



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ENERGÉTICA CON POTENCIAL EÓLICO
EN EL ÁREA DE PALÍN, ESCUINTLA**

Ing. Edgar Yanuario Laj Hun

Asesorado por el Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Guatemala, noviembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ENERGÉTICA CON POTENCIAL EÓLICO
EN EL ÁREA DE PALÍN, ESCUINTLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. EDGAR YANUARIO LAJ HUN

ASESORADO POR EL MTRO. ING. JUAN CARLOS FUENTES
MONTEPEQUE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIO	Mtro. 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 consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ENERGÉTICA CON POTENCIAL EÓLICO EN EL ÁREA DE PALÍN, ESCUINTLA

Tema que fuera asignado por la dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería, con fecha 31 de mayo de 2019.

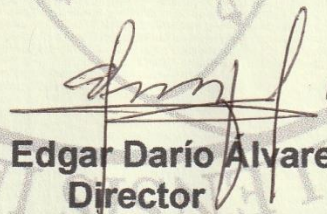
Ing. Edgar Yanuario Laj Hun

EEPFI-1193-2019

En mi calidad de Director 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 y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ENERGÉTICA CON POTENCIAL EÓLICO EN EL AREA DE PALIN, ESCUINTLA”** presentado por el Ingeniero Edgar Yanuario Laj Hun quien se identifica con Carné **100023434**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala**



Guatemala, noviembre de 2019

EEPFI-1194-2019

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ENERGÉTICA CON POTENCIAL EÓLICO EN EL AREA DE PALIN, ESCUINTLA”** presentado por el Ingeniero Edgar Yanuario Laj Hun quien se identifica con Carné **100023434**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, noviembre de 2019

Guatemala, noviembre de 2019

Maestro
Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
USAC – Facultad de Ingeniería
Presente.-

Estimado Mtro. Álvarez:

En mi calidad como Asesor del Ingeniero **Edgar Yanuario Laj Hun** quien se identifica con Carné **100023434** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ENERGÉTICA CON POTENCIAL EÓLICO EN EL AREA DE PALIN, ESCUINTLA"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Asesor

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Carné No. 3,504

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por todo.

Mi familia

Por el amor y apoyo incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la fuente de conocimiento.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente siempre.
Instituto Nacional de Electrificación	Por el apoyo brindado en la investigación.
Mi asesor	Juan Carlos Fuentes, por compartir sus conocimientos y guiarme en este proceso.
Mis amigos	A los verdaderos, por el apoyo en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	I
LISTA DE SIMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	1
1.1. Energía renovable en el mundo	1
1.2. Energía eólica, situación Guatemala	5
1.3. El movimiento del aire en la superficie terrestre	7
1.3.1. Fuerza del gradiente de presión.....	8
1.3.2. Fuerza de Coriolis	8
1.3.3. Aceleración centrípeta	9
1.3.4. Fuerza de rozamiento	9
1.4. Métodos estadísticos de estimación	9
1.4.1. Consistencia	9
1.4.2. Independencia.....	10
1.4.3. Homogeneidad.....	10
1.4.4. Distribución	10
1.4.5. Tendencia	10
1.4.6. Análisis de eventos extremos	10
1.5. Aspectos ambientales.....	11

1.5.1.	Ventajas.....	11
1.5.2.	Desventajas.....	12
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
3.	RESULTADOS.....	17
3.1.	Análisis de la consistencia.....	17
3.2.	Análisis de la independencia.....	19
3.3.	Análisis de la homogeneidad.....	22
3.4.	Análisis de la distribución.....	24
3.5.	Análisis de la tendencia.....	25
3.6.	Análisis de la frecuencia de la serie de velocidad del viento.....	26
3.7.	Análisis de eventos extremos para la serie de velocidad del viento.....	27
3.8.	Estimación del potencial energético y su distribución temporal...	30
3.9.	Validación de los resultados.....	33
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	35
	CONCLUSIONES.....	39
	RECOMENDACIONES.....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	APÉNDICES.....	47

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Régimen temporal de la precipitación pluvial con detalle mensual	13
2.	Distribución temporal de la velocidad del viento con detalle mensual....	14
3.	Serie histórica de la precipitación pluvial con detalle anual.....	14
4.	Serie histórica de la velocidad del viento con detalle anual	15
5.	Serie anual de días con precipitación pluvial.....	15
6.	Serie anual de la velocidad máxima del viento.....	16
7.	Consistencia de la serie de la precipitación pluvial mensual	17
8.	Curva de permanencia de la velocidad del viento	18
9.	Función de autocorrelación de la serie temporal de la precipitación pluvial anual	19
10.	Función de autocorrelación de la serie temporal de la velocidad media del viento anual	20
11.	Función de autocorrelación de la serie temporal de la velocidad máxima del viento anual.....	21
12.	Análisis de normalidad de la serie de precipitación pluvial.....	24
13.	Análisis de normalidad de la serie de velocidad del viento	25
14.	Histograma de la serie de velocidad del viento	27
15.	Retorno de eventos extremos	28
16.	Ajuste a la mejor proyección de retorno de eventos extremos	29
17.	Ley exponencial Hellman	31
18.	Densidad vs. temperatura	32
19.	Velocidad vs. potencia	32

20.	Potencial energético vs. altura detalle mensual	33
21.	Composición de la generación acumulada para el año 2018.....	36
22.	Composición de la generación 2018	36
23.	Capacidad instalada y efectiva del parque generador del SNI en MW al mes de septiembre de 2018.....	37
24.	Generación eléctrica por tipo de combustible, en (%) de enero a noviembre de 2018	38

TABLAS

I.	Parámetros estadísticos obtenidos en la prueba <i>t</i> de Student para la serie de precipitación pluvial	22
II.	Parámetros estadísticos obtenidos en la prueba de Cramer para la serie de precipitación pluvial	22
III.	Parámetros estadísticos obtenidos en la prueba <i>t</i> de Student para la serie de velocidad del viento.....	23
IV.	Parámetros estadísticos obtenidos en la prueba de Cramer para la serie de velocidad del viento.....	23
V.	Tendencia en la serie de precipitación pluvial mediante el test no paramétrico Spearman Rank Order Correlation.....	26
VI.	Tendencia en la serie de la velocidad del viento mediante el test no paramétrico Spearman Rank Order Correlation.....	26
VII.	Periodo de retorno de eventos extremos de velocidad del viento	30
VIII.	Validación de los resultados a través del coeficiente de rugosidad	34

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje
CO₂	Bióxido de carbono
EVs	Vehículos eléctricos
GW	Gigavatio
GWh	Gigavatio hora
GWP	Potencial de calentamiento global
HFC	Hidrofluorocarbonos
m	Metro
MW	Megavatio
NOX	Óxidos de nitrógeno
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
SAO	Sustancias que agotan la capa de ozono
SO₂	Dióxido de azufre

GLOSARIO

Emisión	Es la liberación de una sustancia (generalmente de un gas), hacia la atmósfera.
Energía	Capacidad para realizar un trabajo en forma de movimiento, luz, calor u otra transformación.
Estacionalidad	La estacionalidad o variación estacional de una serie temporal es la variación periódica y predecible de la misma con un periodo inferior o igual a un año. Es una de las componentes de las series temporales, y se contrapone a la tendencia (comportamiento a largo plazo) y a la variación cíclica (variación periódica con un periodo superior al año).
Geostrófico	El viento geostrófico es la corriente resultante de la interacción del viento de gradiente y la fuerza aparente de desviación de Coriolis.
Gradiente bórico	Variación de la presión atmosférica expresado en función de las fuerzas bóricas, derivadas de las variaciones en la presión y perpendiculares a las isobaras.
Ráfaga	Golpe de viento violento y de poca duración.

Rugosidad

La rugosidad del suelo se estima como un espesor o altura, este es un parámetro que influye en el perfil vertical de la velocidad del viento, por lo tanto, en la dispersión.

Sistematizar

Proceso por el cual se pretende ordenar una serie de elementos, pasos, etapas, entre otros, con el fin de otorgar jerarquías a los diferentes elementos.

Velocidad

La velocidad es la magnitud física de carácter vectorial que relaciona el desplazamiento con el tiempo. En virtud de su carácter vectorial, para definir la velocidad debe considerarse la dirección del desplazamiento y el módulo, el cual se denomina celeridad o rapidez.

RESUMEN

La energía eólica hace referencia a aquellas tecnologías y aplicaciones que emplean la energía cinética del viento, convirtiéndola en energía eléctrica, térmica o mecánica.

El presente trabajo de investigación trata sobre la estimación de generación energética con potencial eólico en el área de Palín, Escuintla, con el objetivo de sistematizar los datos de medición obtenidos durante treinta años y simular el potencial a diferentes alturas para consulta y referencia de proyectos eólicos en la región.

Para realizar el estudio, se analizaron los datos de las series temporales de viento y precipitación pluvial que se monitorean en la estación meteorológica localizada en el embalse de planta hidroeléctrica Jurún Marinalá de la Empresa de Generación de Energía Eléctrica (EGEE) del Instituto Nacional de Electrificación (INDE); se determinó el potencial eólico al considerar los factores geográficos y ambientales del sector. Además, se presentan las alternativas y recomendaciones a ser tomadas en cuenta para el desarrollo de proyectos en la región.

En la investigación, se logró establecer el potencial energético del viento y el impacto en la matriz energética nacional, que pueden llegar a tener este tipo de proyectos de generación. También, se determinó la alternativa de generación energética mediante recursos renovables como sustituto a la dependencia nacional del uso de combustible fósil para suplir esta necesidad; sobre todo en el periodo característico de generación del país que coincide en la transición de la

generación a través de recursos hídricos y la generación a través del bagazo de la zafra como materia prima, al ser el periodo donde el precio de oportunidad de la energía (POE) alcanza sus valores más altos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aumento de la actividad industrial y la modernización tecnológica de sus procesos, así como el de los hogares, generan mayor demanda de energía eléctrica en el país. Esta de ser suplida con las tecnologías comunes a través de combustibles fósiles, origina mayores emisiones de gases de efecto invernadero, lo que aumenta la huella de carbono.

La política energética del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala (MEM), pretende cambiar la matriz energética actual del país, con un crecimiento de aporte a través de tecnologías renovables, para cerrar la brecha de la dependencia actual de energía generada con combustibles fósiles.

En el caso de Guatemala, existe poca información del potencial eólico que sirva de referencia para estimar y evaluar proyectos de energía eólica, específicamente, para este caso en el área de Palín, Escuintla.

¿Los datos existentes de la velocidad del viento, son estadísticamente confiables para sistematizarlos en instrumentos técnicos científicos de consulta y referencia para proyectos eólicos?

¿Los datos de viento pueden ser usados para generar instrumentos técnicos de apoyo en el estudio de proyectos de energía eólica en Palín, Escuintla?

¿Contribuye con la política energética que aspira a una matriz energética independiente de combustibles fósiles en Guatemala?

¿Cuáles serían las ventajas de generar instrumentos técnicos de velocidad de viento para uso en estudios de proyectos eólicos de la región?

OBJETIVOS

General

Analizar estadísticamente la velocidad del viento, de manera de ordenar y validar los datos en instrumentos técnicos científicos, para consulta y referencia de proyectos eólicos en la región.

Específicos

1. Sistematizar estadísticamente la información de la base de datos de las velocidades del viento en la estación meteorológica Jurún Marinalá del INDE en la región de Palín, Escuintla.
2. Estimar el potencial energético del viento y su comportamiento temporal en la región estudiada, para incentivar el desarrollo de proyectos que contribuyan a la diversificación de la matriz energética.
3. Generar instrumentos técnicos científicos de consulta para orientación a la población, instituciones o empresas interesadas en el desarrollo de proyectos eólicos.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación plantea la siguiente interrogante central:

Al utilizar los datos recopilados por el INDE, ¿existe análisis estadístico de los datos medidos de velocidades del viento de la estación meteorológica Jurún Marinalá, para estimar el potencial eólico de la región?

De lo anterior, se estableció el objetivo general: realizar análisis estadístico de la velocidad del viento, de manera de sistematizar los datos en instrumentos técnicos científicos para consulta y referencia de proyectos eólicos en la región.

En la presente investigación, se adoptó una línea de investigación de tipo cuantitativa, mediante análisis inferencial de las propiedades de la serie temporal de precipitación pluvial y viento.

Se dividió en las siguientes etapas metodológicas para dar respuesta a las interrogantes planteadas, tanto la principal como las auxiliares:

1. Recopilación de la información: la recopilación de la información, se realizó a través de las gestiones ante la superintendencia de operación y mantenimiento de la EGEE del INDE para hacer uso de las bases de datos de la estación meteorológica Jurún Marinalá; esta recopilación fue acompañada por la unidad de hidrología de dicha institución.

2. Clasificación de información: se clasificó la información por series temporales de precipitación pluvial y viento.
3. Cuantificación y estimación de las propiedades de la serie temporal: se procedió en el análisis de la consistencia, homogeneidad, independencia, distribución y tendencia para ambas variables.
4. Modelación del potencial energético: consistió en el análisis estadístico realizado para obtener el perfil de velocidad del viento, desviación estándar, dirección del viento, densidad del aire, velocidades máxima y mínima del viento, temperatura, presión atmosférica, energía del viento, estimación de la probabilidad de velocidad y densidad de potencia media.
5. Validación del diseño y las estimaciones: se realizó una simulación con los datos obtenidos a través de los años y se modeló una gráfica para determinar el comportamiento de la velocidad del viento en los días posteriores a la toma de datos de esta investigación.

INTRODUCCIÓN

Guatemala cuenta con regiones que se consideran con un alto potencial eólico; aunque se cuenta con información regional del viento y su potencial, es necesario conocer los valores específicos del punto donde se desea aprovechar el recurso, lo que permite estimar la producción energética.

La energía eólica es energía limpia, no genera desechos contaminantes al ambiente. Tiene un costo de producción menor a otras tecnologías; permite que se sustituya la producción convencional a base de combustibles fósiles por recurso renovable.

La normativa que rige el mercado eléctrico nacional, al ser un mercado de oportunidad, prioriza la producción más eficiente y a base de recursos renovables; lo que hace la inversión de este tipo de proyectos, rentables bajo condiciones óptimas de operación técnica y eficiente en la generación.

La sistematización de la base de datos de la velocidad del viento y de la precipitación pluvial de un periodo de 30 años, aporta instrumentos de consulta técnica que sirven de referencia a personas e instituciones interesadas en proyectos de esta naturaleza en la región de Palín, Escuintla.

En la presente investigación, se encuentra una introducción que tiene como fin que el lector se interese en el tema, posteriormente las bases científicas y tecnológicas para su desarrollo.

El planteamiento del problema se encuentra delimitado y se formula la pregunta central.

Se plantearon 3 objetivos acorde a la investigación; se realizó un estudio estadístico completo para determinar el comportamiento de la serie.

En el marco teórico, se presentan los fundamentos bibliográficos, para poder llevar a cabo la investigación.

Adicionalmente, se presentaron los métodos, las técnicas, los instrumentos y los materiales de la investigación; se describen los diseños experimentales propuestos.

Se tiene una sección de discusión de resultados; por último, se presentan las referencias utilizadas como soporte científico de este estudio, en el cual se incluyen artículos científicos, *journals* relacionadas con el tema y sitios en internet de instituciones gubernamentales.

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

La energía eólica es uno de los mayores recursos de energía renovable y candidato fuerte para desarrollo de proyectos para satisfacer la demanda creciente de electricidad.

1.1. Energía renovable en el mundo

Según el informe más reciente de REN21 (2019) el año 2017 fue importante para la energía renovable, pues se caracterizó por las mayores incorporaciones de capacidad mundial, la disminución de los costos y el progreso en tecnologías de apoyo.

El crecimiento de las energías renovables en el sector energía en el año 2017, se dio a causa de varios factores a nivel mundial, entre ellos el aumento de la inversión, las preocupaciones sobre la seguridad energética, el medio ambiente y la salud humana, la creciente demanda de energía en el desarrollo y las economías emergentes, la necesidad de acceso a la electricidad y los gobiernos inclusivos de políticas ambientales. En el año 2018, se observaron acontecimientos que influyeron en la energía renovable: ofertas más bajas para la energía complementaria solar y eólica en licitaciones en varios países de todo el mundo, mayor interés en la electrificación del transporte, nuevas políticas y metas establecidas por los gobiernos a todos los niveles (World Economic Forum, 2016).

La energía solar fotovoltaica y la energía eólica, actualmente se unen a las tecnologías geotérmica, hidroeléctrica y bioenergía y calor, que desde hace

tiempo se han establecido como fuentes de energía con costos competitivos y como base de matriz energética en varios países, cada vez más cerca competitivamente con la generación existente con combustibles fósiles y la generación de energía nuclear (Vanham, 2016).

Los países en desarrollo han aumentado su potencia instalada a través de inversión en tecnologías de energía renovable a nivel mundial, en seguimiento del ejemplo de China como potencia mundial (Lieberman, 2018).

En el contexto de los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ODS) y apoyado por el Banco Mundial, en el año 2017, se creó la plataforma sostenibilidad movilidad para todos (SUM4ALL). Dicha iniciativa se basa en cuatro ejes estratégicos, que plantea, que la movilidad sostenible debe ser: equitativa, eficiente, verde y segura; para una nueva alianza estratégica global que tiene como objetivo poner en práctica los ODS que incluye la reducción de la huella ambiental y la contaminación, a favor del medio ambiente (#SUMBilbao19, 2018).

A nivel mundial se han realizado acuerdos para contribuir a reducir drásticamente los gases de efecto invernadero y limitar el calentamiento global; el Protocolo de Montreal es un acuerdo multilateral sobre el medio ambiente que previene con éxito el daño masivo a la salud humana y al medio ambiente por la excesiva radiación ultravioleta del sol al eliminar la producción y el consumo de sustancias que agotan la capa de ozono. El 15 de octubre de 2016, en Kigali, las partes del Protocolo de Montreal llegaron a un acuerdo en su 28ª reunión para reducir el consumo y la producción de hidrofluorocarbonos (HFC), que se utilizan con frecuencia como sustitutos de las sustancias que agotan la capa de ozono (SAO). Aunque los HFC no son SAO, son poderosos gases de efecto invernadero que tienen un potencial de calentamiento global (GWP) significativo. La

enmienda Kigali es un acuerdo internacional vinculante, o tratado, cuyo objetivo es crear derechos y obligaciones en el derecho internacional (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala, 2016).

Energía Sostenible para Todos (SEforALL) puso en marcha la iniciativa refrigeración para todos (Cooling for ALL) dirigido a identificar los desafíos y oportunidades de la refrigeración sostenible, a través del acuerdo sobre el clima de París, los ODS y el Protocolo de Montreal de Kigali (SEforAll, 2017).

La fijación del precio del carbono gana atención como una forma de abordar el cambio climático. Unos 40 países y más de 20 ciudades, estados y provincias usan mecanismos, tales como régimen de comercio de derechos de emisión e impuestos sobre el carbono, o se preparan para implementarlos. Una medida de este tipo ayuda a que el daño causado por las emisiones de gases de efecto invernadero recaiga en quienes son responsables del mismo y que pueden reducir tales emisiones. El sector privado ha apoyado cada vez más una fijación consistente del precio del carbono. Muchas empresas operan en países que ya cuentan con estos mecanismos y usan la fijación del precio sombra o social del carbono en sus planes e inversiones (Banco Mundial, 2014).

China, la fuente de gases de efecto invernadero más grande del mundo, apunta a elevar la proporción de combustibles no fósiles al 20% de su mezcla energética total para 2020, como parte del Acuerdo de París en diciembre de 2015, donde se comprometió a limitar las emisiones de carbono. Países como Canadá, Chile, Colombia, Costa Rica, México, los gobernadores de California y Washington, y los primeros ministros de Alberta, Columbia Británica, Nueva Escocia, Ontario y Quebec lanzaron el marco cooperativo de Precios de Carbono en las Américas, lo que reafirma su compromiso con el Acuerdo de París al comprometerse a implementar los precios del carbono como un instrumento de

política central para la acción del cambio climático; por lo que reconocen que el cambio climático es una amenaza mundial. La integración regional de los instrumentos de fijación de precios del carbono en todo el hemisferio será uno de los logros, además de desarrollar políticas de carbono que apoyen la competitividad, fomenten la innovación, creen empleos, proporcionen un entorno saludable para sus ciudadanos y ofrezcan reducciones de emisiones significativas (Carbon Pricing Leadership Coalition, 2017).

El carbón es una de las fuentes de electricidad que más genera gases de efecto invernadero, la electricidad generada por las plantas eléctricas de carbón representan a nivel mundial el 40%. En noviembre de 2017, un grupo de 27 gobiernos nacionales, provinciales, estatales liderados por Canadá, puso en marcha la Alianza Carbón Encendido del Pasado, donde adquiere el compromiso de eliminar de forma gradual la energía producida por el carbón en el año 2030; a principios de 2018 (Government of Canada, 2018).

Un cuarto de todas las emisiones de bióxido de carbono (CO₂) relacionadas con la energía y aproximadamente el 15-17% de toda la propagación de las emisiones humanas de CO₂, se debe al transporte. Los gobiernos nacionales de Costa Rica, Francia, Los Países Bajos y Portugal, así como el Proceso de París sobre la movilidad y clima, junto con empresas privadas comprometidas con la acción ambiciosa en el transporte y el cambio climático, realizan en noviembre de 2017 la Alianza para la Descarbonización de Transporte. El transporte limpio y eficiente, tanto público como privado, es un elemento inherente en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (Bonn, 2017).

La iniciativa de vehículos eléctricos mundial puso en marcha la campaña EV30@30, con el objetivo de ayudar a abrir oportunidades para un mayor uso de

energías renovables en el sector del transporte; establecimiento de una meta colectiva de un 30% del mercado de vehículos eléctricos (EVs) entre todos los coches de pasajeros, vehículos comerciales ligeros, autobuses y camiones para el año 2030 (AIE, 2018).

En Guatemala, existen esfuerzos aislados de instituciones privadas que incursionan en la descarbonización del transporte a través del mercado de los vehículos eléctricos, que en alianza con otras empresas hacen esfuerzos para incentivar este tipo de transporte, a través de tarifas de energía a menor valor comercial en un horario determinado para el proceso de carga del vehículo; actualmente, no existen políticas públicas o programas destinados a movilidad (Ministerio de Energía y Minas, 2019).

En muchos países en desarrollo, gran parte de la población aún no cuenta con acceso a la energía, en particular en África. Aproximadamente, 1.06 mil millones de personas en todo el mundo vivían sin electricidad en 2016, mientras que alrededor de 2.8 mil millones de personas carecen de acceso a agua limpia para cocinar. Es un hecho que las energías renovables ganan terreno a nivel mundial, especialmente la energía solar fotovoltaica y la energía eólica; sin embargo, los combustibles fósiles representan la gran mayoría del consumo mundial de energía final (Banco Mundial, 2018).

1.2. Energía eólica, situación Guatemala

La fuerza del viento es una fuente limpia de energía renovable. Su uso aplicado a la generación de energía eléctrica disminuye el consumo de energía generada a través de combustibles fósiles, lo que genera un impacto ambiental positivo debido a que no produce gases nocivos en comparación de los sistemas convencionales. El viento está disponible en cualquier lugar del planeta, aunque

no todos los lugares son óptimos, ni reúnen las condiciones idóneas para desarrollar proyectos eólicos.

En publicación de la página oficial de internet del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala (2019) afirma:

Guatemala se encuentra en una posición estratégica geográficamente, se encuentra afectada por el patrón de los vientos alisios, los cuales se desplazan con una componente del Norte (puede ser NNE, NE, NNO) durante los meses de octubre a febrero, debido a un sistema de alta presión que se ubica por esta época en la parte central de los Estados Unidos de norteamericana y su prolongación a través del Golfo de México y la Península de Yucatán (en la República Mexicana). Estas corrientes de aire ingresan desde el territorio del Golfo de México por el departamento de Izabal y se encañonan entre las Sierras del Merendón y Las Minas, de esta forma estos vientos se aceleran y logran velocidades un poco más altas en el oriente del país, luego pasan a la zona central y se dirigen a la parte noroeste del país disminuyendo considerablemente su velocidad, cubriendo el área que está comprendida entre la Sierra de los Cuchumatanes y el Pie del Monte de la Costa Sur. Durante los meses de marzo a junio, el viento mantiene una componente Sur por la presencia de sistemas de baja presión, ubicados a lo largo del Océano Pacífico que son responsables de gobernar la circulación o flujo del viento. Cuando estos sistemas de presión son los suficientemente grandes, hacen que el viento logre rebasar los macizos montañosos del Pie de Monte y de la Sierra de los Cuchumatanes, llegando hasta los departamentos de Alta Verapaz, Huehuetenango y El Quiché. En los restantes meses de julio a septiembre, el viento conserva una componente Norte, debido a la presencia del anticiclón semipermanente del Atlántico que mantiene un flujo a través del departamento de Izabal, excepto en situaciones donde aparecen los huracanes o tormentas tropicales que hacen que el flujo cambie completamente, pero ello, de forma transitoria. Sic.

También, la página del Ministerio de Energía y Minas, a través de la Dirección General de Energía, cuenta con el proyecto de medición eólica en Guatemala, que contiene información que puede ser usada para la consulta y el desarrollo de proyectos. Entidades privadas han participado en la medición de

este recurso, con el objeto de identificar el potencial eólico para el desarrollo de proyectos con fines energéticos, localizados en los departamentos de Jutiapa (Comapa, El Progreso y Agua Blanca), Guatemala (Villa Canales y en Amatitlán), Escuintla (San Vicente Pacaya) y Sacatepéquez (Alotenango). La generación eléctrica a partir del recurso eólico en Guatemala, complementa la producción proveniente de las centrales hidroeléctricas, ya que en la época de verano éstas presentan sus niveles más bajos de producción, el aumento en la velocidad de los vientos coincide con la disminución de las precipitaciones (Ministerio de Energía y Minas, 2019).

El primer parque de generación eólica que empezó a operar en Guatemala, es San Antonio El Sitio en Villa Canales Guatemala, que tiene una capacidad de 52.8 megavatios. En San Vicente Pacaya, Escuintla, y Agua Blanca, Jutiapa, funcionan también dos parques eólicos más, lo que suma una potencia instalada de 106.5 MW en total para energía eólica en Guatemala (Reve, 2019).

1.3. El movimiento del aire en la superficie terrestre

Debido a la diferencia de temperatura entre los polos, se genera la energía necesaria para la circulación atmosférica del aire.

La diferencia de presión existente entre la superficie de la tierra y los niveles superiores de la atmosfera ocasiona el escape de esta, el descenso de la presión del aire al aumentar la altura; esta compensa la fuerza de gravedad dirigida hacia abajo; esto es lo que se conoce como equilibrio hidrostático.

Este equilibrio, conjuntamente con la estabilidad general de la atmosfera y su escaso espesor, limita en gran manera los movimientos verticales del aire. La

velocidad de los vientos horizontales es del orden de varios centenares de veces mayor que la de los movimientos verticales.

El movimiento del aire en las proximidades de la superficie terrestre está controlado por cuatro factores como lo son la fuerza del gradiente de presión, fuerza de Coriolis, aceleración centrípeta y fuerza de rozamiento.

1.3.1. Fuerza del gradiente de presión

Esta fuerza es la componente horizontal de la fuerza de presión. La componente vertical de dicha fuerza se equilibra con la fuerza de la gravedad.

La diferencia de presión en el espacio, que puede ser debido a causas mecánicas o térmicas, controla los movimientos horizontales de las masas de aire. El gradiente de presión es la fuerza que ocasiona el movimiento del aire desde la zona de altas presiones hacia las de bajas presiones.

1.3.2. Fuerza de Coriolis

Debido a la rotación del globo, cualquier movimiento en el hemisferio norte es desviado hacia la derecha, si se mira desde nuestra posición en el suelo (en el hemisferio sur es desviado hacia la izquierda).

Esta aparente fuerza de curvatura es conocida como fuerza de Coriolis. La fuerza de Coriolis es una consecuencia del hecho de que el movimiento de las masas de aire sobre la superficie de la tierra está generalmente referido a un sistema de coordenadas móvil.

1.3.3. Aceleración centrípeta

Los cuerpos que se mueven o siguen una trayectoria curva se ven sometidos a una aceleración dirigida hacia su centro de rotación. En un sistema de baja presión, el flujo equilibrado sigue una trayectoria circular debido a que la fuerza de Coriolis es menor que el gradiente de presión.

La diferencia entre ambos casos da la aceleración centrípeta.

1.3.4. Fuerza de rozamiento

La fuerza debido al rozamiento del aire con la superficie terrestre ejerce un importante efecto sobre su movimiento.

En las proximidades de la superficie (por debajo de unos 500 metros o los terrenos llanos) el rozamiento hace que disminuya la velocidad del viento por debajo del valor geostrofico.

1.4. Métodos estadísticos de estimación

Caracterización de la serie temporal: se refiere al detalle temporal, es decir de forma diaria, mensual y anual, con sus respectivos gráficos de secuencia.

Propiedades estadísticas de la serie temporal:

1.4.1. Consistencia

Consiste en la estimación de saltos o quiebres, lo cual puede realizarse mediante el análisis doblemente másico.

1.4.2. Independencia

Las series pueden ser dependientes e independientes, para lo cual se aplican algunos métodos como la prueba de Anderson. Teóricamente, las series temporales de este tipo de variables deben de ser independientes.

1.4.3. Homogeneidad

Estimada mediante las pruebas estadísticas t Student y Cramer, permite identificar si estadísticamente todos los datos de la serie pertenecen a una misma población.

1.4.4. Distribución

Se estimará el ajuste de la serie temporal a la distribución normal mediante pruebas gráficas y paramétricas.

1.4.5. Tendencia

Con el objeto de estimar alguna tendencia de la serie se aplicará la prueba de Spearman, recomendada por la Organización Meteorológica Mundial, para este tipo de variables.

1.4.6. Análisis de eventos extremos

Hace referencia a la aplicación de un modelo estadístico para estimar el comportamiento de eventos extremos de la velocidad del viento.

1.5. Aspectos ambientales

Todo proyecto genera un impacto ambiental durante el proceso de construcción e instalación, pero consideramos las ventajas y desventajas, que este tipo de proyectos generan a futuro, como parte de su operación y mantenimiento.

1.5.1. Ventajas

A comparación de otros medios de producción de energía, la energía eólica además de ser renovable, es considerada limpia ya que hace uso de la fuerza del viento y no genera ningún desecho en su producción, haciéndola un medio sustentable.

Cada unidad (kWh) de electricidad producida con turbinas eólicas puede desplazar una unidad de electricidad generada por una central que quema hidrocarburo. Es posible calcular la cantidad de gases contaminantes que este reemplazo significa en forma genérica, si bien este valor varía según la eficiencia de la central térmica, el uso de equipos de disminución de la emisión y el tipo de combustible (Moragues & Rapallini, 2019).

Al hacer uso de la fuerza del viento como materia prima, de tecnología conocida y usada ya en la industria actual, resulta ser de las opciones más económicas para la reducción de emisiones de CO₂ en sustitución de otro tipo de fuentes de energía, así como la reducción de los efectos regionales producidos por la lluvia ácida y asociados a las concentraciones en aire de dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NOX).

1.5.2. Desventajas

Las desventajas en relación al impacto ambiental que se puedan atribuir a la energía eólica, es la contaminación visual debido a la alteración de paisajes por el uso de estructuras de gran tamaño para el aprovechamiento del potencial. La contaminación acústica, debido al ruido ocasionado por el movimiento de las aspas y la vibración provocada, motivo por el cual se recomienda la planificación de este tipo de proyectos lejos de poblaciones que puedan ser afectadas.

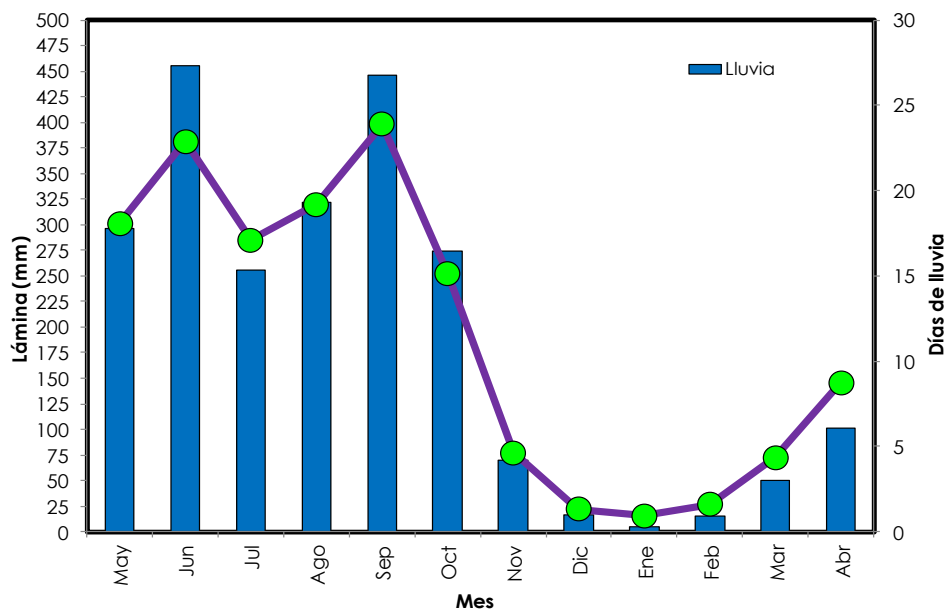
Tiene impactos significativos sobre la ecología local, por las alteraciones del hábitat debido a los cambios de la presión atmosférica que se producen por el movimiento de las aspas, directamente a los murciélagos y las aves de la región; debido a que suelen colisionar con las torres o sus aspas en movimiento, al ignorar el peligro que representan este tipo de estructuras.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La procedencia de la información, se realizó a través de la base de datos registrada por la EGEE del Instituto Nacional de Electrificación, quien acompañó dicho proceso con personal del departamento de hidrología.

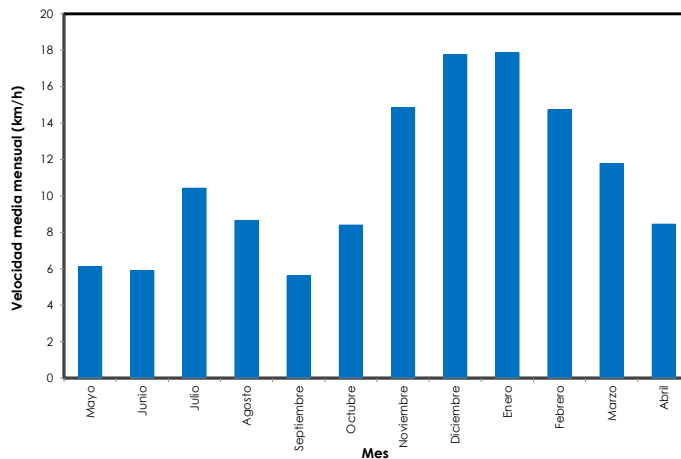
Se realizó el ordenamiento e integración de los datos previo al análisis estadístico; se obtuvo la siguiente caracterización de los datos para la medición en un periodo de treinta años:

Figura 1. Régimen temporal de la precipitación pluvial con detalle mensual



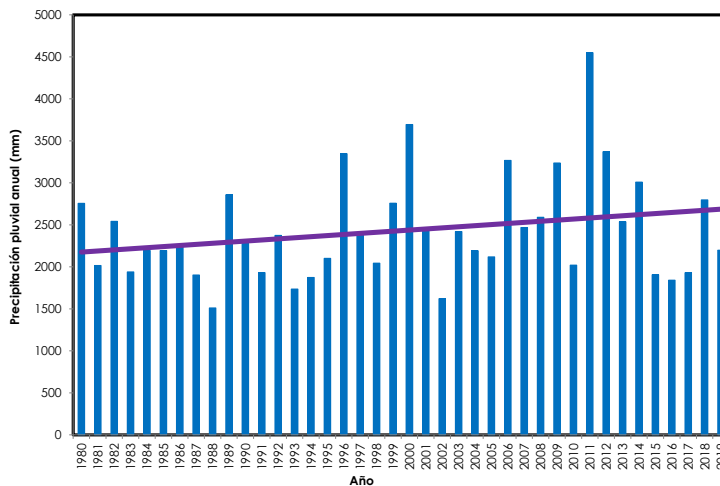
Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Figura 2. **Distribución temporal de la velocidad del viento con detalle mensual**



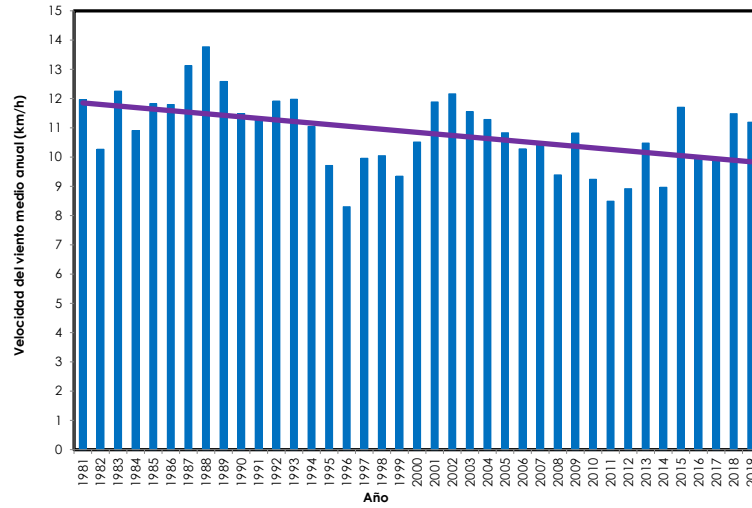
Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Figura 3. **Serie histórica de la precipitación pluvial con detalle anual**



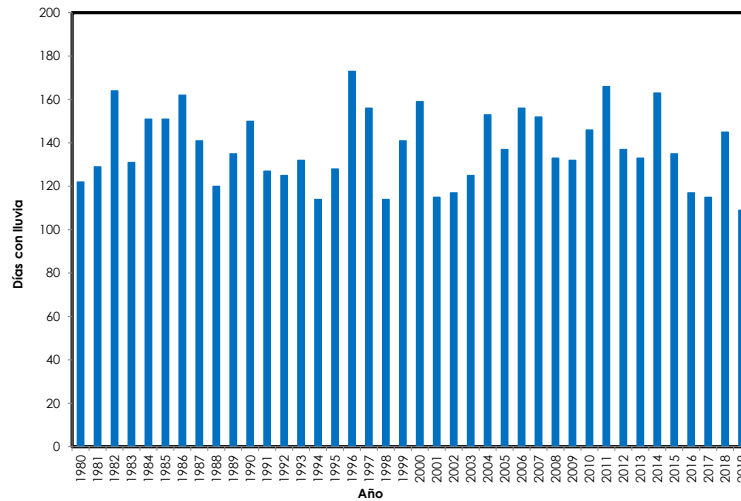
Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Figura 4. **Serie histórica de la velocidad del viento con detalle anual**



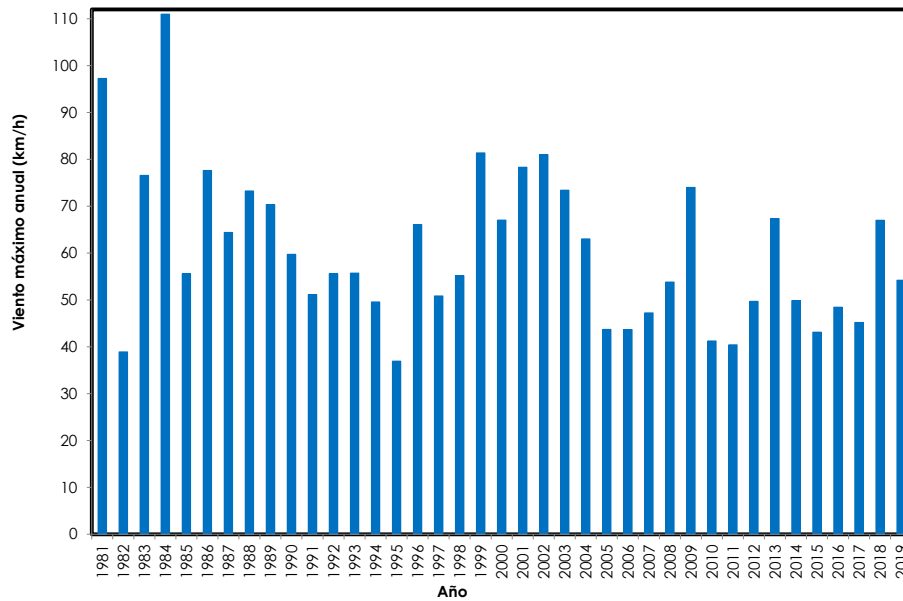
Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Figura 5. **Serie anual de días con precipitación pluvial**



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Figura 6. Serie anual de la velocidad máxima del viento



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

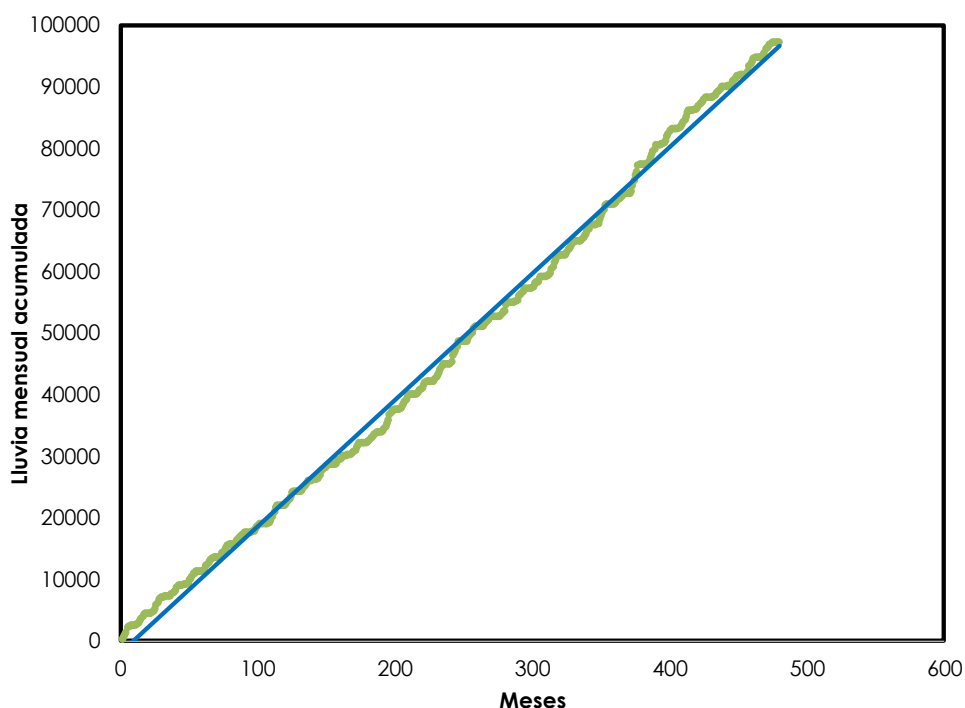
3. RESULTADOS

Se realizó el análisis estadístico para los parámetros de medición en un periodo de treinta años; se obtuvo la siguiente caracterización de los datos:

3.1. Análisis de la consistencia

Podemos observar las siguientes graficas desarrolladas.

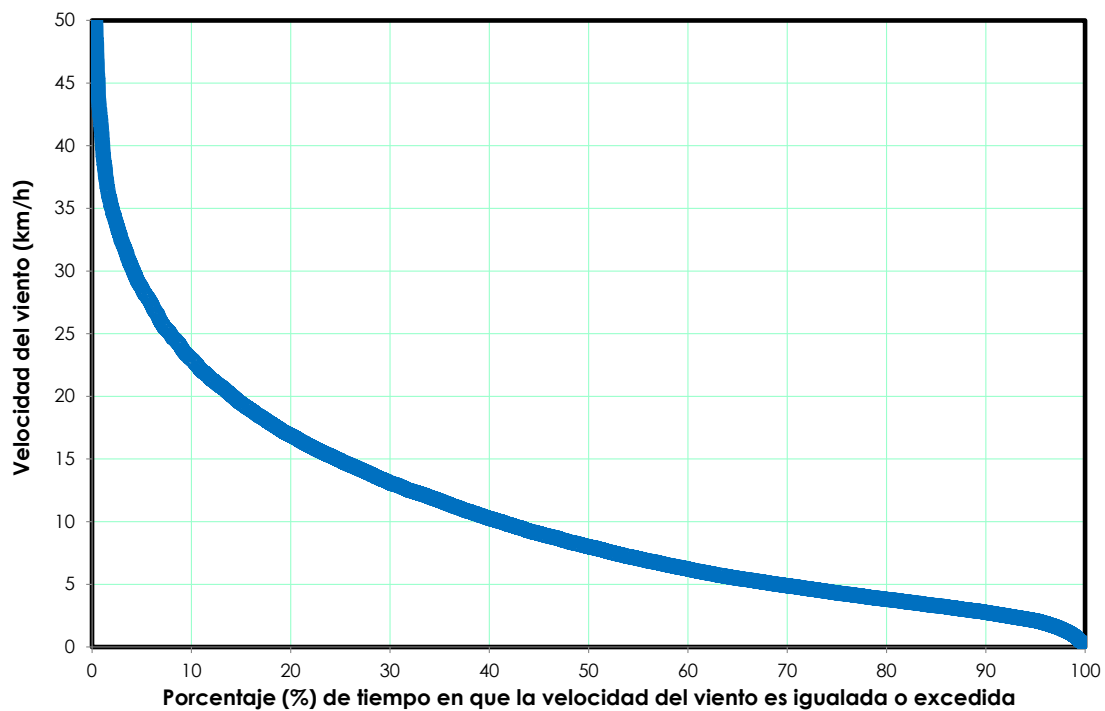
Figura 7. **Consistencia de la serie de la precipitación pluvial mensual**



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la serie de precipitación pluvial es consistente y confiable, dado que no presenta irregularidades, como quiebres o saltos. Esto puede deberse a los protocolos de operación y mantenimiento del equipo de medición instalado en esta estación meteorológica.

Figura 8. **Curva de permanencia de la velocidad del viento**



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

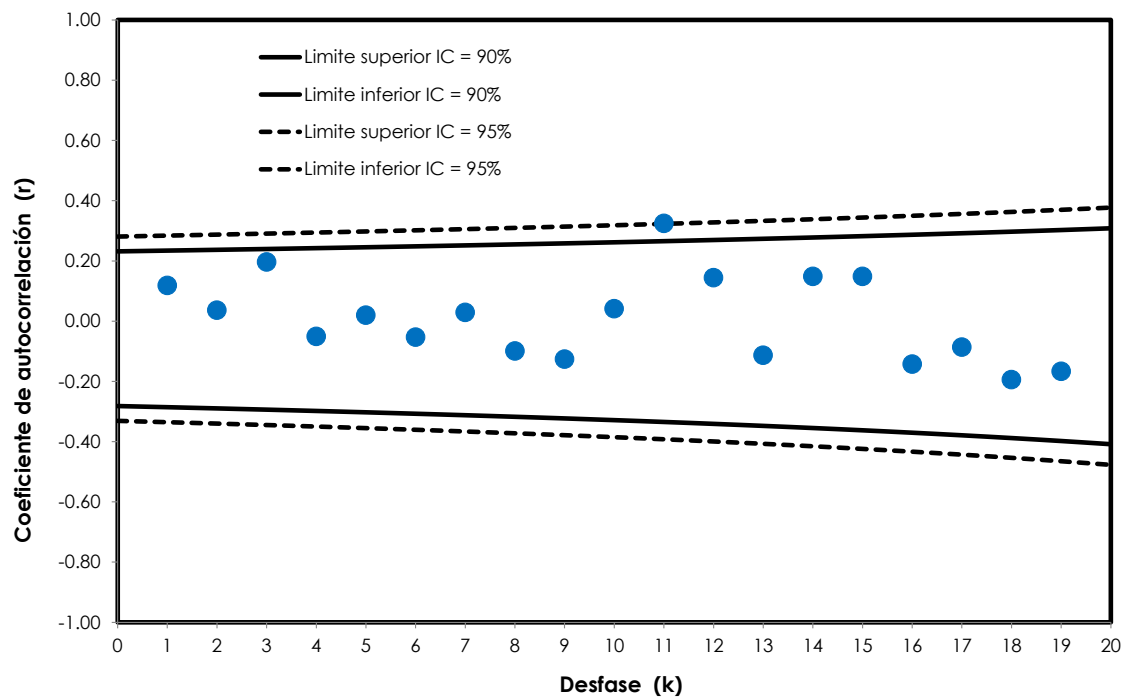
La 8 representa el comportamiento del viento a nivel promedio durante un año estacional, se deduce que la velocidad del viento igualada o excedida el 50% del tiempo es mayor a 7 km por hora. Existe la probabilidad de épocas con velocidades de viento altas que puedan superar los 35 km por hora por periodos

cortos, consideradas como ráfagas. En especial, los meses comprendidos entre noviembre y enero.

3.2. Análisis de la independencia

Podemos observar las siguientes graficas desarrolladas.

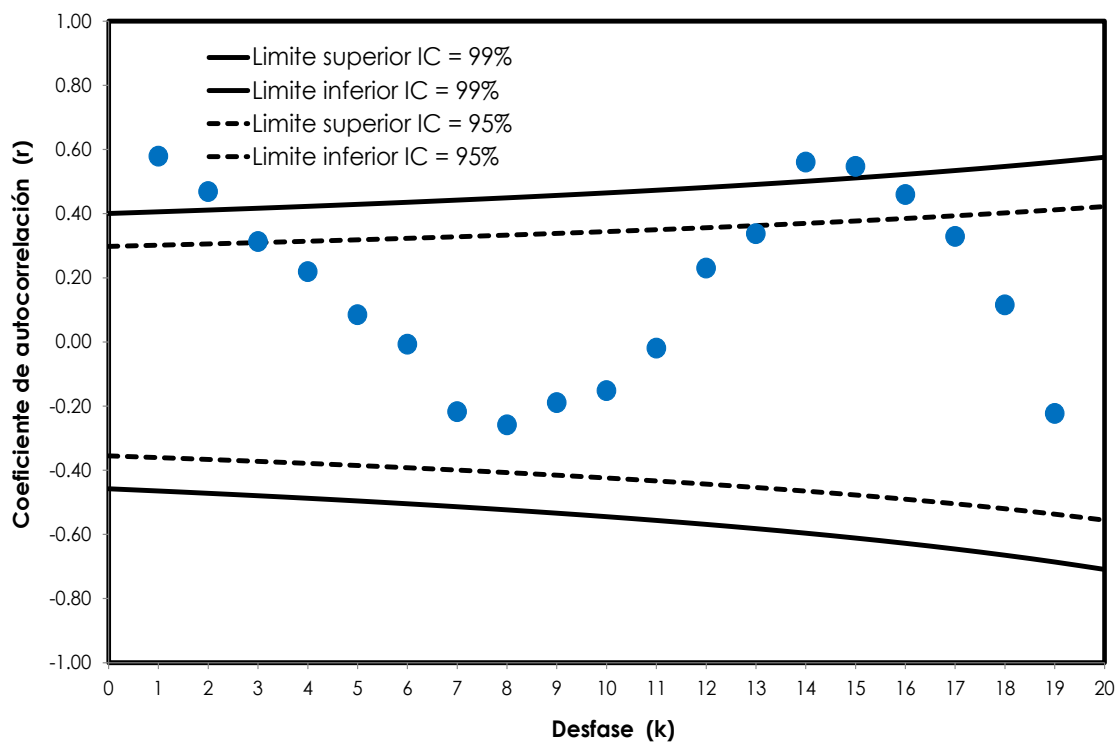
Figura 9. **Función de autocorrelación de la serie temporal de la precipitación pluvial anual**



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que 95% de la serie está dentro del intervalo de confianza, por lo que la serie es independiente. Esto significa que la serie no posee gradientes, al ser comportamiento totalmente aleatorio.

Figura 10. **Función de autocorrelación de la serie temporal de la velocidad media del viento anual**

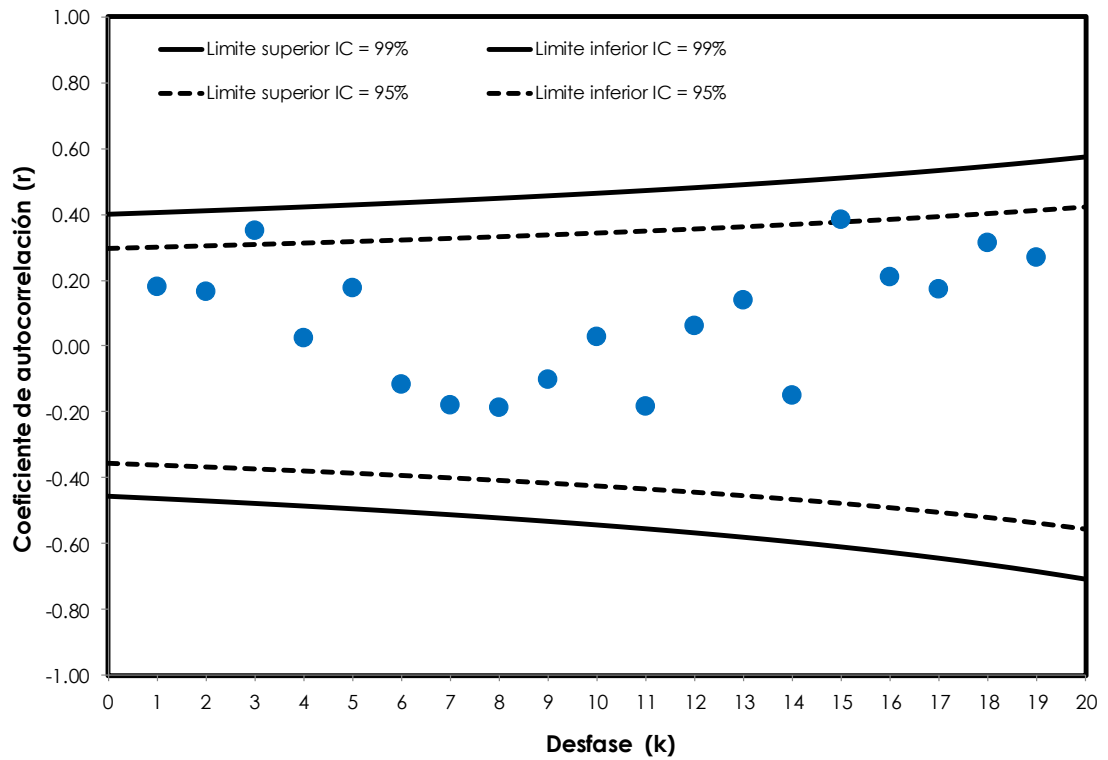


Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la serie de velocidad del viento es independiente para la velocidad media.

Se puede apreciar en la diez una tendencia a un comportamiento cíclico en el periodo de treinta años; esto puede obedecer a patrones de movimiento de la tierra que influyen en el comportamiento del viento, de lo cual puede profundizarse más en su análisis a futuro, al caracterizar los datos de los próximos años.

Figura 11. **Función de autocorrelación de la serie temporal de la velocidad máxima del viento anual**



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la serie de velocidad del viento máximo (ráfagas) es independiente, dado a que esta serie no es normal (estadísticamente), sino su comportamiento es de acuerdo con distribuciones para eventos extremos.

3.3. Análisis de la homogeneidad

Se observa en las siguientes tablas los valores calculados.

Tabla I. **Parámetros estadísticos obtenidos en la prueba t de Student para la serie de precipitación pluvial**

Serie	t		Conclusión
	estimado	teórico	
Anual	1.42	2.05	Homogénea

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Tabla II. **Parámetros estadísticos obtenidos en la prueba de Cramer para la serie de precipitación pluvial**

Serie	t estimado		t teórico		Conclusión
	t_{60}	t_{30}	t_{60}	t_{30}	
Anual	1.83	2.03	2.02	2.06	Homogénea

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la serie de precipitación pluvial es homogénea.

Tabla III. **Parámetros estadísticos obtenidos en la prueba t de Student para la serie de velocidad del viento**

Serie	<i>t</i>		Conclusión
	estimado	teórico	
Anual	2.26	2.73	Homogénea
Máxima	1.21	2.04	Homogénea

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Tabla IV. **Parámetros estadísticos obtenidos en la prueba de Cramer para la serie de velocidad del viento**

Serie	<i>t</i> estimado		<i>t</i> teórico		Conclusión
	<i>t</i> ₆₀	<i>t</i> ₃₀	<i>t</i> ₆₀	<i>t</i> ₃₀	
Anual	3.29	2.38	2.74	2.74	Heterogénea
Máxima	1.15	2.14	2.74	2.74	Homogénea

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

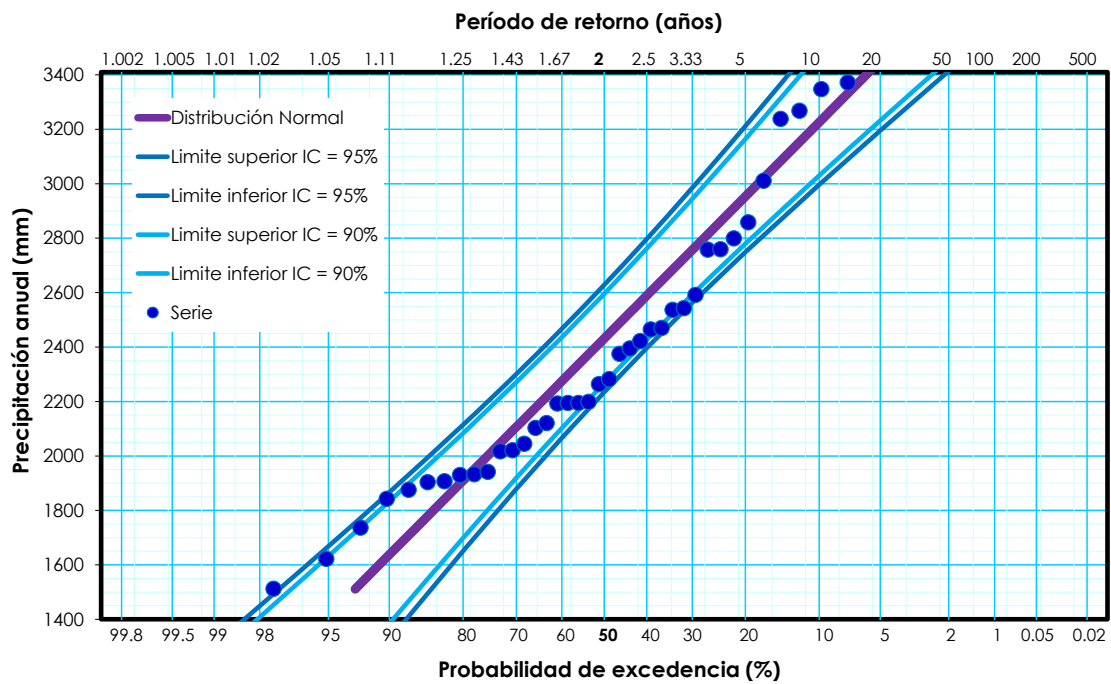
Se concluye que la serie de precipitación pluvial es heterogénea.

Existe una correlación inversa entre las variables velocidad del viento y lluvia, al existir mayor viento en los meses de época seca y viceversa. Cabe resaltar que las condiciones que propician la lluvia, principalmente la baja presión atmosférica, influye negativamente en el comportamiento de las líneas de viento.

3.4. Análisis de la distribución

Podemos observar las siguientes graficas desarrolladas.

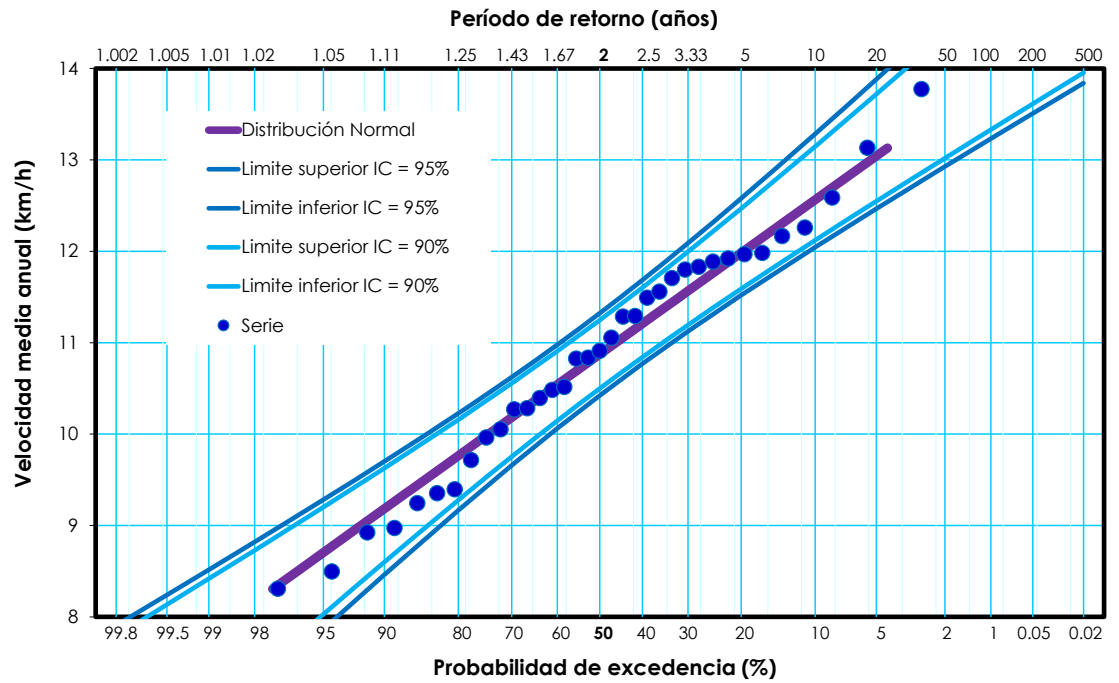
Figura 12. Análisis de normalidad de la serie de precipitación pluvial



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la serie de lluvia es normal.

Figura 13. **Análisis de normalidad de la serie de velocidad del viento**



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la serie de la velocidad del viento es normal.

3.5. Análisis de la tendencia

Podemos observar en las siguientes tablas los valores calculados.

Tabla V. **Tendencia en la serie de precipitación pluvial mediante el test no paramétrico Spearman Rank Order Correlation**

Serie	t		Distancia	Tendencia	
	t calculado	t teórico		Sentido	Significancia
Anual	5.85	2.05	-3.80	Positivo	Presente

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la serie de la precipitación pluvial tiene sentido positivo con una significancia presente.

Tabla VI. **Tendencia en la serie de la velocidad del viento mediante el test no paramétrico Spearman Rank Order Correlation**

Serie	t		Distancia	Tendencia	
	t calculado	t teórico		Sentido	Significancia
Anual	1.97	2.04	0.07	Negativo	Ausente
Máxima	0.56	2.04	1.47	Negativo	Ausente

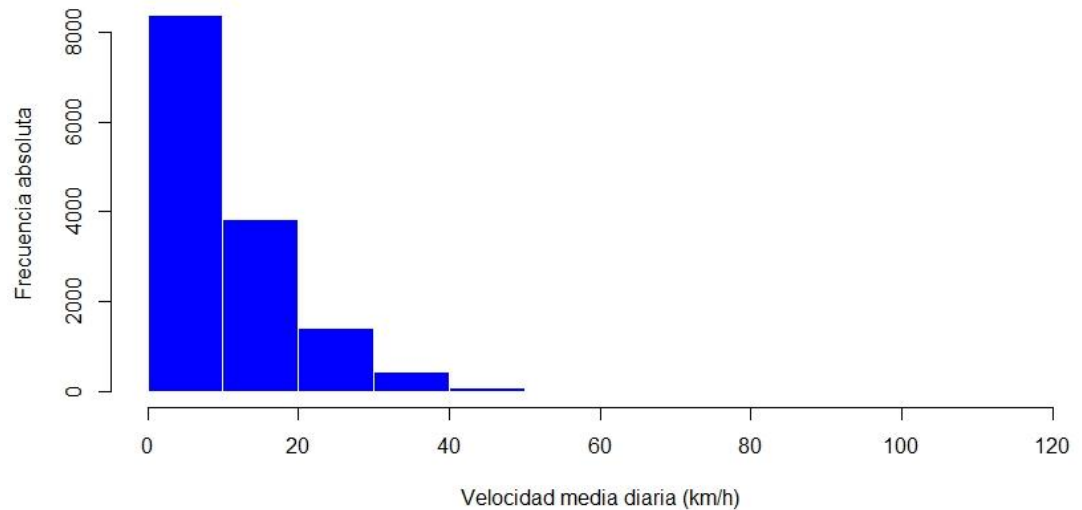
Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la serie de la precipitación pluvial tiene sentido negativo con una significancia ausente.

3.6. Análisis de la frecuencia de la serie de velocidad del viento

Podemos observar la gráfica desarrollada.

Figura 14. **Histograma de la serie de velocidad del viento**



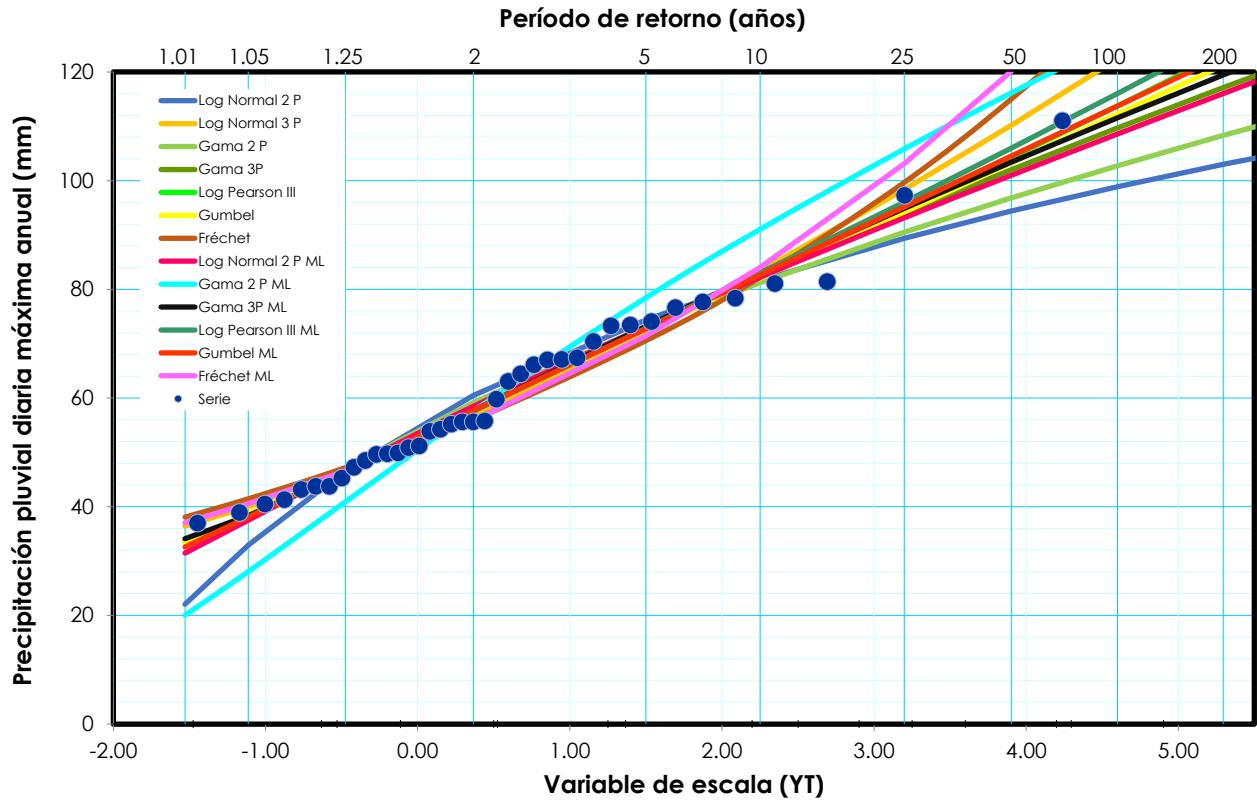
Fuente: elaboración propia utilizando el software R con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que la frecuencia o permanencia de la velocidad media del viento durante todo el periodo analizado.

3.7. Análisis de eventos extremos para la serie de velocidad del viento

Para el análisis de eventos extremos se utilizó el software estadístico HIDRO ESTA versión 2 para el cálculo de los momentos convencionales y los momentos lineales previo al desarrollo de las gráficas siguientes.

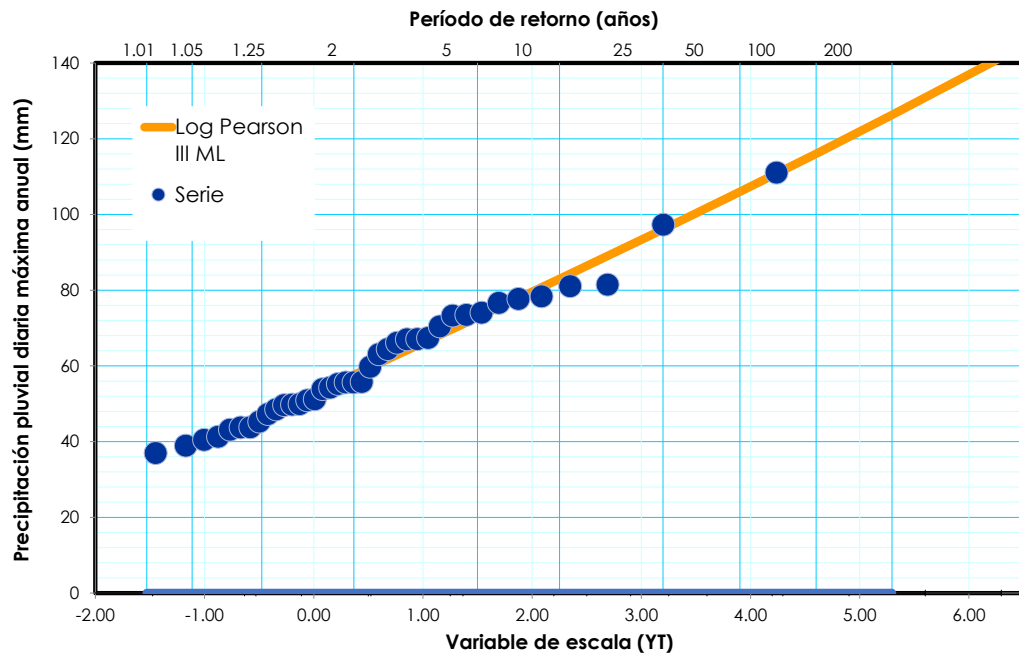
Figura 15. Retorno de eventos extremos



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se procede al ajuste de datos con la mejor proyección de retorno de eventos extremos, como se muestra en la 15 el momento lineal Log Pearson III.

Figura 16. **Ajuste a la mejor proyección de retorno de eventos extremos**



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Se concluye que el momento lineal Log Pearson III es el que se ajusta mejor a la serie, en donde se observa el siguiente periodo de retorno y su correspondiente clasificación en la escala de Beaufort.

Tabla VII. **Periodo de retorno de eventos extremos de velocidad del viento**

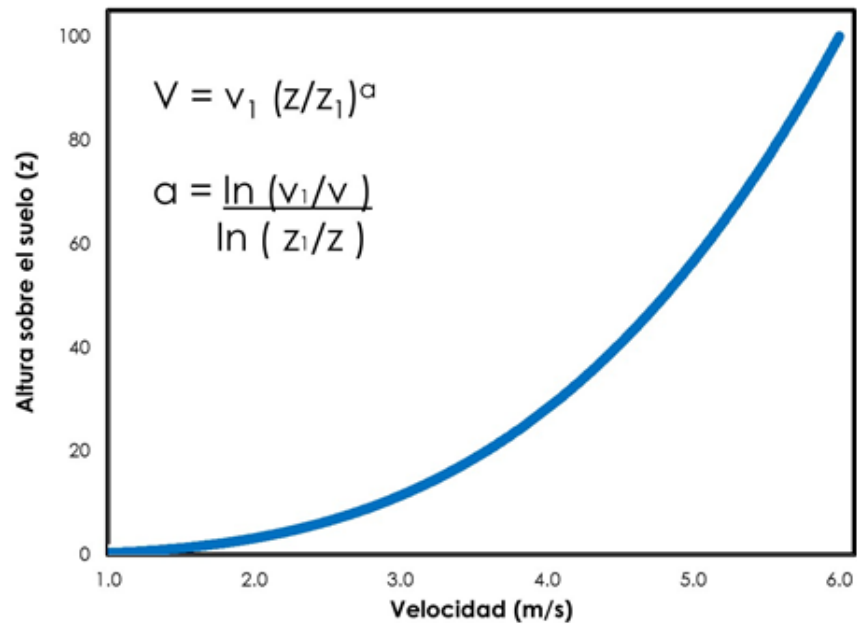
Período de retorno (años)	Log Pearson III Velocidad en Km/h	Escala de Beaufort
2	58	7
5	73	8
10	83	9
25	96	10
50	106	10
100	116	11

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

3.8. Estimación del potencial energético y su distribución temporal

El viento varía con la altura debido a la rugosidad del terreno u obstáculos cercanos, hasta una distancia donde la velocidad no se ve afectada. Esta variación depende de la estacionalidad del viento y sigue la ley exponencial llamada Hellman; de manera de extrapolar estos datos a diferentes alturas como se observa la 17.

Figura 17. Ley exponencial Hellman



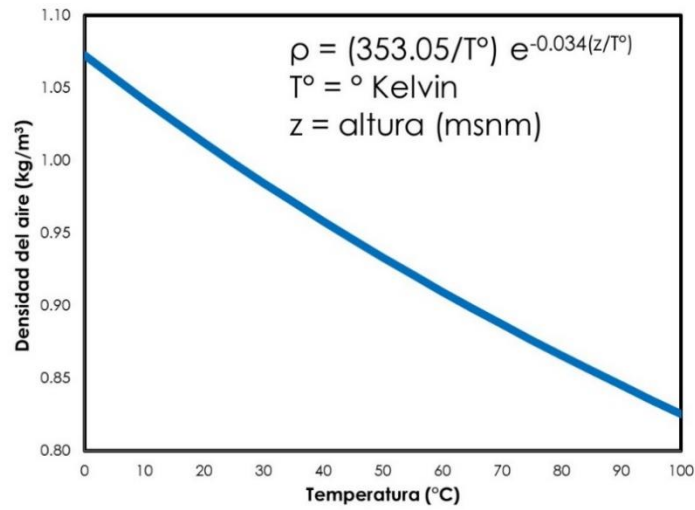
Fuente: Fuentes Montepeque, J. (2016). Presentación *Generación de energía con recursos renovables*. p.4.

Donde:

- V = velocidad estimada a la altura Z
- V_1 = velocidad del viento a la altura Z_1
- Z = altura solicitada
- Z_1 = altura para la V_1
- α = rugosidad

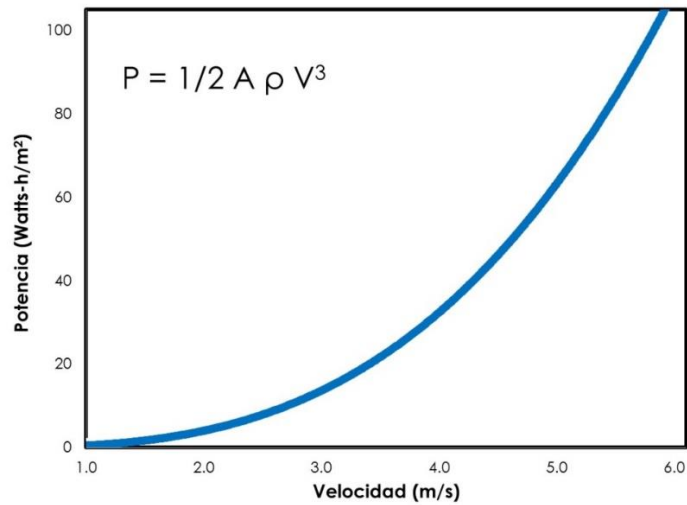
En la 18 se observa la relación de la densidad del aire contra la temperatura del ambiente, que dependen de la altura a la que se encuentre el punto de interés.

Figura 18. **Densidad vs. temperatura**



Fuente: Fuentes Montepeque, J. (2016). Presentación *Generación de energía con recursos renovables*. p.5.

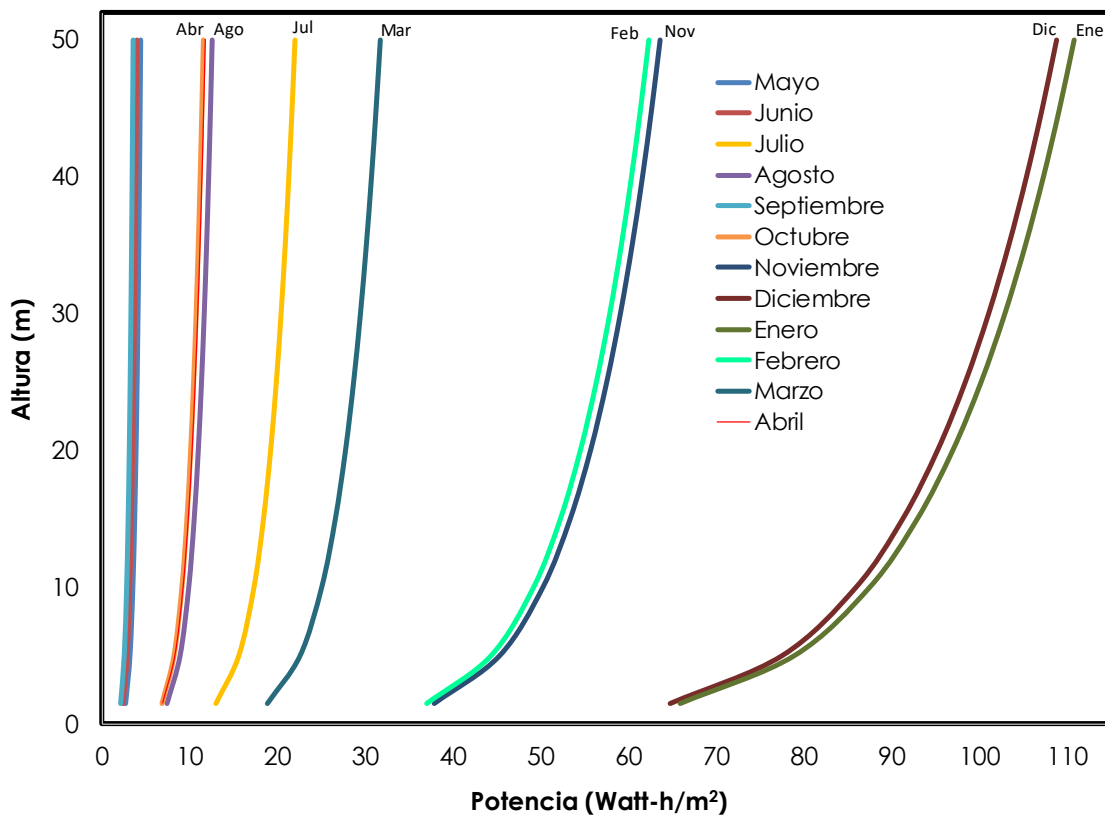
Figura 19. **Velocidad vs. potencia**



Fuente: Fuentes Montepeque, J. (2016). Presentación *Generación de energía con recursos renovables*. p.6.

Del análisis estadístico anterior, se concluyó la proyección del potencial energético del viento a una altura máxima de 50 metros de acuerdo a la 20.

Figura 20. **Potencial energético vs. altura detalle mensual**



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

3.9. Validación de los resultados

Con el objetivo de verificar los valores del coeficiente de rugosidad propuesto o teórico, se realizó la comparación de las mediciones realizadas con

el equipo convencional instalado a 1.5 metros contra el equipo automatizado instalado a 2 metros.

Mediante el perfil vertical del viento a través de la ecuación de Hellman, se validó el modelo teórico a través del coeficiente de rugosidad “ α ”.

Se seleccionaron dos meses, agosto y diciembre del año 2017, para la verificación y validación; se hizo uso de los días que presentaron más consistencia en los valores y datos.

El criterio según la teoría de acuerdo a las condiciones geográficas del lugar, considera un valor 0.09, lo que concuerda con el promedio de los datos seleccionados que más se aproximan.

Tabla VIII. Validación de los resultados a través del coeficiente de rugosidad

Año	Mes	Día	Velocidad del viento (km/h)		Coeficiente de rugosidad
			Convencional	Automatizado	
2017	Agosto	3	9.20	9.92	0.11
		22	3.87	4.17	0.11
	Diciembre	4	16.68	17.47	0.07
		21	16.77	17.26	0.04
		30	15.60	18.97	0.12

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

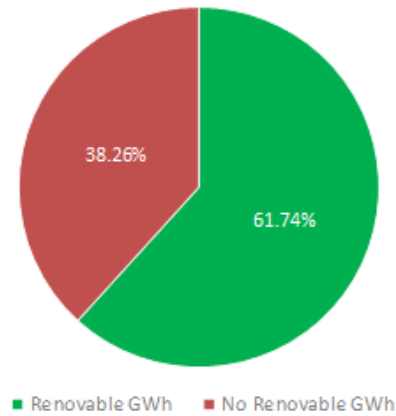
Las series temporales de las variables meteorológicas en análisis son confiables estadísticamente; por lo que el potencial es óptimo para el desarrollo de proyectos eólicos en el área estudiada, de acuerdo con los métodos aplicados.

La gráfica de potencial energético versus altura como instrumento técnico científico de apoyo para toma de decisiones fue validado a través del coeficiente de rugosidad, al confirmar los criterios de valores, según los modelos teóricos.

Guatemala aun cuenta con una alta dependencia de generación con tecnologías convencionales como se observa en los informes del Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Los proyectos de potencial energético a través de recursos renovables, permiten contribuir a la matriz energética nacional a disminuir la dependencia de tecnologías convencionales a base de combustibles fósiles.

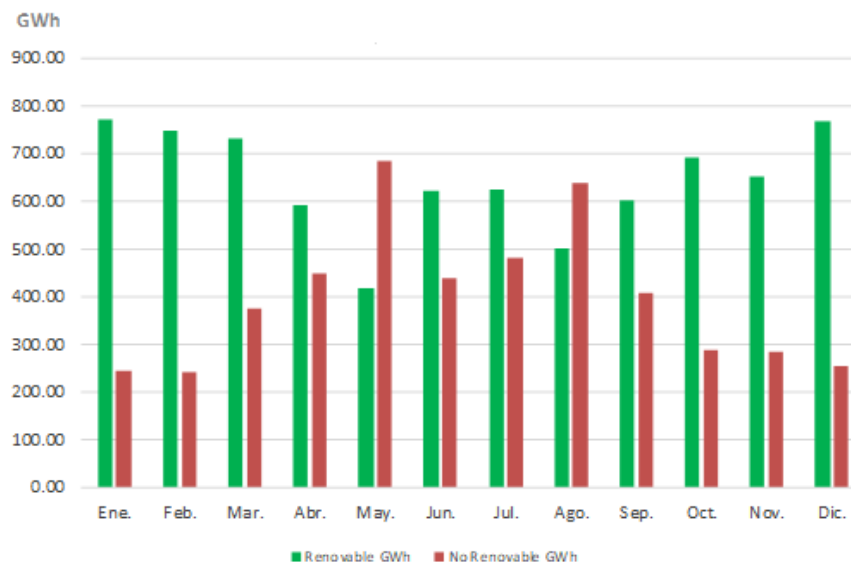
Hay que considerar que la generación a través del potencial eólico depende de la disponibilidad del viento, el cual es un recurso que no puede ser controlado y es una generación de oportunidad, lo que no permite que este tipo de tecnología sea considerado como oferta firme eficiente (OFE) y no pueda ser comprometida en contratos, ya que no se puede garantizar que no se produzca falta de suministro a requerimiento del sistema.

Figura 21. **Composición de la generación acumulada para el año 2018**



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. (2019). Recuperado de <https://www.amm.org.gt>.

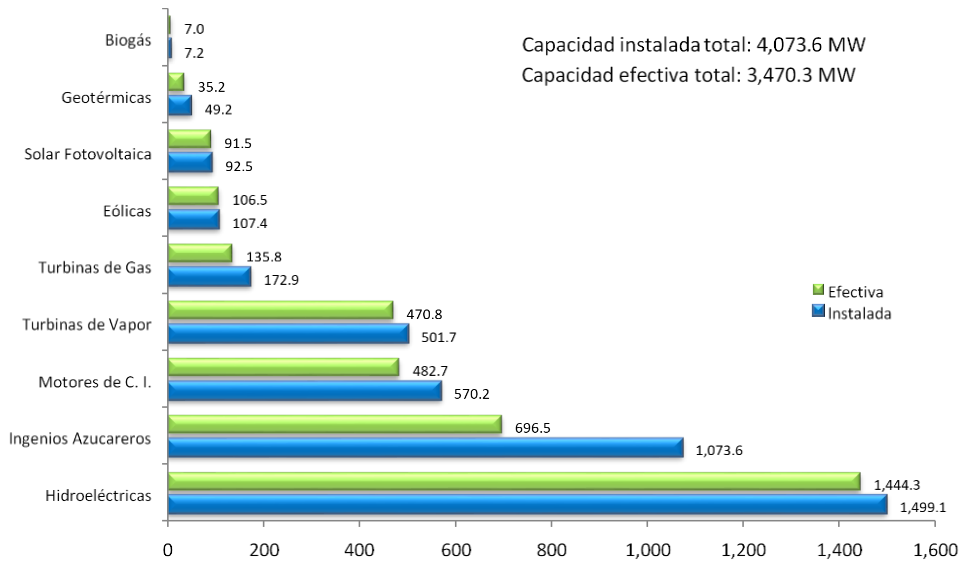
Figura 22. **Composición de la generación 2018**



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. (2019). Recuperado de <https://www.amm.org.gt>.

Los meses donde se tiene mayor potencial eólico corresponden al periodo de noviembre a febrero, lo que complementa la generación hídrica que tiene su mayor potencial en época de lluvia en los meses de mayo a octubre, lo que permite contribuir a la matriz energética nacional con crecimiento de generación renovable.

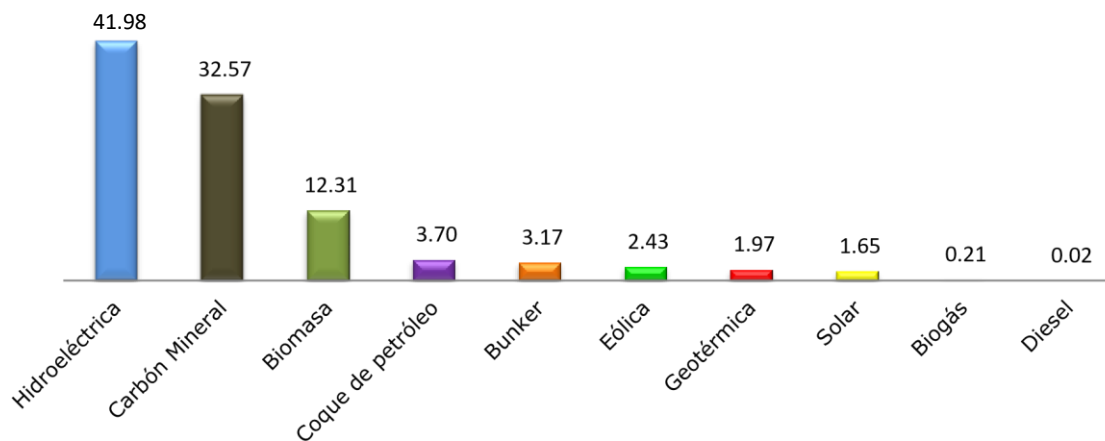
Figura 23. Capacidad instalada y efectiva del parque generador del SNI en MW al mes de septiembre de 2018



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. (2019). Recuperado de <http://www.mem.gob.gt>

Al año 2018, la capacidad instalada del parque generador del sistema nacional interconectado (SIN) de Guatemala, contaba con una contribución del 2.43% para la generación eólica, que corresponde a 107.4 MW lo que comparado con el año 2017 creció un 41.5%, respecto a capacidad instalada de 75.9 MW, el cual representaba el 1.69% del total del parque generador.

Figura 24. **Generación eléctrica por tipo de combustible, en (%) de enero a noviembre de 2018**



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. (2019). Recuperado de <http://www.mem.gob.gt>

El desarrollo de proyectos eólicos ha tenido un crecimiento importante en el parque generador; el país cuenta con áreas geográficas adecuadas para el desarrollo de este tipo de proyectos y al conocer los potenciales de generación, estos contribuyen al incentivo de este tipo de proyectos.

Se tuvo la limitante de que los dos anemómetros tenían una diferencia de altura de 0.5 metros, lo que no permite una validación certera del coeficiente de rugosidad por la posible interferencia entre ellos.

CONCLUSIONES

1. Se estableció la confiabilidad de las series analizadas a través de los métodos estadísticos aplicados a variables climáticas, los cuales presentaron resultados satisfactorios de acuerdo a la 8, en donde la velocidad del viento igual o mayor al 50% del tiempo se estimó en 8 km/h.
2. Se sistematizaron los datos de velocidad del viento de la estación meteorológica Jurún Marinalá del INDE en la región de Palín, Escuintla, a través del modelo teórico del perfil vertical del viento y el coeficiente de rugosidad, mismo que presentó un comportamiento de acuerdo con la variación estacional de la serie.
3. Se estimó el potencial energético del viento y su comportamiento temporal en la región estudiada; se determinó que los meses con mayor potencial son enero, febrero, noviembre y diciembre, con valores que oscilan entre 5 y 25 KW-h/m².
4. Se validaron las series temporales de la velocidad del viento para el desarrollo de la curva de potencial energético en función de la altura como instrumentos de apoyo en estudios de proyectos de energía eólica en el área de Palín, Escuintla.

RECOMENDACIONES

1. Aumentar las observaciones de las mediciones de velocidad a otras alturas mayores y en periodos de 10 minutos, para validar los datos proyectados y definir la confiabilidad de la curva de potencia a través de la estimación del coeficiente de rugosidad.
2. Instar a las instituciones del subsector eléctrico, que incluyan proyectos de energías renovables para la disminución de los contaminantes en el medio ambiente.
3. Informar y comunicar los resultados de la presente investigación a los diversos actores y sectores de la ciudad de Guatemala, para que tengan referencia y apoyo en la toma de decisiones para inversiones en energías renovables.
4. Seguir el monitoreo durante un año simultáneamente la velocidad a diferentes alturas, para seguir la confirmación de las mediciones.
5. Profundizar el análisis de la velocidad del tiempo, al tomar como base la validación de la variable independiente que muestra una tendencia cíclica de aproximadamente 40 años, que puede responder a patrones de movimiento de la tierra que influyen en el comportamiento del viento.

BIBLIOGRAFÍA

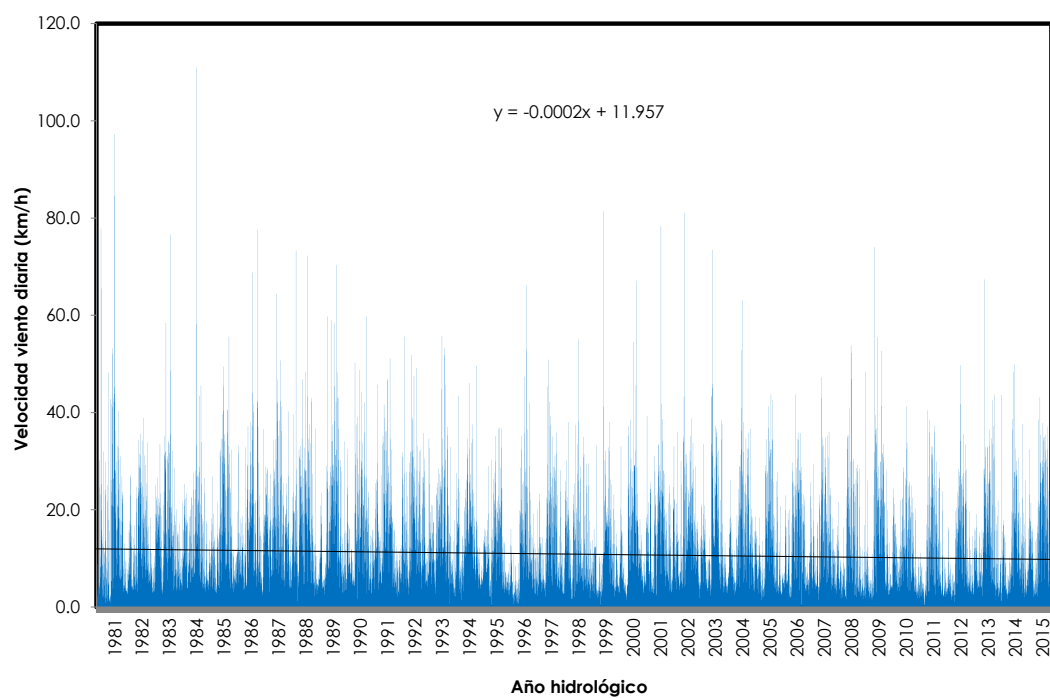
1. #SUMBilbao19. (2018). *Recuperado de <https://sumbilbao19.com/la-movilidad-urbana-sostenible-clave-para-el-logro-de-los-ods>*
2. AIE. (2018). *Recuperado de <https://www.iea.org/tcep/transport/evs/>*
3. Banco Mundial. (2014). *Recuperado de <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/06/11/what-does-it-mean-to-put-a-price-on-carbon>*
4. Banco Mundial. (2018). *Recuperado de <https://datos.bancomundial.org/indicador/eg.elc.accs.zs>*
5. Bonn. (2017). *United Nations Climate Change. Recuperado de <https://unfccc.int/news/new-transport-decarbonisation-alliance-for-faster-climate-action>*
6. Carbon Pricing Leadership Coalition. (2017). *Recuperado de <https://www.carbonpricingleadership.org/news/2017/12/14/leaders-commit-to-regional-cooperation-on-carbon-pricing-in-the-americas>*
7. Government of Canada. (2018). *Recuperado de <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/canada-international-action/coal-phase-out.html>*

8. Lieberman, A. (2018). DEVEX. *Recuperado de <https://www.devex.com/news/china-developing-countries-lead-in-renewable-and-energía-solar-inversión-92474>*
9. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala. (2016). *Recuperado de http://www.marn.gob.gt/s/viena-montreal/paginas/Enmiendas_del_Protocolo_de_Montreal*
10. Ministerio de Energia y Minas. (2019). *Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/11/Energ%C3%ADa-E%C3%B3lica-en-Guatemala.pdf>*
11. Moragues, J., & Rapallini, A. (2019). *Recuperado de <http://www.cedecap.org.pe/1590/>*
12. REN21. (2019). *Recuperado de http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/*
13. Reve. (2019). *Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico. Recuperado de <https://www.evwind.com/2019/02/11/guatemala-avanza-en-generacion-con-energias-renovables/>*
14. SEforAll. (2017). *Recuperado de <https://www.seforall.org/content/cooling-for-all-initiative-announced>*
15. Vanham, P. (2016). *World Economic Forum. Recuperado de <https://www.weforum.org/press/2016/12/a-convenient-truth-fighting-climate-change-turned-into-a-profitable-business/>*

16. World Economic Forum. (2016). *Recuperado de* http://www3.weforum.org/docs/WEF_Renewable_Infrastructure_Investment_Handbook.pdf

APÉNDICES

Apéndice 1. Distribución temporal del viento con detalle diario



Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 2. Potencial energético en función de la altura, mayo

Velocidad media: 6.11 km/h 2.72
 T° media: 22.41 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	6.11	1.70	22.41	295.41	1.077	2.64
5	6.49	1.80	22.43	295.43	1.077	3.16
10	6.72	1.87	22.47	295.47	1.076	3.50
15	6.86	1.90	22.50	295.50	1.075	3.72
20	6.96	1.93	22.53	295.53	1.075	3.88
25	7.03	1.95	22.56	295.56	1.074	4.01
30	7.10	1.97	22.60	295.60	1.073	4.12
35	7.15	1.99	22.63	295.63	1.072	4.21
40	7.20	2.00	22.66	295.66	1.072	4.29
45	7.24	2.01	22.69	295.69	1.071	4.36
50	7.28	2.02	22.73	295.73	1.070	4.43

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 3. Potencial energético en función de la altura, junio

Velocidad media: 5.88 km/h
 T° media: 22.41 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	5.88	1.63	22.41	295.41	1.077	2.35
5	6.25	1.74	22.43	295.43	1.077	2.81
10	6.47	1.80	22.47	295.47	1.076	3.12
15	6.60	1.83	22.50	295.50	1.075	3.31
20	6.70	1.86	22.53	295.53	1.075	3.46
25	6.77	1.88	22.56	295.56	1.074	3.57
30	6.83	1.90	22.60	295.60	1.073	3.67
35	6.89	1.91	22.63	295.63	1.072	3.75
40	6.93	1.93	22.66	295.66	1.072	3.83
45	6.97	1.94	22.69	295.69	1.071	3.89
50	7.01	1.95	22.73	295.73	1.070	3.95

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 4. Potencial energético en función de la altura, julio

Velocidad media: 10.42 km/h
 T° media: 23.01 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	10.42	2.89	23.01	296.01	1.075	13.04
5	11.07	3.07	23.03	296.03	1.075	15.61
10	11.46	3.18	23.07	296.07	1.074	17.31
15	11.69	3.25	23.10	296.10	1.073	18.39
20	11.86	3.29	23.13	296.13	1.073	19.18
25	11.99	3.33	23.16	296.16	1.072	19.82
30	12.10	3.36	23.20	296.20	1.071	20.36
35	12.20	3.39	23.23	296.23	1.071	20.82
40	12.28	3.41	23.26	296.26	1.070	21.23
45	12.35	3.43	23.29	296.29	1.069	21.59
50	12.42	3.45	23.33	296.33	1.068	21.92

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 5. Potencial energético en función de la altura, agosto

Velocidad media: 8.64 km/h
 T° media: 22.77 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	8.64	2.40	22.77	295.77	1.076	7.43
5	9.17	2.55	22.79	295.79	1.076	8.90
10	9.50	2.64	22.83	295.83	1.075	9.87
15	9.69	2.69	22.86	295.86	1.074	10.48
20	9.83	2.73	22.89	295.89	1.073	10.93
25	9.94	2.76	22.92	295.92	1.073	11.30
30	10.03	2.79	22.96	295.96	1.072	11.60
35	10.11	2.81	22.99	295.99	1.071	11.87
40	10.18	2.83	23.02	296.02	1.071	12.10
45	10.24	2.84	23.05	296.05	1.070	12.31
50	10.29	2.86	23.09	296.09	1.069	12.50

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 6. Potencial energético en función de la altura, septiembre

Velocidad media: 5.62 km/h
 T° media: 21.91 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	5.62	1.56	21.91	294.91	1.079	2.06
5	5.97	1.66	21.93	294.93	1.078	2.46
10	6.18	1.72	21.97	294.97	1.078	2.73
15	6.31	1.75	22.00	295.00	1.077	2.90
20	6.40	1.78	22.03	295.03	1.076	3.03
25	6.47	1.80	22.06	295.06	1.076	3.13
30	6.53	1.81	22.10	295.10	1.075	3.21
35	6.58	1.83	22.13	295.13	1.074	3.28
40	6.63	1.84	22.16	295.16	1.073	3.35
45	6.67	1.85	22.19	295.19	1.073	3.41
50	6.70	1.86	22.23	295.23	1.072	3.46

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 7. Potencial energético en función de la altura, octubre

Velocidad media: 8.40 km/h
 T° media: 21.90 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	8.40	2.33	21.90	294.90	1.079	6.84
5	8.92	2.48	21.92	294.92	1.078	8.20
10	9.23	2.56	21.96	294.96	1.078	9.09
15	9.42	2.62	21.99	294.99	1.077	9.65
20	9.56	2.65	22.02	295.02	1.076	10.07
25	9.66	2.68	22.05	295.05	1.076	10.40
30	9.75	2.71	22.09	295.09	1.075	10.69
35	9.83	2.73	22.12	295.12	1.074	10.93
40	9.89	2.75	22.15	295.15	1.073	11.14
45	9.95	2.76	22.18	295.18	1.073	11.33
50	10.01	2.78	22.22	295.22	1.072	11.51

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 8. Potencial energético en función de la altura, noviembre

Velocidad media: 14.85 km/h
 T° media: 21.81 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	14.85	4.12	21.81	294.81	1.079	37.87
5	15.77	4.38	21.83	294.83	1.079	45.35
10	16.33	4.54	21.87	294.87	1.078	50.28
15	16.66	4.63	21.90	294.90	1.077	53.40
20	16.90	4.70	21.93	294.93	1.077	55.72
25	17.09	4.75	21.96	294.96	1.076	57.57
30	17.25	4.79	22.00	295.00	1.075	59.13
35	17.38	4.83	22.03	295.03	1.074	60.47
40	17.50	4.86	22.06	295.06	1.074	61.65
45	17.60	4.89	22.09	295.09	1.073	62.71
50	17.69	4.92	22.13	295.13	1.072	63.67

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 9. Potencial energético en función de la altura, diciembre

Velocidad media: 17.75 km/h
 T° media: 21.32 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	17.75	4.93	21.32	294.32	1.081	64.75
5	18.85	5.24	21.34	294.34	1.080	77.53
10	19.51	5.42	21.38	294.38	1.080	85.97
15	19.91	5.53	21.41	294.41	1.079	91.30
20	20.20	5.61	21.44	294.44	1.078	95.26
25	20.43	5.67	21.47	294.47	1.077	98.44
30	20.62	5.73	21.51	294.51	1.077	101.10
35	20.77	5.77	21.54	294.54	1.076	103.39
40	20.91	5.81	21.57	294.57	1.075	105.42
45	21.04	5.84	21.60	294.60	1.075	107.22
50	21.15	5.87	21.64	294.64	1.074	108.86

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 10. Potencial energético en función de la altura, enero

Velocidad media: 17.86 km/h
 T° media: 21.24 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	17.86	4.96	21.24	294.24	1.081	65.96
5	18.96	5.27	21.26	294.26	1.081	78.98
10	19.63	5.45	21.30	294.30	1.080	87.57
15	20.03	5.57	21.33	294.33	1.079	93.00
20	20.32	5.65	21.36	294.36	1.078	97.04
25	20.55	5.71	21.39	294.39	1.078	100.27
30	20.74	5.76	21.43	294.43	1.077	102.98
35	20.90	5.81	21.46	294.46	1.076	105.32
40	21.04	5.84	21.49	294.49	1.076	107.38
45	21.17	5.88	21.52	294.52	1.075	109.22
50	21.28	5.91	21.56	294.56	1.074	110.88

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 11. Potencial energético en función de la altura, febrero

Velocidad media: 14.74 km/h
 T° media: 21.56 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	14.74	4.09	21.56	294.56	1.080	37.05
5	15.65	4.35	21.58	294.58	1.080	44.36
10	16.20	4.50	21.62	294.62	1.079	49.19
15	16.54	4.59	21.65	294.65	1.078	52.23
20	16.77	4.66	21.68	294.68	1.077	54.50
25	16.96	4.71	21.71	294.71	1.077	56.32
30	17.12	4.76	21.75	294.75	1.076	57.84
35	17.25	4.79	21.78	294.78	1.075	59.15
40	17.37	4.82	21.81	294.81	1.075	60.31
45	17.47	4.85	21.84	294.84	1.074	61.34
50	17.56	4.88	21.88	294.88	1.073	62.28

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 12. Potencial Energético en función de la altura, marzo

Velocidad media: 11.77 km/h
 T° media: 22.17 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	11.77	3.27	22.17	295.17	1.078	18.86
5	12.50	3.47	22.19	295.19	1.078	22.58
10	12.95	3.60	22.23	295.23	1.077	25.04
15	13.21	3.67	22.26	295.26	1.076	26.59
20	13.40	3.72	22.29	295.29	1.075	27.74
25	13.55	3.76	22.32	295.32	1.075	28.67
30	13.68	3.80	22.36	295.36	1.074	29.44
35	13.78	3.83	22.39	295.39	1.073	30.11
40	13.87	3.85	22.42	295.42	1.073	30.70
45	13.96	3.88	22.45	295.45	1.072	31.23
50	14.03	3.90	22.49	295.49	1.071	31.70

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

Apéndice 13. Potencial energético en función de la altura, abril

Velocidad media: 8.45 km/h
 T° media: 22.88 °C

Altura m	Velocidad		Temperatura		Densidad kg/m ³	Potencia Watt-h/m ²
	km/h	m/s	°C	°K		
1.5	8.45	2.35	22.88	295.88	1.076	6.96
5	8.98	2.49	22.90	295.90	1.075	8.33
10	9.29	2.58	22.94	295.94	1.075	9.24
15	9.48	2.63	22.97	295.97	1.074	9.81
20	9.62	2.67	23.00	296.00	1.073	10.24
25	9.73	2.70	23.03	296.03	1.072	10.58
30	9.82	2.73	23.07	296.07	1.072	10.87
35	9.89	2.75	23.10	296.10	1.071	11.11
40	9.96	2.77	23.13	296.13	1.070	11.33
45	10.02	2.78	23.16	296.16	1.070	11.52
50	10.07	2.80	23.20	296.20	1.069	11.70

Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación.

