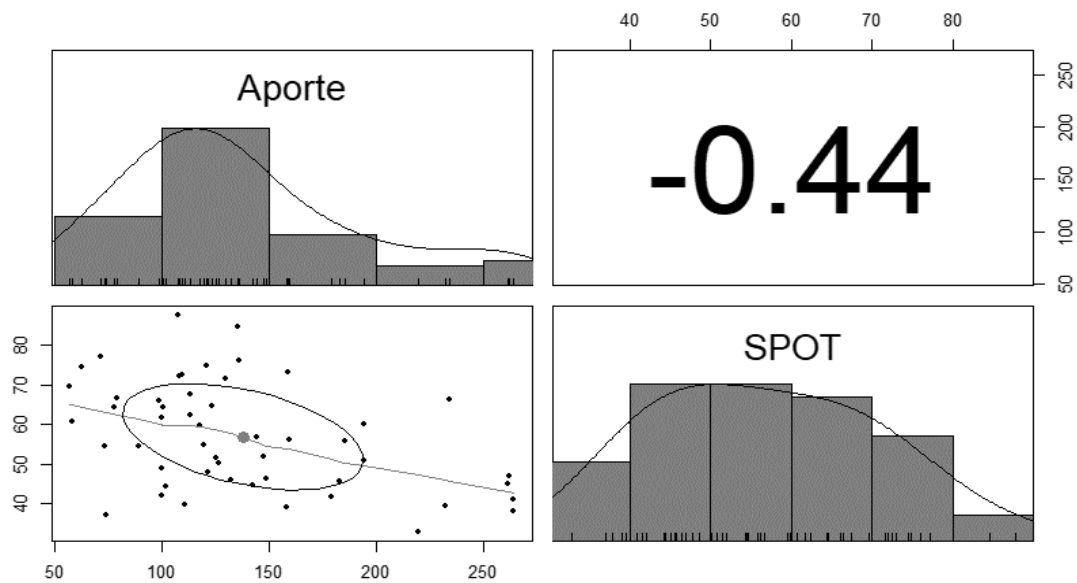
Se presentan los siguientes resultados de acuerdo con los objetivos propuestos.

3.1. Análisis del precio de oportunidad de la energía a partir de la tendencia de aporte de hidroeléctrica Chixoy

Dado el porcentaje de aporte de energía, a la matriz de generación de Guatemala, se consideró el efecto de esta para la obtención del precio *SPOT*, para ello iniciamos midiendo la correlación existente entre estas variables, teniendo un grado de correlación relativamente bajo. Para el proceso de observación se empleará la serie de tiempo de aporte de generación de Chixoy graficada en la Figura 17, histórico de aporte de la generación eléctrica de la central Chixoy.

Figura 7.

Correlación SPOT – Aporte

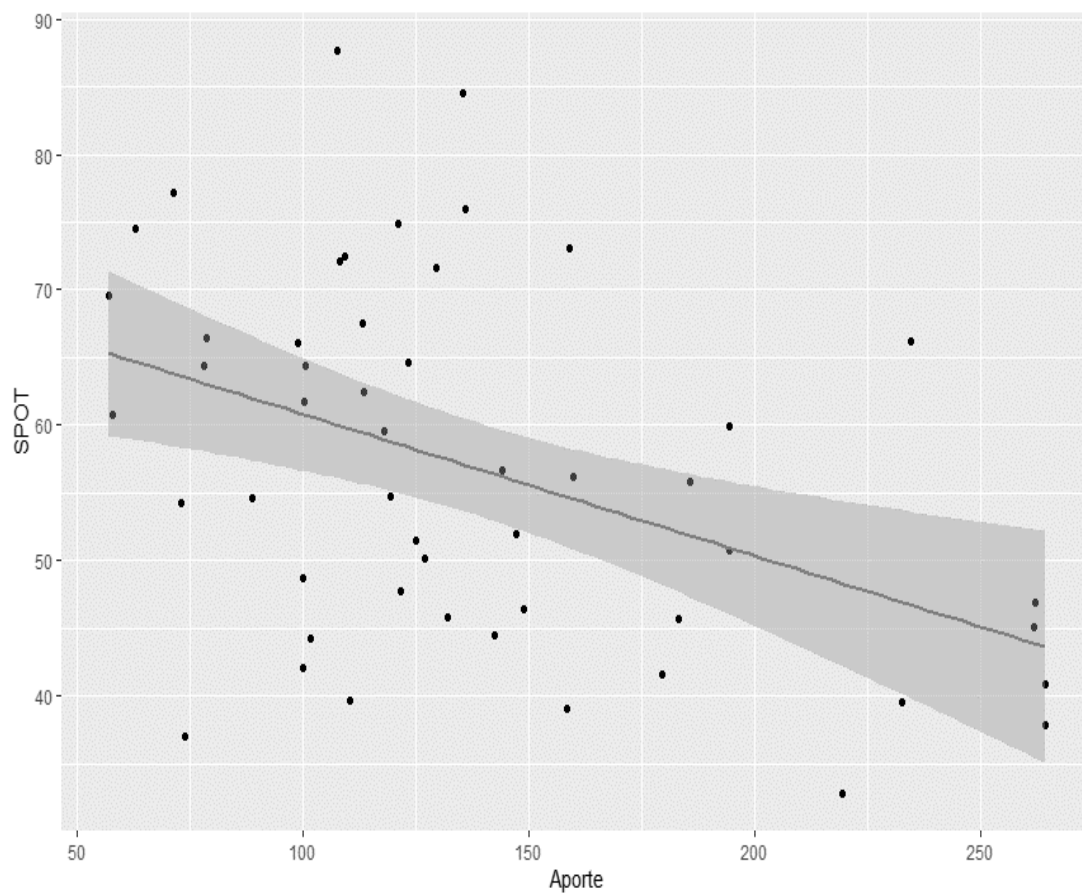


Nota. Gráfico de correlación aporte-SPOT de mercado, octubre 2015- agosto 2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de AMM, (agosto 2020).

La relación de la variable, a pesar de no ser significativa, se optó por realizar una regresión lineal entre estas obteniendo la siguiente información, mínimo de -26.4928, primer cuartil de -8.6038, mediana 0.6118, tercer cuartil de 7.1497, máximo de 27.6778, $R^2 = 0.1907$, una correlación de Pearson negativa de 0.4369 que en la Figura 10 se aproximó a -0.44.

Figura 8.

Regresión SPOT - Aporte

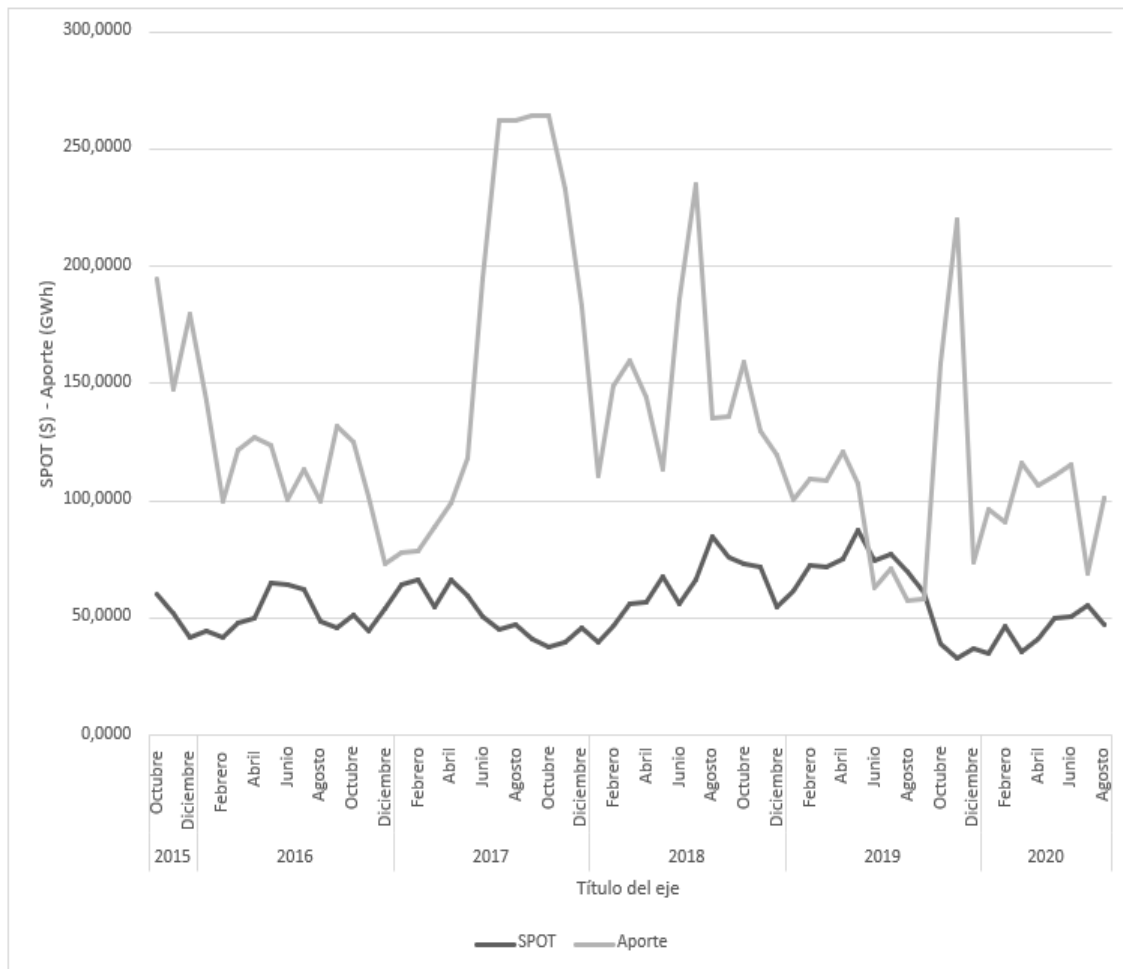


Nota. Gráfico de dispersión precio *SPOT*-Aporte octubre 2015 - agosto 2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de AMM. (agosto 2020).

El costo de la energía se analiza a partir de la serie de tiempo obtenida a través de la información del precio *SPOT*, resultado de la operación de post-despacho del AMM, información analizada a partir del mes de octubre del año 2015.

Figura 9.

Relación SPOT -Aporte



Nota. Series temporales variables de mercado, 2015-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de AMM, (agosto 2020).

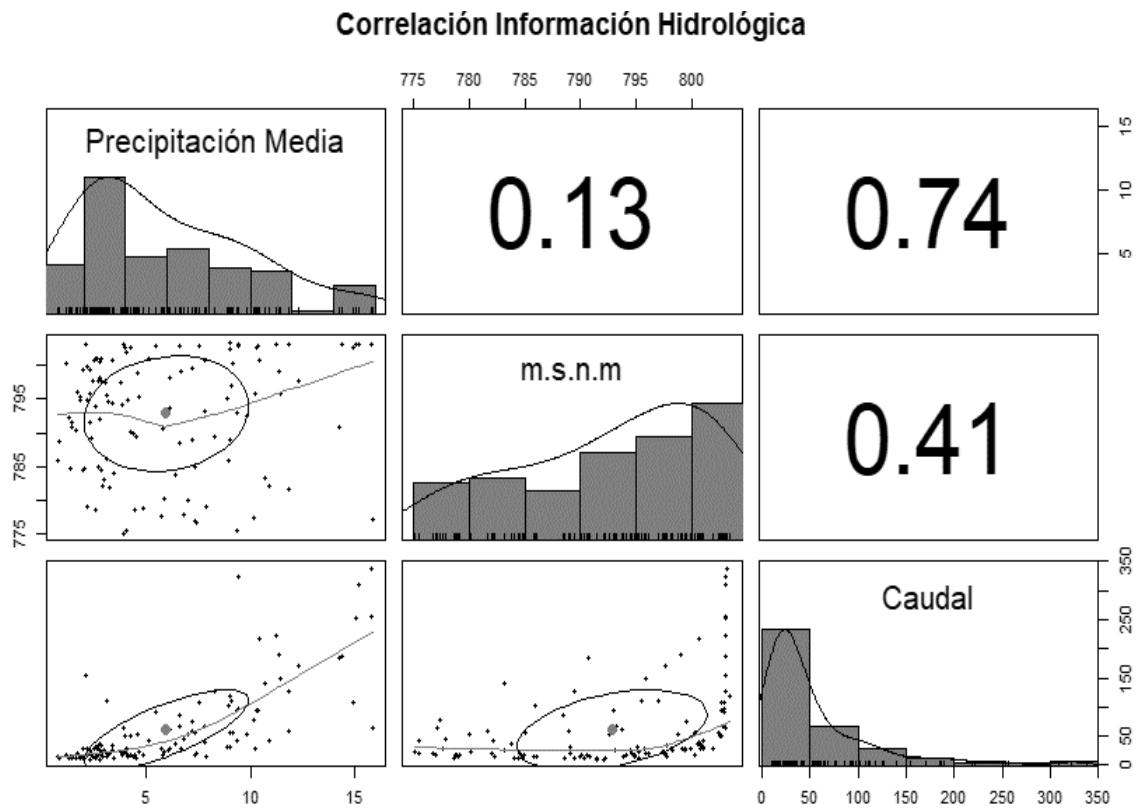
3.2. Análisis de confiabilidad de hidroeléctrica Chixoy

Para el análisis de confiabilidad se analizaron las variables de cotas, caudal y precipitación pluvial, esta información se analiza a partir del mes de

enero del año 2010, hasta el diciembre del año 2019. Partimos de nuevo analizando la correlación de nuestras variables y el resultado es el siguiente:

Figura 10.

Correlaciones variables hidrológicas

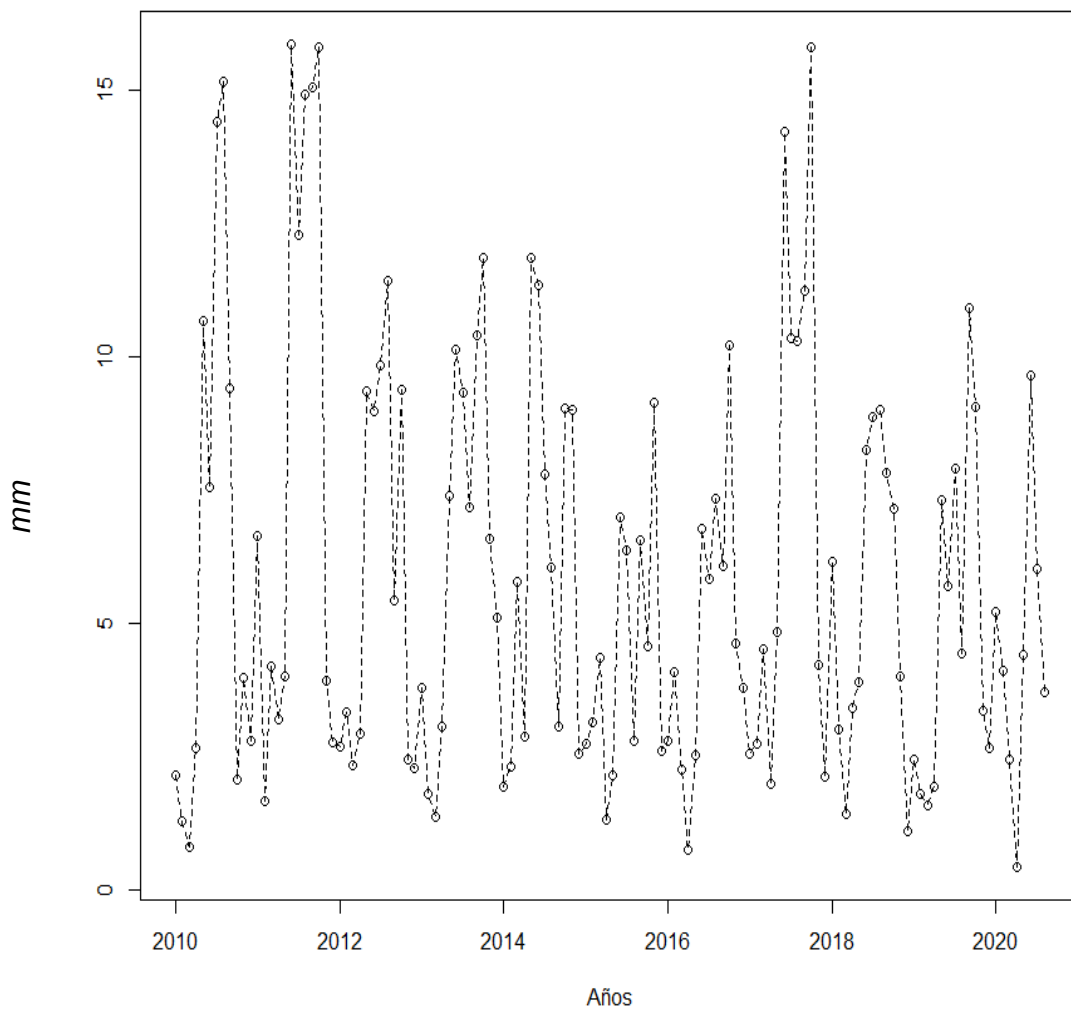


Nota. Gráfico de correlación variables hidrológicas, 2010-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de INSIVUMEH, (agosto 2020).

La observación de la información se realiza mediante series de tiempo separadas de las variables, sin embargo, se realiza una serie en conjunto para poder comparar.

Figura 11.

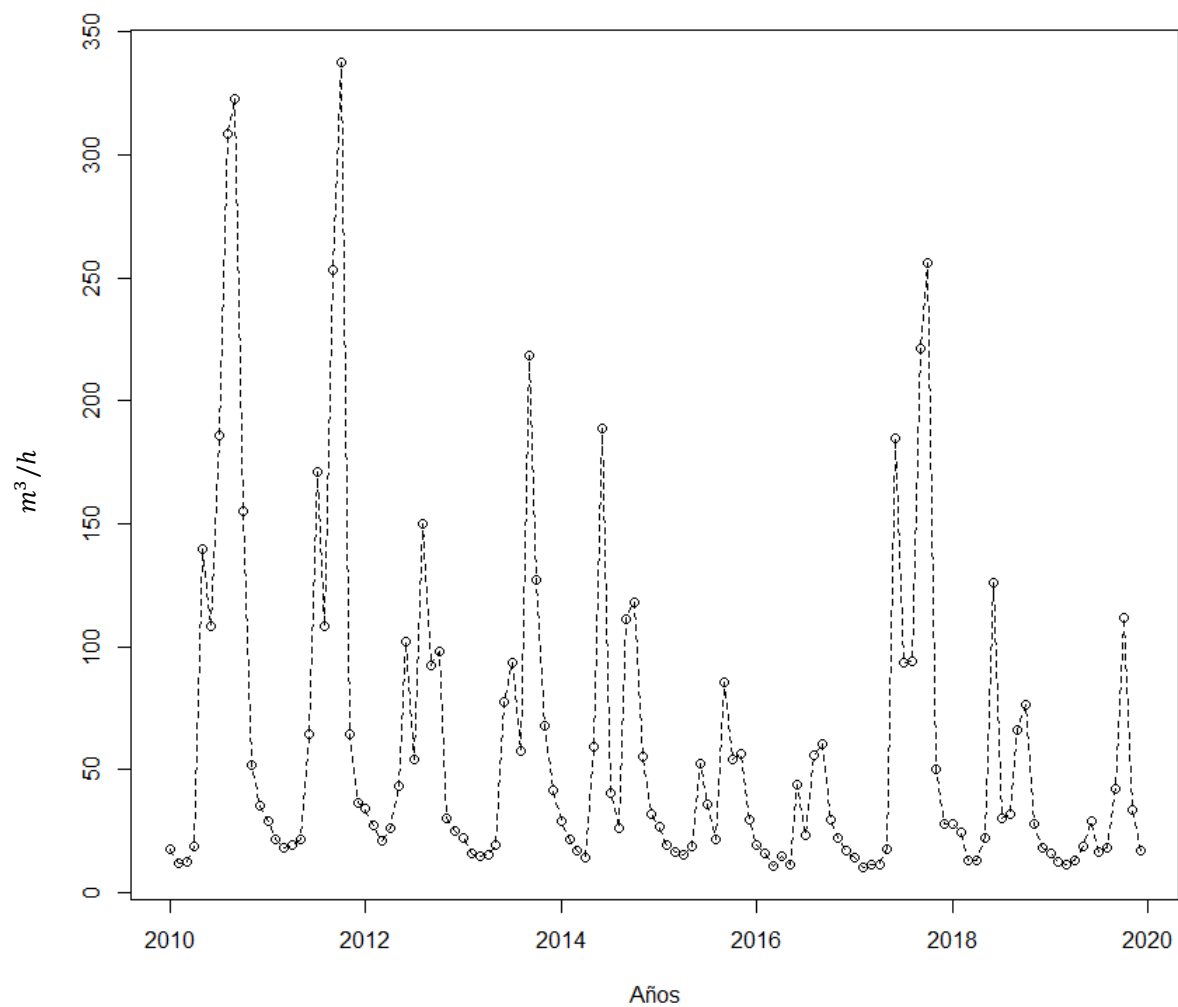
Precipitación pluvial región Norte



Nota. Serie temporal de precipitación pluvial región Norte - Chixoy, 2010-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de INSIVUMEH, (agosto 2020).

Figura 12.

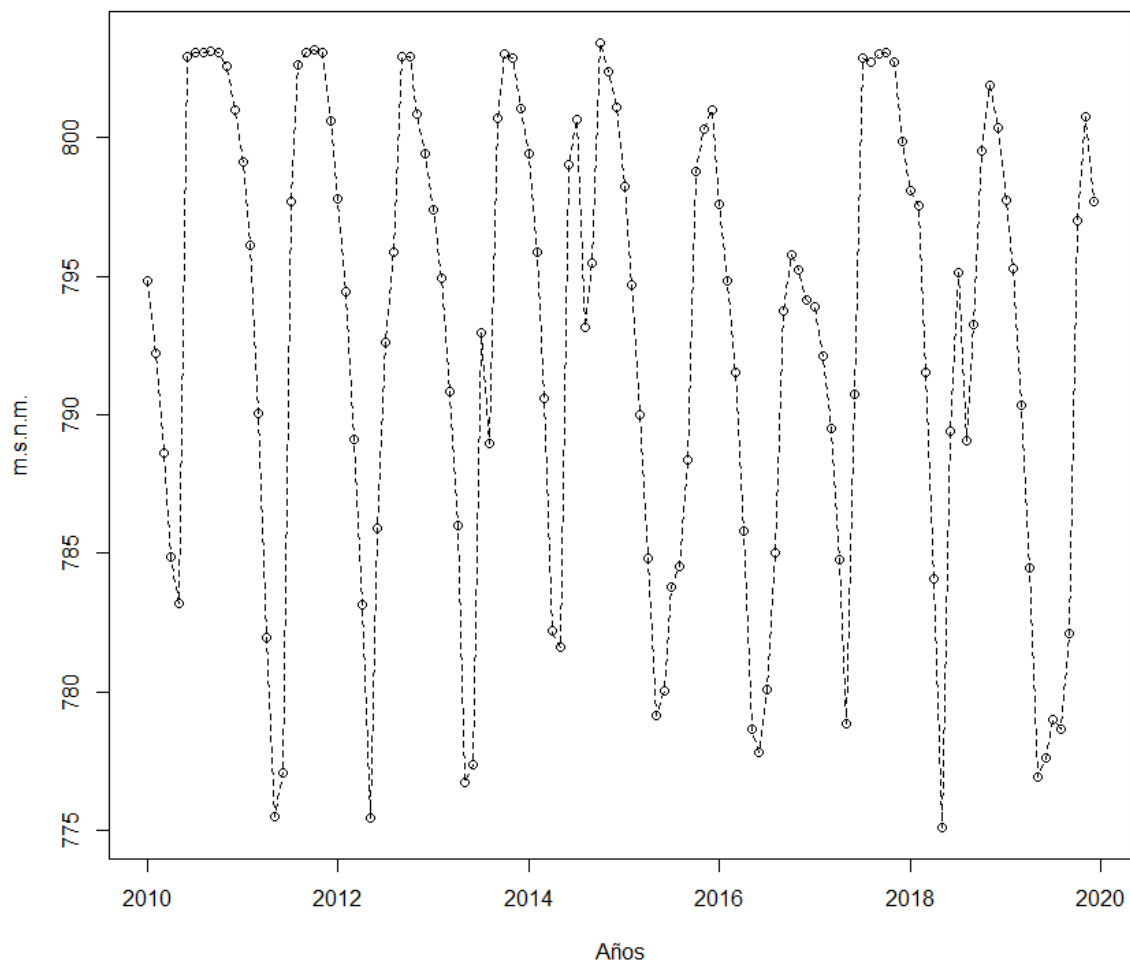
Caudal reportado operación Chixoy



Nota. Serie temporal de caudal m^3/h Chixoy, 2010-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de INSIVUMEH, (agosto 2020).

Figura 13.

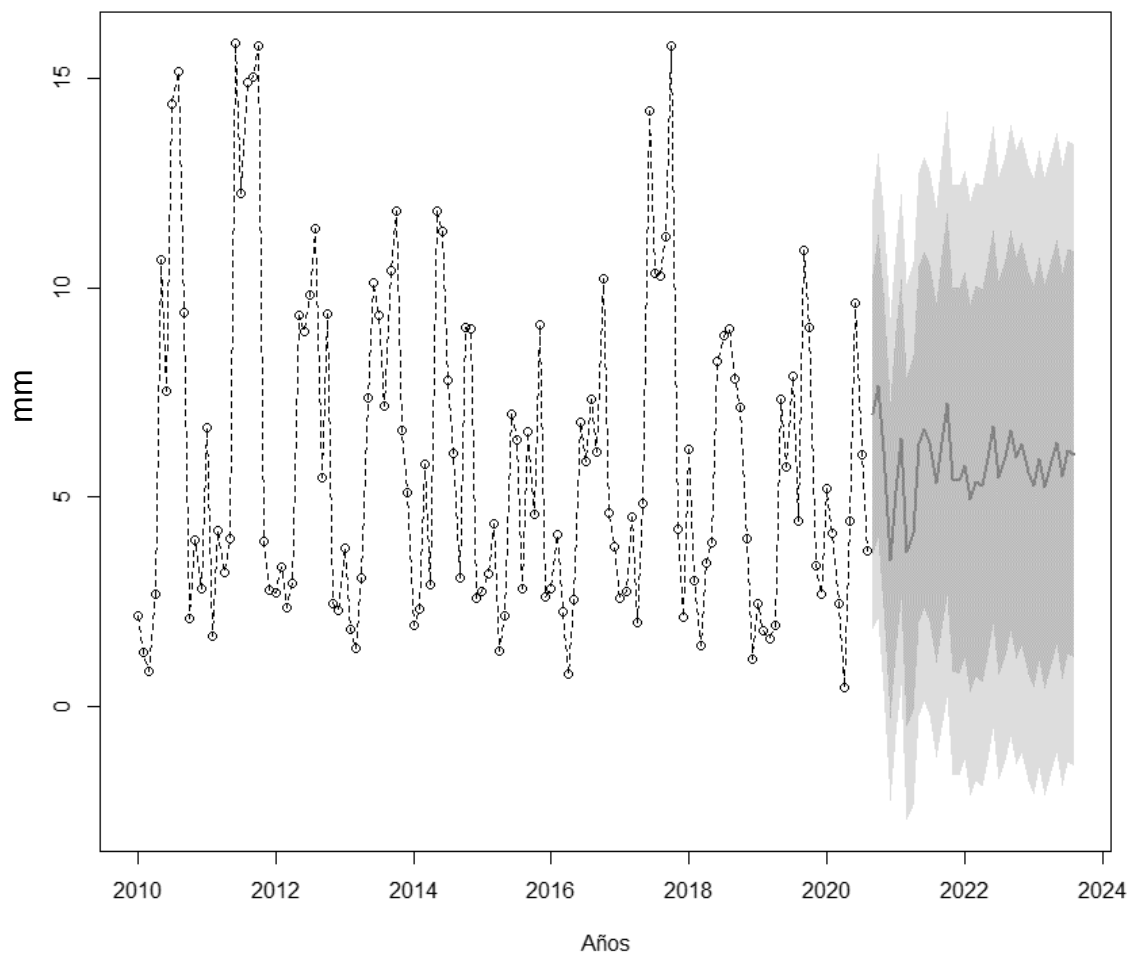
Cotas declaradas Chixoy



Nota. Serie temporal cotas declaradas, m.s.n.m. Chixoy, 2010-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de AMM, (agosto 2020).

Figura 14.

Pronóstico precipitación pluvial región Norte



Nota. Pronóstico precipitación pluvial región Norte, mm, Chixoy, 2010-2024. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de INSIVUMEH, (agosto 2020).

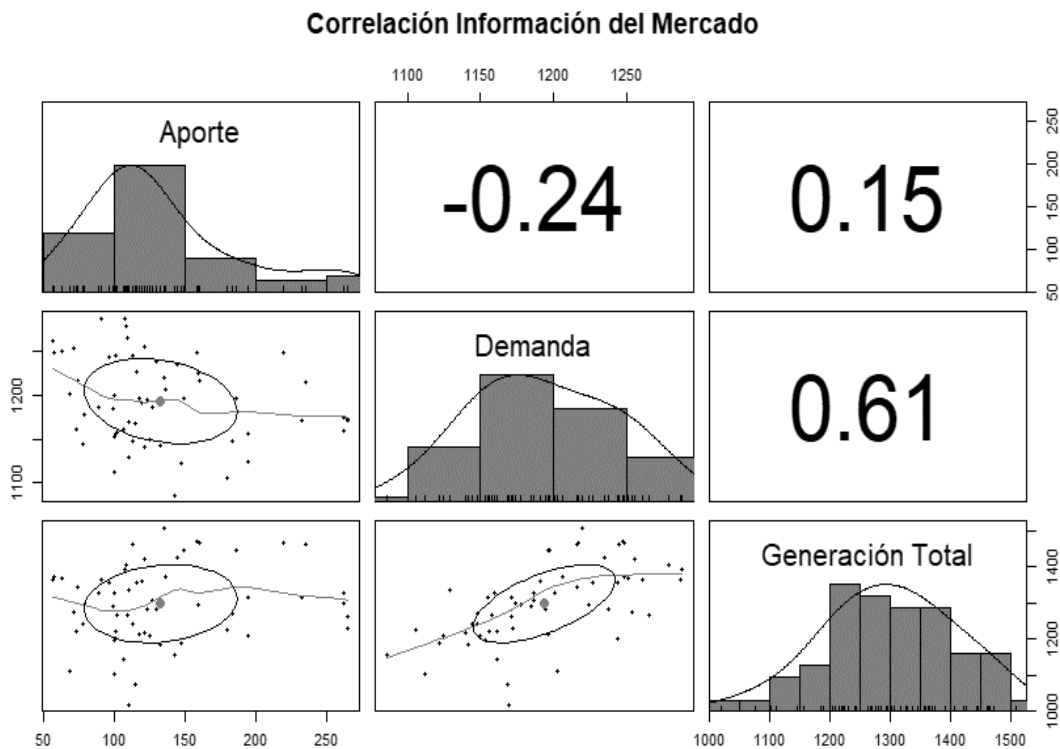
Finalmente se realiza un pronóstico de la precipitación pluvial que se tendrá en el área de Alta Verapaz, la cual se presenta en la Figura 14.

3.3. Efectos de la producción energética de Guatemala a partir de la tendencia de aporte de hidroeléctrica Chixoy

Se parte de la correlación de las variables analizadas para este objetivo que son el aporte en generación, la demanda total del país y la generación total. Estos datos son analizados de octubre del año 2015 a agosto del 2020, en períodos mensuales.

Figura 15.

Correlaciones variables de mercado



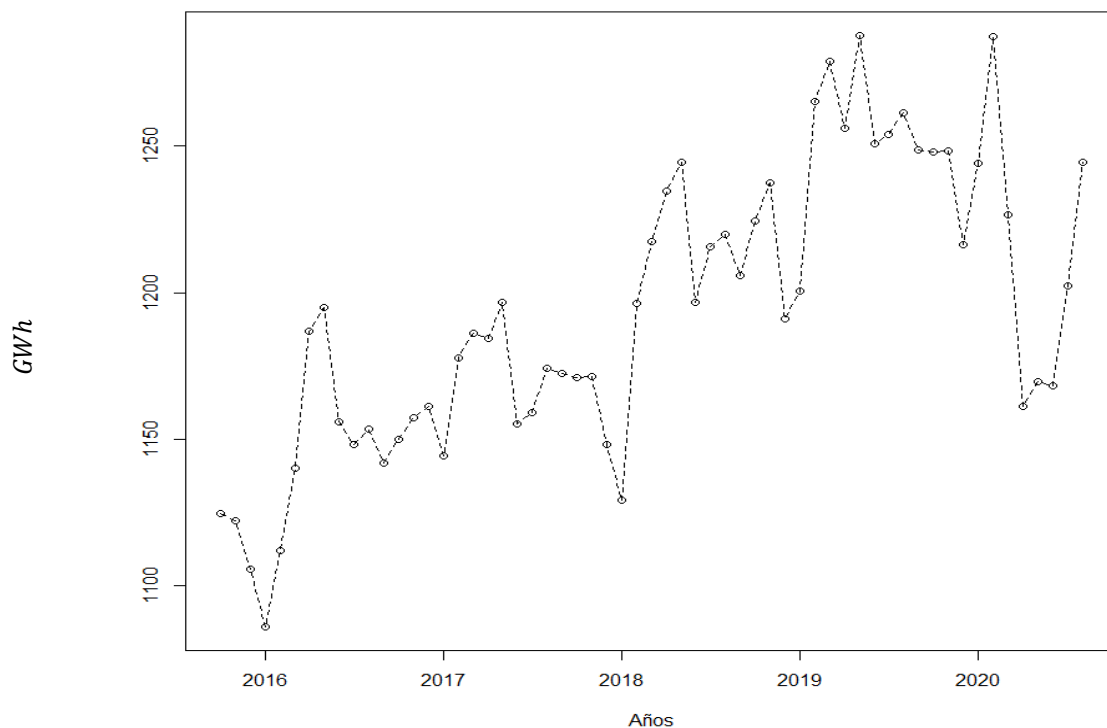
Nota. Gráfico de correlación aporte-demanda-generación de mercado, 2015-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de AMM, (agosto 2020).

Para analizar la tendencia se tiene la serie de tiempo del aporte brindado por esta unidad generadora, el período es el indicado anteriormente. Para el proceso de observación se empleará la serie de tiempo de aporte de generación de Chixoy graficada en la Figura 7, histórico de aporte generación Chixoy.

Un factor importante para el correcto análisis del presente estudio es conocer la demanda nacional energética, ya que nos permitirá conocer el impacto que se puede llegar a tener en cualquiera de los escenarios planteados.

Figura 16.

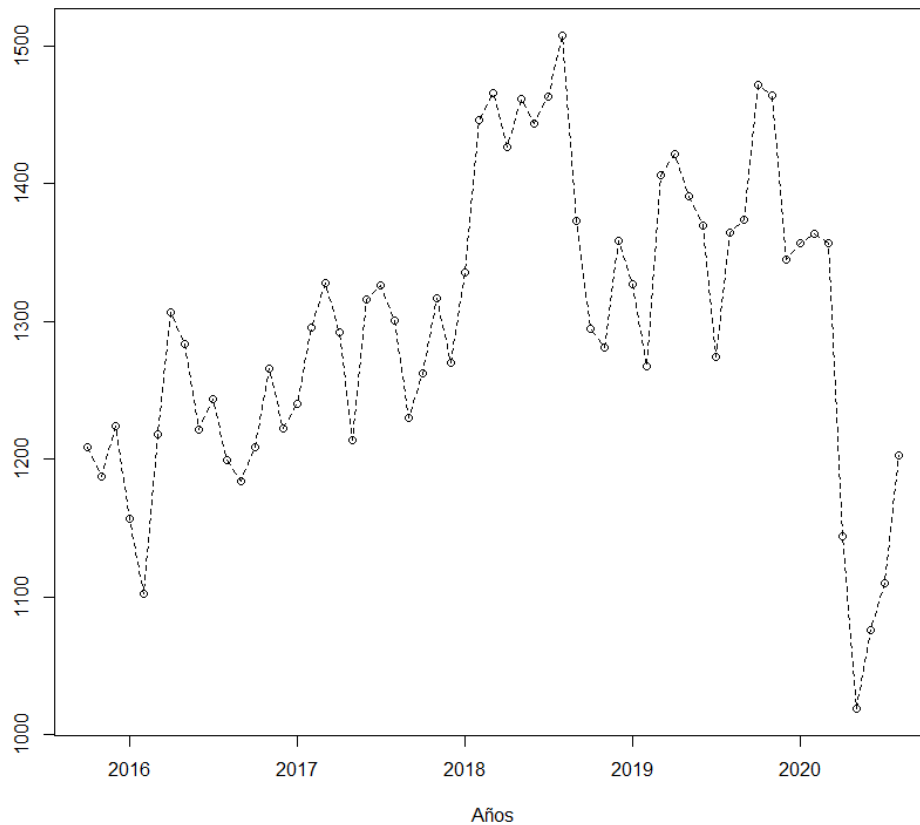
Histórico demanda energética Guatemala



Nota. Serie temporal demanda energética del mercado guatemalteco, GWh, 2015-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de AMM, (agosto 2020).

Figura 17.

Histórico de generación Hidroeléctrica Chixoy



Nota. Serie temporal generación de Chixoy, GWh, 2015-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de AMM, (agosto 2020).

3.4. Ciclos estacionales de generación de Hidroeléctrica Chixoy a través del tiempo y analizar la dependencia de dos variables climatológicas en su proceso de producción

El desarrollo de los ciclos estacionales de generación se obtiene a partir de la serie de tiempo de aporte, la cual muestra el comportamiento del aporte de generación de esta, iniciando en el mes de octubre del año 2015, hasta agosto

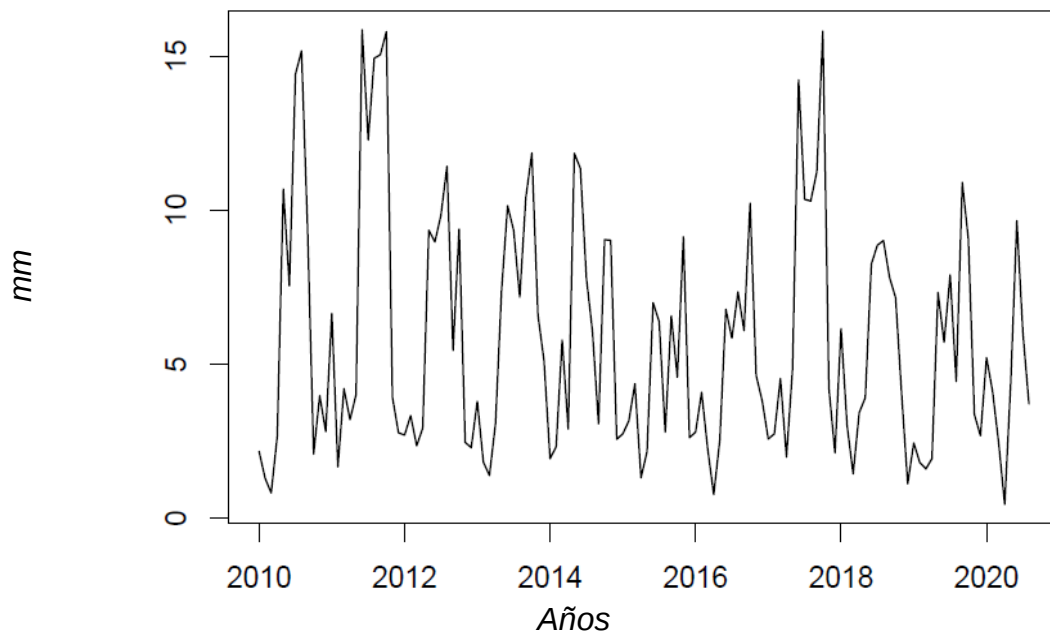
del año 2020. Obteniendo un coeficiente de determinación $R^2= 0.8584$, un valor de mediana de 117.92 GWh, un valor máximo de 264.53 GWh y un valor mínimo de 57.05 GWh.

Se determinaron los ciclos estacionales a partir del promedio mensual de precipitación pluvial desde enero del 2010 hasta agosto del 2020, siendo 5.8606 mm de lluvia el valor de referencia.

Con ello se confirmó que se marcan los períodos secos desde noviembre hasta mayo, y los de lluvia de junio a octubre de cada año.

Figura 18.

Histórico precipitación pluvial región Norte Guatemala

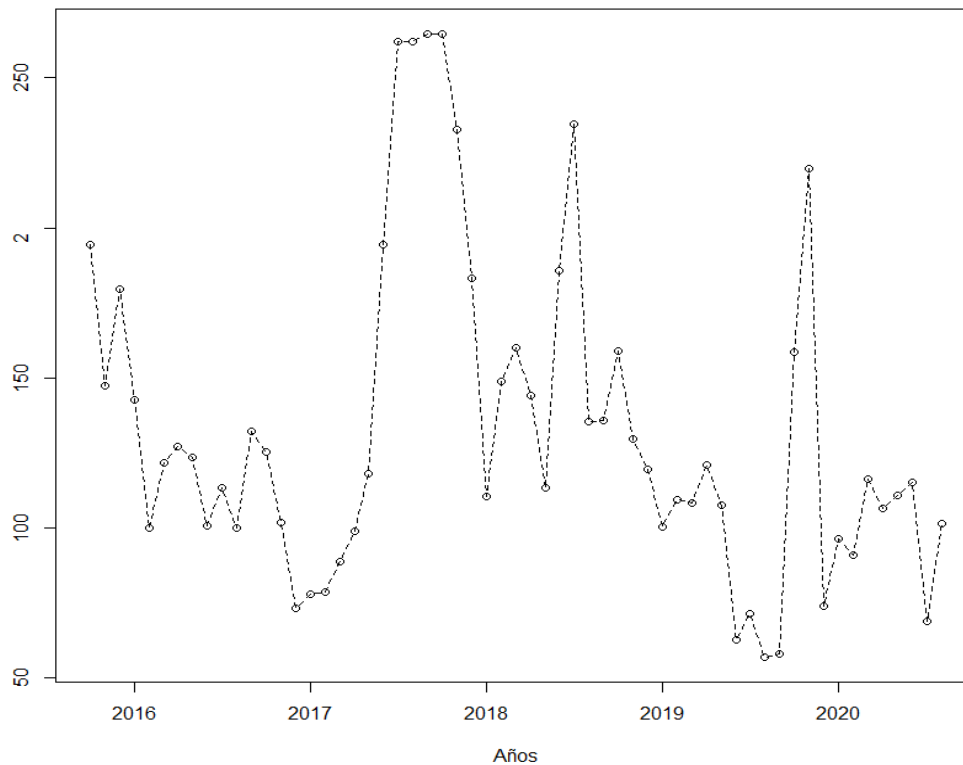


Nota. Histórico precipitación pluvial región norte Guatemala. (mm) enero 2010 – agosto 2020. Elaboración propia con Rstudio, datos obtenidos de INSIVUMEH Guatemala, (agosto 2020).

Para determinar la correlación existente entre temperatura y lluvia se utilizó el coeficiente de correlación lineal dando como resultado $R=0.44$. Con ello se demuestra que los valores no son directamente proporcionales entre sí, apreciable en la Figura 9.

Figura 19.

Histórico aporte generación Chixoy

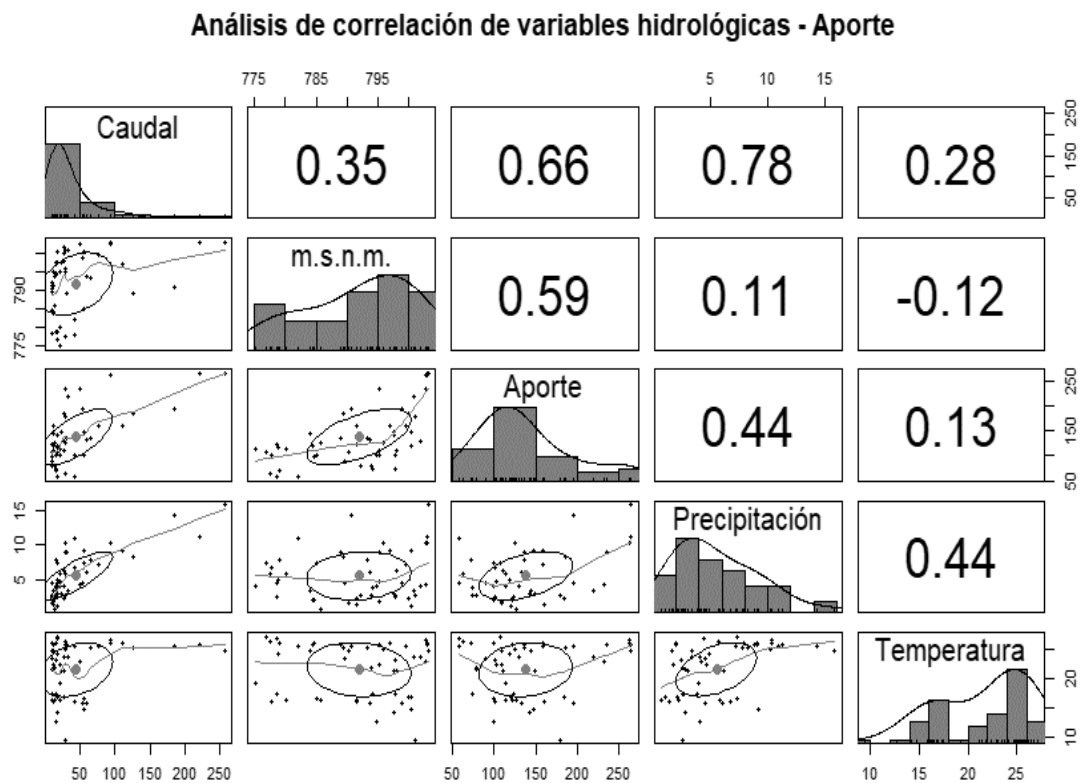


Nota. Serie temporal de generación Chixoy, 2015-2020. Elaboración propia con software *RStudio*, datos obtenidos de AMM, (agosto 2020).

A continuación, se presenta el desarrollo del análisis de correlación de las variables denominadas hidrológicas, comparadas con el aporte de generación de esta hidroeléctrica.

Figura 20.

Correlaciones variables hidrológicas - aporte



Nota. Gráfico de correlación variables hidrológicas y aporte de Chixoy, 2010-2020. Elaboración propia con software RStudio, datos obtenidos de INSIVUMEH, (agosto 2020).

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados se presentan mediante un análisis interno en el que se detalló el cumplimiento de objetivos y la comparación con otros estudios con enfoque similar.

4.1. Análisis interno

Se analizaron antecedentes de efectos del cambio climático en hidroeléctricas de otros países, para el desarrollo de esta investigación se definió a la Hidroeléctrica Chixoy como el objeto de estudio.

Los datos hidrológicos y de clima del período 2010 al 2020 y desde octubre del 2015 al 2020 para las variables de mercado, esto debido a la viabilidad en cuanto a la recolección de estos datos, considerándose muestra suficiente para el análisis en ambos casos.

El punto de partida es la relación existente entre las variables, con el objetivo de determinar correlación. También se realizó un proceso explicativo, se analizaron mediante series de tiempo y se explicó las variaciones e impacto en el mercado.

Se considera confiable este estudio, dadas las fuentes de donde se obtuvieron los datos históricos, obtenidos del resultado de operación del Administrador del Mercado Mayorista, así como la fiabilidad de los datos meteorológicos brindados por el Instituto Nacional de Sismología Vulcanología

Metrología e Hidrología. Y el análisis realizado ya que se emplearon métodos estadísticos y software de análisis RStudio.

La muestra de datos para los estudios hidrológicos es de la región norte del país, sin embargo, no se analizó información de estaciones específicas del río Chixoy, por lo que se propone para estudios futuros delimitar y analizar la cuenca que alimenta hidroeléctrica Chixoy.

El estudio es replicable, ya que el método empleado y el software utilizado para la correlación y la observación de las series de tiempo será el mismo para las diferentes corridas de datos.

El análisis del efecto en el precio de la energía ante una reducción en capacidad de generación de Chixoy se realizó mediante el precio de oportunidad partiendo de la tendencia de aporte de Chixoy y se determinó lo siguiente:

- En el análisis correlacional del *SPOT* y el aporte de generación, se observa una tendencia negativa y la significancia de esta no se considera importante como para lograr crear una dependencia entre ellas, sin embargo, para futuros estudios de mercado si se deberá tomar en cuenta y se necesitará complementar con las variables que se consideren necesarias para el objetivo que se determine.
- El modelo de regresión de lineal simple, estructurado a partir de estas variables no se considera suficiente para explicar el comportamiento del precio de oportunidad de la energía, sin embargo, según los resultados de dicha regresión se obtuvo que, los valores del intercepto son significativos, el modelo de regresión quedaría de la siguiente manera: $SPOT=71.28+(-$

0.1046xAporte), esto para el presente estudio y los datos del rango descritos anteriormente.

A pesar de la poca correlación que existe entre estas dos variables, en la Figura 9, relación *SPOT*-Aporte, se tiene una coincidencia entre los mínimos operacionales o de aporte, con los máximos del precio de oportunidad para los períodos analizados.

En el precio de oportunidad de la energía se observaron valores menores a la media para períodos de hasta 6 meses, iniciando en noviembre del 2015 hasta abril del 2016, el segundo inicia de agosto del 2016 a diciembre del mismo año. El período más largo es el de junio del 2017 hasta abril del 2018, siendo once meses de precios por debajo de este indicador.

La generación en los períodos descritos anteriormente coincide con un mayor aporte de Chixoy, estos comparados con la mediana de la misma variable. También se observa la relación inversa, en la que, si se tiene un aporte bajo de generación, el precio de oportunidad será alto. A excepción de algunos casos puntuales como para los meses de junio- julio 2018, octubre – noviembre 2019. La tendencia es decreciente, y encaja con el estudio del impacto en la generación de esta.

Dado el orden en el que son convocadas las unidades generadoras mediante la lista de mérito, se tiene que esta tendencia decreciente afectaría el precio de oportunidad de la energía, ya que las primeras en entrar a operación son las renovables. Confirmando la dependencia del despacho con este tipo de generación, y las variaciones según los escenarios de planteados de estacionalidad con el precio de oportunidad, resultando un aumento en el precio *SPOT* versus la disminución de generación.

Para estimar la confiabilidad de Hidroeléctrica Chixoy, desde el punto de vista de suministro de agua a su embalse. se estudió el grado de correlación alto existente entre el Caudal y la Precipitación media, como se puede observar en la Figura 10, correlación de variables hidrológicas, que es de 0.74, mientras que para la precipitación y cotas reportadas se tiene 0.13, abordaremos este grado de significancia derivado de la ubicación de las estaciones meteorológicas estudiadas, ya que las más importantes serán Santa María Cahabón y Cobán, que se encuentran cercanas a ríos Salamá, Carchelá y Chixoy, siendo estos los que alimentan su embalse. Mientras que la correlación de cotas y caudal se considera significativa con 0.41, ya que se definió desde el inicio la dependencia de estas.

Las series de tiempo realizadas a partir de los datos históricos nos presentan estacionariedad para la precipitación pluvial y las cotas de operación, además de la observación, se corroboró la estacionariedad mediante la prueba de *Dickey-Fuller*, lo que nos permite realizar posteriormente un pronóstico de 36 meses de la precipitación pluvial. La serie de tiempo del caudal no presenta estacionariedad.

En el período analizado de diez años no se observó ningún valor menor al mínimo de la cota de operación de 772 m.s.n.m., teniendo un mínimo arriba de este parámetro de 3.19 y una media arriba del mínimo de operación de 20.84 m.s.n.m.

Con ello se confirma que a pesar de que observó una tendencia decreciente en la precipitación, las cotas se mantienen en valores aceptables para la operación, no demostrando estar en límites operacionales.

La precipitación pluvial también muestra una tendencia de disminución, resultando un 50.00 % de las 120 observaciones realizadas por debajo de la mediana, sin embargo, a no ser que ocurra algún caso especial se considera que la precipitación se mantiene a niveles necesarios para que se mantengan la operación de la hidroeléctrica, ya que en los meses de junio a octubre se observa que el período de lluvias se mantiene estable coincidiendo con la estación lluviosa.

La proyección realizada a partir de los datos históricos de precipitación y demuestran un comportamiento estable.

Una vez analizados los resultados estadísticos, confirmamos la confiabilidad hidrológica a partir de estas variables, en las que se demostró la correlación existente entre estas, y que continuará la tendencia de lluvias vitales para alimentar el embalse Chixoy.

Según los reportes expuestos en la Figura 19, histórico del aporte de Chixoy, se evidencia períodos de aporte mínimos por debajo de la mediana de hasta 5 meses, desde diciembre del año 2016 hasta abril del año 2017, observando nuevamente este fenómeno en junio del 2019 a septiembre del mismo año. El año 2018 fue un año favorable para la generación de Chixoy, debido a que se reportó una media mayor de 5.35 mm, mostrando similitudes con la información declarada en históricos de precipitación siendo la mediana de 4.53 mm.

La correlación de las variables demuestra un alto grado de aceptación para el caudal y el aporte, sin embargo, no presenta el mismo comportamiento para el caudal y las cotas reportadas, teniendo un porcentaje de relación $R^2=12.25$, el mayor grado de aceptación se da entre el caudal y la precipitación

pluvial, las cuales son variables directamente proporcionales a lo largo del tiempo.

Según los resultados observados en la Figura 9 los valores de correlación de variables hidrológicas y aporte, existe un mínimo grado de relación de las variables hidrológicas con la temperatura, por lo que se desestimó esta última en los efectos analizados; no obstante, es necesario observar su comportamiento en los periodos analizados a partir del año 2017, debido al aumento significativo en comparación con el periodo anterior.

Se identificaron los efectos en la producción energética de Guatemala a partir de la tendencia de aporte de Chixoy mediante la correlación entre aporte y generación total, según los resultados de este procedimiento estadístico tampoco se consideran significativos, sin embargo, el aporte analizado de octubre del 2015 a diciembre del 2019 es posible observar un efecto de la demanda para escenarios de generación mínima de esta planta, caso observado en los períodos de estación seca (noviembre-abril), y para un período atípico, en el que a pesar de estar dentro de los meses considerados como lluviosos, se tuvieron aportes mínimos de generación.

Situación que se ejemplificó en el período de mayo a octubre del año 2019, para ello fue necesario analizar el aporte de generación, cuya mediana fue 127.557 GWh, y que, al momento de comparar este dato con la demanda observada, representó un aporte significativo del total de la demanda, resultado obtenido de la comparación de la mediana del aporte con cada uno de los reportes mensuales de demanda. Por esta razón se considera significativa la diferencia 32 GWh por debajo de la mediana de esta variable para el período descrito, ya que representó un aporte relevante que se suplió con otra tecnología

de generación y el resultado final se observó en el precio de oportunidad, cotizándose arriba de la media.

La tendencia de demanda será creciente, por lo que se confirma la correlación negativa resultante, también se debe resaltar que llegará un punto en el que la demanda aumentará y la capacidad de aporte llegará a su límite, lo cual significará un estancamiento en el porcentaje de aporte total para la demanda del país.

Se confirmó también una relación estrecha entre el aporte y la generación total del país, ya que existe una dependencia entre estas. Se validó el objetivo, indicando que el efecto en el mercado con la reducción del aporte según la variación con base a la estacionalidad del año.

Observando también meses puntuales de esta temporada donde ocurren lluvias a pesar de no estar pronosticadas y permiten almacenar agua en el embalse, resultando generación positiva para el siguiente período.

Los efectos en el mercado de esta variación no son relevantes, ya que este cambio se da a lo largo del tiempo, y la firmeza del sistema permite continuar la operación del mercado sin ningún problema, sin embargo, un cambio repentino y que presente un asentamiento de esta variación, significaría un replanteamiento de dicha programación, lo cual coincide con el antecedente presentado en Venezuela, donde se tiene un alto porcentaje de generación a partir de una misma cuenca, y los efectos del cambio climático son percibidos en su caudal de aporte.

El grado de correlación obtenido para las variables de temperatura y precipitación pluvial no demuestran una relación directamente proporcional, dado que el resultado de $R < 0.6$ se tomará como despreciable.

Las variables de mercado en el año 2017 demuestran una mejora en cuanto a la producción de energía, ya que los reportes de caudal presentan un promedio de $82.72 \text{ m}^3/\text{s}$., siendo este el reporte más significativo. Las cotas declaradas por la hidroeléctrica, para su mejor año coinciden con el período descrito, arrojando un resultado de 795.34 m.s.n.m., y la precipitación pluvial reportó 7.08 mm.

Se determinaron los ciclos estacionales de generación a través del tiempo siguiendo la premisa de que en Guatemala se cuenta con dos períodos climatológicos marcados y empleados para la programación a largo plazo (PLP), siendo estación seca (noviembre – abril) y de lluvia (mayo – octubre). Como se observó en las corridas de series de tiempo para cada una de estas variables, esta premisa no se mantiene según lo indicado anteriormente, debido a que en 7 de los 10 años analizados la temporada seca se extendió hasta el mes de mayo.

4.2. Análisis externo

El análisis en el efecto del precio de la energía logra determinar una relación entre el precio de oportunidad y el aporte de energía que inyecta Chixoy a la red, esto es apreciable en la Figura 19 de la sección de resultados donde se observan períodos definidos entre abril y octubre. Coincidiendo con panoramas similares de países con matrices energéticas semejantes a la nuestra, como el caso de Colombia, donde según Peláez (2014):

En este sentido, identifican la existencia de un patrón estacional de los precios de la electricidad (incluso en el largo plazo), que representa el eje focal para la valoración del *commodity*. Este patrón es estudiado a partir de la relación entre: las reservas de agua, el precio *SPOT* y los contratos *forward* de corto plazo. Botterud, Kristiansen, & Ilic, en *The relationship between spot and future prices in the Nord Pool electricitymarket*, analizan el impacto en el valor por disponer de la capacidad de cambiar entre las fuentes alternativas de generación para tomar ventaja cuando los precios están altos y los niveles de agua bajan (caso similar al colombiano). (p. 45)

Estos patrones coinciden también con la variación de precios de precios de mercado.

Según Peláez (2014) “Colombia determina la formación de los precios de bolsa y de contratos a futuro; adicionalmente las condiciones meteorológicas en el país también tienen gran influencia en el precio ya que en temporadas muy secas los precios aumentan significativamente”, (p. 54). Similitudes de países latinoamericanos con mercados eléctricos legislados y con estructuras similares.

Que se fundamenta también con García (2011):

Donde indica que la generación de electricidad en el país dependa en gran medida de los cambios climáticos que se presenten durante el año, en temporadas secas, la cantidad de agua disminuye en los embalses, por

tanto, el precio de la energía eléctrica generalmente aumenta. Mientras que en los períodos lluviosos sucede lo contrario. (p. 230)

Estimar la confiabilidad de Hidroeléctrica Chixoy, desde el punto de vista de suministro de agua a su embalse, se logró observar según la proyección de la Figura 16 una media similar para años futuros, según pronóstico al 2024, este podría cambiar de manera significativa por algún evento catastrófico que altere de manera drástica las variables analizadas en este punto, sin embargo, dejando de lado este escenario hipotético, podemos asegurar la confiabilidad del resultado según Bardales, Castañón y Herrera (2019):

El comportamiento histórico de la precipitación pluvial en Guatemala de 1960 a 2016 muestra oscilaciones cuasidecadales, reguladas por fuentes de variabilidad climática de corto y largo periodo en los océanos Pacífico norte, Atlántico norte y Pacífico ecuatorial. La tendencia de la precipitación revela un aumento promedio nacional del 3 %, especialmente en la década de los noventa; en años anormalmente húmedos, las anomalías nacionales alcanzan el 9 %. (p. 9)

Se demuestra que la tendencia de precipitación pluvial es creciente y se tendrá el vital líquido para la continuidad de operación de la unidad generadora.

Identificar los efectos en la producción energética de Guatemala, a partir de la tendencia de aporte de hidroeléctrica Chixoy, la demanda energética de Guatemala es creciente por lo que se tiene una relación directa entre la generación de energías renovables y el suministro eléctrico en el país, situación

que ocurre en los países en desarrollo como Colombia donde según Cortés y Arango (2017):

La demanda de electricidad en Colombia ha venido creciendo desde el año 2001 con tasas que oscilan entre el 1,5% y el 4,1% anual, para una demanda total de electricidad de 60,89 TWh en el año 2013. La demanda mensual de electricidad presenta un patrón cíclico anual con un mínimo en el mes de febrero. De acuerdo con el plan de expansión de generación 2015-2019, publicado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), se encontró que se requieren entre 4.208 y 6.675 megavatios de expansión para la próxima década. Con el fin de suplir la demanda nacional, se proyecta la ampliación de la matriz energética formulando escenarios que incorporan las fuentes renovables, no convencionales, como la producción eólica, ubicada principalmente en la Guajira (Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], 2017). (p. 381)

A causa de la alta dependencia del sistema eléctrico al recurso hídrico, el país enfrenta dificultades ante periodos de sequía caracterizados por el fenómeno del Niño, Según Cortés y Arango (2017):

“Esto representa un riesgo para el sistema, ya que la demanda se traslada a las centrales térmicas, las cuales operan al máximo de su capacidad. Consecuentemente, el sistema eléctrico colombiano es muy sensible a cambios climáticos y requiere diversificar su matriz energética, mediante

la incorporación de energías renovables y otros proyectos de inversión en los que se aproveche la diversidad de recursos naturales pertenecientes en la región. (p. 385)

Los ciclos estacionales y dependencia de fuentes de energía hidráulica en países con matrices de generación similares a Guatemala se pueden observar en la región latinoamericana, como es el caso de Colombia, país donde ya confirmaron la dependencia de este tipo de fuentes renovables. Ya que según García (2011), “La generación eléctrica en Colombia se realiza principalmente por medio de generación hidráulica. En el año 201 esta tecnología se incrementó el 67.88 % comparado con el año 2009, teniendo una representación del 76 % en su totalidad” (p.230).

El año 2016, demuestra el ciclo estacional presentado en el presente estudio debido a que la información concuerda con los datos obtenidos de patrón de lluvia, según Figueroa (2016):

La época de invierno comprende los meses de mayo a octubre y para la época de verano lo comprende los meses de noviembre a abril. También se identifican los meses de mayor acumulación de lluvia, siendo estos junio y septiembre y un descenso para los meses de julio y agosto por el efecto de la canícula que regularmente se presenta en esa época. En cuanto a la época de verano, los meses con mayor déficit de lluvia son los de diciembre y enero. (p. 117)

CONCLUSIONES

1. Se analizó del precio de la energía ante escenarios de variación en capacidad de producción, se confirmó relación directa entre el aporte de generación de Chixoy con el precio de *SPOT* debido al tipo de despacho que se realiza mediante el ingreso de energías renovables como prioridad en esta, y los costos relacionados en su generación, demostrando que se tienen precios altos del *SPOT* sobre los \$ 90.00 en los mínimos de aporte y viceversa, esto para datos observados desde octubre del 2015 hasta agosto del 2020.
2. Se estimó la confiabilidad de hidroeléctrica Chixoy desde el punto de vista de suministro de la fuente de energía a partir de las variables hidrológicas y climáticas de datos observados del año 2010 al 2019-2020, dado que la variación de cotas se encontraba dentro de los rangos operacionales. La precipitación pluvial se mantiene a pesar los cambios estacionales y según el pronóstico realizado no existe posibilidad de desabastecimiento de agua en el embalse.
3. Se identificó que los efectos económicos en la producción energética de Guatemala a partir de la tendencia de aporte de Chixoy no son considerables, dado que aporta en promedio un 10 % de la demanda total del país y un 11 % de la generación total, esto para el período de tiempo analizado, desde octubre 2015 hasta agosto 2020, los efectos en el mercado derivados de esta unidad generadora se observan en las variaciones del precio *SPOT*.

4. Se determinó que los ciclos estacionales de generación de Hidroeléctrica Chixoy mantienen estacionalidad de acuerdo con el período de temporada seca, desde noviembre hasta abril, y de lluvia para los meses de mayo a octubre, esto se analizó a partir de la correlación de variables clasificadas como hidrológicas con el aporte de generación. Se desestimó la variable de temperatura dada la poca significancia obtenida en las correlaciones.

RECOMENDACIONES

1. Analizar precios de la energía para Guatemala considerando otras variables económicas significativas de generación y de mercado para enlazarlas con un estudio y pronóstico de demanda tanto de energía como de potencia, también incluir variables del mercado internacional Mercado Eléctrico Regional, contratos y sus efectos en la lista de mérito del país.
2. Considerar la variable de uso de la tierra para estimar confiabilidad de una hidroeléctrica mediante el suministro de agua. En caso de realizar pronósticos con las variables analizadas en el presente estudio se deberán obtener datos de mayor antigüedad.
3. Identificar los efectos económicos derivados de una reducción de aporte de cualquier hidroeléctrica en la matriz energética de Guatemala, se deberán plantear escenarios donde se reduzca la capacidad de producción de manera considerable, también realizar simulaciones en Software NCP, empleado en la programación de la operación a corto plazo.
4. Determinar ciclos estacionales de generación relacionados a tendencias climáticas se deberá delimitar a un área específica que cumpla con variables que se consideren determinantes en cuanto a clima y sectorizarlos por las áreas de mayor afluencia hídrica y que presenten cantidades significativas de aporte, esto permitirá desarrollar modelos

más precisos, que puedan permitirnos observar posibles cambios estacionales.

REFERENCIAS

- Argueta Tejada, S. (2007). *Guía de normas y estándares técnicos aplicados a agua y saneamiento*. Guatemala: Fondo para el logro de los ODM.
- Bardales Espinoza, W. C. (2019). *Clima de Guatemala, tendencias observadas e índices de cambio climático*. Guatemala: Editorial Universitaria UVG. Recuperado el agosto de 2020.
- CNEE. (2013). Mercado de Energía Eléctrica, Guía del Inversionista. *Unidad de Comunicación CNEE*, 63. Obtenido de <http://www.cnee.gob.gt/pdf/informacion/GuiadelInversionista2015.pdf>
- CNEE. (2016). *Compendio de Normas Técnicas*. Guatemala: Servi Prensa.
- Comisión General de Energía Eléctrica CNEE. (12 de 10 de 2018). *CNEE*. Recuperado el 12 de 10 de 2018, de www.cnee.gob.gt
- Congreso de la República de Guatemala . (31 de Mayo de 1985). Constitución Política de la República de Guatemala. *Constitución Política de la República de Guatemala*. Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala: Gobierno de Guatemala.
- Congreso de la República de Guatemala . (1986). *Constitución Política de la República de Guatemala*. Guatemala: Asamblea Nacional Constituyente.

Congreso de la República de Guatemala. (1986). *Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Decreto No. 68-86)*. Guatemala: Gobierno de Guatemala.

Congreso de la República de Guatemala_INDE. (2010). *Ley Orgánica del INDE 64-94 y sus reformas*. Guatemala : INDE.

Cortés, S. A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Energéticas Colombia*, 375-390.

Ferney Moreno, L. (2012). *Regulación del mercado de Energía Eléctrica en América Latina: la Convergencia entre Libre Competencia e Intervención del Estado*. . Colombia: Universidad Externado de Colombia .

García Marquez, R. (1999). *Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas*. Mexico.

García, F. (Marzo de 2016). Análisis de la Variabilidad Hidrometeorológica en la Parte Alta de la Cuenca del Río Chixoy . Guatemala , Guatemala , Guatemala: Facultad de Ingeniería USAC.

García, H. e. (2005). *Controles de calidad en la fabricación de un rodete Pelton*. Lima, Perú: Facultad de Ciencias Físicas EAP de Ingeniería Mecánica de Fluidos.

Gobierno de Guatemala . (1963). *Código Civil, Decreto Número 106*. Guatemala : Gobierno de Guatemala.

Gobierno de Guatemala. (1996). *Ley General de Electricidad*. Guatemala: Gobierno de Guatemala.

Gobierno de Guatemala, Organismo Ejecutivo. (2016). *Acuerdo Gubernativo Número 137-2016*. Guatemala: Gobierno de Guatemala.

Gómez Cuevas, N. (2016). Mercado de Oportunidad de la Energía en Guatemala: Un Modelo Téorico. *Revista Académica ECO*, 71-87. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Mario_Ruiz_Estrada/publication/309728604_A_General_Theoretical_Review_about_Globalization_and_Regional_Integration/links/581fde7b08ae12715af9275b.pdf#page=85

Guatemala, C. d. (1989). Ley de áreas protegidas . *Decreto 4-89*, 16.

Guatemala, C. d. (1996). *Ley Forestal*. Guatemala: Gobierno de Guatemala.

IEB. (2018). *Coordinación de aislamiento de línea Incinate - Carlos Dorión*. Guatemala.

Juela Torres, L. A. (2017). *Comparación de los Diferentes Tipos de Generadores para un Pico de Central Hidroeléctrica*. Ecuador, Loja, Ecuador: Universidad Católica de Loja. Obtenido de <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/20.500.11962/21444/1/Juela%20Torres%20Lenin%20Antonio.pdf>

MARN. (1986). *Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente* . Guatemala : Gobierno de Guatemala.

MEGABRAS. (15 de enero de 2019). *Telurómetro digital de alta frecuencia TM25m*. Obtenido de MEGABRAS: www.megabras.com

MEM. (2021). *Informe Estadístico* . Guatemala: Gobierno de Guatemala.

Mijangos López, Nadia; Camó Molina, Andrea. (2011). Manual de Educación Ambiental Sobre el Recurso Hídrico en Guatemala. Guatemala : MARN.

Ortiz Flórez, R. (2011). *Hidráulica, generación de energía*. Chile: Ediciones de la U.

Peláez Villalda, D. C. (2014). *Determinación del costo de la energía hidráulica en Colombia*. Medellín Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas departamento de Ingeniería de la Organización.

Pérez Loarca, S. B. (2015). Manual de aplicación de la norma IEEE Std. 81. El Salvador.

PNUMA. (1999). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Manual de Legislación Ambiental de Guatemala (IDEADS)*. Guatemala: IDEADS.

Quiroz Ruiz, I. P. (2016). Incidencia de las sequías sobre las cuencas aportantes a los grandes embalses en Venezuela. (U. C. Alvarado”, Ed.) *Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”, Barquisimeto, Venezuela*. Recuperado el 20 de agosto de 2020.

Rodríguez Alvarado, A. E. (Noviembre de 2018). Efectos del Fenómeno "El Niño" en los recursos hídricos de la cuenca del río Chixoy. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Facultad de Ingeniería USAC.

URL. (Noviembre de 2005). *Situación del Recurso Hídrico en Guatemala*. Guatemala, Guatemala: Serviprensa. S.A.

Vargas, L., Palma, R., & Moya, O. (2001). Mercados Eléctricos y Bolsas de Energía: Aspectos Críticos para su implementación en Chile. *Revista Chilena de Ingeniería*, 1-5.

ANEXOS

A continuación, se presentan como anexos la información empleada para el análisis de datos presentados en el estudio.

Anexo 1.

Matriz de coherencia

ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE AFLUENTES QUE ALIMENTAN EL EMBALSE DE HIDROELÉCTRICA CHIXOY Y SU IMPACTO EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DE GUATEMALA		
PROBLEMA	OBJETIVOS	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN
PROBLEMA PRINCIPAL	GENERAL	PREGUNTA CENTRAL
Las estaciones climáticas en Guatemala se encuentran marcadas por invierno lluvioso y verano seco, sin embargo, el fenómeno del niño puede alterar estas estaciones y prolongar la temporada de calor disminuyendo las lluvias y afectando la generación hidroeléctrica.	Analizar los ciclos estacionales de generación de Hidroeléctrica Chixoy a través del tiempo y la dependencia de dos variables climatológicas en su proceso de producción	¿Se cumplen los ciclos de generación según las estaciones del año, cuál es la variable determinante para el suministro de agua en hidroeléctrica Chixoy?
PROBLEMAS SECUNDARIO	ESPECÍFICO	PREGUNTAS ESPECÍFICAS
Aumento del precio <i>SPOT</i> según la estación del año, y la reducción de generación de hidroeléctrica Chixoy.	Analizar el efecto en el precio de la energía ante una reducción en capacidad de generación por parte de Hidroeléctrica Chixoy.	¿Cuál es la variación de precio de la energía cuando disminuye la generación por parte de hidroeléctrica Chixoy, es significativa en el mercado eléctrico nacional?
El cambio climático se ve reflejado en las lluvias y temperatura de la región norte de Guatemala.	Estimar la confiabilidad de Hidroeléctrica Chixoy, desde el punto de vista de suministro de agua a su embalse.	¿Son apreciables los efectos en los cambios de temperatura y lluvias en la región norte del país, existe tendencia a la baja en las cotas declaradas a lo largo del período estudiado, 2010 al 2019?

Continuación anexo 1.

PROBLEMAS SECUNDARIO	ESPECÍFICO	PREGUNTAS ESPECÍFICAS
La tendencia creciente en la demanda de energía del país se verá afectada por la variabilidad que pueda existir en la producción de Chixoy, dado el aporte significativo a la matriz de generación.	Identificar los efectos en la producción energética de Guatemala, a partir de la tendencia de aporte de hidroeléctrica Chixoy.	¿Cuál es el efecto en la matriz de generación dada la creciente demanda energética del país, y los cambios climáticos y sus efectos en la generación de la hidroeléctrica Chixoy?
RESULTADOS	CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES
En el análisis correlacional del <i>SPOT</i> y el aporte de generación, se observa una tendencia negativa y la significancia de esta no se considera importante como para lograr crear una dependencia entre ellas, sin embargo, para futuros estudios de mercado si se deberá tomar en cuenta y se necesitará complementar con las variables que se consideren necesarias para el objetivo que se determine.	Los resultados del presente estudio demostraron que se mantiene la estacionalidad de acuerdo con el período de temporal seco, desde noviembre hasta abril, y de lluvia para los meses de mayo a octubre, esto se determinó a partir de la correlación de variables clasificadas como hidrológicas con el aporte de generación de Hidroeléctrica Chixoy, desestimando la variable de temperatura dada la poca significancia obtenida en las correlaciones. Caso contrario con la precipitación pluvial que demuestra una relación directa con el aporte de generación.	Cuando se realicen análisis de precios de la energía para Guatemala se deben considerar otras variables significativas de generación y de mercado para enlazarlas con un estudio y pronóstico de demanda tanto de energía como de potencia, también incluir variables del mercado internacional MER, contratos y sus efectos en la lista de mérito del país.
Se comprobó estacionariedad para las variables de precipitación pluvial y cotas de operación esto mediante observación y prueba Diceky-Fuller, por lo que se realizó un pronóstico de 36 de precipitación pluvial.	Se analizó el precio de la energía ante escenarios de variación en capacidad de producción, se confirmó relación directa entre el aporte de generación de Chixoy con el precio de <i>SPOT</i> , debido al tipo de despacho que se realiza mediante el ingreso de energías renovables como prioridad en esta, y los costos relacionados en su generación, demostrando que se tienen precios altos del <i>SPOT</i> en los mínimos de aporte y viceversa, esto para datos observados desde	Para cualquier análisis de confiabilidad en cuanto al suministro de agua para centrales de generación hidráulica, se deberán considerar factores externos como crecimiento demográfico de las áreas aledañas a los nacimientos y vertientes de los ríos o variables que influyan directamente precipitación pluvial. En caso de realizar pronósticos de estas variables se deberá tratar de obtener data de mayor de mayor antigüedad.
En el período analizado de diez años no se observó ningún valor menor al mínimo de la cota de operación de 772 m.s.n.m., teniendo un mínimo arriba de este parámetro de 3.19 y una media arriba del mínimo de operación de 20.84 m.s.n.m.		

Continuación anexo 1.

Octubre del 2015 hasta agosto del 2020.		
No se consideran significativos la correlación entre aporte y generación total, sin embargo, el aporte analizado de octubre del 2015 a diciembre del 2019 representó un promedio del 11% de la generación total del país, por lo que, también dadas las fuentes de recolección de información, modelos empleados para el procesamiento de datos y el programa en el que se desarrolló el presente estudio, se validó la confiabilidad del resultado y se confirma que siguiendo este procedimiento se puede replicar el mismo, ya que la información es de dominio público y el procesamiento de datos dependerá del enfoque del investigador, empleando los modelos estadísticos que considere viables para la obtención de los resultados.	Se estimó la confiabilidad de hidroeléctrica Chixoy desde el punto de vista de suministro de agua a partir de las variables hidrológicas y climáticas de datos observados del año 2010 al 2019-2020, dado que la variación de cotas se encontraba dentro de los rangos operacionales. La precipitación pluvial se mantiene a pesar los cambios estacionales y según el pronóstico realizado no existe posibilidad de desabastecimiento de agua en el embalse.	Para estimar los efectos en la producción de una hidroeléctrica en la matriz energética de Guatemala, se deberán plantear escenarios donde se reduzca la capacidad de producción de manera considerable, también considerar realizar simulaciones en Software NCP, que es el empleado en la programación de la operación a corto plazo.
En Guatemala se cuenta con dos períodos climatológicos marcados y empleados para la programación a largo plazo (PLP), siendo estación seca (noviembre – abril) y de lluvia (mayo – octubre). Como se observó en las corridas de series de tiempo para cada una de estas variables, esta premisa no se mantiene según lo indicado anteriormente debido a que en 7 de los 10 años analizados la temporada seca se extendió hasta el mes de mayo. El desarrollo de los ciclos estacionales de generación se obtiene a partir de la serie de tiempo de aporte.	Se determinó que los ciclos estacionales de generación de Hidroeléctrica Chixoy mantienen estacionalidad de acuerdo con el período de temporal seco, desde noviembre hasta abril, y de lluvia para los meses de mayo a octubre, se analizó a partir de la correlación de variables clasificadas como hidrológicas con el aporte de generación de Hidroeléctrica Chixoy, desestimando la variable de temperatura dada la poca significancia obtenida en las correlaciones.	Para determinar ciclos estacionales de generación relacionados a tendencias climáticas se deberá delimitar a un área específica que cumpla con variables que se consideren determinantes en cuanto a clima y sectorizarlos por las áreas de mayor afluencia hídrica y que presenten cantidades significativas de aporte, esto permitirá desarrollar modelos más precisos, que puedan permitirnos observar posibles cambios estacionales. También se recomienda realizar un estudio específico para el cambio climático en Guatemala.

Nota. Matriz de coherencia entre variables analizadas y las conclusiones realizadas. Elaboración propia, realizado con Excel.

Anexo 2.

Datos analizados del Mercado Eléctrico Nacional

Fecha	Generación Total (GWh)	Aporte Chixoy (GWh)	% Aporte	Precio SPOT (\$)
oct-15	1208.60588	194.4800	16%	59.9098
nov-15	1187.477083	147.3714	12%	51.9563
dic-15	1224.346505	179.4669	15%	41.5497
ene-16	1156.837433	142.5614	12%	44.4491
feb-16	1102.098815	100.0315	9%	42.0114
mar-16	1218.426815	121.5593	10%	47.7334
abr-16	1306.589514	126.9393	10%	50.1273
may-16	1283.872379	123.3856	10%	64.6303
jun-16	1221.760799	100.5856	8%	64.3801
jul-16	1243.698085	113.4488	9%	62.4794
ago-16	1199.270531	99.9839	8%	48.7027
sep-16	1184.353229	132.093	11%	45.8064
oct-16	1209.155477	125.148	10%	51.4937
nov-16	1265.962257	101.823	8%	44.2251
dic-16	1222.56082	73.1823	6%	54.2904
ene-17	1240.029704	78.0367	6%	64.4078
feb-17	1295.365253	78.7675	6%	66.4776
mar-17	1328.120598	88.9310	7%	54.5661
abr-17	1292.251042	98.9522	8%	66.0548
may-17	1214.25709	117.924	10%	59.5552
jun-17	1316.362083	194.3881	15%	50.7838
jul-17	1326.439281	261.9226	20%	45.0848
ago-17	1300.680612	262.0897	20%	46.8843
sep-17	1230.486597	264.5348	21%	40.8936
oct-17	1262.107191	264.4575	21%	37.9053
nov-17	1317.361042	232.6720	18%	39.4856
dic-17	1269.71119	183.1658	14%	45.6836
ene-18	1335.527184	110.5051	8%	39.6372
feb-18	1446.412463	148.8660	10%	46.3675
mar-18	1465.731082	159.8607	11%	56.2234
abr-18	1426.704028	144.2062	10%	56.6919

Continuación anexo 2.

Fecha	Generación Total (GWh)	Aporte Chixoy (GWh)	% Aporte	Precio SPOT (\$)
may-18	1461.671673	113.2053	8%	67.4782
jun-18	1443.890417	185.7120	13%	55.8591
jul-18	1463.43125	234.6988	16%	66.1609
ago-18	1507.528831	135.4460	9%	84.5608
sep-18	1372.739583	135.9649	10%	76.0128
oct-18	1294.859778	158.9445	12%	73.0171
nov-18	1280.9975	129.5305	10%	71.6320
dic-18	1358.619422	119.3687	9%	54.7138
ene-19	1327.01213	100.2910	8%	61.7131
feb-19	1267.84628	109.2368	9%	72.5084
mar-19	1405.992171	108.3431	8%	72.0546
abr-19	1421.448611	121.0322	9%	74.8945
may-19	1390.878898	107.5198	8%	87.7099
jun-19	1369.586563	62.8377	5%	74.4675
jul-19	1274.790726	71.3285	6%	77.1587
ago-19	1365.005444	57.0517	4%	69.5617
sep-19	1374.276806	57.9505	4%	60.7591
oct-19	1472.223488	158.4355	11%	39.0993
nov-19	1464.455764	219.6107	15%	32.7596
dic-19	1345.252151	73.8497	5%	37.0626
ene-20	1357.236022	96.3367	7%	34.9370
feb-20	1363.570797	91.0070	7%	46.7685
mar-20	1357.383569	116.0753	9%	35.7417
abr-20	1144.278472	106.6397	9%	40.7012
may-20	1019.254167	110.6769	11%	49.7735
jun-20	1076.057743	115.1398	11%	50.6978
jul-20	1110.399328	68.91616	6%	55.6732
ago-20	1202.702789	101.4112	8%	47.1250

Nota. Datos analizados de generación, aporte y precio. Elaboración propia, realizado con Excel.

Anexo 3.

Datos climatológicos analizados del INSIVUMEH

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
ene-10	20.6237	2.1699
feb-10	20.4538	1.2978
mar-10	23.3140	0.8247
abr-10	25.6054	2.6699
may-10	26.6618	10.6843
jun-10	25.9667	7.5495
jul-10	26.0000	14.4108
ago-10	25.7796	15.1656
sep-10	24.8355	9.4065
oct-10	23.4118	2.0860
nov-10	21.2925	3.9817
dic-10	19.9204	2.8161
ene-11	22.1452	6.6495
feb-11	20.6667	1.6710
mar-11	23.5269	4.2097
abr-11	25.2688	3.2022
may-11	26.9914	4.0151
jun-11	25.1430	15.8516
jul-11	25.6075	12.2763
ago-11	26.1269	14.9290
sep-11	24.7430	15.0419
oct-11	23.4978	15.7892
nov-11	21.8946	3.9323
dic-11	21.7269	2.7753
ene-12	13.8516	2.7022
feb-12	21.3624	3.3333
mar-12	23.5161	2.3581
abr-12	25.1892	2.9280
may-12	26.5312	9.3484
jun-12	25.6118	8.9710
jul-12	25.3108	9.8355
ago-12	26.1204	11.4247
sep-12	24.7656	5.4484

Continuación anexo 3.

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
oct-12	24.1634	9.3871
nov-12	21.0903	2.4656
dic-12	22.6441	2.2968
ene-13	18.9215	3.7957
feb-13	21.4989	1.8258
mar-13	23.2032	1.3925
abr-13	26.1258	3.0753
may-13	26.5000	7.3892
jun-13	25.2667	10.1419
jul-13	25.6774	9.3398
ago-13	16.3839	7.1817
sep-13	25.0323	10.4043
oct-13	25.5312	11.8484
nov-13	22.6656	6.6022
dic-13	23.1204	5.1215
ene-14	21.3462	1.9387
feb-14	13.4333	2.3204
mar-14	25.2495	5.7849
abr-14	25.4495	2.8946
may-14	25.7484	11.8430
jun-14	25.2677	11.3548
jul-14	25.9280	7.7935
ago-14	25.9183	6.0591
sep-14	15.7796	3.0667
oct-14	17.4925	9.0419
nov-14	14.0301	9.0215
dic-14	8.2946	2.5688
ene-15	14.0065	2.7398
feb-15	12.9129	3.1667
mar-15	15.0645	4.3667
abr-15	16.4527	1.3194
may-15	16.0957	2.1645
jun-15	14.8065	6.9935
jul-15	16.0796	6.3828
ago-15	15.4688	2.7978
sep-15	15.2763	6.5688
oct-15	15.7527	4.5806

Continuación anexo 3.

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
nov-15	14.6591	9.1355
dic-15	9.4548	2.6194
ene-16	14.1108	2.7968
feb-16	12.6462	4.0935
mar-16	16.1613	2.2602
abr-16	16.2731	0.7753
may-16	17.3247	2.5366
jun-16	16.0935	6.7806
jul-16	16.3699	5.8462
ago-16	16.5247	7.3462
sep-16	15.7882	6.0935
oct-16	24.9333	10.2258
nov-16	22.3935	4.6333
dic-16	17.4172	3.8086
ene-17	21.8183	2.5742
feb-17	21.4559	2.7441
mar-17	23.4419	4.5355
abr-17	26.0000	1.9903
may-17	24.0473	4.8344
jun-17	25.4882	14.2237
jul-17	25.9140	10.3516
ago-17	26.4215	10.2946
sep-17	25.6871	11.2419
oct-17	24.7538	15.8065
nov-17	22.9118	4.2280
dic-17	16.7505	2.1280
ene-18	21.1344	6.1527
feb-18	21.3548	3.0086
mar-18	15.9398	1.4452
abr-18	24.6527	3.4290
may-18	19.1968	3.9151
jun-18	25.0763	8.2484
jul-18	25.7172	8.8624
ago-18	25.8387	9.0129
sep-18	25.2484	7.8204
oct-18	25.3839	7.1624
nov-18	23.7161	4.0172

Continuación anexo 3.

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
dic-18	16.8301	1.1194
ene-19	23.0634	2.4462
feb-19	22.3065	1.8086
mar-19	24.6817	1.6054
abr-19	25.6387	1.9376
may-19	27.1516	7.3269
jun-19	26.2022	5.7140
jul-19	26.0022	7.9011
ago-19	26.7634	4.4409
sep-19	25.4516	10.9032
oct-19	25.8871	9.0634
nov-19	23.7204	3.3688
dic-19	17.4011	2.6817
ene-20	23.5710	5.2108
feb-20	23.0269	4.1215
mar-20	25.0441	2.4591
abr-20	27.0527	0.4527
may-20	17.4720	4.4226
jun-20	25.5849	9.6559
jul-20	26.3075	6.0301
ago-20	9.6323	3.7161

Nota. Modelos de series de tiempo. Obtenido de G. Aneiros (2008). *Series de Tiempo*. (<https://docplayer.es/3691712-Series-de-tiempo-german-aneiros-perez-master-en-tecnicas-estadisticas-curso-2008-09-departamento-de-matematicas-universidade-da-coruna.htm>).

Consultado el 28 de octubre del 2019. De dominio público.

Anexo 4.

Datos hidrológicos analizados del AMM

Mes	m s.n.m	Caudal (m^3/s)
ene-10	794.8358	17.8
feb-10	792.2378	12
mar-10	788.6196	12.6
abr-10	784.8493	18.8
may-10	783.1916	139.6
jun-10	802.9390	108.4
jul-10	803.0545	185.9
ago-10	803.0738	308.6
sep-10	803.1036	322.7
oct-10	803.0800	154.8
nov-10	802.5770	51.7
dic-10	800.9845	35.4
ene-11	799.1383	29.1
feb-11	796.1242	21.8
mar-11	790.0619	18.3
abr-11	781.9580	19.4
may-11	775.5116	21.8
jun-11	777.0900	64.4
jul-11	797.6835	170.9
ago-11	802.6339	108.2
sep-11	803.0877	253.1
oct-11	803.1639	337.5
nov-11	803.0777	64.2
dic-11	800.5800	36.2
ene-12	797.7855	34
feb-12	794.4459	27.1
mar-12	789.1155	21
abr-12	783.1360	26.2
may-12	775.4287	43
jun-12	785.8933	102
jul-12	792.5958	54.1
ago-12	795.8439	149.9
sep-12	802.9077	92.1
oct-12	802.9219	97.8

Continuación anexo 4.

Mes	m s.n.m	Caudal (m^3/s)
nov-12	800.8463	30
dic-12	799.4290	25.1
ene-13	797.4123	22.2
feb-13	794.9118	15.9
mar-13	790.8258	14.6
abr-13	786.0070	15.3
may-13	776.7355	19.4
jun-13	777.3900	77.3
jul-13	792.9658	93.4
ago-13	788.9468	57.6
sep-13	800.6773	218.3
oct-13	803.0326	127.4
nov-13	802.8720	67.7
dic-13	801.0432	41.8
ene-14	799.4316	28.9
feb-14	795.8714	21.7
mar-14	790.5777	17.2
abr-14	782.2057	14.2
may-14	781.6055	59
jun-14	799.0207	189
jul-14	800.6413	40.3
ago-14	793.1526	26.4
sep-14	795.4617	111.3
oct-14	803.4023	117.9
nov-14	802.39467	55.1
dic-14	801.0813	31.9
ene-15	798.2387	26.8
feb-15	794.6814	19.3
mar-15	789.9952	16.3
abr-15	784.8147	15.5
may-15	779.1384	19
jun-15	780.0300	52.5
jul-15	783.7690	35.7
ago-15	784.5458	21.4
sep-15	788.3927	85.2
oct-15	798.7861	54.2
nov-15	800.3227	56.3

Continuación anexo 4.

Mes	m s.n.m	Caudal (m^3/s)
dic-15	801.0132	29.8
ene-16	797.5981	19.2
feb-16	794.8210	16.1
mar-16	791.5000	10.6
abr-16	785.8123	15
may-16	778.6571	11.2
jun-16	777.8310	43.8
jul-16	780.1026	23.1
ago-16	785.03194	55.7
sep-16	793.74533	60.4
oct-16	795.75903	29.7
nov-16	795.23033	22.4
dic-16	794.1629	17
ene-17	793.88581	14.4
feb-17	792.1025	10.4
mar-17	789.51194	11.5
abr-17	784.767	11.2
may-17	778.87419	17.8
jun-17	790.747	184.5
jul-17	802.85839	93.6
ago-17	802.70774	94.1
sep-17	803.02467	221.4
oct-17	803.0529	255.9
nov-17	802.716	50
dic-17	799.88387	27.8
ene-18	798.10161	28.15
feb-18	797.54214	24.18
mar-18	791.52613	12.95
abr-18	784.06067	12.93
may-18	775.11935	21.98
jun-18	789.42533	125.86
jul-18	795.13065	30.37
ago-18	789.05645	31.61
sep-18	793.24333	66.13
oct-18	799.53226	76.26
nov-18	801.877	28.13

Continuación anexo 4.

Mes	m s.n.m	Caudal (m^3/s)
dic-18	800.34581	18.03
ene-19	797.72645	15.7
feb-19	795.25786	12.4
mar-19	790.35839	11.3
abr-19	784.45	13.1
may-19	776.93129	19
jun-19	777.60533	28.9
jul-19	778.97484	16.3
ago-19	778.66774	18.2
sep-19	782.08067	42.4
oct-19	797.00419	111.8
nov-19	800.76767	33.5
dic-19	797.68581	16.8

Nota. Modelos de series de tiempo. Obtenido de G. Aneiros (2008). *Series de Tiempo*. (<https://docplayer.es/3691712-Series-de-tiempo-german-aneiros-perez-master-en-tecnicas-estadisticas-curso-2008-09-departamento-de-matematicas-universidade-da-coruna.htm>).

Consultado el 28 de octubre del 2019. De dominio público.