



Evaluación de pre-factibilidad del sistema *Wind Tree* de producción de energía eólica en la ciudad de Bogotá

David Felipe Garcia Olaya

Código: 1901-010

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, 2019-1

Evaluación de pre-factibilidad del sistema *Wind Tree* de producción de energía eólica en la ciudad de Bogotá

David Felipe Garcia Olaya

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director: David Felipe Beltrán

Línea de Investigación: Gestión integral sustentable, Infraestructura sustentable

Código: 1901-010

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019-1

Acta de sustentación

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

(Dedicatoria)

Su uso es opcional. En ella el autor del trabajo dedica su trabajo en forma especial a quienes considere y/o entidades

Por ejemplo:

A mis padres. ...

Agradecimientos

Reconocimiento a las personas y a las instituciones que ayudaron en la realización de la investigación.

1. Tabla de Contenido

1. Tabla de Contenido	1
2. Listado de Figuras	2
3. Listado de Tablas	3
Siglas	4
4. Resumen	5
5. Abstract	5
6. Introducción	6
7. Planteamiento del problema	7
8. Justificación	8
9. Objetivos	9
10. Marco de referencia	10
10.1 Antecedentes	10
10.1.2 La cosecha de energía eólica	10
10.2 Estado del arte	10
10.2.1 Aerogeneradores.....	10
10.2.2 Aerogeneradores pequeños	11
10.2.3 Sistema <i>Wind Tree</i>	13
10.2.4 Treepods	15
10.2.5 V-AIR.....	15
10.2.6 Estaciones meteorológicas	16
10.2.7 Sistema de producción de energía urbana	16
10.3 Marco conceptual	17
10.4 Marco teórico	18
10.4.1 Transformación de la energía	18
10.4.2 Pérdida de la energía	19
10.4.3 Ley de Betz.....	19
10.4.4 Aerodinámica de las turbinas eólicas	19
10.4.5 Efecto Bernouilli	20
10.5 Marco normativo	20

10.6 Marco geográfico	22
10.7 Marco institucional.....	23
11. Marco Metodológico	24
<i>11.1 Fase 1. Caracterización de información sobre el régimen de viento en la ciudad de Bogotá.</i>	<i>24</i>
<i>11.2 Fase 2. Evaluación de las variables económica, ecológica y social en los puntos con viento favorable en la ciudad de Bogotá.....</i>	<i>24</i>
<i>11.3 Fase 3. Proposición de una guía de implementación del sistema Wind Tree</i>	<i>28</i>
12. Resultados y Análisis.....	34
<i>12.1 Fase 1. Caracterización de información sobre el régimen de viento en la ciudad de Bogotá.</i>	<i>34</i>
<i>12.2 Fase 2. Evaluación de las variables económica, ecológica y social en los puntos con viento favorable en la ciudad de Bogotá.....</i>	<i>49</i>
<i>12.3 Fase 3. Proposición de una guía de implementación del sistema Wind Tree</i>	<i>52</i>
13. Conclusiones	58
14. Recomendaciones	59
15. Bibliografía	60

2. Listado de Figuras

<i>Figura 1. Esquema de funcionamiento de un aerogenerador.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. HAWTs</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3. VAWTs</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4. Vista frontal y superior del sistema Wind Tree</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5. Esquema de instalación eléctrica de Wind Tree.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6. Curva de potencia del Aeroleaf.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7. Aerogeneradores de eje vertical de V-AIR</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8. Aerogenerador con eje horizontal Venturi y sus partes.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9. Localización de Bogotá en Colombia, área de estudio</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10. Ubicación de red monitoreo de calidad del aire Bogotá (RMCAB).</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11. Flujograma metodología</i>	<i>30</i>
<i>Figura 12. Mapa de vientos geo portal IDEAM, en Colombia.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 13. Mapa de vientos geo portal IDEAM, acercado a Bogotá.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 14. Graficas por Estación año 2011</i>	<i>36</i>
<i>Figura 15. Graficas por Estación año 2012</i>	<i>37</i>
<i>Figura 16. Graficas por Estación año 2013</i>	<i>38</i>

<i>Figura 17. Graficas por Estación año 2014</i>	39
<i>Figura 18. Graficas por Estación año 2015</i>	40
<i>Figura 19. Graficas por Estación año 2016</i>	41
<i>Figura 20. Graficas por Estación año 2017</i>	42
<i>Figura 21. Graficas por Estación año 2018</i>	43
<i>Figura 22. Convenciones de evaluación para las estaciones</i>	44
<i>Figura 23. Estación Usaquén</i>	45
<i>Figura 24. Estación Sagrado Corazón</i>	45
<i>Figura 25. Estaciones Guaymaral y Suba</i>	45
<i>Figura 26. Estaciones Bolivia y Las Ferias</i>	46
<i>Figura 26. Estaciones Kennedy y Carvajal</i>	46
<i>Figura 28. Estación Simón Bolívar</i>	46
<i>Figura 29. Estación Fontibón</i>	47
<i>Figura 30. Estación Puente Aranda</i>	47
<i>Figura 31. Estación Tunal</i>	47
<i>Figura 32. Estación San Cristóbal</i>	48
<i>Figura 33. velocidad del viento promedio multianual RMCAB.</i>	52
<i>Figura 34. Esquema del sistema Wind Tree y su funcionamiento</i>	54

3. Listado de Tablas

<i>Tabla 1. Marco normativo referente a la energía renovable eólica en Colombia</i>	20
<i>Tabla 2. Síntesis de los registros de información</i>	24
<i>Tabla 3. Matriz de evaluación de variables</i>	25
<i>Tabla 4. Convenciones para evaluación de la matriz</i>	25
<i>Tabla 5. Comportamiento anual de la velocidad del viento en las estaciones</i>	25
<i>Tabla 6. Convenciones de evaluación por año.</i>	26
<i>Tabla 7. Calificaciones teniendo en cuenta ponderado por estación</i>	26
<i>Tabla 8. Producción de energía por estación.</i>	26
<i>Tabla 9. Rangos de producción energía sistema Wind Tree</i>	27
<i>Tabla 10. Convenciones de producción de energía</i>	27
<i>Tabla 11. Tarifa energía por estrato</i>	27
<i>Tabla 12. Evaluación de costo de tarifa por estrato</i>	28
<i>Tabla 13. Evaluación tasa de retorno inversión Colombia</i>	28
<i>Tabla 14. Tabla Resumen</i>	28
<i>Tabla 15. Tabla metodológica de la investigación</i>	30
<i>Tabla 16. Comportamiento anual de la velocidad del viento en las estaciones</i>	43
<i>Tabla 17. Calificaciones por estrato de estaciones</i>	48
<i>Tabla 18. Tarifa energía por estrato</i>	49
<i>Tabla 19. Matriz de evaluación de variables.</i>	50
<i>Tabla 20. Tabla de retorno de inversión.</i>	51
<i>Tabla 21. Revoluciones por minuto en relación a la velocidad del viento</i>	52

Tabla 22. Velocidad del viento m/s relación con energía producida 53

Siglas

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

RM CAB: Red de Monitoreo de Calidad del aire de Bogotá

SDA: Secretaria Distrital de Ambiente

UPME: Unidad de Planeación Minero energética

4. Resumen

La energía eólica es un tipo de energía renovable con alto potencial de uso desde los puntos de vista económico, social y ecológico. Este proyecto de investigación tiene como objetivo principal evaluar de forma preliminar las condiciones de viabilidad del sistema *Wind Tree*, en zonas donde el régimen de vientos pueda ser considerado como favorable en la ciudad de Bogotá. La metodología tuvo en cuenta la caracterización de información del sistema *Wind Tree* según datos de ficha técnica, el análisis de datos de velocidad de viento en diferentes puntos de la zona urbana de Bogotá en un período entre 2011 y el 2018, tomando como base la información suministrada por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). Se procesan los datos a través de análisis estadístico multitemporal de la velocidad promedio del viento con el fin de cotejar el posible comportamiento frente al funcionamiento del sistema *Wind Tree*, para lo cual es necesario que se supere el umbral de velocidad de 2,0 m/s. Posteriormente, se evalúa el costo de energía en las diferentes locaciones de acuerdo con datos de la RMCAB y la Secretaría Distrital de Ambiente con el fin de alimentar una matriz de evaluación, para poder seleccionar la locación de operación óptima que permita la implementación del sistema *Wind Tree* y por último se plantea una guía de recomendación del sistema, que permita su análisis en otras locaciones a nivel nacional. Entre los resultados relevantes del presente estudio se encuentra que la estación Kennedy presenta los resultados más favorables para la implementación de *Wind Tree*; sin embargo, a pesar de las ventajas ambientales, los costos de inversión pueden ser relativamente altos para implementar el sistema y que se genere un retorno a la inversión atractivo. Se sugiere que el sistema sea implementado en otras regiones de Colombia con un régimen de vientos más favorable y compatible con el sistema.

Palabras clave: Sistema *Wind Tree*, energía eólica, aerogeneradores verticales (VAWTs), pre-factibilidad.

5. Abstract

Wind energy is a type of renewable energy with a high potential from the economic, social and environmental points of view. This research has the main goal of evaluating the viability conditions of the *Wind Tree* system, in areas where the wind regimen can be considered as positive in the city of Bogota. The methodology considered the information characterization of the *Wind Tree* system, according to technical sheet data, the wind velocity analysis in different points of the urban area of Bogota in a period of time between 2011 and 2018, considering the information provided by the Bogota Air Quality Monitoring System (RMCAB). The data is processed through multitemporal statistical analysis of the average wind velocity to collate the possible behavior with the functioning of the *Wind Tree* system, for which is necessary to surpass a velocity limit of 2,0 m/s. Afterwards, the energy cost is evaluated in different locations according to the information from RMCAB and the Environmental District Secretariat to fill an evaluation table, in order to be able to select the optimal location for the *Wind Tree* system implementation, and lastly, a recommendation guide is proposed, permitting its analysis for the implementation elsewhere in the country. Between the most important results it's the fact that the Kennedy station is the best one for the system implementation, however, despite the environmental advantages, the investment costs may be relatively high to implement the system and that generates an attractive investment return. It is suggested that the system is implemented in other regions of Colombia with a better and more compatible behavior of the wind.

Keywords: *Wind Tree* system, wind energy, vertical wind turbines (VAWTs), pre-feasibility.

6. Introducción

En la actualidad, los avances tecnológicos en temas ambientales, juegan un papel importante tanto para el medio ambiente como para el ser humano, quien ha buscado hacer de sus tecnologías cada vez más limpias, generando una menor carga de externalidades y pasivos reflejados en la contaminación de diferentes ecosistemas. El aprovechamiento de la energía eólica es uno de estos avances, que pretende llegar a generar energía renovable en grandes extensiones de espacio aprovechable y suplir las necesidades eléctricas de los habitantes que la requieren.

La presente investigación aborda temas de estudio relacionados no sólo con parques eólicos urbanos sino con una alternativa de aprovechamiento de recursos que genera co-beneficios para las ciudades en términos de generación de electricidad. En este punto es donde se genera la pregunta ¿por qué si la tecnología avanza, debemos afectar más la tierra y los ecosistemas para suplir nuestras necesidades? Esta investigación está encaminada hacia la disminución de dichas afectaciones con la generación de energía limpia, y a la concientización y apropiación de las personas acerca de desde donde sale y por qué sale la energía, contribuyendo a una economía sostenible en Colombia, en términos de producción de energía. Esto mediante una tecnología innovadora, denominada: el sistema *Wind Tree*, el cual consiste en un “árbol” de acero que cuenta con “hojas” como aerogeneradores verticales que permiten generar energía eléctrica a partir del flujo libre del aire.

Con el desarrollo de este proyecto, se busca incentivar la investigación y desarrollo de este tipo de sistemas de producción de energía desde fuentes alternativas en regiones con necesidades de abastecimiento energético y que tenga un valor social agregado, que como en el caso del sistema *Wind Tree*, se concientiza a la población sobre el poder de hacer un cambio sin necesidad de afectar negativamente la salud tanto de los ecosistemas como de los humanos, con el uso de tecnologías que cuentan con técnicas sostenibles que tienen la posibilidad de abastecer las necesidades de la población teniendo en cuenta su tendencia de menor costo en el tiempo. Este trabajo tiene como fin ampliar el campo de acción de las empresas de producción energética que no comprometan la biodiversidad y riqueza natural del país y que sea de beneficio no sólo económico sino ambiental.

El planteamiento de esta investigación se basa en información de New World Wind, la empresa desarrolladora del sistema *Wind Tree*, que fue analizado en conjunto con datos medidos en las diferentes estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RCMAB) de los años muestra entre 2011 y 2018, tomando como base la variable de velocidad de viento, la cual es el factor que implícitamente mostraría el potencial de generación energética si el sistema se pusiera en funcionamiento. A partir de la tasa de producción, se calcula cuanta energía sería posible producir y según las condiciones socioeconómicas de la ciudad, se analiza la viabilidad económica con respecto a la tasa de retorno de inversión. Finalmente se compila la información tecnológica y el funcionamiento de los aerogeneradores para proponer una guía de implementación del sistema *Wind Tree* en otras regiones.

7. Planteamiento del problema

Según la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia, la demanda de energía eléctrica y potencia máxima son de gran importancia en el despacho de los generadores eléctricos y tienen un aumento anual de aproximadamente 1 GWh para la región centro del país, donde se encuentra la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta tendencias de crecimiento poblacional, desarrollo económico y factores ambientales (Unidad de Planeación Minero Energética, 2017). Haciendo uso de datos como este, se da cuenta de la necesidad inminente de la investigación de energías alternativas que sean eficientes, sustentables y se desarrollen en el marco del crecimiento económico y demográfico del país.

La dependencia de combustibles fósiles en la economía y el incremento en la demanda de energía por los diferentes avances tecnológicos ha impulsado a una búsqueda de diferentes alternativas de energía limpia; a pesar de esto, son vistas como un área sin competitividad ante las tecnologías comunes, lo que conlleva a proponer un prototipo que se adapte a la ciudad de Bogotá y que pueda generar una sostenibilidad energética y aprovechando el viento de la ciudad. La mayor variación anual de los bienes regulados, la presentó el sector de energía eléctrica con un 8,82 % superando a los combustibles fósiles con un 7,28% (Revista Dinero, 2019)

La energía de Colombia es la cuarta más costosa de Latinoamérica, esto se debe a la necesidad de comprar energía spot o del mercado diario (Revista Dinero, 2015) ya que las hidroeléctricas y termoeléctricas suplen el 70% de la demanda y a pesar de ser tecnologías eficientes, el estado de distribución y la baja eficiencia de algunas centrales eléctricas hacen que el costo incremente. Si bien este es el caso a nivel nacional con respecto a los países latinoamericanos, se denota claramente la importancia de la creación de métodos más limpios y accesibles de energía, particularmente para el acceso a la electricidad, y un estudio en la ciudad de Bogotá, siendo la capital, tiene un peso muy importante sobre un análisis general del país. La diversificación de los mercados de producción de energía es la solución propuesta en esta investigación.

La problemática de la investigación radica en un estudio de pre-factibilidad desde un punto de vista diferente al que se tiene usualmente del uso de energía eólica, partiendo hacia un punto de vista de zonas urbanas. Lo que se busca, no es instalar un parque eólico dentro de la ciudad, sino aprovechar los vientos que esta tiene en diferentes locaciones de tal forma que se pueda generar energía limpia.

8. Justificación

El presente proyecto busca sentar una base en la investigación de aprovechamiento de la energía eólica en Colombia, particularmente, en su capital. Haciendo uso del sistema *Wind Tree*, productor de energía eléctrica gracias a la acción del viento, desde valores de velocidad del viento que otros sistemas considerarían como insignificantes. Las condiciones de régimen de viento urbanas tienen el potencial de generar electricidad al utilizar este tipo de sistema, de modo que su potencial pueda ser aprovechado en conjunto con las condiciones de régimen de viento en zonas urbanas.

Si bien en la actualidad existen diferentes maneras de producción de energía no convencional, como por ejemplo parques eólicos de turbinas convencionales en grandes ciudades, instalación de paneles de energía solar a gran escala, o el uso de combustibles no contaminantes, muchas de ellas tienen obstáculos al intentar ser implementadas, ya sea por cuestiones de espacio, económicas o tecnológicas propias de los países en vía de desarrollo. De esto la importancia de ondear y apoyar este tipo de investigaciones porque en un futuro los sistemas convencionales de producción de energía eléctrica **serán insuficientes para la demanda creciente de la misma (International Energy Agency, 2018)**. Es allí, donde la ingeniería ambiental entra a jugar un papel importante, aportando soluciones y haciendo, desde la investigación cada vez más eficientes estos sistemas de energía limpia.

Los medios convencionales de producción de electricidad, como las hidroeléctricas y termoeléctricas tienen un impacto ambiental a gran escala por su magnitud, tanto por confinar tantos caudales a un solo punto, como a la pérdida de biodiversidad de la misma zona (Rico, 2018). La postura de este proyecto de investigación se basa en la construcción de ciudades sostenibles adaptadas para el aprovechamiento de los recursos disponibles en sus condiciones propias como ciudad, como es el caso de los regímenes de viento influenciados por la presencia de obstáculos tales como edificios.

Esta investigación pretende contribuir en el marco económico desde un enfoque de ahorro por instalación de unidades productoras de energía no convencional que permitan diversificar las fuentes energéticas disponibles hasta el momento. Desde el punto de vista social, el proyecto no sólo se plantea como un método moderno, sustentable e ingenioso de producción de energía, si no que mejora la calidad de vida de las personas, tanto trabajadores como estudiantes, al ser una fuente de energía renovable que se puede localizar en parques o zonas amplias, sin ningún tipo de contaminación visual, y funcional de tal manera que puede ser replicada en una gran variedad de regiones.

Se busca explotar un campo alternativo de producción energética pensado principalmente para las condiciones propias de las ciudades, teniendo en cuenta el potencial eólico de los espacios disponibles para su implementación. Con la publicación de este informe de pre-factibilidad de investigación se busca incentivar el uso de esta tecnología, en regiones del país que tengan un régimen de viento considerado como favorable.

Mediante la evaluación de pre-factibilidad del sistema *Wind Tree* que está pensado para cumplir una necesidad de sostenibilidad y contribuir así a la implementación de la ingeniería ambiental en la ciudad de Bogotá, sobre los edificios, puesto que la disposición eólica en las terrazas de los mismos tiene una gran potencialidad que no se ha aprovechado como debería ser. La investigación pensada contribuye a contrarrestar los efectos del uso de combustibles fósiles, dejando de lado los sistemas convencionales de producción de energía y ayudar a la transición de energías fósiles a energías limpias y renovables

9. Objetivos general y específicos

General:

Evaluar las condiciones de pre-factibilidad de un dispositivo eléctrico basado en el sistema *Wind Tree*, en zonas donde el régimen de vientos sea considerado como favorable en la ciudad de Bogotá.

Específicos:

1. Caracterizar las condiciones de régimen de viento que sean más efectivas y viables para un sistema de generación de electricidad basado en la tecnología *Wind Tree* en la ciudad de Bogotá
2. Evaluar las variables económica, ecológica y social en los puntos con viento favorable considerable en la ciudad de Bogotá.
3. Desarrollar una guía de recomendación que permita implementar el sistema *Wind Tree* en el sitio más adecuado en la ciudad de Bogotá.

10. Marco de referencia

10.1 Antecedentes

10.1.1 La cosecha de energía eólica

El viento es una de las más antiguas y eficaces fuentes de energía conocidas. Los convertidores de energía eólica eran conocidos en civilizaciones como en Persia y en la China y durante muchos años los barcos de vela constituyeron un importante uso de la energía eólica. En el siglo pasado, los convertidores de energía eólica se utilizaban para accionar molinos, para moler granos y bombear agua (Rubio, Domínguez, Reneses, Barrio, Arbeteta, & Lechosa, 2011).

“El aprovechamiento de la energía eólica constituye una fuente de energía sumamente atractiva y ventajosa, no solamente para las empresas de servicios públicos, sino para la economía de un país en general” (Rubio, Domínguez, Reneses, Barrio, Arbeteta, & Lechosa, 2011).

En años recientes, por las condiciones medioambientales del planeta y el alto consumo de combustibles fósiles, ha aumentado la demanda de recursos energéticos que sean amigables con el medio ambiente; los proveedores de energía han reconocido la importancia de la energía eólica y han invertido en el desarrollo de turbinas eólicas. Este tipo de energía es la única energía renovable que ha crecido y se ha impuesto más rápido de lo que se había previsto (Kuhn, Marquis, & Rotatori, 2010).

Una de las razones por las que la capacidad energía eólica ha sido exitosa y reconocida es gracias a tecnologías mejoradas en las turbinas. Existen diversos componentes de una turbina eólica que se deben considerar, como lo son la torre, las cuchillas y su diseño innovador. Los nuevos desarrollos en la construcción de estructuras más altas, haciendo uso de materiales mejores y más livianos, han mejorado sus técnicas diseño y ha permitido construir turbinas más altas para captar mejores vientos a mayores alturas y con menores costos (Kuhn, Marquis, & Rotatori, 2010).

En la actualidad, la energía eólica es una de las fuentes de energía alternativas menos costosas y se está convirtiendo más accesible conforme la tecnología mejora y la infraestructura se desarrolla. Según Schefter, la meta de la implementación de la energía eólica es: “encontrar la combinación adecuada de tamaño, forma, materiales y locación que produzca la mayor cantidad electricidad por un menor costo” (Schefter, 1982). El emplear turbinas eólicas eficientes, que convierten la energía mecánica del viento en energía eléctrica utilizable, requiere el uso extenso de la física (Grogg, 2005).

10.2 Estado del arte

10.2.1 Aerogeneradores

El aerogenerador es uno de los métodos modernos que existen para la producción de energía limpia, especialmente en ciudades donde existen regímenes de viento recurrentes, estos, son una respuesta tecnológica a la recurrente pregunta: ¿Es posible generar energía “más limpia” de una manera sostenible, viable y sustentable? (Schefter, 1982).

Los aerogeneradores son una forma de producción de energía eólica que ha aumentado su auge recientemente. Un aerogenerador es un generador pequeño de electricidad que aprovecha el movimiento eólico, teniendo una capacidad de hasta 30 kW. Los aerogeneradores son instalados ya sea de forma solitaria o junto con sistemas fotovoltaicos para formar un sistema híbrido solar-eólico para descentralizar la generación de energía. Un aerogenerador es adaptable para la generación de energía en áreas sin electricidad que tienen velocidades de viento adecuadas (Federation of Indian Chambers of Commerce and Industry, 2012).

Los aerogeneradores o turbinas eólicas comunes son estructuras grandes que comúnmente se conocen como parques eólicos cuando hay varios aerogeneradores en un mismo sitio y comprenden grandes áreas de extensión. Existen tres componentes principales para la conversión de la energía a través de turbinas eólicas: el rotor o sistema de captación de viento, la caja de engranajes o multiplicadora y el generador eléctrico. En la *Figura 1* se muestra una síntesis del esquema de funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal. La turbina comienza a funcionar cuando el anemómetro detecta una velocidad de viento suficiente para producir electricidad. La velocidad del viento es un parámetro importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad. A mayor velocidad de viento, la energía que capte el aerogenerador es mayor (Universidad Politécnica de Catalunya, 2009). Los sistemas de giro colocan al aerogenerador en la dirección del viento y liberan los mecanismos de freno para que se produzca el movimiento libre del rotor (Cobreiro & Jiménez, 2014).

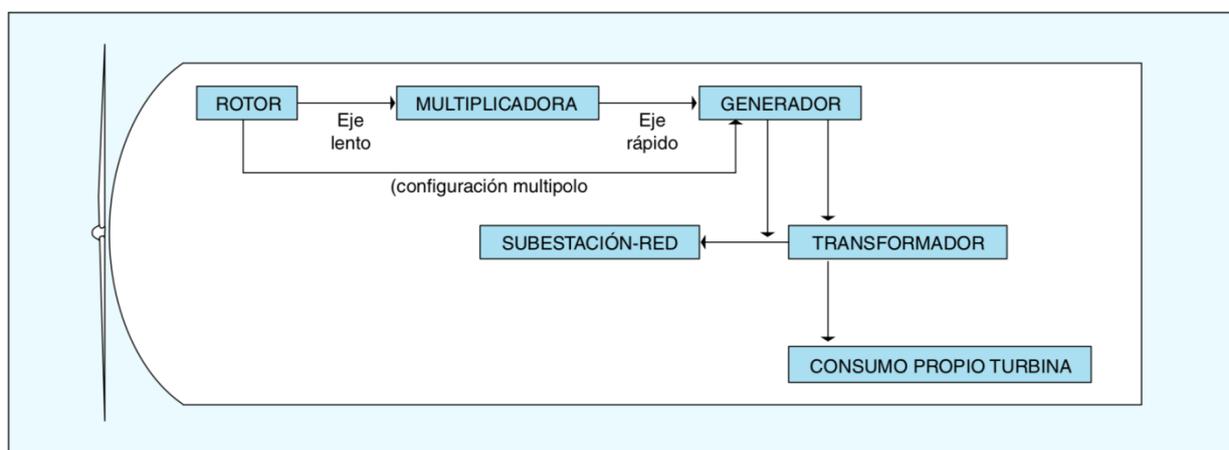


Figura 1. Esquema de funcionamiento de un aerogenerador. Fuente: (Cobreiro & Jiménez, 2014).

Los aerogeneradores obtienen su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido de las palas y de la velocidad del viento; esta es energía cinética convertida en energía mecánica que se transmite al eje lento (Universidad Politécnica de Catalunya, 2009). Dicho eje conecta el buje a la multiplicadora. Por el interior del eje discurren conductos del sistema hidráulico y eléctrico que regulan el movimiento de las palas. La función de la multiplicadora es conseguir que el eje de salida (eje rápido) gire a mayor velocidad que el de entrada, y así conseguir una velocidad de giro de 50 a 80 veces mayor. A la salida del eje rápido la energía mecánica se transforma en eléctrica (de baja o alta tensión) en el generador. Desde este, la energía se distribuye mediante conductores eléctricos específicos hacia la base de la torre donde generalmente se encuentra el transformador interno que transforma la energía de baja tensión (generalmente 690 V) en alta tensión (20.000 o 30.000 V) y así se envía a la red para consumo (Cobreiro & Jiménez, 2014).

10.2.2 Aerogeneradores pequeños

En un documento realizado por la Asociación Americana de Energía Eólica, el comité de aerogeneradores pequeños proyectó un total de 75.000 MW de capacidad de energía eólica para el 2020 generador por sistemas de mediana o pequeña escala. De estos, 15.000 MW se ven a futuro en locaciones que son adaptables para poner el sistema en azoteas. En Europa desde 2010, ha habido un incremento en el interés de utilizar energías renovables en los ambientes urbanos; las tecnologías consideradas más comunes son las instalaciones termasolares y fotovoltaicas-solares. Sin embargo, en los últimos años un número considerable de productores han desarrollado pequeños aerogeneradores especialmente diseñados para los ambientes urbanos. Estas tecnologías de pequeña escala de tecnologías renovables generan energía limpia, mientras que reducen las emisiones de dióxido de carbono. Los aerogeneradores urbanos generan la energía in-situ, evitando las pérdidas por transmisión, estos también proveen una declaración visual de energía sostenible, promoviendo así también una imagen más verde, de tal forma que hay un incremento del apoyo local, incluyendo políticos, industrias, autoridades, y en general el agrado de la población (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).

La popularidad de los aerogeneradores pequeños está creciendo en Europa y cada día existen más personas y compañías interesadas en instalar este tipo de energía en sus hogares o sus edificaciones. Sin embargo, ciertos aspectos desafiantes de estos aerogeneradores deben ser considerados como lo son: velocidad media del viento anual disminuida y flujo turbulento. La velocidad media disminuida puede ocurrir por la presencia de edificios, que reducen la velocidad del viento en altitudes superiores, donde resultan turbulencias por la interacción del viento con los mismos edificios y otros obstáculos. El flujo turbulento supone un reto debido al rápido cambio en la dirección del viento, ya que esto implicaría que el aerogenerador o la turbina debe reaccionar rápidamente a esta dirección cambiante. De esta manera, el reto es encontrar, crear o diseñar turbinas que puedan manejar adecuadamente la turbulencia, o encontrar las áreas urbanas con menores niveles de turbulencia, aquí se pueden considerar las azoteas de los edificios ya que el flujo del viento allí puede ser significativamente más alto pues se concentra al pasar por estos sitios (también se pueden considerar parques, campos de deporte, etc.) y además, cumplir con las expectativas de la sociedad de crear aerogeneradores que se integren apropiadamente con los edificios y las casas tanto estructuralmente como visualmente (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).

Existen a grandes rasgos, dos tipos de aerogeneradores que dependen de la orientación de su eje de rotación, los aerogeneradores con eje horizontal, ilustrados en La *Figura 2* (HAWTs por sus siglas en inglés: Horizontal Axis Wind Turbines) y los aerogeneradores con eje vertical, ilustrados en la *Figura 3* (VAWTs por sus siglas en inglés: Vertical Axis Wind Turbines) (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).



Figura 2. HAWTs. Fuente: (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).

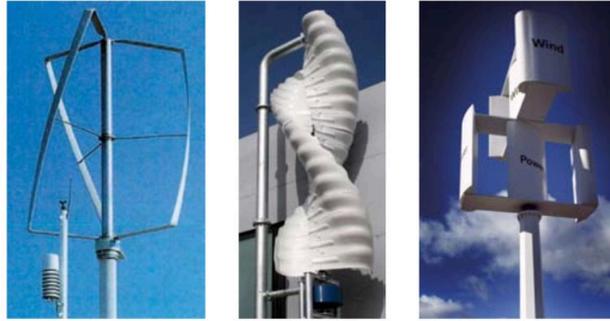


Figura 3. VAWTs. Fuente: (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).

Las HAWTs, son el tipo de aerogeneradores más asociados con energía eólica, que posee un eje horizontal con 3 hojas. El rotor debe estar posicionado hacia la dirección del viento por medio de una cola o con un sistema que se mueva en dirección del viento. Los HAWTs son sensibles a los cambios en la dirección del viento y a la turbulencia, teniendo un efecto negativo en su funcionamiento. Por otro lado, los VAWTs son diseñados usualmente para los sistemas urbanos; los cambios en la dirección del viento tienen menos efectos negativos en este tipo de aerogenerador ya que no debe ser posicionado en la dirección del viento. Sin embargo, la eficiencia en general de estos aerogeneradores al producir electricidad, es menor (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).

10.2.3 Sistema Wind Tree

Inspirado en los árboles, *Wind Tree* es un Sistema de producción eléctrica complementario, basado en un aerogenerador con eje vertical llamado *Aeroleaf*. Esta innovación captura todos los tipos de viento, ya sea turbulento o laminar. Cada *Aeroleaf* esta hecha de un generador sincrónico con imanes permanentes. Los generadores desarrollados por New World Wind tienen un estator (bobinado de cobre vinculado a una tarjeta electrónica) y un rotor hecho de dos platos que sostienen los imanes. Es iniciado por la rotación de la hoja, sin ningún tipo de cinturones o engranajes, los imanes crean un campo magnético, generando tensión y corriente alternativa (AC por sus siglas en inglés). Para permitir la adición de potencia al *Aeroleaf*, se conmuta corriente continua antes de la generación del AC final (New World Wind, 2018).

Gracias a la tarjeta electrónica diseñada por New World Wind, la producción de corriente es optimizada con respecto a la velocidad del viento. El microcontrolador de cada *Aeroleaf* garantiza una regulación óptima del sistema. Cada diez milisegundos se realiza una computación para enviar un(a) instrucción de voltaje/corriente a la velocidad rotatoria *Aeroleaf* para generar así la mayor cantidad de potencia (New World Wind, 2018).

Wind Tree es una estructura de acero (tronco y ramas) en la cual se instalan 54 *Aeroleafs*. Cada *Aeroleaf* es independiente, lo que facilita tanto la producción como el mantenimiento, pues cada turbina puede ser monitoreada sin detener toda la producción en general (ensamble eléctrico en paralelo) y sin riesgo (bajo voltaje de 48V). La estructura del árbol se puede observar desde el punto de vista superior y frontal en la Figura 3. *Wind Tree* mide de alto 30,2 pies (9,2 metros) y de ancho el largo que ocupa es de 26,2 pies (7,9 metros) en total; la altura de la rama más baja es de 11,5 pies (3,5 metros) y el largo de cada *Aeroleaf* es de 3 pies (90 centímetros). El peso total de la estructura es de 2500 kilogramos. Se debe contar con un área de aproximadamente 15m² para el almacenamiento (o posicionamiento) de la estructura y debe tener acceso a un camión de instalación o desinstalación. Un árbol completo en funcionamiento puede producir 5400 W de energía (New World Wind, 2018).

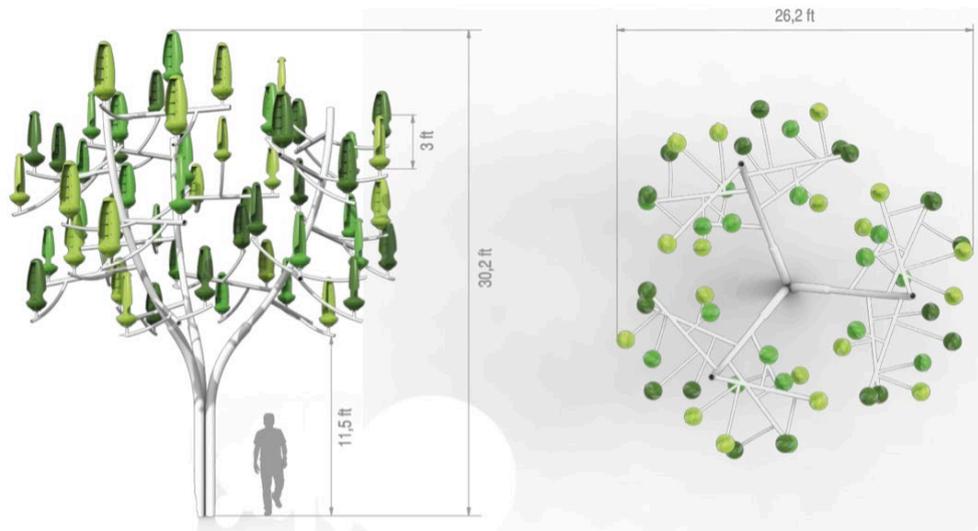


Figura 4. Vista frontal y superior del sistema Wind Tree. Fuente: (New World Wind, 2018).

Para el esquema de instalación eléctrica que *Wind Tree* requiere, New World Wind provee un armario eléctrico, este está hecho de:

- Una batería, que permite regular temporalmente la producción de electricidad, para limitar los picos y únicamente para necesidades de corto plazo. No es para almacenamiento.
- La fuente de poder ininterrumpida (UPS por sus siglas en inglés) permite proporcionar al equipo receptor una tensión alterna, directamente conectado a la red local.
- Todos los sistemas de seguridad requeridos para conexión a la red eléctrica (cable fusible, interruptores, pararrayos e interruptor de aislamiento).

Como se muestra en la Figura 4, el armario eléctrico está disponible para conectarse a la red local.

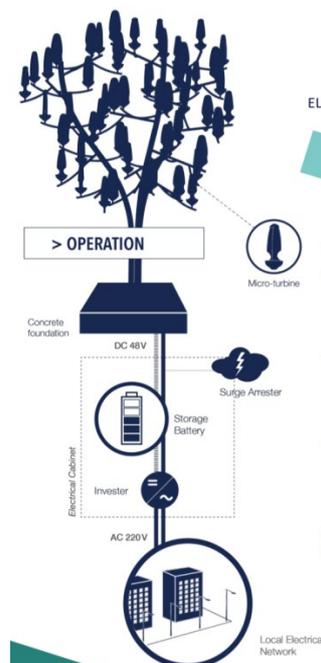


Figura 5. Esquema de instalación eléctrica de Wind Tree. Fuente: (New World Wind, 2018).

La aerodinámica de la *Aeroleaf* ha sido optimizada para la menor velocidad de viento, con una velocidad mínima ajustada a 2,0 m/s para que la turbina entre en operación productiva. Por seguridad, *Aeroleaf* tiene integrado un sistema de frenado, el cual es activado cuando se

excede una velocidad del viento de 18,0 m/s que corresponde a una velocidad rotatoria de 700 revoluciones por minuto (rpm); entonces la energía producida es limitada a 100W por turbina (5400W para el árbol completo) (New World Wind, 2018). En la Figura 5 se observa la curva de potencia del *Aeroleaf* por defecto, incluyendo el sistema de frenado.

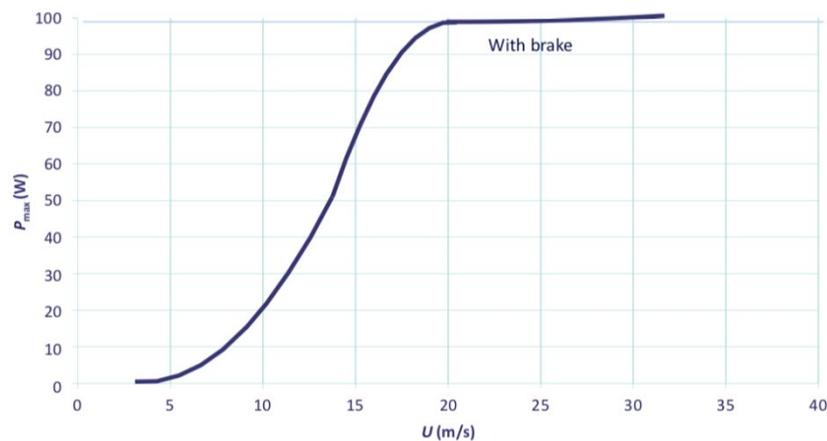


Figura 6. Curva de potencia del *Aeroleaf*. Fuente: (New World Wind, 2018).

10.2.4 Treepods

Es un proyecto que presenta unos árboles multidisciplinares que además de remover el CO₂ y transformarlo en oxígeno, estando provistos de paneles solares y hechos de plástico reciclado, incluyendo un balancín en la base y sirviendo como luminaria urbana. Se basan en el empleo de tecnología de oscilación de humedad, desarrollada por el Dr. Klaus Lackner (Lenfest Center en la Universidad de Columbia), que permite la captura eficiente de la energía de CO₂ del aire, cerrando el ciclo del carbono y la creación de un producto valioso. Inspirado por él, The Boston's TREEPODS INIATIVE, busca ayudar a la consecución de los objetivos de Boston en los programas de reducción de carbono (TYS Magazine, 2014).

10.2.5 V-AIR

Inició en 2008 con el nombre de Urban Green Energy (UGE) y rápidamente se convirtió en el líder mundial de VAWTs, con tecnología Darieus, gracias a la calidad y estética de sus máquinas. A finales de 2016, se renombró como V-AIR, una compañía que busca atender a los desafíos del mundo relacionados con la energía por medio de soluciones innovadoras, cosechando la energía cinética del viento, las turbinas V-Air Europe proveen tecnología avanzada, creando una fuente dependiente de energía. V-AIR produce turbinas de eje vertical para la producción de energía renovable y asequible alrededor del mundo (Vision Air Wind, 2019). Son creadores de turbinas como las observadas en la *Figura 6*.

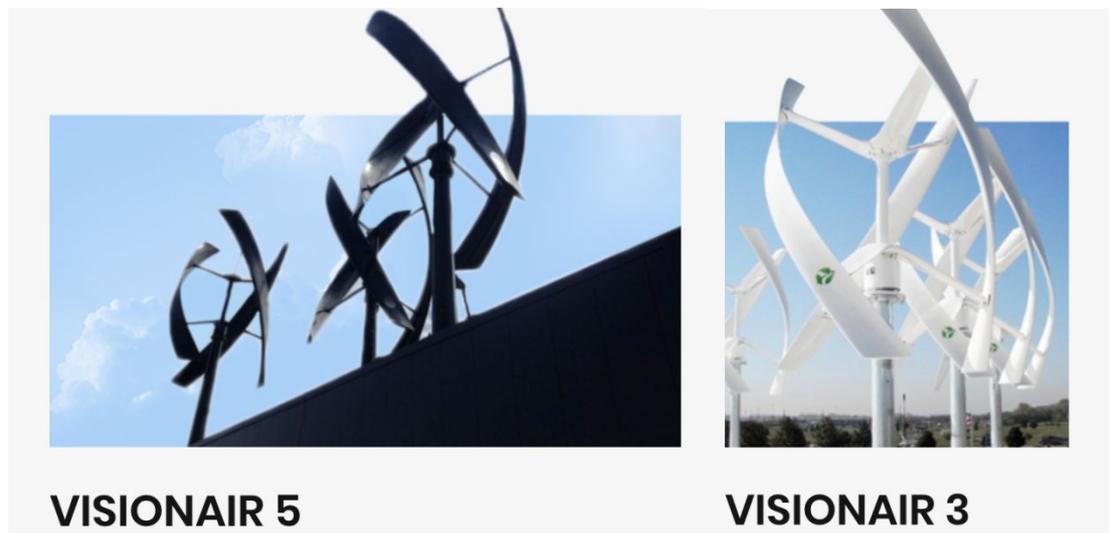


Figura 7. Aerogeneradores de eje vertical de V-AIR. Fuente: (Vision Air Wind, 2019)

10.2.6 Estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas son definidas como el lugar donde se realizan mediciones y observaciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos como velocidad del viento, material particulado, dirección de viento, precipitación entre muchas otras. Las estaciones meteorológicas son usadas como registro de información de mediciones y observaciones puntuales de los diferentes parámetros, cada parámetro tiene un instrumento especializado para su medición. Esto para así poder establecer un comportamiento atmosférico (PCE inst., 2018).

El instrumento predeterminado para medir un parámetro como la velocidad del viento se llama anemómetro. Consiste en un instrumento para poder medir la velocidad de gases ya sea de un conducto o de un flujo no confinado como el viento atmosférico. Es usado comúnmente para determinar la velocidad del viento ya que detecta el cambio en alguna propiedad física del fluido. (Omega, 2019)

10.2.7 Sistema de producción de energía urbana

Un sistema de producción de energía urbana, conocido como Venturi, es un ejemplo de aerogeneradores horizontales/verticales con cola, pero con una construcción de rotor innovadora: seis aspas semi-circulares que juntas forman una construcción esférica. En general los conceptos de aerogeneradores solo producen una fuerza en la dirección del viento, de donde no se puede extraer más energía que aquella que es suministrada perpendicular al plano del rotor. Sin embargo, si el flujo converge hacia arriba del rotor del aerogenerador y se desvía hacia abajo, el rotor es capaz de extraer más energía del flujo del viento; esto le permite al aerogenerador Venturi generar electricidad a partir de flujos turbulentos a velocidades de viento muy pequeñas. El desarrollo de un concepto operacional es interesante, porque sus eficiencias adecuadas pueden ser realizadas a diferencia de los conceptos convencionales de aerogeneradores en ambientes urbanos; esto le permite al diseño de pequeños aerogeneradores funcionar de manera costo-efectiva en locaciones urbanas (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).

Las aspas de un aerogenerador pequeño HAWT Venturi están adjuntas al buje (hub en inglés) en ambos extremos y cuando está rotando se observa una esfera. Gracias a este comportamiento aerodinámico, los aerogeneradores Venturi crean un patrón de flujo de viento que genera áreas de baja presión dentro de la esfera lo cual atrae al aire en frente del rotor

hacia la esfera. Después que el rotor ha absorbido la energía del aire, el aire que tiene poca energía es balanceado hacia afuera a través de los planos Venturi y es llevada por el flujo de aire alrededor; esto permite que potencia adicional sea extraída del viento para una turbina que es relativamente pequeña. Los componentes de la *Energy Ball o Venturi* se ilustran en la *Figura 8*, que muestra las aspas esféricas, el sistema de orientación del viento, el soporte mecánico, el poste y la posición del generador eólico de tracción directa (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).

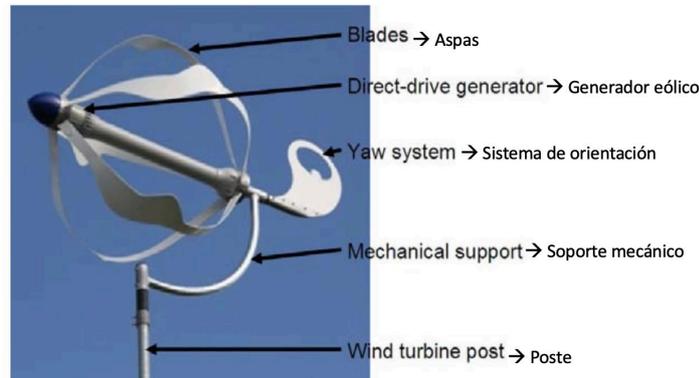


Figura 8. Aerogenerador con eje horizontal Venturi y sus partes. Fuente: (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009)

Esta máquina es construida directamente con la turbina para minimizar pérdidas por fricción, el uso de un generador eólico de tracción directa significa la habilidad de funcionar con velocidad variable o sin un elemento de contacto eléctrico entre el estator y el rotor, lo que es favorable desde el aspecto de mantenimiento y ruido. La eficiencia de los aerogeneradores es usualmente medida en términos de costo-efectividad, por ejemplo, el costo por kWh de electricidad producida. En este caso, la eficiencia puede ser expresada por el rendimiento medido por el número de kWh producidos por metro cuadrado del área del rotor (Paulides, Encica, Jansen, & Lomonova, 2009).

10.3 Marco conceptual

A continuación, se presentan los conceptos relevantes al proyecto de investigación relacionados con la producción de energía eólica.

La energía es la capacidad de hacer trabajo y se manifiesta de muchas formas que pueden intercambiarse: mecánica, calorífica, eléctrica, química, magnética, nuclear, solar, eólica, entre otras. Las distintas formas de energía se transforman unas en otras, y lo más importante es que en ese proceso la cantidad total de energía se conserva. Este fenómeno es conocido como principio de conservación de la energía (Sánchez, Trigueros, & Tagüena, 1999) (UNAM, 1997).

La energía mecánica tiene dos formas: cinética y potencial. La energía cinética se puede describir como la energía útil que posee un cuerpo en virtud de su funcionamiento o movimiento; la energía potencial es energía almacenada, útil sólo en potencia hasta su conversión en energía cinética, es decir que esta transformación (de potencial a cinética) supone un movimiento (UNAM, 1997).

Las fuentes de energía provienen de diferentes recursos naturales como la madera, el viento, el agua, el sol, los combustibles fósiles, etc. Estas se clasifican como renovables y no renovables, dependiendo de la durabilidad del recurso. Ante el agotamiento de los recursos

energéticos fósiles como el petróleo, se han planteado otras maneras de aprovechar y generar energía y así han surgido la energía nuclear, la energía solar, la hidroeléctrica, la eólica, la fotovoltaica, la geotérmica, la mareomotriz y la utilización de biogás (ABC Argentina, 2007). Las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana. El sol está en el origen de todas ellas porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica. El sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación, que provoca la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica (Moreno, 2013).

El viento es el movimiento del aire causado por el calentamiento diferencial de la superficie terrestre y la atmósfera, que presenta variaciones significativas en el tiempo y en el espacio. Se refiere específicamente al movimiento horizontal de las parcelas de aire. Es una magnitud vectorial caracterizada por tener velocidad y dirección (variable), con un desplazamiento determinado por la acción de diferentes fuerzas sobre las parcelas de aire, especialmente por las diferencias de presión (IDEAM, 2012)

La energía eólica se refiere al proceso de producir electricidad a partir del viento, o aire que fluye naturalmente en la atmósfera de la tierra. Las turbinas de aire modernas son utilizadas para capturar la energía cinética del viento y generar así electricidad (American Wind Energy Association, 2018).

Existen tres tipos principales de energía eólica; el primero es el viento con escala de utilidad, en el cual las turbinas eólicas que varían en tamaño produciendo desde 100kW hasta obtener una gran cantidad de MW, donde la electricidad es entregada a la red eléctrica y distribuida a cada usuario por operarios del sistema eléctrico. El segundo es el viento distribuido o “pequeño” que proviene de pequeños aerogeneradores que producen por debajo de 100kW que son utilizados directamente en una casa, una granja o un negocio pequeño y no están conectados a la red eléctrica. Por último, está el viento de las costas, donde las turbinas eólicas están construidas en grandes cuerpos de agua, usualmente sobre las costas continentales, este tipo es el más grande y que genera más potencia y electricidad (American Wind Energy Association, 2018).

Con respecto a los aerogeneradores, existen diversos términos que son importantes de abarcar, como los generadores que son aparatos que producen energía eléctrica a partir de otro tipo de energía; puede ser de tipo mecánico (alternador y dinamo) o químico (pila). La alta velocidad de rotación que se obtiene del sistema de transmisión se conecta al generador que produce electricidad a partir del movimiento, como en los tradicionales sistemas de vapor. El rotor está compuesto por las aspas y el eje al que están unidas (Moreno, 2013).

Al ser la presente investigación un estudio de pre-factibilidad, esta se define como la etapa de la preparación y ejecución de un proyecto, posterior al nacimiento de la idea inicial y anterior al estudio de factibilidad, donde se detallan más los aspectos señalados como términos de referencia, profundizando en cálculos, estimaciones e investigaciones, con el fin de identificar las alternativas convenientes, que posteriormente se estudiarán como factibles (Pardo, 2004). Como resultado de un estudio de pre-factibilidad se pretende descartar alternativas no factibles, seleccionar aquella alternativa que es técnica y económicamente mejor y pasar a la etapa de factibilidad o diseño (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2005).

10.4 Marco teórico

10.4.1 Transformación de la energía

Todas las formas de energía se pueden inter-convertir, teniendo lugar las conversiones de acuerdo a rigurosas leyes de cambio. Estas leyes son las de la termodinámica:

- ⇒ Primera ley: Ley de la Conservación de la Energía. Esta ley por definición indica que La energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma (UNAM, 1997), aplica para sistemas cerrados.
- ⇒ Segunda ley: Está directamente relacionada con la conversión de todas las formas de energía en calor y se define como: Los procesos implicados en las transformaciones de energía no ocurren espontáneamente a no ser que se produzca una degradación de energía desde una forma no azarosa a otra azarosa (UNAM, 1997).

10.4.2 Pérdida de la energía

Los niveles de pérdidas eléctricas constituyen una importante medida de eficiencia y sostenibilidad financiera del sector eléctrico. En el transporte de energía, estas pérdidas son referidas a la diferencia entre la electricidad que ingresa a la red y la que es entregada para el consumo final, y son reflejo del nivel de eficiencia de la infraestructura en transmisión y distribución. El concepto de pérdidas eléctricas incluye también la electricidad entregada pero no facturada, que se traduce directamente en pérdidas financieras y sirve como indicador del desempeño operacional de las empresas eléctricas (Jiménez, Serebrisky, & Mercado, 2014).

10.4.3 Ley de Betz

El desempeño de las máquinas eólicas es descrito por la ley de Betz que aplica para máquinas de viento con eje horizontal. Sin embargo, la eficiencia de máquinas de viento con eje vertical también es estimada relativamente a la potencia máxima calculada de la fórmula de Betz. Esta fórmula fue introducida por primera vez por el ingeniero alemán Albert Betz en 1919 y publicada en su libro: “Wind Energy and its Extraction through Windmills” publicado en 1926 (Ragheb, 2017).

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

El coeficiente de Betz sugiere que una turbina eólica puede extraer como máximo el 59,3% de la energía en una corriente de viento ininterrumpida. Considerando las pérdidas por fricción, la rugosidad de la superficie de las aspas y las imperfecciones mecánicas, este valor varía entre 35% y 40% de la potencia disponible en el viento bajo condiciones ideales (Ragheb, 2017).

10.4.4 Aerodinámica de las turbinas eólicas

La aerodinámica describe las fuerzas desarrolladas por los flujos de aire. Se consideran flujos estacionarios, toda partícula que llegue a un punto cualquiera P en el espacio lo hará con la

misma velocidad y dirección. Por lo tanto, la trayectoria seguida por una partícula que pase por el punto P , será seguida por cualquier otra partícula que alcance dicho punto. Dicha trayectoria es llamada línea de corriente, y tiene la propiedad de que el flujo de aire es tangente a ella en todo punto aerodinámico describe las fuerzas desarrolladas por los flujos de aire. Al considerar flujos (Universidad Nacional de la Plata, 2013).

Toda región en el espacio limitada por líneas de corriente es llamada tubo de flujo. De las definiciones anteriores, el flujo de aire a través de las paredes del tubo de flujo es nulo.

El flujo de aire m que atraviesa la sección transversal A de un tubo de flujo está dado por:

$$m = \rho_w \cdot A \cdot W$$

La relación que existe entre flujos de aire transversalmente en un tubo de flujo es establecida por la ley de continuidad:

$$\frac{d}{dx}(\rho_w \cdot A \cdot W) = 0$$

Donde x es la coordenada en la dirección del flujo. La ley de continuidad resulta del hecho que no existen fuentes ni sumideros de flujo. El aire, a velocidades subsónicas, puede considerarse incompresible, con lo cual ρ_w es constante. Debido a ello, la ecuación de continuidad se simplifica y establece que la velocidad del aire y la sección del tubo de flujo son inversamente proporcionales (Universidad Nacional de la Plata, 2013).

10.4.5 Efecto Bernoulli

El efecto *Bernoulli* dicta que, cuando un gas tal como el aire, fluye, su presión disminuye. Esta es la base de como funcionan los aviones: la forma de la sección transversal del ala, fuerza al aire a seguir un camino más largo sobre la parte superior del ala, de tal manera que incrementa su velocidad y creando una fuerza neta hacia arriba llamada elevación (Smith, 2010).

La ecuación de Bernoulli es otra relación fundamental de la dinámica de los fluidos, que se deriva del teorema de la conservación de la energía. Establece que a lo largo de un tubo de flujo se satisface:

$$\frac{d}{dx} \left(p + \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot A + \rho_w \cdot g \cdot z \right) = 0$$

Donde p es la presión, g es la aceleración gravitacional y z es la altura (Universidad Nacional de la Plata, 2013).

10.5 Marco Normativo

En el presente marco se determinan las leyes, decretos, resoluciones, por las cuales se ampara legalmente la producción de energía renovable con viento en Colombia, y se sintetiza en la *Tabla 1* que contiene las normas, la disposición y el artículo relacionado.

Tabla 1. Marco normativo referente a la energía renovable eólica en Colombia

Norma	Disposición
Constitución Política de Colombia 1991	Es pertinente considera que la Constitución Política es la ley suprema por la cual se establecen los derechos y deberes de los habitantes de la Nación, además de la organización de los poderes del Estado.
Ley 99 de 1993. Ley General Ambiental de Colombia	Que Por medio de esta ley se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental(SNA). En el que competen los asuntos de los recursos naturales que competen a este trabajo de grado.
Decreto Ley 2811 de 1974. Código Nacional de recursos Naturales	El presente decreto tiene por objetivo dar las bases normativas para el manejo de los recursos naturales renovables, además de propender por los derechos de las comunidades a disfrutar de un ambiente que contribuyan al bienestar físico. Lo cual compete al trabajo puesto que esta enfocado en investigación para implementación de tecnologías de energía renovable y aportar a la construcción de ciudades sostenibles y saludables.
Ley 697 del 3 de octubre de 2001,	sobre uso racional de energía, que define como propósito nacional avanzar hacia la utilización de fuentes renovables en pequeña escala y, particularmente, apoyar la investigación básica y aplicada para que, con el tiempo, se reduzcan costos y se amplíe la capacidad de energías como la eólica, la solar, la geotérmica o la de biomasa. Toca los principales puntos de este trabajo ya que involucra la parte económica del costo de energía en relación a la implementación e investigación de energías como la que nos compete que es la eólica.
Ley 788 del 27 de diciembre de 2002	que exime del impuesto a la renta a las ventas de energía con fuentes renovables, durante quince años, si se obtienen los certificados de reducción de emisiones de carbono previstos en el Protocolo de Kioto, los cuales generan ingresos a los empresarios. No obstante, el 50% de estos ingresos tiene que destinarse a programas de beneficio social para gozar de la exención del impuesto. Desde el punto de vista de este trabajo se puede analizar una opción de ganar ganar ya que la investigación dará fortalecimiento y mayor poder competitivo a la energía eólica y la reducción de pago de impuestos igual.
Ley 1215 de 2008	es que le permite a cualquier ciudadano que lo desee y que esté en capacidad de hacerlo volverse un participante activo de la oferta de generación eléctrica a pequeña y mediana escala. “No obstante se puede afirmar que en Colombia han sido pocas las inversiones que se han hecho para importar tecnología que ayude a la generación de fuentes no convencionales a penetrar de manera significativa el mercado de energía, por lo que este tipo de inversión y alternativas de negocio son uno de los principales retos que debe enfrentar la ley.”
Ley 1715 del 13 de mayo de 2014 (Ley de Energías Renovables)	que definió el marco normativo para promover las energías no convencionales para incentivar y promover su uso en Colombia donde el 70 por ciento de la energía producida viene de las hidroeléctricas y el único respaldo son las termoeléctricas (UPME, 2014). Dicha Ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter

	renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la eficiencia energética y la respuesta a la demanda
Decreto 1543 de 2017 creación del fondo de energía no convencionales y de gestión eficiente (FENOGE).	Dicho decreto crea el Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENCGE), el cual en cumplimiento de la ley 1715 tiene la primera tarea de entregar recursos para la investigación y los planes piloto de proyectos relacionados con la producción de energías limpias. A pesar que este fondo FENOGE centra sus recursos para áreas que no están interconectadas al sistema energético esta investigación relacionara la productividad del sistema en Bogotá y dejando un amplio espectro para la posibilidad de posibles sitios rurales.

Fuente: (Giraldo, 2017; Revista Semana, 2018)

10.6 Marco Geográfico

El proyecto de investigación está planteado para ser evaluado en diferentes localidades de la ciudad de Bogotá, en Colombia. Un mapa de Bogotá se muestra en la *Figura 9*: Mapa de Colombia puntualizando la localización de Bogotá.

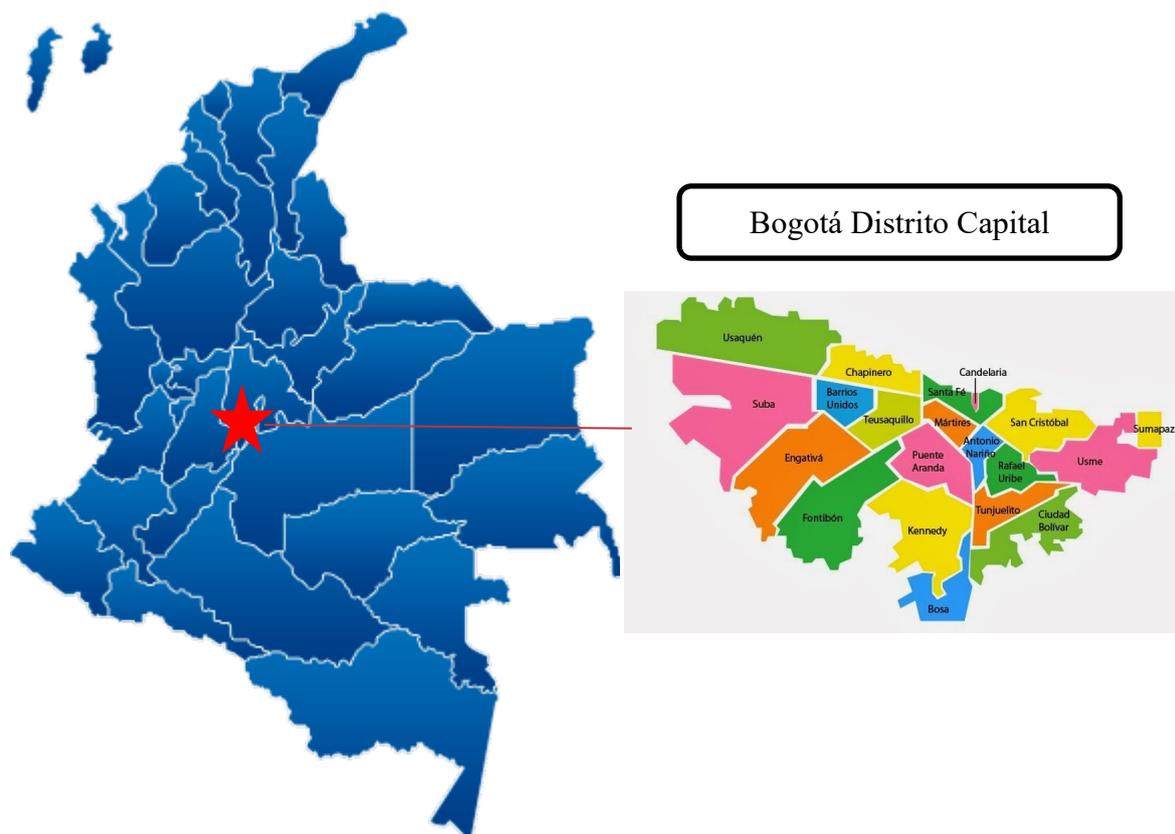


Figura 9. Localización de Bogotá en Colombia, área de estudio. Fuente: (Master Predios, 2010)

La localización de las estaciones en cada localidad a nivel general en la ciudad de Bogotá se muestra en la *Figura 10*.

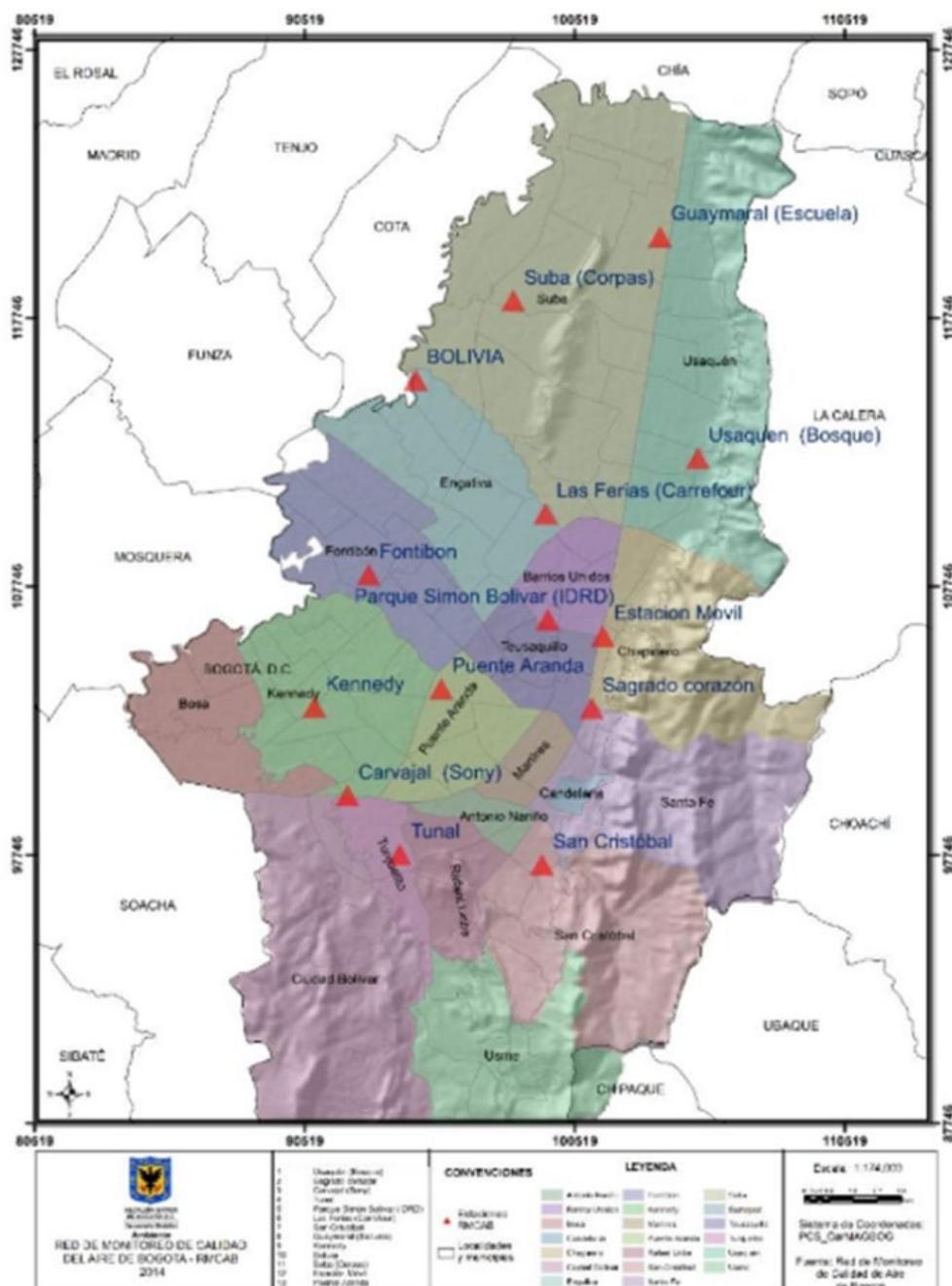


Figura 10. Ubicación de red monitoreo de calidad del aire Bogotá (RMCAB). Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017)

10.7 Marco institucional

Las instituciones involucradas en la investigación son 4. En primera instancia, la Universidad El Bosque ya que suministró las herramientas necesarias para que se pudiera llevar a terminación este proyecto y es la institución a la cual se presentará la investigación. En segundo lugar esta la empresa New World Wind, que como institución nace de la unión de una visión del inventor Jérôme Michaud-Larivière quien vio el potencial en la energía eólica representado en los árboles y el del emprendedor Luc-Eric quien aporta sus conocimientos y los medios industriales para que esta se estableciera como una de las alternativas ecológicas de producción de energía (New World Wind, 2018). En tercer lugar, está La alcaldía mayor

de Bogotá pues esta inmersa en el proyecto puesto que la comunidad esta directamente relacionada con este nuevo modelo de producción de energía, contribuyendo al surgimiento de ciudades sostenibles. Por último, se tienen en cuenta instituciones como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA) pues intervienen en este proyecto aportando los datos de las estaciones meteorológicas de Bogotá, las cuales se tuvieron en cuenta para poder hacer la proyección de disponibilidad del recurso eólico.

11. Marco Metodológico

11.1 Fase 1. Caracterización de información sobre el régimen de viento en la ciudad de Bogotá.

La recopilación de información se consultó de diversas fuentes que son sintetizadas a continuación en la *Tabla 2* y que se detallan en su totalidad en la fase de resultados. Los temas principales para la caracterización de información relevante son: *Wind Tree*, el régimen de vientos, la estratificación y el costo de la energía en Bogotá, e información de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA).

Tabla 2. Síntesis de los registros de información

Tema	Información obtenida y acción a realizar
Sistema <i>Wind Tree</i>	VAWTs, análisis de la implementación del sistema en la ciudad de Bogotá.
Vientos en Bogotá	Mapa de comportamiento general del viento en Colombia, teniendo como fuente el IDEAM, para analizar su régimen en Bogotá. De la Red de Monitoreo de Calidad del aire en Bogotá (RMCAB) se obtienen los datos del régimen de vientos en Bogotá, se tratan en el programa RStudio y posteriormente se analizan.
Estratificación en Bogotá	Por parte de la SDA, se obtiene: ubicación por dirección de las estaciones meteorológicas de Bogotá con el fin de registrar el estrato en que se ubican.

Costo de la energía en Bogotá	Por parte de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) se obtiene la tarifa promedio anual por estrato período 2011-2018, y por parte de CODENSA, la cantidad de energía producida período 2011-2018 con el fin de contribuir a la fase 2.
-------------------------------	---

11.2 Fase 2. Evaluación de las variables económica, ecológica y social en los puntos con viento favorable en la ciudad de Bogotá.

Con el fin de evaluar las variables mencionadas, en primer lugar, se realizó una matriz, como se observa en la *Tabla 3*, la cual es posteriormente llenada con la información correspondiente a cada una de las estaciones meteorológicas en la ciudad de Bogotá.

Tabla 3. Matriz de evaluación de variables.

1.Nombre Estación	2. Análisis de línea media de viento (que esté por encima del umbral de velocidad de viento 2,0 m/s)	3. Energía que se puede generar en esta zona de Bogotá.	4. Precio de la energía (estrato)	5. Rentabilidad de poner un sistema Wind Tree en esta zona. (tiempo de retorno de inversión)

La evaluación de la matriz, al igual que los puntajes descritos para cada uno de sus componentes, fueron establecidos criterio del autor, dándole valores de puntaje determinados, dependiendo del componente que se este analizando y dando un mayor puntaje a las características que se consideran como idóneas para la operación del sistema Wind Tree.

Se establecieron las siguientes convenciones para su evaluación (*Tabla 4*), en donde cada columna se evaluó con respecto a su tema y al final se realizó una suma de los puntos para establecer la mejor alternativa y darle cumplimiento al objetivo dos de la investigación.

Tabla 4. Convenciones para evaluación de la matriz

A.	10 PUNTOS
B.	7 PUNTOS
C.	5 PUNTOS
D.	4 PUNTOS
E.	3 PUNTOS
F.	1PUNTO

En la matriz (*Tabla 3*), el encabezado "Nombre Estación" hace referencia a las estaciones que corresponden al sitio de estudio que es la ciudad de Bogotá. No son tomadas en cuenta 2 estaciones: Bolivia de Engativá ya que no se tiene en la SDA en la RMCAB y la estación Séptima móvil, pues no es relevante por ser una estación móvil, lo cual no garantiza que su localización sea la misma durante la muestra de estudio años 2011 a 2018. El encabezado "análisis de línea media de viento" (que esté por encima del umbral de velocidad de viento 2m/s) se analizó mediante la herramienta Rstudio al elaborar graficas de línea promedio de la velocidad del viento por estación anual desde el 2011 al 2018, y posteriormente se analizó en una tabla el comportamiento anual (*Tabla 5*).

Tabla 5. Comportamiento anual de la velocidad del viento en las estaciones

tabla de evaluacion de velocidad del vento en estaciones de bogota									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	ponderado
Carvajal									
CAR (centro de alto rendimiento)									
Fontibon									
Guaymaral									
Las Ferias									
Min.Ambiente									
Puente Aranda									
San Cristobal									
Suba									
Tunal									
Usaquen									
Kennedy									

Para la evaluación en la matriz (Tabla 3), el encabezado “Convenciones de evaluación por año.” se consideró necesario un rango en donde el umbral base sea 2,0 m/s, pues esta es la velocidad mínima para que el sistema *Wind Tree* funcione. Así que se establece estos rangos para su evaluación. Convenciones de evaluación por año (Tabla 6)

Tabla 6 Convenciones de evaluación por año.

Convenciones Evaluacion Estaciones.	
	con una linea media por encima de 2 m/s en periodos largos
	con una linea media por debajo de 2m/s en periodos largos
	con una linea media con algunos picos de 2 m/s en tiempos prolongados
	con una linea media con algunos picos de 2 m/s en tiempos cortos
	N/A no aplica

Para el ponderado final de la Tabla 5 se hizo uso de 3 tipos de calificaciones. Sí durante los 8 años se mantuvo un comportamiento de velocidad del viento de 2,0 m/s la calificación será **óptimo (A)** y si no se tuvo este comportamiento la calificación será **no óptimo (F)** y otro en donde describe como: **de mayor estudio (D)**, ya que no se tiene la informacion concreta y es necesario un estudio posterior.

Tabla 7. Calificaciones teniendo en cuenta ponderado por estación

CONVENCIONES PONDERADO POR ESTACION	
optimo	cumple en su mayoría o total las condiciones de viento minima para el sistema <i>WIND TREE</i>
no optimo	no cumple con las condiciones en los años de muestra
de mayor estudio	su comportamiento va de 3 m/s - 5 m/s es necesario estudiar mas a fondo

En la matriz (Tabla 3), el encabezado “Energía que se puede generar en esta zona de Bogotá” se trabajó por medio de la herramienta de Microsoft Excel en conjunto con la herramienta RStudio la cual proporciona las graficas que se evaluarán en Microsoft Excel para estimar la producción de energía con respecto a la velocidad del viento. usando para esto los datos horarios de las estaciones suministrados por RMCAB para asignarle los valores

correspondientes a cada velocidad según el sistema *Wind Tree* que se muestra en la *Tabla 9* rangos de producción energía sistema *Wind Tree* por último se realiza una sumatoria de cuanto podría ser el potencial eléctrico en dicha zona para su posterior evaluación presente en la (*tabla 8*) producción de energía por estación.

Tabla 8. Producción de energía por estación.

PRODUCCION DE ENRGÍA WATTS POR ESTACION												
	Carvajal - Sevilla	Centro de Al	Fontibon	Guaymaral	Kennedy	Las Ferias	MinAmbiente	Puente Aranda	San Cristobal	Suba	Tunal	Usaquen
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
sumatoria												

Los rangos de producción de energía por velocidad del sistema *Wind Tree* que se muestra en la *Tabla 9* se elaboran a partir de la gráfica de producción de energía que proporciona el sistema en su página web para así estimar la cantidad de energía que puede proporcionar el sistema en las diferentes estaciones ubicadas en Bogotá para la elaboración de la (*tabla 8*) con las condiciones de cada una de ellas específicas.

Tabla 9. Rangos de producción energía sistema Wind Tree

velocidad viento(m/s)	energía producida (watts)
0-1	0
2-2,9	1
3-3,9	1,5
4-4,9	1,7
5-5,9	2,5
6-6,9	3
7-7,9	6
8-8,9	10
9-9,9	15
10-10,9	21
11-11,9	28
12-12,9	36
13-13,9	45
14-14,9	56
15-15,9	66
16-16,9	79
17-17,9	88
18-18,9	95
19-19,9	99
20-20,9	100

Los rangos para la evaluación de la (*Tabla 8*) del sistema se establecen con un aproximado de cuanto sería lo máximo que puede generar un sistema *Wind Tree* en el periodo de muestra años 2011-2018, presente en la (*Tabla 10*).

Tabla 10. Convenciones de producción de energía

COLOR	CONVENCIÓNES	WATTS
	A.	>50000
	B.	46000-30000
	C.	30000-25000
	D.	20000-24000
	E.	23000-11000
	F.	10000-8000
	G.	<1000

En la matriz (*Tabla 3*), el encabezado “Precio de la energía (estrato)”, se trabajó por medio de los datos suministrados por la UPME el cual establece los valores de la tarifa de la energía por año y estrato como se presenta en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Tarifa energía por estrato

año	estrato1	estrato2	estrato 3	estrato4	estrato 5	estrato 6
2011						
2012						
2013						
2014						
2015						
2016						
2017						
2018						
promedio						

Para la evaluación de la *Tabla 8* se establecen los siguientes rangos de calificación, los cuales están sujetos a que en la recopilación de información la tarifa más elevada tenga la convención A ordenarla de mayor costo a menor costo F siendo el rango mas bajo como se presenta en la *Tabla 12*.

Tabla 12. Evaluación de costo de tarifa por estrato.

Estrato	Tarifa promedio	Evaluación
6		A.
5		B.
4		C.
3		D.
2		E.
1		E.
Sin estrato		F.

En la matriz (*Tabla 3*), el encabezado “Rentabilidad de poner un sistema Wind Tree en esta zona. (tiempo de retorno de inversión)”, se trabajó por medio de los datos de producción de energía del sistema y la tarifa por año década estación llevando acabo esto lo podemos comparar con la inversión inicial y calcular la tasa de retorno a partir de la siguiente formula:

$$ROI = \frac{B - I}{I}$$

(grenwords, 2017)

Dónde:

- B: Beneficios
- I= inversión

(grenwords, 2017)

Tabla 13. Evaluación tasa de retorno inversión

Rango	Evaluado
En 1 – 2 años	A.
En 3-4 años	B.
En 5-6 años	C.
En 7-8 años	D.
No se recupera la inversión con la muestra estudio	E.

Como parte final de la fase 2, se establecen en la *Tabla 14* todos los resultados, para realizar un mejor análisis y comprensión de las diferentes condiciones.

Tabla 14. Tabla Resumen

Características de medición estaciones RM CAB												
Estación	Localización toma muestra	dirección	localidad	Tipo de zona	Tipo de estación	Altura del suelo	Altura punto de muestra al suelo	Altura viento al suelo	estrato	estrato aledaños	mas lejanos	evaluacion de estaciones
Guaymaral												
Usaquén												
Suba												
Bolivia												
Las Ferias												
P. Simón Bolívar												
Sagrado Corazón												
Fontibón												
Puente Aranda												
Kennedy												
Carvajal												
Tunal												
San Cristóbal												

11.3 Fase 3. Proposición de una guía de implementación del sistema Wind Tree

Usando la fuente de información del sistema *Wind Tree* se elabora una guía de implementación de la tecnología en el punto óptimo que se estableció anterior mente con la matriz de variables.

La guía se establece con 7 puntos principales los cuales serán:

1. Dimensiones.
2. Producción de energía.
3. Descripción de funcionamiento.
4. Instalación del sistema *Wind Tree*.
5. Viabilidad económica.
6. Cálculo de reducción huella de carbono.
7. Seguimiento y adherencia social del sistema.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que resume la metodología planteada para la realización del proyecto:

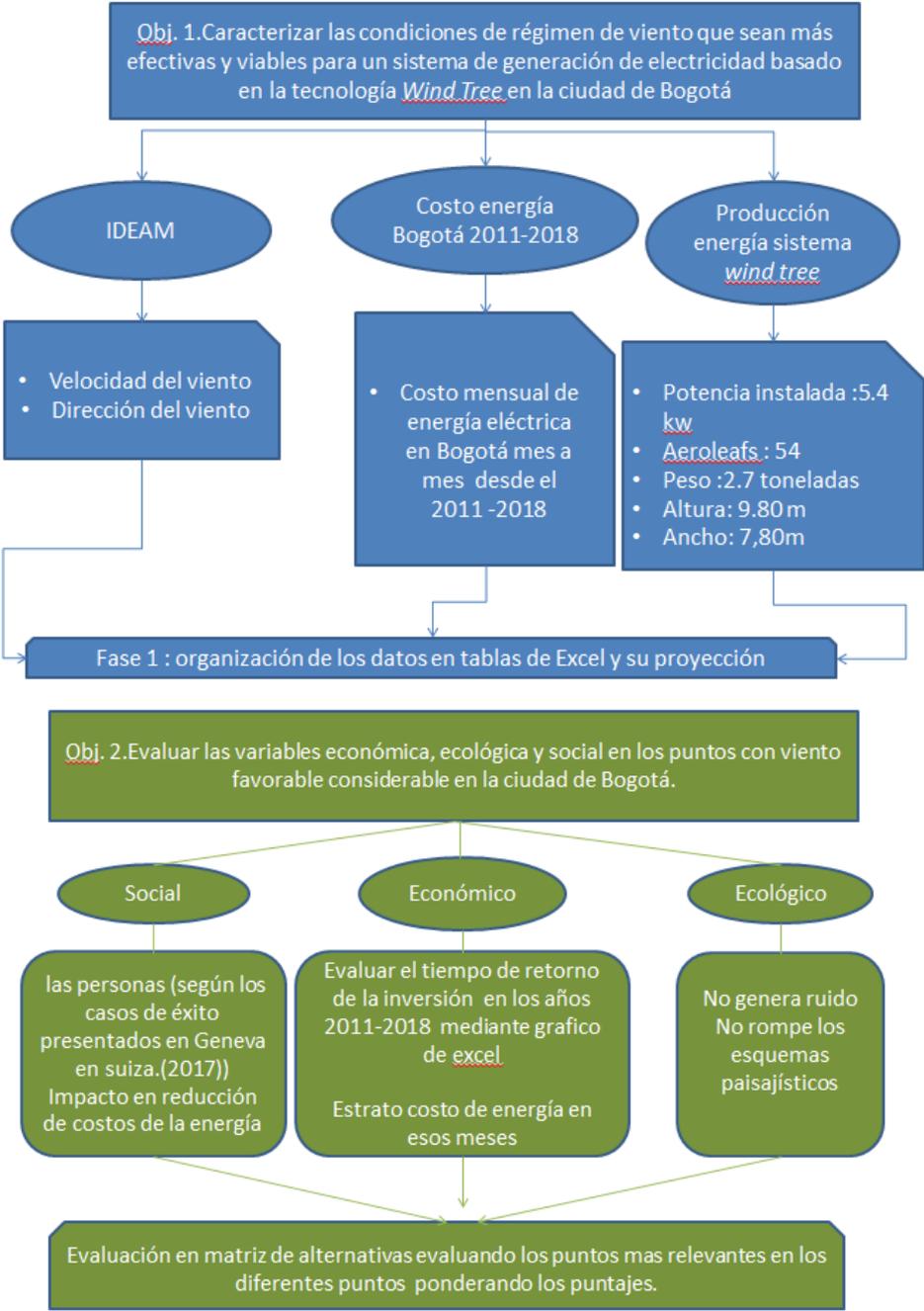




Figura 11. Flujograma metodología

Tabla metodológica

La tabla metodológica es un insumo que guía el plan de trabajo, en ella se incluyen el objetivo general y los específicos, las actividades, metodología (con técnicas e instrumentos) a partir de cada objetivo específico.

Tabla 15. Tabla metodológica de la investigación

Objetivo	Fase 1	Fase 2	Fase 3
General	Evaluar las condiciones de pre-factibilidad de un dispositivo eléctrico basado en el sistema <i>Wind Tree</i> , en zonas donde el régimen de vientos sea considerable favorable en la ciudad de Bogotá.		

Específicos	Caracterizar las condiciones de régimen de viento que sean más efectivas y viables para un sistema de generación de electricidad basado en la tecnología <i>Wind Tree</i> en la ciudad de Bogotá	Evaluar las variables económica, ecológica y social en los puntos con viento favorable considerable en la ciudad de Bogotá.	Desarrollar una guía de recomendación que permita implementar el sistema <i>Wind Tree</i> en el sitio más adecuado en la ciudad de Bogotá.
Enfoque	El enfoque del trabajo de investigación es cuantitativo, ya que se tratan métodos puntuales de información como producción de energía, promedios, sumas, estimación de costos rentabilidad, datos de velocidad de vientos horarios y anuales, graficas de descripción de comportamiento de viento y parámetros de evaluación para el caso puntual se usan los datos de las diferentes estaciones de Bogotá		
Alcance	<p>Fase 1: En esta fase el alcance es descriptivo ya que el abordar las diferentes alternativas de sistemas eólicos y sus fundamentos físicos nos da una pauta para generar un criterio para entender cuales serian las mejores condiciones para un sistema <i>Wind Tree</i>.</p> <p>Fase 2 En esta fase el alcance es exploratorio puesto que los datos del sistema <i>Wind Tree</i> no se han aplicado al contexto de la zona de estudio Bogotá</p> <p>Fase 3 El alcance de esta fase es explicativo ya que a partir lo obtenido en la fase 1 y 2 se plantea una guía que explica como se puede replicar el proceso de pre-factibilidad.</p>		
Actividad	Recolectar, procesar y caracterizar la información sobre los sistemas de producción energía eólicos denominados VAWT y HAWT, Recopilar información del sistema <i>Wind Tree</i> con sus especificaciones limitantes e historia.	<p>Recopilar datos de entrada de comportamiento de velocidad de viento y hacerle la configuración pertinente para usarlos en <i>R Studio</i></p> <p>Correr la herramienta <i>R Studio</i></p> <p>Recolectar, procesar y analizar datos de comportamiento velocidad viento en</p>	Organizar la información recolectada en los diferentes puntos del trabajo y elaborar una guía que plantee los puntos y como podría replicarse el estudio de pre-factibilidad en otra zona de estudio.

	<p>Realizar búsqueda de mapas relacionados al comportamiento de viento y la ubicación de las estaciones meteorológicas de la RMCAB.</p> <p>Recopilación de información del Sistema <i>Wind Tree</i></p>	<p>las diferentes estaciones de RMCAB</p> <p>Evaluar las diferentes estaciones con respecto a los puntos estipulados</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Nombre estación 2 Línea media viento 3 Producción viento 4 Precio de la Energía 5. Rentabilidad 	
Técnica	<p>Análisis de contenido de datos presentes en reportes, noticias, informes e investigaciones.</p> <p>Recolección, organización y análisis de datos presentes en bases de datos de estaciones meteorológicas.</p> <p>Recolección de información y datos en Excel de la curva de producción de energía por RPM (revoluciones por minuto) de los <i>Aeroleaf</i>.</p>	<p>Recolección, organización de los datos por medio de los cuales se realizarán los análisis</p> <p>Línea media y promedio de comportamiento de velocidad de las diferentes estaciones meteorológicas</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Análisis y evaluación 2 Análisis y evaluación 3 Relación velocidad producción energía 4 Según estrato cuanto costo la energía 2011-2018 5 En cuanto tiempo retorna la energía 	<p>Proposición y elaboración de una guía técnica con puntos detallados que describan como implementar el sistema <i>Wind Tree</i>.</p>
Instrumento	<p>Reportes noticiosos, artículos e investigaciones.</p>	<p>Microsoft Excel</p> <p>RStudio</p> <p>Análisis de información</p>	<p>Análisis de información</p> <p>Guía técnica</p>

	<p>Información de comportamiento de velocidad del viento de RMCAB en los años 2011 a 2018.</p> <p>Microsoft Excel</p>		
Resultados esperados	<p>Caracterización del estado de las diferentes tecnologías eólicas y condiciones de régimen de viento en Bogotá lo cual se usara en el siguiente objetivo2.</p>	<p>A partir de una ponderación estimar cual es el mejor punto para poner <i>el</i> sistema <i>Wind Tree en Bogotá</i></p>	<p>Construir una guía que establezca los puntos relevantes para replicar el proceso de esta tesis en algún otro punto</p>

Fuente: elaboración propia

12. Resultados y Análisis

12.1 Fase 1. Caracterización de información sobre el régimen de viento en la ciudad de Bogotá.

Para el cumplimiento de este objetivo se utilizó el método de búsqueda de información y recopilación de la misma, consultando bibliografía de casos de éxitos de tecnologías eólicas e información sobre el régimen de viento de la ciudad de Bogotá.

Sistema Wind Tree

Los sistemas eólicos tradicionales crean una necesidad de espacio demasiado amplia para el funcionamiento de un parque eólico; es por esta restricción que se crean los VAWTs y HAWTs, descritos en el marco de referencia. Estos, son una solución innovadora propuesta para generar energía limpia en espacios reducidos como pueden ser las ciudades, por ejemplo, Bogotá, la cual tiene precios muy elevados para el suministro de energía por ser un terreno tan extenso desde cierto punto de vista, las condiciones de viento no son las más favorables para la implementación del sistema.

Particularmente, el sistema *Wind Tree* el cual es un sistema VAWTs, tiene una gran ventaja competitiva puesto que tiene un procesador que ajusta resistencia respecto a la fuerza del viento y así maximiza su producción de energía con relación a los otros VAWTs del mercado. Su producción de energía inicia superando el umbral de 2,0 m/s y al compararlo con otro aerogenerador vertical como el DS300 que tiene como umbral para inicio de operación es de 3,0 m/s (Etneo, 2018) es así como se puede entender como el sistema *Wind Tree* tiene un factor de alta ventaja competitiva sobre otros, ya que al iniciar con un umbral menor de velocidad de viento, se puede implementar en una mayor cantidad de sitios y es capaz de producir energía como una velocidad muy reducida que en otros sistemas no sería considerada como eficiente ni relevante.

Régimen de viento en Bogotá

En el mapa nacional de vientos del IDEAM se observa el comportamiento del viento en todo Colombia, acercándose al sitio de estudio que corresponde a la ciudad de Bogotá en donde se ubica la estación de aeropuerto El Dorado la cual presenta una velocidad de viento, como se observa en la *Figura 11*, con un promedio de 4,0 – 5,0 m/s con una dirección predominante de sur oeste como se observa en la *Figura 12* y determinando a Bogotá dentro del umbral necesario para entrar en operación en el sistema *Wind Tree*

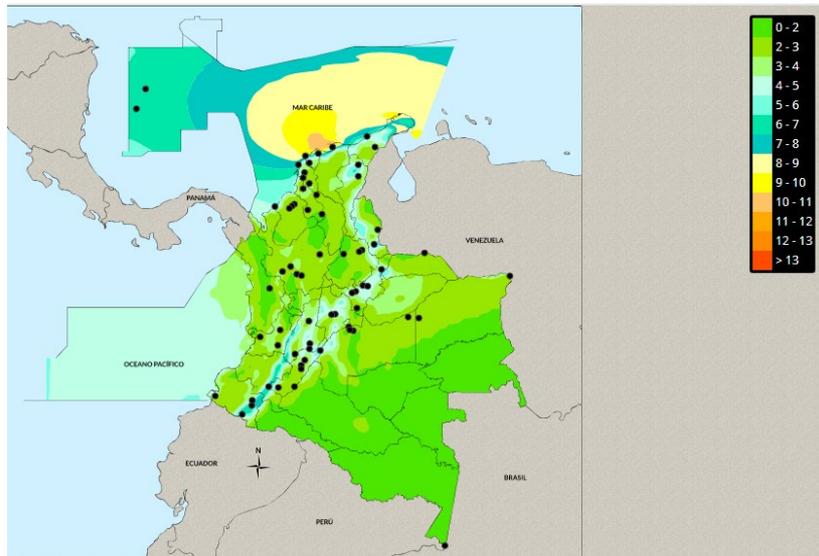


Figura 12. Mapa de vientos geo portal IDEAM, en Colombia. Fuente: (IDEAM, 2019)

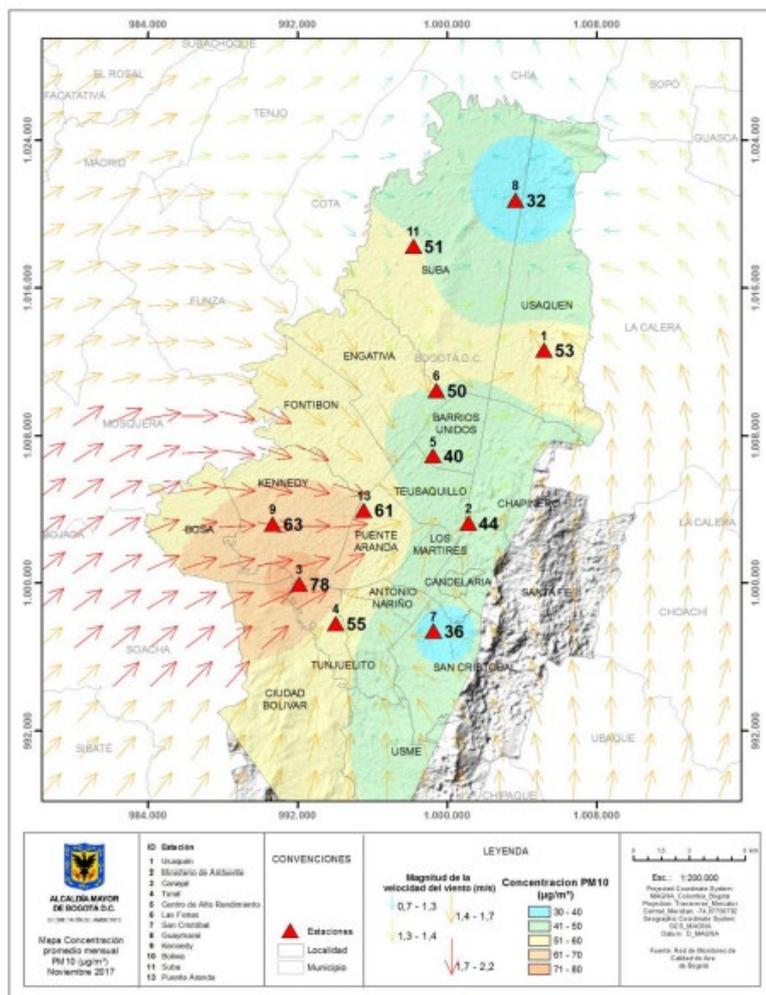


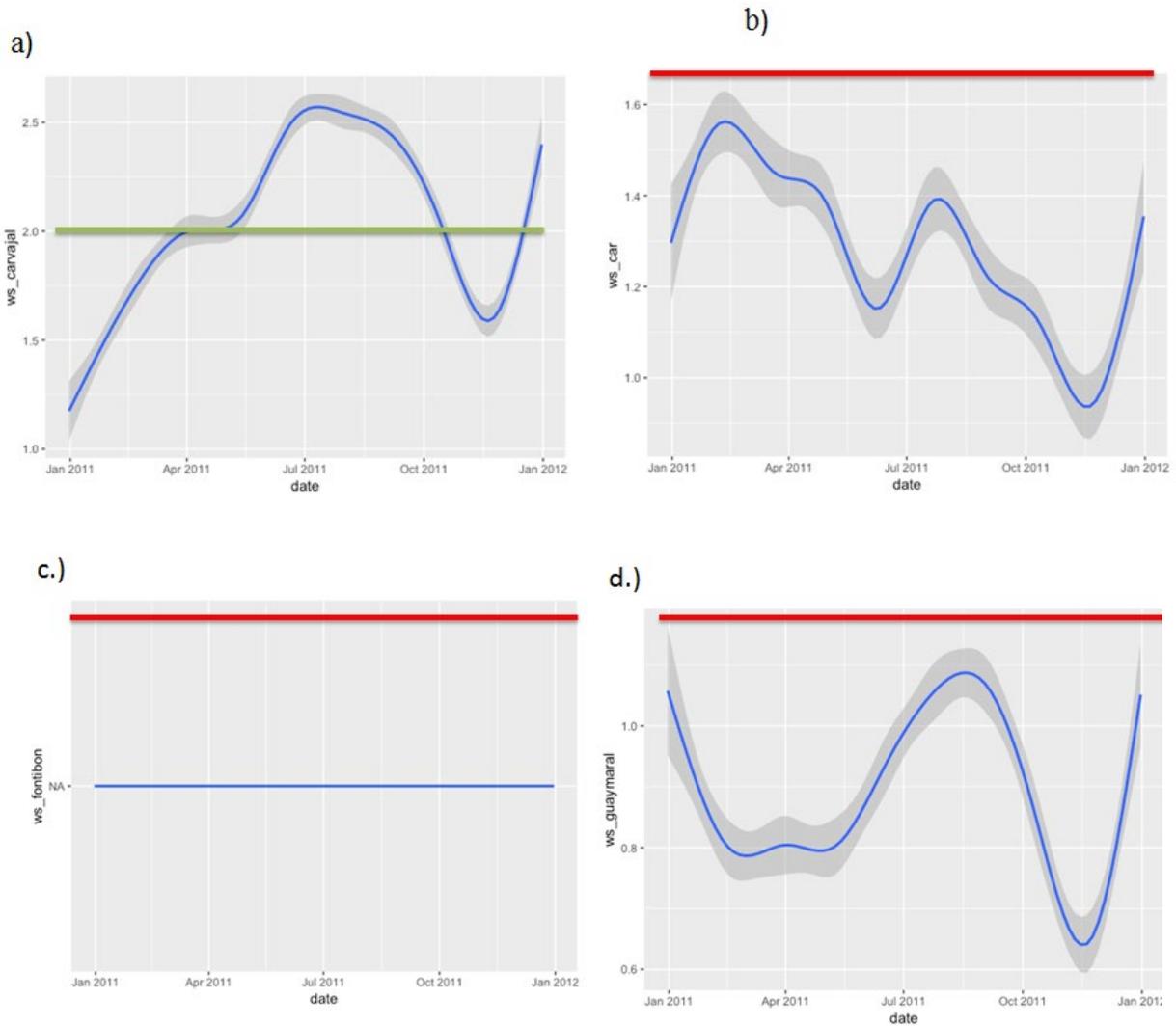
Figura 13. Mapa de dirección de vientos Bogotá. (RMCAB, 2017)

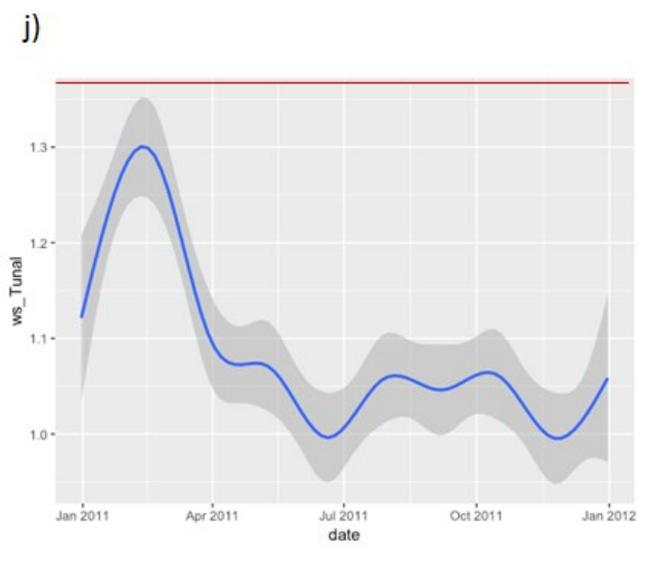
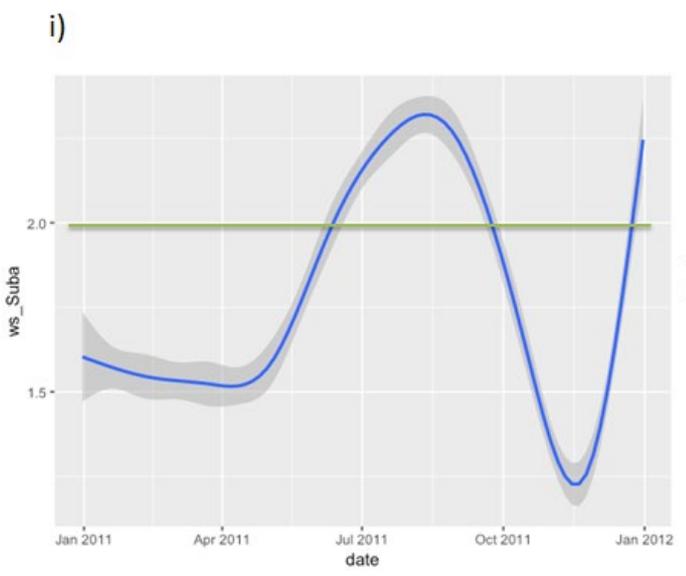
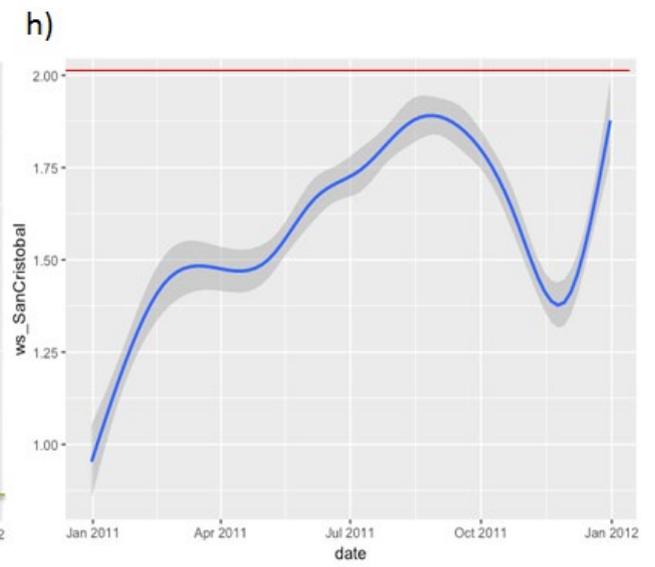
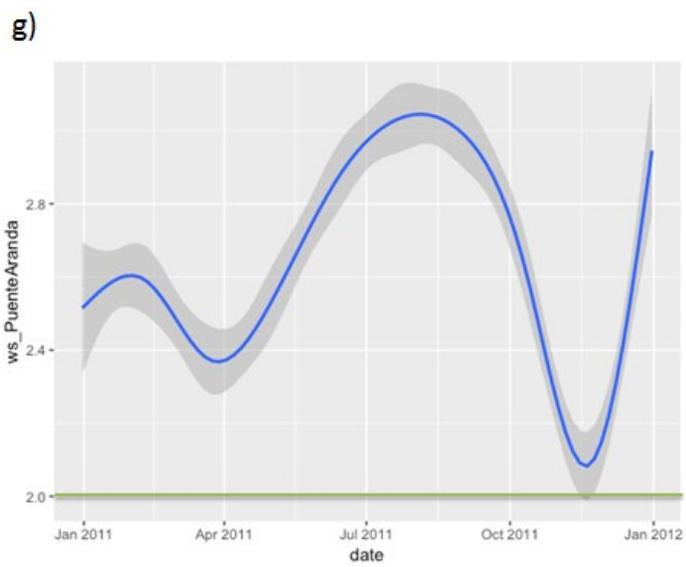
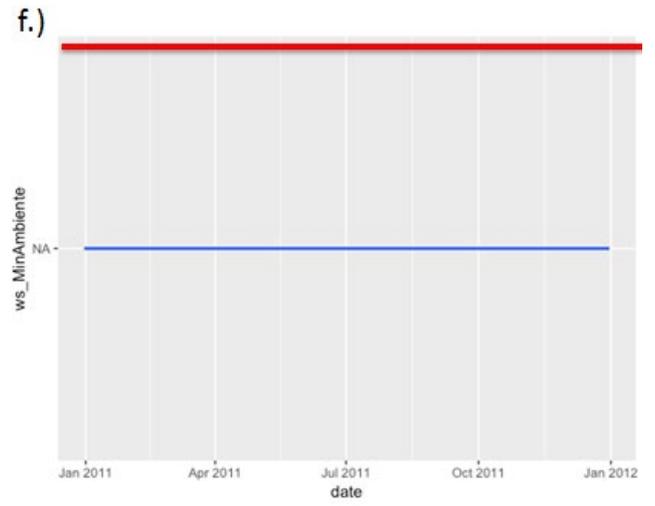
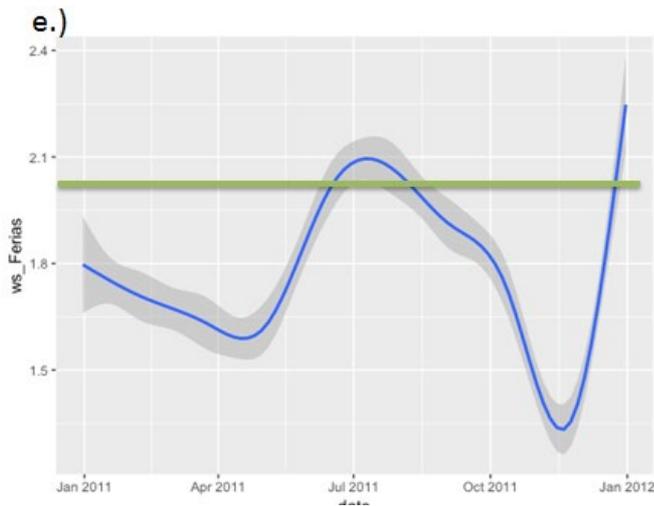
A partir de los datos de la RMCAB (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá) en el enlace: <http://201.245.192.252:81/> se tratan los datos en la herramienta RStudio para generar gráficas del comportamiento del viento en cuanto a velocidad en metros por segundo de manera horaria durante años los años considerados para la muestra (2011-2018). Partiendo del umbral de

velocidad para el inicio de operación del sistema *Wind Tree* (2,0 m/s) se asigna color verde en las gráficas a aquellas estaciones que cumplen con este umbral y rojo a aquellas que no cumplen (*Figuras 14 a 21*). La línea verde es la línea base de 2,0 m/s. En las gráficas el eje Y corresponde a la velocidad del viento en metros por segundo y al mes del año correspondiente en el eje X.

1) Serie de graficas año 2011 donde se muestra el comportamiento de la velocidad del viento en los meses de enero a diciembre donde sólo pasaron el umbral mínimo las estaciones Carvajal, Ferias, Kennedy y Suba.

2011





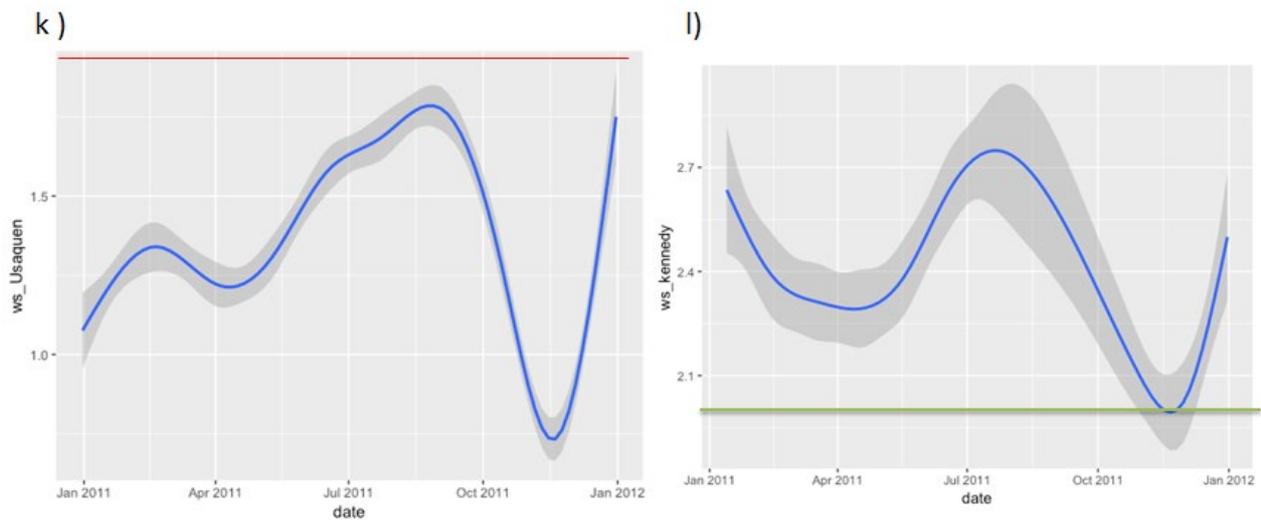
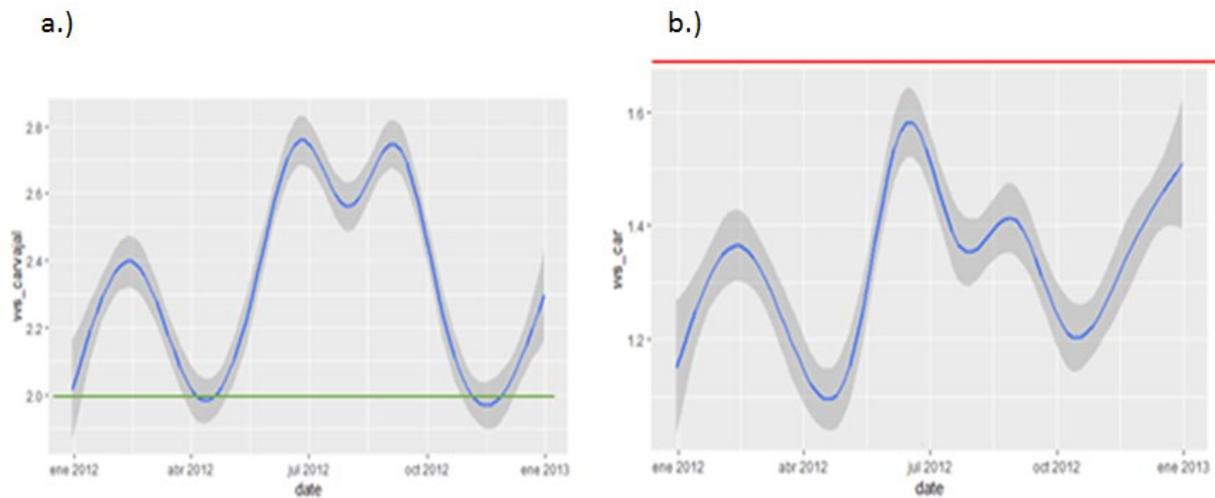


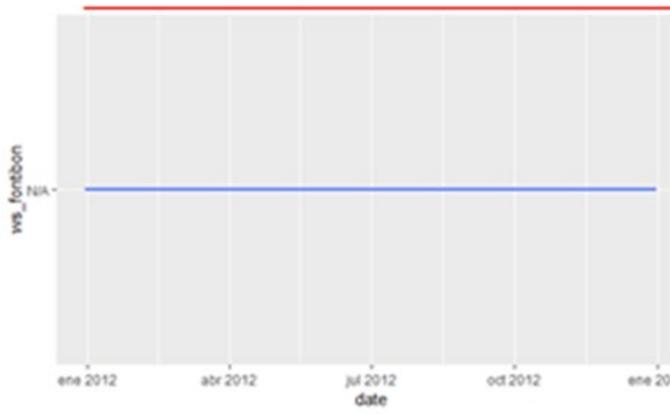
Figura 14. Graficas por Estación año 2011. a) Carvajal, b) Centro de alto rendimiento, c) Fontibón, d) Guaymaral, e) Las Ferias, f) Ministerio de Ambiente, g) Puente Aranda, h) San Cristóbal, i) Suba, j) Tunal, k) Usaquén, l) Kennedy. Fuente: propia

2) Serie de graficas del año 2012 donde se muestra el comportamiento de la velocidad del viento en los meses de enero a diciembre donde superaron el umbral de 2 m/s las estaciones Carvajal, Ferias, Kennedy, Puente Aranda y Suba.

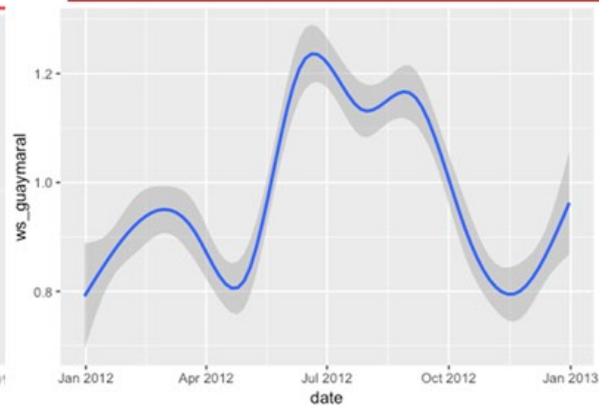
2012



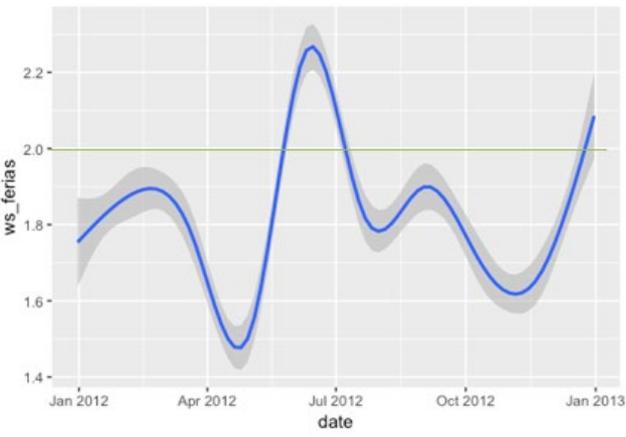
c)



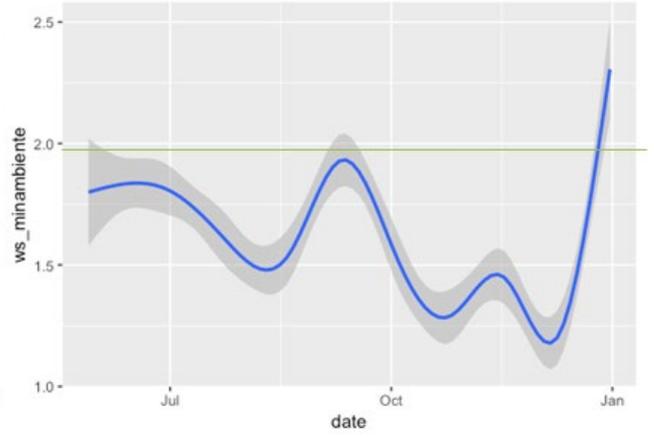
d)



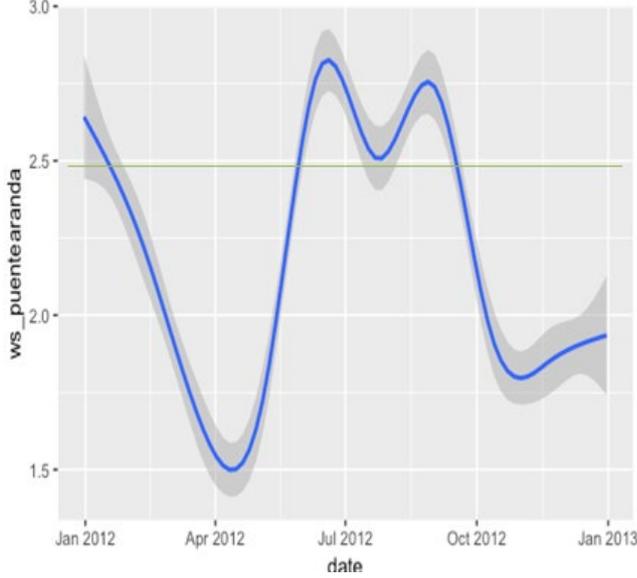
e)



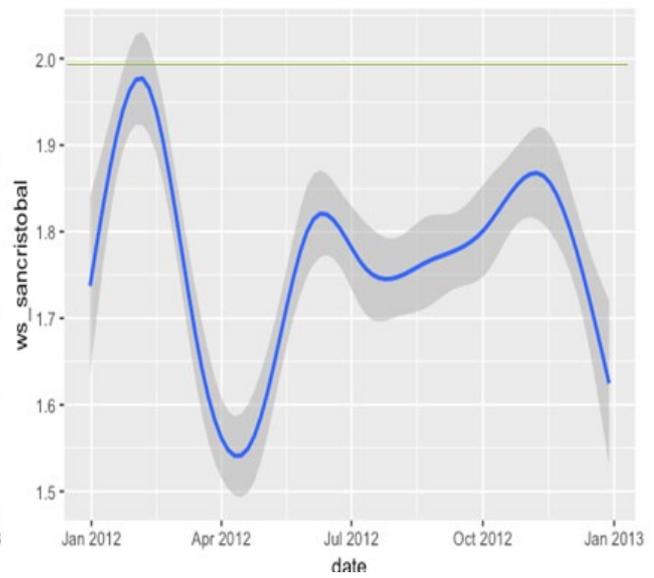
f)



g)



h)



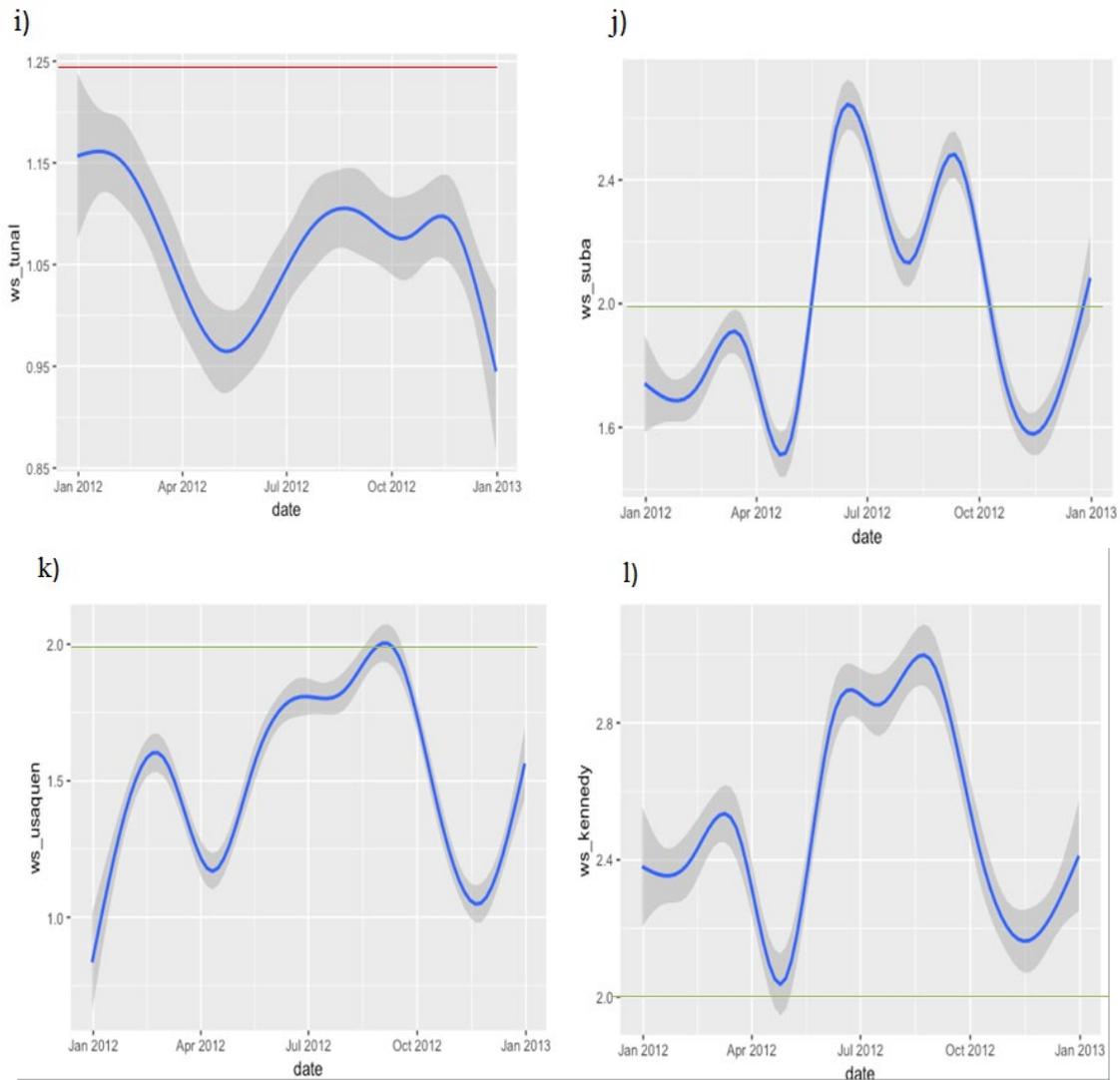
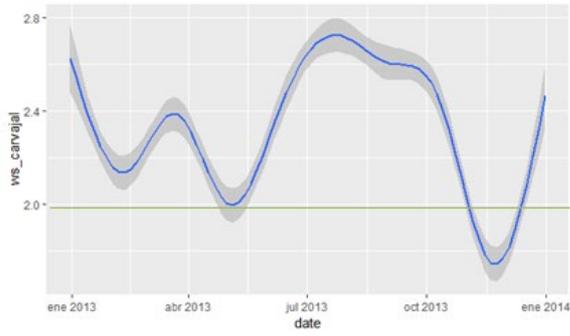


Figura 15. Graficas por Estación año 2012. a) Carvajal, b) Centro de alto rendimiento, c) Fontibón, d) Guaymaral, e) Las Ferias, f) Ministerio de Ambiente, g) Puente Aranda, h) San Cristóbal, i) Suba, j) Tunal, k) Usaquén, l) Kennedy. Fuente: propia

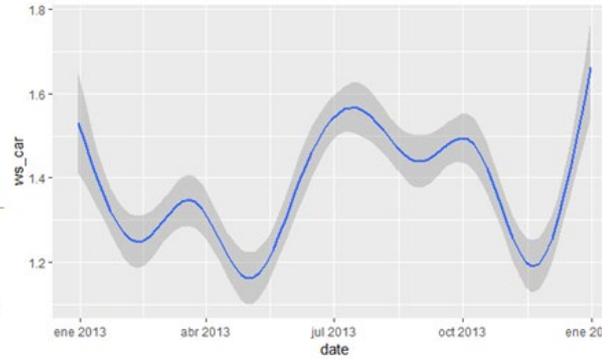
3) Serie de graficas del año 2013 donde observa el comportamiento de la velocidad del viento donde superaron el umbral las estaciones Carvajal, Ferias, Kennedy, Puente Aranda, Suba y San Cristóbal.

2013

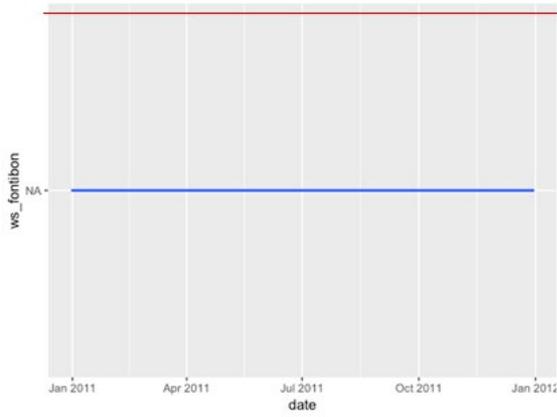
a)



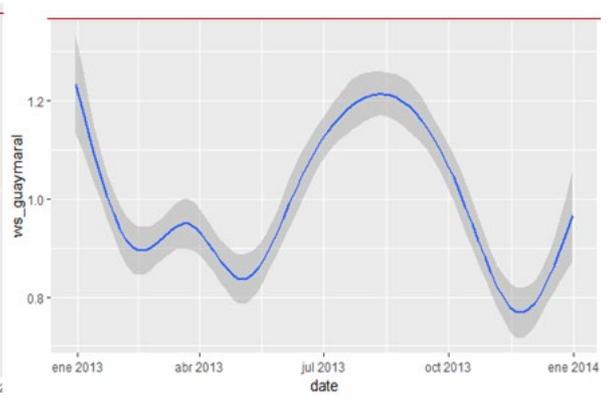
b)



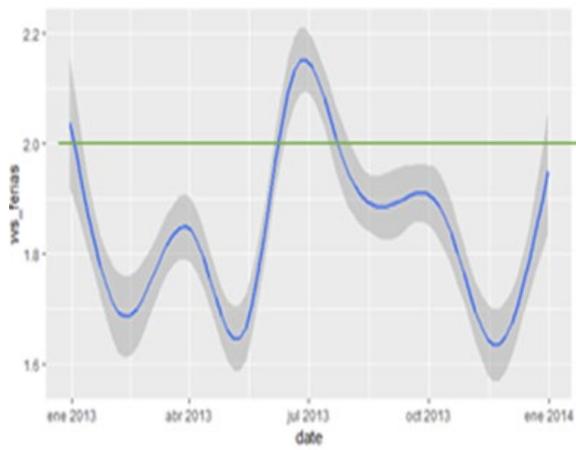
c)



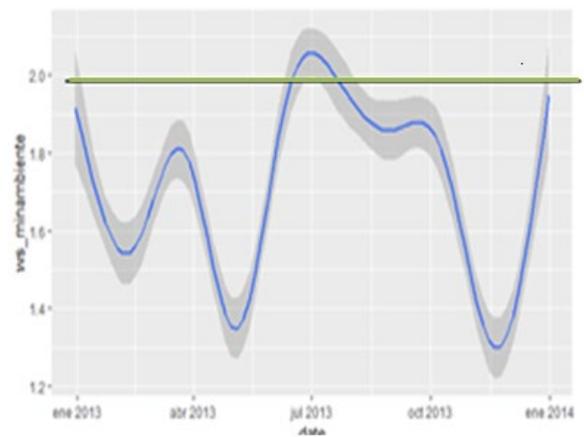
d)



e)



f)



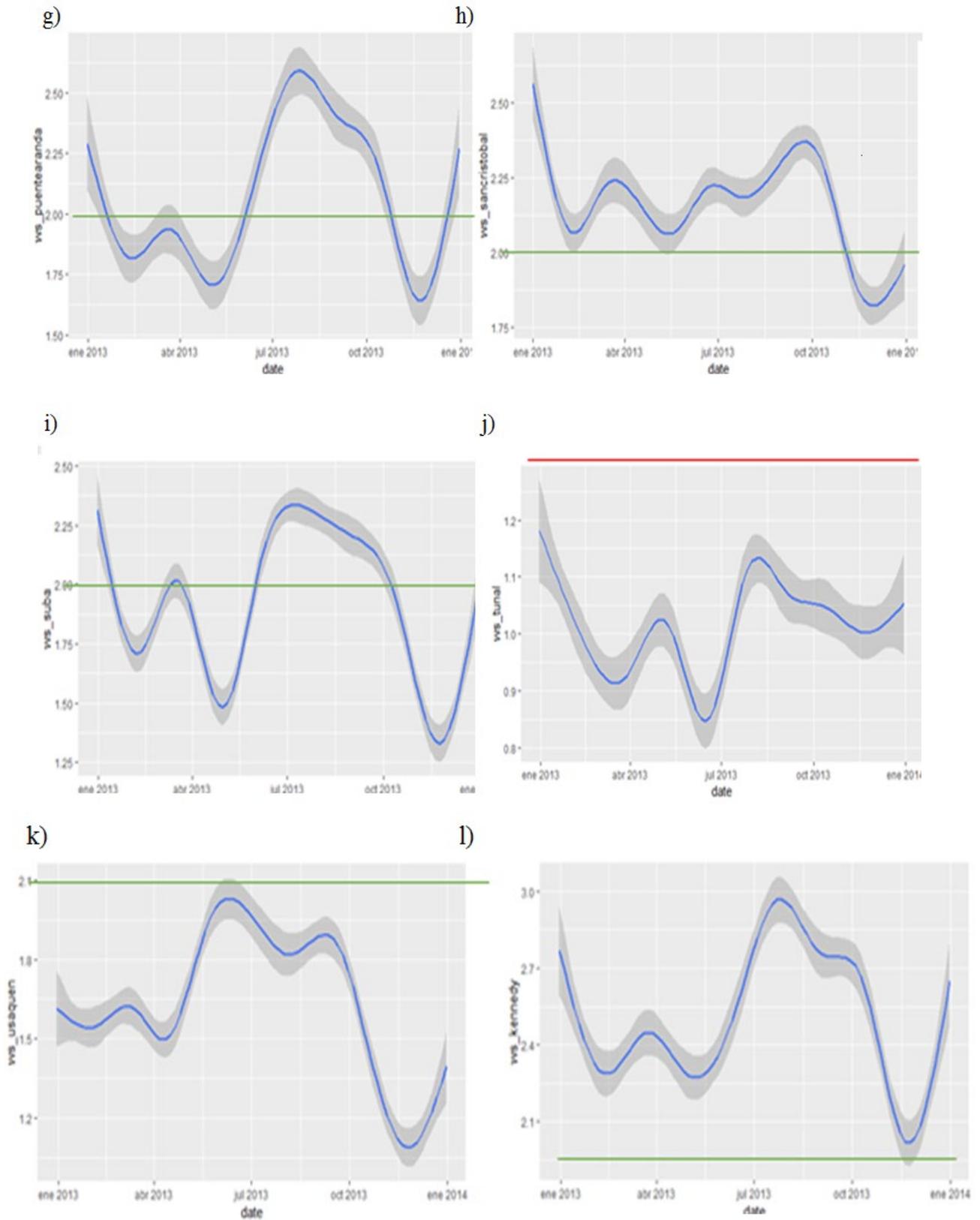
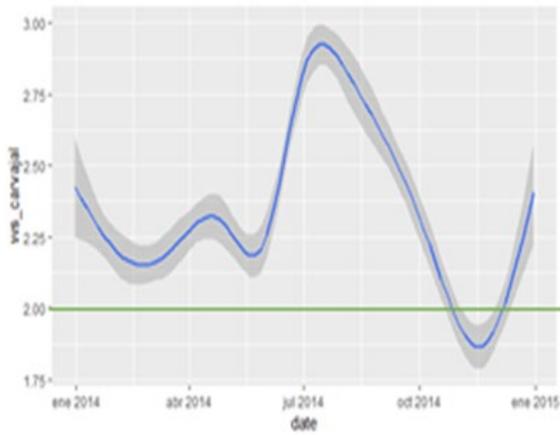


Figura 16. Graficas por Estación año 2013. a) Carvajal, b) Centro de alto rendimiento, c) Fontibón, d) Guaymaral, e) Las Ferias, f) Ministerio de Ambiente, g) Puente Aranda, h) San Cristóbal, i) Suba, j) Tunal, k) Usaquén, l) Kennedy. Fuente: propia

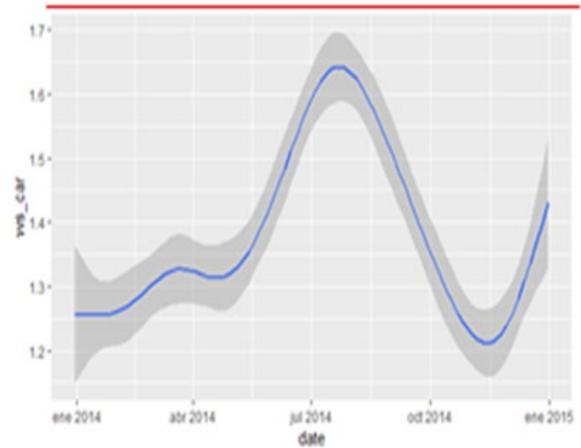
4) Graficas del año 2014 donde muestra el comportamiento de la velocidad del viento durante el año donde sólo superaron el límite de 2 m/s las estaciones Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Suba.

2014

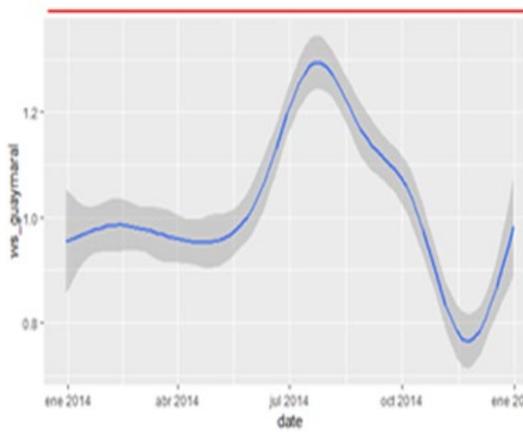
a)



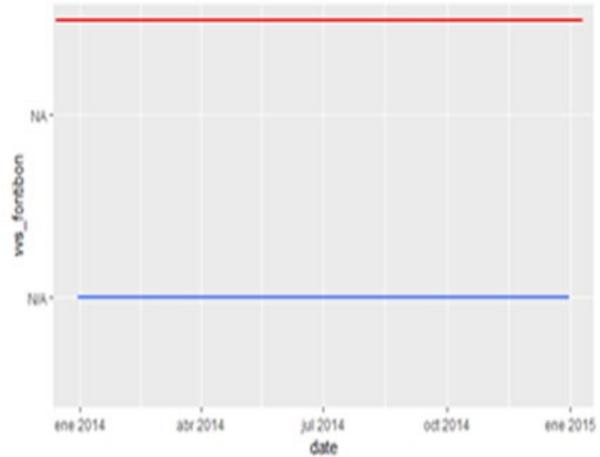
b)



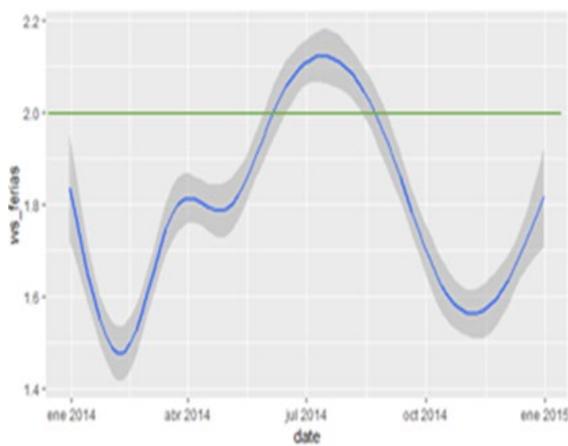
c)



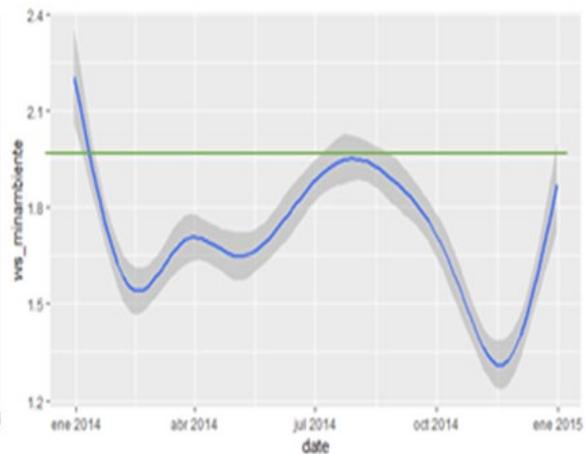
d)



e)



f)



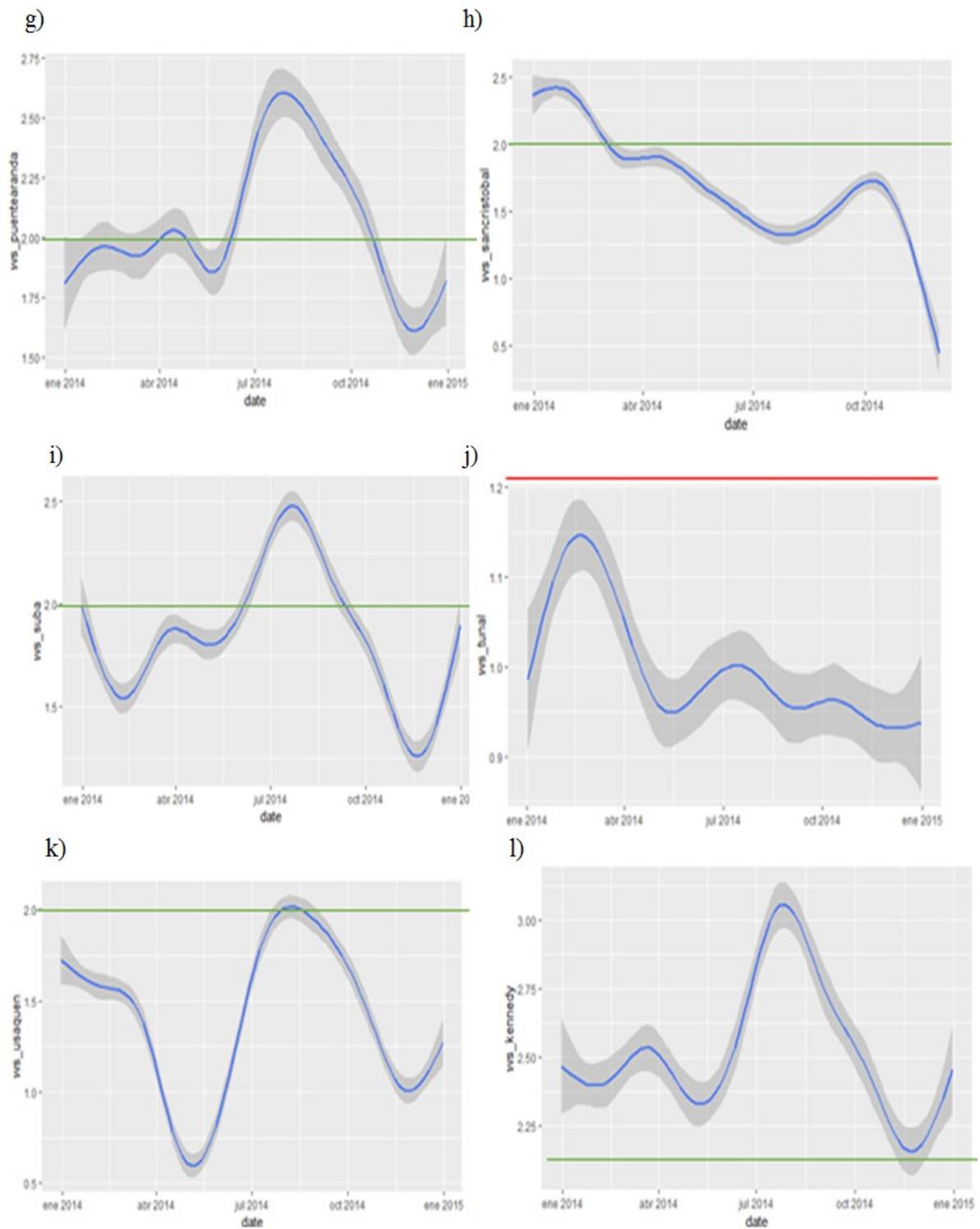
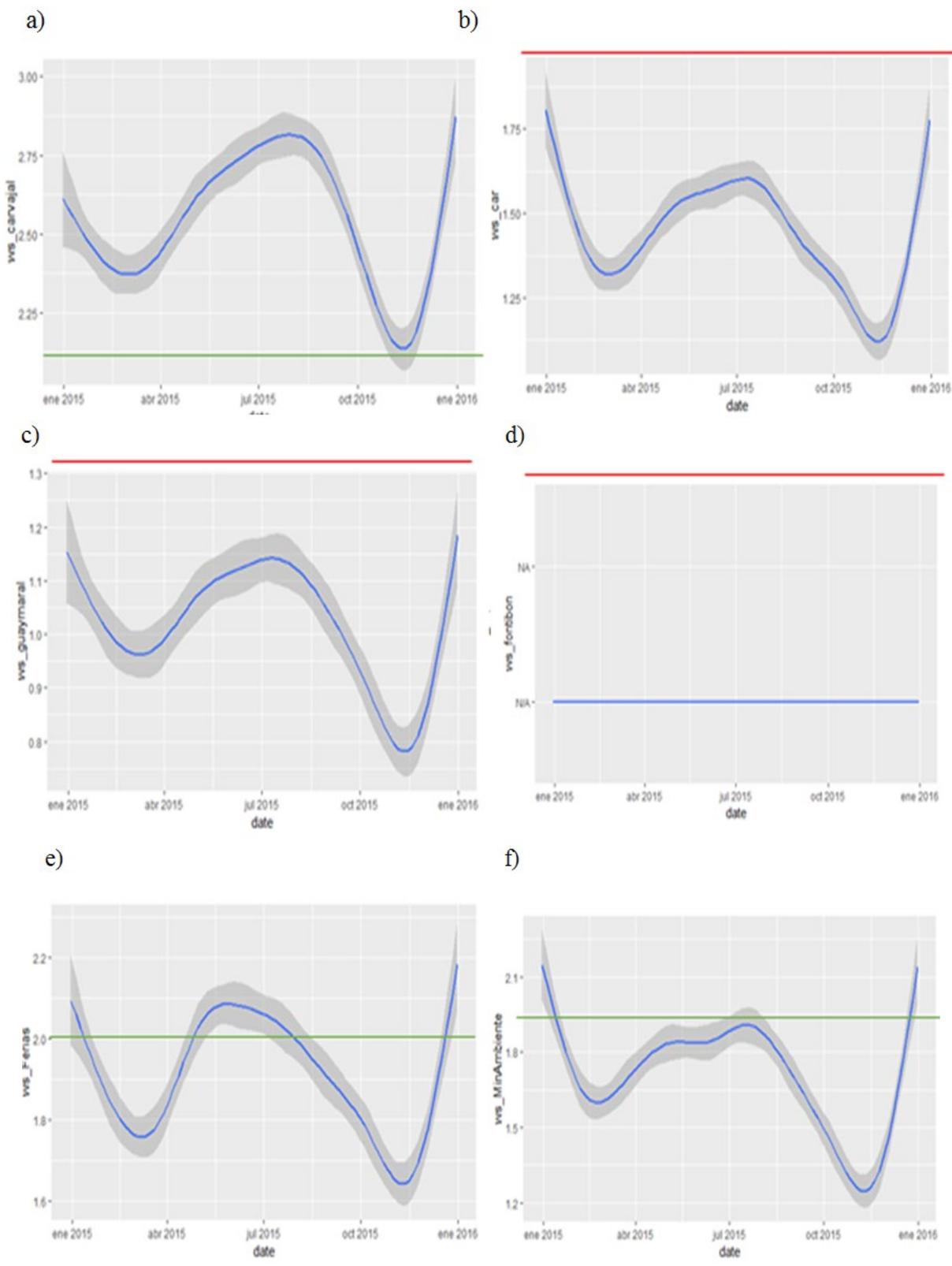


Figura 17. Graficas por Estación año 2014. a) Carvajal, b) Centro de alto rendimiento, c) Fontibón, d) Guaymaral, e) Las Ferias, f) Ministerio de Ambiente, g) Puente Aranda, h) San Cristóbal, i) Suba, j) Tunal, k) Usaquén, l) Kennedy. Fuente: propia

5) Graficas del año 2015 del comportamiento de la velocidad del viento en los meses de enero a diciembre donde solo superaron el umbral de 2 m/s las estaciones Carvajal, Kennedy y Puente Aranda.

2015



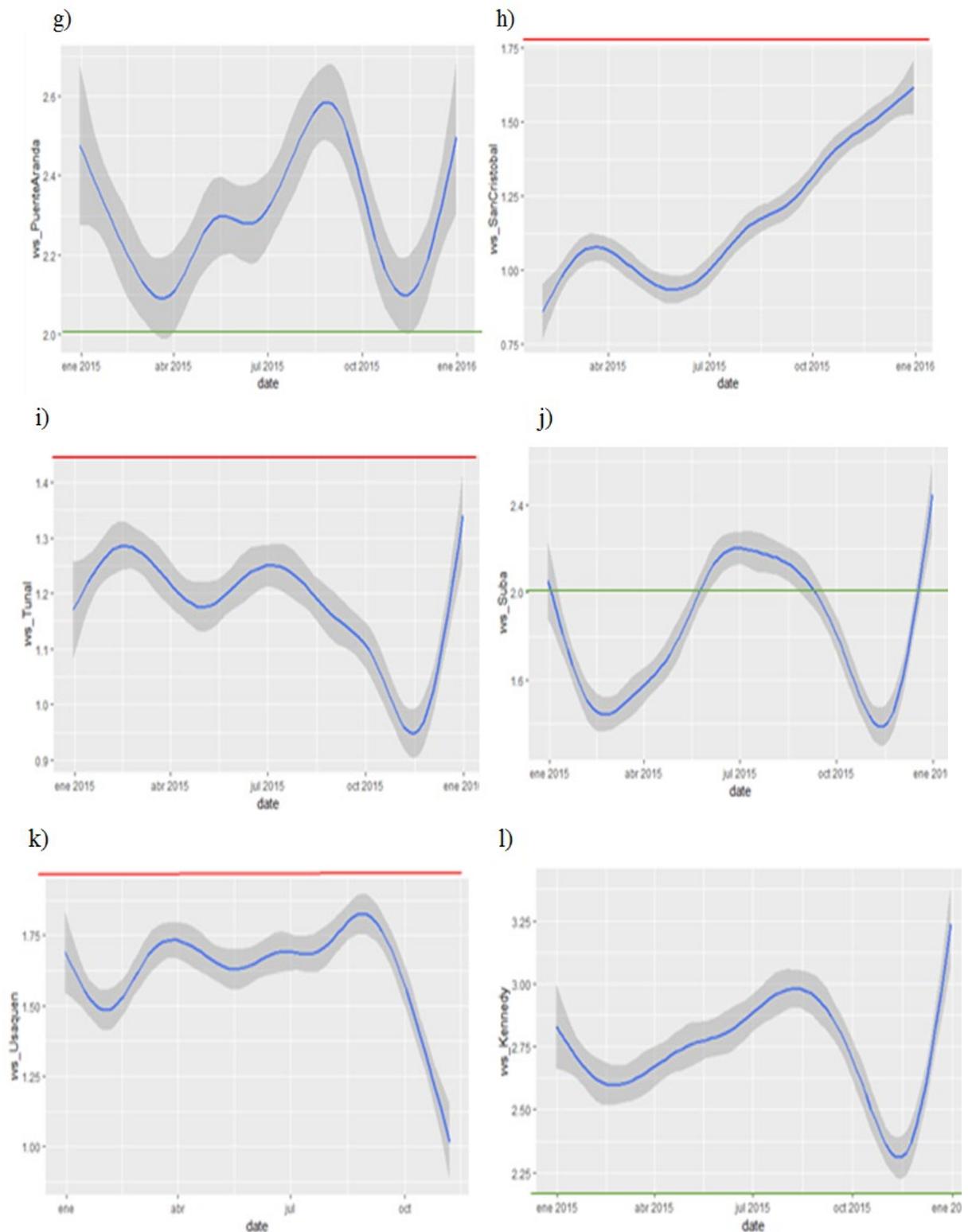
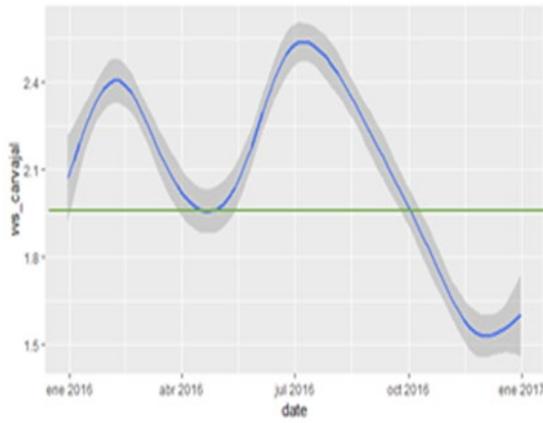


Figura 18. Graficas por Estación año 2015. a) Carvajal, b) Centro de alto rendimiento, c) Fontibón, d) Guaymaral, e) Las Ferias, f) Ministerio de Ambiente, g) Puente Aranda, h) San Cristóbal, i) Suba, j) Tunal, k) Usaquén, l) Kennedy. Fuente: propia

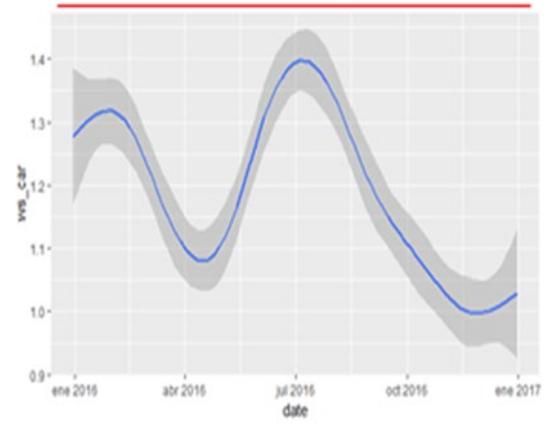
6) Graficas del año 2016 donde muestra el comportamiento de la velocidad del viento en los meses de enero a diciembre donde el umbral fue superado en las estaciones Carvajal, Kennedy y Puente Aranda.

2016

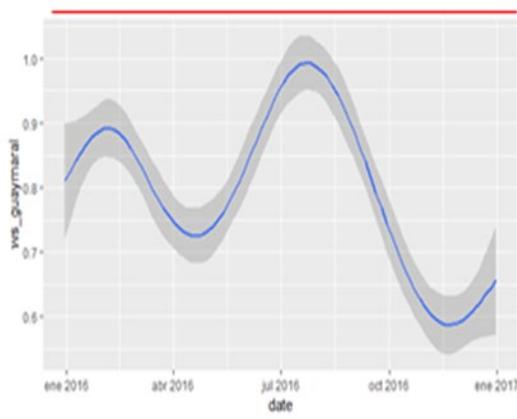
a)



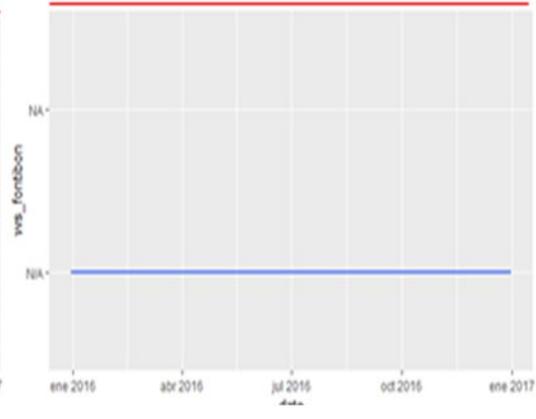
b)



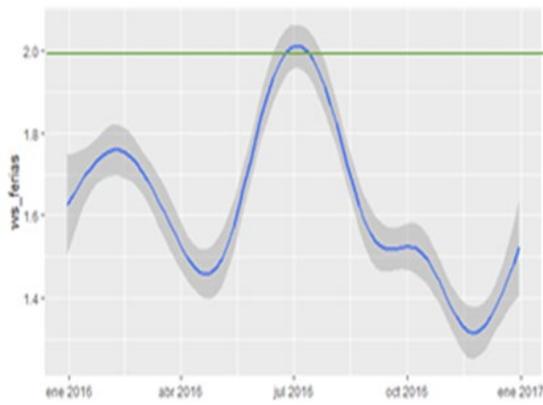
c)



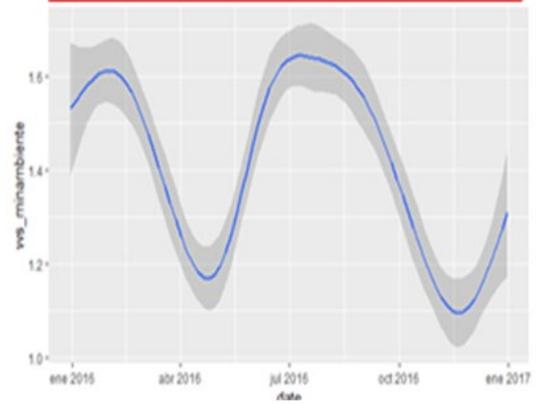
d)



e)



f)



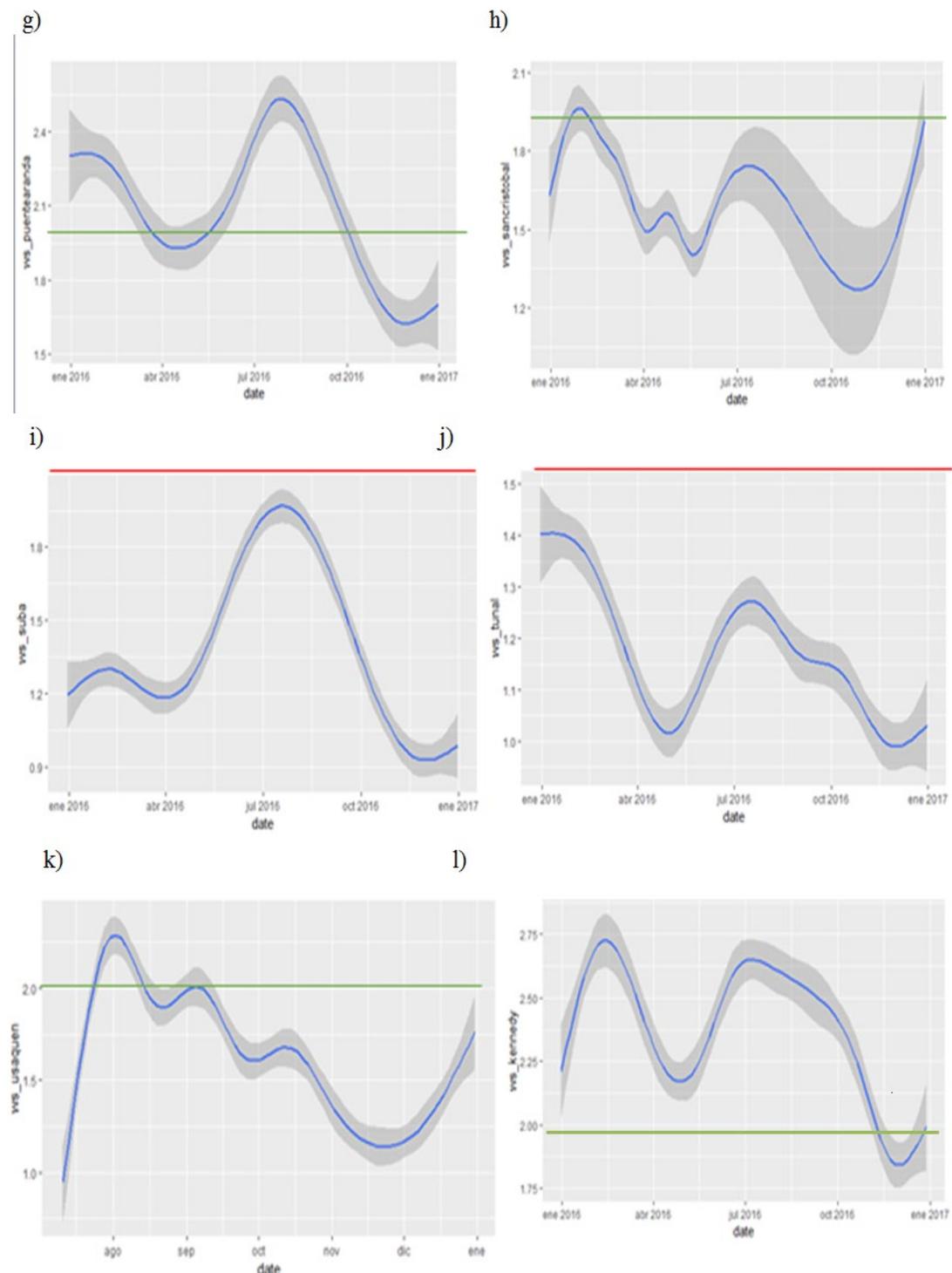
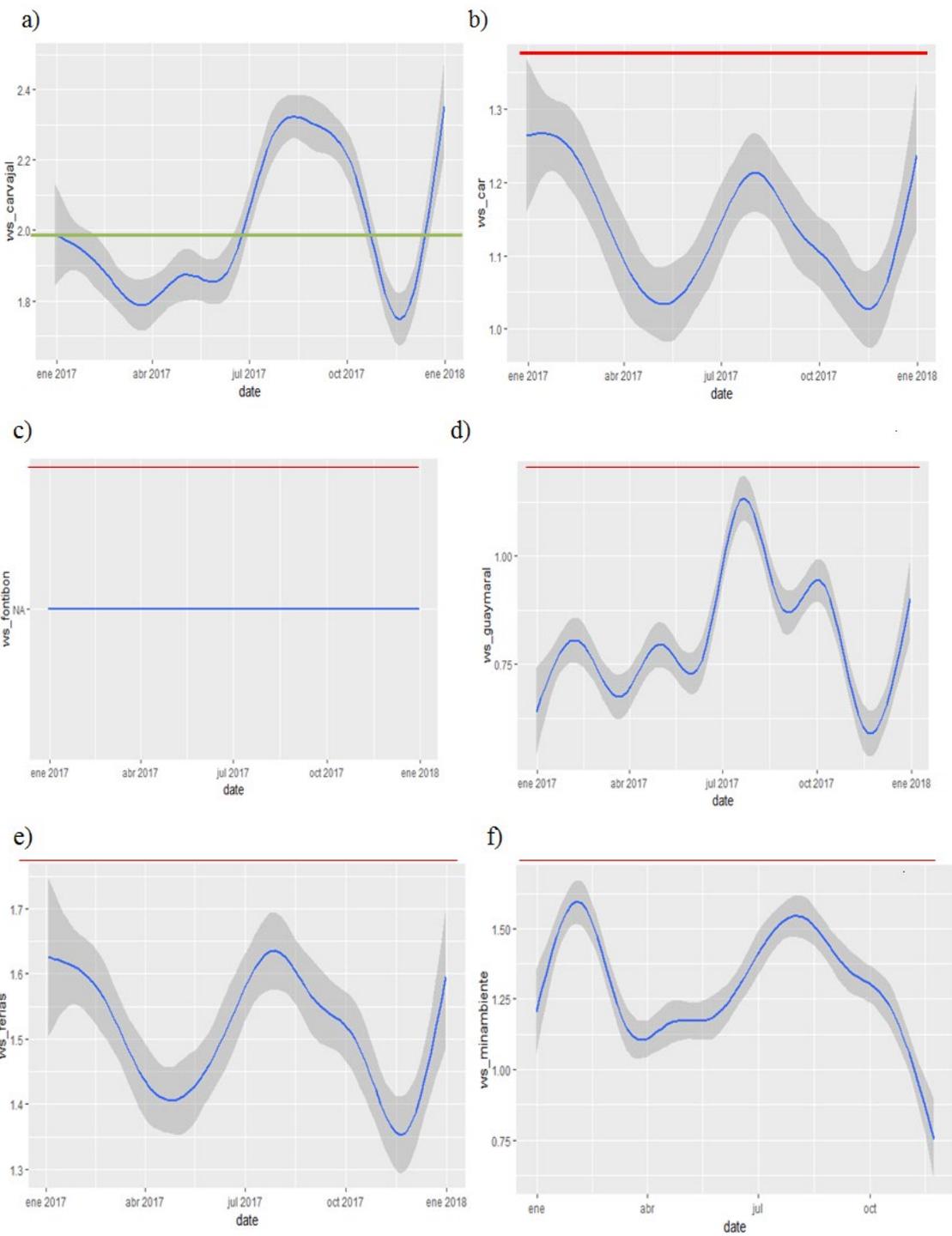


Figura 19. Graficas por Estación año 2016. a) Carvajal, b) Centro de alto rendimiento, c) Fontibón, d) Guaymaral, e) Las Ferias, f) Ministerio de Ambiente, g) Puente Aranda, h) San Cristóbal, i) Suba, j) Tunal, k) Usaquén, l) Kennedy. Fuente: propia

7) Serie de graficas del año 2017 donde muestra el comportamiento de la velocidad del viento donde se superó el umbral de 2 m/s las estaciones Carvajal, Kennedy y Puente Aranda.

2017



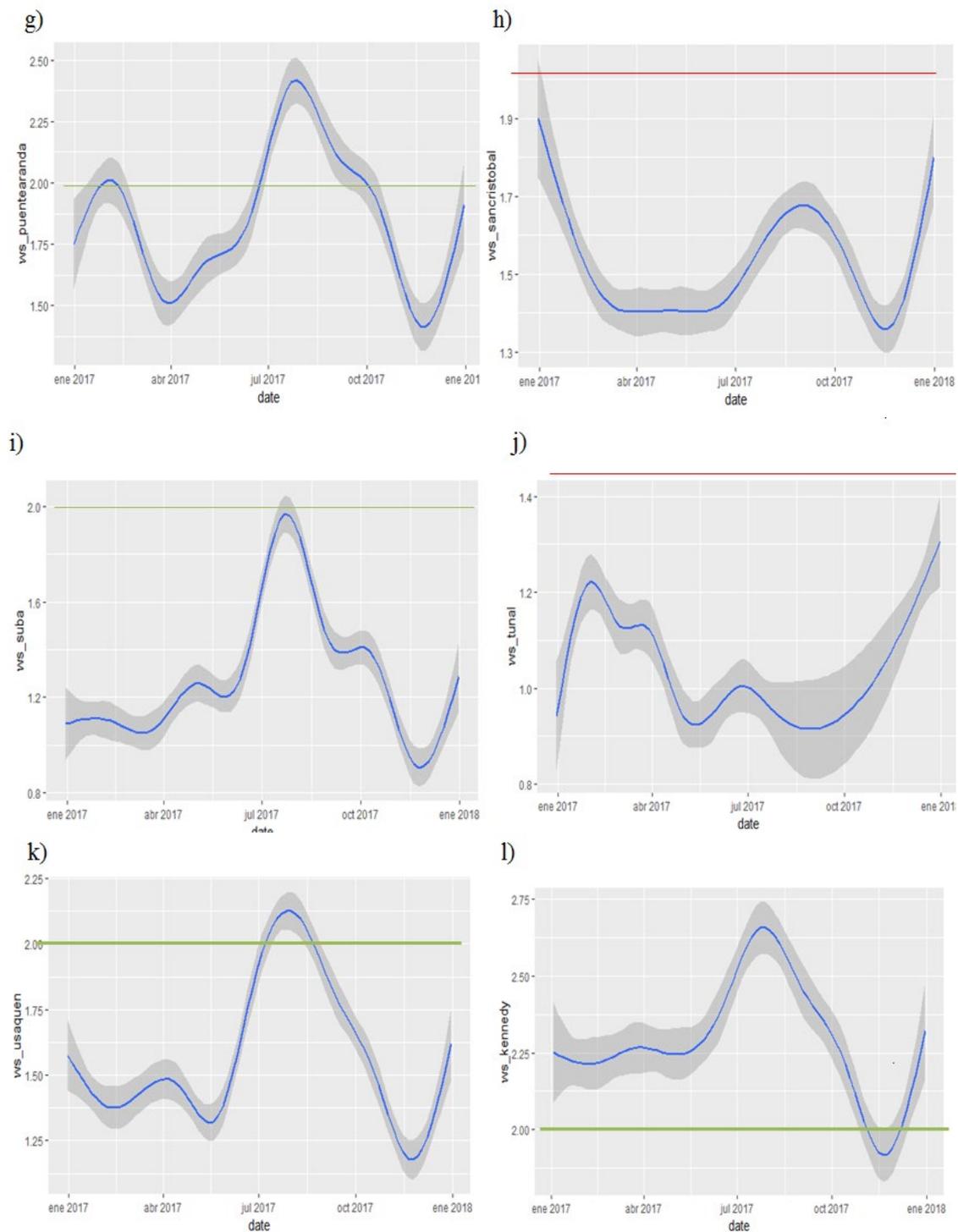
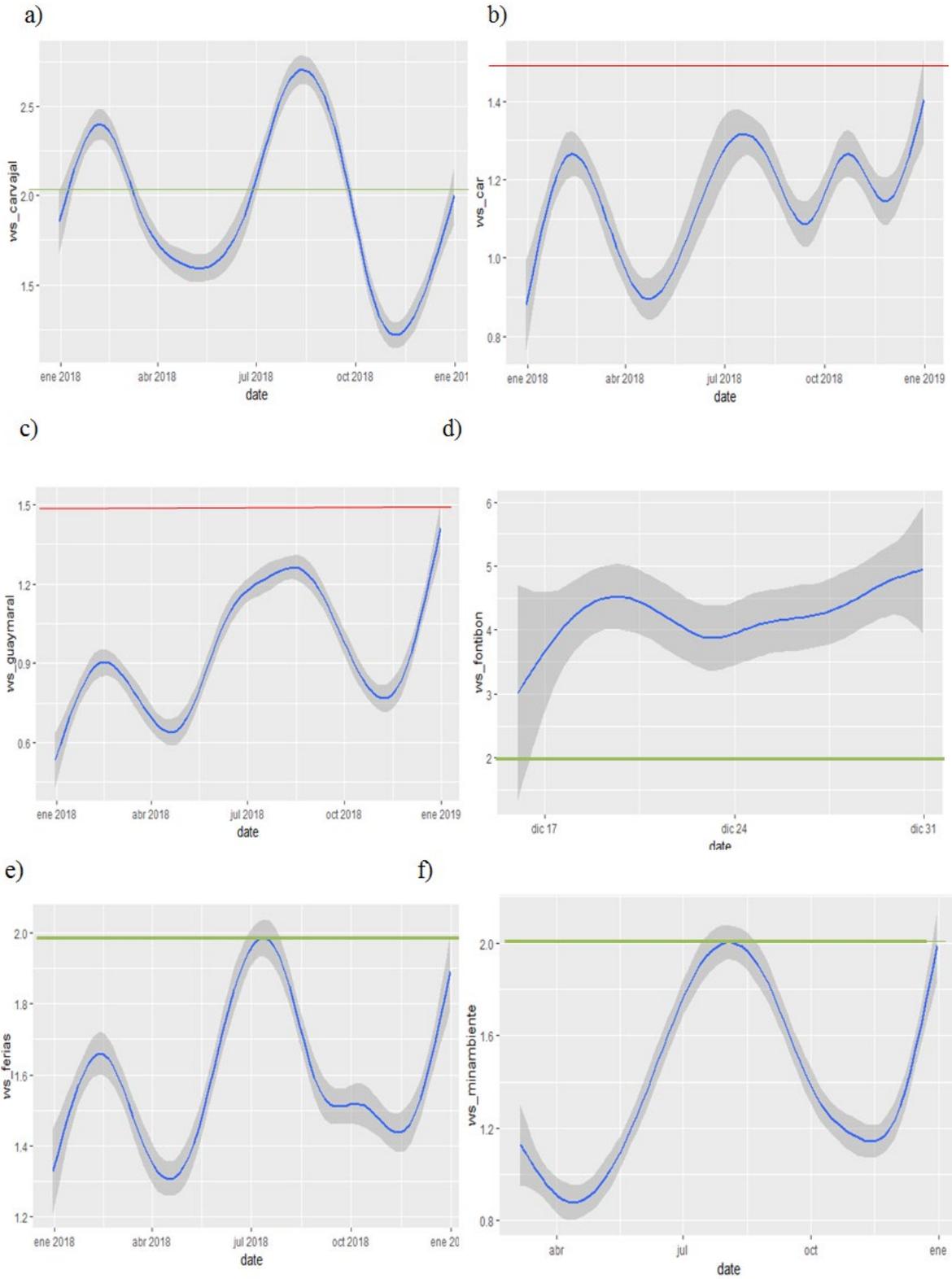


Figura 20. Graficas por Estación año 2017. a) Carvajal, b) Centro de alto rendimiento, c) Fontibón, d) Guaymaral, e) Las Ferias, f) Ministerio de Ambiente, g) Puente Aranda, h) San Cristóbal, i) Suba, j) Tunal, k) Usaquén, l) Kennedy. Fuente: propia

8) Serie de graficas del año 2018 donde muestra el comportamiento de la velocidad del viento, superaron el umbral las estaciones Carvajal, Kennedy, Puente Aranda, Guaymaral y Fontibón.



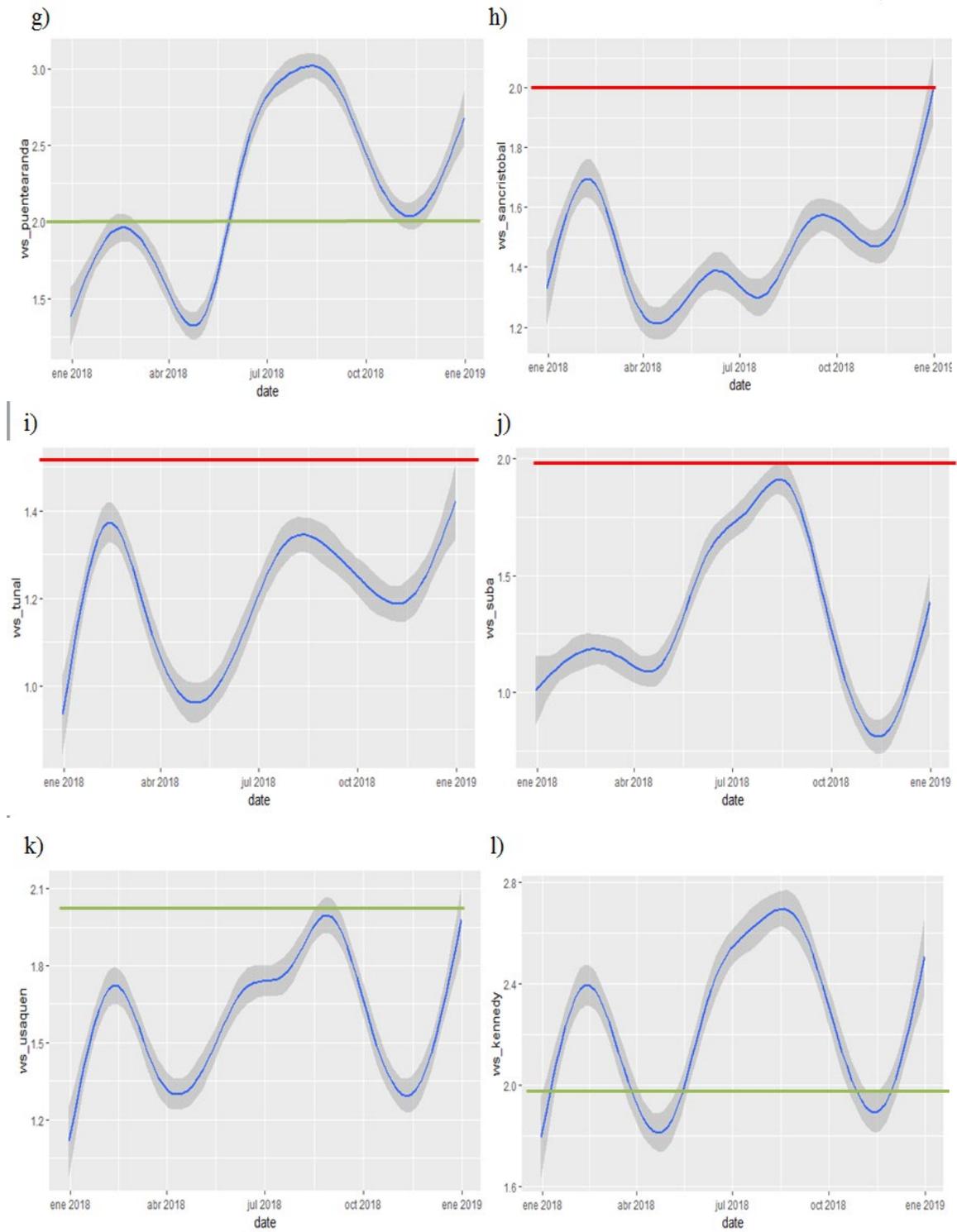


Figura 21. Graficas por Estación año 2018. a) Carvajal, b) Centro de alto rendimiento, c) Fontibón, d) Guaymaral, e) Las Ferias, f) Ministerio de Ambiente, g) Puente Aranda, h) San Cristóbal, i) Suba, j) Tunal, k) Usaquén, l) Kennedy. Fuente: propia

Para resumir toda la información obtenida en las gráficas de cada año, se sintetiza la información a continuación en la *Tabla 16*:

Tabla 16. Comportamiento anual de la velocidad del viento en las estaciones

tabla de evaluacion de velocidad del viento en estaciones de bogota									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	ponderado
Carvajal									Optimó
CAR (centro de alto rendimiento)									No Optimó
Fontibon									De mayor estudio
Guaymaral									No Optimó
Las Ferias									No Optimó
Min.Ambiente									No Optimó
Puente Aranda									Optimó
San Cristobal									No Optimó
Suba									No Optimó
Tunal									No Optimó
Usaquen									No Optimó
Kennedy									Optimó

A partir de estos valores y segregación, se hace esta tabla de resumen donde al final se de una calificación de óptimo y no óptimo teniendo en cuenta las siguientes convenciones:

Convenciones Evaluacion Estaciones.	
	grafica que tiene velocidades de 2,0 m/s en periodos de mas de 3 meses
	grafica que no tiene velocidades de 2,0 m/s
	grafica que tiene picos velocidades de 2,0 m/s en periodos no mayores a 1 mes
	grafica que tiene velocidades de 2,0 m/s en periodos cortos menores a 2 meses
	N/A no aplica

CONVENCIONES PONDERADO POR ESTACION	
optimo	cumple en su mayoría o total las condiciones de viento minima para el sistema WIND TREE
no optimo	no cumple con las condiciones en los años de muestra
de mayor estudio	su comportamiento va de 3 m/s - 5 m/s es necesario estudiar mas a fondo

Figura 22. Convenciones de evaluación para las estaciones

Los puntos en la ciudad de Bogotá donde es relevante realizar el estudio son en donde se encuentran las estaciones: Carvajal, Puente Aranda , Kennedy y Fontibón, de esta ultima se tienen únicamente los datos de diciembre del 2018, y los valores aunque pocos, son relevantes, pues la media de velocidad del viento supera los 2,0 m/s y se mantiene la tendencia hasta los últimos días de diciembre. Cabe resaltar que las estaciones que no tienen valores se debe a que el instrumento de medición no detecta el flujo de aire, es decir, la medición está por debajo del límite de detección (calmas) o el sistema de reporte distrital presenta fallas de recolección y/o transmisión de datos.

Estratificación en Bogotá

Para este punto es necesario establecer la ubicación de cada estación en las localidades de la ciudad de Bogotá y contrastarla con los datos de la SDA con el fin de conocer el estrato en el cual se encuentran las diferentes estaciones meteorológicas. En las Figuras 23 a 32 se observa la localización precisa de las estaciones en cada localidad presente en la ciudad.

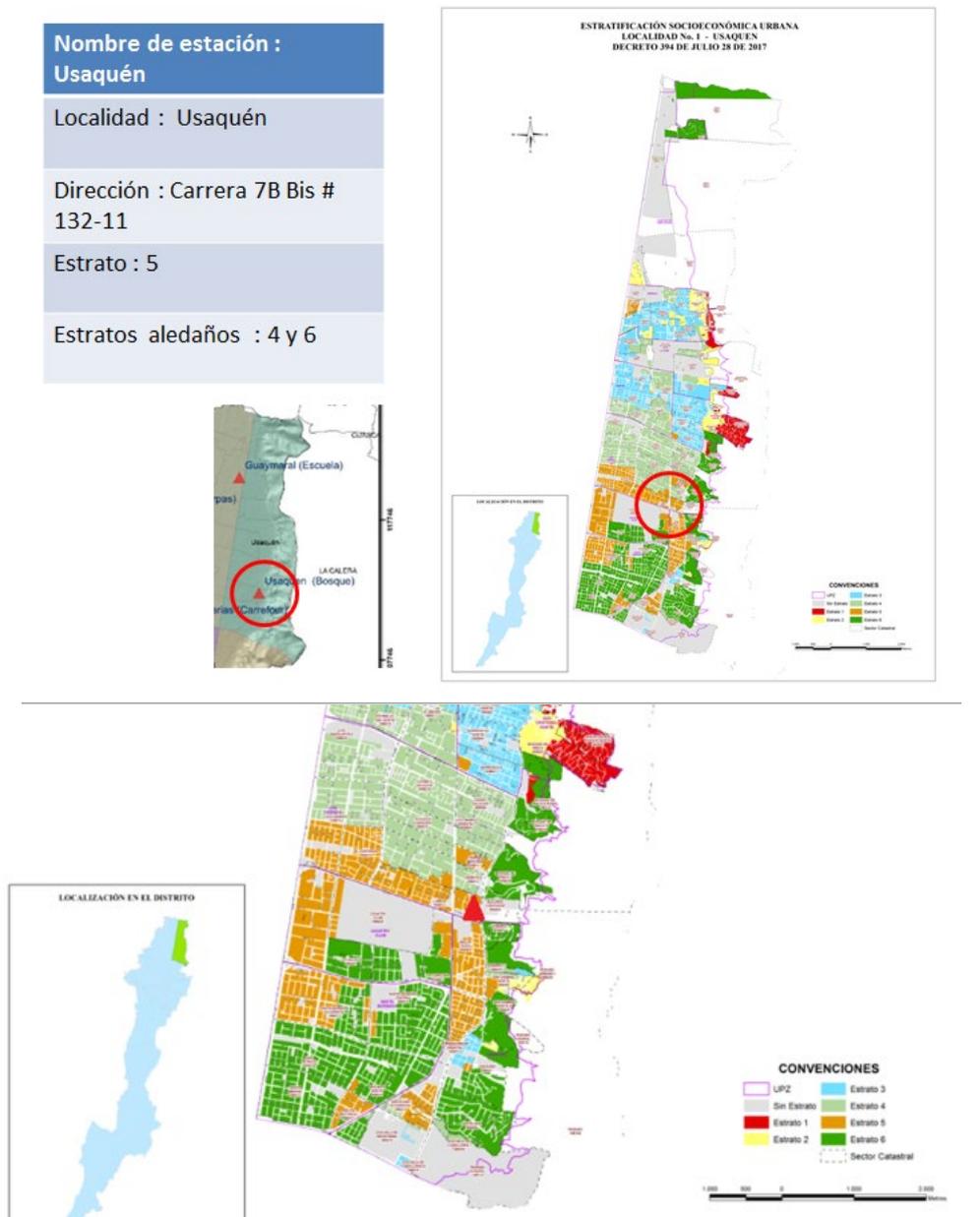


Figura 23. Estación Usaquén. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

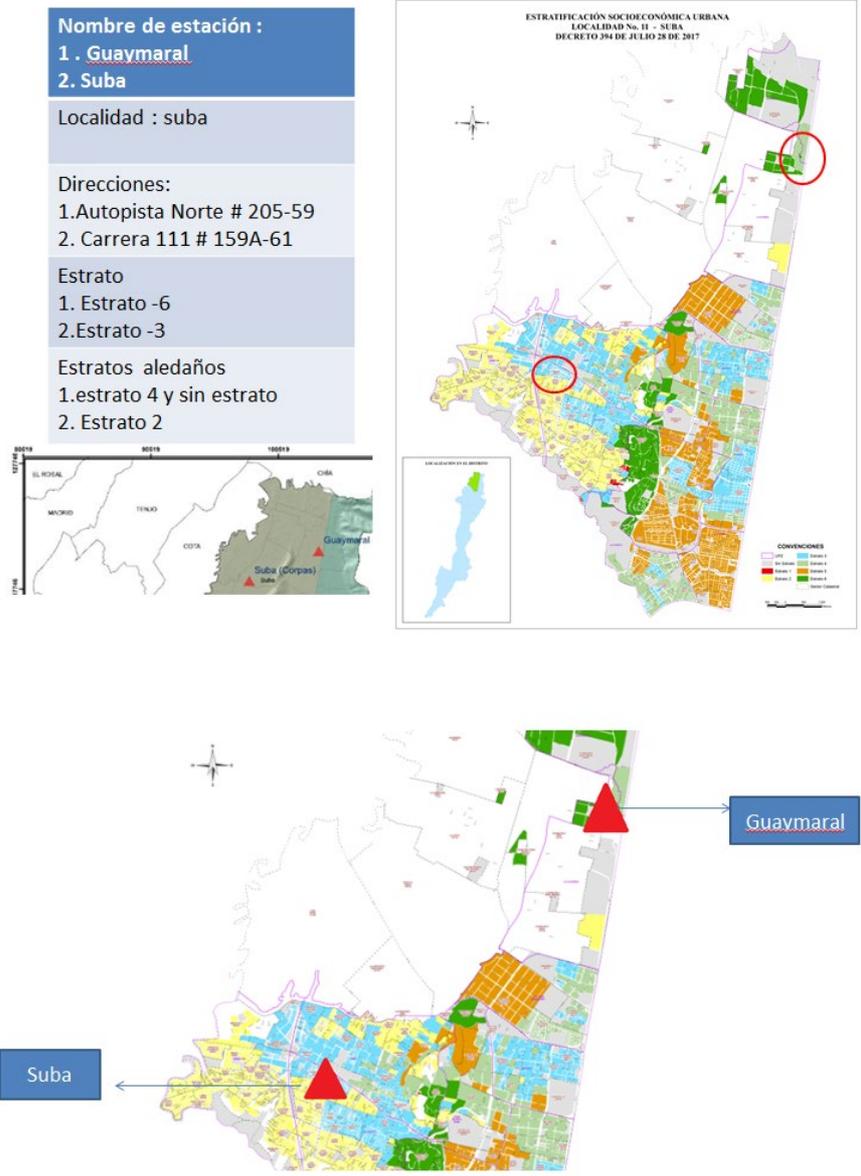


Figura 25. Estación 1) Guaymaral, 2) Suba. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Nombre de estación :
1. Bolivia
2. Las ferias

Localidad : Engativá

Direcciones:
1. Avenida Calle 80 # 121-98
2. Avenida Calle 80 # 69Q-50

Estrato
1. Estrato -3
2. Estrato -3

Estratos aledaños
1. estrato 2 y 4
2. Estrato 3

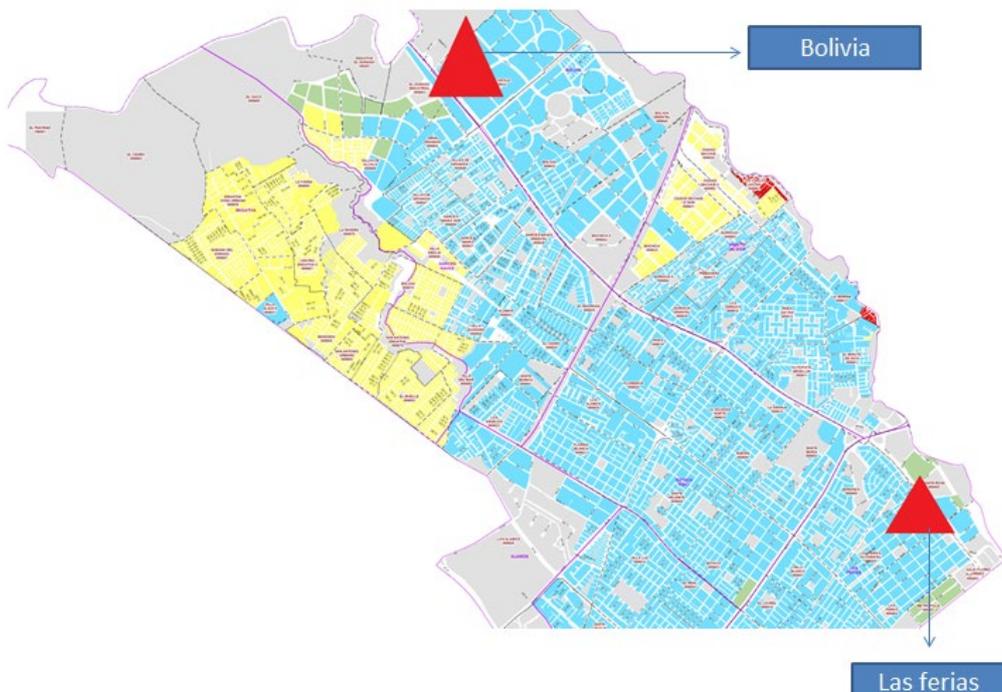
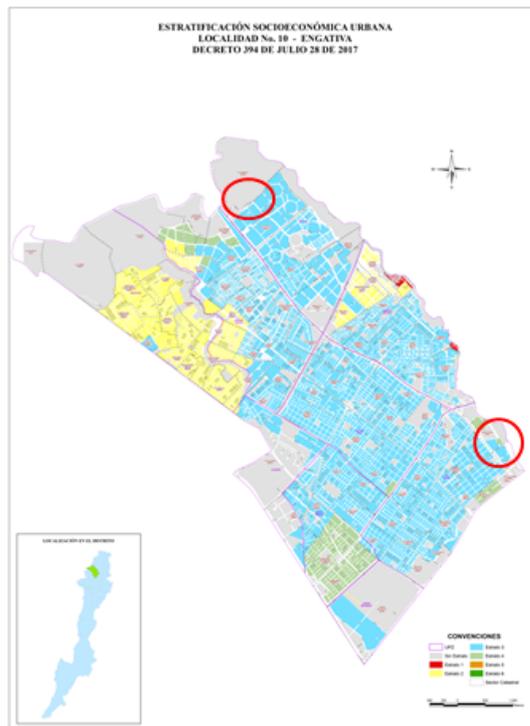


Figura 26. Estación 1) Bolivia, 2) Las Ferias. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Nombre de estación :
1. Kennedy
2. Carvajal

Localidad : Kennedy

Direcciones:
1. Carrera 80 # 40-55 sur
2. Autopista Sur # 63-40

Estrato
1. Estrato 2
2. Estrato 3

Estratos aledaños
1. estrato 3
2. Estrato 2

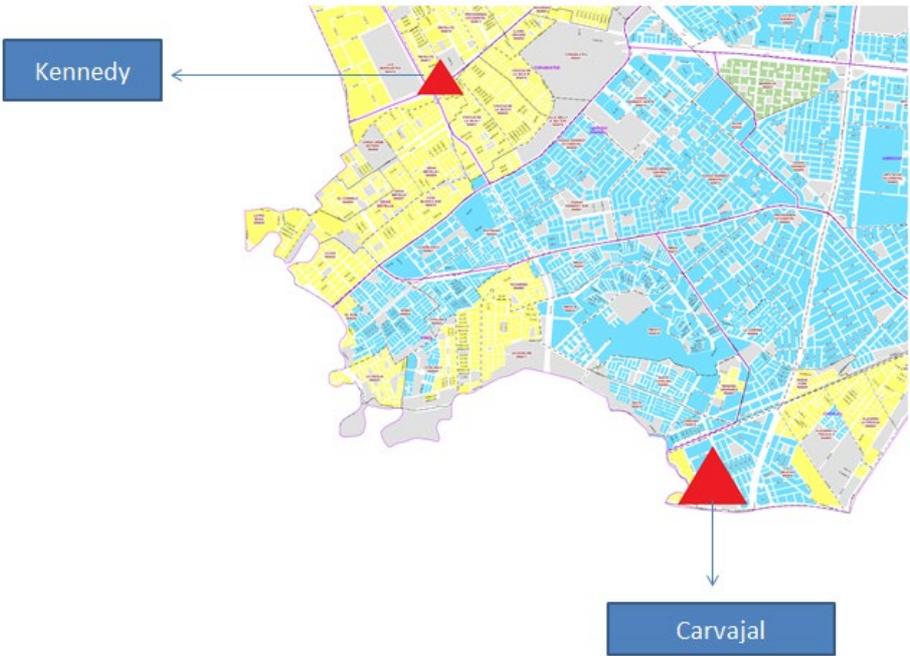
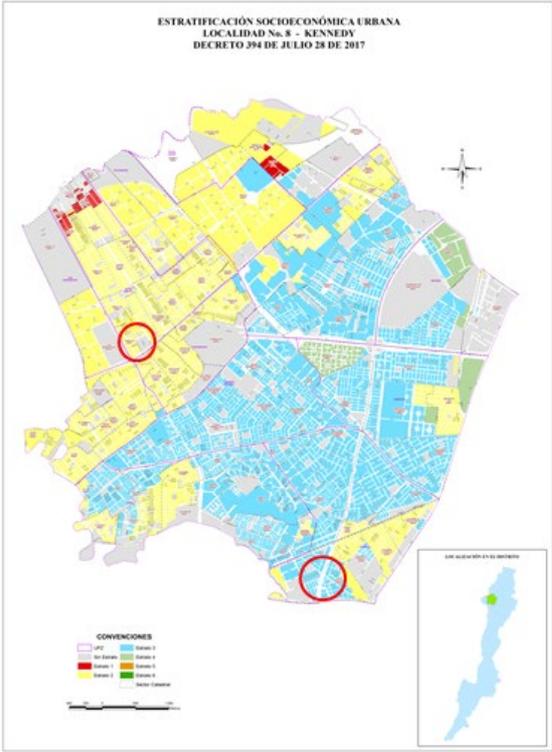
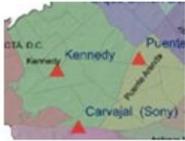


Figura 27. Estación 1) Kennedy, 2) Carvajal. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Nombre de estación : 1. P. Simón Bolívar
Localidad : 1. barrios unidos
Direcciones: 1. Calle 63# 59A-06
Estrato 1. Estrato : sin estrato
Estratos aledaños 1.estrato 3 -4

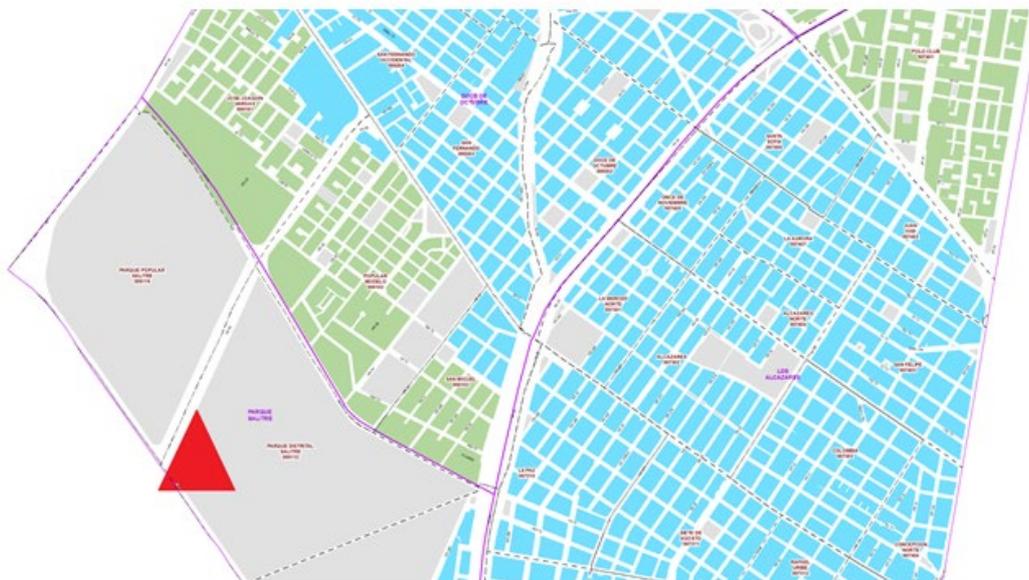


Figura 28. Estación Simón Bolívar. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Nombre de estación : Fontibón
Localidad : Fontibón
Dirección: Carrera 96G # 17B-49
Estrato Estrato 3
Estratos aledaños .estrato 2 y 4

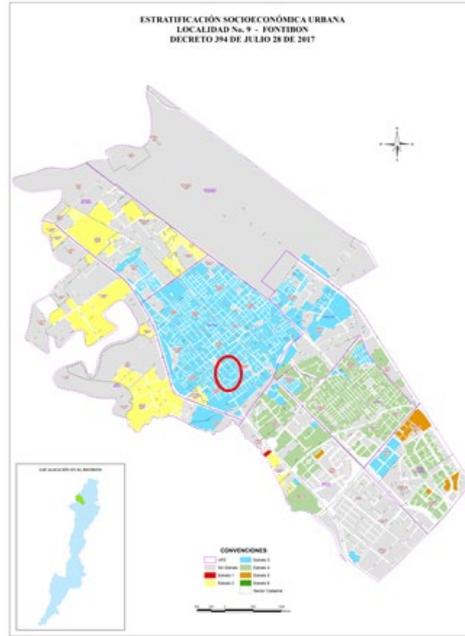


Figura 29. Estación Fontibón. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Nombre de estación :Puente Aranda
Localidad : Puente Aranda
Dirección: Calle 10 # 65-28
Estrato Estrato sin
Estratos aledaños estrato 3



Figura 30. Estación Puente Aranda. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Nombre de estación : Tunal
Localidad : Tunjuelito
Dirección: Carrera 24 # 49-86 sur
Estrato Estrato 2
Estratos aledaños estrato 2 y 3

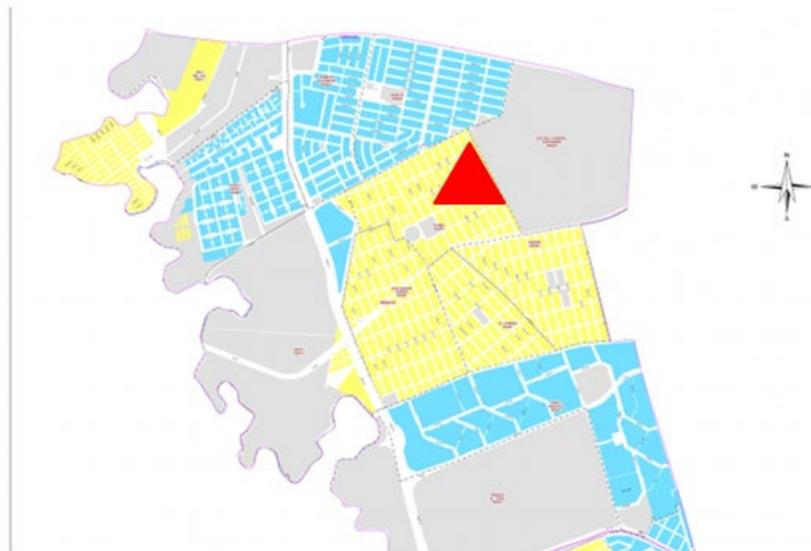
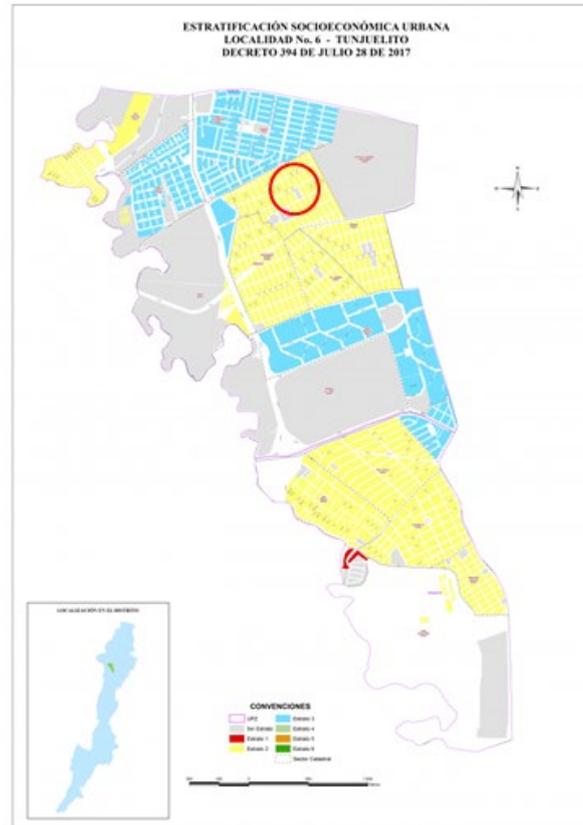


Figura 31. Estación Tunal. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Nombre de estación : San Cristóbal
Localidad : San Cristóbal
Dirección: Carrera 2 Este # 12-78 sur
Estrato Estrato 2
Estratos aledaños estrato 3 y 1

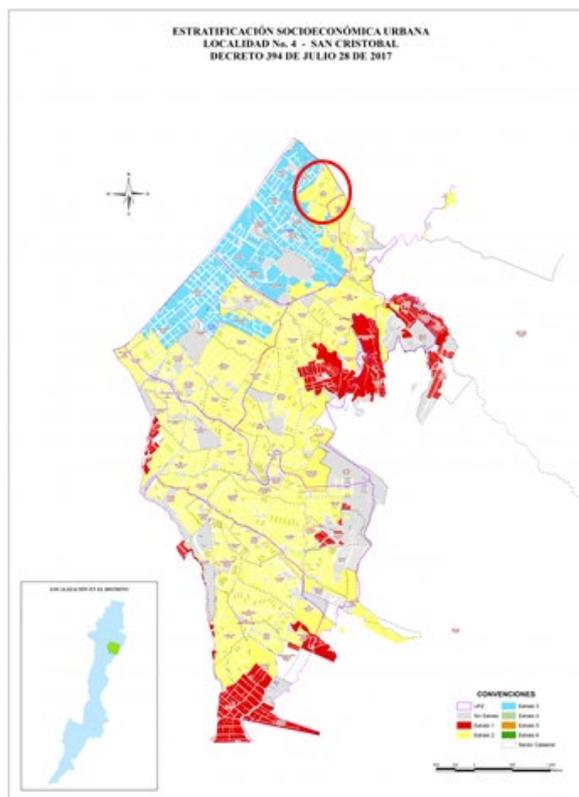


Figura 32. Estación San Cristóbal. Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017; Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Teniendo como base estos datos, se realiza una tabla resumen donde se especifica el nombre de la estación, la localidad donde se encuentra, su dirección física en Bogotá, el tipo de zona y por último el estrato en donde se encuentra:

Tabla 17. Calificaciones por estrato de estaciones

Estación	Localización toma muestra	dirección	Localidad	Tipo de zona	estrato
Guaymaral	Zona Verde	Autopista Norte # 205-59	suba	Suburbana	6
Usaquén	Azotea	Carrera 7B Bis # 132-11	Usaquén	Urbana	5
Suba	Azotea	Carrera 111 # 159A-61	suba	Suburbana	3
Bolivia	Zona Verde	Avenida Calle 80 # 121-98	Engativá	Suburbana	3
Las Ferias	Zona Verde	Avenida Calle 80 # 69Q-50	Engativá	Urbana	3
car	Zona Verde	Calle 63# 59A-06	Barrios unidos	Urbana	sin
ministerio de ambiente	Azotea	Calle 37 # 8-40	santa fe	Urbana	sin (3)
Fontibón	Azotea	Carrera 96G # 17B-49	Fontibón	Urbana	3

Puente Aranda	Azotea	Calle 10 # 65-28	Puente Aranda	Urbana	sin(3)
Kennedy	Zona Verde	Carrera 80 # 40-55 sur	Kennedy	Urbana	2
Carvajal	Azotea	Autopista Sur # 63-40	Kennedy	Urbana	3
Tunal	Zona Verde	Carrera 24 # 49-86 sur	Tunjuelito	Urbana	2
San Cristóbal	Zona Verde	Carrera 2 Este # 12-78 sur	San Cristóbal	Urbana	2

Fuente: propia

A partir de esta tabla se observa a que estrato pertenece cada estación; esto, con el fin de conocer cuanto es lo que se cobra por el servicio de energía dentro del período de estudio y mediante este valor, conocer el período de retorno de dinero según el año y el costo de la energía.

Costo de la energía en Bogotá

En la *Tabla 18* se muestra el precio anual por estrato en la ciudad de Bogotá de la empresa CODENSA encargada del servicio de la luz, según la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) (UPME, 2018).

Tabla 18. Tarifa energía por estrato

SUI Tarifa Promedio por Empresa						
año	estrato1	estrato2	estrato 3	estrato4	estrato 5	estrato 6
2011	\$ 348,00	\$ 349,00	\$ 349,00	\$ 346,00	\$ 347,00	\$ 347,00
2012	\$ 350,00	\$ 355,00	\$ 355,00	\$ 352,00	\$ 353,00	\$ 352,00
2013	\$ 357,00	\$ 358,00	\$ 358,00	\$ 355,00	\$ 357,00	\$ 355,00
2014	\$ 379,00	\$ 377,00	\$ 376,00	\$ 373,00	\$ 375,00	\$ 374,00
2015	\$ 386,00	\$ 385,00	\$ 384,00	\$ 381,00	\$ 384,00	\$ 382,00
2016	\$ 438,00	\$ 435,00	\$ 435,00	\$ 431,00	\$ 434,00	\$ 432,00
2017	\$ 449,00	\$ 448,00	\$ 448,00	\$ 443,00	\$ 444,00	\$ 443,00
2018	\$ 492,00	\$ 489,00	\$ 488,00	\$ 484,00	\$ 486,00	\$ 484,00
promedio	\$ 399,88	\$ 399,50	\$ 399,13	\$ 395,63	\$ 397,50	\$ 396,13

Fuente: Adaptada de (UPME, 2018).

Con esta información se puede establecer que los estratos más altos no necesariamente tienen las tarifas más altas, lo que indica que no necesariamente por pertenecer a un estrato más alto, la vivienda tendrá un mayor cobro por la energía, es así que mediante el análisis de rentabilidad, aquellas viviendas que se encuentren en estratos más altos no necesariamente tendrán una tasa de retorno de inversión del sistema *Wind Tree* más alta.

Los estratos 1, 2 y 3 tienen una tarifa promedio de cobro del servicio de energía entre los años 2011 al 2018 de \$399 por KW consumido, siendo esta, la tarifa más elevada del cobro del servicio de energía, posteriormente se encuentra el estrato 5, con una tarifa promedio de cobro del servicio de energía de \$397 por KW consumido, el siguiente, es el estrato 6 con una tarifa promedio de cobro del servicio de energía de \$396 por KW consumido. Por último, se encuentra el estrato 4 con una tarifa promedio de cobro del servicio de energía de \$395 por KW consumido.

Estos valores varían según los estratos por diversas razones. Una de la más recurrentes y que explica este fenómeno de tarifas más caras en estratos más bajos es la infraestructura eléctrica, ya que en estos estratos los ciclos de renovación son poco recurrentes lo que repercute en que, si se daña la infraestructura o se ve comprometida por algún peligro, el cambio no se da oportunamente contraponiendo esta situación a los estratos altos en donde los ciclos de renovación son altos y los cambios de infraestructura oportunos. A los bajos ciclos de renovación se le suma, la poca planeación de las viviendas en estratos bajos, lo que incrementa la demanda de energía, sin embargo la infraestructura no está diseñada para dicha demanda, lo que ocasiona un deterioro de ella en un menor tiempo al posiblemente previsto, se suman también los actos vandálicos como robo de cableado entre más factores que incrementan el valor de la factura de energía en estos estratos.

En esta fase, el estudio se enfoca en la recolección de información del sistema *Wind Tree*, y de toda aquella información relacionada con el régimen de vientos en la ciudad de Bogotá, ya que estos datos son necesarios para analizar las condiciones iniciales con las que cuenta tanto el sistema, como la ciudad en la que se desea implementar. La recolección de información preliminar es un punto crucial en este tipo de investigación, pues da pie a los resultados y análisis de las siguientes fases.

12.2 Fase 2. Evaluación de las variables económica, ecológica y social en los puntos con viento favorable en la ciudad de Bogotá

La evaluación de variables se dio a partir de una matriz en donde se resume la información y se asignan puntajes de acuerdo a lo descrito en el marco metodológico para al final hacer una suma y establecer cual sería el mejor punto de Bogotá para poner el sistema *Wind Tree*.

Tabla 19. Matriz de evaluación de variables.

1.Nombre Estación	2. Análisis de línea media de viento (que este por encima del umbral de velocidad de viento 2m/s)	3.Energía que se puede generar en esta zona de Bogotá.	4.Precio de la energía (estrato)	5.Rentabilidad de poner un sistema Wind Tree en esta zona. (tiempo de retorno de inversión)	TOTAL
carvajal	A.	B.	A.	E.	30 PUNTOS
CAR (centro de alto rendimiento)	F.	E.	A.	E.	15 PUNTOS
fontibon	D.	G.	A.	E.	16 PUNTOS
guaymaral	F.	F.	C.	E.	9 PUNTOS
Las Ferias	F.	C.	A.	E.	18 PUNTOS
min ambiente	F.	D.	A.	E.	17 PUNTOS
puente aranda	A.	B.	A.	E.	30 PUNTOS
san cristobal	F.	D.	A.	E.	17 PUNTOS
suba	F.	C.	A.	E.	18 PUNTOS
tunal	F.	F.	A.	E.	14 PUNTOS
usaquen	F.	D.	B.	F.	15 PUNTOS
kennedy	A.	A.	A.	E.	32 PUNTOS

En la columna 1 se establecen los nombres de las estaciones que se van a estudiar. Se parte de 14 estaciones que son las que presenta el IDEAM para la ciudad de Bogotá, pero sólo se tienen datos de 12 de ellas, que son aquellas que se estudian.

En la columna 2 se presenta el análisis global del comportamiento de viento según los datos de la RMCAB y se discriminan según la línea del umbral mínimo de 2,0 m/s, es así como las estaciones Carvajal, Puente Aranda y Kennedy son las que más tienen puntaje, calificadas con la letra A, lo que quiere decir que estos 3 puntos son los puntos con mayor intensidad de vientos en Bogotá y Fontibón fue la estación de peor puntaje, calificada con la letra D, lo cual implica que Fontibón sería el lugar donde menos corre viento en Bogotá, pero existe una salvedad de que la estación de Fontibón únicamente reportó datos durante diciembre del 2018.

La columna 3, de la energía que puede producir cada estación, está descrita por 2 limitantes: primero, por la velocidad del viento y segundo, la producción energética por el sistema *Wind Tree* ya que esta producción cambia según la velocidad de viento: a mayor velocidad, mayor voltaje produce.

La columna 4, explica el precio de la energía por estrato; según el costo del servicio de energía, Guaymaral y Usaquén son los únicos calificados con C y B respectivamente, el resto de estaciones se califican con A ya que todos están en estratos 2 o 3 y estos son los estratos que tienen los precios de energía más altos.

En la columna 5 se describe la rentabilidad del sistema. Se estableció por años, pero en ninguna estación se recupera la inversión esto quiere decir que la tasa de retorno de inversión es muy alta y en la muestra de los años tomados para el estudio no se retorna la inversión por esto todos se califican con la letra E que es no retorno de inversión en los años de muestra, por lo cual el sistema *Wind Tree* en la ciudad de Bogotá, no es rentable para un período de tiempo considerable. La recuperación de la inversión se puede establecer en 64 años para la estación con mayor puntaje esto tomando el viento y las condiciones climáticas de la muestra que fueron de solo 8 años y proyectando las mismas condiciones cosa que puede que cambie ya que el factor viento tiene demasiadas variables y no se comporta de forma gaussiana para su predicción

Como se estableció en el marco metodológico, cada letra tiene un puntaje para sumarlo y para asignar un valor al final en donde el mayor puntaje será la mejor evaluación del punto. Las estaciones con mayor puntaje fueron:

- a) Kennedy → 32 puntos
- b) Puente Aranda → 30 puntos
- c) Carvajal → 30 puntos

Según el estudio de pre-factibilidad la mejor ubicación para implementar el sistema *Wind Tree en Colombia*, Bogotá sería la estación de Kennedy ya que presenta el mejor puntaje.

El retorno de inversión está dado por la multiplicación del costo de la energía en ese año y en ese estrato por la energía que suministró el sistema anualmente. En la *Tabla 20* se puede ver el retorno monetario de la inversión en cada uno de los años y para cada estación. La estación con el mejor potencial de recuperación de la inversión es en la localidad de Kennedy con un total de COP \$20'000.000 en 8 años, sin embargo, el costo de instalación del sistema según New World Wind es

de EUR 49.500 (New World Wind, 2017), que según la tasa de cambio a 2019 (1 euro = 3.600 pesos colombianos), se traducen a un precio de COP \$175'000.000 valor que podría ser poco atractivo para un inversor privado residencial o industrial, teniendo en cuenta el costo actual de consumo en Bogotá. Adicional a esto, en términos de economía en relación a la productividad, existen paneles solares fotovoltaicos que producen la misma cantidad de energía que *Wind Tree* y tienen un valor de entre EUR 15.000 y EUR 20.000, sin embargo, su ventaja recae en que el árbol es adaptable a diferentes locaciones y puede producir energía para cubrir la mitad de las necesidades anuales de un hogar francés promedio, cubrir las necesidades de una oficina de bajo consumo por doce meses, o cargar un automóvil eléctrico por 10.000 millas cada año, equivalente a 160 galones de combustible (Schreiber, 2016). Posterior a la instalación del sistema, New World Wind no se encarga directamente de los costos de mantenimiento o de operación, estos dependen del sistema de red eléctrica en el sitio en donde sea instalado, sólo en caso de daños mayores en la funcionalidad de la estructura, la empresa atenderá (New World Wind, 2018).

Es necesario hacer un estudio posterior en una ciudad con un régimen de viento superior donde la energía producida sea tal que se pueda recuperar el costo de la instalación y se puedan producir ganancias.

Tabla 20. Matriz de retorno de inversión.

Produccion cuantificada en COP\$												
	Carvajal - Sevil	Centro de Alto	Fontibon	Guaymaral	Kennedy	Las Ferias	MinAmbiente	Puente Aranda	San Cristobal	Suba	Tunal	Usaquen
2011	\$ 1.753,516	\$ 723,093	\$ -	\$ 292,209	\$ 1.626,584	\$ 1.270,116	\$ -	\$ 2.610,171	\$ 827,444	\$ 1.227,154	\$ 343,800	\$ 762,116
2012	\$ 2.153,714	\$ 815,293	\$ -	\$ 418,880	\$ 2.442,222	\$ 1.429,443	\$ 718,769	\$ 2.112,179	\$ 1.195,605	\$ 1.508,040	\$ 312,400	\$ 993,024
2013	\$ 2.357,108	\$ 901,695	\$ -	\$ 438,461	\$ 2.595,822	\$ 1.400,389	\$ 1.333,765	\$ 1.977,019	\$ 1.718,830	\$ 1.525,008	\$ 307,379	\$ 965,971
2014	\$ 2.065,443	\$ 885,179	\$ -	\$ 502,170	\$ 2.697,058	\$ 1.453,541	\$ 1.423,498	\$ 1.802,206	\$ 1.293,713	\$ 1.618,680	\$ 307,632	\$ 970,762
2015	\$ 2.963,712	\$ 1.016,755	\$ -	\$ 529,414	\$ 3.216,444	\$ 1.719,629	\$ 1.437,658	\$ 2.457,178	\$ 516,362	\$ 1.776,154	\$ 463,810	\$ 1.179,686
2016	\$ 2.384,235	\$ 835,853	\$ -	\$ 392,947	\$ 2.556,234	\$ 1.454,988	\$ 1.200,121	\$ 2.515,300	\$ 939,861	\$ 1.355,808	\$ 582,378	\$ 737,106
2017	\$ 2.351,507	\$ 743,635	\$ -	\$ 438,437	\$ 2.803,942	\$ 1.218,067	\$ 989,318	\$ 2.066,893	\$ 1.328,365	\$ 1.232,045	\$ 351,098	\$ 1.400,864
2018	\$ 2.328,297	\$ 720,581	\$ 442,079	\$ 627,070	\$ 2.989,990	\$ 1.458,095	\$ 970,632	\$ 2.959,915	\$ 1.441,425	\$ 1.320,186	\$ 619,319	\$ 1.686,031
TOTAL	\$ 18.357,532	\$ 6.642,084	\$ 442,079	\$ 3.639,588	\$ 20.928,298	\$ 11.404,267	\$ 8.073,761	\$ 18.500,861	\$ 9.261,604	\$ 11.563,075	\$ 3.287,814	\$ 8.695,561
PROM	\$ 2.294,691	\$ 830,260	\$ 55,260	\$ 454,948	\$ 2.616,037	\$ 1.425,533	\$ 1.009,220	\$ 2.312,608	\$ 1.157,701	\$ 1.445,384	\$ 410,977	\$ 1.086,945
MES	\$ 191,224	\$ 69,188	\$ 4,605	\$ 37,912	\$ 218,003	\$ 118,794	\$ 84,102	\$ 192,717	\$ 96,475	\$ 120,449	\$ 34,248	\$ 90,579

Los resultados de esta segunda fase son indispensables para entender la pre-factibilidad del proyecto, ya que se evalúan diversos puntos del sistema pero después de analizar la matriz de variables, se reducen las posibilidades de implementación, los resultados de este trabajo indican que ninguna de las estaciones es económicamente viable lo que es de gran importancia en la toma de decisiones para seguir con el proyecto en la fase de factibilidad, que conlleva más elementos de investigación y más puntos que requieren una inversión para poder llevarlos a cabo.

Al contrastar los promedios ponderados de las diferentes estaciones de la RMCAB con el informe anual del 2017 de esta misma red, *Figura 33* (RMCAB, 2017), las estaciones con mayor puntaje durante la investigación, coinciden con las estaciones que presentan mayores velocidades de viento. Esto se resalta gracias a la importancia de la relación velocidad del viento, con el potencial de producción de energía y el retorno de inversión que el sistema *Wind Tree* podría aportar.

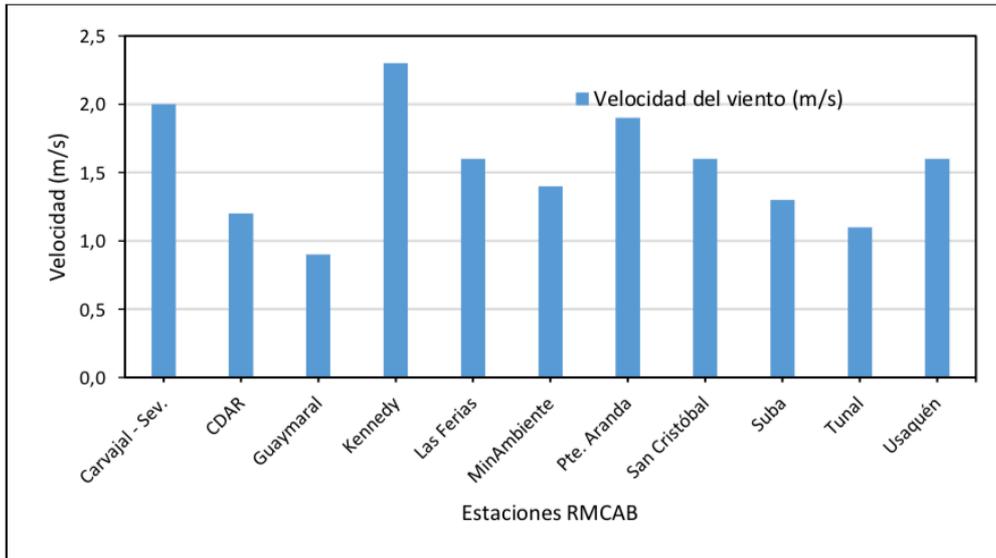


Figura 33. Velocidad del viento promedio multianual RMCAB. (RMCAB, 2017)

Al analizar el comportamiento de los vientos anualmente a en Bogotá (Figura 34), estos tienen un comportamiento de velocidad que no supera los 2,0 m/s (RMCAB, 2016). Esto se debe a que en la gráfica de la RMCAB se presentan valores promedio de todas las estaciones presentes en la ciudad, es decir, que aún si hay estaciones que reportan valores de 4,0 m/s o de 6,0 m/s, también existen estaciones que reportan valores muy cercanos a 1,0 m/s, lo que ocasiona un promedio poco variable y no permite que sean visibles ciertos picos que si serían representativos para esta investigación.

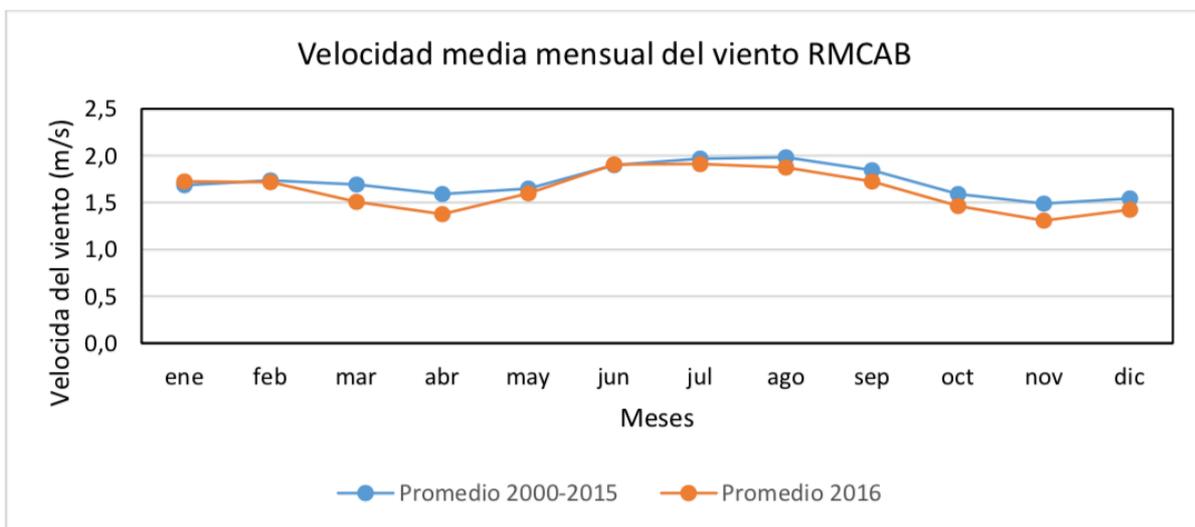


Figura 34. Velocidad media mensual del viento RMCAB. (RMCAB, 2016)

Durante esta fase se realizó la evaluación de las diferentes estaciones, teniendo en cuenta la matriz planteada. Se evalúa así pues la pre-factibilidad de *Wind Tree* en términos del potencial y deficiencia que tiene el sistema en Bogotá como región. A pesar de todos los puntos positivos de *Wind Tree* y su positivo impacto ambiental, el impacto económico no es significativo para esta área

del país al no producir la cantidad de energía necesaria para suplir las necesidades de los habitantes y al mismo tiempo generar ganancias.

12.3 Fase 3. Proposición de protocolo de implementación del sistema Wind Tree

Usando la fuente de información del sistema *Wind Tree* se elabora una guía de recomendaciones para la implementación de esta tecnología. Esta guía de recomendaciones trata los puntos críticos para entender el sistema *Wind Tree* y el cómo establecer su viabilidad preliminar teniendo en cuenta algunos aspectos clave vistos en el presente estudio.

1. Dimensiones

Observado en el marco de referencia, *Wind Tree* es una estructura de acero, que mide de alto 9.2 metros y de ancho el largo que ocupa es 7.9 metros en total; la altura de la rama más baja es de 3.5 metros y el largo de cada *Aeroleaf* es de 90 centímetros. El peso total de la estructura es de 2500 kilogramos. Se debe contar con un área de aproximadamente 15m² para el almacenamiento (o posicionamiento) de la estructura y debe tener acceso a un camión de instalación o desinstalación (New World Wind, 2018). Se debe tener también en cuenta el armario eléctrico con el que cuenta cada árbol del sistema *Wind Tree*.

En varias partes de Europa, en países como Francia, Alemania y Suiza, existen varios árboles de *Wind Tree* que ya están instalados (New World Wind, 2017), y se encuentran usualmente en parques comunes de la ciudad, en plazoletas que tengan un área mayor a 20m², y en áreas que tienen pequeños edificios cercanos, donde usualmente se plantaría un árbol natural. Teniendo esto en cuenta, se recomienda para su instalación en Bogotá, en parques públicos, donde se visualmente se ajusten, donde sean de utilidad, ya sea cerca a una pequeña oficina, cerca a la fuente de energía de los postes de luz, cerca a un negocio pequeño de comidas, zonas en donde recurran jóvenes, ya que *Wind Tree* cuenta con tomas de carga de dispositivos móviles (New World Wind, 2017). También se puede localizar en áreas o parques cercanos a sitios de entrenamiento deportivos, ya que estas instalaciones usualmente cuentan con el espacio necesario y se les daría un uso adecuado a los árboles. No se recomienda instalarlos en áreas de difícil acceso como azoteas o espacios con área de ingreso reducida.

2. Producción de energía

La aerodinámica del *Aeroleaf* ha sido optimizada para la menor velocidad de viento, con una velocidad mínima ajustada a 2,0 m/s para que la turbina entre en operación productiva. (New World Wind, 2018). En la *Figura 6*, en el marco de referencia se observa la curva de potencia del *Aeroleaf* por defecto, incluyendo el sistema de frenado.

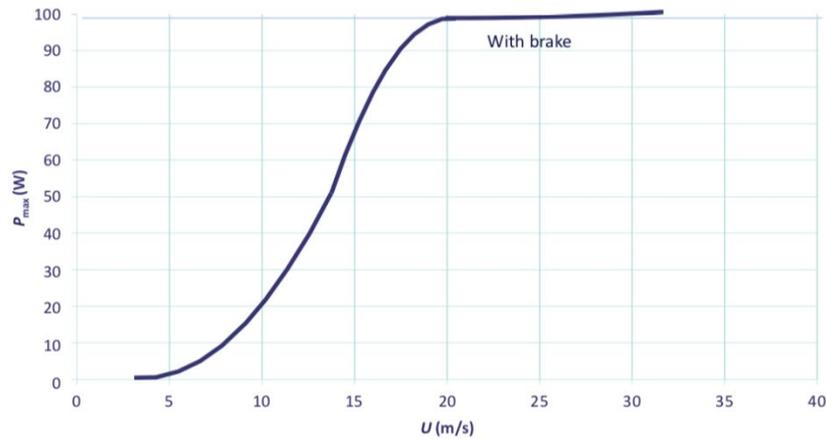
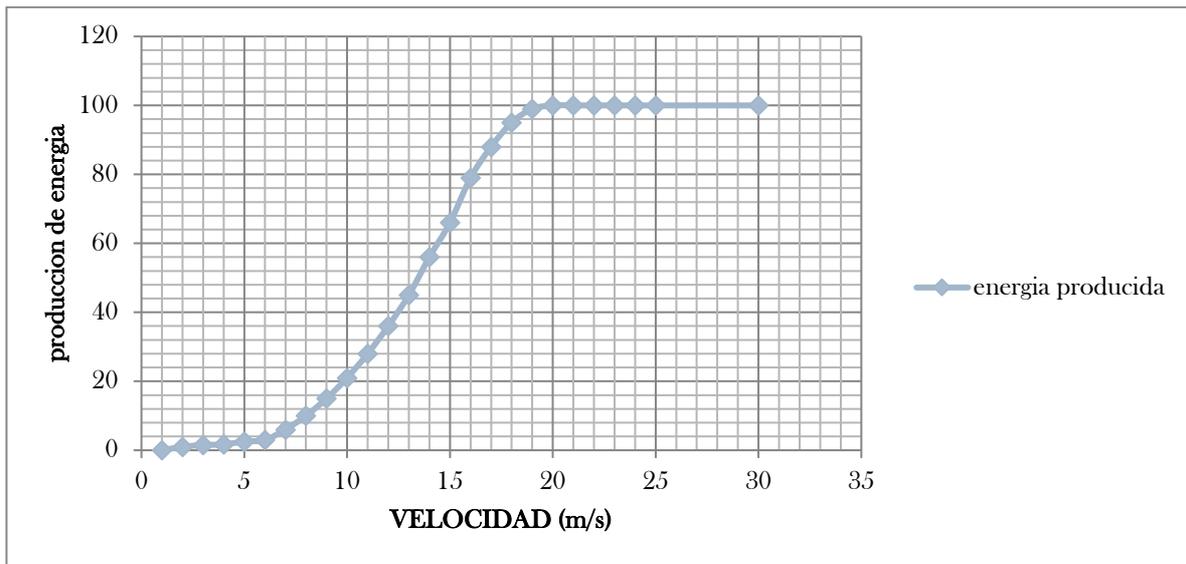


Figura 6. Curva de potencia del Aeroleaf. Fuente: (New World Wind, 2018).

La producción potencial de energía a partir de una velocidad de viento de 2,0 m/s presenta los siguientes valores y se establecen las velocidades y los voltajes que obtendrían según la velocidad. Se realizó una regla de 3 para aproximar las velocidades con las revoluciones por minuto ya que ambas son directamente proporcionales pero para la energía producida fue necesario hacer un estimado a partir de la elaboración de una grafica por el autor acercándose lo más posible a *Figura 6. Curva de potencia del Aeroleaf*.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Revoluciones por minuto en relación a la velocidad del viento y relación a energía producida.

	RPM	Velocidad (m/s)	energía producida (w)
max	700	20,0	100
	670	19,1	99

650	18,6	95	
650	18,6	95	
600	17,1	88	
550	15,7	66	
500	14,3	56	
450	12,9	36	
400	11,4	28	
350	10,0	21	
300	8,6	10	
250	7,1	6	
200	5,7	2,5	
190	5,4	2,5	
180	5,1	2,5	
170	4,9	1,7	
150	4,3	1,7	
140	4,0	1,7	
130	3,7	1,5	
120	3,4	1,5	
110	3,1	1,5	
100	2,9	1	
95	2,7	1	
90	2,6	1	
85	2,4	1	
80	2,3	1	
75	2,1	1	
70	2,0	1	
60	1,7	0	
56	1,6	0	
55	1,6	0	
min	50	1,4	0

Al ser proporcionales, si una aumenta la otra igual pero el sistema tiene un sistema de seguridad que solo deja llegar a un funcionamiento máximo de velocidad de viento de 20 m/s que corresponde a 700 RPM, a partir de esta velocidad el *Aeroleaf* inicia su proceso de desaceleración para evitar posibles fallos.

A partir de estos voltajes, se pueden discriminar aquellas horas en donde el voltaje es 0 watt que son las velocidades menores a 2,0 m/s y a partir de 2,0 m/s se inicia la producción energética, es así como esta producción energética luego se sumará como producción total.

3. Descripción del funcionamiento

El *Wind Tree* está basado en el concepto de generación y consumo directo de electricidad in-situ en el edificio o área conectados a la red. *Wind Tree* se conecta a la red local de electricidad gracias al armario eléctrico diseñado por New World Wind. Un espacio se debe dedicar para este armario, dentro de una distancia máxima de 50 metros. Adicionalmente, al árbol y al armario, New World Wind también provee el cableado eléctrico entre estos. La instalación en

general cumple con los estándares europeos de calidad. Cualquier protección específica o cableado extra debe ser preparada por el consumidor para garantizar la conexión entre la red eléctrica y el armario eléctrico. Para verificar el cumplimiento de los estándares y el correcto funcionamiento, New World Wind integra un sistema de monitoreo al momento de instalar cada nuevo *Wind Tree* (New World Wind, 2018).

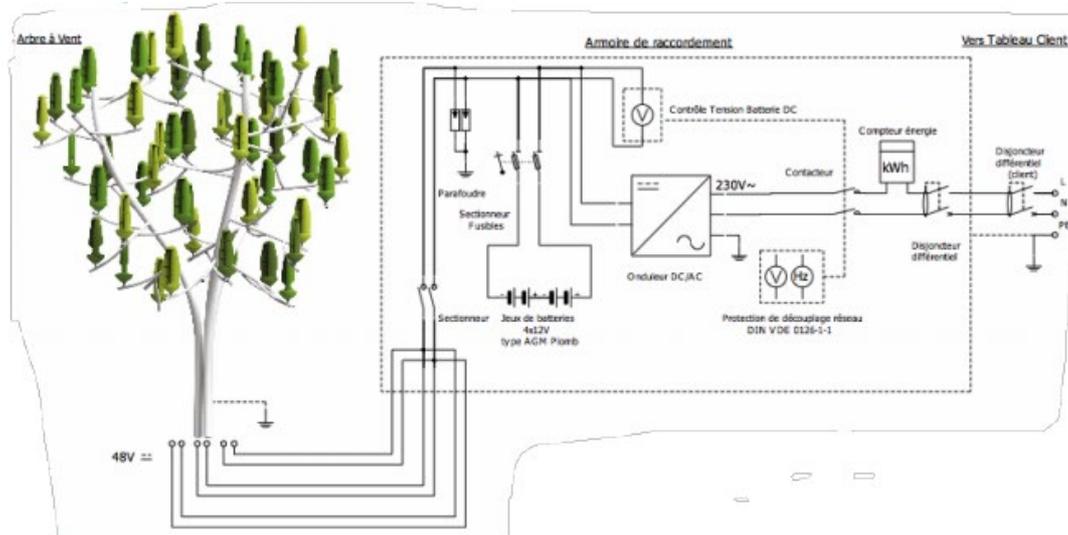


Figura 34. Esquema del sistema *Wind Tree* y su funcionamiento (New World Wind, 2018).

De acuerdo al funcionamiento del sistema, se debe tener una velocidad del viento considerable para su buen desempeño. Si bien el sistema tiene un umbral de velocidad relativamente pequeño, se considera necesario hacer estudios del sistema en ciudades y regiones donde se tenga una velocidad alta y constante, caso que no sucede en la ciudad de Bogotá, donde la velocidad promedio no es lo suficientemente alta para suplir la necesidad energética de manera costo-eficiente con respecto a las soluciones actuales.

4. Instalación del sistema *Wind Tree*

Debe existir un área designada de mínimo quince metros cuadrados para el almacenamiento y disposición del sistema, al cual entrará un camión para la instalación y posible mantenimiento, así que debe ser un área con acceso constante garantizado. El tiempo de instalación usualmente toma entre 2 y 4 días.

5. Viabilidad económica

- a. Tomando los datos de velocidad del viento de las estaciones del IDEAM (para Colombia) o de la red de monitoreo de calidad del aire de una ciudad o región en específico, se hace una relación de viento con voltaje para saber cuanto potencial puede generar en un período de tiempo específico.
- b. partir de dicho voltaje se hace la relación de cuanto se puede ahorrar en determinado sitio en términos monetarios y dependiendo de la zona de la ciudad (costos de energía según estrado) y de las condiciones del viento. Se considera en este paso también, el período de retorno de la inversión calculado a partir de la ecuación de $ROI = \frac{B-I}{I}$ Donde: B: Beneficios, I= inversión (grenwords, 2017)

- c. Si se obtienen los resultados en términos de producción de energía, ahorros y retorno de inversión esperados, o mejores, se inicia una fase de factibilidad del sistema *Wind Tree* para considerar sus posibles lugares de instalación y para iniciar la fase de contacto con la empresa New Wolrd Wind para indicar que se desea instalar un árbol (o varios) en el país.
- d. En caso tal que no se obtenga un período de retorno de la inversión considerable o que las condiciones de viento o de tiempo no lo permitan, se debe investigar en otra ciudad o región

6. Cálculo de reducción huella de carbono cuanta energía se podría dejar de consumir

Implementar un sistema como *Wind Tree*, que produzca 5400W de energía, para el caso europeo, se logran evitar 3,2 toneladas de CO₂ a la atmósfera, ya que se produce la misma cantidad de electricidad que con 864kg de carbón o con 15 litros de combustible como petróleo (New World Wind, 2018).

Para el caso colombiano, según la UPME, para proyectos y mediciones específicas de generación de emisiones de CO₂ por consumo de energía eléctrica se puede calcular la huella de carbono siguiendo lo establecido en la norma ISO 14067 y el GHG Protocolo. Para esto existe la posibilidad de calcular las emisiones por kWh generado promedio. Es un instrumento de fácil aplicación y cálculo ya que la información de la generación eléctrica de las plantas conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y los tipos y consumos de combustibles utilizados puede ser consultada fácilmente en los portales oficiales; el factor de emisión en la generación FEG se calcula a partir de las emisiones de CO₂ provenientes del uso de combustibles divididas entre la cantidad de electricidad generada (Bonilla, Herrera, & Puertas, 2017).

Para determinar el cálculo de la huella de carbono, se debe seleccionar un método para determinar el factor de emisión del margen de operación (MO). Un cálculo de factor de emisión del MO simple es calculado como el promedio (ponderado por generación) de emisiones de CO₂ por unidad de generación de electricidad (tCO₂/MWh) de todas las plantas de generación eléctrica conectadas al SIN (Bonilla, Herrera, & Puertas, 2017)..

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$EF_{grid,OMsimple,y} = \frac{\sum_m EG_{m,y} \cdot EF_{EL,m,y}}{\sum_m EG_{m,y}}$$

Fuente: (Bonilla, Herrera, & Puertas, 2017).

Donde:

$EF_{Red_OM_simple,y}$ Factor de emisión margen de operación simple para el año y (t CO₂/MWh)

$EG_{m,y}$ Energía neta entregada a la red por cada unidad de

$EF_{EL,m,y}$	Factor de emisión de las unidades de generación m en el año y (t CO_2 /MWh)
m	Todas las unidades de generación conectadas a la red a excepción de las unidades low-cost/must-run
y	El año correspondiente a los datos utilizados

Para calcular el Factor de Emisión del Margen de Operación de las unidades de generación por este método se tienen dos opciones, dependiendo de la disponibilidad de información:

- *Opción A:* se considera la generación neta de electricidad para la red y el factor de emisión de CO_2 de cada una de las plantas/unidades de generación conectadas.

$$EF_{EL,m,y} = \frac{\sum_i FC_{i,m,y} \cdot NCV_{i,y} \cdot EF_{CO_2,i,y}}{EG_{m,y}}$$

Fuente: (Bonilla, Herrera, & Puertas, 2017).

Donde:

$EF_{EL,m,y}$	Factor de Emisión del CO_2 de la unidad de energía m en el año y (t CO_2 e/MWh)
$FC_{i,y}$	Cantidad de combustible fósil tipo i consumido por la unidad de energía m en el año y (Unidad de Masa o volumen).
$NCV_{i,y}$	Valor calorífico Neto del combustible fósil tipo i en el año y (GJ/unidad de masa o volumen).
$EF_{CO_2,i,y}$	Factor de emisión del CO_2 del combustible fósil i en el año y (t CO_2 /GJ)
$EG_{m,y}$	Electricidad Neta Generada y despachada a la red eléctrica por las unidades m en el año y (MWh).
m	Todas las unidades de generación conectadas a la red eléctrica
i	Todos los combustibles fósiles i quemados en las unidades de energía el año y .
y	Año correspondiente al período de análisis.

Opción B: se basa en la generación neta total de electricidad de todas las plantas eléctricas conectadas a la red, considerando los tipos de combustibles y consumos de los mismos por las plantas que las alimentan.

$$EF_{EL,m,y} = \frac{EF_{CO_2m,i,y} \cdot 3,6}{\eta_{m,y}}$$

Fuente: (Bonilla, Herrera, & Puertas, 2017).

Donde:

$FEL_{m,y}$ = Factor de emisión de CO₂ de la unidad m en el año y (t CO₂/MWh)

$EF_{CO_2m,i,y}$ = Factor de emisión de CO₂ promedio del combustible fósil tipo i utilizado en la unidad m en el año y (t CO₂/GJ)

CO_{2my} = Eficiencia promedio en la conversión de energía neta de la unidad m en el año y
y = Año correspondiente al periodo de cálculo

La opción B sólo puede ser usada sí: (i) la información necesaria para realizar el cálculo con la opción A no está disponible, (ii) sólo las plantas renovables son consideradas como *low-cost/must-run* y se conoce la cantidad de energía que estas plantas entregan a la red, y (iii) no se incluyen plantas fuera del SIN en la selección de centrales a ser tenidas en cuenta para el cálculo (Bonilla, Herrera, & Puertas, 2017).

Realizando los anteriores cálculos por parte de funcionarios de la UPME, para Colombia, en 2016 el factor de emisión para huella de carbono tuvo un valor de 0,21 tCO₂/MWh. Dicho factor puede ser empleado para: proyectos y mediciones específicas de emisiones de gases de efecto invernadero, estimación de gases de efecto invernadero por consumo de energía eléctrica, inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero y cálculo de la huella de carbono empresarial o corporativa (Bonilla, Herrera, & Puertas, 2017).

7. Seguimiento y adherencia social del sistema

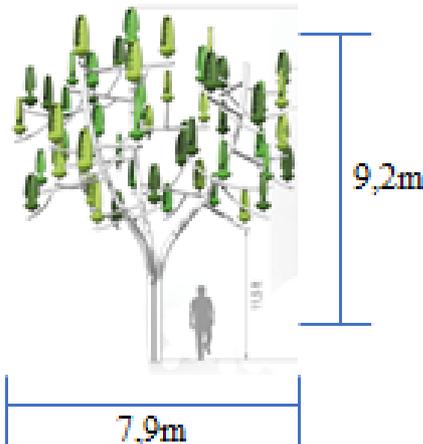
El seguimiento y adherencia se establece según las visitas que tenga el sistema *Wind Tree* al sitio de instalación del este, contactando con aquellos responsables de su buen desempeño y con la empresa encargada de la red de energía local. La adherencia se medirá con la asistencia a las actividades que se planteen para acoplar el sistema a la comunidad (talleres creativos, charlas de reciclaje y otros).

Todos los pasos mencionados en la guía se realizaron para que en el futuro se pueda realizar un estudio de pre-factibilidad de manera ágil y eficiente en otras partes de Colombia o del mundo, teniendo un impacto positivo y un punto a favor en las ciudades tal vez costeras o que por su localización geográfica tengan un régimen de vientos favorable y que sea compatible con las especificaciones que tiene *Wind Tree*.

DIAGRAMA DEL PASO A PASO DE LA GUÍA

GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA *WIND TREE*

1. DIMENSIONES



Peso: 2500kg

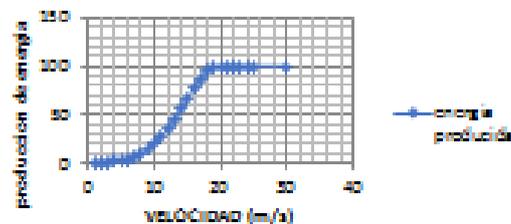
Área mínima: 15m²

Locación sugerida: parques públicos, áreas entre edificaciones pequeñas, áreas cercanas a pequeñas oficinas, sitios de entrenamiento deportivo en la ciudad

2. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA



Wind Tree produce energía a partir de una velocidad de 2,0 m/s como se presenta en la siguiente tabla



Velocidad (m/s)	energía producida (kWh)
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	100
21	100
22	100
23	100
24	100
25	100
26	100
27	100
28	100
29	100
30	100
31	100
32	100
33	100
34	100
35	100
36	100
37	100
38	100
39	100
40	100

3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

- *Wind Tree* se conecta a la red local de electricidad
- Se requiere un área para instalar el armario eléctrico del "árbol" dentro de una distancia de 50m
- Posicionar en un área con viento considerable, superior al umbral

4. INSTALACIÓN DEL SISTEMA *WIND TREE*

- Área mínima de 15 metros cuadrados, con entrada y salida de camión de instalación garantizada
- Disponer de entre 2 y 4 días para la instalación



5. VIABILIDAD ECONÓMICA

- Recopilar datos del régimen de viento por parte del IDEAM o una institución meteorológica verificada
- Realizar cálculo de voltaje producido en relación a la velocidad del viento
- Cálculo de ahorros $\rightarrow EPW \times TE$
- Donde:
 - ✓ EPW = energía producida por el sistema
 - ✓ TE = tarifa de energía
- Si los resultados económicos son positivos se procede a la etapa de factibilidad y de contacto a la empresa *Wind Tree* para instalación



6. CÁLCULO DE REDUCCIÓN DE HUELLA DE CARBONO



Seguir protocolo de la UPME para el cálculo del factor de emisión de huella de carbono, o tener en cuenta su valor a nivel nacional (0,21 tCO₂/MWh) para el cálculo de la huella de carbono empresarial

7. SEGUIMIENTO Y ADHERENCIA SOCIAL AL SISTEMA



El seguimiento y adherencia se establece según las visitas que tenga el sistema *Wind Tree* al sitio de instalación de este .

13 Conclusiones

El estudio de la implementación del sistema *Wind Tree* en la ciudad de Bogotá, permite llegar a las siguientes conclusiones:

La energía eólica es un importante suministro de energía con gran potencial pero aun los aerogeneradores tienen un camino amplio que recorrer para ser competitivamente comparables con energías como la hidráulica o las fósiles, para llegar a esto se tubo una investigación de funcionamientos y comparación de potenciales energéticos con otro aerogenerador el sistema wind tree posee muchísimas ventajas para aprovechar tanto la cantidad de aeroleaft que posee como el concepto de que sea un árbol que en este caso no provee vida si no energía estos son puntos que juegan mucho a su favor mas en un mundo donde cada vez se desplaza mas la parte ecológica y se

le da paso a lo sintético alejándose de la naturaleza este es un ejemplo de como la ciencia debe tratar de enfocar sus diseños en diseños de la misma naturaleza que a partir de millones de años se han perfeccionado.

El sistema Wind Tree posee un potencial por aeroleaft pequeño pero la suma de estos pequeños voltajes llegan a ser representativos a pesar que en este trabajo no se genero un voltaje esperado en los años de muestra como para generar un retorno de inversión se puede concluir que bogota tiene un potencial eólico importante en sitios como Kennedy y Fontibón, y a pesar de generar un estudio amplio en todo los punto de RMCAB quedan algunas localidades marginadas por la falta de datos.

A pesar de no ser factible económicamente se elabora una pequeña guía para poder replicar el proceso en otras partes del país con potencial eólico mayor.

- La implementación del sistema para uso residencial o comercial individual no sería viable debido a restricciones financieras, teniendo en cuenta que en el mejor de los casos de espera un retorno de inversión superior a 10 años
- Por último la pre-factibilidad es un proceso del que se pueden rescatar diferentes puntos positivos, uno de los más importantes es que se analizan indiscriminadamente diferentes ubicaciones abarcando un área de gran extensión como es Bogotá, cosa que en la factibilidad no se podría hacer pues es un estudio más profundo y complejo y que conlleva costos y esfuerzos más grandes pues es un paso a la aplicación.

14. Recomendaciones

Al realizar un estudio sobre el sistema *Wind Tree* para la ciudad de Bogotá, se tienen en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Este tipo de sistema de producción de energía es innovador, moderno, ambientalmente amigable y ajustable a un gran número de locaciones alrededor del mundo, sin embargo, es una inversión de alto costo y requeriría poner muchos árboles *Wind Tree* en un solo sitio de la ciudad para suplir con las necesidades eléctricas y de los habitantes o usuarios del servicio de luz. Dado el alto costo que implica implementar el sistema, se concluye que sería mejor instalarlo en lugares con vientos más elevados como podría ser el norte de Colombia y la mayoría de la parte costera, lugares donde si valga la pena la inversión y se recupere parte de ella.
- La implementación del sistema eólico *Wind Tree* en una zona de régimen de viento más alto puesto que la velocidad de viento en Bogotá no es superior a 2,0 m/s en suficientes estaciones y esto afecta directamente su rentabilidad haciendo que el proyecto no sea viable en las estaciones de la RMCAB, no obstante, la información que se tiene de viento no contempla el comportamiento del viento con los edificios en donde podría considerarse un potencial eólico del que no se tienen estudios ni datos concretos. El potencial que se puede obtener de los canales de viento podría ser relevante en el estudio de implementación de un sistema *Wind Tree*.
- La cuantificación de la energía en el sector comercial podría ser un nicho de estudio para la implementación de este sistema pero por falta de información de uso del suelo en Bogotá no se realizó la cuantificación de este nicho, es por esto que se recomienda levantar información precisa del uso del suelo y relacionarlo con la localización de las estaciones de la RMCAB.
- Se debe tener en cuenta que para la viabilidad se consideró la cifra de 175 millones de pesos colombianos que es lo que cuesta aproximadamente el sistema *Wind Tree* según New World Wind, y a esto es necesario sumarle los costos de importación, iva, entre otros. Para evitar estos costos en la implementación o factibilidad se debe contemplar la posibilidad de no importar si no llegar a un convenio con la empresa New World Wind para que ellos manden los sistemas netamente necesarios y las materias primas se usen nacionales para disminuir estos costos de implementación.
- Se considera que se debería tener en cuenta el estudio realizado por 2 ingenieros mecánicos de la Universidad Libre (Guauque & Torres, 2014) para tener en cuenta el comportamiento del viento con respecto a obstáculos en las ciudades como lo pueden ser edificios, y a partir de esto poder generar un mayor potencial eólico que podría ser aprovechado por el sistema *Wind Tree* u otro tipo de sistema de energía eólica en una ciudad.

- En un estudio posterior de factibilidad se puede comparar los aerogeneradores verticales del mercado con aquellos del sistema *Wind Tree* con el fin de evaluar distintas potencias y costos que podrían generar en las diferentes ubicaciones en Bogotá y/o en el país.
- El sistema *Wind Tree* es una alternativa que posee muchas características buenas pero aún no son competitivos ante una forma de producción de energía como la hidroeléctrica para el caso de Colombia ya que la tecnificación y magnitud es demasiado grande. A pesar de sus pro y contras para diversificar el mercado de tecnologías renovables deben ser más competitivas en todos los ambientes y es donde entra el rol de la ingeniería ambiental para crear sistemas o tecnologías renovables para producir electricidad que sean más rentables y por ende competitivo.

15. Bibliografía

- ABC Argentina. (2007). *Las transformaciones de la energía*. Obtenido de ABC Argentina: http://servicios.abc.gov.ar/lainstitucion/revistacomponents/revista/archivos/textos-escolares2007/CFS-ES4-1P/archivosparadescargar/CFS_ES4_1P_u7.pdf
- American Wind Energy Association. (2018). *What is wind energy?* Obtenido de <https://www.awea.org/wind-101/basics-of-wind-energy>
- Bonilla, M., Herrera, H., & Puertas, Y. (10 de 2017). *Factores de emisión del sistema interconectado nacional Colombia-SIN*. Obtenido de Unidad de Planeación Minero Energética: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiciJuyxPLhAhWjzlkKHdyAC68QFjAAegQIBhAC&url=http%3A%2F%2Fwww1.upme.gov.co%2FServicioCiudadano%2FDocuments%2FProyectos_normativos%2FDoc_calculo_del_FE_del_SIN_2016.docx&usg=AOvVaw14t
- Cobreiro, P., & Jiménez, N. (2014). *Aerogeneradores (I): funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales*. Obtenido de Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo: <https://www.aeolica.org/uploads/documents/10170-aerogeneradores-i-funcionamiento-y-marco-normativo-de-prevenircn-de-riesgos-laborales.pdf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2005). *Evaluación Social de Proyectos*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/2/33602/SegundoModulo.pdf>
- Etneo. (2018). *Turbina DS300 única tecnología híbrida*. Obtenido de Etneo: <https://www.etneo.com/es/turbina-ds300/>
- Federation of Indian Chambers of Commerce and Industry. (2012). *Aerogenerator*. Obtenido de <http://www.techno-preneur.net/technology/new-technologies/energy/aerogenerator.html>
- grenwords. (05 de 2017). *grenwords*. Recuperado el 28 de 04 de 2019, de <https://www.genwords.com/blog/que-es-roi>
- Grogg, K. (2005). *Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines*. Carleton College.
- Guauque, E., & Torres, G. (2014). *ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UNA MICROTURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA ZONA URBANA DE BOGOTÁ, COLOMBIA*. Obtenido de Universidad Libre:

- <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7819/GuauquePescaEdwinAlfonso2014.pdf?sequence=1>
- Guauque, E., & Torres, G. (2014). *ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UNA MICROTURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA ZONA URBANA DE BOGOTÁ, COLOMBIA*. Obtenido de Universidad Libre: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7819/GuauquePescaEdwinAlfonso2014.pdf?sequence=1>
- IDEAM. (2012). *Atlas Viento*. Obtenido de http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/ATLAS/documentos/Marco%20Conceptual_%20Viento.pdf
- IDEAM. (2019). *Atlas vientos IDEAM 2019*. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>
- International Energy Agency. (2018). *World Energy Outlook*. Obtenido de <https://webstore.iea.org/download/summary/190?filename=spanish-weo-2018-es.pdf>
- Jiménez, R., Serebrisky, T., & Mercado, J. (2014). *Dimensionando las pérdidas de electricidad en los sistemas de transmisión y distribución en América Latina y el Caribe*. Obtenido de Banco Interamericano del Desarrollo: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjLnaSjoabhAhVHmlkKHYuYDkAQFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fpublications.iadb.org%2Fpublications%2Fspanish%2Fdocument%2FElectricidad-perdida-Dimensionando-las-p%25C3%25A9rdidas-de-ele>
- Kuhn, B., Marquis, J., & Rotatori, H. (05 de 03 de 2010). *Wind Turbine Desing and Implementation*. Obtenido de Worcester Polytechnic Institute: https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-031410-225604/unrestricted/Turbine_MQP.pdf
- Master Predios. (2010). *Localización Bogotá*. Recuperado el 20 de marzo de 2019, de <http://www.masterpredios.com/>
- Moreno, P. (2013). *ENERGÍA EÓLICA: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU UTILIZACIÓN EN COLOMBIA*. Obtenido de Universidad Libre: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10602/Monograf%C3%ADa.pdf?sequence=1>
- New World Wind. (2017). *L'Arbre à vent*. Obtenido de [http://newworldwind.com/wp-content/uploads/2018/01/NewWorldWind's-Book-\(fr\).compressed.pdf](http://newworldwind.com/wp-content/uploads/2018/01/NewWorldWind's-Book-(fr).compressed.pdf)
- New World Wind. (2018). *The Wind Tree*. Obtenido de <http://newworldwind.com/wp-content/uploads/2018/01/Data-sheet-WindTree-NWW-ENG.pdf>
- Omega. (2019). *Anemómetro*. Recuperado el 26 de marzo de 2019, de <https://es.omega.com/prodinfo/anemometros.html>
- Pardo, J. (10 de 2004). *Estudio de prefactibilidad de un proyecto para la prestación de servicios de acabados para vivienda de interés social en Bogotá DC.*. Obtenido de Pontificia Universidad Javeriana: <https://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis45.pdf>
- Paulides, J., Encica, L., Jansen, J., & Lomonova, E. (2009). *Small-scale Urban Venturi Wind Turbine: Direct-Drive Generator*. Obtenido de IEEE Xplora: https://www.researchgate.net/publication/224506030_Small-scale_urban_Venturi_wind_turbine_Direct-drive_generator
- PCE inst. (2018). *Estación meteorológica*. Recuperado el 29 de marzo de 2019, de <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/que-estacion-meteorologica.htm>
- Ragheb, M. (2017). *Wind Power Systems*. Obtenido de <http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Energy%20Conversion%20Theory%20Betz%20Equation..pdf>
- Revista Dinero. (2015). *¿Por qué es tan cara la energía eléctrica en Colombia?* Obtenido de <https://www.dinero.com/pais/articulo/costos-energia-colombia/212216>

- Revista Dinero. (24 de 01 de 2019). *¿Por qué la factura de energía le está pegando a la inflación?* Obtenido de <https://www.dinero.com/edicion-impresa/pais/articulo/por-que-los-bienes-regulados-afectan-la-meta-de-inflacion/266412>
- Rico, G. (2018). *Hidroeléctricas en Colombia: entre el impacto ambiental y el desarrollo*. Obtenido de Mongabay: <https://es.mongabay.com/2018/06/hidroelectricas-colombia-hidroituango/>
- RMCAB. (2016). *Informe Anual de Calidad del Aire en Bogotá Año 2016*.
- RMCAB. (2017). *Informe Anual de la Calidad del Aire de Bogotá 2017*.
- Rubio, M., Domínguez, A., Reneses, Á., Barrio, A., Arbeteta, A., & Lechosa, E. (2011). *Diseño de aerogeneradores*.
- Sánchez, A., Trigueros, M., & Tagüeña, J. (1999). *Energía*. Obtenido de Revista de cultura científica UNAM: <https://www.revistaciencias.unam.mx/pt/106-revistas/revista-ciencias-53/945-energia.html>
- Schefter, J. (1982). Capturing Energy from the Wind. *NASA Scientific and Technical Info Branch, Washington D.C.*, p. 18.
- Schreiber, M. (2016). *Man-made “wind trees” will finally make it possible to power homes using turbines*. Obtenido de <https://qz.com/763715/wind-trees-mini-turbines-that-can-power-homes/>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2017). *Estaciones Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Recuperado el 11 de marzo de 2019, de <http://ambientebogota.gov.co/estaciones-rmcab>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (s.f.). *Estaciones RMCAB*. Recuperado el 03 de 2018, de <http://ambientebogota.gov.co/estaciones-rmcab>
- Secretaría Distrital de Planeación. (2017). *Estratificación por Localidad Bogotá*. Recuperado el 15 de marzo de 2019, de <http://www.sdp.gov.co/gestion-estudios-estrategicos/estratificacion/estratificacion-por-localidad>
- Smith, J. (2010). *Bernoulli Effect*. Obtenido de Stanford University: https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Bernoulli_Effect.html
- TYS Magazine. (16 de 10 de 2014). *Treepods: árboles artificiales para limpiar el aire*. Obtenido de <http://www.tysmagazine.com/treepods-arboles-artificiales-para-limpiar-el-aire/>
- UNAM. (1997). *Energía: Transformación de la energía, conservación y utilización*. Obtenido de http://www.sisal.unam.mx/labeco/LAB_ECOLOGIA/Ecologia_de_Poblaciones_y_Comunidades_files/phillipson.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2017). *Proyección Regional Demanda de Energía Eléctrica y Potencia Máxima en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía.
- Universidad Nacional de la Plata. (2013). *Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica*.
- Universidad Politécnica de Catalunya. (2009). *Diseño de un aerogenerador de baja potencia*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2763/40843-1.pdf?sequence=1>
- UPME. (10 de 2017). *Factores de emisión del sistema interconectado nacional Colombia-SIN*. Obtenido de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiciJuyxPLhAhWjzlkKHdyAC68QFjAAegQIBhAC&url=http%3A%2F%2Fwww1.upme.gov.co%2FServicioCiudadano%2FDocuments%2FProyectos_normativos%2FDoc_calculo_del_FE_del_SIN_2016.docx&usg=AOvVaw14t
- UPME. (2018). *Costos de energía en Bogotá*. Obtenido de www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consultas_SuiConsumo.aspx?IdModulo=2&cerviso
- Vision Air Wind. (2019). *V-AIR*. Obtenido de <http://www.visionairwind.com>

