METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR, EÓLICO Y DE AGUA LLUVIA PARA APROVECHAMIENTO EN ZONAS RURALES DE BOGOTÁ.

METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF THE ENERGY POTENTIAL OF SOLAR, WIND AND RAINS IN RURAL AREAS OF BOGOTA.

María Alejandra Loaiza Ocampo

UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
Bogotá D.C.
2018

UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR, EÓLICO Y DE AGUA LLUVIA PARA APROVECHAMIENTO EN ZONAS RURALES DE BOGOTÁ.

METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF THE ENERGY POTENTIAL OF SOLAR, WIND AND RAINS IN RURAL AREAS OF BOGOTA.

Trabajo de formación para la investigación.

Presentado por:
María Alejandra Loaiza Ocampo

Director:
Carlos Andrés Forero Núñez

1 DE DICIEMBRE DE 2017
UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO
Bogotá D.C.

Notas de Aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá 13 diciembre 2017

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ser mi fortaleza en los momentos de dificultad durante mi preparación como profesional. A mis padres por ser mi apoyo incondicional y mi mayor motivación para la culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco a la Universidad Jorge Tadeo Lozano por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto y en especial a mi director de tesis Dr. Ing. Carlos Andrés Forero Núñez, pues confió en mis habilidades para llevar a cabo este estudio además de brindarme su apoyo, amistad y sobre todo por compartir conmigo todo su conocimiento, demostrarme que los sueños los hacemos realidad y darme a conocer la Energía Renovable como un estilo de vida.

Contenido

Resumen 5
Introducción: 7
Metodología: 17
Resultados y discusión 20
Conclusiones: 31
Recomendaciones: 32
Referencias: 33
Anexo 1 36
Anexo 2 38

Lista de Figuras

Figura 1 Gráfico de dirección del viento. 9
Figura 2 Estación Meteorológica Weather Station WH3081 17
Figura 3 Rosa de vientos. 18
Figura 4 Instalación de la estación meteorológica en la terraza del CIPI. 20
Figura 5 Sistema de adquisición de datos. 20
Figura 6 Distribución de velocidades tomadas cada 10 min para el 30 de Mayo 21
Figura 7 Histograma de Velocidad del Viento para Abril. 21
Figura 8 Rosa de vientos Mayo 22
Figura 9 Rosa de vientos Junio 22
Figura 10 Resumen de Potencial diario de Energía Eólica para los meses de estudio 23
Figura 11 Energía Eólica diaria en Agosto. 23
Figura 12 Energía Eólica diaria en Mayo 23
Figura 13 Energía Eólica Mensual. 24
Figura 14 Radiación solar 6 de Julio 25
Figura 15 Energía Solar diaria de Julio 26
Figura 16 Energía Solar diaria de Agosto 26
Figura 17 Energía Solar Mensual. 26
Figura 18 Cantidad de agua lluvia diaria y mensual de Mayo. 27
Figura 19 Potencial de Agua Lluvia mensual. 28
Figura 20 Análisis de Prefactibilidad para la generación de energía eólica 29
Figura 21 Análisis de Prefactibilidad para la generación de energía solar según la eficiencia de aprovechamiento. 30
Figura 22 Manual estación meteorológica MA3081 PRO 37
Figura 23 Histograma de Velocidad del Viento para Mayo 38
Figura 24 Histograma de Velocidad del Viento para Junio 38
Figura 25 Histograma de Velocidad del Viento para Julio. 38
Figura 26 Histograma de Velocidad del Viento para Agosto. 38
Figura 27 Rosa de vientos Abril 39
Figura 28 Rosa de vientos Julio. 39
Figura 29 Rosa de vientos Agosto. 40
Figura 30 Energía Eólica diaria en Junio 40
Figura 31 Energía Eólica diaria en Julio 40
Figura 32 Energía Eólica diaria en Abril. 41
Figura 33 Curvas de potencia para aerogeneradores de diferentes marcas. 41
Figura 34 Energía Solar diaria de Abril. 42
Figura 35 Energía Solar diaria de Mayo 42
Figura 36 Energía Solar diaria de Junio. 43
Figura 37 Cantidad de agua lluvia diaria y mensual de Abril. 43
Figura 38 Cantidad de agua lluvia diaria y mensual de Junio. 44
Figura 39 Cantidad de agua lluvia diaria y mensual de Agosto. 44

Resumen

Este trabajo nace a partir de un proyecto del grupo de investigación de energía, ambiente y desarrollo EADE para la identificación de estrategias de promoción de fuentes de energía renovable en zonas rurales de Bogotá, en conjunto con la Secretaría Distrital de Planeación. Como primera medida es necesario la estimación del potencial energético existente en dichas zonas; sin embargo, mientras se lleva a cabo el proceso de adquisición de los equipos es imperativo definir la metodología de análisis de datos meteorológicos para la estimación del recurso. Esto se lleva a cabo mediante la instalación de una estación meteorológica en el CIPI (Centro de Investigación en Procesos de Ingeniería), recopilación de datos y su posterior análisis. Así se obtienen la rosa de vientos e histograma de velocidad de vientos, curvas de variación irradiancia, cantidad de agua lluvia recogida y posteriormente el potencial energético para cada uno de los recursos. Después del tratamiento de más de 100.000 datos tomados entre Abril – Agosto del 2017, se obtuvieron valores mensuales de potencial energético promedio de 73000 Wh/m^2, 4400 Wh/m^2 y 68 Wh/m^2 de energía solar, eólica y de agua lluvia, respectivamente.

Palabras Clave: Fuente de Energía, Renovable, Eólica, Solar, Hídrica, Metodología, Tratamiento De Datos.

Abstract

This work comes from a project of the EADE energy, environment and development research group for the identification of renewable energy promotion strategies in rural areas of Bogotá, together with the Secretaría Distrital de Planeación. As a first measure, it is necessary to estimate the existing energy potential in these areas. However, when the equipment acquisition process is carried out, it is imperative to define a methodology for analyzing the meteorological data and estimating also the energy potential. This is carried out through the installation of a weather station in the CIPI (Center for Research in Engineering Processes), data gathering and subsequent analysis. Because of that, the wind rose and the wind speed histogram, irradiance variation curves, amount of rainwater collected and, , the energy potential for each resource where obtained. More than 100,000 data taken between April and August of 2017, were employed. Hence, an average energy potential of 73000 Wh/m^2, 4400 Wh/m^2 y 68 Wh/m^2 of solar, wind and rainwater were calculated.

Keywords: Energy Source, Renewable, Wind, Solar, Water, Methodology, Data Processing.

Introducción:

En la actualidad se presenta la necesidad de desarrollar sistemas energéticos que se basen en el uso de fuentes renovables con el ánimo de disminuir el impacto ambiental causado por las fuentes tradicionales fósiles tales como el carbón, el gas natural y los derivados del petróleo. Colombia es un país que posee un potencial energético que está constantemente en estudio teniendo en cuenta los diversos recursos existentes, la evolución en el precio de inversión de las tecnologías y la posible política pública que puede promover estas tecnologías en un futuro cercano. Para el 2015, la UPME estimó que el país cuenta con 19,5 MW instalados a partir del recurso eólico además de una irradiación promedio diaria de 4,5 kWh/m^2, la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m^2 aunque la capacidad instalada solo cuenta con 9 MW (UPME, 2015).

El grupo de investigación en Energía, Ambiente y Desarrollo (EADE) adscrito al Departamento de Ingeniería de la Universidad Jorge Tadeo Lozano tiene como una de sus líneas de investigación la promoción de sistemas renovables en diferentes zonas del país. En la actualidad se encuentra terminando de definir detalles para la realización de un proyecto conjunto con la Secretaría de Planeación Distrital para la evaluación del potencial energético en la zona rural de Bogotá, como una posible alternativa para establecer estrategias que incentiven el desarrollo de proyectos de energía renovables en zonas como Ciudad Bolívar, USME y Sumapaz. La Secretaría de Planeación Distrital tiene contemplada esta alternativa de dar valor agregado a la zona y poder promover otro tipo de sistemas económicos diferente a los cultivos tradicionales que han afectado algunas zonas de conservación como sucede con el páramo de Sumapaz.

Como primera actividad de este proyecto se llevará a cabo la instalación de cerca de 20 estaciones meteorológicas con las cuales se medirá la radiación solar incidente, velocidad, dirección del viento, y niveles de lluvia. Así mismo se instalarán estaciones de monitoreo de calidad del agua en algunos cauces ubicados en el área de estudio. Con el ánimo de poder ejecutar de la mejor manera posible este proyecto es necesario definir cuál será la estrategia de análisis y manejo de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas e identificar los algoritmos de cálculo con los cuales se transformará la información en valores de potencial energético. Por lo tanto, este proyecto se plantea necesario previo al inicio del proyecto macro con el ánimo de establecer la metodología de análisis y manejo de la información para identificar el potencial energético eólico, solar e hídrico a partir de una estación meteorológica instalada en el CIPI.

La estación meteorológica WH3081 permite medir dirección y velocidad del viento, humedad relativa y temperatura, presión atmosférica, rayos UV, luminosidad y pluviosidad (Meteoagro SAS, 2017). A partir de estos datos es posible estimar el potencial energético existente por medio de estrategias de cálculo que evalúen el recurso eólico, solar e hídrico.

La energía renovable ha tomado fuerza a nivel mundial pues su uso a gran escala ayudará a la humanidad a eliminar la dependencia de los combustibles fósiles para producir energía, combatir el calentamiento global y, además, elevar el nivel de vida de las poblaciones en los países en desarrollo a causa de la investigación, tecnología y fabricación que promete una nueva industria (Comisión Electrotécnica Internacional, 2008). La utilización eficaz de los recursos naturales (eólico, solar e hídrico) implica tener conocimiento de las características de estos en la zona de estudio. Desde que se consideran estas alternativas energéticas se ha investigado acerca de las tecnologías de aprovechamiento y metodologías de estimación de potencial por lo que se presenta a continuación una breve introducción a los temas relacionados con el trabajo a realizar.

Energía Eólica:

Esta energía se basa en el aprovechamiento de la energía cinética generada por las corrientes de viento que chocan con las hélices de los aerogeneradores o turbinas de viento y que, por medio del movimiento rotacional generan trabajo mecánico y posteriormente electricidad (Cusaría & Quiroga, 2013).

Una turbina eólica o aerogenerador se diseña para convertir la energía cinética del viento en energía mecánica, moviendo un eje, generalmente horizontal. Luego los generadores de la turbina convierten la energía mecánica en electricidad. Esta se puede almacenar en baterías, o utilizar directamente (Álvarez, 2015).

La dirección del viento se asigna de acuerdo con el punto cardinal donde se origina. Es medida con una veleta y dada en grados sexagesimales (de 0º a 360º) y/o rumbos del horizonte (N, SUR, ESTE, OESTE) (Figura *1***¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El rumbo del viento varía continuamente alrededor de un sentido medio, así los registros diarios permiten establecer un diagrama polar donde la longitud de los vectores direccionales muestra la media del viento correspondiente (Jannini, Gonzalez, & Mastrángelo., 2004).

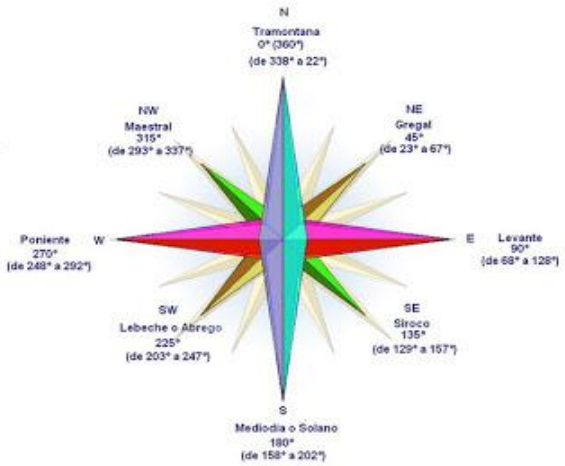

Figura 1 Gráfico de dirección del viento.
Fuente: (Jannini, Gonzalez, & Mastrángelo., 2004)

La velocidad del viento se determina con anemómetros de rotación, característicos de las estaciones meteorológicas que manejan velocidades por encima de 1 m/s

(Tabla 1). Estas velocidades se pueden clasificar según los Grados Beaufort (Jannini, Gonzalez, & Mastrángelo., 2004).

Tabla 1 Clasificación de la velocidad el viento según los Grados Beaufort.

Grado Beaufort	Velocidad (m/s)		Descripción
	De	a	
0	0	0.2	Calma
1	0.3	1.5	Ventolina
2	2.1	3.1	Brisa Suave
3	3.6	5.1	Brisa Leve
4	5.7	8.2	Brisa Moderada
5	8.8	10.8	Viento refrescante
6	11.3	13.9	Viento Fuerte
7	14.4	17.0	Viento muy Fuerte
8	17.5	20.6	Temporal
9	21.1	24.2	Temporal Fuerte
10	24.7	28.9	Temporal muy Fuerte
11	28.8	32.4	Tempestad
12	32.9	36.5	Huracán

Fuente: (Jannini, Gonzalez, & Mastrángelo., 2004)

Para la estimación del potencial de generación de energía eólica, el tratamiento de datos en general, parte del monitoreo de las velocidades de viento y de sus correspondientes direcciones (Cusaría & Quiroga, 2013), posteriormente se lleva a cabo la identificación de la distribución de Weibull y el análisis de la rosa de vientos (Castañeda & Tejada, 2013).

La distribución de Weibull permite determinar un factor de escala c que determina la velocidad promedio del viento en el lugar de estudio y el parámetro de forma k que indica el grado de dispersión de los registros, con estos se puede establecer la frecuencia con la que se manifiesta una velocidad determinada del viento (Castañeda & Tejada, 2013)

$$p(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e\text{^}\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right) \qquad (1)$$

Donde:

- p (v) es la probabilidad de la velocidad del viento observada.
- v es la velocidad del viento observada (m / s).
- A representa el parámetro de escala de Weibull (m / s).
- k es el parámetro de forma de Weibull sin dimensión.

Algunos ejemplos de la estimación del potencial energético realizados a partir del estudio de la velocidad del viento por medio de estaciones meteorológicas son:

En Elizabeth, Sudáfrica, el análisis de velocidad del viento y el potencial de energía eólica se realizó mediante parámetros estadísticos Weibull. Los datos meteorológicos se tomaron con un intervalo de 5 minutos durante 5 años (2005 - 2009) obteniendo como resultado una máxima densidad de energía eólica durante la primavera (septiembre-octubre) de 256 kW/m^2 y mínima durante el otoño (abril-mayo) de 152 kW/m^2 (Ayodele, Jimoh, Munda, & Agee, 2012). En otra zona, en la Republica de Mauricio, Dhunny et al., realizaron un estudio mediante la recolección de datos durante 10 años (2005 - 2014) para verificar la viabilidad de la instalación de un parque eólico de hasta 40 generadores, con lo que lograron calcular la velocidad promedio del viento, 6,5 m/s y estimar un potencial energético de hasta 11 MW para el proyecto (Dhunny, Lollchund, & Rughooputh, 2016).

Al igual que en el resto del mundo, en Colombia también se realizan este tipo de estudios para la evaluación de velocidad del viento y el potencial energético que aún no se aprovecha por completo en el país. Corte et al., realizaron un estudio en la Zona caribe colombiana donde determinaron, a través del modelo matemático de Weibull el comportamiento del viento para el año 2014, teniendo en cuenta los registros históricos (Datos de estaciones meteorológicas y registros del IDEAM) de los años 2012 y 2013. Allí concluyeron que las velocidades máximas se alcanzarían en Febrero y estarían entre 1 y 2.75 m/s en esta zona de estudio (Corte, Sierra , & Valencia, 2015). En el Valle de Aburrá, Antioquia, se estudia, por medio de cuatro funciones de densidad de probabilidad, el potencial energético con cinco estaciones meteorológicas de las cuales cuatro se ubican en la zona urbana y una en zona

rural. A partir de la función que mejor representa la distribución de la velocidad del viento se estimaron los potenciales energéticos que fueron 4.54 W/m^2, y 911 W/m^2 respectivamente (Amaya, Saavedra, & Arango, 2014). Por otro lado, en los municipios de Paipa y Sotaquirá, Boyacá se estudió el potencial de generación de energía eólica por medio de la instalación de una estación que fue operada durante seis meses. La información obtenida permitió observar que el promedio total de velocidad del viento para los 184 días de evaluación fue de 4,57 m/s, y la densidad de potencial eólico de 410 W/m^2 (Cusaría & Quiroga, 2013).

Energía solar:

La energía solar (Murcia, 2008), es la energía radiante del sol recibida en la tierra que puede ser aprovechada por tres tipos de tecnologías que son energía solar fotovoltaica, energía solar térmica y energía solar pasiva. Un sistema solar fotovoltaico funciona cuando el campo de módulos fotovoltaicos convierte en corriente eléctrica directa la energía solar que recibe durante el día; un generador de energía térmica basa su tecnología en la captación de la radiación por medio de elementos denominados colectores o concentradores, los cuales disminuyen las pérdidas de calor y aumentan la energía absorbida; en cuanto a los generadores pasivos comprenden elementos que se aprovechan en la construcción o adecuación de una vivienda con el fin de calentarla o refrescarla (UPME, 2004).

La radiación solar es el flujo de energía que se recibe por parte del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta) (Chamorro, Ortíz, & Viana., 2015).

La Irradiación es el valor de la potencia luminosa (valor estándar 1 KW/m^2) (Gasquet, 2004), así mismo el día solar promedio es el número de horas que, del total entre el amanecer y el anochecer, el sol irradia con una potencia luminosa estándar. Para su cálculo se tiene en cuenta el promedio de insolación diaria dividida por el valor estándar para una locación, y de allí se obtiene el valor (en horas) del día solar promedio para esa locación (Gasquet, 2004).

En cuanto a los tipos de radiación se encuentran:

- Radiación directa que llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección.
- Radiación difusa que va en todas las direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino también de las partículas de polvo atmosférico, montañas, etc.
- Radiación reflejada es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie.
- Radiación global es la radiación total dada por la suma de las tres radiaciones.

La radiación solar global es la cantidad de radiación disponible para convertir en energía útil en una localidad. Esta depende de varios factores: posición del Sol en el cielo, condiciones atmosféricas generales y del microclima (época del año) (UPME, 2004).

También para energía solar las estaciones meteorológicas permiten obtener información para realizar la estimación de potencial energético solar, por ejemplo Posso et al., evaluaron el potencial de energía solar en Venezuela utilizando 35 de estos equipos, este estudio se elaboró con una base de datos en Microsoft Office Excel, los resultados muestran que se posee un potencial factible de aprovechamiento, con valores de superiores a 5.1 kWh/m^2 día, con máximos valores hacia la franja costera norte y región insular (5.8 a 7.3 kWh/m^2) (Posso, González, Guerra, & Gómez, 2014). Por otro lado, en México realizan un trabajo donde pretenden estimar el potencial energético solar a partir de datos meteorológicos, por medio de modelos analíticos para el cálculo de la irradiancia solar, específicamente, el modelo Bird y Hulstrom. Finalmente desarrollan un nuevo método basado en la transmitancia atmosférica que presenta una clara ventaja sobre el tradicional pues reduce el proceso de cálculo para obtener las irradiancias solares (Gutierrez, y otros, 2017).

En Córdoba Colombia, Narváez et al. desarrollan e implementan una estación meteorológica con facilidades para medir la radiación solar global y la temperatura ambiente. La estación tuvo un sistema de adquisición y procesamiento de datos y fue desarrollado usando instrumentación virtual y el paquete LabVIEW 7.1. Con base en las mediciones realizadas y los datos obtenidos se obtuvieron valores del promedio diario, mensual de radiación solar y temperatura ambiente, así como también valores promedio de las temperaturas máxima y mínima registrada durante un año (Junio 2006-Junio2007); el potencial estimado es de 4898 Wh/m^{2}día, que corresponde a aproximadamente 4.9 horas de radiación estándar. Esto significa que la zona de Lorica tiene un potencial alto de radiación solar que la hace atractiva para la instalación de plantas solares (Narvaez, Dielman, & Gordillo, 2008). Para el año 2015 en Pereira, se realiza un trabajo que pretende analizar el potencial disponible y aprovechable en un punto estratégico de la ciudad por medio de la instalación de una estación meteorológica monitoreada durante 8 meses. El análisis usó herramientas informáticas como Excel y aplicaciones que ayudan a determinar el potencial energético de los datos promediados durante los días involucrados. El resultado de la Irradiación total promedio fue de 444,61 W/m^2 y del potencial energético fue 4,63 kWh/m^2 (Álvarez, 2015).

Energía hidráulica:

La energía hidráulica se obtiene a partir de una acumulación de agua ya sea en una represa o embalse, que luego será conducida hasta las turbinas por medio de un desnivel para transferir la energía cinética al generador, y allí se genera energía eléctrica. La ubicación de estas plantas hidroeléctricas influye en el costo de la energía producida (Fedesarrollo, 2013).

Los tipos de centrales hidroeléctricas, según su capacidad de generación, utilizadas para el abastecimiento del país son (Quintero, 2010):

- Las Piconcentrales, las cuales son plantas que operan a filo de agua con una capacidad instalada entre 1 y 10 kW.

- Las Microcentrales, funcionan a filo de agua y tiene una capacidad instalada entre 10 y 100 kW.
- Las Minicentrales tiene una capacidad instalada entre 100 y 1000 kW, trabajando a filo de agua.
- Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) tienen una capacidad instalada entre 1.000 y 20.000 kW, operando a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas y zonas interconectadas.

El Sistema a filo de agua, es la técnica más usada para la captación de agua. En este sistema parte del agua del río se desvía a un canal de generación que se vuelve a unir con el río más adelante.

Tratamiento de datos experimentales:

En cuanto al tratamiento de datos obtenidos de las estaciones meteorológicas, Mahmood (Mahmood, 2016) utiliza métodos estadísticos para la homogeneización de los datos recolectados con la intensión de disponer de datos efectivos para el análisis climático en Pakistán e India, al igual que (Ma., 2016) quienes además comparan y rectifican estos con los datos tomados satelitalmente. Por otro lado, (Fetisovaa, Ermolenko, G., & Kiselevac, 2017) estudiaron los datos para la evaluación del potencial eólico en Rusia por medio de la distribución de Weibull y aplicación del método de mínimos cuadrados para determinar los parámetros requeridos para aplicar la función de Weibull, de aquí obtuvieron una metodología eficaz para la selección de equipos en el proceso de diseño de un sistema de suministro de energía en una cierta ubicación. (Atodirese, Cotorcea, Serban, & Dumitrele, 2015) evalúan el potencial eólico de la zona noroccidental del Mar Negro a partir de datos obtenidos por satélite de ASCAT (Advanced SCATterometer) y de estaciones meteorológicas costeras con el fin de utilizar estos datos a bordo de buques comerciales y a su vez producir energía de forma eficiente y renovable que permita el funcionamiento de los mismos. Respecto a la medición del pluvial, en España (Hardy & Garrido., 2010) se ha usado para tomar como opción el

almacenamiento de la misma para abastecimiento de la demanda del sector energético y la producción a largo plazo de biocarburantes.

Por otro lado, en Colombia se han realizado algunos estudios de radiación solar en el país como el de (Murcia, 2008) y en cuanto al análisis de datos meteorológicos como lo hizo (Chamorro, Ortíz, & Viana., 2015) para la cuantificación y caracterización de la radiación incidente en la Guajira (Zona norte de Colombia) a partir del estudio de datos meteorológicos suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) de más de cinco años evaluados a través del modelo de Bird y Hulstrom, determinando así la radiación directa e indirecta y la radiación global promedio multianual determinando un potencial energético entre 3,4 y 6,5 kWh/m^2 día.

Hasta el momento no se han hallado evidencias del tratamiento de datos de pluviosidad (agua lluvia) para la generación de energía, lo que le da valor agregado a nuestra propuesta, pues no estamos enfocados en la evaluación de un solo tipo de generación sino en tres (eólico, solar e hídrico). El propósito del estudio de los datos de pluviales es identificar si es viable el aprovechamiento del recurso por medio de su almacenamiento para luego por gravedad poner en marcha una turbina de generación eléctrica. Por esto el objetivo principal de este trabajo es determinar e implementar una metodología de cálculo para la evaluación del potencial energético solar, eólico e hídrico a partir de datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en el CIPI.

Metodología:

El proyecto se desarrolla recogiendo, en tiempo real, los datos suministrados por la estación meteorológica Weather Station WH3081 instalada en la terraza del Centro de Investigación de Procesos de Ingeniería (CIPI) (Figura 2) (Ver Anexo 1). Estos datos registran la variación de la radiación incidente, velocidad y dirección de viento, temperatura y humedad relativa ambiente, y nivel de precipitación en un lapso igual a 10 minutos. Con estos datos se procede a analizar el potencial energético diario y mensual mediante el desarrollo de la curva de distribución de Weibull y rosa de vientos para potencial eólico (Figura 3); la curva de radiación incidente y horas de sol estándar para potencial energético solar y la curva que refleja el potencial de agua lluvia, suponiendo un lugar de recolección de la misma en el séptimo piso de los módulos 7 y 7A de la universidad.

Figura 2 Estación Meteorológica Weather Station WH3081
Fuente: (Meteoagro SAS, 2017)

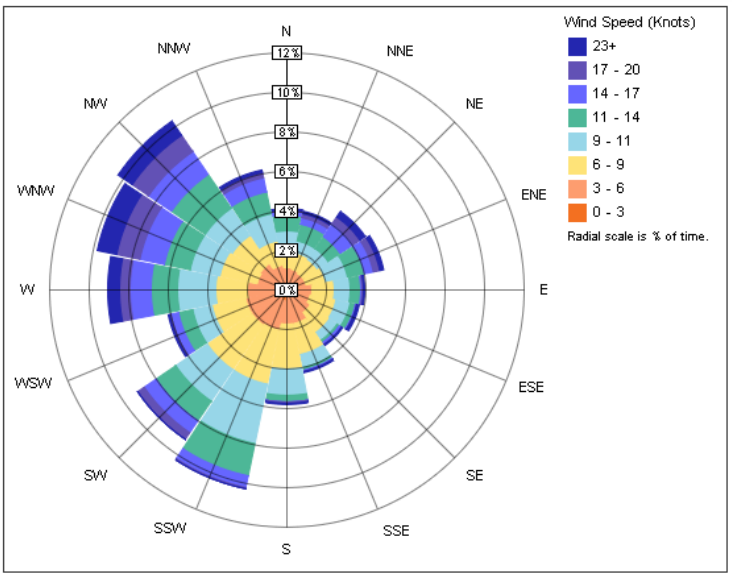

Figura 3 Rosa de vientos.
Fuente: (Autodesk, Inc., 2014)

Para le tratamiento de datos de vientos, se realiza el cálculo de densidad energética y la energía eólica que se podría llegar a producir.

$$P = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * v_{viento}^{3} \tag{2}$$

$$E = \int \frac{1}{2} * \rho_{aire} * v_{viento}^{3}\, dt \tag{3}$$

$$W_{eólico} = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * A * v^{3} \tag{4}$$

Donde ρ_{aire} es la densidad del aire a condiciones estándar (kg/m^3); v es la velocidad del viento (m/s); A es el área de barrido del rotor del aerogenerador (m^2). En cuanto al recurso solar se realiza el cálculo de energía solar que se podría producir a partir de los datos recolectados.

$$E = \int I\, dt \tag{5}$$

$$W_{solar} = I_{incidente} * A \tag{6}$$

Donde E es energía (Wh); W potencial energético (W); I es la irradiación (W/m^2); A es el área de incidencia (m^2).

Y por último para el tratamiento de datos de agua lluvia se realiza el cálculo de la energía potencial. La estación meteorológica arroja los datos de pluviosidad en mmH_2O lo que equivale a un L/m^2.

$$E = \frac{\rho_{agua} * g * h * S}{1000} \quad (7)$$

Donde ρ_{agua} es la densidad del agua (kg/m^3); S es el promedio pluvial mensual en (L/m^2); g es el valor de la gravedad (m/s^2); h es la altura propuesta para la estimación de la energía potencial (m).

Para establecer el potencial de aprovechamiento de energía hídrica a partir de la recolección de aguas lluvias se tendrá en cuenta la variación en los datos de pluviometría, análisis de posibles áreas de recolección, conversión de energía potencial en cinética y su posterior aprovechamiento en una pequeña central hidroeléctrica.

Finalmente se llevará a cabo un estimativo preliminar de la prefactibilidad técnica, económico y ambiental que supondría la instalación de sistemas prototipo de aprovechamiento de energía solar, eólica e hídrica en instalaciones del CIPI o de la Universidad.

Resultados y discusión

La instalación de la estación meteorológica se realizó a finales de Marzo y se solicitó el préstamo de un computador durante el tiempo de estudio para la instalación del programa Easy Weather Plus, que permite la recolección de datos y así dar inicio al estudio en Abril. El sistema de adquisición de datos arroja un archivo de Excel con la información tomada por la estación, de estos datos usamos día, hora, intervalo de toma de datos, velocidad y dirección del viento, radiación y rango de lluvia diario, semanal y mensual. El intervalo de tiempo configurado fue de 10 min

Figura 4 Instalación de la estación meteorológica en la terraza del CIPI. Fuente: El Autor

Figura 5 Sistema de adquisición de datos. Fuente: El Autor

<u>Evaluación del Potencial Eólico:</u>

Iniciamos con el análisis de velocidad del viento minuto a minuto diario (Figura 7), de estas graficas concluimos que las horas más productivas se encuentran entre las 6 Am y 12 m; el área bajo estas curvas son las que nos permitirán

estimar el potencial energético por medio de la aplicación de la ecuación (4). Luego realizamos un gráfico de distribución para ver si se lograban ajustar a la probabilidad de densidad de Weibull pero al tener tantos datos sesgados entre 0 y 1 m/s con una frecuencia acumulada de aprox. 50 % (Figura 7) no fue posible; sin embargo se desarrollaron los histogramas de frecuencia en relación con la velocidad del viento para los diferentes meses. (Ver **Anexo 2**)

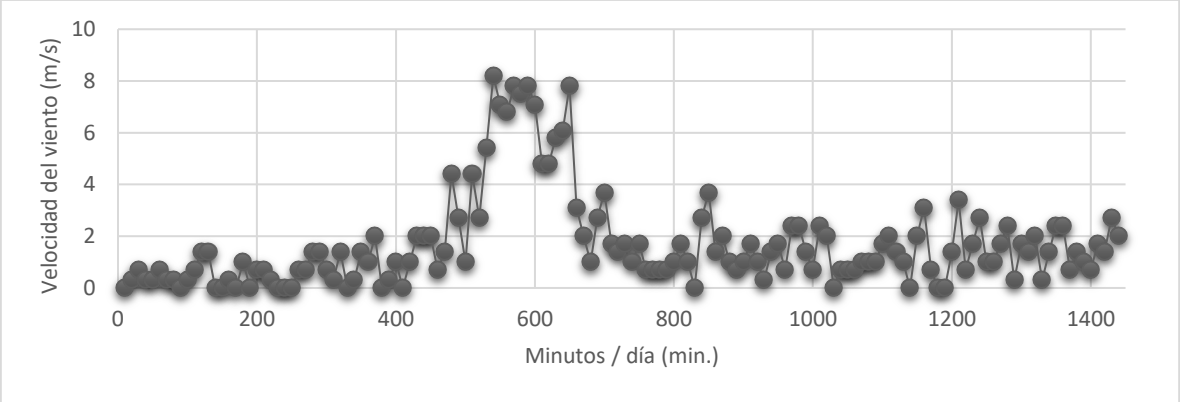

Figura 6 Distribución de velocidades tomadas cada 10 min para el 30 de Mayo

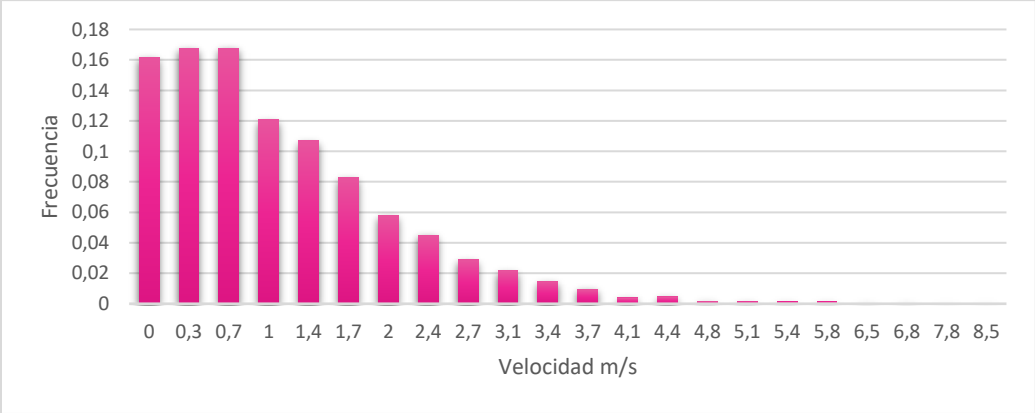

Figura 7 Histograma de Velocidad del Viento para Abril.

Aunque se registraron velocidades superiores a 3 m/s, estas no son lo suficientemente significativas para aumentar el potencial energético. Luego se realizó la rosa de vientos (Figura 9 y Figura 9) teniendo en cuenta ocho direcciones con el fin de identificar de donde proviene la mayor cantidad de

viento; los intervalos de velocidad fueron acoplados de acuerdo a su distribución; en color fucsia y violeta encontramos las calmas y las ventolinas, en color azul celeste y azul oscuro están las brisas suaves y en rojo las brisas moderadas. El resultado final nos arrojó las direcciones Este y Sudeste, con porcentajes de entre el 25% y 35% cada una sobre la distribución total, como las fuentes principales. (Ver **Anexo 2**)

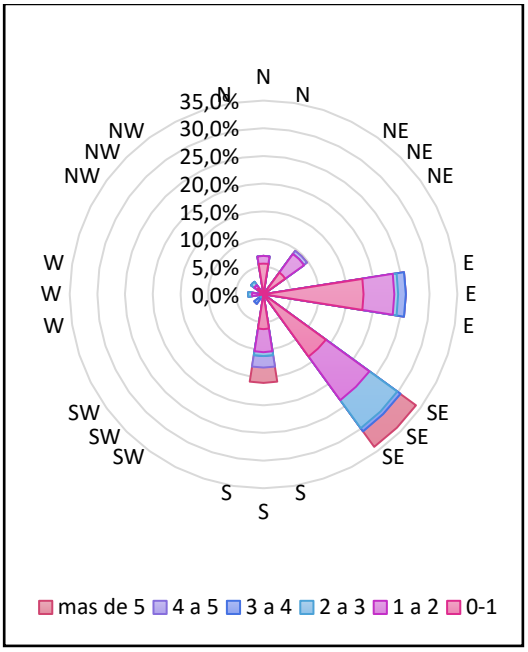

Figura 8 Rosa de vientos Mayo

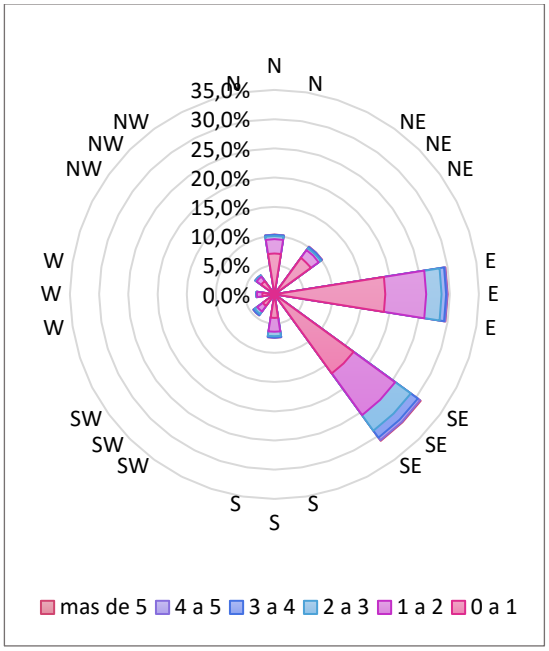

Figura 9 Rosa de vientos Junio

Y por último para el análisis del recurso eólico se calculó el potencial energético diario mostrado en la Figura 10. Esta figura posee los valores calculados para cada día de los 5 meses de estudio de forma que su comparación fuese más clara. Abril y Mayo fueron los únicos meses donde se presentaron valores superiores a 400 Wh/m^2 día.

En Abril (Figura 12) se superaron los 400 Wh/m^2 en los días 13, 22 y 24 mientras que en Mayo (*Figura 12*) ocurrió durante la mayoría del mes y particularmente en el día 30 se encontró un aumento considerable hasta los 1700 Wh/m^2 día, siendo este

el día con mayor potencial energético estimado durante el tiempo de estudio.(Ver **Anexo 2**)

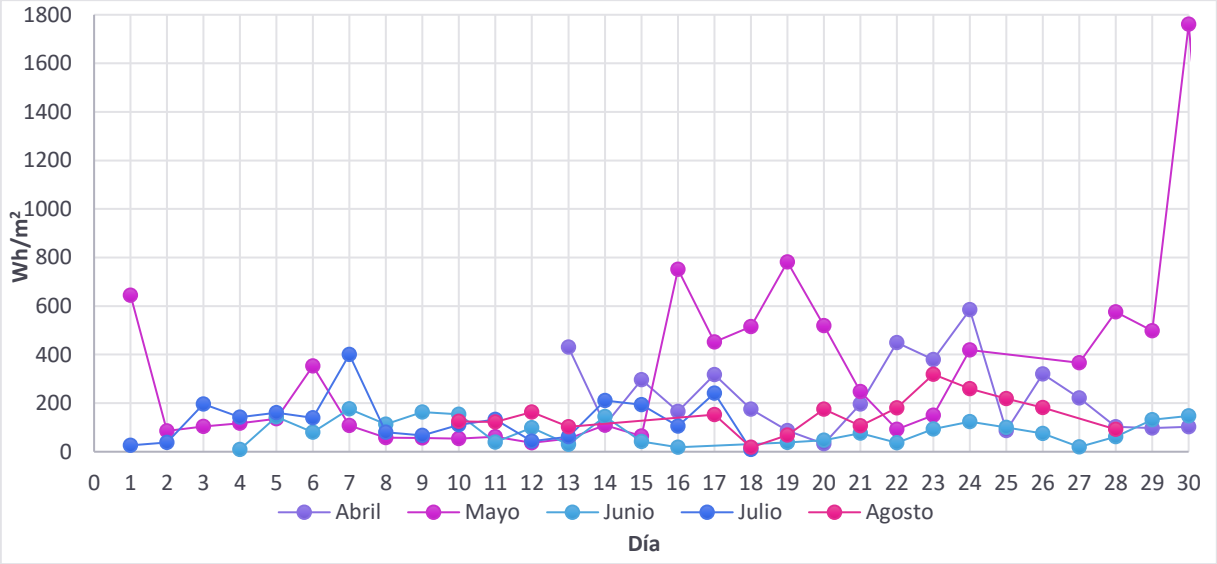

Figura 10 Resumen de Potencial diario de Energía Eólica para los meses de estudio

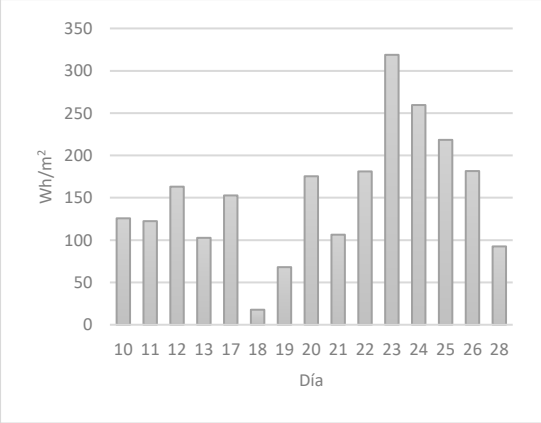

Figura 11 Energía Eólica diaria en Agosto.

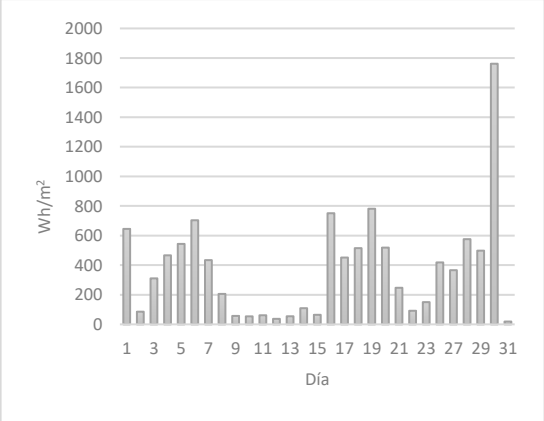

Figura 12 Energía Eólica diaria en Mayo

Como resumen mensual en la Figura 13 se muestra el potencial energético total, destacándose Mayo y Agosto con los mayores valores 9 kWh/m^2 y 4,5 kWh/m^2 respectivamente; Abril es el mes menos productivo con apenas 1,8 kWh/m^2.

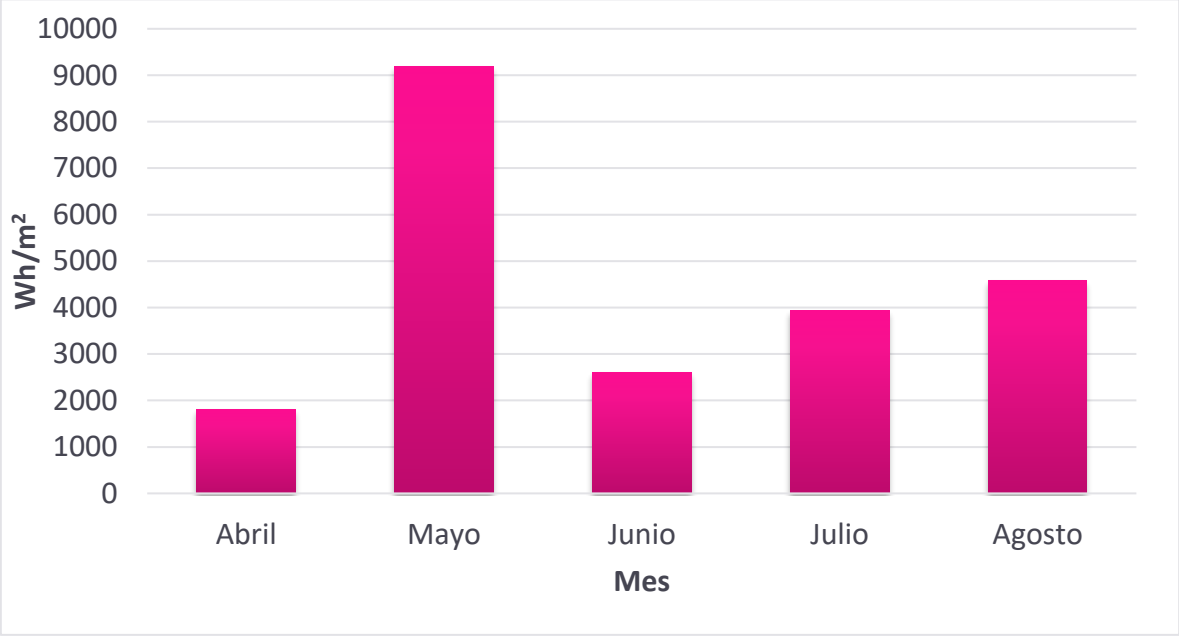

Figura 13 Energía Eólica Mensual.

Al comparar estos resultados con los datos reportados por (Ayodele, Jimoh, Munda, & Agee, 2012) y (Dhunny, Lollchund, & Rughooputh, 2016) en diferentes ubicaciones de África, se tiene que las velocidades promedio se encuentran entre 4 y 6,5 m/s, datos que para nuestra ubicación no ocupan más del 1% en la distribución de frecuencias mensuales mostradas en los anexos para todo el periodo de estudio. Estos investigadores pretendían evaluar la viabilidad de la construcción de parques eólicos para abastecimiento energético en determinadas regiones lo que se verificó con el cálculo de los potenciales energéticos (150 y 250 kWh/m2). Sin embargo, este estudio pretende, a partir de la estimación del potencial, ser una herramienta para la posterior definición de zonas aptas para la generación de energía eólica en la zona rural de Bogotá, similar a lo que hicieron (Cusaría & Quiroga, 2013) en su estudio del potencial eólico en Paipa y Sotaquirá, donde con datos meteorológicos determinaron una velocidad de viento promedio de 4,5 m/s, y un potencial energético de 22 kWh/día para un aerogenerador de 50 m^2 de área.

- **Evaluación del Potencial Solar:**

Para la estimación del potencial energético solar utilizamos los datos de radiación calculando así la energía disponible aprovechable diaria y mensual. Al igual que para eólica se realizó un análisis del área bajo la curva de la radiación minuto a minuto para cada día de estudio como se observa en la Figura 14 . A continuación, en la Figura 15 se observa que Julio posee el 83% de sus días con un potencial energético mayor a los 2000Wh/m^2. Aunque el mes con mayor potencial de generación es Agosto (Figura 16) ya que, el 95% de los datos obtenidos están sobre este rango y además presenta máximos de 3 kWh/m^2, 4 kWh/m^2, y hasta 5 kWh/m^2 . En general, (Figura 17) los meses con mayor producción son Abril, Julio y Agosto con un potencial mensual de 72,6 kWh/m^2, 72,9 kWh/m^2 y 89,7 kWh/m^2 respectivamente. (Ver **Anexo 2**)

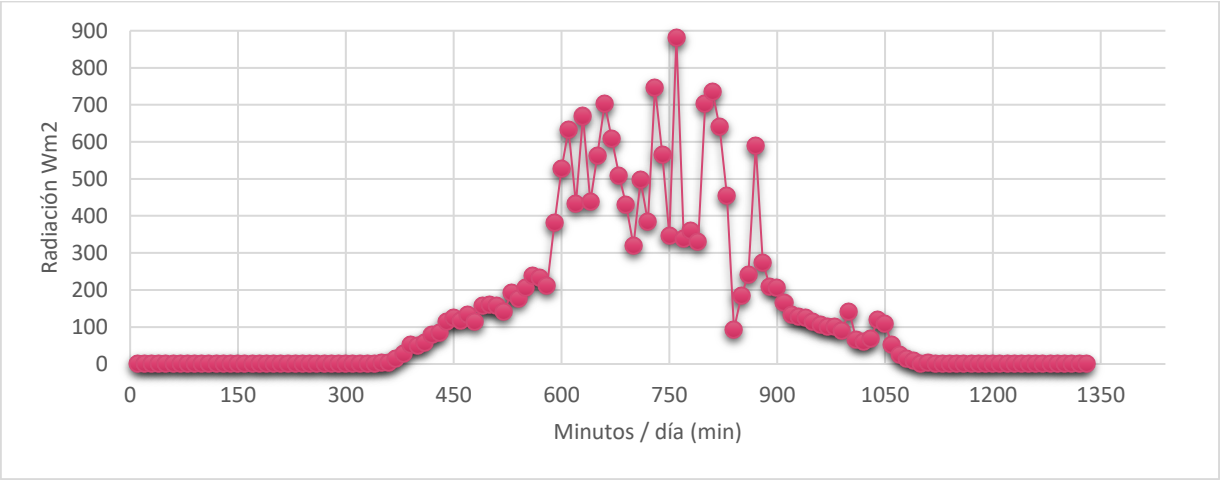

Figura 14 Radiación solar 6 de Julio

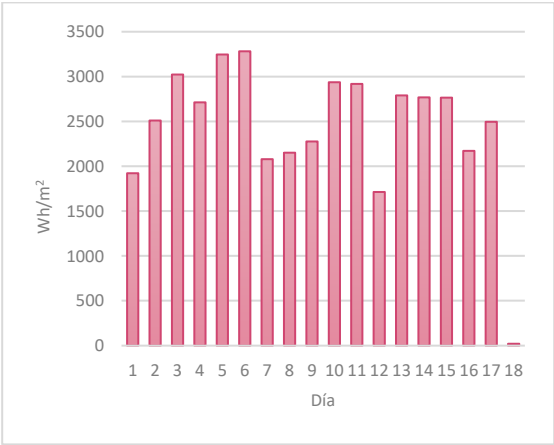

Figura 15 Energía Solar diaria de Julio

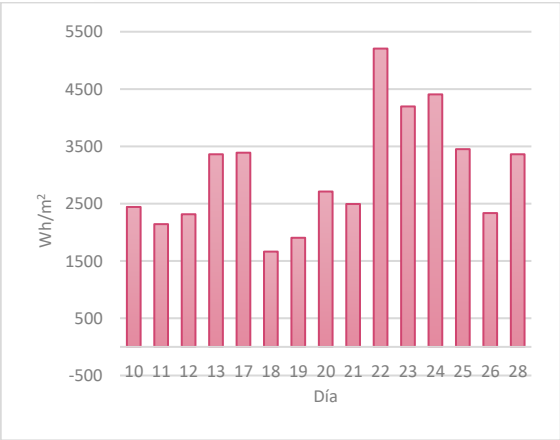

Figura 16 Energía Solar diaria de Agosto

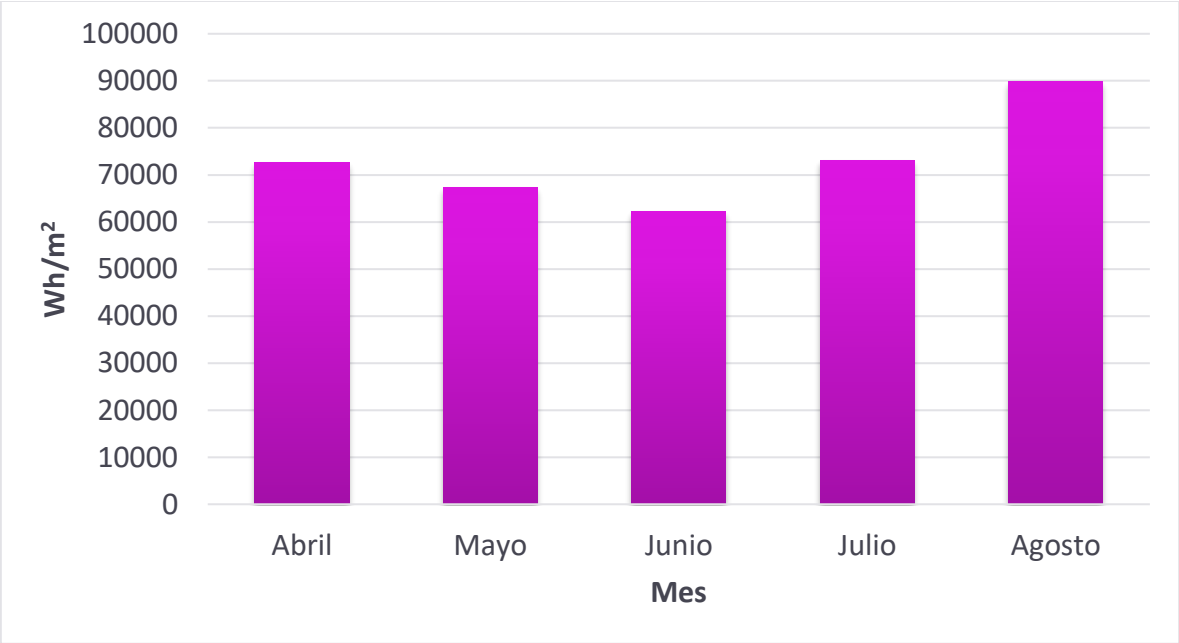

Figura 17 Energía Solar Mensual.

En resumen, el potencial promedio encontrado fue de 73 kWh/m^2/mes, lo que equivale a 2,4 kWh/m^2/día que en relación con el potencial estimado en Venezuela por (Posso, González, Guerra, & Gómez, 2014) es un poco menos de la mitad pues el promedio allí se encuentra entre 5,8 *y* 7,3 kWh/m^2/día, valores similares a los encontrados en Córdoba, Colombia por (Narvaez, Dielman, & Gordillo, 2008) pues sus valores máximos estuvieron entre 5,1 y 5,3 kWh/m^2/día para los meses de

enero y febrero que, a diferencia de lo estimado para Bogotá el mes con menor potencial energético en Córdoba fue Mayo con 4,1 kWh/m^2/día.

- **Evaluación del Potencial Hídrico:**

En esta estimación se utilizaron los datos de pluviosidad diaria y mensual (Figura 18Figura 18) para encontrar la cantidad de agua lluvia que se podría llegar a recolectar y la capacidad de generación que se podría dar si se instala un sistema de almacenamiento en la terraza de los módulos 7 y 7A de la universidad generando así una caída de aproximadamente 24 metros. (Ver **Anexo 2**)

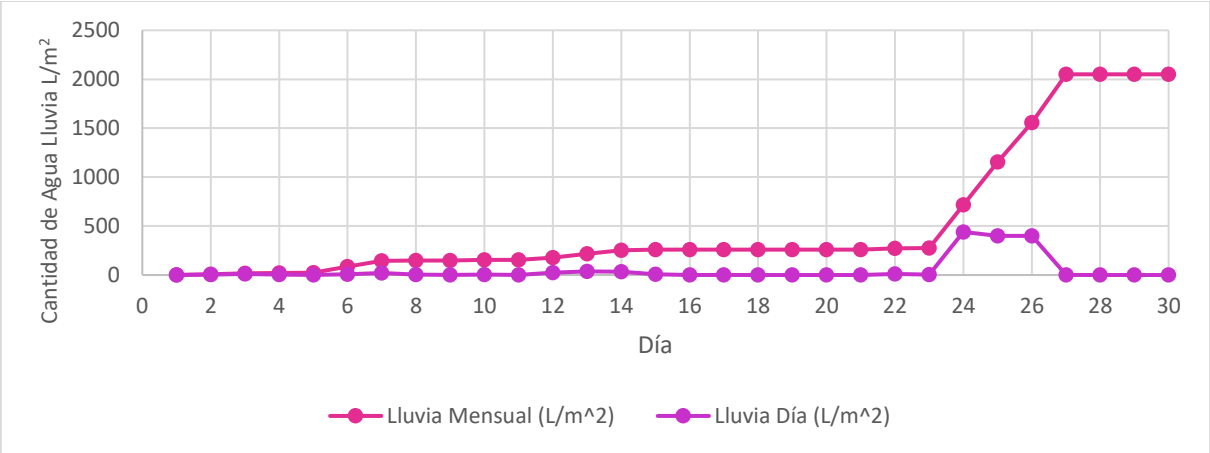

Figura 18 Cantidad de agua lluvia diaria y mensual de Mayo.

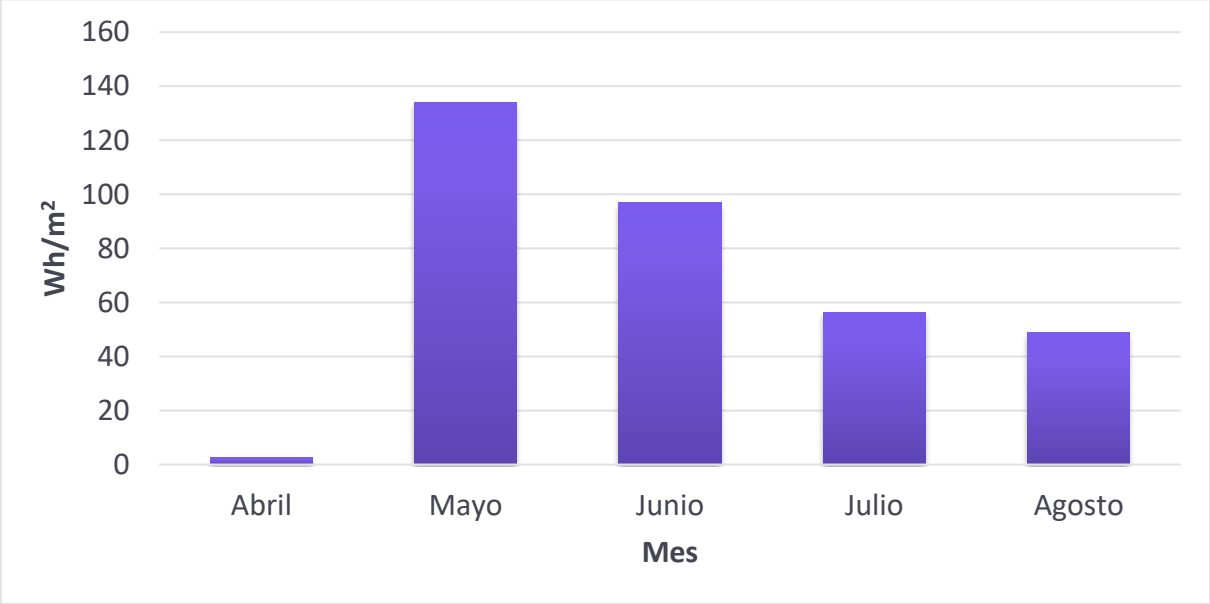

Figura 19 Potencial de Agua Lluvia mensual.

El potencial hídrico estimado se muestra en la Figura 19, de la cual se obtuvo que en Mayo se presentaron la mayor cantidad de lluvias del periodo de estudio por lo que su potencial energético es el mayor.

En cuanto al estimativo de la prefactibilidad técnica, económico y ambiental de la instalación de prototipos, para la energía eólica promedio 2,6 kWh/m^2/mes es la máxima energía eléctrica teórica teniendo en cuenta el límite de Betz (Figura 20), sin embargo este valor dependerá del factor de capacidad de una turbina, que puede estar entre 20% y 40%. Para la velocidad de viento reportado no es posible técnicamente el uso de turbinas comerciales puesto que en su gran mayoría tienen una velocidad de arranque mayor a 3 m/s. Esto de acuerdo con diferentes curvas de potencia de turbinas dadas por empresas tales como Enercon, Vestas, Nordex, Siemens, entre otras. (Ver **Anexo 2**, *Figura 33*,Tabla 2)

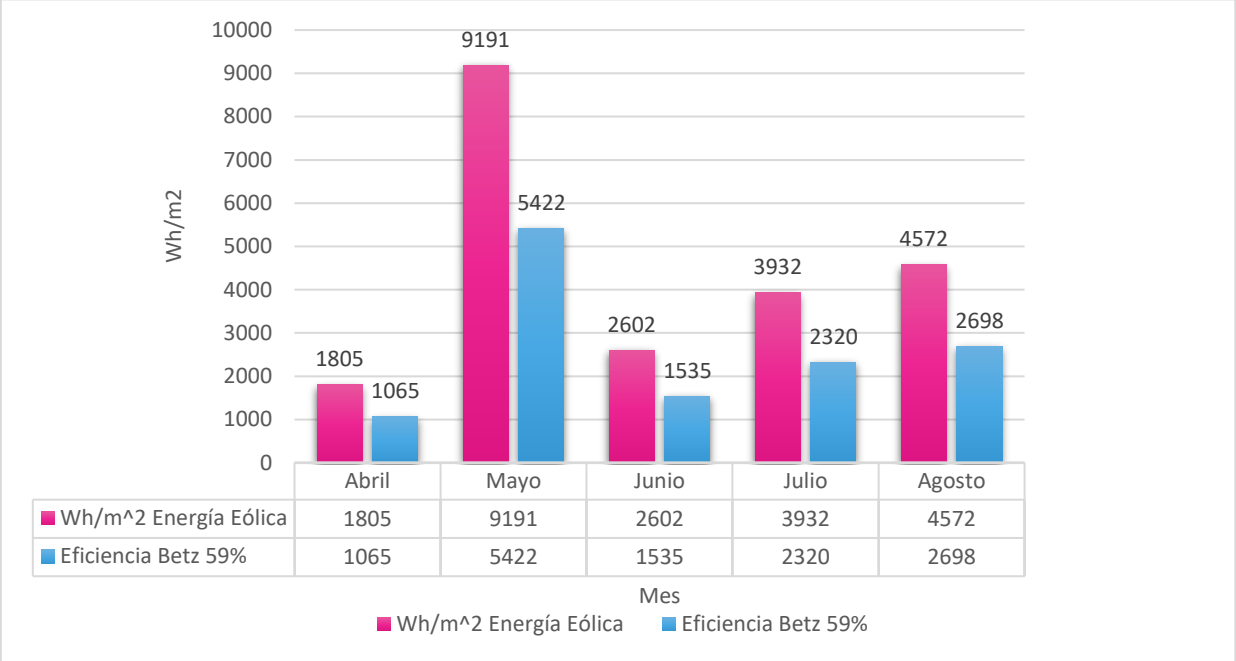

Figura 20 Análisis de Prefactibilidad para la generación de energía eólica

Así mismo, la energía eléctrica generada a partir de radiación solar tendría un valor promedio mensual de 10,2 kWh/m^2 suponiendo una eficiencia técnica cercana al 14% para paneles fotovoltaicos policristalinos de empresas tales como Sunenergy, Greenpower, Kyocera, Solar World, entre otras. Considerando una eficiencia más real de todo el sistema, incluyendo perdidas por cables e inversores, ésta podría estar alrededor del 6,8% (Figura 21). Esto significaría una generación mensual de 4942 Wh/m^2, 4579 Wh/m^2, 4231 Wh/m^2, 4962 Wh/m^2 y 6105 Wh/m^2 en Abril, Mayo, Junio, Julio y Agosto. Esta generación representa un ahorro cercano a 12409 \$/m^2 utilizando el precio de venta que actualmente se maneja en Bogotá de 500 \$/kWh. Ambientalmente el uso de esta fuente de energía puede representar una disminución de 0,01152 tCO_2/m^2 usando un factor de conversión de 0,464 tCO_2/MWh característico de un combustible gaseoso en Colombia.

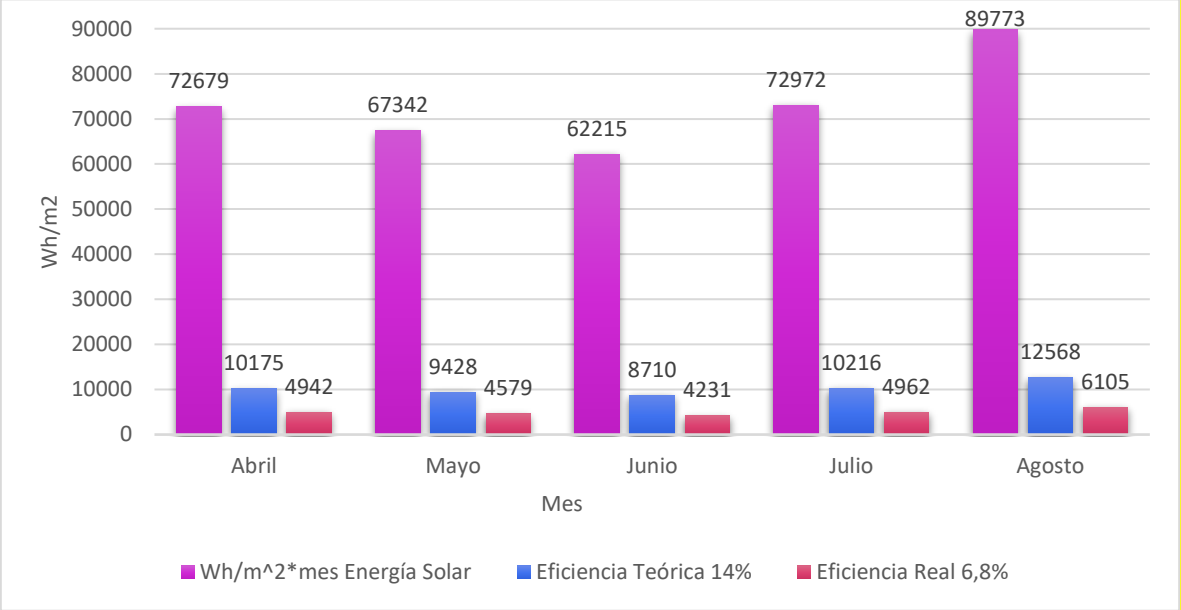

Figura 21 Análisis de Prefactibilidad para la generación de energía solar según la eficiencia de aprovechamiento.

La viabilidad técnica de uso de aguas lluvias dependerá de un análisis dinámico de la frecuencia e intensidad de estas. Si bien es cierto, almacenar más agua permite usar mayores caudales en las turbinas genera un aumento en la carga sobre la edificación, infraestructura para el almacenamiento de las aguas lluvias y un sistema de control de caudal que se enviaría a la turbina. La ventaja de este tipo de energía está relacionada con la alta eficiencia de las turbinas que pueden estar alrededor del 80% y 90%. Por ejemplo al utilizar una turbina HE (Tecnoturbines Power Water, 2012) se podrían a llegar a generar hasta 3 kW/m^2 utilizando un caudal de 10L/s, pero teniendo en cuenta que la máxima cantidad de agua acumulable se registró en Mayo con 2000L/m^2 esto solo permitiría una generar energía durante 3 min/m^2 por lo que si se quisiera generar por al menos 1 hora se requerirían 18 m^2, lo que sería un área poco productiva en los meses de sequía como Abril donde apenas se registraron 40 L/m^2.

Conclusiones:

- Se Implementó una metodología de cálculo completamente reproducible para la evaluación del potencial energético solar, eólico e hídrico a partir de datos obtenidos de una estación meteorológica además de conocer las posibles dificultades tanto en la instalación y manejo de este equipo como en el tratamiento de la información.
- Se trataron más de 100.000 datos entregados por la estación meteorología en los cinco meses de estudio para la medición del potencial energético a partir del recurso eólico, solar y de precipitación pluvial.
- Los cinco meses de estudio estuvieron comprendidos entre Abril y Agosto del presente año para los que se obtuvieron valores mensuales promedio de 73000 Wh/m^2, 4400 Wh/m^2 y 68 Wh/m^2 de energía solar a partir de radiación directa, eólica y de agua lluvia a 24m de altura respectivamente.
- La metodología de análisis permitió identificar el potencial energético a partir de los datos suministrados por la estación meteorológica, lo que hace explicita su reproducibilidad para el tratamiento de estos en diferentes zonas del territorio nacional para establecer lugares con oportunidad de aprovechamiento y posterior generación de energía eléctrica, mecánica y/o térmica.
- Una vez estimado el potencial energético del recurso existente es posible establecer la viabilidad técnica de conversión de energía utilizando valores de eficiencia característicos de equipos tales como microturbinas de agua, paneles fotovoltaicos y turbinas de viento de eje horizontal.

Recomendaciones:

- Contar con un equipo de cómputo para la conexión a la estación meteorológica, que tenga acceso permanente a internet además de software actualizado para asegurar una toma de datos constantes y permitir la transmisión de los mismos en tiempo real.
- Revisar la continuidad del servicio de energía eléctrica del edificio, ya que debido a los continuos cortes se vio afectada la recolección de datos además de generar daños en el módulo transmisor.

Referencias:

Álvarez, S. I. (- de Mayo de 2015). Análisis del Potencial Natural de Viento, Radiacion Solar y Precipitación pluvial en la Universidad Tecnológica de Pereira. *Análisis del Potencial Natural de Viento, Radiacion Solar y Precipitación pluvial en la Universidad Tecnológica de Pereira*. Pereira, Risaralda, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

Amaya, P., Saavedra, A., & Arango, E. (2014). A statistical analysis of wind speed distribution models in the Aburrá Valley, Colombia. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 121-136.

Atodirese, D., Cotorcea, A., Serban, A., & Dumitrele, E. (2015). Assesment of the wind potential for the North-Western area of the black sea by Interpreting data recorded by Meteorological castal stations. *"Mircea cel Batran" Naval Academy Scientific Bulletin*, 9-17.

Autodesk, Inc. (- de - de 2014). *Wind*. Obtenido de Autodesk University: http://auworkshop.autodesk.com/es/library/building-science/wind

Ayodele, T., Jimoh, A., Munda, J., & Agee, J. (2012). Statistical analysis of wind speed and wind power potential of Port Elizabeth using Weibull parameters. *Energy in Southem Africa*, 30-38.

Castañeda, W. F., & Tejada, L. A. (2013). Aplicacion de la ecuación de Weibull para la determinar porencial eólico en Tunja-Colombia. *XX SIMPOSIO PERUANO DE ENERGIA SOLAR*, -.

Chamorro, M. V., Ortíz, E. V., & Viana., L. A. (2015). Cuantificación y caracterización de la radiación solar en el departamento de La Guajira-Colombia mediante el cálculo de transmisibilidad atmosférica. *Prospect. Vol. 13, No. 2*, 54-63.

Comisión Electrotécnica Internacional. (2008). *Energías Renovables.* Ginebra: Comisión Electrotécnica Internacional.

Corte, D., Sierra , F., & Valencia, G. (2015). Mathematical model validation ¨Probability Density Function (PDF) of Weibull¨ assessing the wind resource in colombian Caribbean are: case study. *Prospect*, 38-46.

Cusaría, A. A., & Quiroga, J. V. (2013). Estudio del potencial de generación de energía eólica en la zona del páramo de Chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá, departamento de Boyacá a 3534 m.s.n.m. *Avances Investigación en Ingeniería*, 18-26.

Danish Wind Industry Association. (06 de 05 de 2003). *Wind Power*. Obtenido de Wind Power: http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/wndspeed.htm

Dhunny, A. Z., Lollchund, M. R., & Rughooputh, S. D. (2016). Evaluation of a wind farm project for a smart city in the South-East Coastal Zone of Mauritius. *Energy in Southern Africa*, 39-50.

Fedesarrollo. (2013). *Análisis costo beneficio de energías renovables.* Bogotá: UPME.

Fetisovaa, Y. A., Ermolenko, B. V., G. V., & Kiselevac, S. V. (2017). Determining the Parameters of Weibull Function to Estimate the Wind Power potential in Conditions of Limited Source Meteorological Data. *Thermal Engineering* , 251-257.

Gasquet, H. (2004). *Conversión de la Luz Solar en Conversión de la Luz Solar en Manual Teórico y Práctico sobre los Sistemas Fotovoltaicos.* Cuernavaca: Solartronic S.A .

Gutierrez, A., Villicaña, E., Alvarez, E., Gonzalez, J., Xiberta, J., & Suarez, M. (2017). Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance. *Elsevier, 81*(-), 93-106.

Hardy, L., & Garrido., A. (2010). *Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España.* Madrid: Fundación Botín.

Jannini, R., Gonzalez, J., & Mastrángelo., S. (2004). *Energía Eolica Teoría y Cracterísticas de Inatalaciones.* Buenos Aires: Boletín Energético CNEA / Comisión Nacional de Energía Atómica CNEA. .

Ma., F. H. (2016). Analysis of Long-Term Meteorological Observation for Weather and Climate Fundamental Data over the Northern Tibetan Plateau. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology*, 1-10.

Mahmood, R. (2016). Quality control and homogenization of daily meteorological data in the trans-boundary region of the Jhelum River basin . *Journal of Geographical Sciences*, 1661-1674 .

Meteoagro SAS. (15 de Abril de 2017). *Meteoagro.* Obtenido de Meteoagro: http://www.meteoagro.co/public/documentos/ftecnicas/ft_ma3081_pro.pdf

Murcia, H. R. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de ingeniería. Universidad de los Andes.*, 83-89.

Narvaez, J. R., Dielman, G., & Gordillo, G. (2008). Estudio del Potencial de Radiación Solar y de la Temperatura Ambiente en Lorica-Córdoba. *Revista Colombiana de Física, 40*(2), 392-395.

Posso, F., González, J., Guerra, F., & Gómez, H. (2014). Estimación del potencial de energía solar en Venezuela utilizando sistemas de información geográfica. *Revista Geográfica Venezolana, 55*(1), 27-43.

Quintero, E. (2010). *Investigación de pequeñas centrales en Colombia.* Bogotá: UPME.

Tecnoturbines Power Water. (- de - de 2012). *Tecnoturbines*. Obtenido de Tecnoturbines: http://tecnoturbines.com/turbinas-cargade-bateria/

UPME. (2004). *Energías Renovables: Descripción, Tecnologías y usos finales.* Bogotá: UPME.

UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.* Bogotá: UPME.

Anexo 1

Especificaciones Técnicas

- Transmisor alimentado con energía solar
- Sensores de velocidad y dirección del viento
- Pluviómetro, termohigrómetro
- Sensores de Radiación UV e Luminosidad (Lux/m2 convertibles a watts/m2).
- Transmisión de datos controlada por radio: 433mhz, alcance de transmisión de hasta 100 metros

Consumo de energía:

- Estación base: 1.5V LR6 3xAA alcalina;
- Transmisor: Batería 2xAA 1.5V recargable
- Dimensiones (Alto*Ancho*Profundidad): Estación base: 165x148x27mm

Rangos de medición:

- Rango de temperatura interior: 0 ° C a +50 ° C.
- Rango de temperatura exterior: -40 ° C a 65 ° C.
- Precisión de la temperatura: + / -1,0 ° C.
- Rango de humedad: 1% - 99%.
- Exactitud de la humedad: + / -5% bajo -20 ° C a 65 ° C y 20% -98%.
- Rango de velocidad del viento: 0-50 m / s.
- Precisión de velocidad viento: +/- 1 m/s (velocidad del viento 10m/s)
- Rango de lluvia: 0-9,999 mm.
- Exactitud Lluvia: + /-1.5mm.
- Rango de Iluminancia: 0-300,000 Lux.
- Precisión: + / -10%.

Incluye:

- Sensor de dirección del viento
- Sensor de velocidad del viento
- Sensor de humedad relativa y temperatura
- Sensor de presión atmosférica
- Sensor rayos UV
- Sensor luminosidad (Lux/m2)
- Consola de visualización/Datalogger
- Cable USB
- Software EasyWeather Plus 2.0
- **Abrigo meteorológico mejorado**
- **Pluviómetro profesional**

Abrigo meteorológico profesional:
Protege contra la radiación solar los sensores de temperatura y humedad relativa de las estaciones meteorológicas. Se compone de nueve platos de plástico moldeados y un brazo de montaje en plástico ABS que inhibe los rayos UV.

Pluviómetro profesional:
Cuenta con un área de captación de 20.3 cm de diámetro y cumple con las especificaciones del National Weather Service de los Estados Unidos. Resolución 0.25 mm.

Características:

1. Transmisor accionado con energía solar.
2. Índice UV (0-12).
3. Iluminancia para mediciones locales.
4. Puerto USB para una fácil conexión al PC.
5. Los datos meteorológicos de la estación base y hasta 4.080 conjuntos de datos del historial de tiempo con intervalos de medición ajustable por el usuario pueden ser grabados y subidos al PC.
6. Datos de lluvia (pulgadas o mm):1 hora, las 24 horas, una semana, un mes y total desde el último reinicio.
7. Visualización de la sensación térmica y punto de rocío (° F o ° C). Valores mínimos y máximos, junto con la hora y fecha de grabación.
8. Velocidad del viento (mph, m/s, km/h, nudos, Beaufort).
9. Dirección del viento con brújula.
10. Ícono de pronóstico de condiciones meteorológicas en las próximas horas.
11. Alarma para: Temperatura, humedad, sensación térmica, punto de rocío, precipitaciones, velocidad del viento, presión atmosférica, advertencia de tormenta.
12. Iconos de pronóstico basado en los cambios de presión barométrica.
13. Presión barométrica (inHg o hPa).
14. Muestra la temperatura interior y exterior en grados Fahreheit o Celsius.
15. Display humedad interior y exterior en grados Fahreheit o Celsius.
16. Calendario perpetuo.
17. Configuración de zona horaria.
18. Alarma de tiempo.
19. Retroiluminación de luz LED en el display.
20. Colgante de pared o de forma independiente.
21. Recepción instantánea sincronizada.

Figura 22 Manual estación meteorológica MA3081 PRO
Fuente (Meteoagro SAS, 2017)

Anexo 2

A continuación, se muestran las gráficas descritas en los resultados para los meses faltantes.

- **<u>Histogramas de frecuencia de Velocidad de vientos.</u>**

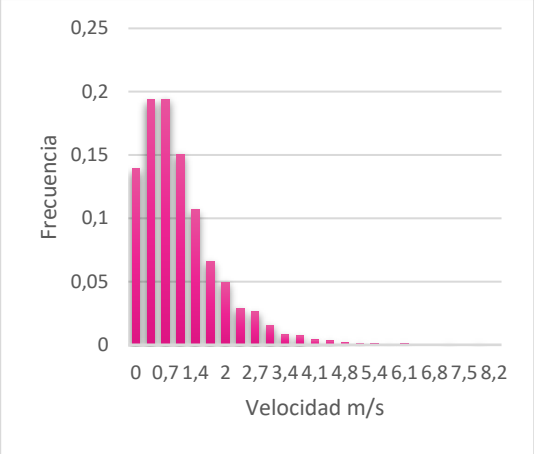

Figura 23 Histograma de Velocidad del Viento para Mayo

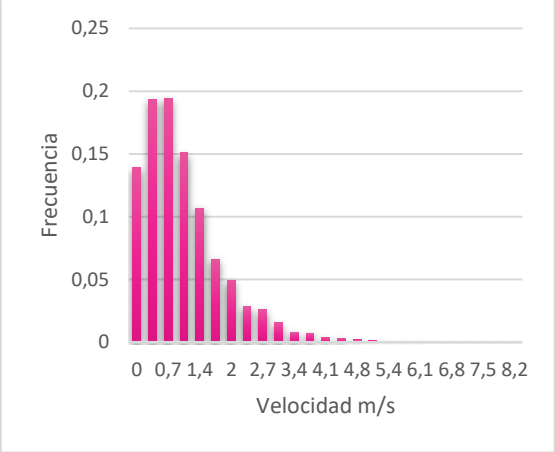

Figura 24 Histograma de Velocidad del Viento para Junio

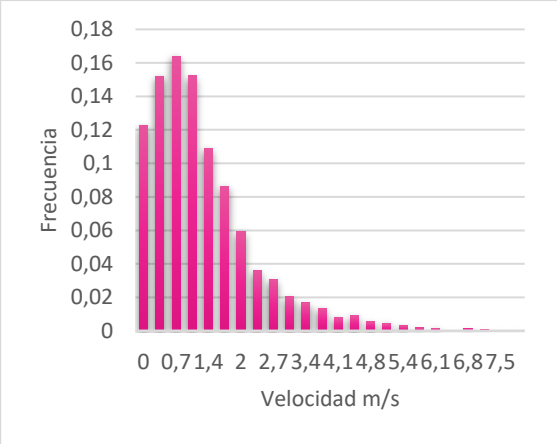

Figura 25 Histograma de Velocidad del Viento para Julio.

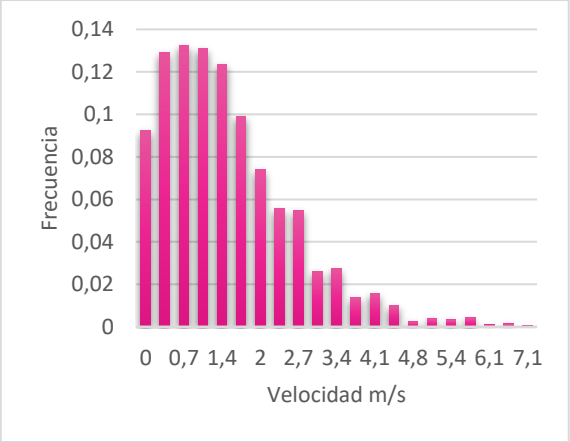

Figura 26 Histograma de Velocidad del Viento para Agosto.

- **Rosa de vientos.**

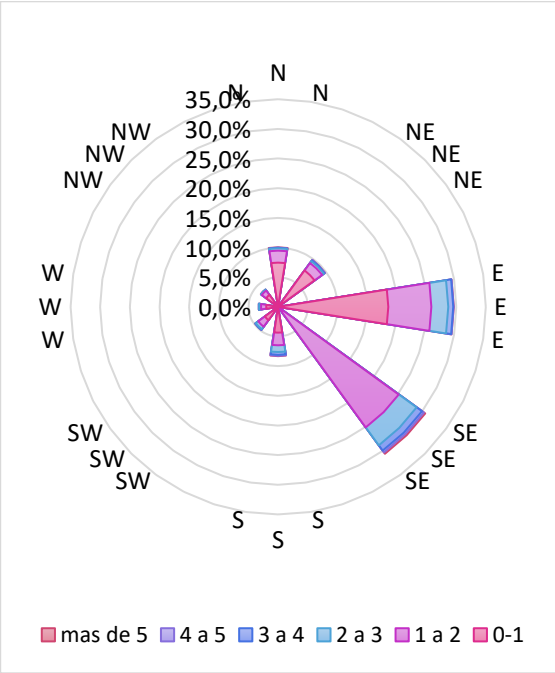

Figura 27 Rosa de vientos Abril

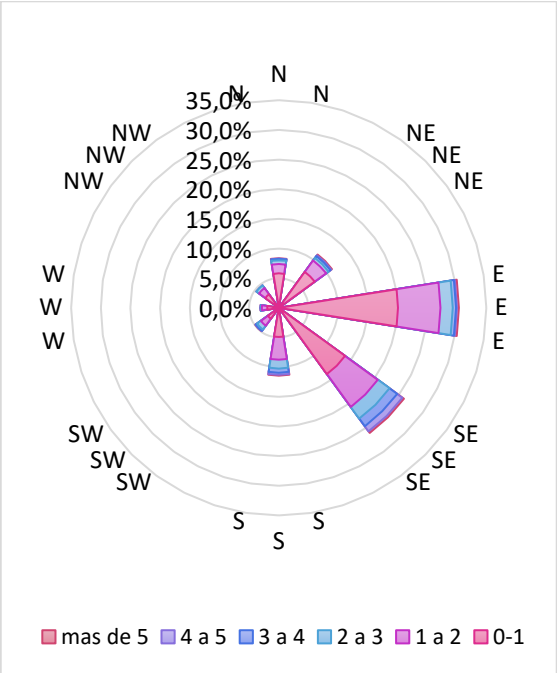

Figura 28 Rosa de vientos Julio.

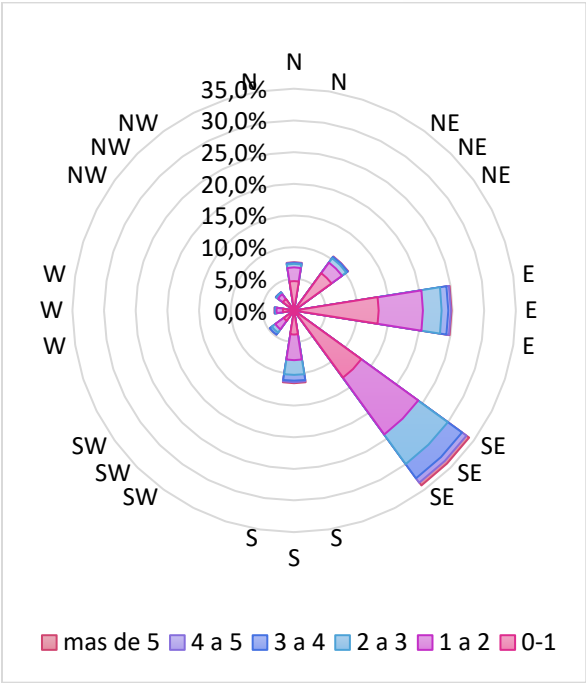

Figura 29 Rosa de vientos Agosto.

- **<u>Energía eólica diaria.</u>**

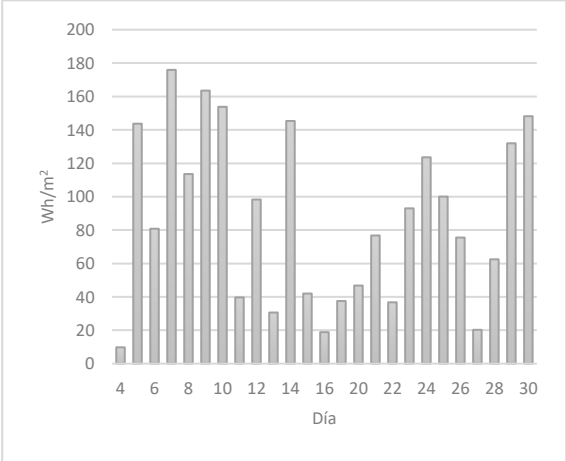

Figura 30 Energía Eólica diaria en Junio

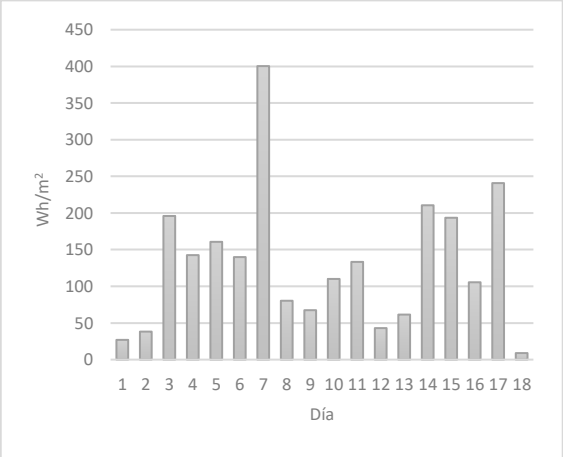

Figura 31 Energía Eólica diaria en Julio

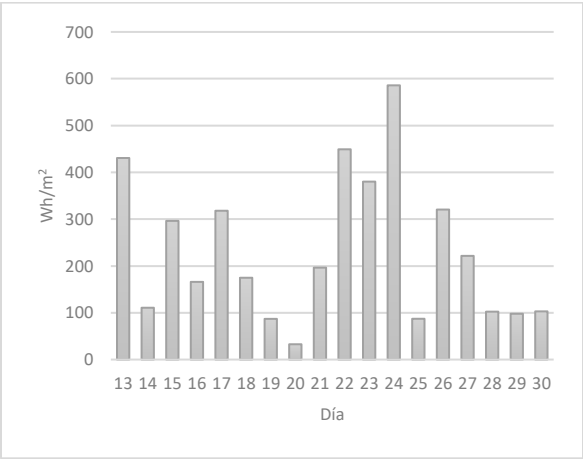

Figura 32 Energía Eólica diaria en Abril.

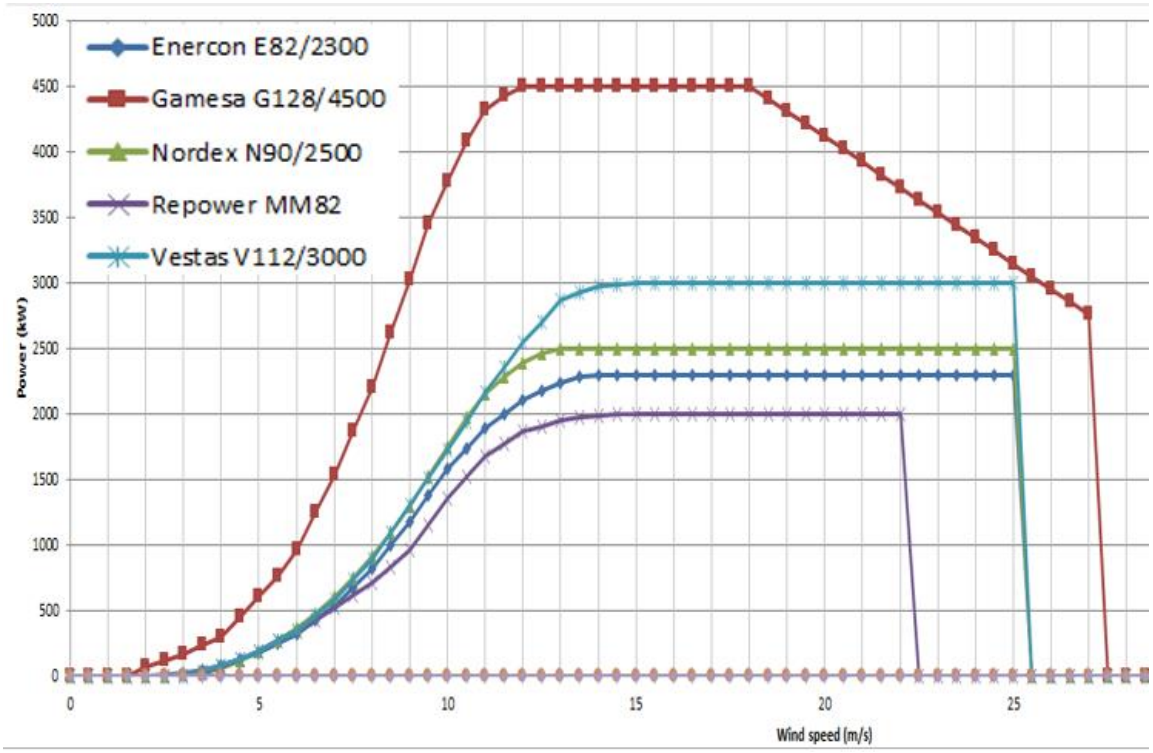

Figura 33 Curvas de potencia para aerogeneradores de diferentes marcas. Fuente (Danish Wind Industry Association, 2003)

Tabla 2 Potencias a partir de la velocidad de arranque para Aerogeneradores comerciales.

Productor	**Potencia (kW)** **Velocidad del viento (m/s)**							
	0	**0,5**	**1**	**1,5**	**2**	**2,5**	**3**	**3,5**
Enercon	0	0	0	0	3	12	25	50
Gamesa	0	0	0	0	75	120	165	230
Nordex	0	0	0	0	0	0	5	17
Repower	0	0	0	0	0	0	0	25
Vestas	0	0	0	0	0	0	0	36

Fuente (Danish Wind Industry Association, 2003)

- **<u>Energía solar diaria.</u>**

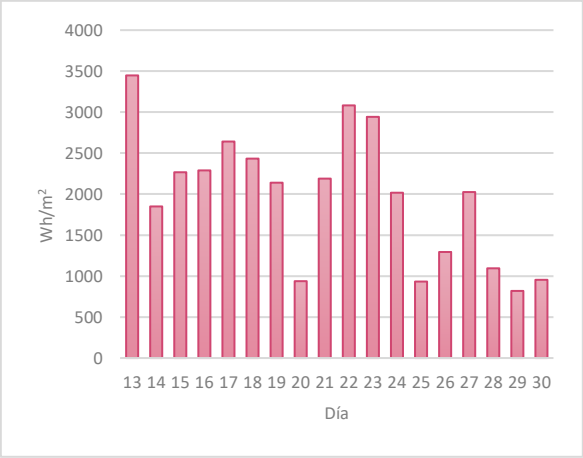

Figura 34 Energía Solar diaria de Abril.

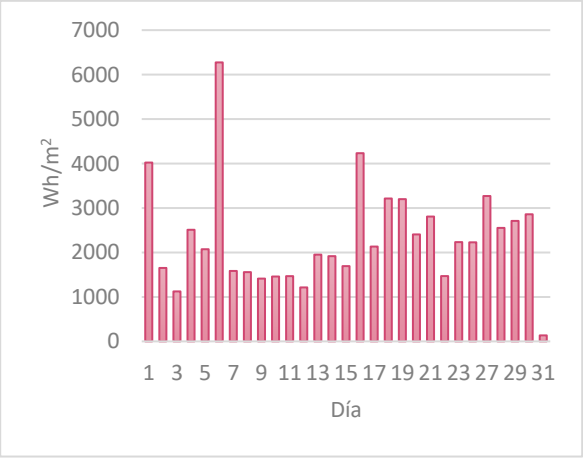

Figura 35 Energía Solar diaria de Mayo

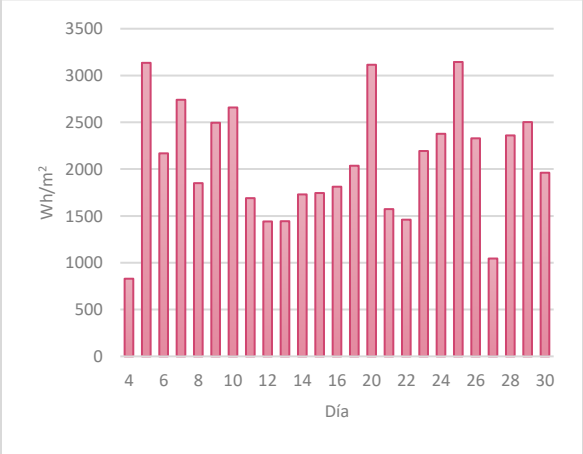

Figura 36 Energía Solar diaria de Junio.

- **<u>Cantidad de agua lluvia diaria y mensual</u>**

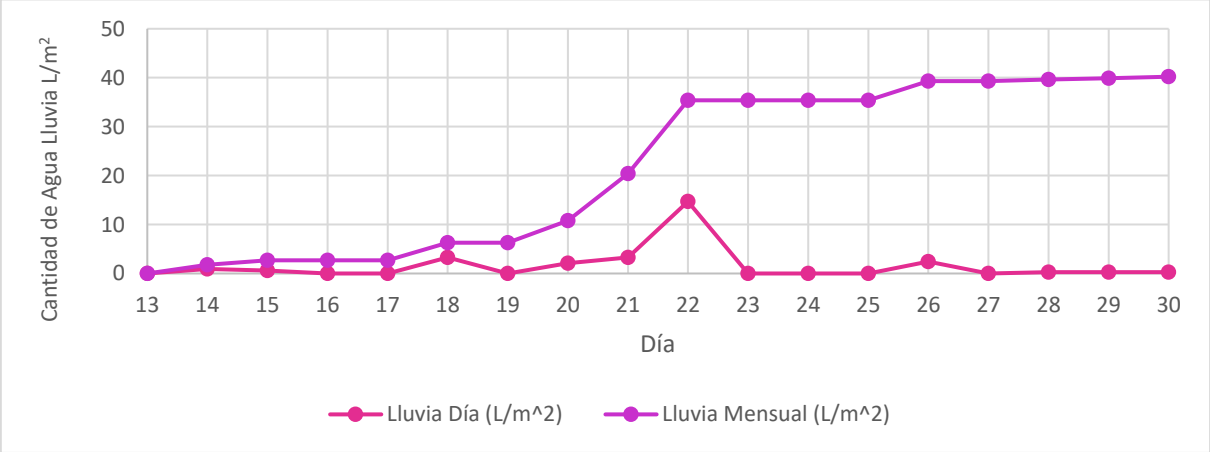

Figura 37 Cantidad de agua lluvia diaria y mensual de Abril.

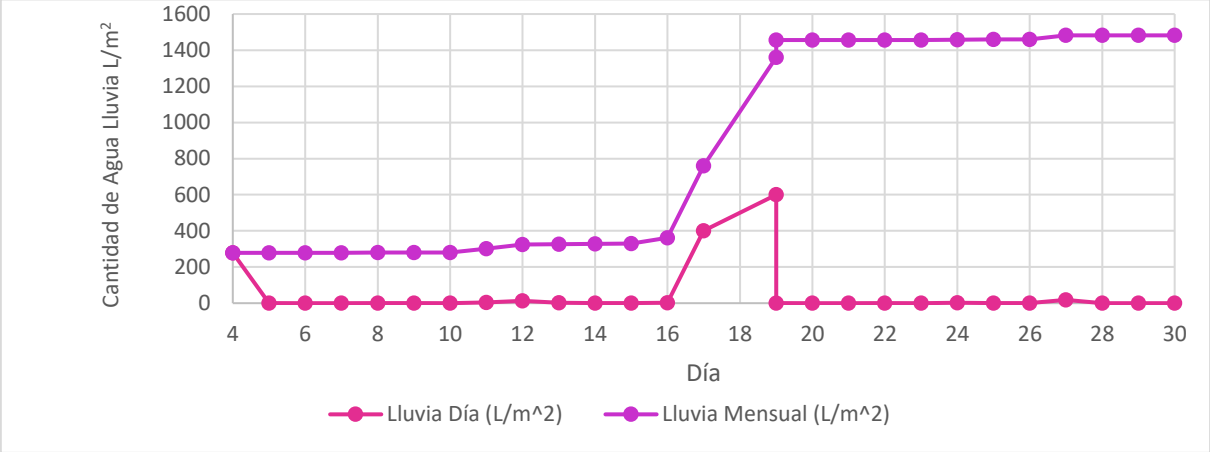

Figura 38 Cantidad de agua lluvia diaria y mensual de Junio.

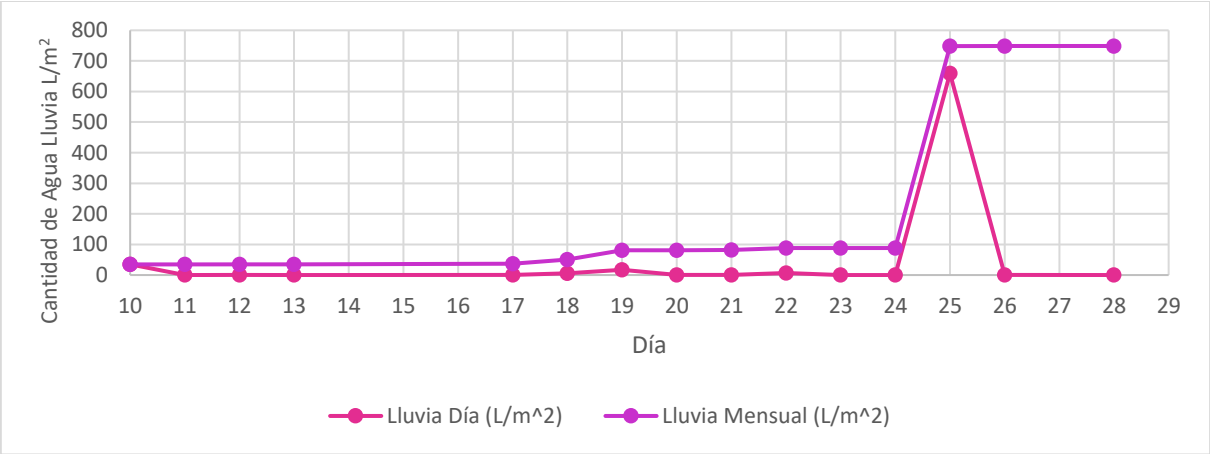

Figura 39 Cantidad de agua lluvia diaria y mensual de Agosto.