

# Influencia de la variabilidad climática en temperatura, precipitación y velocidad del viento en Villonaco, Ecuador

María Encalada-Flores<sup>1</sup>; Gissela Iza-Arias<sup>2</sup>

## Resumen

La energía eólica se destaca por su eficiencia y renovabilidad, siendo un recurso inagotable para la generación de energía. En el año 2017, el sector eléctrico ecuatoriano generó un 73.64% de su energía a partir de fuentes renovables, de las cuales un 0.26% provino de la energía eólica; el presente artículo tiene como objetivo determinar la viabilidad de la zona para la generación eólica mediante el estudio de la variabilidad climática en base al comportamiento de las variables temperatura, precipitación y velocidad del viento en un lapso de 39 años. La variabilidad climática, especialmente notable en la zona de la Central Eólica de Villonaco, es analizada utilizando estaciones virtuales durante el período mencionado, comprendido entre 1981 y 2020. Este estudio abarca aspectos anuales y estacionales del clima, incluyendo temperatura, precipitación, y velocidad del viento. Se emplean métodos estadísticos como la desviación estándar para examinar tendencias y comportamientos, permitiendo además el cálculo de anomalías para cada variable y el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica. Los resultados de este análisis indican que la región en cuestión es altamente propicia para la generación de energía a partir del viento a largo plazo.

**Palabras claves:** Energía eólica, variabilidad climática, viento, clima.

## Influence of climate variability on temperature, precipitation and wind speed in Villonaco, Ecuador

### Abstract

Wind energy stands out for its efficiency and renewability, being an inexhaustible resource for power generation. In 2017, the Ecuadorian electricity sector generated 73.64% of its energy from renewable sources, of which 0.26% came from wind energy. This article aims to determine the viability of the area for wind generation by studying climatic variability based on the behavior of temperature, precipitation, and wind speed variables over a period of 39 years. Climatic variability, especially notable in the Villonaco Wind Farm area, is analyzed using virtual stations during the mentioned period, spanning from 1981 to 2020. This study covers annual and seasonal aspects of climate, including temperature, precipitation, and wind speed. Statistical methods such as standard deviation are employed to examine trends and behaviors, also allowing for the calculation of anomalies for each variable and the Standardized Precipitation Drought Index. The results of this analysis indicate that the region in question is highly conducive to long-term wind energy generation.

**Keywords:** Wind energy, climatic variability, wind, climate.

**Recibido:** 8 de febrero de 2024

**Aceptado:** 22 de abril de 2024

<sup>1</sup> Universidad Central del Ecuador gissel\_259@hotmail.com <https://orcid.org/0009-0008-4374-9325>

<sup>2</sup> Universidad Central del Ecuador majitoencaladaf@gmail.com <https://orcid.org/0009-0004-8340-2845>

## I. INTRODUCCIÓN

El comportamiento anormal del clima o denominado variabilidad climática, es un hecho que ha estado siempre presente a nivel global, se define como las variaciones del estado medio y otras características estadísticas del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos [1]. Ecuador es afectado continuamente por diferentes sistemas sinópticos que ocurren durante el año, los cuales regulan al clima y a la variabilidad climática del país, la interacción océano atmósfera da origen a un fenómeno de variabilidad climática, conocido como Fenómeno de El Niño y de La Niña, que ejercen una influencia en el comportamiento climático del país [2].

La provincia de Loja también está sometida a cambios temporales que requieren ser estudiados continuamente debido a su aprovechamiento del recurso eólico, con el fin de que esta energía limpia siga siendo viable por varios años más, estos estudios no deben enfocarse solamente en la Central Eólica denominada “Villonaco”, sino también en otros puntos que resultan igual de atractivos en cuanto al recurso viento. De manera que el objetivo del presente artículo es analizar la variabilidad climática en la provincia de Loja en base a las variables temperatura, precipitación y velocidad del viento para determinar la factibilidad a largo plazo del uso de energía eólica.

El viento se produce por acción del Sol, debido al calentamiento de la tierra se produce una elevación en la temperatura del aire más cercano, esto hace que disminuya su densidad lo que hace que este aire ascienda y el aire más frío que se encuentra en la parte superior descienda, esto no es diferente para la energía eólica; ya que el viento tiene su origen en las diferencias de presión creadas por el irregular calentamiento producido por radiación solar [3].

A la vez, la precipitación afecta la presión atmosférica, cuando llueve, el aire se enfría y se vuelve más denso, lo que puede alterar los patrones de viento. Por lo tanto, una mayor precipitación puede influir en la distribución de la presión y, a su vez, en los vientos disponibles para la generación de energía eólica [4]. Mientras que, el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) es

un índice mensual que se basa en el cálculo de las anomalías pluviométricas mensuales acumuladas estandarizadas y en él los valores negativos corresponden a meses secos, en tanto que los positivos reflejan meses no secos [5].

Además, el perfil de velocidad del viento se pronuncia más con el aumento de la rugosidad del suelo y su velocidad disminuye y el gradiente de velocidad con respecto a la altura depende principalmente de la rugosidad del terreno. Los datos de viento normalmente se suelen medir a la altura de la estación de la que se disponen datos en los estudios iniciales [6].

En cuanto a la oscilación térmica, se define como la diferencia que existe entre la temperatura mínima y la temperatura máxima que se registra en un lugar durante un tiempo dado, esta revela cuánto varía la temperatura en un sitio durante un periodo e indica cuántos grados de diferencia hay entre el instante más frío y el más cálido. Se considera que una amplitud térmica es insignificante cuando es menor de 5 °C, baja entre 5 y 10 °C, media entre 10 a 18 °C, y alta cuando es superior a los 18 °C [7].

En la actualidad, nuestro país no cuenta con una base completa y constante de datos meteorológicos, por lo cual, es indispensable homogeneizar la base de datos de todas variables climatológicas que permitan comprender la influencia de la variabilidad climática, sobre todo en el estudio del viento y posterior validar los datos mediante correlación y regresión. Por lo que, para el presente análisis, se determinan cinco estaciones meteorológicas virtuales establecidas en puntos estratégicos según la orografía de la zona, los datos meteorológicos de todas las variables se obtienen mediante el conjunto de datos TERRAClimate y, de las estaciones meteorológicas del INAMHI para las variables temperatura y precipitación, este contraste de información permite posteriormente la validación entre datos de estaciones meteorológicas y de satélites.

Posteriormente, se realiza el cálculo de anomalías anuales y mensuales para cada variable en cada una de las cinco estaciones mediante Excel y tablas dinámicas, usando la metodología de puntuaciones Z se calculan las anomalías de cada variable climatológica. Luego, se grafican las

series de tiempo de cada variable y la distribución de sus anomalías, lo que en conjunto con la determinación del índice IESP y la oscilación térmica permite predecir el comportamiento y la tendencia de la temperatura, precipitación y viento en el transcurso de los años.

## II. METODOLOGÍA

### 2.1. Descripción del área de estudio

El Parque Eólico Villonaco se encuentra ubicado en la provincia de Loja, cantón Loja. Se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas de 4°00'03.57" S y 79°16'33.16" O [8]. Consta de 11 aerogeneradores fabricados por la empresa Gold Wind de China, son de tipo GW70/1500, cada aerogenerador tiene una potencia de 1.5 MW, por lo que el parque genera una potencia nominal de 16.5 MW [9].

El factor orográfico, conformado por un relieve que desciende de Este a Oeste, con un gradiente general del 2,4 %, ha contribuido a que en Loja se forme una microzona de convergencia, es decir, de transición entre la zona montañosa de los Andes Meridionales del Ecuador y el desierto de Sechura del Perú [10].

En la provincia de Loja existen 20 estaciones meteorológicas ubicadas por toda la provincia, sin embargo, cerca del Parque Eólico Villonaco y en el cantón Loja solamente se encuentra la estación La Argelia, que ofrece información de acceso libre pues

pertenece al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), otras estaciones tienen acceso restringido por pertenecer a instituciones privadas.

Para el presente estudio se crean cinco estaciones meteorológicas virtuales ubicadas en zonas estratégicas dependiendo de la orografía de la zona. La primera estación se ubica en el Parque Eólico Villonaco puesto que se va a analizar la variabilidad climática con especial atención en esta zona; la segunda estación se ubica en Guangora debido a que en esta zona se visualiza que la montaña del Villonaco pierde pendiente, es decir, se considera como el pie de la montaña; la tercera estación se ubica en el cantón Catamayo, mismo que es un valle con diferencia de altura, radiación y presión que se encuentra cercano al parque eólico e influye en el comportamiento del comportamiento del viento del mismo; la cuarta estación se ubica en Malacatos, zona en donde inicia la formación montañosa del Villonaco, además de que se supone la influencia de la cuenca del río Malacatos en la zona de estudio; la última estación se ubica en la zona de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), que se localiza en la parte urbana de la ciudad de Loja y se considera su cercanía al Parque Eólico. La ubicación de las estaciones virtuales se observa en la Figura 1 y las coordenadas UTM correspondientes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas UTM de las estaciones meteorológicas virtuales

Estación meteorológica virtual	Coordenadas X	Coordenadas Y
Villonaco	693292.1	9557864.6
Guangora	692104.2	9562987
Catamayo	683321	9558647
Malacatos	692309.9	9551898.3
UTPL	700844.2	9558393.4



Figura 1. Mapa de ubicación con estaciones virtuales

### 2.2. Obtención de datos

Los datos de análisis se obtienen de distintas fuentes, en primer lugar, del dataset TERRA mediante la colección de Google Earth Engine de TerraClimate, mismo que es un conjunto de datos de clima mensual para superficies terrestres globales de WorldClim y ofrece datos a partir de 1958 a 2020, es decir, de 39 años. En segundo lugar, de la estación del INAMHI, La

Argelia, ubicada en la ciudad de Loja para datos de precipitación y temperatura mensuales, lo que permite la correlación con los datos satelitales.

### 2.3. Velocidad del viento

Para calcular la velocidad del viento [11] a 60 metros, que es la altura a la que las turbinas de los aerogeneradores se encuentran respecto al suelo, se utiliza la siguiente Ecuación 1:

$$v = v_{ref} \ln(z/z_0) / \ln(z_{ref}/z_0) \quad (1)$$

en donde:

$v_{ref}$  = velocidad de referencia, es decir, una velocidad de viento ya conocida a una altura  $z_{ref}$ .

$z$  = altura sobre el nivel del suelo para la velocidad deseada,  $v$ .

$z_0$  = longitud de rugosidad en la dirección de viento actual.

La longitud de rugosidad es mayor cuanto mayor es el número de obstáculos (edificios, bosques, terreno accidentado, etc.), siendo prácticamente nula para zonas con agua. Por tanto,

se debe analizar el tipo de paisaje de la zona que rodea el emplazamiento de estudio porque va a influir en gran medida en la velocidad del viento de la zona y en consecuencia a la producción de energía del parque [6]. Puesto que la zona en donde está ubicada el Parque Eólico Villonaco es una montaña alejada de la urbanización, se considera que es un terreno abierto con colinas suavemente redondeadas y, por tanto, se asigna una clase de rugosidad 1 con longitud de rugosidad de 0.03 m, conforme se especifica [12] en la Tabla 2.

Tabla 2. Tabla de clases y longitudes de rugosidad según el terreno (WASP)

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad $z_0$ (m)	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas.
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentados y muy desigual.
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos.
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

Fuente: Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (1990). El Atlas Eólico Europeo. Risø National Laboratory. WASP.

Para el procesamiento de datos, se detalla en la Figura 2 mediante un esquema, la metodología utilizada, los softwares y herramientas que permiten el procesamiento de la información meteorológica de cada variable.

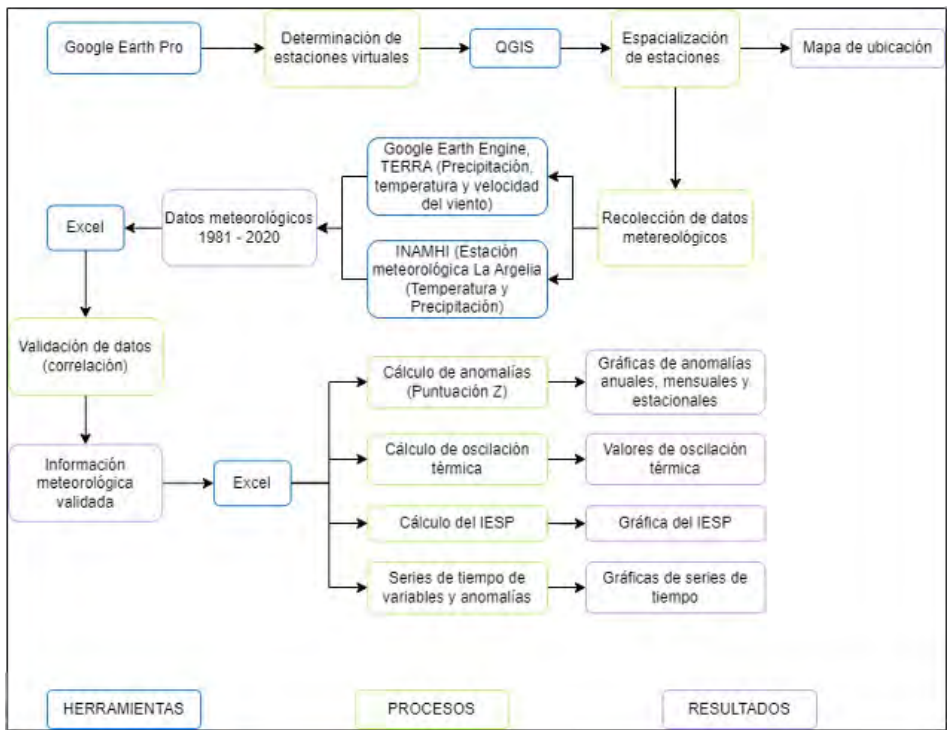


Figura 2. Esquema de metodología utilizada

**2.4. Validación de datos**

Para evaluar el desempeño de los modelos en comparación con uno referencial se disponen de

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\text{Covarianza}}{\text{desviaciones típicas de } x \text{ y } y} \quad (2)$$

El coeficiente de correlación toma siempre valores entre -1 y 1.

- Si  $-1 < r < 0$  existe correlación lineal negativa o inversa y será más fuerte cuanto más se aproxime  $r$  a -1.
- Si  $0 < r < 1$  existe correlación lineal positiva o directa y será más fuerte cuanto más se aproxime  $r$  a 1.
- Si  $r = 1$  o  $r = -1$ , la correlación es una dependencia lineal directa (+1) o inversa (-1).
- Si  $r = 0$  independencia, no existe correlación lineal, aunque estas podrían estar relacionadas por una correlación curvilínea.

A partir de este análisis teórico se puede encontrar una correlación entre los datos obtenidos mediante la torre meteorológica del INAMHI ubicada en La Argelia y los datos obtenidos por el TERRA para la estación virtual UTPL, debido a la cercanía de las dos estaciones. El cálculo de la correlación se realiza para los parámetros de temperatura media y precipitación.

**2.5. Cálculo de anomalías**

Para cada estación meteorológica y cada variable se realiza el cálculo de anomalías anuales

$$(\text{valor temperatura media} - \text{media}) / \text{Desviación} \quad (3)$$

$$(\text{valor precipitación media} - \text{media}) / \text{Desviación} \quad (4)$$

$$(\text{valor velocidad viento} - \text{media}) / \text{Desviación} \quad (5)$$

**2.3. Oscilación térmica**

En el caso de estudio, se analiza la oscilación térmica como la diferencia entre la temperatura media mensual del mes más cálido y la temperatura media mensual del mes más frío de cada año, desde el mes de enero de 1981 al mes de diciembre de 2020.

$$IESPi = (APAi - APAméd) / \sigma_{APA} \quad (6)$$

Donde:

IESPi = Índice Estandarizado de Sequía

diferentes pruebas estadísticas [13]. El método que se utiliza con más frecuencia para completar y ampliar la información estadística sobre los

y mensuales. Los datos obtenidos inicialmente son mensuales, por lo que, mediante tablas dinámicas en Excel, se realiza el cálculo del promedio anual de cada variable.

El cálculo de anomalías de cada parámetro se realiza mediante la metodología de puntuaciones Z. La puntuación Z, o puntuación estándar, es un método para describir un punto de datos en su relación con la desviación media y estándar de un grupo de puntos. Tomar una puntuación Z es simplemente asignar los datos en una distribución cuya media se defina como 0 y cuya desviación estándar se defina como 1. La intuición que subyace en el método de puntuación Z de la detección de valores atípicos es que, una vez que hemos centrado y reajustado los datos, cualquier valor que esté demasiado alejado de cero (el umbral suele ser una puntuación Z de 3 o -3) se debe considerar un valor atípico [17].

Así mismo, se realiza el cálculo de desviación estándar y media de los datos anuales y mensuales de precipitación, temperatura media y velocidad del viento. Las anomalías por puntuación Z se calculan con las Ecuaciones 3, 4 y 5:

**2.4. Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica**

El cálculo de las anomalías pluviométricas [18] mensuales acumuladas mediante el IESP responde a la Ecuación 6:

Pluviométrica del mes i.

APAi = Anomalía pluviométrica acumulada del mes i.

APAm<sub>ed</sub>=Valor medio de las anomalías pluviométricas acumuladas del mes correspondiente.

σAPA=Desviación típica de las anomalías pluviométricas acumuladas del mes correspondiente.

Se estandariza las anomalías acumuladas mediante su conversión en puntuaciones Z que viene a ser el IESP, correspondiente a la Ecuación 7:

$$IESP = (APAc_i - APAc) / \sigma APAc \quad (7)$$

APAc<sub>i</sub>= Anomalía pluviométrica acumulada del mes i.

APAc= Valor medio de las anomalías pluviométricas de todos los meses de la serie

σAPAc= Desviación típica de las anomalías

pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie.

El análisis del nivel de sequía se realiza dependiendo del valor del índice, de acuerdo con la Tabla 3.

**Tabla 3.** Nivel de sequía según el valor del IESP

Nivel de sequía	Valor del índice
Normalidad	IESP > -1
Sequía moderada	IESP < -1
Sequía severa	IESP < -1.7
Sequía extrema	IESP < -2

**Fuente:** Pita, M., F. (2006). Recomendaciones para el establecimiento de un sistema de indicadores para la previsión, el seguimiento y la gestión de la sequía. Ministerio de Medio Ambiente. España.

### 2.5. Análisis de las variables meteorológicas

Para el análisis de las variables de cada estación, se grafican las series de tiempo desde 1981 a 2020, lo que permite identificar la posible tendencia, estacionalidad y presencia de ciclos.

aceptable (mayor o igual a 0.5), comprobándose que es viable utilizar la información obtenida con las estaciones virtuales.

## III. RESULTADOS

### 3.1. Validación de datos

Al analizar los datos obtenidos de TerraClimate con los datos de la torre meteorológica del INAMHI se obtiene una correlación de r=0.7 para temperatura media y de r=0.5 para precipitación. Existe una correlación lineal positiva o directa

### 3.2. Temperatura

De acuerdo con las series de datos analizadas, la temperatura promedio del área de estudio es de 16.98 °C, la temperatura máxima promedio es de 23.02 °C y la temperatura mínima promedio es de 12.44 °C. La Tabla 4 presenta los promedios de temperatura mensual mínima, máxima y media en cada punto durante el período de 1981 al 2020.

**Tabla 4.** Datos de temperatura media mensual en el período 1981-2020

Punto	Mínima (°C)	Media (°C)	Máxima (°C)
Catamayo	16.71	18.35	28.65
Villonaco	11.43	17.82	21.73
UTPL	11.26	14.97	21.20
Guangora	10.78	16.09	20.80
Malacatos	12.02	17.66	22.70

La Figura 3 presenta el promedio de las temperaturas mensuales para los cinco puntos. En general, los meses más calientes del área de estudio son agosto, septiembre y octubre, mientras que los

meses más fríos son enero, febrero y marzo. En los cinco puntos se observa una tendencia creciente de la temperatura media.

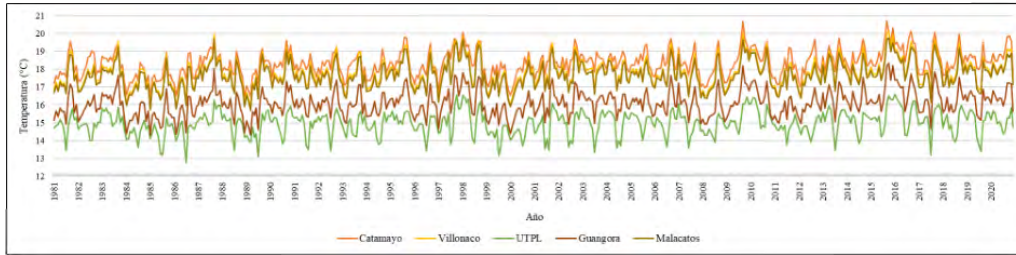


Figura 3. Tendencia de la temperatura media mensual durante el período 1981-2020

La Tabla 5 presenta las anomalías de temperatura mensual durante los 39 años de análisis. El punto en Catamayo presenta una anomalía positiva en los meses de septiembre de los años 2009 y 2015; así como el punto de Guangora, que presenta una anomalía positiva en octubre de 2015, lo que indica que la temperatura promedio mensual estuvo por

encima del promedio histórico registrado en los 39 años. Mientras que el punto de la UTPL presenta una anomalía negativa en julio de 1986, es decir que la temperatura promedio de este mes estuvo por debajo del promedio histórico de los 39 años. Los puntos en Villonaco y Malacatos no presentan temperaturas mensuales atípicas.

Tabla 5. Anomalías de temperatura media mensual en el período 1981-2020

Punto	Mes	Año	Temperatura (°C)	Factor Z
Catamayo	Septiembre	2009	20.69	3.16
	Septiembre	2015	20.72	3.20
UTPL	Julio	1986	12.71	-3.28
Guangora	Octubre	2015	18.33	3.08

La oscilación térmica anual en el área de estudio fluctúa entre 0.85 °C y 3.42°C, con una media de 2.16 °C. La Tabla 6 presenta los valores

mínimos, medios y máximos de oscilación térmica anual para cada punto de interés.

Tabla 6. Datos de oscilación térmica anual en el período 1981-2020

Punto	Mínima (°C)	Media (°C)	Máxima (°C)
Catamayo	1.15	2.13	3.42
Villonaco	1.29	2.33	3.38
UTPL	0.85	2.00	2.84
Guangora	1.26	2.13	3.19
Malacatos	1.27	2.22	3.38

La Figura 4 representa la oscilación térmica de cada punto, donde se observa que aquel que alcanza la menor oscilación térmica es UTPL en el año 1995, mientras que el de mayor oscilación es Catamayo en el año 2009. En Villonaco, la

temperatura presenta un rango de oscilación de 1.29 °C a 3.38 °C, los valores de oscilación térmica más altos (> 3 °C) se presentan en los años 1985, 1989, 1997, 2009 y 2017.

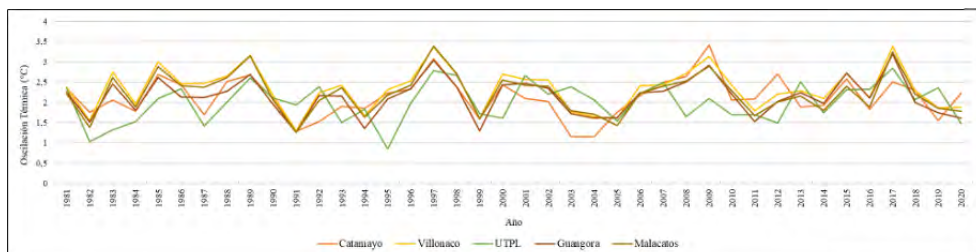


Figura 4. Oscilación térmica anual durante el período 1981-2020



### 3.3. Precipitación

La Tabla 7 indica los valores promedio de

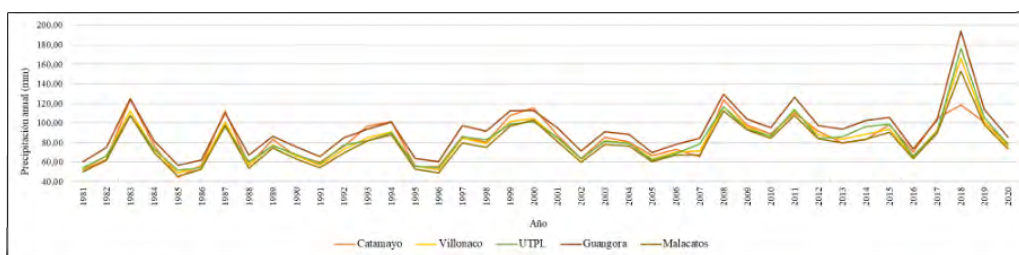
precipitación en las cinco estaciones durante el período de interés.

**Tabla 7.** Datos de precipitación promedio en el período 1981-2020

Punto	Precipitación promedio (mm)
Catamayo	83.41
Villonaco	81.84
UTPL	82.63
Guangora	92.03
Malacatos	78.12

La Figura 5 representa el comportamiento de la precipitación, de forma anual, en las estaciones definidas, donde el punto de Guangora, en el año

2018, presenta el valor mayor de precipitación anual con 193.40 mm



**Figura 5.** Tendencia anual de la precipitación durante el período 1981-2020

Se realiza el cálculo de anomalías para esta variable, de forma anual y mensual para cada estación, reportando que en los puntos de Catamayo y Malacatos no existen anomalías de ningún tipo, por lo que sus datos de precipitación se manejaron dentro del rango promedio. El valor más alto se

encuentra en la estación Guangora con un valor de 726 mm registrados durante el mes de octubre del 2018. El cálculo de anomalías de precipitación también se conoce como Índice Estandarizado de Precipitación o SPI (Tabla 8).

**Tabla 8.** Datos de precipitación promedio en el período 1981-2020

Punto	Mes	Año	Precipitación (mm)	Factor Z
Villonaco	Abril	2000	332	4.0
	Febrero	2018	275	3.1
	Julio	2018	279	3.1
	Octubre	2018	657	9.2
	Noviembre	2018	304	3.5
UTPL	Abril	2000	276	3.5
	Mayo	2015	284	3.7
	Junio	2018	286	3.7
	Julio	2018	433	6.4
	Octubre	2018	610	9.6
Guangora	Noviembre	2018	270	3.4
	Abril	2000	315	3.5
	Julio	2018	392	4.7
	Octubre	2018	726	9.8
	Noviembre	2018	341	3.9

En la Figura 6, el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica indica que, en los puntos de Guangora y UTPL las precipitaciones disminuyeron

en los últimos años, mientras que para los puntos de El Villonaco, Malacatos y Catamayo las precipitaciones aumentaron en los últimos 6 años.

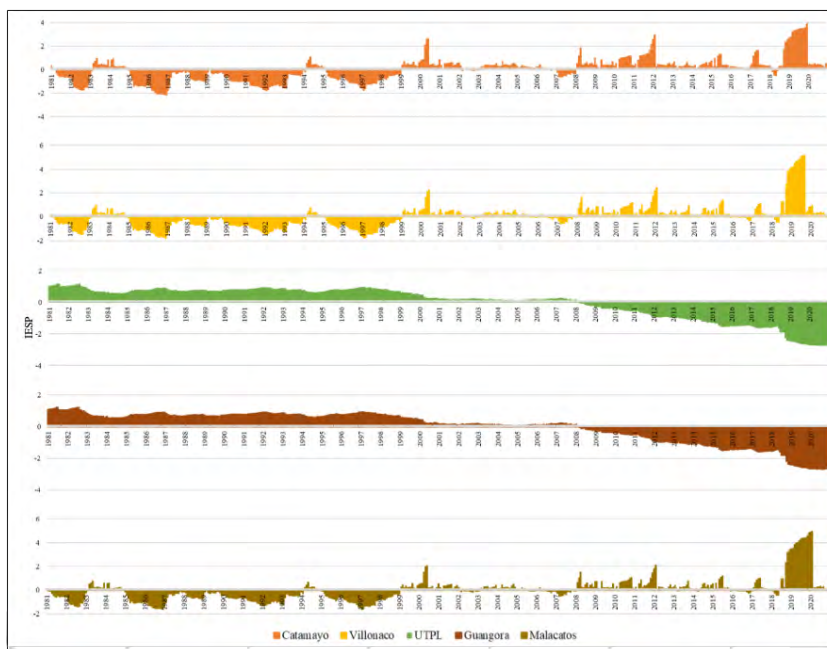


Figura 6. Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica para el período 1981-2020

### 3.4. Viento

De acuerdo con las series de datos obtenidos para velocidades máximas del viento a 10 metros respecto al suelo, los valores oscilan entre 2.46 y

2.50 m/s en los cinco puntos analizados. La Tabla 9 indica los valores promedio de velocidad del viento en las cinco estaciones durante el período de interés.

Tabla 9. Datos de velocidad promedio del viento en el período 1981-2020

Punto	Velocidad promedio (m/s)
Catamayo	2.47
Villonaco	2.50
UTPL	2.47
Guangora	2.46
Malacatos	2.47

A esta altura, se registran valores máximos para el año 2019, mes de agosto, que oscilan en un rango de 3.1 a 3.9 m/s.

de velocidad media del viento a 60 m respecto del suelo. Así se presentan los datos a la altura en la que se encuentran las turbinas eólicas en la Central Villonaco en la Tabla 10.

Con el dato de rugosidad, se obtienen los datos

Tabla 10. Datos de velocidad del viento a 60 m en el período 1981-2020

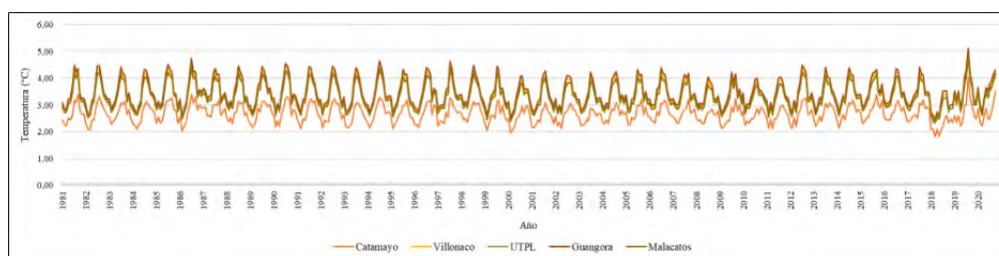
Punto	Mínima (m/s)	Media (m/s)	Máxima (m/s)
Catamayo	1.83	2.67	4.06
Villonaco	2.46	3.41	4.97
UTPL	2.36	3.31	4.71
Guangora	2.49	3.49	5.10
Malacatos	2.36	3.31	4.84

Además, se evidencian valores anómalos en el segundo semestre del 2019 en las cinco estaciones como lo indica la Tabla 11.

**Tabla 11.** Anomalías de velocidad del viento media mensual en el período 1981-2020

Punto	Mes	Año	Velocidad (m/s)	Factor Z
Catamayo	Octubre	2019	3.10	4.24
Villonaco	Agosto	2019	3.80	3.18
UTPL	Agosto	2019	3.60	3.00
Guangora	Agosto	2019	3.90	3.18
Malacatos	Agosto	2019	3.70	3.32

La Figura 7 representa el comportamiento de la velocidad media del viento a 60 m, de forma mensual, en las estaciones definidas.



**Figura 7.** Tendencia de la velocidad media mensual del viento durante el período 1981-2020

#### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

##### 4.1. Temperatura

El Cerro Villonaco donde se encuentra la central eólica, presenta una temperatura media de 17.82 °C para el periodo 1981 – 2020 con una tendencia creciente. El comportamiento en los puntos al sur y oeste del Villonaco es similar, como indica la Figura 3, mientras que al este y sur se registran temperaturas menores, siendo la zona urbana de la UTPL la más fría. Los aerogeneradores Goldwind 70/1500 instalados en el Cerro Villonaco indica, en sus especificaciones técnicas, que la temperatura ambiente de operación es de -30 °C a 40 °C [19], por lo que la ubicación de la central eólica es idónea para un correcto funcionamiento de los aerogeneradores.

En general, la temperatura media del área de estudio ha incrementado en 1.53 °C aproximadamente, dentro del período 1981 – 2020, de acuerdo con el análisis de oscilación térmica. La última década del período de análisis presenta los valores de temperatura media más altos y que, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), coincide en que el período de 2011 a 2020 fue la década más cálida registrada, en la que los seis años más cálidos han sido todos desde 2015 hasta 2020, siendo específicamente

2016, 2019 y 2020 los tres primeros [20].

De acuerdo con los resultados de la serie temporal de la temperatura media mensual, en el año 2016 se alcanzaron las temperaturas más altas de los 39 años en los cinco puntos de análisis, con un rango que oscila entre los 15.66 °C y los 19.26 °C dentro del área de estudio. Según la OMM, el 2016 fue el año más caluroso registrado en la historia, cuando se produjo un intenso episodio de El Niño y presentó un aumento de 1.2 °C sobre la era preindustrial usada como referencia [21].

El evento El Niño Oscilación del Sur (ENOS) se caracteriza por aumentar las temperaturas de las aguas en la parte central y oriental del Pacífico tropical. Este evento, que mostró las primeras señales de aparición en mediados del 2014, tuvo su desarrollo en el 2015, donde, entre los meses de noviembre y diciembre se pudieron observar los mayores valores de anomalías de temperatura. El debilitamiento empezó a partir de marzo de 2016, con señales de regreso de las condiciones normales del océano y de la atmósfera. Durante este período, se generaron impactos significativos a nivel global, siendo que en América Latina las principales manifestaciones estuvieron relacionadas con variaciones extremas de precipitación y temperatura. El Niño 2015-16 fue caracterizado

junto a los de 1982-83 y 1997-98, como uno de los más fuertes desde 1950 [22].

Como se presenta en la Tabla 5, los valores anómalos positivos registrados en septiembre y octubre de 2015, en los puntos ubicados en Catamayo y Guangora respectivamente, corresponden al incremento de la temperatura marcada por el paso del ENOS, puesto que desde julio las anomalías positivas de la temperatura superficial del mar se habían consolidado en todo el Pacífico [22].

La oscilación térmica anual en el Cerro Villonaco presenta valores en un rango de 1.29 °C y 3.38 °C. Según Renee [7], las oscilaciones térmicas menores a 5 °C se toman por insignificantes ya que al localizarse muy cerca de la línea ecuatorial, todos los días del año tienen 12 horas diurnas y los rayos siempre rondan la vertical por lo que estas zonas presentan una menor oscilación térmica respecto a zonas más distantes.

En 1643, Evangelista Torricelli fue el primero en explicar científicamente que los vientos son producidos por diferencias en la temperatura del aire, y por tanto de la densidad; [23] alrededor del 2.3% de la radiación solar es convertida en viento, esto se debe a las distintas temperaturas que existen en la superficie terrestre, ocasionando flujos de aire, que pueden ser aprovechados para producir energía eléctrica. Suponiendo un incremento de 1.5 °C, aproximadamente, similares al incremento observado durante los 39 años de análisis, y que se considera insignificante, se puede inferir que las condiciones futuras de temperatura en Villonaco son propicias para el correcto funcionamiento de la central eólica y el aprovechamiento del recurso por otros 40 años o más.

#### **4.2. Precipitación**

La precipitación promedio correspondiente al periodo de 1981 a 2020 en la estación de Villonaco es de 81.84 mm con una tendencia creciente. El comportamiento que demuestra la variable a lo largo de los 39 años considerados para el estudio va concorde con la estacionalidad del país, ya que el Ecuador únicamente presenta dos: el invierno, de noviembre a abril, que es cuando aumentan las precipitaciones; y el verano, de mayo a octubre, donde las precipitaciones descienden en una gran

cantidad favoreciendo a las épocas secas o de sequías.

A través del cálculo de anomalías en los registros mensuales también conocido como Índice Normalizado de Precipitación (SPI), se cuantifican y comparan las intensidades de los déficits de precipitación en la zona de estudio, este índice tiene la propiedad de poder integrarse sobre un amplio rango de escalas temporales, lo que hace que pueda ser utilizado como indicador de diferentes tipos de sequía, tanto aquellas que son de corta duración y que producen efectos principalmente sobre los sectores agrícola, forestal y pecuario, como para caracterizar sequías climáticas de larga duración conducentes a sequías hidrológicas [24]

Los valores positivos de SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos, que es menor [25]. Todas las anomalías encontradas son positivas, es decir que se presenta un exceso de precipitación. En el análisis destaca el punto de Guangora debido a que presenta los valores más altos de precipitación, esto se debe a que la zona siempre ha sido conocida por sus constantes lluvias ya que se trata de un valle que se encuentra al final de la montaña lo que propicia condiciones climáticas lluviosas. De acuerdo con la OMM [25], si el SPI supera el valor de 2.0, se considera que dicho lugar es extremadamente húmedo, lo que ocurre en todos los casos anómalos presentados para los puntos de Villonaco, UTPL y Guangora.

Con respecto al Índice Estandarizado de Sequia Pluviométrica, durante los últimos años, las épocas de sequías se han acentuado a lo largo de zonas donde no es común como consecuencia del inminente cambio climático y viceversa. De acuerdo con la Figura 6, el nivel de sequía excepcional se presenta durante los últimos años en Guangora y UTPL, estos puntos son especiales porque en invierno puede sobrepasar los niveles normales de precipitación y en verano propicia las sequías. En cambio, los puntos en Catamayo, Villonaco y Malacatos tienen el comportamiento contrario, puesto que pasaron de presentar sequías severas según el índice, a ser territorios libres de sequías a partir de 1999. Esta condición es favorable para el correcto funcionamiento de la Central Eólica en Villonaco debido a que existe una relación

directamente proporcional entre la velocidad del viento y los niveles de precipitación.

Cuando un viento en superficie cargado de humedad encuentra una montaña, se produce el efecto Föhn, que consiste en una corriente ascendente que por enfriamiento adiabático produce saturación y precipitaciones [26], es decir que, si una zona presenta mayores precipitaciones, es probable que los vientos hayan transportado más humedad como es el caso de Villonaco, que indica una tendencia positiva en el IESP.

### 4.3. Viento

En meteorología se estudia el viento como aire en movimiento tanto horizontal como verticalmente. La relación de los movimientos de los vientos y su intensidad se denomina velocidad del viento, que es la cantidad de masa de aire que se desplaza por unidad de tiempo. El flujo de viento se ve afectado por factores como la rugosidad y la topografía del terreno, que tienden a producir perturbaciones en su movimiento. La presencia de lomas, nevados, por ejemplo, puede ser por un lado beneficiosa ya que la velocidad del viento aumenta al llegar a la cima, pero, por otro lado, pendiente debajo de la colina, la turbulencia se ve incrementada; y se pueden producir efectos de recirculación [27]. Para la correcta utilización de la energía eólica es importante conocer velocidades medias, ráfagas, direcciones dominantes y eventuales obstáculos, con el fin de seleccionar tanto los lugares de emplazamiento y las características constructivas de las máquinas [3].

Es importante considerar que el área donde se encuentra la Central Eólica Villonaco es una zona montañosa y, específicamente, en la cresta de la montaña donde se ubican los aerogeneradores, se aprovecha la alta velocidad que se genera aquí. La circulación general atmosférica se ve perturbada por la orografía terrestre produciéndose el desarrollo de efectos geográficos en capas bajas y también medidas y altas de la atmósfera [28]. Por ende, los análisis realizados se enfocan en esta área, pero se considera la influencia de otros puntos virtuales según su orografía y a su cercanía al parque eólico (4-5 km aprox.).

Según la Tabla 9, el comportamiento del viento es aceptable, ya que como se describe

anteriormente el punto virtual del Villonaco corresponde a una resolución de aproximadamente 4 km<sup>2</sup>, vinculándose con el punto virtual de “Guangora”, ya que se encuentran dentro de la resolución especificada, lo que resulta en una oscilación media de la velocidad del viento a 10 m entre 2.50 y 3.8 m/s en la zona.

Las centrales eólicas, necesitan un mínimo de velocidad de 3 m/s y un máximo de 90 m/s para un funcionamiento óptimo, por lo que los datos analizados, muestran que la zona cuenta con una velocidad media óptima, cumpliendo el mínimo de generación a 10 m sobre el suelo [29]. Se constata que la zona de Villonaco es la que presenta valores de viento óptimos para la generación de energía eólica; si bien el punto de “Guangora” presenta velocidades de viento mayores se debe a su orografía y las características del valle en el que se encuentra, por lo que la Central en Villonaco se considera el punto que recibe las velocidades de viento más altas que propician la generación de energía. Además, los datos indican que la velocidad del viento en Villonaco en un periodo de 39 años a 60 m oscila entre los 2.46 y 4.97 m/s, con un comportamiento medio de 3.41 m/s, velocidad que, según CELEC [29], es un mínimo constante para el aprovechamiento del viento para el desarrollo de energía eólica.

Dentro del análisis de la variabilidad climática mediante la aplicación del indicador estadístico de media móvil para el análisis del viento, es muy importante la identificación de estacionalidades, ya que el viento sigue un comportamiento en invierno y otro en verano. En verano los datos presentan una tendencia creciente, llegando a su pico entre los meses de junio-agosto, a partir de allí, los datos tienen un comportamiento decreciente, donde se observa sus puntos más bajos entre febrero-abril. Al analizar la Figura 7, se observa que en un comportamiento anual y estacional (invierno y verano), la tendencia del viento se mantiene creciente.

El ciclo de la estacionalidad es muy frecuente hasta el período de 2017-2020, donde se presenta un comportamiento muy atípico del viento en la zona, registrando los valores más bajos de toda la serie temporal, seguido por el pico más alto en agosto del 2019. Estas anomalías se generan

por el paso de El Niño en el 2017, según el COEN [30], en el 2017 se presentaron intensas lluvias e inundaciones en el fenómeno costero peruano, afectando sus costas norte (frontera con el sur del Ecuador).

En general, en la zona de Villonaco, la velocidad del viento exhibe un comportamiento uniforme a lo largo del tiempo, lo que sugiere una consistencia en su potencial para la generación de energía eólica a largo plazo. Este patrón estable de vientos proporciona una base sólida para el aprovechamiento sostenible de este recurso renovable en el tiempo. Al mantener una velocidad constante y predecible, se facilita la planificación y operación eficiente de las centrales eólicas en la región.

## V. CONCLUSIONES

La temperatura media en el Cerro Villonaco oscila entre los 17.82 °C y presenta una tendencia creciente dentro del período de 1981 a 2020 con un incremento de 1.55 °C, cuyas temperaturas medias más altas se registraron en el año 2016 donde se alcanzaron temperaturas de hasta 19.55 °C, debido al paso del ENOS que propició la presencia de anomalías en la región. A través del análisis efectuado se constata que la ubicación de la Central Eólica Villonaco presenta una distribución de temperatura adecuada conforme las especificaciones de los aerogeneradores instalados en el parque, que permite mantener la operación eficaz de los mismos.

El análisis de la precipitación en la zona de estudio revela una tendencia creciente en la cantidad de lluvia durante el período de 1981 a 2020, alineada con la estacionalidad del país. La precipitación media en la zona de Villonaco fue de 81.84 mm, con un comportamiento dependiente de la estacionalidad, siendo más prominente durante el invierno que durante el verano. Aunque se observa un exceso generalizado de precipitación, particularmente en los puntos de Villonaco, UTPL y Guangora, evidenciado por valores positivos del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), también se registran episodios de sequía excepcional.

El análisis de la velocidad del viento en Villonaco revela valores oscilantes entre 2.46 y 4.97 m/s a

60 metros sobre el suelo, considerados óptimos para el funcionamiento de centrales eólicas. La estacionalidad anual, enfocada en invierno y verano, muestra una tendencia creciente durante el verano, alcanzando su punto máximo entre junio y agosto, seguido de un período decreciente hasta febrero-abril. A pesar de las anomalías, la velocidad del viento en la zona presenta un comportamiento uniforme a lo largo del tiempo, lo que ofrece una oportunidad única para el desarrollo continuo de proyectos de energía limpia a largo plazo, contribuyendo así a la diversificación de la matriz energética y a la mitigación de los impactos ambientales asociados con fuentes de energía no renovables.

## VI. REFERENCIAS

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2015). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.
- Hidalgo-Proaño, M. (2017). Variabilidad Climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS. *CienciaAmérica*, vol. 6, no. 2, pp. 42–47. <https://cienciaamerica.edu.ec/index.php/uti/article/view/82>
- Armijos, J. (2016). Análisis técnico y económico de la producción de energía en el Parque Eólico Villonaco. (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja.
- Gobierno de Navarra. (s.f). *Meteorología y climatología de Navarra*. Documento en línea. <http://meteo.navarra.es/energiasrenovables/energiaeolica.cfm>
- Blanquero, R., Carrizosa, E., Pita, M., F., Camarillo, J. & Álvarez-Francosa, J. (2012). Modelo estadístico para la predicción del índice estandarizado de sequía pluviométrica (IESP) en Andalucía. Cambio climático. *Extremos e impactos*. VIII Congreso Asociación Española de Climatología (Madrid).
- Agüello, I. (2019). *Estudio del recurso eólico, implan-*

- tación preliminar y viabilidad económica de un parque eólico de 30 MW en Aranguren (Navarro).* (Tesis de Pregrado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Renee, M. (2017) Amplitud Térmica. *Agrobarrow*. N°60, pp. 20 – 21. [https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/3125/Agrobarrow\\_60\\_p.20-21.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/3125/Agrobarrow_60_p.20-21.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2013). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable presentó el primer Atlas Eólico del Ecuador*. <http://www.energia.gob.ec/ministerio-de-electricidad-y-energia-renovable-presento-el-primer-atlas-eolico-delecuador/>.
- Cochancela Araujo, J. R., & Astudillo Salinas, P. A. (2012). *Análisis energético de centrales eólicas* (Tesis de Pregrado). Universidad de Cuenca.
- Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos. (1994). *Plan integral de desarrollo de recursos hídricos de la provincia de Loja*. Programa Regional para el Desarrollo del Sur (Ecuador). Loja, Ecuador.
- Asociación Danesa de la Industria Eólica. (2000). *Manual de Referencia sobre energía eólica*. Documento en línea. <http://www.windpower.org/es/stat/unitsw.htm>
- Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (1990). *El Atlas Eólico Europeo*. Risø National Laboratory.
- Rivera, U., Liuxmila, J., & Mejía, C. (2017). *Flora y su funcionalidad en dos agroecosistemas de granos básicos, Chinandega, Nicaragua, 2016*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Agraria.
- Rosales González, M. (2013). *Análisis básico sobre la posible variación de la precipitación y de la temperatura bajo la influencia del cambio climático en la Ciudad de Quito*. (Tesis de Pregrado). Universidad Central del Ecuador.
- Ordoñez, I. I., & Luna, R. (2019). *Estudio preliminar de un parque eólico complementario en Ecuador: caso Pímo provincia del Azuay*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Cuenca.
- Calculo.cc. (s.f). *Coficiente de Pearson. Coficiente de correlación lineal. Escala de valores del coeficiente de correlación lineal*. Estadística bidimensional. Documento en línea. [http://calculo.cc/temas/temas\\_estadistica/estadistica\\_bi/teoria/correlacion\\_lineal.ht](http://calculo.cc/temas/temas_estadistica/estadistica_bi/teoria/correlacion_lineal.ht).
- Oracle. (s.f). *Puntuación z*. Documento en línea. [https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs\\_common/PFUSU/insights\\_metrics\\_Z-Score.htm#PFUSU-GUID-640CEBD1-33A2-4B3C-BD81-EB283F82D879](https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_Z-Score.htm#PFUSU-GUID-640CEBD1-33A2-4B3C-BD81-EB283F82D879)
- Pita, M., F. (2006). *Recomendaciones para el establecimiento de un sistema de indicadores para la previsión, el seguimiento y la gestión de la sequía*. Ministerio de Medio Ambiente. España. <https://api.core.ac.uk/oai/oai:idus.us.es:11441/32527>
- Lucio, J. (2014). *Diseño de un parque eólico en el sector Pusuchisi Alto del cantón Latacunga para el Sistema de Distribución de la Empresa Eléctrica Coto-paxi* (Tesis de grado). Escuela Politécnica Nacional.
- Organización Meteorológica Mundial. (2020). *El 2020 está en camino de ser uno de los tres años más cálidos registrados*. Organización Meteorológica Mundial. <https://wmo.int/es/media/el-2020-esta-en-camino-de-ser-uno-de-los-tres-anos-mas-calidos-registrados>
- Naciones Unidas. (2023). *Se prevé que El Niño comience este verano*. Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2023/05/1520612>
- CIIFEN. (2017). *El Niño 2015-16: Evolución, vulnerabilidad e impactos en Latinoamérica*. [https://issuu.com/ciifen/docs/el\\_ni\\_o\\_2015-16\\_evolucion\\_vulner](https://issuu.com/ciifen/docs/el_ni_o_2015-16_evolucion_vulner)
- Dang, T., & Rashid, M. (2009). Introduction, history, and theory of wind power. En 41st North American Power Symposium, NAPS 2009. Simposio llevado a cabo en Starkville, MS, USA.
- Endara, S. (2019). *Monitoreo de sequías para sistemas*

- de alerta temprana.* Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-83.pdf>
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario.* [https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO\\_standardized\\_precipitation\\_index\\_user\\_guide\\_es\\_2012.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf)
- Martínez, I. (2010). *Termodinámica de la Atmósfera.* IAA. Ingeniería aeronáutica y astronáutica. ISSN 0020-1006. <http://imartinez.etsiae.upm.es/~isidoro/Env/Atmospheric%20thermodynamics.pdf>
- Pico, J. (2018). Determinación del potencial eólico disponible en el sector Mechahuasca en la Parroquia de Pilahuín, Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua. (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato.
- Jorba, O. (2005). *Simulación de los campos de viento de la Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas.* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC-EP). (2012). *Parque Eólico Villonaco*, pp. 3-34. [https://www.celec.gob.ec/index.php?option=com\\_content&view=article&id=189:eolico](https://www.celec.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=189:eolico).
- Venkateswaran, K., MacClune, K., Enríquez, M. F., & ISET International. (2017). *El Niño Costero: Las inundaciones de 2017 en el Perú.* Zurich Flood Resilience Alliance. <https://infoinundaciones.com/recursos/download/8670>