

**DOCUMENTO DE OFERTA ENERGETICA**

**CONVENIO INTERINSTITUCIONAL**

**Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME**

**Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas – IPSE**

**Universidad del Atlántico – UA**



**PERS BOLIVAR**  
**UNIATLANTICO UPME IPSE**

**Noviembre de 2022**

# TABLA DE CONTENIDO

<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>2</b>
<b>PRÓLOGO.....</b>	<b>6</b>
INTRODUCCIÓN .....	6
ANTECEDENTES .....	7
MOTIVACIÓN.....	9
OBJETIVOS .....	9
ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	10
<b>CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL DEPARTAMENTO .....</b>	<b>12</b>
1.1. DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DEL DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR .....	12
1.2. INSTRUMENTOS Y REGISTROS .....	14
1.3. INVENTARIO DE LA INFORMACIÓN PARA CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA .....	14
<b>CAPITULO 2: HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS DE ANÁLISIS .....</b>	<b>16</b>
2.1. HERRAMIENTAS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	16
2.1.1. MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL .....	17
2.1.2. MEDIDAS DE VARIABILIDAD.....	18
2.1.3. MEDIDAS DE FORMA .....	19
2.2. HERRAMIENTAS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	21
2.2.1. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD NORMAL O GAUSSIANA .....	21
2.2.2. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD GAMMA .....	22
2.2.3. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL .....	22
2.3. LEY DE HELLMANN .....	23
2.4. DENSIDAD DE POTENCIA EÓLICA .....	24

<b><u>CAPITULO 3: GRAFICAS DE TENDENCIA MENSUALES RECURSO EÓLICO.....</u></b>	<b>25</b>
3.1. GRÁFICAS DE TENDENCIA: VARIACIONES MENSUALES .....	25
3.1.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE TENDENCIA .....	25
3.2. GRÁFICAS DE PERFIL DE VELOCIDAD DEL VIENTO: APLICACIÓN DE LA LEY DE HELLMANN .....	28
<b><u>CAPITULO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS RECURSO EÓLICO .....</u></b>	<b>30</b>
4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS PARA LA ESTACIÓN TIPO CARMEN DE BOLÍVAR .....	30
4.1.1. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS Y HERRAMIENTAS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA .....	30
4.1.2. DISTRIBUCIONES AJUSTADAS MULTIANUALES.....	33
4.1.3. RESULTADOS EXPRESADOS EN ROSAS DE VIENTOS .....	36
4.1.4. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	52
<b><u>CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR.....</u></b>	<b>54</b>
5.1. DISPONIBILIDAD DE LA ENERGÍA SOLAR EN LA SUPERFICIE TERRESTRE .....	54
5.1.1. FACTORES GEOGRÁFICOS .....	55
5.1.2. INFORMACIÓN ASTRONÓMICA .....	55
5.1.3. INFORMACIÓN GEOMÉTRICA.....	58
5.1.4. INFORMACIÓN FÍSICA.....	59
5.1.5. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA .....	60
5.2. RADIACIÓN SOLAR Y ATMÓSFERA .....	61
5.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ATMÓSFERA TERRESTRE .....	61
5.2.3. CONSTITUYENTES ATMOSFÉRICOS QUE DISPERSAN LA RADIACIÓN SOLAR .....	63
5.2.4. CONSTITUYENTES ATMOSFÉRICOS QUE ABSORBEN LA RADIACIÓN SOLAR .....	64
5.2.5. CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR .....	66
5.3. EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DEL NORTE Y CENTRO DEL DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR A TRAVÉS DEL MODELO DE BIRD Y HULSTROM .....	69
5.3.1. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA REALIZAR LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA ZONA CENTRO Y NORTE DEL DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR .....	69
5.3.2. MODELO DE BIRD Y HULSTROM .....	71
5.3.3. CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	72

5.3.4. MODELO FÍSICO DE RADIACIÓN .....	73
5.4. CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DEL NORTE Y CENTRO DEL DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR.....	83
5.4.1. ANÁLISIS DE TRANSMITANCIAS .....	84
5.4.2. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN SOLAR .....	87
5.4.3. EVALUACIÓN DEL MODELO DE BIRD Y HULSTROM .....	93
5.5. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR DEL SUR DEL DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR A TRAVÉS DE DATOS METEOROLÓGICOS RECOPIADOS POR LA NASA.....	100
5.5.1. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL SUR DEL DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR.....	103

**CAPÍTULO 6: POTENCIAL DE DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR EN EL DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR..... 114**

6.1. INTRODUCCIÓN .....	114
6.2. SOLAR FOTOVOLTAICA .....	115
6.3. SOLAR TÉRMICA .....	116

**CAPÍTULO 7: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA..... 117**

6.1. BIOMASA .....	117
6.2. IMPORTANCIA DEL MAÍZ, EL ARROZ Y EL COCO EN COLOMBIA.....	117
6.3. PIROLISIS.....	119
6.4. BIOCOMBUSTIBLES SOLIDOS .....	119
6.5. MÉTODOS TERMOGRAVIMÉTRICOS (TGA) .....	120

**CAPITULO 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN EVALUACIÓN POTENCIAL BIOMASA ..... 121**

8.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS BIOMASAS .....	121
8.2. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO .....	122
8.3. ANÁLISIS CINÉTICO MEDIANTE EL MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍAS DE ACTIVACIÓN (DAEM) .....	127
8.4. ANÁLISIS FTIR DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN .....	137
8.5. POTENCIAL ENERGÉTICO .....	144

<b><u>CAPITULO 9. RECURSO HÍDRICO EN EL DEPARTAMENTO DE BOLIVAR.....</u></b>	<b><u>148</u></b>
<b>9.1. CUENCA DEL RÍO CAUCA.....</b>	<b>148</b>
<b>9.2. CUENCA DEL RÍO MAGDALENA.....</b>	<b>148</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>152</b>
<b>ANEXO 1. CÓDIGOS EN MATLAB PARA ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS PROVENIENTES DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....</b>	<b>155</b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>161</u></b>

# Prólogo

## Introducción

Actualmente y desde hace muchos años distintos sectores de investigación están en la búsqueda constante de nuevas tecnologías que ayuden a fomentar el desarrollo sostenible de la sociedad. Sin embargo, se hace necesario que estas nuevas tecnologías contribuyan a mitigar el deterioro ambiental y el gasto energético producto de procesos de producción, la industrialización y el uso irracional de la energía. Las energías renovables, son una gran alternativa cada vez más implementada a nivel mundial, existen diferentes tipos las cuales son la solar, hidráulica, eólica. De todas las energías renovables se ha ubicado la energía eólica como una de las principales fuentes de mayor crecimiento dentro del conjunto de energías renovables, puesto que es confiable, prometedora y económicamente rentable, convirtiéndose en una tecnología muy accesible para una utilización a gran escala en los próximos años.

Colombia cuenta con mucho potencial para hacer estudios de la implementación de este tipo de energías debido a que a lo largo de su territorio cuenta con mucha diversidad. La costa Caribe es una zona que ha sido objeto de estudio del potencial eólico y solar. Hoy en día Colombia solo cuenta con dos parques eólicos 'JEPIRACHI' conformado por 15 aerogeneradores Nordex N60/250 que producen 1,3 MW cada uno (juntos generan un total de 19,5 MW) y están distribuidas en un terreno de 1,2 Km<sup>2</sup> de la Alta Guajira y más recientemente en el corregimiento de Uribía, Cabo de la Vela funciona el parque eólico 'GUAJIRA 1' que cuenta con 10 generadores que producen 2 MW cada uno con una capacidad total de 20 MW por lo que, los dos parques proporcionan 39,5 MW. Además, se conoce que en Atlántico se construirá el primer parque eólico sobre el mar. Por lo tanto, es importante tener en cuenta otras regiones como Bolívar donde se pueden llevar a cabo también la implementación de estas energías renovables puede ser la eólica, solar incluso otras que permitan aprovechar las altas temperaturas y el mar. Este apartado del documento se basa especialmente en el estudio de que tan factible es la instalación de recursos eólicos y

solar teniendo en cuenta velocidades, dirección del viento en esta región y datos metrológicos para la estimación del potencial solar.

## **Antecedentes**

El viento es una fuente no convencional de energía (FNCE), la cual se ha ido desarrollando a medida que avanza el tiempo, pero que a su vez requiere de una gran inversión inicial, gasto compensado por los grandes beneficios que aporta.

El desarrollo de la energía eólica ha sido notable a través de los años, su aprovechamiento se remonta a las primeras comunidades. Algunas fuentes aseguran que alrededor del año 3000 A.C. se usaban barcos a vela para movilizarse a través del río Nilo, impulsados por la energía proveniente del aire en movimiento. Molinos de viento, conocidos como panémonas, que impulsaban el funcionamiento de las bombas de agua en los sistemas de riego eran usados en el reinado de Hammurabi. En China, había molinos de rotor vertical junto con palas, empleados para el mismo fin, asimismo, en Persia éstos se empleaban para la molienda de cereales. Sin embargo, sólo a partir del siglo VI D.C. se obtiene tiene la respectiva documentación sobre estas máquinas, empleadas para trabajos similares, en Sistán [1].

En Europa, se empleaban molinos de rotor horizontal, siendo los castellanos, que servían para moler cereales, y los holandeses, usados para desecar pantanos alrededor del año 1430, los más conocidos [2].

Con el avance del tiempo, se comenzaron los esfuerzos para desarrollar la tecnología de aerogeneradores atendiendo a la necesidad económica y demanda energética con el objetivo de obtener mayor resistencia y eficiencia, pero eran muy costosos. Posteriormente, gracias al desarrollo de la aerodinámica, se establecieron criterios de diseño útiles al momento de fabricar turbinas eólicas [2].

Las primeras bases técnicas y tecnológicas que impulsaron el desarrollo de la energía eólica empezaron durante la crisis del petróleo (1973), cuando se planteó la necesidad de investigar otras fuentes alternativas de abastecimiento [3]. Durante este periodo, se desarrollaron los modelos predecesores a los actuales aerogeneradores. Los primeros fueron creados por Leopold Jacob, quien creó la aeroturbina de Lacourt (1982), capaz de desarrollar entre 5 y 25kW [2]. En 1983, Stewart Perry construyó el molino multipala, el más vendido de la historia, sin embargo, el pionero del desarrollo de los aerogeneradores fue Charles Brush, quien inventó y fabricó la primera turbina eólica de funcionamiento automático para la generación de energía eléctrica. La etapa posterior, estuvo demarcada por un aumento en los precios del petróleo, lo que favoreció la fabricación de turbinas eólicas como fuente no convencional de energía limpia y renovable. Fue entonces cuando el diseño danés se mejoró, alcanzando una potencia de hasta 250 kW. A partir de ahí, estos equipos han ido ampliando su potencia [2].

Muchos países, han empezado a considerar la producción de energía eólica. En 2001, en Dinamarca se creó la Asociación Mundial de Energía Eólica (World Wind Energy Association), organización internacional que promociona el aprovechamiento del recurso eólico. Países como Nigeria, Kenia, Canadá, Estados Unidos, Argelia, Brasil, China, Argentina y Egipto, a través de los años, han realizado estudios empleando modelos numéricos como la distribución de Weibull, para analizar la densidad, movimiento, velocidad, dirección, potencial y demás características del viento. Asimismo, éstos países han incorporado prototipos de aerogeneradores en sus edificios, para los procesos de fabricación, que permitan el diseño y desarrollo sostenible de los mismos [1].

Actualmente, la generación de energía eólica está en aumento, miles de Megawatts son producidos principalmente por los países europeos. Desde el 2007, el crecimiento de proyectos eólicos se mide en Gigawatts. China tiene la mayor capacidad instalada con 44,7 GW y lidera el mercado internacional de turbinas eólicas [4].

En Colombia, desde la primera mitad del siglo XX, se empleó la energía eólica para movilizar los molinos de viento en los sistemas de bombeo de agua en la Costa Atlántica, Llanos

orientales, Valles interandinos y en el altiplano Cundiboyacense. Con la crisis del petróleo, se desarrollaron grandes proyectos hidroeléctricos y se comenzó a emplear la energía solar en algunas zonas residenciales en Bogotá. Sin embargo, no hubo mucho interés en la investigación de energías alternativas, puesto que el Estado se enfocó en las hidroeléctricas, desaprovechando así los vientos de la región Caribe. Sólo desde finales de 1990, se han realizado estudios importantes enfocados al desarrollo de la utilización de los vientos [5]. En el 2002, entró en funcionamiento el parque Eólico de Jepírachi en La Guajira con 20 MW. De igual forma, otros proyectos que involucran a la comunidad indígena Wayuu, se encuentran en primera fase. En el 2010, se otorgó la licencia para la construcción y operación del proyecto eólico Jouktai en el Cabo de la Vela, que aún se encuentra en estudio, cuya capacidad prevista sería de 31,5 MW [4]. Todo lo anterior, con el fin de proporcionar una mejor calidad de vida que disminuya la pobreza, además de la promoción del uso eficiente de energías alternativas empleando recursos propios de la región como la radiación solar y las corrientes de viento.

## **Motivación**

La realización del presente documento surge a partir de las arduas y extensas investigaciones que un grupo de estudiantes y profesores a nivel nacional han realizado para identificar a Colombia como un país que tiene el potencial necesario para el sostenimiento de un parque eólico, que tiene recursos naturales diversos y suficientes para empezar a cambiar métodos tradicionales de generación de energía eléctrica por energías alternativas, buscando un equilibrio que permita aprovechar el potencial del viento, reduciendo en gran medida los efectos causados por los desastres naturales en fenómenos como El Niño, de igual forma reduciendo la emisión de CO<sub>2</sub> producto de la combustión de combustibles fósiles en las termoeléctricas.

## **Objetivos**

El objetivo del presente documento es realizar un análisis estadístico de la velocidad y dirección del viento en el departamento de Bolívar, tomando como base las mediciones

horarias realizadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) con el fin de presentar una herramienta que permita obtener información precisa del comportamiento del viento, para que a través del seguimiento de estas dos variables, sea posible pronosticar el potencial eólico de la región donde se lleva a cabo el estudio de tal forma que se puedan registrar los resultados del estudio en mapas eólicos.

## **Estructura del documento**

El contenido del documento consta de siete capítulos.

Inicialmente se presenta un prefacio donde se incluyen los antecedentes de la tecnología para el desarrollo de turbinas eólicas y el uso de la energía eólica a nivel nacional y mundial, se presentan los objetivos y la motivación por la cual se realiza el estudio y el documento

El primer capítulo, contiene la descripción geográfica del departamento de Bolívar, instrumentos y registros empleados para la obtención de los datos e inventario de la información para cada estación meteorológica.

El segundo capítulo, es la recopilación de información acerca de las herramientas de estadística descriptiva (medidas de tendencia central y de dispersión), los modelos de distribuciones estadísticas que pueden aplicarse al momento de evaluar el recurso eólico (distribución Normal, Gamma, Weibull y Rayleigh), la ley de Hellmann para determinar la velocidad del viento a diferentes alturas y la importancia de la densidad de potencia eólica.

El tercer capítulo, presenta un análisis de tendencia de la velocidad del viento en estaciones meteorológicas del departamento de Bolívar. Incluye gráficas de variaciones mensuales y anuales del viento para las diferentes estaciones meteorológicas organizadas en 4 grupos, perfiles de la velocidad del viento aplicando la Ley de Hellmann y gráficas de la densidad de potencia eólica tomando como referencia el periodo comprendido entre los años 2003-2013.

El cuarto capítulo, provee información acerca de la caracterización del recurso eólico, cálculo de medidas de tendencia central, dispersión, gráficas horarias, histogramas de frecuencia y

las respectivas rosas de viento por mes, tomando como cálculo tipo para la estación base, durante el periodo comprendido entre los años 2003-2013.

El quinto capítulo, presenta los conceptos fundamentales y definiciones asociadas a la evaluación del potencial solar con sus respectivos cálculos.

El sexto capítulo, presenta la evaluación potencial de desarrollo de la energía solar en el Departamento de Bolívar.

El séptimo y octavo capítulo, presenta los fundamentos, resultados y análisis de la evaluación del potencial energético de biomasa disponible en el Departamento de Bolívar.

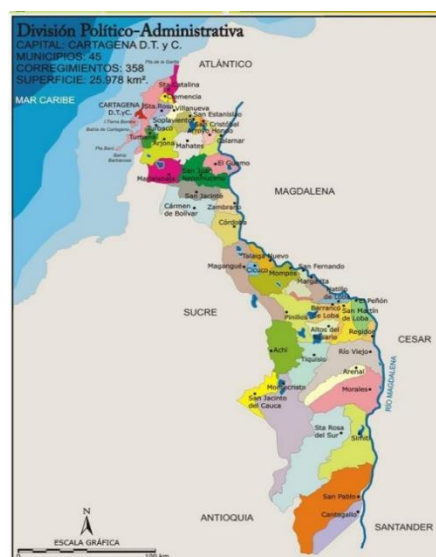
El noveno capítulo, presenta una visión general del recurso hídrico disponible en el Departamento de Bolívar.

# CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL DEPARTAMENTO

La velocidad y dirección de los vientos depende de qué tan cerca a la línea ecuatorial se encuentra el punto de la tierra donde se quiere analizar el potencial eólico, por lo tanto, es necesario conocer los aspectos generales que comprende la geografía del departamento de Bolívar, para así poder obtener una idea sobre el tipo de terreno en el que se realizará el estudio.

## 1.1. Descripción geográfica del departamento de Bolívar

El Departamento de Bolívar está situado en el extremo Norte de la república de Colombia, haciendo parte de la región Caribe colombiana. Morfológicamente semeja una lengüeta que se extiende desde el Mar Caribe en sección nororiente, hasta las selvas del Carare en la línea divisoria con el Departamento de Antioquia. El Departamento de Bolívar limita por el Norte con el mar Caribe y el departamento del Atlántico, al Este con el río Magdalena que lo separa de los departamentos del Magdalena, Cesar y Santander, al Sur con los departamentos de Santander y Antioquia y al Oeste con los departamentos de Antioquia, Córdoba, Sucre y el mar Caribe. [6]. En la fig. 1 se observa el mapa del departamento de Bolívar.



**Figura 1.** Mapa del departamento de Bolívar.

**Fuente:** <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/bolivar/municipios-division-politica.html>

Para los procesos de planificación y gestión administrativa los 46 municipios de la división política del Departamento de Bolívar, han sido, agrupados en seis (6) subregiones denominadas Zonas de Desarrollo Económico y Social (ZODES), denominadas ZODES Dique, Montes de María, Depresión Momposina, Loba, y Magdalena Medio [7].

- **Zodes Dique:** El Dique bolivarense es el soporte y despensa agropecuaria de Cartagena y Barranquilla, tiene un potencial marítimo y acuícola.
- **Zodes Montes De María:** Es una región con distrito de riego, suelos fértiles, vacación agroindustrial, ganadera, forestal y artesanal, posee una cultura agroexportadora, y esta cruzada por la troncal de occidente y articulada a la troncal del Magdalena Medio.
- **Zodes Mojana:** Es una región con gran dotación de recursos naturales y biodiversidad, posee vocación minera y agropecuaria y un gran potencial acuícola.
- **Zodes Depresión Momposina:** Región con excelentes suelos, vocación ganadera y artesanal con un gran potencial turístico, orfebrería y ebanistería.
- **Zodes Loba:** La Zodes Loba tiene vocación agropecuaria y minera, posee gran potencial para desarrollar importantes proyectos mineros auríferos y agroindustriales (palma, cacao).
- **Zodes Magdalena Medio:** Región rica en dotación de recursos naturales y biodiversidad, con vocación agropecuaria, minera, presenta un gran potencial agroexportador y minero aurífero.

## 1.2. Instrumentos y registros

Para el análisis estadístico del presente documento se tomaron registros en cada estación meteorológica ubicada en el departamento de Bolívar, de cada estación se toman las variables relacionadas con el viento, mostradas en la tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros y unidades de medición.

Parámetro	Unidad medida
Dirección del viento	Grados
Velocidad del viento	m/s

La información de las anteriores variables fue obtenida de [1] haciendo uso de mediciones registradas frecuencia de 1 hora, las 24 horas del día, durante un periodo de 10 años.

## 1.3. Inventario de la información para cada estación meteorológica

Los datos registrados pertenecientes a la dirección y velocidad del viento por cada estación meteorológica fueron suministrados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). La información proporcionada corresponde a los registros de 29 estaciones. En la tabla 2 se presenta el inventario.

**Tabla 2.** Inventario de la información suministrada por el IDEAM para cada estación meteorológica.

Código	Estación	Años	Número de días por cada año	Número de días por cada mes (enero - diciembre)	Número total de días medidos
23205030	STA. ROSA DE SIMITÍ	1990 - 1997	178, 245, 231, 167, 74, 275, 92, 113	87, 29, 90, 111, 146, 106, 138, 93, 128, 131, 144, 172	1375

<b>29035040</b>	NUEVA FLORIDA	2000-2010, 2014	161, 83, 209, 63, 51, 132, 160, 33, 318, 166, 32, 30	122, 101, 145, 241, 76, 94, 103, 118, 84, 148, 112, 94	1438
<b>29035170</b>	SINCERÍN	2000-2002, 2004-2011	277, 33, 32, 117, 70, 31, 249, 301, 136, 173, 161	127, 102, 73, 123, 76, 139, 175, 174, 172, 155, 131, 133	1580
<b>29015020</b>	CARMÉN DE BOLÍVAR	2000-2010, 2013	227, 245, 349, 306, 190, 74, 98, 229, 230, 25, 64, 29	232, 237, 208, 134, 121, 134, 154, 132, 151, 195, 185, 183	2066

A partir de la información mostrada en la tabla 2 se empleó un código en MATLAB para completar los datos faltantes. Este proceso permitió obtener la velocidad y dirección de las horas, días, meses y años faltantes calculando el promedio de esos parámetros teniendo en cuenta la información suministrada para esos mismos intervalos de tiempo. Por ejemplo, si el valor de la velocidad para la hora 5 del día 20 de enero de 2009 no se tenía, el algoritmo, al introducir los datos, inmediatamente promediaba las horas 5 para todos los 20 de enero de todos los años a partir de los cuales se tenían registros, y de esta forma, el programa asignaba un valor completando ese espacio.

La ubicación geográfica en la Región Caribe de cada una de estas estaciones seleccionadas [8] se muestra a continuación en la tabla 3.

**Tabla 3.** Catálogo de la información de las estaciones seleccionadas para el análisis estadístico del viento.

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESTACIÓN</b>	<b>DPTO</b>	<b>MUNICIPIO</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>
<b>29015020</b>	Carmen de Bolívar	Bolívar	El Carmen de Bolívar	9°43'N	75°07'W
<b>29035170</b>	Sincerín	Bolívar	Arjona	10°09'N	75°17'W
<b>29035040</b>	Nueva Florida	Bolívar	María La Baja	09°57'N	75°21'W
<b>23205030</b>	Sta. Rosa De Simití	Bolívar	Simití	07°58'N	74°04'W

## **CAPITULO 2: HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS DE ANÁLISIS**

Las diferencias de temperaturas que existen a lo largo de la tierra originan cambios de presión que hacen que las masas de aire se desplacen horizontalmente de una zona a otra más cercana con presión distinta, originándose así el viento de forma aleatoria. Esta aleatoriedad característica del recurso eólico permite estudiar su comportamiento al analizar la velocidad, mediante la aplicación de herramientas estadísticas. El presente documento se enfoque en el análisis estadístico de los vientos, del cual se obtendrán conclusiones experimentales que permitirán conocer a fondo acerca de la naturaleza de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Para el análisis de la velocidad del recurso eólico se emplearon medidas de tendencia central y de variabilidad, a partir de las cuales se presentaron los datos eólicos resumidos en forma de tablas y gráficas. Asimismo, asociado a este comportamiento aleatorio del viento existe una distribución de probabilidad asociada al viento; a lo largo de este capítulo, se explicará también la teoría referente a distribuciones de Weibull y de Rayleigh, para describir la variación de la velocidad en el tiempo en un sitio dado, la distribución normal, cuyas características permiten aplicarse a diferentes tipos de situaciones, y la distribución gamma.

Por otro lado, teniendo en cuenta que la altura influye en la velocidad del viento, es necesario estudiar la Ley de Hellmann para conocer el valor de esta variable a diferentes alturas, considerando el tipo de terreno en el que se evaluará. Nada de lo anterior sería de provecho sino se escribiera acerca de los métodos para conocer la cantidad de energía que proporciona el movimiento del aire dadas ciertas condiciones geográficas y meteorológicas.

### **2.1. Herramientas de estadística descriptiva**

Estas herramientas permiten obtener información valiosa al describir y analizar la información concerniente a las velocidades de cada estación meteorológica, además de

permitir agrupar estos datos en clases, con las cuales pueden elaborarse técnicas gráficas como los histogramas de frecuencias que evidencian patrones existentes en un conjunto de datos.

Existen dos medidas numéricas que permiten obtener de información de cualquier grupo, ayudan a caracterizar los datos y a mostrar algunas de sus propiedades importantes, éstas son: las medidas de tendencia central y las de variabilidad.

### 2.1.1. Medidas de tendencia central

Proporcionan una medida cuantitativa sobre la ubicación del centro de un conjunto de datos.

Existen tres medidas de tendencia central: la media, la moda y la mediana.

La media es el promedio aritmético y se denota por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Para datos agrupados, la media se calcula por:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^k f_i x_i / n \quad (2)$$

Una de las propiedades que presenta la media es que la suma de las desviaciones de los datos respecto a la media es cero.

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0 \quad (3)$$

Una desventaja de la media es que puede ser afectada por la existencia de valores extremos.

Por otro lado, la **mediana** es el valor medio cuando las observaciones se ordenan de menor a mayor, incluyendo los valores repetidos si los hay [9]. Ésta no se ve afectada por extremos y hace énfasis en el verdadero centro de un conjunto de datos [10]. Para un número de observaciones impar, la mediana se calcula por:

$$\text{Mediana} = \frac{x_{n+1}}{2} \quad (4)$$

Lo que matemáticamente indica que, si el número de observaciones es impar, la mediana será el valor que se encuentre justo en la mitad del conjunto de datos ordenados. En cambio, si el número de observaciones es par, la mediana se calcula por:

$$\text{Mediana} = x_{n/2} + x_{\left(\frac{n}{2}\right)+1} \quad (5)$$

En este caso el valor de la mediana será el promedio de los valores de las dos observaciones que estén en la mitad del conjunto de datos ordenado. Para datos agrupados, la mediana se calcula por:

$$\text{Mediana} = L + c \left( \frac{j}{f_m} \right) \quad (6)$$

Donde **L** es el límite inferior de la clase donde se encuentra la mediana,  $f_m$  es la frecuencia de esa clase, “**c**” es la longitud de la clase y “**j**” es el número de observaciones de esa clase necesarias para completar  $n/2$ .

Finalmente, la **moda** es la observación que ocurre con más frecuencia, la cual puede que no exista o que no sea única, hay casos en que su utilidad es limitada [11].

### 2.1.2. Medidas de variabilidad

La variabilidad es un fenómeno natural en todo proceso, su medida siempre debe ser considerada al momento de estudiar un conjunto de datos, pues sus efectos no pueden pasar desapercibidos.

Una de las medidas de variabilidad es el **rango** o **recorrido** que no es más que la diferencia entre el valor más grande y el más pequeño de una muestra, sin tomar en cuenta el resto de observaciones. Sin embargo, la más empleada es la **desviación estándar**, esta es la medida de la desviación respecto a la media de cada una de las observaciones. Asume un valor positivo cuando su valor es mayor que la media y negativo si es menor. De ser pequeñas las magnitudes de las variaciones puede decirse entonces que hay poca variabilidad porque están cerca a la media [11] [12]. La desviación estándar de una muestra se calcula por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (7)$$

Al elevar al cuadrado la desviación estándar se obtiene la **varianza** de una muestra ( $s^2$ ), es decir,  $\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}$ , donde la cantidad (n-1) se conoce como **grados de libertad asociados a la varianza**, para este caso se toma como el número de observaciones independientes [10].

Otra medida de variabilidad un poco difícil de obtener teóricamente pero más real que la desviación estándar es la Desviación media:

$$D.M. = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (8)$$

Para datos agrupados, la desviación media se aproxima por:

$$D.M. = \frac{\sum_{i=1}^k f_i |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^k f_i} \quad (9)$$

Esta medida permite el enfoque tanto en las desviaciones de los datos como en los signos de las mismas y es menos sensible a los valores extremos del conjunto de datos [11].

### 2.1.3. Medidas de forma

Proporcionan información acerca de la forma como están distribuidos los datos entorno a las medidas de tendencia central, si es simétrica a un eje vertical o si existe elevación, apuntamiento o achatamiento en el centro de la distribución, lo que se evidencia mediante su representación gráfica ya sea a través de histogramas o diagramas de barra [12]. Existen dos tipos de medidas de forma, el sesgo o coeficiente de asimetría y la curtosis o apuntamiento.

#### - Sesgo o coeficiente de asimetría ( $g_1$ )

Permite medir la simetría de la distribución, determinando si el comportamiento de un conjunto de datos a ambos lados de una medida central es el mismo. El centro de simetría más usado es la media, de esta forma, una distribución de frecuencia es simétrica respecto a

este valor central, si para cada valor de la variable, existe otro valor con la misma frecuencia equidistante respecto de la media. Así, una distribución perfectamente simétrica tendrá un coeficiente de simetría igual a cero y la moda, media y mediana coincidirán [12]. Cuando éste sea mayor que cero, la asimetría será positiva, es decir, está sesgada a la derecha, y la media será mayor que la mediana, y ésta a su vez mayor que la moda [12], de lo contrario, cuando sea menor que cero, estará sesgada a la izquierda, la media será menor que la mediana y menores que la moda [12]. Un conjunto de datos se considera simétrico cuando las observaciones caen dentro del intervalo  $\pm 5$ .

El coeficiente de asimetría se define por [12]:

$$g_1 = \frac{\bar{x} - M_o}{s} \quad (10)$$

El coeficiente de asimetría puede convertirse en un valor con una distribución normal estándar en muestras grandes, empleando el **Sesgo estandarizado** [13] definido por la siguiente expresión matemática:

$$z_1 = \frac{g_1}{\sqrt{6/n}} \quad (11)$$

De esta forma, para un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 5% un sesgo estandarizado podría ser significativo si su valor está fuera del intervalo  $\pm 2$ .

**- . Curtosis o apuntamiento ( $g_2$ ).**

Refleja la concentración de un conjunto de observaciones en el centro de una distribución, indicando las desviaciones de los datos en sentido vertical [12]. Este apuntamiento se mide mediante el coeficiente de curtosis ( $g_2$ ), de esta forma, una distribución es platicúrtica cuando su curva es aplanada y su  $g_2 < 0$ , leptocúrtica cuando es elevada y su  $g_2 > 0$ , y mesocúrtica cuando no describe ninguna de las dos formas anteriores, es considerada una curva normal y su  $g_2 = 0$ . Un coeficiente de curtosis ubicado dentro del rango  $\pm 5$  describe una distribución mesocúrtica [12].

La expresión matemática que define el coeficiente de curtosis se presenta a continuación:

$$g_2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4 n_i}{N s^4} \quad (12)$$

Al igual que el sesgo, el valor estadístico de curtosis puede convertirse en un valor con distribución normal estándar en muestras grandes mediante la **curtosis estandarizada** [13], a través de la expresión:

$$z_2 = \frac{g_2}{\sqrt{24/n}} \quad (13)$$

Es así que para un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 5% la curtosis estandarizada se considera significativa si su valor está fuera del intervalo  $\pm 2$ .

## 2.2. Herramientas de estadística inferencial

El comportamiento de la velocidad del viento puede ser caracterizado como una variable aleatoria continua con una distribución de probabilidad asociada, de ahí que sea posible su análisis mediante las herramientas de la estadística inferencial, al emplearse modelos estadísticos que permiten analizar de una forma más real la distribución de este parámetro para así poder estimar cómo se comportará durante un periodo de tiempo específico.

### 2.2.1. Distribución de probabilidad Normal o Gaussiana

Su aplicabilidad a un sinnúmero de situaciones hace de esta distribución la más importante de la estadística, ya que muchos otros modelos tienden hacia ésta a medida que el tamaño de la muestra aumenta. Asimismo, proporciona una representación adecuada de mediciones físicas, datos meteorológicos, entre otros. Para su aplicación requiere principalmente de dos parámetros, la media y la desviación estándar, y su función de densidad de probabilidad para una variable aleatoria X normalmente distribuida, está dada por [11] :

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que:

$$-\infty < x < \infty; -\infty < \mu < \infty; \sigma > 0$$

### 2.2.2. Distribución de probabilidad Gamma

Es otro modelo estadístico usado para ajustar las distribuciones de velocidades del viento. Su representación gráfica es asimétrica y sesgada a la derecha. La función gamma está dada por (devore 189):

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad \text{para } \alpha > 0 \quad (15)$$

Y la función de densidad de probabilidad es [10] :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, & x > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (16)$$

Cuando  $\alpha, \beta > 0$ , se tiene que:  $E(X) = \alpha\theta$  y  $Var(X) = \alpha\theta^2$  [11] . Siendo  $\alpha$  es el parámetro de forma y  $\beta$  el parámetro de escala.

### 2.2.3. Distribución de probabilidad de Weibull

Este modelo permite caracterizar la amplitud de la distribución de las velocidades del viento en el tiempo. Depende de un parámetro de forma ( $k$  o  $\alpha$ ) que puede variar de 1 a 3,6; y uno de escala ( $c$ ,  $\theta$  o  $\beta$ ) [14] [15]. Una variable aleatoria  $X$  tiene una distribución de Weibull si su función de densidad de probabilidad está dada por [11]:

$$f(x; \alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\theta^\alpha} x^{\alpha-1} \exp[-(x/\theta)^\alpha] & x, \alpha, \theta > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (17)$$

Cuando el parámetro de forma,  $\alpha = 2$  y el parámetro de escala,  $\theta = \sqrt{2}$ ,  $\sigma$  se obtiene la función de densidad de probabilidad de la **distribución de Rayleigh** cuya expresión matemática está dada por:

$$f(x; \sigma^2) = \frac{x}{\sigma^2} \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad x > 0 \quad (18)$$

Cuando el parámetro de forma es igual a 3, se obtiene la distribución normal, antes mencionada.

### 2.3. Ley de Hellmann

La velocidad del viento depende de la altura del lugar donde se desee conocer su magnitud. No es lo mismo evaluar el potencial eólico en una zona costera o en áreas montañosas, que evaluarlo en cualquier otro sitio en general, es precisamente por esta razón que la Organización Mundial de Meteorología recomienda, que las medidas de esta variable se realizan a una altura estándar de 10 metros [2], con el fin de disminuir cualquier perturbación que pueda generarse debido a la fricción con la superficie [16]. Es así, que tomando el valor anterior como referencia o cualquier otro del que se disponga, es posible conocer la velocidad instantánea del recurso eólico a una altura deseada mediante la *ley de Hellmann* [15] definida por:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\alpha \quad (19)$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades del viento a alturas de  $h_1$  y  $h_2$  respectivamente, y  $\alpha$  es el exponente de Hellmann (coeficiente de rugosidad o fricción) que varía con la rugosidad del terreno, es decir, los obstáculos y accidentes propios de la geografía de un lugar, que provocan variaciones en la velocidad del viento [15]. Los valores de  $\alpha$  se encuentran en la Tabla 4:

**Tabla 4.** Coeficiente de rugosidad o fricción para diferentes terrenos [17].

Tipo de rugosidad	A
<b>Lugares llanos con hielo o hierba</b>	[0,08 - 0,12]
<b>Lugares llanos (mar o costa)</b>	0,14
<b>Terrenos poco accidentados</b>	[0,13 - 0,16]
<b>Zonas rústicas, terrenos de cultivos.</b>	0,2
<b>Terrenos accidentados o bosques</b>	[0,2 - 0,24]
<b>Terrenos accidentados y ciudades</b>	[0,25 - 0,4]

## 2.4. Densidad de potencia eólica

Si el objetivo es determinar el potencial del recurso eólico de una zona determinada, es necesario conocer la cantidad de energía, que proporciona el movimiento del aire de ese lugar, esto es la densidad de potencia eólica. Ésta, puede calcularse mediante la expresión:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (20)$$

Siendo  $P/A$  la densidad de potencia en Vatios ( $W/m^2$ ),  $\rho$  la densidad del aire en  $kg/m^3$ , y  $v$  la velocidad del viento en  $m/s$  [1]. Cabe resaltar que el valor de la densidad de potencia eólica depende en gran medida de las variaciones en la velocidad del viento y la densidad del aire en determinadas condiciones geográficas, pues a mayor densidad del aire, mayor energía generara en la turbina eólica [16].

La densidad del aire depende de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, la presión y temperatura del lugar, es decir, es diferente para cada sitio con condiciones geográficas y meteorológicas diferentes.

La densidad del aire puede calcularse mediante la ecuación de estado de gases ideales mostrada a continuación[18].

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (21)$$

Siendo  $P$  y  $T$  la presión y temperatura del aire en grados kelvin del lugar, y  $R$  la constante particular del aire, cuyo valor es aproximadamente  $286,7 J/Kg * K$  [18].

# CAPITULO 3: GRAFICAS DE TENDENCIA MENSUALES

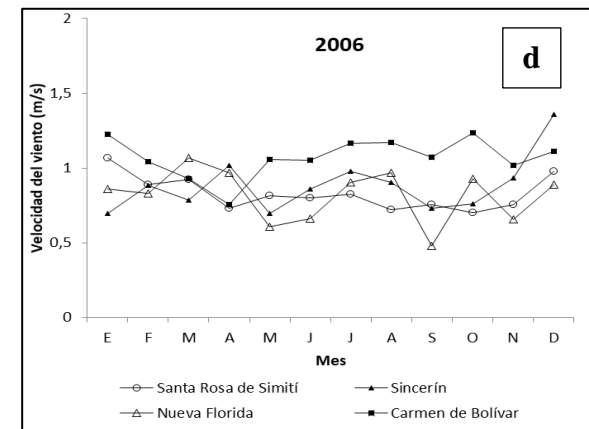
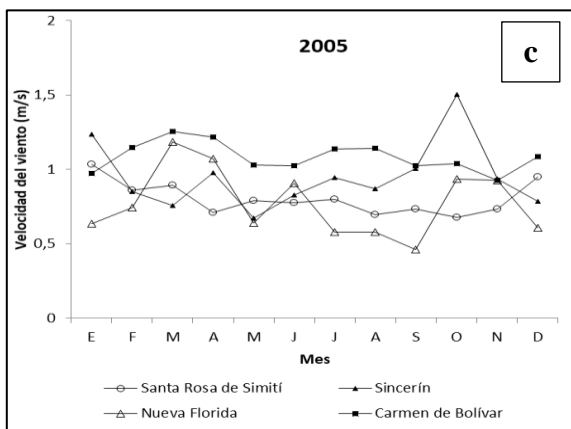
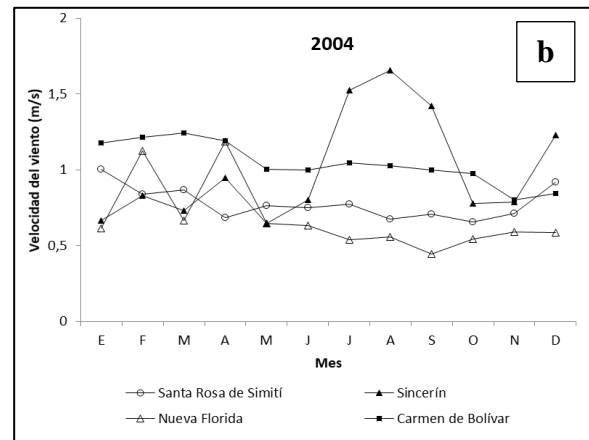
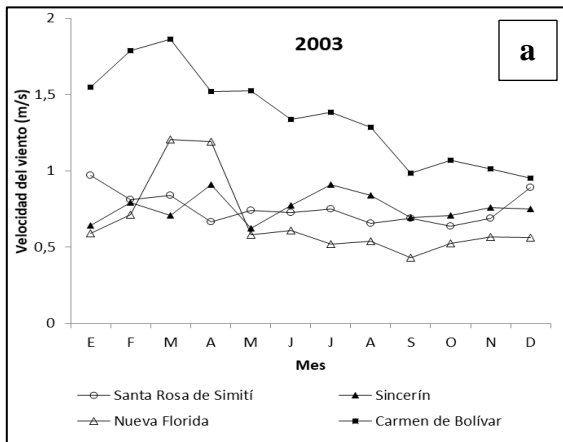
## RECURSO EÓLICO

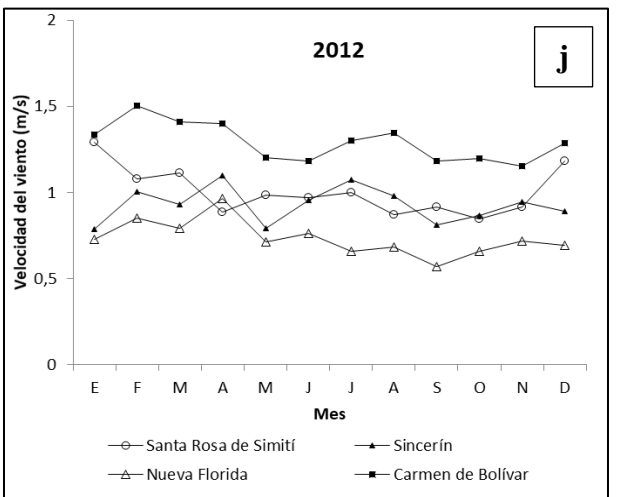
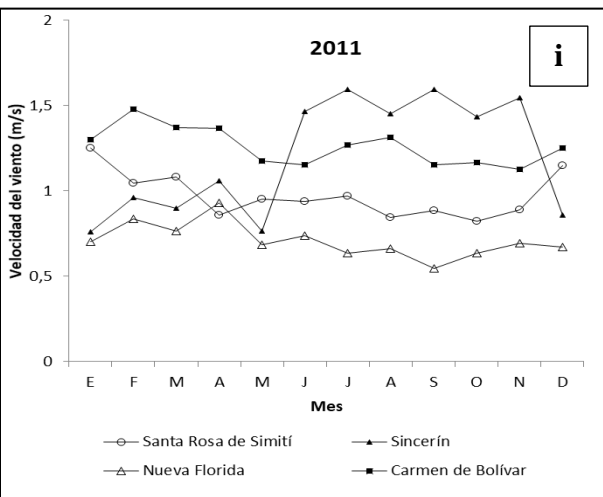
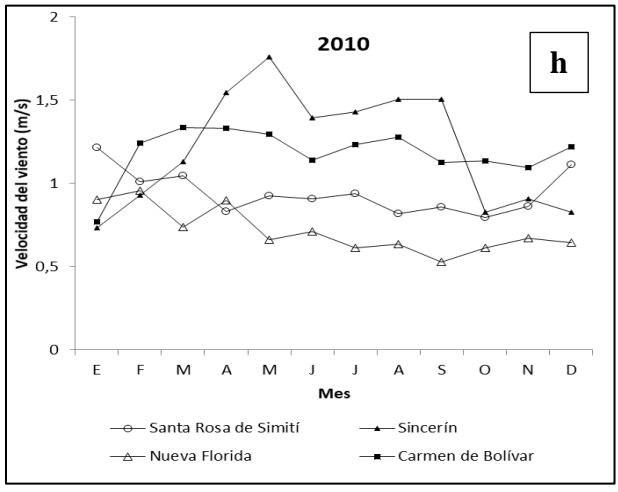
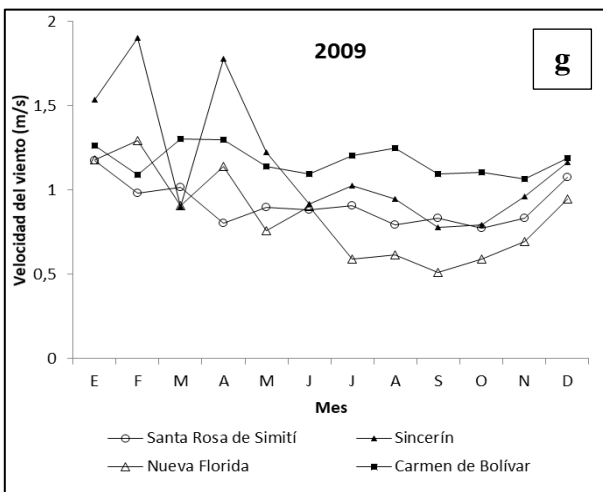
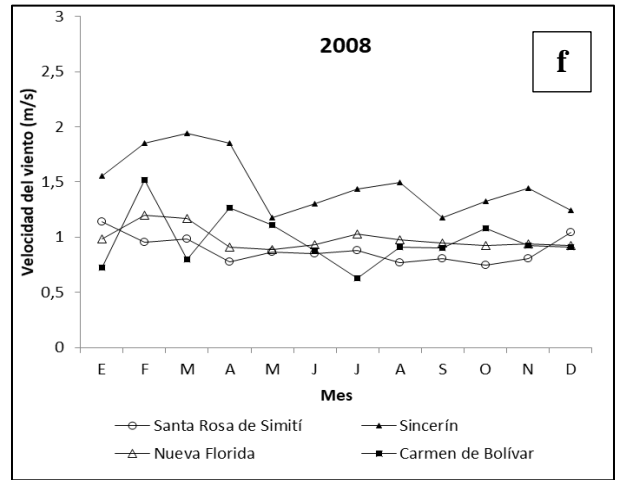
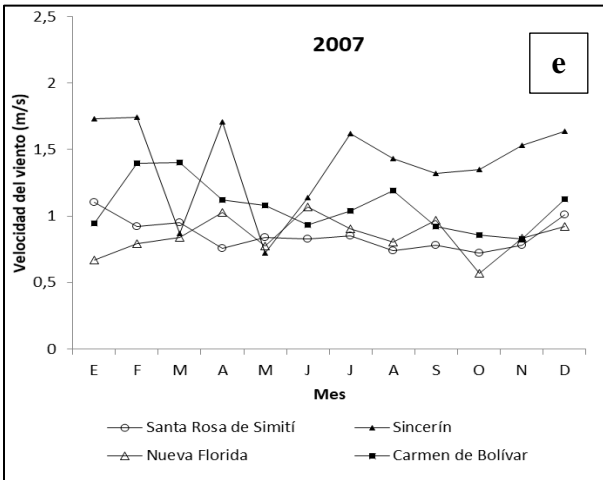
### 3.1. Gráficas de tendencia: variaciones mensuales

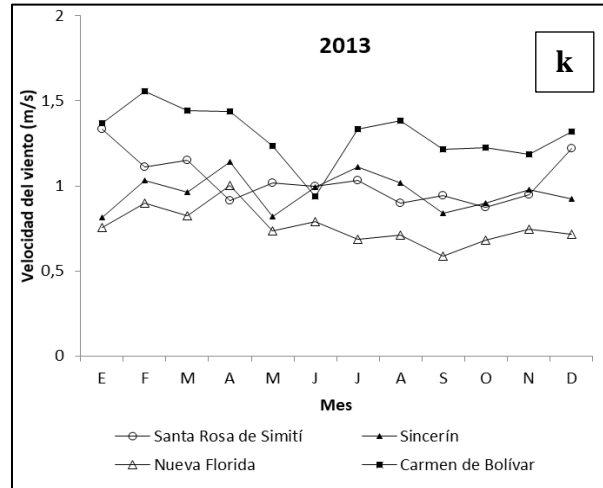
Se realizaron gráficas de tendencia para la variable de velocidad con la finalidad de analizar el comportamiento mensual del viento durante un período de 10 años e identificar en cuáles meses se presentaron las velocidades más bajas y más altas para cada estación.

#### 3.1.1. Análisis e interpretación de las gráficas de tendencia

Las gráficas de tendencia para las 4 estaciones muestran el comportamiento del viento durante el periodo comprendido entre 2003 y 2013 (fig.2: a-k).



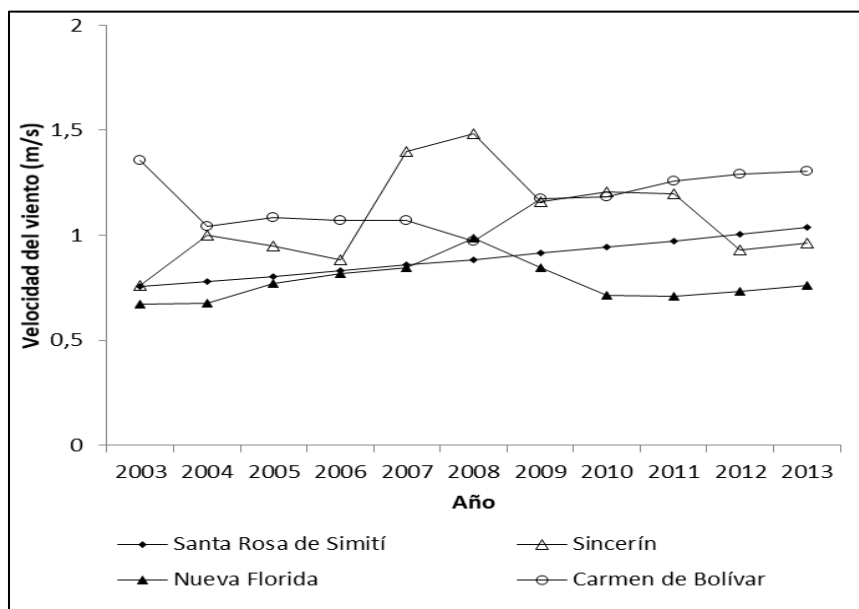




**Figura 2:** a-k). Variaciones mensuales de la velocidad del viento para cada estación.

Las series de tiempo muestran que las mayores velocidades del viento se obtuvieron para la estación Carmen de Bolívar, cuya información presenta gran aleatoriedad comparada con la correspondiente a las demás estaciones, que es un poco más constante, mientras que las menores se registraron en forma general en Nueva Florida. La velocidad más alta para el periodo comprendido entre 2003 y 2013 se presentó en el mes de marzo con un valor de 1,36 m/s, por el contrario, el más bajo fue de 0,59 m/s durante septiembre, el mes en el que se registran los valores más bajos para la variable en estudio.

La figura 3 muestra un comportamiento variable para la magnitud de las velocidades registradas para las estaciones Sincerín y Carmen de Bolívar, cierta tendencia en los valores obtenidos para Santa Rosa De Simití y Nueva Florida.



**Figura 3.** Promedio anual de la velocidad del viento.

### 3.2. Gráficas de perfil de velocidad del viento: Aplicación de la Ley de Hellmann

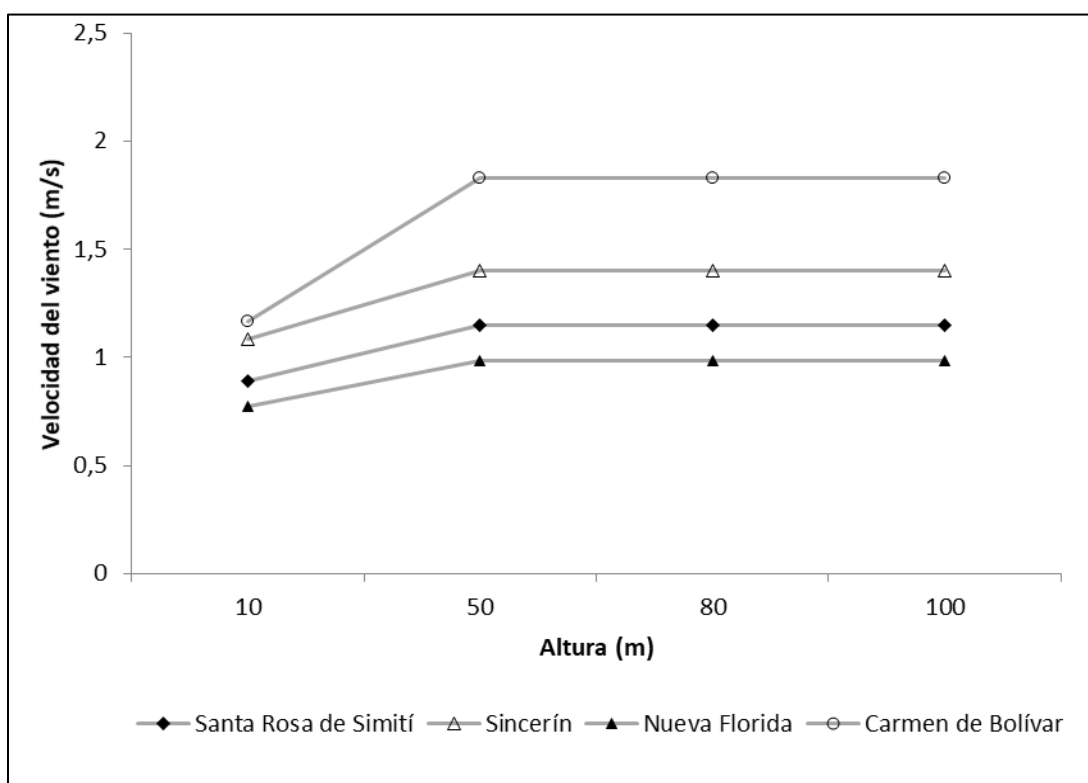
Se presentan diferentes perfiles de velocidad del viento para cada uno de las estaciones, aplicando la Ley del Hellmann, con la cual se obtuvieron valores de esta variable para alturas de 50, 80 y 100 metros, tomando como referencia la velocidad a una altura de 10 metros, siempre que no hubiese obstáculos que pudieran afectar su medida.

A continuación, en la Tabla 5 se encuentran los valores de los coeficientes de Hellmann asignados a cada una de las estaciones seleccionadas:

**Tabla 5.** Coeficientes de rugosidad asignados a las distintas estaciones.[17]

ESTACIÓN	COEFICIENTE	ESTACIÓN	COEFICIENTE
<b>Carmen de Bolívar</b>	0,28	<b>Sta. Rosa de Simití</b>	0,16
<b>Nueva Florida</b>	0,15	<b>Sincerín</b>	0,16

Para cada estación los valores de los coeficientes de Hellmann se seleccionaron acorde a la topografía de la zona donde está ubicada. Los perfiles de viento para cada estación se encuentran graficados a continuación, acorde a los grupos antes mencionados. Bajo estas aproximaciones, el perfil de viento para cada estación confirma que, a mayor altura, mayor velocidad de viento se tendrá, de esta forma en la Figura 4, la estación Carmen de Bolívar presenta las velocidades más elevadas mientras que las de Nueva Florida son mínimas en comparación con el resto.



**Figura 4.** Perfil de velocidad del viento para cada estación.

## **CAPITULO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS RECURSO EÓLICO**

El recurso eólico, hoy día, cumple un papel importante en el desarrollo de tecnologías de energías renovables. Al mencionar este recurso, directamente se hace referencia a la energía obtenida a través de la cinemática del viento. La energía eólica ofrece un enorme potencial para el suministro de cantidades importantes de energía eléctrica limpia.

Por lo anterior, en este capítulo se desarrolla un análisis estadístico, de datos de los datos de velocidades del viento tomados en la estación tipo Carmen de Bolívar, dividido en tres partes; inicialmente se presentan datos de frecuencia para el desarrollo de histogramas, reflejando así el comportamiento de los datos medidos; a continuación se presenta una tabla con las distribuciones ajustadas para datos tomados mensualmente en un rango de diez años, esto soportado por las gráficas de las distribuciones utilizadas para el análisis de las velocidades; por último, se muestra para cada mes la tendencia de la dirección de las velocidades en rosas de vientos, siendo esta la manera de identificar mes a mes la dirección del viento con mayor potencial.

### **4.1. Análisis estadístico de los datos para la estación tipo Carmen de Bolívar**

Se toma como estación tipo para el análisis de los datos de velocidades y dirección de los vientos, la estación ubicada en Carmen de Bolívar, aplicando detalladamente las herramientas estadísticas descritas anteriormente. Mediante el estudio estadístico de los datos medidos en esta estación se obtiene una muestra del resultado del potencial eólico en Bolívar, sin embargo, en el documento se incluye como anexo posterior los resultados obtenidos de manera resumida para las demás estaciones mencionadas en la tabla 3.

#### **4.1.1. Histograma de frecuencias y herramientas de estadística descriptiva**

En la Tabla 6 se presentan las frecuencias de los datos medidos multianualmente para los doce meses del año, se calculan las medidas de promedio, desviación estándar, seso y

curtosis; al mismo tiempo que se muestran los datos máximos y mínimos para determinado mes.

**Tabla 6.** Datos estadísticos multianuales para la estación Carmen de Bolívar

<i>Mes</i>	<i>Recuento</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Rango</i>	<i>Sesgo Estandarizado</i>	<i>Curtosis Estandarizada</i>
<b>Enero</b>	8184	1,14759	0,685518	0,597353	0,1	5,7	5,6	49,2989	46,7266
<b>Febrero</b>	7464	1,36177	0,928556	0,681876	0,2	12	11,8	55,0668	74,1551
<b>Marzo</b>	8184	1,30482	0,907753	0,695691	0,2	6,4	6,2	60,5439	63,33
<b>Abril</b>	7920	1,26313	0,716721	0,567418	0,4	6	5,6	47,8305	59,1817
<b>Mayo</b>	8184	1,1684	0,568871	0,486879	0,353484	5,4	5,04652	55,6366	84,2134
<b>Junio</b>	7920	1,06644	0,509916	0,478147	0,4	4,6	4,2	54,7019	87,0902
<b>Julio</b>	8184	1,15758	0,603762	0,521572	0,2	5,4	5,2	41,0412	42,04
<b>Agosto</b>	8184	1,20848	0,508988	0,421181	0,4	4,8	4,4	32,7254	28,9479
<b>septiembre</b>	7920	1,06225	0,503626	0,474114	0,4	4,9	4,5	49,6836	77,2296
<b>Octubre</b>	8184	1,09827	0,533751	0,485992	0,1	5,7	5,6	58,8228	105,975
<b>noviembre</b>	7920	1,01166	0,430644	0,425679	0,35222	3,7	3,34778	23,1265	-2,19773
<b>Diciembre</b>	8184	1,11762	0,542485	0,485393	0,3	4,8	4,5	47,7513	57,0744

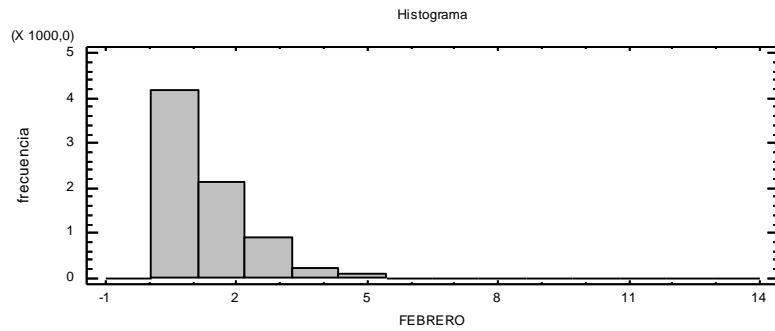
Se observan los datos obtenidos de la velocidad del viento en los distintos meses del año por un lapso comprendido entre 2003 y 2013. En estas es posible observar que, en meses como julio a partir 8184 datos de velocidad del viento comprendidos entre un mínimo de 0,2 m/s y un máximo de 5,4 m/s para este mes en la estación Carmen de Bolívar; se estimó un valor promedio de 1,15758 m/s y una desviación estándar, medida adimensional de la dispersión relativa a la media de 0,603762. Otro mes donde se tiene un valor considerable de velocidad promedio del viento es en febrero donde se obtuvo este valor realizando un análisis de 7464 datos comprendidos entre 0,2 m/s y un valor máximo de 12 m/s en la estación antes mencionada, donde se encontró un valor promedio de 1,30482 m/s siendo este el mes donde la velocidad promedio del viento alcanza su valor máximo con una dispersión de los datos de 0,928556.

Por otro lado, se obtuvo los meses donde la velocidad del viento tuvo los valores más bajos en el año, donde encontramos a noviembre que tiene una velocidad promedio del viento de 1,01166 m/s que fue la velocidad más baja en todo el año, esto se obtuvo analizando los 7920 datos suministrados. Es necesario también nombrar al mes de septiembre que obtuvo una velocidad considerablemente baja, este se analizó a partir de 7920 datos suministrados, en el cual se obtuvo una velocidad promedio de 1,06225 m/s y una desviación estándar con el valor medio de 0,503626 (Ver Tabla 7).

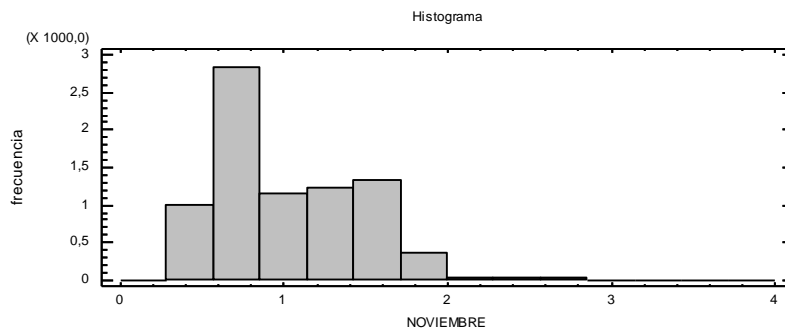
**Tabla 7.** Análisis mensual de frecuencias para Carmen de Bolívar.

<i>Mes</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia Relativa</i>
<b>Enero</b>	0,371429	0,942857	0,657143	4386	0,5359
<b>Febrero</b>	0,0714286	1,14286	0,607143	4163	0,5577
<b>Marzo</b>	0,371429	0,942857	0,657143	3970	0,4851
<b>Abril</b>	0,571429	1,14286	0,857143	3206	0,4048
<b>Mayo</b>	0,428571	0,857143	0,642857	2970	0,3629
<b>Junio</b>	0,714286	1,07143	0,892857	2350	0,2967
<b>Julio</b>	0,328571	0,757143	0,542857	2672	0,3265
<b>Agosto</b>	0,857143	1,28571	1,07143	2311	0,2824
<b>Septiembre</b>	0,428571	0,857143	0,642857	3097	0,391
<b>Octubre</b>	0,371429	0,942857	0,657143	4005	0,4894
<b>Noviembre</b>	0,571429	0,857143	0,714286	2826	0,3568
<b>Diciembre</b>	1,28571	1,71429	1,5	1658	0,2026

En esta Tabla 7 encontramos un análisis mensual el cual describe los intervalos de velocidades de viento, en el que se contienen una descripción detallada de la cantidad de datos de velocidades que contiene dichos intervalos. Por ejemplo, el mes de marzo los datos más frecuentes de velocidad estuvieron en el intervalo de [0,371429; 0,942857] con un total de 3970 datos que pertenecen a este intervalo. Ahora observamos en los meses de Febrero y Noviembre la cantidad de datos de velocidades para los diferentes intervalos de velocidades de viento.



**a) Febrero (Pmax)**



**b) Noviembre (Pmin)**

**Figura 5 a-b).** Histogramas de frecuencias multianuales para los meses de febrero y noviembre. est. Car. Bolívar.

#### 4.1.2. Distribuciones ajustadas multianuales

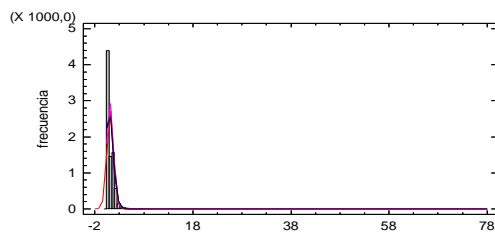
La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. La distribución de frecuencia de la velocidad del viento caracteriza al viento en un lugar dado de dos maneras. Primero, la distribución de frecuencia determina con qué frecuencia se observa una cierta velocidad del viento en ese lugar y segundo, identifica el rango de velocidades del viento observado en dicho lugar. Este análisis con frecuencia se obtiene ordenando las observaciones de velocidad del viento en bins de 1 metro por segundo (m/s) y calculando el porcentaje de cada bin. Las velocidades del viento pueden ser calculadas como un promedio o expresadas como un valor instantáneo. Generalmente, se utilizan intervalos

para promediar la velocidad del viento de 1 o 2 minutos (observaciones del clima), 10 minutos (la norma para programas de monitoreo de energía eólica), por hora, mensuales y anuales. Es importante conocer la altura de medición para una velocidad del viento dada, debido a la variación de la velocidad del viento con la altura. Las observaciones de la dirección del viento en estaciones meteorológicas a menudo se basan en una brújula de 36 puntos (cada 10 grados). La distribución de la dirección del viento con frecuencia se presenta como una rosa de los vientos (una gráfica de la frecuencia de ocurrencia por dirección). Las rosas de los vientos también pueden representar cantidades tales como la velocidad promedio o el porcentaje de potencia disponible en cada dirección. La distribución de la velocidad del viento es importante porque los sitios con idénticas velocidades promedio del viento, pero diferentes distribuciones pueden resultar en un recurso eólico disponible sustancialmente diferente. Estas diferencias pueden corresponder a un factor de hasta dos o tres. Dentro del análisis probabilístico en los modelos estadísticos constituye una fuente de información bastante relevante el saber cómo distribuye la velocidad del viento, para así poder estimar de mejor manera el comportamiento en un determinado período de tiempo y así implementar un modelo lo más aproximado a la realidad.

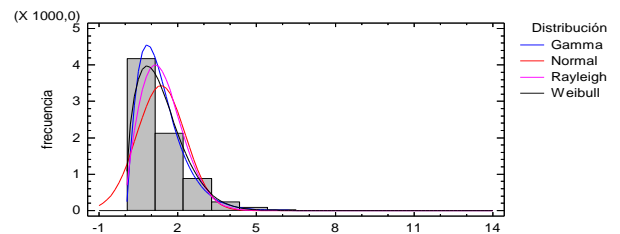
**Tabla 8.** Distribuciones multianuales Carmen De Bolívar 2003 – 2013.

Meses	Gamma		Normal		Rayleigh		Weibull	
Enero	Forma	3.19595	Media	1.14759	Escala	1.29207	Forma	1.80523
	Escala	2.78492	Desv. Estándar	0.685518	Umbral Inferior	0.0523436	Escala	1.29955
Febrero	Forma	2.57718	Media	1.36177	Escala	1.71203	Forma	1.59878
	Escala	1.89253	Desv. Estándar	0.928556	Umbral Inferior	-0.00776639	Escala	1.53171
Marzo	Forma	2.53463	Media	1.30482	Escala	1.6651	Forma	1.57453
	Escala	1.94251	Desv. Estándar	0.907753	Umbral Inferior	-0.0914903	Escala	1.4659
Abril	Forma	3.41989	Media	1.26313	Escala	1.37285	Forma	1.88899
	Escala	2.70748	Desv. Estándar	0.716721	Umbral Inferior	0.0921948	Escala	1.43114
Mayo	Forma	4.80721	Media	1.1684	Escala	1.09494	Forma	2.17194
	Escala	4.11434	Desv. Estándar	0.568871	Umbral Inferior	0.2328210	Escala	1.32325
Junio	Forma	4.83338	Media	1.06644	Escala	1.00254	Forma	2.20023
	Escala	4.53225	Desv. Estándar	0.509916	Umbral Inferior	0.2032430	Escala	1.20643

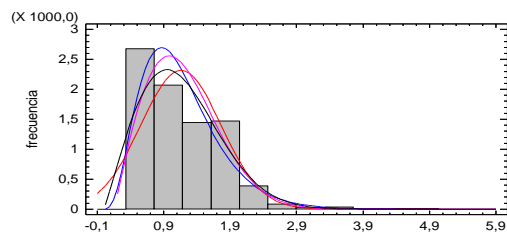
<b>Julio</b>	<b>Forma</b>	3.93106	<b>Media</b>	1.15758	<b>Escala</b>	1.17484	<b>Forma</b>	2.0489
	<b>Escala</b>	3.39592	<b>Desv. Estándar</b>	0.603762	<b>Umbral Inferior</b>	0.1497310	<b>Escala</b>	1.31276
<b>Agosto</b>	<b>Forma</b>	5.80747	<b>Media</b>	1.20848	<b>Escala</b>	1.0498	<b>Forma</b>	2.51805
	<b>Escala</b>	4.80561	<b>Desv. Estándar</b>	0.508988	<b>Umbral Inferior</b>	0.2903040	<b>Escala</b>	1.36404
<b>Septiembre</b>	<b>Forma</b>	4.94675	<b>Media</b>	1.06225	<b>Escala</b>	0.979054	<b>Forma</b>	2.2295
	<b>Escala</b>	4.65688	<b>Desv. Estándar</b>	0.503626	<b>Umbral Inferior</b>	0.2226390	<b>Escala</b>	1.20259
<b>Octubre</b>	<b>Forma</b>	4.76879	<b>Media</b>	1.09827	<b>Escala</b>	1.13244	<b>Forma</b>	2.16813
	<b>Escala</b>	4.34209	<b>Desv. Estándar</b>	0.533571	<b>Umbral Inferior</b>	0.0994841	<b>Escala</b>	1.24295
<b>Noviembre</b>	<b>Forma</b>	5.62688	<b>Media</b>	1.01166	<b>Escala</b>	0.866154	<b>Forma</b>	2.53062
	<b>Escala</b>	5.56201	<b>Desv. Estándar</b>	0.130644	<b>Umbral Inferior</b>	0.2601370	<b>Escala</b>	1.14387
<b>Diciembre</b>	<b>Forma</b>	4.8671	<b>Media</b>	1.11762	<b>Escala</b>	1.02784	<b>Forma</b>	2.19462
	<b>Escala</b>	4.35488	<b>Desv. Estándar</b>	0.542485	<b>Umbral Inferior</b>	0.2445830	<b>Escala</b>	1.26765



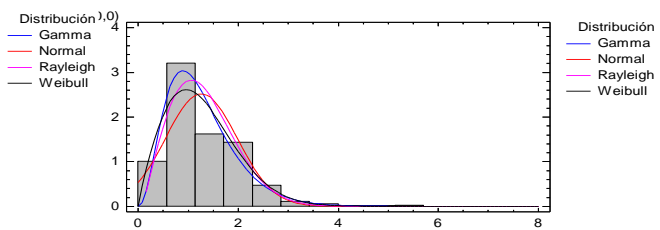
a) Enero



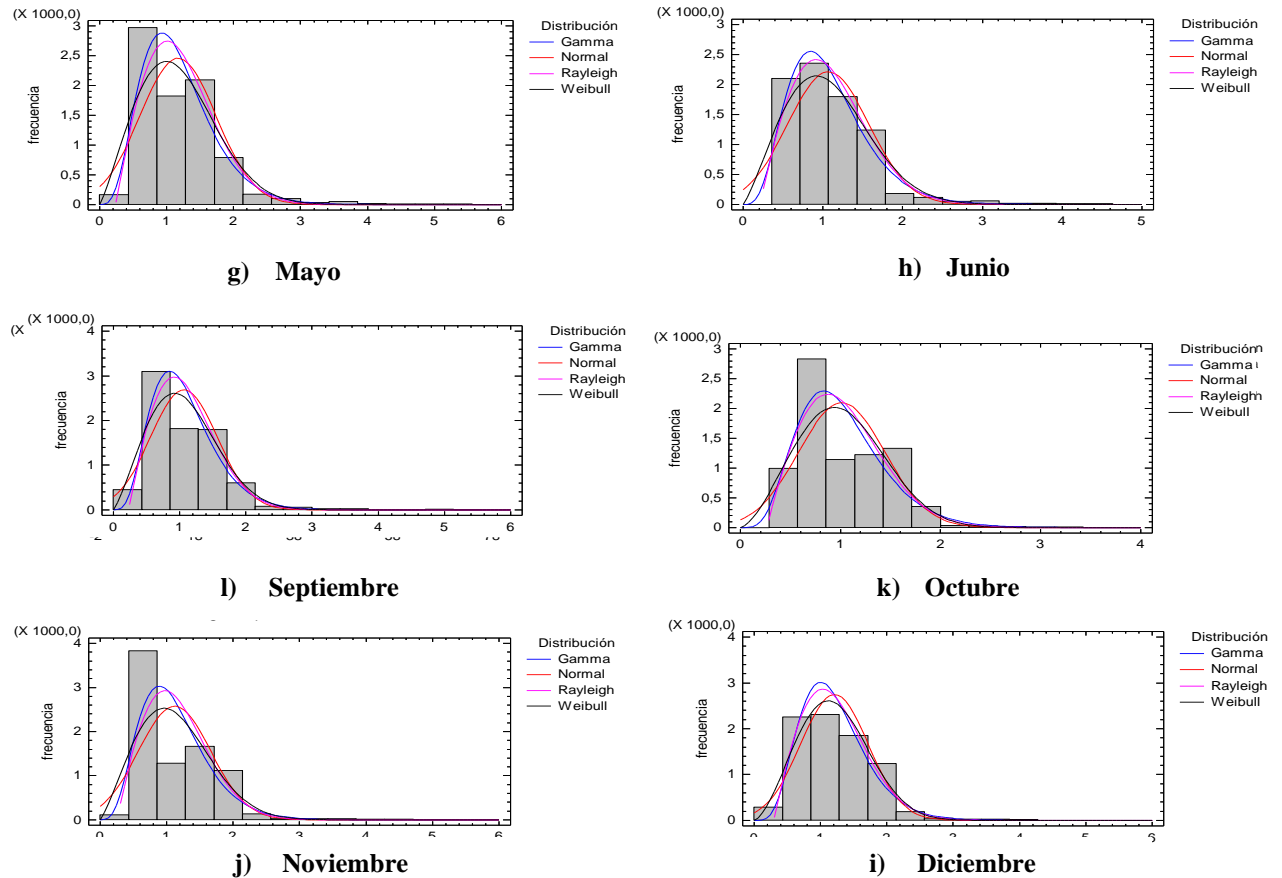
b) Febrero



d) Marzo



c) Abril

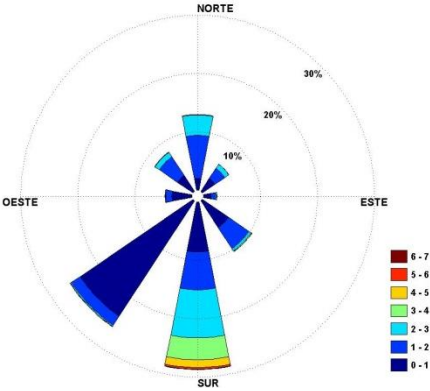


**Figura 6 a-i).** Distribuciones de frecuencias de velocidad del viento ajustadas para la estación Carmen De Bolívar periodo 2003-2013.

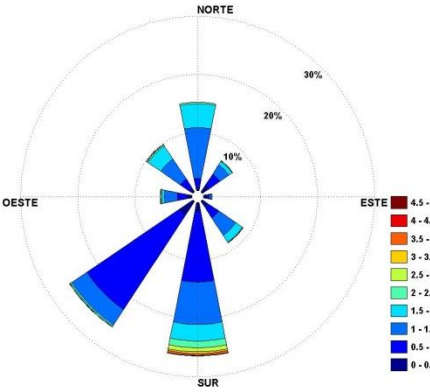
#### 4.1.3. Resultados expresados en rosas de vientos

Realizando un análisis de los meses predominantes de la dirección de los vientos para la estación Carmen de Bolívar, se observa claramente que la dirección Sur (S) es sobresaliente con velocidades máximas comprendidas entre los 5 m/s a 7 m/s. Desde el año 2003 a 2013, en el mes de febrero el 38,76% y el 25,65% de las direcciones del viento, se encontraron en las direcciones S y suroeste (SO), respectivamente, con un 22,4% y 24,53% de velocidades promedio en la dirección S comprendidas entre 2 - 3 m/s y 0 - 1 m/s respectivamente, como se observa en la Figura 6. Para el mes de junio el comportamiento también fue predominante en la dirección S con un 26,23%, seguido de un 25,94% de la dirección SO, con velocidades en la dirección S entre 1 - 1,5 m/s y 0,5 - 1 m/s en un 14,57% y un 22,4% respectivamente. Para el mes de octubre sobresalieron los vientos en dirección S con un 22,87%, seguido de

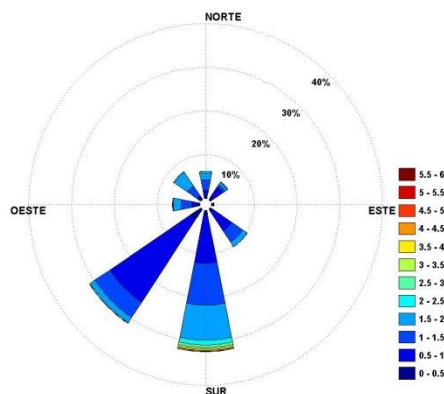
las componentes SO con un 21,65%, y distantemente de SE con un 9,99%. Se encontraron en las direcciones S, SO y SE, respectivamente, con un 28,75%, 25,68% y 5,4% de velocidades promedio comprendidas entre 1 – 1,5 m/s y 0,5 - 1 m/s, respectivamente, como se observa en la Figura 6. El previo análisis revela que las máximas velocidades de viento en la estación Carmen de Bolívar predominan en la dirección Sur.



a) Febrero



b) Junio



c) Octubre

**Figura 7 a-c).** Rosas de viento en la estación de Carmen De Bolívar para los meses de febrero, junio y octubre de 2003-2013.

Es importante mencionar que, las rosas de viento realizadas en el presente análisis se fundamentan en las direcciones del viento registradas por las estaciones meteorológicas del IDEAM, al igual que la velocidad, teniendo en cuenta todos los valores medidos desde el año 2003 a 2013 en lugar de estudiar valores promedios de los meses, por lo tanto es posible afirmar que estas rosas de vientos obtenidas son muy exactas, muestran la tendencia del viento en este periodo y pueden ser utilizadas como herramienta para la toma de futuras decisiones en el departamento.

Para las demás estaciones se llevó a cabo el mismo paso a paso del anterior procedimiento detallado para la zona del Carmen de Bolívar, los resultados de las demás estaciones meteorológicas se muestran a continuación:

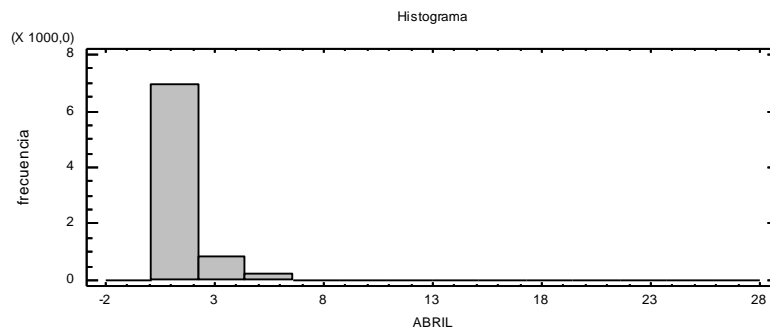
**Tabla 9.** Análisis estadístico de los datos registrados por la estación meteorológica SINCERIN periodo 2003-2013.

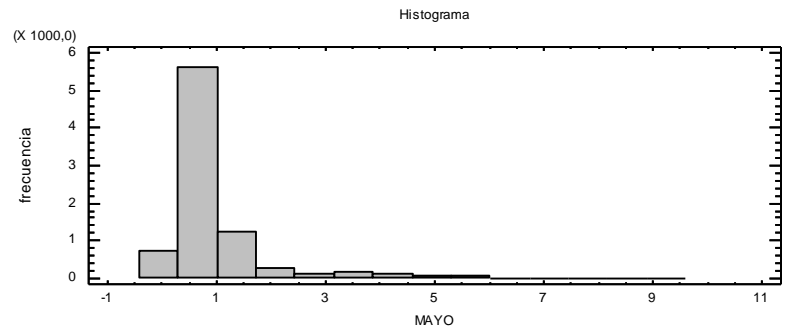
Mes	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Enero	8184	1,01338	0,868557	0,857087	0,1479	13,2	13,0521	106,32	219,712
Febrero	7464	1,16172	0,919611	0,791592	0,0831936	9,6	9,51681	96,2502	160,878
Marzo	8184	0,964516	0,874677	0,906856	0,130733	41	40,8693	523,416	10084,9
Abril	7920	1,27506	1,10216	0,864397	0,1	24,1	24	105,761	491,945

Mayo	8184	0,90009	0,81639	0,907009	0,0801123	8,1	8,01989	123,107	262,961
Junio	7920	1,03793	0,797704	0,768556	0,106963	6,3	6,19304	82,7508	124,645
Julio	8184	1,24073	0,917942	0,739838	0,2	18,5	18,3	100,336	364,736
Agosto	8184	1,19042	0,926044	0,777916	0,210894	7,7	7,48911	83,6152	111,769
septiembre	7920	1,07998	0,95444	0,883761	0,135575	8,7	8,56443	88,7891	121,996
Octubre	8184	1,02172	0,948248	0,928088	0,0830794	26,3	26,2169	166,244	1245,99
Noviembre	7920	1,06616	0,976774	0,916159	0,070298	43,6	43,5297	431,151	8289,62
Diciembre	8184	1,06025	0,895256	0,84438	0,17233	13,6	13,4277	83,7244	170,271

**Tabla 10.** Frecuencia estadística de los datos registrados por la estación meteorológica SINCERIN periodo 2003-2013.

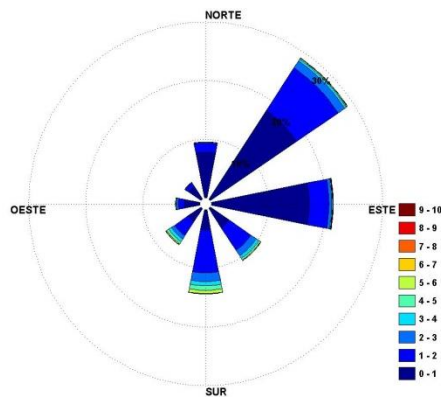
<i>Mes</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia Relativa</i>
<b>Enero</b>	0,0714286	1,14286	0,607143	6496	0,7937
<b>Febrero</b>	0,714286	1,57143	1,14286	3669	0,4916
<b>Marzo</b>	-2	1,57143	-0,214286	7549	0,9224
<b>Abril</b>	0,142857	2,28571	1,21429	6892	0,8702
<b>Mayo</b>	0,314286	1,02857	0,671429	5587	0,6827
<b>Junio</b>	0,271429	0,842857	0,557143	3609	0,4557
<b>Julio</b>	0,714286	2,42857	1,57143	4759	0,5815
<b>Agosto</b>	0,514286	1,22857	0,871429	3940	0,4814
<b>Septiembre</b>	0,414286	1,12857	0,771429	4414	0,5573
<b>Octubre</b>	0,142857	2,28571	1,21429	7427	0,9075
<b>Noviembre</b>	0,571429	4,14286	2,35714	5060	0,6389
<b>Diciembre</b>	0,142857	1,28571	0,714286	5810	0,7099



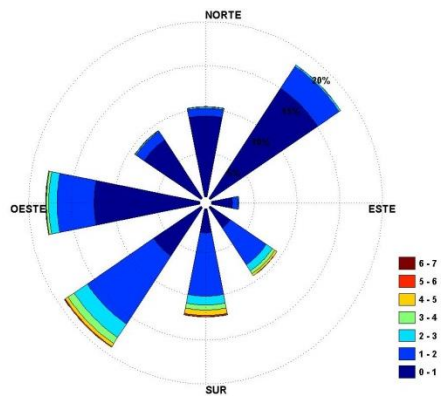


**b) Mayo (Pmin)**

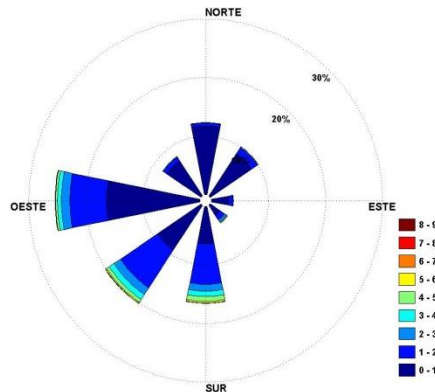
**Figura 8 a-b).** Histograma de frecuencia para los datos de la estación Sincerin en los meses de abril y mayo de 2003-2013.



**a) Febrero**



**b) Junio**



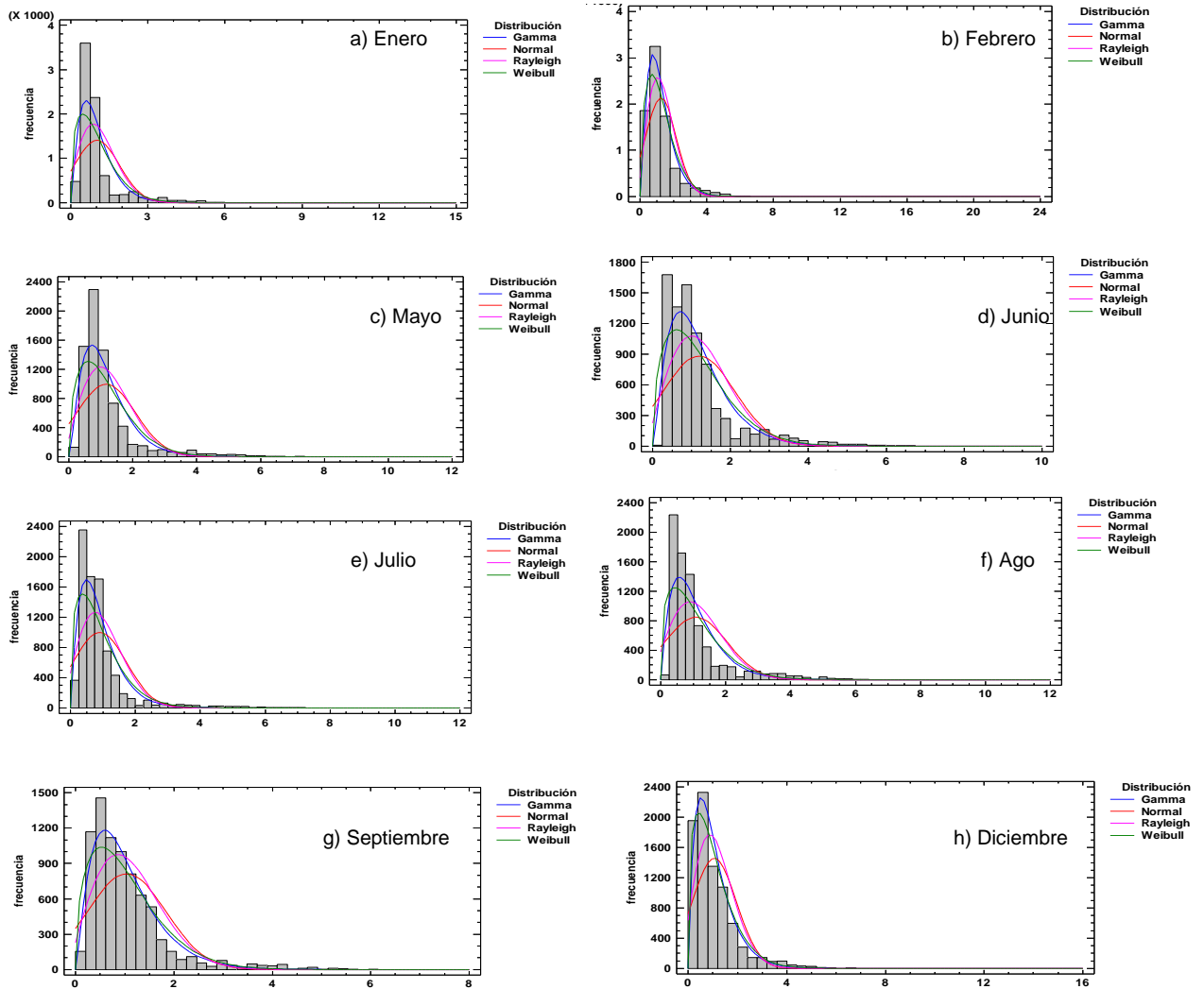
c) Octubre

Figura 9 a-c). Rosas de viento en la estación de Sincerín para los meses de febrero, Junio y Octubre de 2003-2013.

Tabla 11. Distribuciones ajustadas multianuales para la estación meteorológica SINCERIN periodo 2003-2013.

Meses	Gamma		Normal		Rayleigh		Weibull	
	Forma		Media		Escala		Forma	
Enero	Forma	2.37804	Media	1.01338	Escala	1.48087	Forma	1.3962
	Escala	2.34664	Desv. Estándar	0.868557	Umbral Inferior	-0.185695	Escala	1.1269
Febrero	Forma	2.57024	Media	1.6172	Escala	1.59324	Forma	1.47221
	Escala	2.21244	Desv. Estándar	0.919611	Umbral Inferior	-0.13893	Escala	1.299420
Marzo	Forma	2.94827	Media	0.964516	Escala	NA	Forma	1.44336
	Escala	3.05673	Desv. Estándar	0.874677	Umbral Inferior	NA	Escala	1.07598
Abril	Forma	1.83726	Media	1.27506	Escala	NA	Forma	1.31428
	Escala	1.44092	Desv. Estándar	1.10216	Umbral Inferior	NA	Escala	1.39626
Mayo	Forma	2.17172	Media	0.90009	Escala	1.38768	Forma	1.34382
	Escala	2.41278	Desv. Estándar	0.81639	Umbral Inferior	-0.2220070	Escala	0.993529
Junio	Forma	2.3134	Media	1.03793	Escala	1.4266	Forma	1.46602
	Escala	2.22887	Desv. Estándar	0.797704	Umbral Inferior	-0.1451860	Escala	1.1575
Julio	Forma	2.57571	Media	1.24073	Escala	1.63371	Forma	1.52657
	Escala	2.07596	Desv. Estándar	0.917942	Umbral Inferior	-0.1110820	Escala	1.39126
Agosto	Forma	2.45018	Media	1.149042	Escala	1.62742	Forma	1.14069
	Escala	2.05825	Desv. Estándar	0.962044	Umbral Inferior	-0.1473370	Escala	1.33079
Septiembre	Forma	2.09119	Media	1.07998	Escala	1.64332	Forma	1.33963

	<b>Escala</b>	1.93634	<b>Desv. Estándar</b>	0.95444	<b>Umbral Inferior</b>	-0.2579420	<b>Escala</b>	1.19151
<b>Octubre</b>	<b>Forma</b>	1.9419	<b>Media</b>	1.02172	<b>Escala</b>	NA	<b>Forma</b>	1.30063
	<b>Escala</b>	1.90061	<b>Desv. Estándar</b>	0.948248	<b>Umbral Inferior</b>	NA	<b>Escala</b>	1.11904
<b>Noviembre</b>	<b>Forma</b>	2.16672	<b>Media</b>	1.06616	<b>Escala</b>	NA	<b>Forma</b>	1.36221
	<b>Escala</b>	2.03227	<b>Desv. Estándar</b>	0.976774	<b>Umbral Inferior</b>	NA	<b>Escala</b>	1.17731
<b>Diciembre</b>	<b>Forma</b>	1.95659	<b>Media</b>	1.06025	<b>Escala</b>	1.58622	<b>Forma</b>	1.34568
	<b>Escala</b>	1.8454	<b>Desv. Estándar</b>	0.895256	<b>Umbral Inferior</b>	-0.2491800	<b>Escala</b>	1.1675



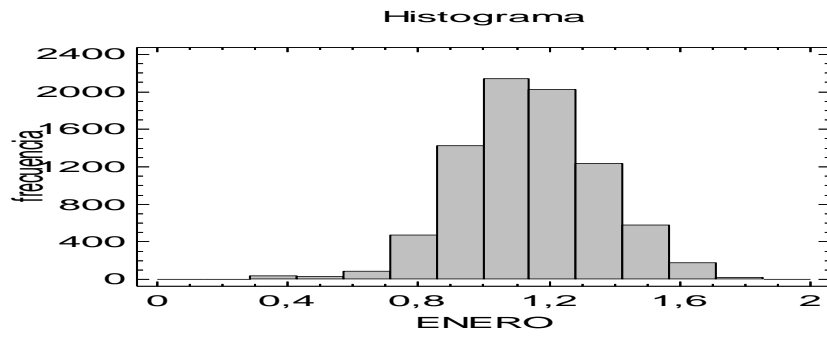
**Figura 10 a-h).** Distribuciones de frecuencias de velocidad del viento ajustadas para la estación Sincerín periodo 2003-2013.

**Tabla 12.** Análisis estadístico de los datos registrados por la estación meteorológica SANTA ROSA DE SIMITI periodo 2003-2013.

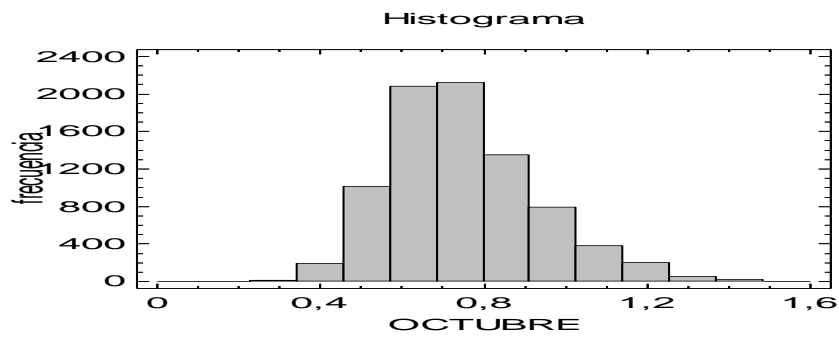
<i>Mes</i>	<i>Recuento</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Rango</i>	<i>Sesgo Estandarizado</i>	<i>Curtosis Estandarizada</i>
<b>Enero</b>	8184	1,14403	0,211102	18,45%	0,305581	1,82218	1,5166	-1,4801	6,5277
<b>Febrero</b>	7464	0,953899	0,210856	22,10%	0,289497	1,64034	1,35085	8,28671	-4,01008
<b>Marzo</b>	8184	0,987021	0,217514	22,04%	0,391358	1,96041	1,56905	18,685	3,42867
<b>Abril</b>	7920	0,782737	0,16707	21,34%	0,171554	1,47882	1,30727	12,7052	13,7648
<b>Mayo</b>	8184	0,87084	0,217634	24,99%	0,379128	1,79567	1,41654	22,067	2,07648
<b>Junio</b>	7920	0,856727	0,200344	23,38%	0,368741	1,63996	1,27122	18,2211	-0,868116
<b>Julio</b>	8184	0,884868	0,190398	21,52%	0,41429	1,96669	1,5524	15,79	3,28561
<b>Agosto</b>	8184	0,770036	0,188761	24,51%	0,235887	3,15845	2,92256	66,4867	295,541
<b>septiembre</b>	7920	0,808387	0,202787	25,09%	0,294858	1,60226	1,3074	24,0176	3,92313
<b>Octubre</b>	8184	0,750712	0,17952	23,91%	0,301874	1,50476	1,20289	24,2754	7,51629
<b>noviembre</b>	7920	0,811661	0,177172	21,83%	0,244096	1,50172	1,25763	5,65892	0,831218
<b>Diciembre</b>	8184	1,0482	0,201016	19,18%	0,545889	1,7348	1,18891	12,0132	-4,26746

**Tabla 13.** Frecuencia estadística de los datos registrados por la estación meteorológica SANTA ROSA DE SIMITI periodo 2003-2013

<i>Mes</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia Relativa</i>
<b>Enero</b>	1	1,14286	1,07143	2138	0,2612
<b>Febrero</b>	0,9	1,02857	0,964286	1683	0,2255
<b>Marzo</b>	0,857143	1,02857	0,942857	2546	0,3111
<b>Abril</b>	0,685714	0,8	0,742857	2294	0,2896
<b>Mayo</b>	0,714286	0,857143	0,785714	2249	0,2748
<b>Junio</b>	0,771429	0,9	0,835714	1962	0,2477
<b>Julio</b>	0,685714	0,857143	0,771429	2651	0,3239
<b>Agosto</b>	0,571429	0,857143	0,714286	4864	0,5943
<b>Septiembre</b>	0,642857	0,771429	0,707143	2148	0,2712
<b>Octubre</b>	0,685714	0,8	0,742857	2123	0,2594
<b>Noviembre</b>	0,685714	0,8	0,742857	1937	0,2446
<b>Diciembre</b>	0,9	1,02857	0,964286	1957	0,2391

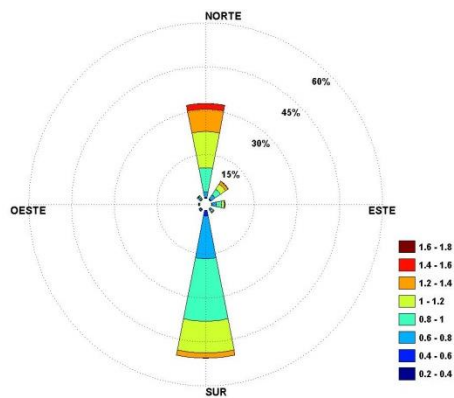


**a) Enero (Pmax)**

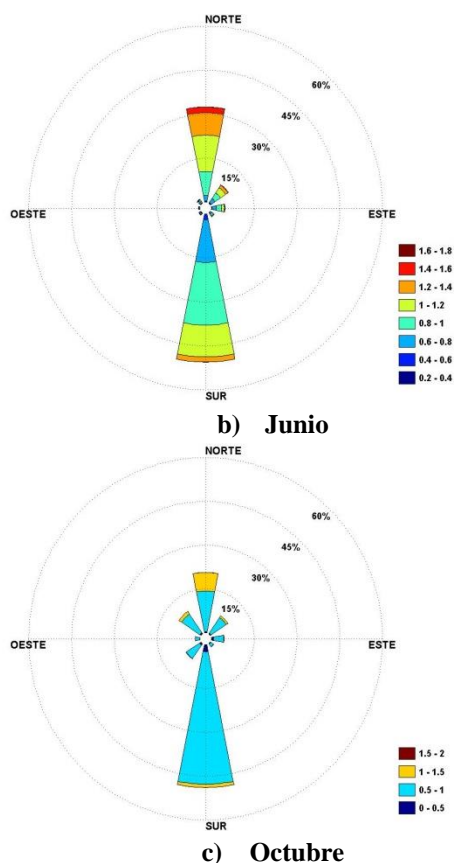


**b) Octubre (Pmin)**

**Figura 11.** Histograma de frecuencia para los datos de la estación Santa Rosa De Simiti en los meses de enero y octubre de 2003-2013.



**a) Febrero**

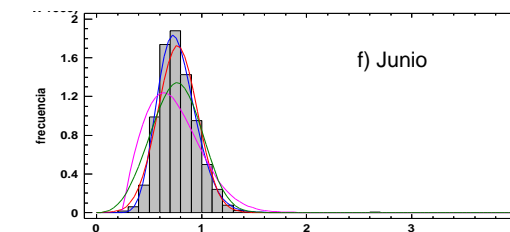
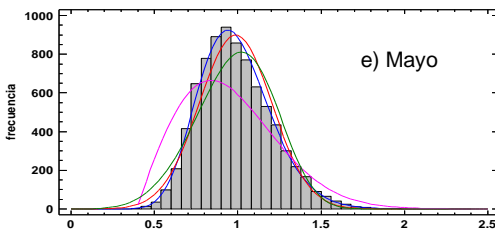
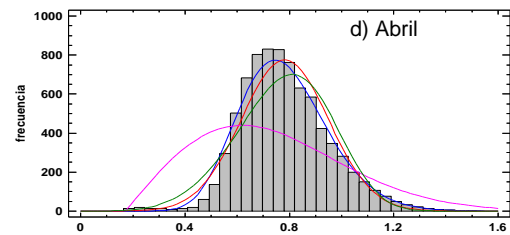
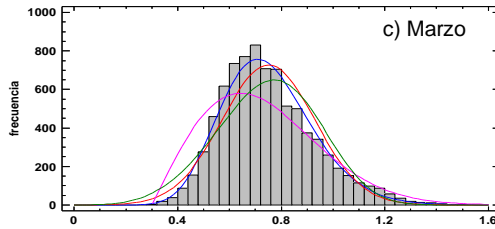
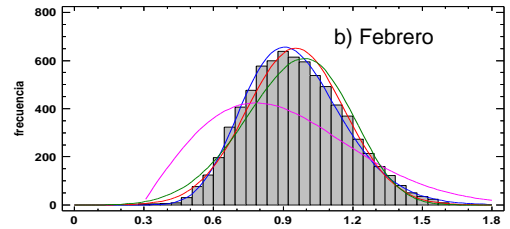
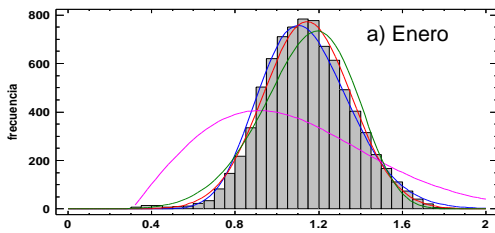


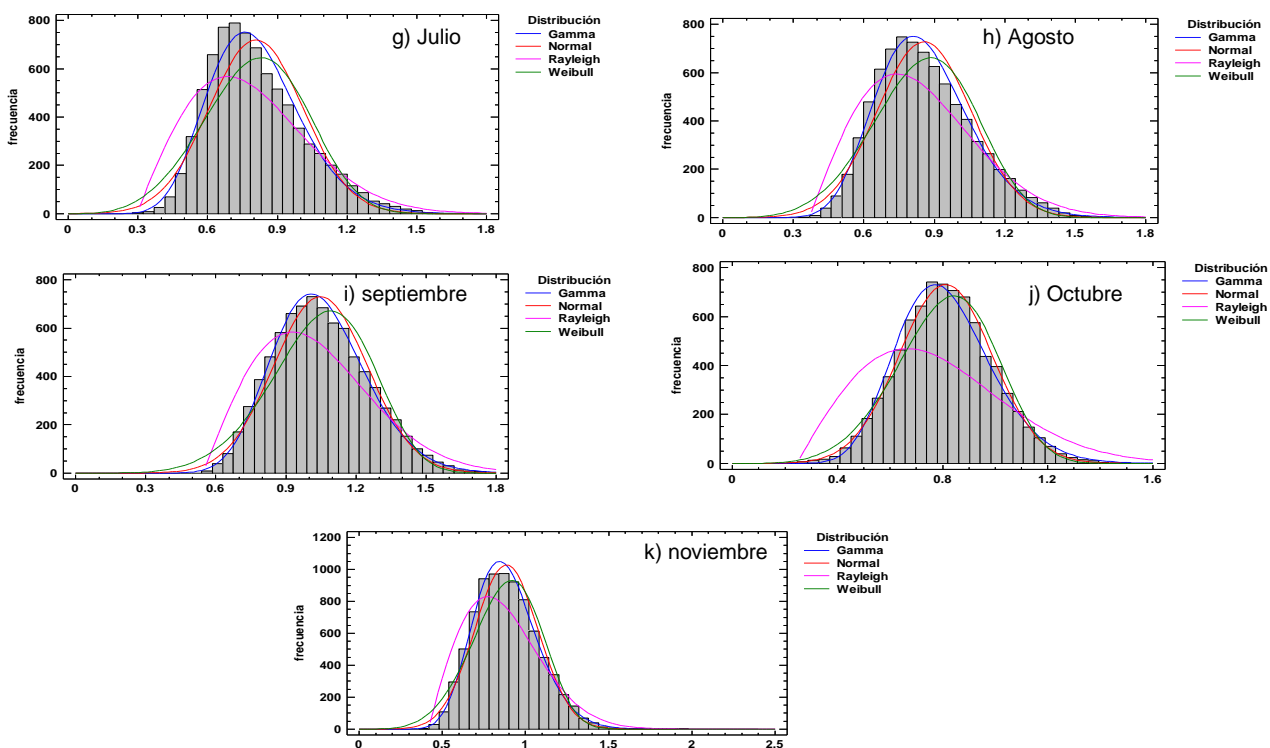
**Figura 12 a-c).** Rosas de viento en la estación de Santa Rosa De Simití para los meses de febrero, Junio y Octubre de 2003-2013.

**Tabla 14.** Distribuciones ajustadas multianuales para la estación meteorológica SANTA ROSA DE SIMITI periodo 2003-2013.

Meses	Gamma		Normal		Rayleigh		Weibull	
	Forma	Escala	Media	Desv. Estándar	Escala	Umbral Inferior	Forma	Escala
Enero	Forma	27.3306	Media	1.14403	Escala	0.864746	Forma	5.91978
	Escala	23.8898	Desv. Estándar	0.211102	Umbral Inferior	0.305445	Escala	1.23106
Febrero	Forma	19.92580	Media	0.953899	Escala	0.69718	Forma	4.87713
	Escala	20.8888	Desv. Estándar	0.210856	Umbral Inferior	0.28936	Escala	1.038530
Marzo	Forma	20.8684	Media	0.987021	Escala	0.634248	Forma	4.71445
	Escala	21.1428	Desv. Estándar	0.217514	Umbral Inferior	0.3912320	Escala	1.07485
Abril	Forma	21.0063	Media	0.782737	Escala	0.633712	Forma	4.87564
	Escala	26.8369	Desv. Estándar	0.16707	Umbral Inferior	0.171442	Escala	0.850025
Mayo	Forma	16.4336	Media	0.87084	Escala	0.537887	Forma	4.17329
	Escala	18.8709	Desv. Estándar	0.217634	Umbral Inferior	0.3789420	Escala	0.955915

<b>Junio</b>	<b>Forma</b>	18.5621	<b>Media</b>	0.856727	<b>Escala</b>	0.527631	<b>Forma</b>	4.48669
	<b>Escala</b>	21.6662	<b>Desv. Estándar</b>	0.200344	<b>Umbral Inferior</b>	0.3686060	<b>Escala</b>	0.936514
<b>Julio</b>	<b>Forma</b>	21.6807	<b>Media</b>	0.884468	<b>Escala</b>	0.50775	<b>Forma</b>	4384928
	<b>Escala</b>	24.5017	<b>Desv. Estándar</b>	0.190398	<b>Umbral Inferior</b>	0.4141630	<b>Escala</b>	0.961942
<b>Agosto</b>	<b>Forma</b>	17.8995	<b>Media</b>	0.770036	<b>Escala</b>	0.566619	<b>Forma</b>	3.59027
	<b>Escala</b>	23.2451	<b>Desv. Estándar</b>	0.188761	<b>Umbral Inferior</b>	0.2357790	<b>Escala</b>	0.839998
<b>Septiembre</b>	<b>Forma</b>	16.4786	<b>Media</b>	0.808387	<b>Escala</b>	0.552228	<b>Forma</b>	4.13123
	<b>Escala</b>	20.3845	<b>Desv. Estándar</b>	0.202787	<b>Umbral Inferior</b>	0.2947360	<b>Escala</b>	0.887634
<b>Octubre</b>	<b>Forma</b>	18.0582	<b>Media</b>	0.750712	<b>Escala</b>	0.483505	<b>Forma</b>	4.30333
	<b>Escala</b>	24.0547	<b>Desv. Estándar</b>	0.17952	<b>Umbral Inferior</b>	0.3017640	<b>Escala</b>	0.821757
<b>Noviembre</b>	<b>Forma</b>	20.0312	<b>Media</b>	0.811661	<b>Escala</b>	0.594676	<b>Forma</b>	4.94444
	<b>Escala</b>	24.6793	<b>Desv. Estándar</b>	0.177172	<b>Umbral Inferior</b>	0.2349880	<b>Escala</b>	0.882548
<b>Diciembre</b>	<b>Forma</b>	27.1751	<b>Media</b>	1.0482	<b>Escala</b>	0.541164	<b>Forma</b>	5.51822
	<b>Escala</b>	29.9254	<b>Desv. Estándar</b>	0.201016	<b>Umbral Inferior</b>	0.5457560	<b>Escala</b>	1.13196





**Figura 13 a-h).** Distribuciones de frecuencias de velocidad del viento ajustadas para la estación Santa Rosa De Simití periodo 2003-2013.

### ESTACIÓN NUEVA FLORIDA

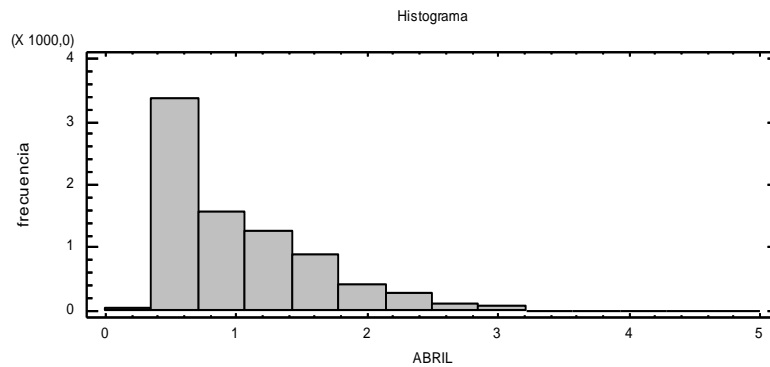
**Tabla 15.** Análisis estadístico de los datos registrados por la estación meteorológica NUEVA FLORIDA periodo 2003-2013.

Mes	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Enero	8184	0,78342	0,598526	0,763991	0,118848	15,8	15,6812	129,201	966,75
Febrero	7464	0,93073	0,632489	0,679562	0,0974832	9,9	9,80252	60,6876	124,022
Marzo	8184	0,922733	0,658957	0,714136	0,14856	22,2	22,0514	200,895	2483,65
Abril	7920	1,02605	0,57363	0,559068	0,3	4,3	4	45,3765	26,8383
Mayo	8184	0,697758	0,358642	0,513992	0,171905	3,5	3,32809	76,3382	128,325
Junio	7920	0,791985	0,398787	0,503528	0,1	3,6	3,5	71,6892	101,959
Julio	8184	0,696292	0,460985	0,662057	0,12479	16,5	16,3752	240,854	3190,73
Agosto	8184	0,701122	0,424371	0,605274	0,118848	3,5	3,38115	61,7811	74,5824
septiembre	7920	0,588476	0,369038	0,627107	0,142618	3,4	3,25738	92,7914	162,209
Octubre	8184	0,691511	0,503737	0,728458	0,118848	22,2	22,0812	437,41	7963,13

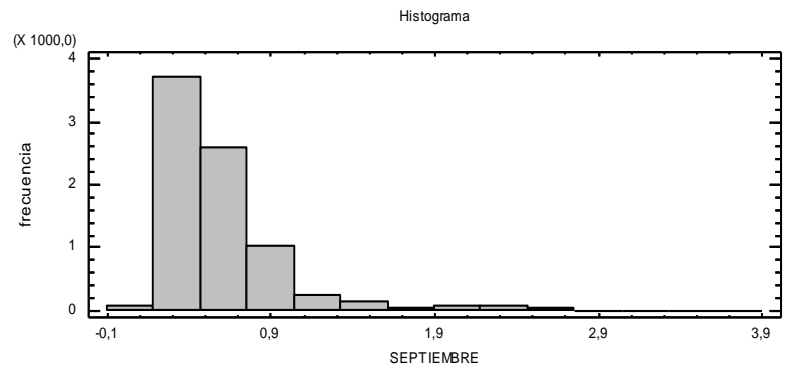
noviembre	7920	0,729371	0,415758	0,570023	0,207799	8,7	8,4922	85,7729	360,173
Diciembre	8184	0,742264	0,490663	0,661035	0,14856	8,2	8,05144	68,6012	160,124

**Tabla 16.** Frecuencia estadística de los datos registrados por la estación meteorológica NUEVA FLORIDA periodo 2003-2013.

<i>Mes</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia Relativa</i>
<b>Enero</b>	0,285714	1,57143	0,928571	6519	0,7966
<b>Febrero</b>	-0,142857	0,714286	0,285714	3847	0,5154
<b>Marzo</b>	-1	0,785714	-0,107143	4484	0,5479
<b>Abril</b>	0,357143	0,714286	0,535714	3364	0,4247
<b>Mayo</b>	0,285714	0,571429	0,428571	3695	0,4515
<b>Junio</b>	0,471429	0,757143	0,614286	3103	0,3918
<b>Julio</b>	0,428571	1,85714	1,14286	5538	0,6767
<b>Agosto</b>	0,185714	0,471429	0,328571	3131	0,3826
<b>Septiembre</b>	0,185714	0,471429	0,328571	3704	0,4677
<b>Octubre</b>	-1	0,785714	-0,107143	5485	0,6702
<b>Noviembre</b>	0,414286	1,12857	0,771429	4870	0,6149
<b>Diciembre</b>	0,414286	1,12857	0,771429	3702	0,4523

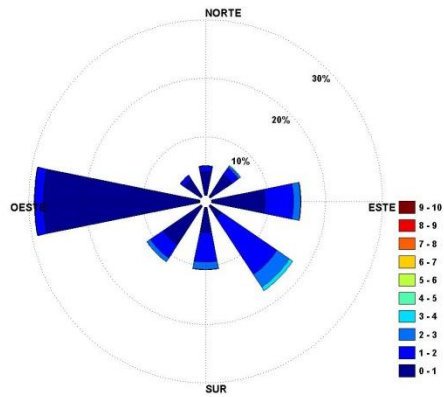


**a) Abril (Pmax)**

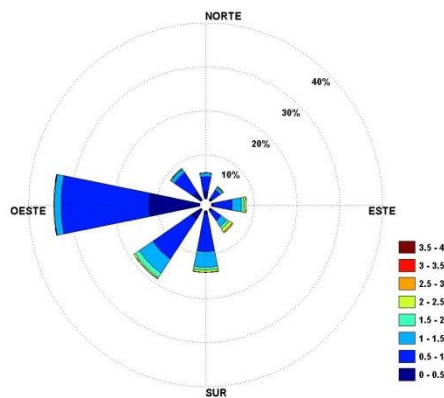


**b) Septiembre (Pmin)**

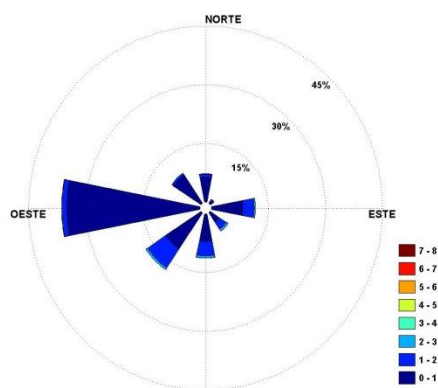
**Figura 14.** Histograma de frecuencia para los datos de la estación Nueva Florida en los meses de abril y septiembre de 2003-2013.



**a) Febrero**



**b) Junio**



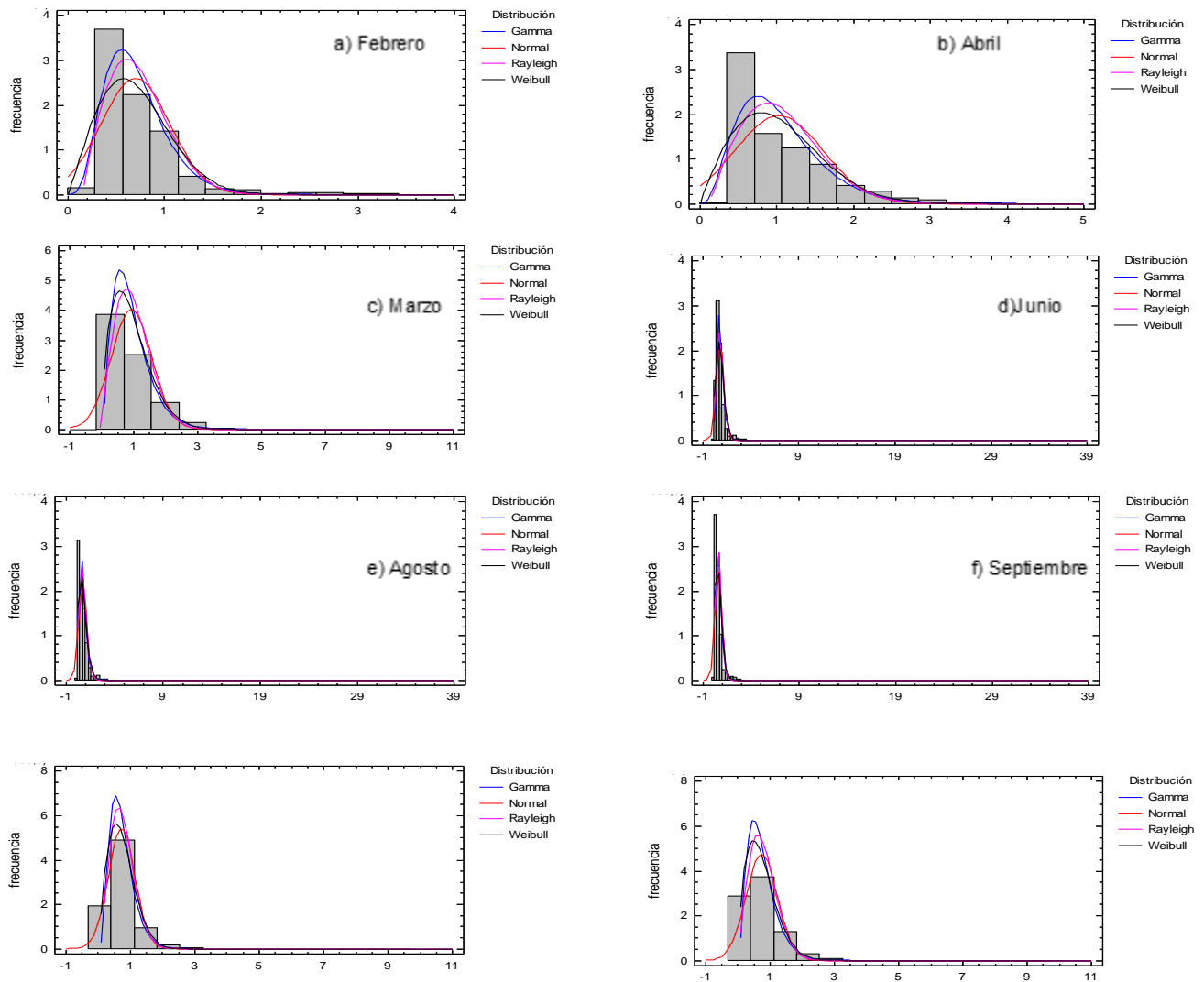
c) Octubre

Figura 15 a-c). Rosas de viento en la estación de Nueva Florida para los meses de febrero, Junio y Octubre de 2003-2013.

Tabla 17. Distribuciones ajustadas multianuales para la estación meteorológica NUEVA FLORIDA periodo 2003-2013.

Meses	Gamma		Normal		Rayleigh		Weibull	
Enero	Forma	2.35643	Media	0.78342	Escala	NA	Forma	1.47877
	Escala	3.00788	Desv. Estándar	0.598526	Umbral Inferior	NA	Escala	0.878473
Febrero	Forma	2.63778	Media	0.93073	Escala	1.16261	Forma	1.60880
	Escala	2.8341	Desv. Estándar	0.632489	Umbral Inferior	-0.00445116	Escala	1.04759
Marzo	Forma	2.7631	Media	0.922733	Escala	NA	Forma	1.5804
	Escala	2.99448	Desv. Estándar	0.658957	Umbral Inferior	NA	Escala	1.03652
Abril	Forma	9.73951	Media	1.02605	Escala	1.0747	Forma	1.92895
	Escala	3.62509	Desv. Estándar	0.57363	Umbral Inferior	0.117215	Escala	1.16471
Mayo	Forma	4.88631	Media	0.697758	Escala	0.661977	Forma	2.06422
	Escala	7.00288	Desv. Estándar	0.358642	Umbral Inferior	0.1413350	Escala	0.79072
Junio	Forma	5.09134	Media	0.791985	Escala	0.799379	Forma	2.10264
	Escala	6.42858	Desv. Estándar	0.398787	Umbral Inferior	0.0991678	Escala	0.897522
Julio	Forma	3.38531	Media	0.696292	Escala	NA	Forma	1.68859
	Escala	4.86191	Desv. Estándar	0.460985	Umbral Inferior	NA	Escala	0.784773
Agosto	Forma	3.34119	Media	0.701122	Escala	0.786258	Forma	1.79342
	Escala	4.76549	Desv. Estándar	0.424371	Umbral Inferior	0.0392056	Escala	0.794061
Septiembre	Forma	3.7308	Media	0.588476	Escala	0.655119	Forma	1.76223
	Escala	6.33976	Desv. Estándar	0.369038	Umbral Inferior	0.0471727	Escala	0.666443

<b>Octubre</b>	<b>Forma</b>	3.15626	<b>Media</b>	0.691511	<b>Escala</b>	NA	<b>Forma</b>	1.59998
	<b>Escala</b>	4.5643	<b>Desv. Estándar</b>	0.503737	<b>Umbral Inferior</b>	NA	<b>Escala</b>	0.775887
<b>Noviembre</b>	<b>Forma</b>	3.93803	<b>Media</b>	0.729371	<b>Escala</b>	0.760819	<b>Forma</b>	1.89256
	<b>Escala</b>	5.39921	<b>Desv. Estándar</b>	0.415758	<b>Umbral Inferior</b>	0.0921790	<b>Escala</b>	0.826685
<b>Diciembre</b>	<b>Forma</b>	2.88927	<b>Media</b>	0.742264	<b>Escala</b>	0.893068	<b>Forma</b>	1.66064
	<b>Escala</b>	3.8925	<b>Desv. Estándar</b>	0.490663	<b>Umbral Inferior</b>	-0.0044850	<b>Escala</b>	0.837984



**Figura 16 a-h).** Distribuciones de frecuencias de velocidad del viento ajustadas para la estación Nueva Florida periodo 2003-2013.

#### 4.1.4. Resultados y discusiones

Se realizó un análisis estadístico y probabilístico de velocidades medias horarias anuales de viento atmosférico mediante registros de 1, 3, 6, 9 y 12 meses de duración. Para demostrar la convergencia de los valores experimentales a la expresión teórica de Rayleigh, se analizaron muestras anuales de viento atmosférico correspondientes a 1998, 1999 y 2000. Además, se determinó la variación de los valores obtenidos al utilizar los registros de distinta duración y

un mismo nivel de probabilidad de excedencia. Se observa que cuando el tiempo de registro de velocidades supera los 6 meses, las constantes determinadas por el método propuesto por Gumbel (Tabla 1), tienden a estabilizarse en torno al valor real dado por la muestra completa (12 meses). A la misma conclusión se arriba al predecir las velocidades con un nivel de probabilidad constante (Tabla 2). En la Figura 4 se observa que, para una velocidad media horaria de viento constante y tiempos de registros cortos, la probabilidad de excedencia es mayor que la obtenida con registros más largos y que las expresiones propuestas por Rayleigh sugieren probabilidades de excedencia mayores que las obtenidas de los registros. La misma Figura, a la derecha, muestra la convergencia de las probabilidades acumuladas de las velocidades de viento atmosférico para registros mayores a 1 año. Esto demuestra que para obtener resultados mediante análisis estadístico y probabilístico es necesario disponer de muestras representativas del proceso aleatorio que se analiza. De esto es posible inferir que cuando se necesita conocer la velocidad media horaria anual del viento atmosférico en un lugar, el nivel de precisión estará asociado al tiempo de duración del registro. Por otro lado, cuando se informa el valor de velocidad media anual correspondiente a un lugar, el mismo debe estar vinculado al nivel de probabilidad de excedencia adoptado en su determinación.

## **CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR**

### **5.1. Disponibilidad de la energía solar en la superficie terrestre**

La energía que emite el Sol y llega a la Tierra presenta dos características importantes, es dispersa e intermitente. Dispersa, porque la radiación al atravesar la atmósfera sufre modificaciones que hacen que se distribuya de forma disgregada; e intermitente porque debido a los fenómenos meteorológicos que tienen lugar en la Tierra varía su disponibilidad. Estas características dificultan su uso como fuente energética y limita su competitividad respecto a otras fuentes.

En el estricto sentido de su aprovechamiento, interesa identificar la disponibilidad de la radiación solar en un entorno dado. Esta tarea supone un proceso complejo ya que se requiere del análisis de diversos factores, los cuales para su estudio se han clasificado en geográficos, astronómicos, geométricos, físicos y meteorológicos[19].

Los factores geográficos se refieren a la latitud, longitud y altitud de lugar. Son de fácil caracterización y su empleo no supone ninguna complejidad en cualquier entorno o zona de la superficie terrestre. Los factores astronómicos guardan relación con la constante solar, la declinación solar, el ángulo horario y las horas de sol. A pesar de que su análisis no requiere de un estudio profundo, deben ser tratados con detalle, pues son la base para estimar la cantidad de energía disponible a lo largo del año. Los factores geométricos son función de la altura solar y el ángulo acimutal. Junto con los astronómicos, permiten construir las tablas de radiación solar teóricas de un lugar determinado.

Los factores físicos hacen referencia al contenido de partículas en la atmósfera como el vapor de agua, las moléculas de aire y los gases miscibles, a la presencia de aerosoles y al efecto del ozono. Su análisis requiere un estudio más exhaustivo pues su presencia atenúa de manera considerable la radiación solar. Los factores meteorológicos son los relativos a la temperatura, precipitaciones, humedad, entre otros. Son los de más difícil predicción ya que varían constantemente y están muy vinculados con los factores físicos. Su estudio e integración en la cuantificación de la radiación solar neta, es de especial importancia. A partir

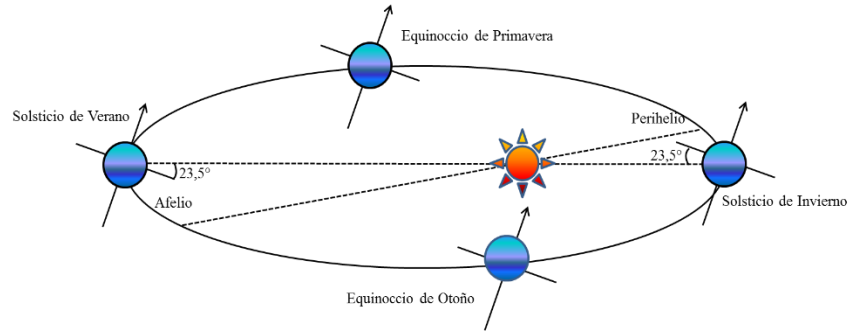
de estos factores se puede calcular la disponibilidad del recurso solar en un lugar determinado. Se debe señalar que los dos últimos son los de mayor impacto en el fenómeno de atenuación de la radiación solar.

### **5.1.1. Factores geográficos**

La posición de cualquier punto en la superficie terrestre viene determinada por la latitud ( $\lambda$ ), la longitud ( $l$ ) y la altitud ( $h$ ). Estos factores geográficos también se designan como coordenadas terrestres. La latitud es una distancia angular medida en grados que indica la posición norte-sur entre un punto terrestre y el paralelo del ecuador. Se cuenta de 0 a  $\pm 90^\circ$ , positivo hacia el norte y negativo hacia el sur. La longitud, es el ángulo en grados que indica la posición este-oeste de un punto en la superficie terrestre a partir del meridiano de Greenwich. Se cuenta de 0 a  $\pm 180^\circ$  (positivo hacia el este y negativo hacia el oeste). La altitud es la altura de un punto de la Tierra con relación al nivel del mar.

### **5.1.2. Información astronómica**

La Constante Solar es la cantidad de energía por unidad de área y tiempo que incide en las capas altas de la atmósfera terrestre. Sin embargo, su valor varía a lo largo del año debido al movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. Este movimiento describe una órbita elíptica, en la que el Sol está en uno de sus focos y, por tanto, la distancia entre ambos oscila entre  $1.47 \times 10^8$  km y  $1.52 \times 10^8$  km. Cuando el Sol está más cerca de la Tierra, la Constante Solar alcanza un valor de  $1,412 \text{ W/m}^2$ ; esto sucede a finales de diciembre y es comúnmente llamado perihelio. Cuando el Sol está más alejado de la Tierra la Constante Solar disminuye hasta  $1,321 \text{ W/m}^2$ , ocurre a principios de julio y es llamado afelio, tal como se ilustra en la Figura 17.



**Figura 17. Movimiento de Traslación.**  
**Fuente:** Valencia, Villicaña y Vanegas, 2016.

El comportamiento mencionado produce una variación en la distancia Tierra-Sol del  $\pm 1.67\%$  respecto a la distancia media, estimada en  $1.495 \times 10^8$  km. Por tanto, para determinar la Constante Solar Diaria ( $C_r$ ), es necesario multiplicar la Constante Solar Normalizada ( $I_{SC}$ ) por la relación que existe entre la distancia media Tierra-Sol y la distancia real en un día dado (día juliano), tal y como se muestra en la ecuación (1) [20].

$$C_r = I_{SC} \cdot \left( 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad (1)$$

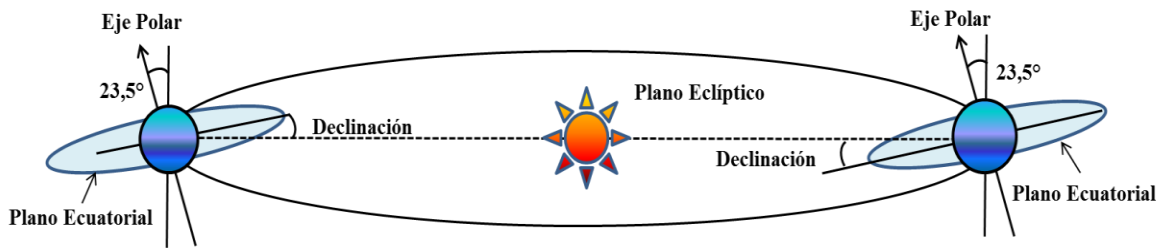
Donde,

$I_{SC}$ : constante solar normalizada

$n$ : día juliano

La Tierra presenta un movimiento de rotación sobre su propio eje, el cual forma un ángulo de  $23.5^\circ$  con respecto a la normal al plano de la eclíptica. Este movimiento junto con el de traslación, da lugar a las estaciones y favorece la presencia de zonas climáticas delimitadas por intervalos de latitudes.

Otros parámetros que permiten determinar la posición del Sol a partir de un sistema de referencia ecuatorial, son la declinación solar ( $\delta$ ) y el ángulo horario ( $\omega$ ). La declinación es el ángulo formado entre la recta que une los centros de la Tierra y el Sol con respecto al plano ecuatorial [20] (ver Figura 18).



**Figura 18.** Declinación solar

Fuente: Noyon, 2008.

Este ángulo varía entre  $+23.5^\circ$  y  $-23.5^\circ$  a lo largo del año y su valor diario puede calcularse a partir de la ecuación (2)[21].

$$\delta = 23,5^\circ \cdot \text{sen} \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2)$$

Donde,

$n$ : día juliano

El movimiento diurno del Sol traza una trayectoria semieclíptica sobre un plano, el cual forma un ángulo con el meridiano del lugar que oscila entre  $+180^\circ$  a  $-180^\circ$ , siendo el mediodía local el punto de origen. A este desplazamiento se le conoce como ángulo horario ( $\omega$ ); para determinarlo es necesario conocer la latitud y declinación correspondiente al lugar dado y aplicar la ecuación (3) [21].

$$\cos \omega = -\tan \lambda \cdot \tan \delta \quad (3)$$

Donde,

$\lambda$ : latitud

$\delta$ : declinación solar

El desplazamiento anterior indica que el trayecto que realiza el Sol desde su salida hasta su puesta sobre el horizonte está representado por horas solares que equivalen a las horas locales. Cada hora local equivale a  $15^\circ$  [21]. La hora solar ( $H_s$ ) se determina con la ecuación (4).

$$H_s = 180 - 15.t \quad (4)$$

Donde,

$t$ : hora civil (toma los valores comprendidos entre 0 y 24 horas)

A partir de las ecuaciones (3) y (4), se puede calcular la salida (*orto*) y puesta (*ocaso*) del Sol diariamente, y así determinar las horas teóricas de Sol. Los factores astronómicos definen la posición del Sol en la bóveda celeste, pero por sí solos, no permiten ubicar su posición sobre un punto de la superficie terrestre. Para ello, es necesario determinar los factores geométricos que hacen referencia al plano horizontal.

### 5.1.3. Información geométrica

La posición del Sol sobre un punto en la superficie terrestre, presenta un ángulo de incidencia respecto al plano horizontal del lugar llamado ángulo de altitud solar ( $A$ ) tal como se muestra en la Figura 19. Su valor puede estimarse mediante una función trigonométrica que requiere de la declinación solar, de la altitud y de la hora solar. La expresión que permite hallar el valor del ángulo de altitud solar ( $A$ ) se presenta como la ecuación (5) [21].

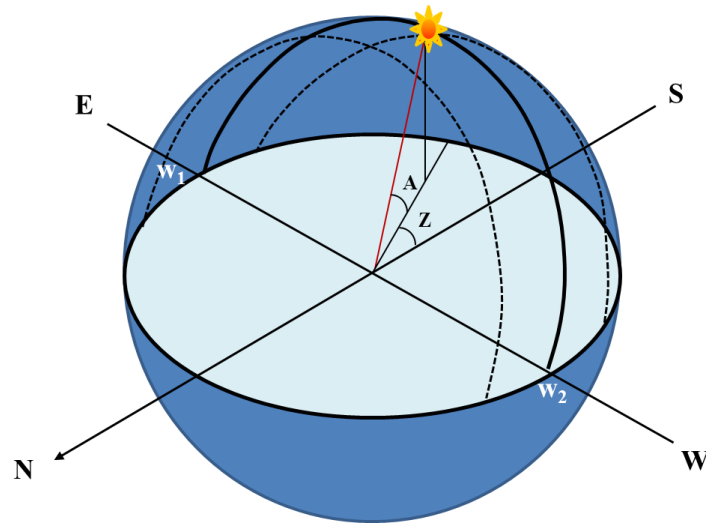
$$\text{sen } A = \cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \cos H_s + \text{sen } \lambda \cdot \text{sen } \delta \quad (5)$$

Donde,

$\lambda$ : latitud

$\delta$ : declinación solar

$H_s$ : hora solar



**Figura 19. Componentes geométricas solares**

**Fuente:** Valencia, Villicaña y Vanegas, 2016.

La misma posición presenta el ángulo acimutal ( $Z$ ), el cual está formado por la proyección del Sol en el plano horizontal y su orientación hacia el sur. Para determinar este ángulo se emplea la ecuación (6) [21].

$$\text{sen } Z = \frac{\text{cos} \delta \cdot \text{sen } H_s}{\text{cos} \cos A} \quad (6)$$

#### 5.1.4. Información física

Cuando un rayo solar atraviesa la masa de aire (atmósfera) ocurren tres fenómenos: 1) absorción, 2) dispersión y 3) reflexión de fotones, debido a que la atmósfera contiene una serie de partículas que interactúan con la radiación solar [22]. Otros elementos contenidos en la atmósfera cuya interacción con la radiación solar es importante, son los aerosoles [23]. Para determinar la magnitud de la atenuación de la radiación, es necesario calcular la densidad de cada componente por sección recta vertical. Para ello se emplea el concepto de masa de aire relativa ( $m_{rel}$ ) que también se conoce como “camino o profundidad óptica”.

La masa de aire relativa es la variación que experimenta un rayo del sol al recorrer la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre. Como cabe esperar, esta variación dependerá

del ángulo de incidencia, de tal manera que, si un rayo solar realiza un recorrido vertical a través de la atmósfera hasta el nivel de mar, se dice que la masa de aire relativa es igual a 1 ( $m_{rel}=1$ ), mientras que, si realiza un recorrido con otro ángulo de incidencia, la masa de aire varía haciendo que  $m_{rel}$  sea diferente a 1 [21], [24].

La masa de aire relativa ( $m_{rel}$ ) es una relación puramente geométrica que considera la forma esférica de la Tierra, y está representada por un valor adimensional, el cual puede obtenerse a partir de la ecuación (7) [22].

$$m_{rel} = \frac{1}{\cos U + 0.15[93.885 - U]^{-1.253}} \quad (7)$$

Donde,

$U$ : ángulo cenital

La ecuación (7) indica que la longitud recorrida por la radiación solar decrece exponencialmente a medida que disminuye su ángulo cenital ( $U$ ). Esto significa que la longitud recorrida por la radiación en la atmósfera, es menor cuando el Sol incide en forma vertical ( $U=0^\circ$ ). De la masa de aire relativa, se deriva la masa óptica del aire ( $m_a$ ), la cual considera los efectos de la presión atmosférica que a su vez está relacionada con la altitud.

### 5.1.5. Información meteorológica

Los factores meteorológicos guardan relación con la temperatura, precipitaciones, y humedad, entre otros. Estos factores tienen una estrecha relación con los factores físicos, ya que su presencia modifica las características atmosféricas y climáticas de un entorno dado, por lo que tienen una clara influencia en los procesos de absorción, dispersión y reflexión de la radiación solar [25].

Su análisis requiere de sendos estudios para predecir su comportamiento, así como de registros climáticos de varios años para poder establecer una climatología particular que permitirá definir la interacción con la radiación solar. Estos factores, al igual que los físicos, son objeto de un estudio detallado.

## **5.2. Radiación solar y atmósfera**

La atmósfera está compuesta por diferentes moléculas (H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, entre otras) y partículas sólidas de diferentes tamaños (polvo, hollín, polen, etc.). En ella, se producen fenómenos de dispersión y reflexión de la radiación solar, que afectan hasta un 30% de la radiación incidente y que son causados, principalmente, por la formación de nubes [26]. La presencia de aerosoles en la atmósfera cobra importancia en el proceso de la formación de nubes, lo cual da lugar a una variación local y estacional de la radiación solar. Así mismo, los gases que la constituyen absorben hasta un 20% de la radiación solar incidente, siendo en la estratósfera donde las radiaciones de longitud de onda corta son absorbidas, es decir, las que transportan más energía.

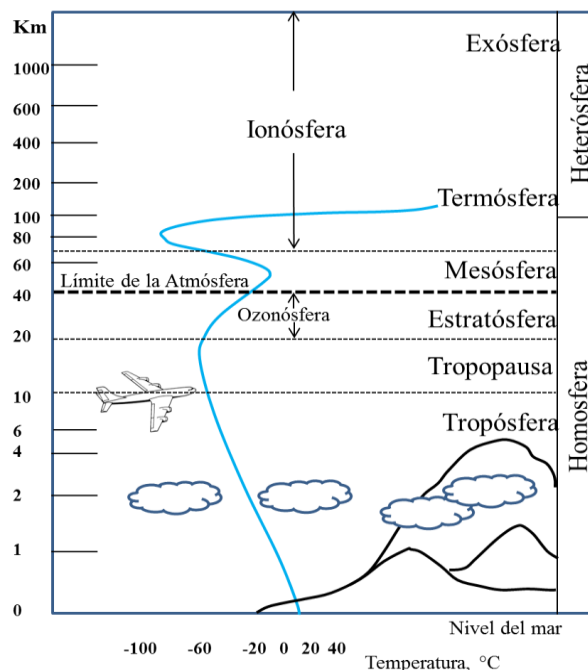
### **5.2.1. Características de la atmósfera terrestre**

La atmósfera es una capa gaseosa compuesta por distintos elementos que se mantiene unida a la Tierra por la fuerza gravitacional. Se estima que posee una masa de  $5.1 \times 10^{18}$  kg y su altura alcanza los 100 km desde la superficie terrestre hacia el espacio exterior.

Se considera que más del 50% de su masa se concentra en los primeros 6 km y el 75% en los primeros 12 km. Su composición química es variable y depende de la ubicación geográfica, altura y clima, aunque se estima que está constituida principalmente en un 78% por moléculas de N<sub>2</sub>, un 21% por moléculas de O<sub>2</sub>, un 1% por moléculas de Ar y un 0.33% por moléculas de CO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> [27]. Además, contiene vapor de agua y partículas llamadas aerosoles, tanto de origen natural como antropogénico.

La atmósfera juega un papel importante para la vida en la Tierra, pues mantiene una temperatura que la hace posible y reduce el impacto de los rayos UV gracias a la absorción que tiene lugar en la capa de ozono. En ella se distinguen dos zonas, la homósfera y la heterósfera. La homósfera es la zona inferior que se extiende desde la superficie terrestre hasta los 100 km de altura, se caracteriza por una concentración de gases, que a excepción

del vapor de agua y del ozono es homogénea. En la homósfera se distinguen varias capas: la tropósfera, la estratósfera, la mesósfera o ionósfera y la termósfera (ver Figura 20).



**Figura 20.** Característica de la atmósfera terrestre.

**Fuente:** Valencia, Villicaña y Vanegas, 2016.

La heterósfera es la zona que está por encima de la homósfera, y en la que los fenómenos de difusión molecular hacen que la composición de la atmósfera ya no sea constante, siendo los componentes más ligeros, junto con el nitrógeno, el oxígeno, el helio y el hidrógeno los que tienen una concentración mayor. En esta capa que alcanza los 12 km de altura, se concentra la mayor cantidad de masa atmosférica, así como el vapor de agua y el oxígeno, lo que determina que sea en ella donde ocurren los fenómenos meteorológicos más notables que influyen en la Tierra. El vapor de agua actúa como regulador térmico lo que permite una temperatura que hace habitable el planeta. La temperatura disminuye con la altitud, en tono a los 6.5°C por km.

### **5.2.2 Constituyentes atmosféricos responsables de la atenuación de la radiación**

La presencia de gases, partículas y moléculas en la atmósfera provoca que la radiación solar extraterrestre sufra una serie de modificaciones al atravesarla, lo que induce a una disminución en su intensidad.

La evolución temporal y espacial de la concentración de los elementos atmosféricos está determinada por distintos factores como son las reacciones químicas, fotoquímicas y los procesos dinámicos y de transporte [28]. Estos factores determinan la cantidad de radiación dispersada y absorbida.

La energía del Sol es absorbida en la superficie de la Tierra, por los continentes y, en mayor grado, por los océanos. Esta energía es transformada en calor y, por ello, cuanto más lejos nos encontramos del nivel del mar, más baja será la temperatura. Este proceso es el que controla la temperatura en la troposfera, la capa más baja de nuestra atmósfera [28].

### **5.2.3. Constituyentes atmosféricos que dispersan la radiación solar**

El aire es una mezcla de los gases que forman la atmósfera terrestre, los cuales se clasifican en gases constantes y accidentales. Los constantes son el nitrógeno (78,1%), el oxígeno (20,9%) y los inertes o nobles. En este último la concentración de argón es de 0.934%. Esta mezcla de gases mantiene la proporción de sus distintos componentes casi invariable hasta los 80 km [28].

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera se encuentra con moléculas de aire e interacciona con ellas. Si la intensidad de la radiación es alta y el tamaño de la molécula también, la radiación que incide sobre ellas las hace vibrar lo que da lugar a la absorción de fotones. Sin embargo, si las moléculas del aire son muy pequeñas, sólo se produce en ellas una rotación lo que da lugar al fenómeno de dispersión, así, cuando una onda electromagnética (*fotones*) colisiona con una partícula (*aire*) parte de la energía incidente se distribuye en el espacio en forma de fotones que continúan su recorrido en todas direcciones [22]. En este proceso, estudiado por Lord John Rayleigh hacia 1870, y que actualmente se

conoce como "*dispersión Rayleigh*", la magnitud de la dispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda incidente [22].

#### **5.2.4. Constituyentes atmosféricos que absorben la radiación solar**

El ozono es una sustancia constituida por tres moléculas de oxígeno ( $O_3$ ). Se encuentra en estado puro a diferentes concentraciones entre los 10 y 40 km de altura. La mayor concentración la tiene en la estratósfera (a 25 km), región que también se conoce como ozonósfera o "capa de ozono". En la estratósfera, el ozono se forma a partir de la disociación de una molécula de oxígeno ( $O_2$ ) en dos átomos de oxígeno en estado atómico (O) debido al flujo energético de la radiación de onda corta (ultravioleta), estos átomos son altamente reactivos, por lo que reaccionan con otras moléculas de  $O_2$  para formar  $O_3$ . En este estado el ozono se disocia nuevamente por la acción de la radiación ultravioleta manteniendo así un equilibrio dinámico. Como resultado de estos procesos, se absorbe la mayor parte de la radiación de onda menor a  $0.29 \mu m$  [28].

Del mismo modo, en la tropósfera tiene lugar la formación de ozono a partir de la disociación de moléculas de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) e hidrocarburos. En este caso, la radiación solar en el rango de longitudes comprendidas entre los  $0.28 \mu m$  y  $0.43 \mu m$  disocia el  $NO_2$  contenido en la atmósfera en un átomo de oxígeno y en una molécula de NO. El átomo libre de oxígeno da origen al ozono ( $O_3$ ) a través de una reacción de choque con una molécula de oxígeno ( $O_2$ ) [29]. En este proceso la absorción de la radiación ocurre en la banda de los  $0.5 \mu m$  y  $0.6 \mu m$ , que incluye el espectro visible.

Para determinar la concentración del ozono en la atmósfera se emplean radiómetros, aunque también existen técnicas matemáticas que permiten estimarla con bastante fiabilidad; para ello es necesario conocer el espesor del ozono (*en columna vertical*) en condiciones normales de presión y temperatura, la cual presenta una pronunciada variación estacional y latitudinal que varía entre 0.2 y 0.5 cm [30]. Hay que señalar finalmente que en la actualidad se dispone de valores tabulados de su concentración para cada mes del año y latitud [22].

El ozono, absorbe, principalmente la radiación solar correspondiente a la región del espectro solar ultravioleta, mientras que las bandas de absorción del vapor de agua y del dióxido de carbono varían desde el infrarrojo cercano a la zona del rojo del espectro visible. Por su parte, el oxígeno absorbe una pequeña banda de la zona del espectro visible [23].

El CO, el N<sub>2</sub>O y el CH<sub>4</sub> son gases miscibles que absorben radiación de onda larga (infrarrojo) [50]; sin embargo, su concentración en la atmósfera es tan pequeña, que su efecto absorbedor se considera despreciable. Para el N<sub>2</sub>, aunque no absorbe radiación infrarroja, ya que es una molécula diatómica apolar, sí lo hace en longitudes de onda más cortas, del orden de 0.100 μm y 0.190 μm, que pertenecen al rango de los rayos X y del Ultravioleta. A pesar de ser el gas más abundante en la atmósfera, su absorción de la radiación solar se limita a esta pequeña franja del espectro electromagnético, por lo que su efecto no es relevante en el intervalo de longitudes de onda de 0.3 a 3 μm, región en el que se concentra el 96% de la energía de la radiación solar [23].

Finalmente, los únicos gases miscibles en los que la absorción de la radiación solar tiene cierta importancia son el CO<sub>2</sub>, que absorbe radiación de onda larga (infrarrojo) y el O<sub>2</sub> que absorbe radiación de onda corta (ultravioleta).

El agua está presente en la atmósfera en forma de vapor, líquido y hielo. La cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera varía considerablemente de una región a otra, pues depende de las zonas con mayor o menor grado de evaporación. Se observa, asimismo, que su concentración disminuye con la altitud, así, cerca de la superficie de la tierra el vapor de agua tiene una concentración máxima del orden de 4% del volumen total del aire, mientras que por encima de los 15 km es prácticamente nula [31].

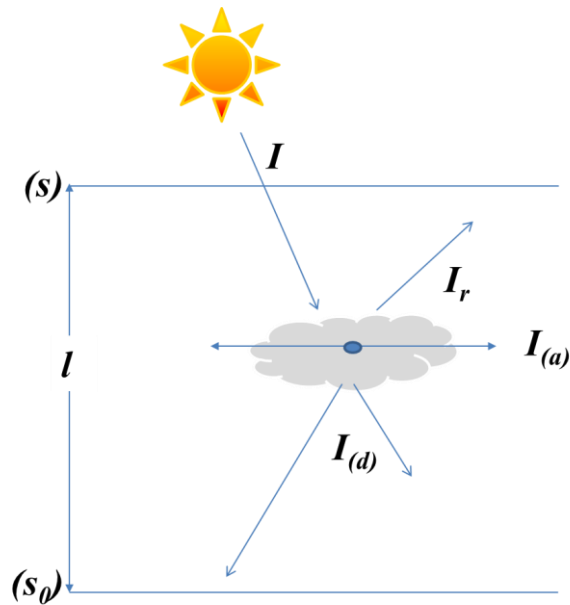
El vapor de agua absorbe la radiación en intervalos de la zona del infrarrojo correspondiente a la longitud de onda comprendida entre 1 μm y 1.8 μm, así como superiores a las 2.5 μm, aunque con menor intensidad [23]. Para determinar la magnitud de absorción es necesario establecer la cantidad total de vapor de agua en columna vertical entre la superficie de la

tierra y el final de la atmósfera [32]. Esta magnitud se denomina como *agua precipitable* (*WW*).

Los aerosoles son una mezcla heterogénea de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un medio gaseoso, cuyo tamaño puede variar desde los 0.005  $\mu\text{m}$  hasta los 20  $\mu\text{m}$  de radio efectivo. Tienen un origen natural (marino, mineral, volcánico, biogénico y cósmico) o derivados de la actividad humana (polvo, hollín, compuestos orgánicos volátiles, humos de combustión, entre otros). Estos elementos afectan de manera significativa la radiación solar. El efecto neto de los aerosoles puede contribuir de manera significativa a un forzamiento radiactivo de la atmósfera a escala local y por tanto a un cambio del clima. La presencia de aerosoles en la atmósfera es variable y su densidad define el grado de turbidez [33]. Este parámetro no es igual en todos los puntos de la Tierra, por lo que debe ser definido para cada región que sea objeto de estudio; para ello existen varios métodos. Algunos de los más conocidos son el Coeficiente de Turbiedad de Angström y el Factor de Linke [23], [34]. El análisis de la turbidez atmosférica resulta interesante para el desarrollo de métodos que cuantifican la radiación solar, ya que permite disponer de información relativa al máximo aprovechamiento de esta energía.

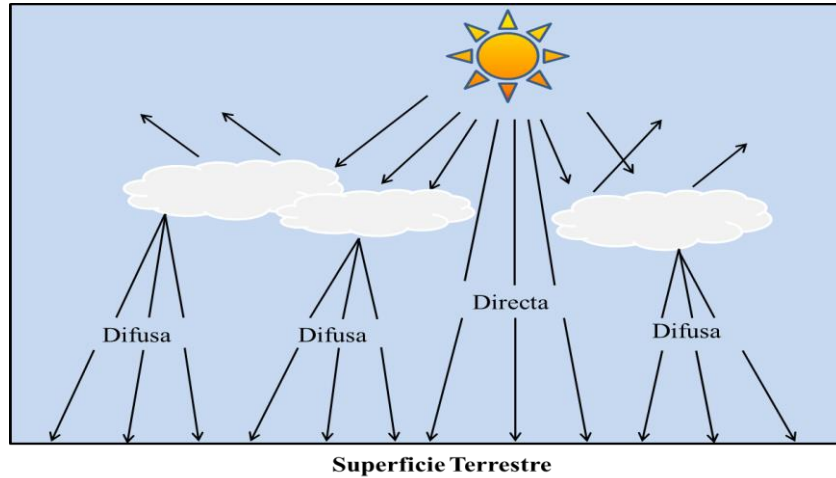
### **5.2.5. Características de la radiación solar**

Cuando una onda electromagnética incide en la superficie terrestre ( $I$ ), una fracción de su intensidad se refleja y lo hace de dos maneras: con reflexión especular ( $I_r$ ) y con reflexión en todas las direcciones ( $I_d$ ) debido al fenómeno de dispersión, tal y como se presenta en la Figura 21.



**Figura 21.** Fenómenos que afectan a un haz de luz al pasar de un medio a otro.  
**Fuente:** Valencia, Villicaña y Vanegas, 2016.

A medida que la radiación atraviesa la atmósfera (profundidad óptica), esta es dispersada por las moléculas de aire y una fracción de su intensidad es absorbida por el medio ( $I_a$ ), con lo que se eleva la energía de este y disminuye la de la onda. Esta disminución aumenta al hacerlo la profundidad óptica (longitud del recorrido). Así, la radiación que logra atravesar la atmósfera sin perturbaciones y sigue la dirección de los rayos solares es conocida como radiación solar directa ( $GD$ ). La radiación que se ve expuesta a fenómenos de dispersión o reflexión por la presencia de partículas y nubes es conocida como radiación solar difusa ( $Gd$ ) e incide en la superficie terrestre desde todas direcciones (ver Figura 22).



**Figura 22.** Componentes de la radiación solar

**Fuente:** Valencia, Villicaña y Vanegas, 2016.

A la suma de la radiación solar difusa y la radiación solar directa se le denomina radiación global ( $G_g$ ), tal como lo representa la ecuación (8).

$$G_g = G_D + G_d \quad (8)$$

Los procesos que intervienen en la atenuación de la radiación son variados y dependen de la concentración de las moléculas y partículas suspendidas en la atmósfera. Por tanto, para determinar los coeficientes de extinción solar será necesario analizar las características de la atmósfera.

### 5.2.5.1. Radiación Directa

La radiación directa es aquella que incide en la superficie terrestre sin que haya sufrido cambios, esto es, que a su paso por la atmósfera no se encontró con ningún elemento que atenuara su potencia energética. Para el desarrollo de sistemas solares térmicos o fotovoltaicos se valora que en la zona que sea objeto de estudio exista mayor proporción de este tipo de radiación.

### **5.2.5.2. Radiación Difusa**

La radiación difusa es la que incide en la superficie terrestre como consecuencia de su dispersión en la bóveda celeste debido a la presencia de partículas o moléculas que han modificado la trayectoria de la radiación solar. En zonas donde predomina el clima cálido húmedo es común encontrar mayor proporción de energía solar difusa, con lo cual la potencia energética es menor.

### **5.2.5.3. Albedo**

Este tipo de radiación surge como consecuencia de que la radiación solar incidente se refleja en la superficie terrestre, así, de acuerdo al tipo de superficie la reflexión puede ser mayor o menor.

## **5.3. Evaluación de la radiación solar del norte y centro del departamento de Bolívar a través del modelo de Bird y Hulstrom**

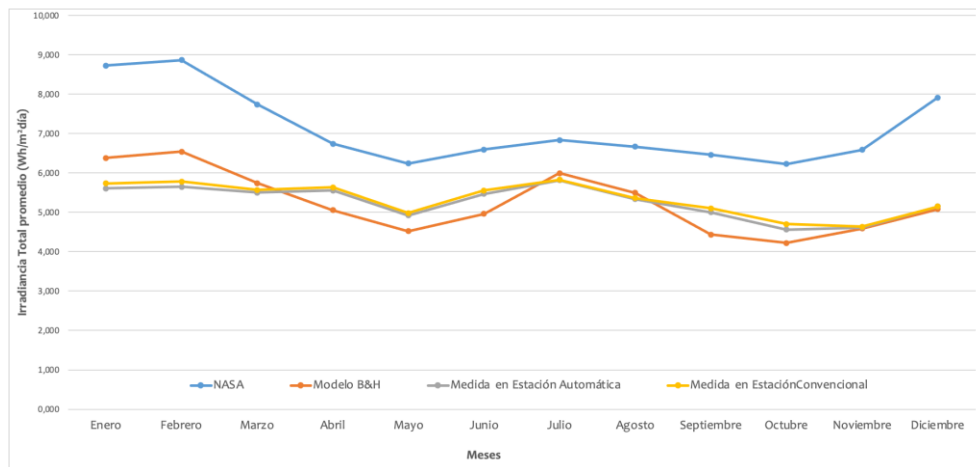
### **5.3.1. Metodología empleada para realizar la cuantificación y caracterización de la radiación solar en la zona centro y norte del departamento de Bolívar**

Para la cuantificación y caracterización de la radiación solar en el departamento de Bolívar se empleó el modelo de Bird y Hulstrom para las zonas donde se encontraban instaladas estaciones meteorológicas con datos históricos suficientes para analizar. Estas estaciones se encuentran distribuidas entre el Centro y Norte del departamento, siendo la estación Apto. Baracoa la que se encuentra en el Centro y la estación Apto. Rafael Núñez la que se encuentra más al Norte. Más adelante se profundiza un poco más acerca de la ubicación de las estaciones meteorológicas.

Luego de evaluado el potencial en esta zona a través del modelo de Bird y Hulstrom (B&H), se procedió a realizar una validación de los datos obtenidos para el Carmen de Bolívar comparándolos con medidas in situ de la radiación total tomada en la estación del Carmen de

Bolívar cuyos valores fueron suministrados por el IDEAM y con datos reportados por la NASA a través de la herramienta POWER Data Access Viewer (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) de libre acceso. Cabe destacar que esta es la única estación del departamento de Bolívar que posee instrumentación para medir esta variable.

Al comparar los datos tal como se observa en la Figura 23, se observa que los valores de la irradiancia reportados por la NASA son mucho más elevados que los medidos en el sitio y los calculados a través del modelo de B&H, lo cual podría atribuirse a una diferencia notable en el número de horas de brillo solar empleadas por la NASA y los que reporta el IDEAM.



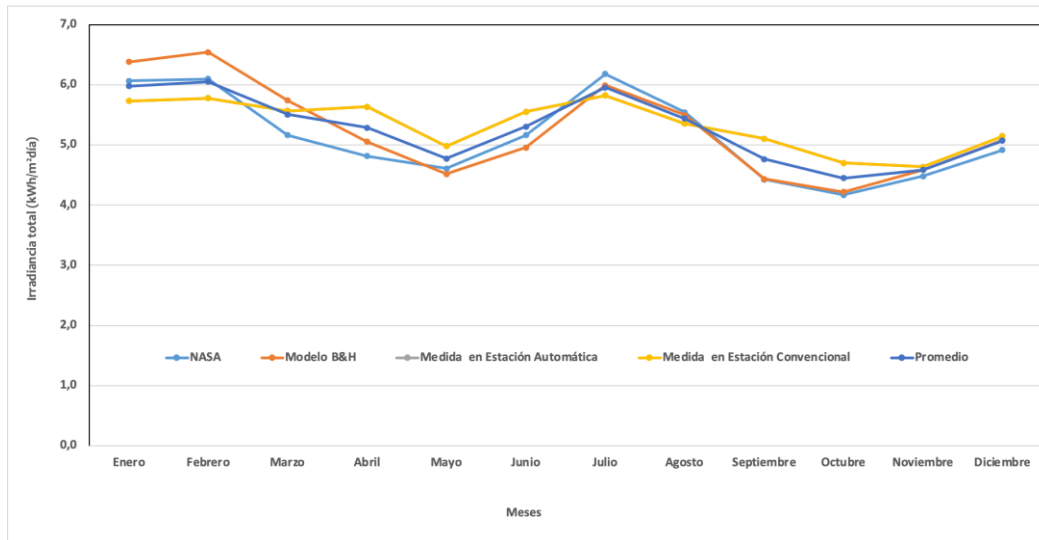
**Figura 23.** Comparación de los valores de irradiancia calculados con el modelo de B&H, los medidos en la estación Carmen de Bolívar y los reportados por la NASA.

**Fuente:** autores.

Por esta razón se procedió a calcular las horas de brillo solar que utiliza la NASA para reportar los valores de Irradiancia empleando la ecuación 9.

$$\text{Horas de Brillo Solar (h/día)} = \text{Irradiancia (Wh/m}^2\text{día)} / \text{Radiación (W/m}^2\text{)} \quad (9)$$

Y por último se procedió a multiplicar la radiación ( $\text{W/m}^2$ ) reportada por la NASA por las horas de brillo solar reportadas por el IDEAM ( $\text{h/día}$ ) con lo cual se observó la siguiente tendencia en los datos (ver Figura 24).



**Figura 24.** Comparación de los valores de irradiancia calculados con el modelo de B&H, con los medidos en la estación Carmen de Bolívar y los reportados por la NASA, pero corregidos con el brillo solar suministrado por el IDEAM.

**Fuente:** autores.

La tendencia que siguen los datos es bastante aceptable y facilita la evaluación del potencial solar en el Sur del departamento a través de la herramienta POWER Data Access Viewer, ya que no hay estaciones con datos históricos suficientes para evaluar el potencial a través del modelo de B&H en esta zona del departamento.

### 5.3.2. Modelo de Bird y Hulstrom

El modelo de Bird y Hulstrom es extenso y riguroso [35] y permite definir el porcentaje de atenuación que sufre la radiación a su paso por la atmósfera, a lo cual se le conoce como “transmitancia total atmosférica” y a efectos de este documento, se le ha denominado “Coeficiente de Transmisibilidad Atmosférica” ( $\tau_{CTA}$ ). Determinar su valor permitirá cuantificar el recurso solar de forma más exacta.

En la práctica, este parámetro se evalúa a partir de modelos matemáticos que se aplican a las medidas realizadas en las estaciones meteorológica sin necesidad de utilizar medidores de partículas. Es de señalar, sin embargo, que aún son escasos los modelos que cuantifican la radiación solar considerando los coeficientes de atenuación atmosférica para cada lugar del

planeta. Por este motivo, este apartado tiene como finalidad establecer el coeficiente de transmisibilidad representativo de la atmósfera del departamento de Bolívar ubicada en la costa Caribe colombiana.

La metodología empleada en este análisis, ha permitido establecer cinco estados de la atmósfera que en función a la diferencia en las concentraciones de partículas se han denominado: extremadamente limpia, despejada, media, turbia y muy turbia.

Para su estudio se analizaron los datos aportados por 8 estaciones meteorológicas, las cuales están ubicadas en diferentes lugares del Centro y Norte del departamento de Bolívar. Cada una cuenta con registros meteorológicos mensuales mayor a cinco años. Esta información permitió identificar el grado de turbidez que el cielo puede presentar en las diferentes épocas del año.

### **5.3.3. Cálculo de la Radiación Solar**

La atmósfera está compuesta por diferentes moléculas ( $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ , entre otros) y partículas sólidas de diferentes tamaños conocidos como aerosoles (polvo, hollín, polen, etc.). Cuando la radiación atraviesa la atmósfera la cual, a efectos de análisis será identificada como *masa de aire* ( $m_a$ ), sufre variaciones, dando origen a los fenómenos de dispersión, absorción y reflexión que reducen hasta en un 50% la potencia de la radiación incidente, dando lugar a una variación local y estacional [36].

El análisis de estos fenómenos posibilita la cuantificación y caracterización de este recurso. En la práctica este estudio se realiza mediante diferentes técnicas, tales como el registro de medidas ejecutadas en las zonas que sean objeto de estudio, el tratamiento de imágenes de satélite o el empleo de modelos físicos de irradiación. El primero, conlleva al empleo de instrumentos específicos para su medición, que en muchos casos no son en lo económico asequibles; el segundo, aunque aporta mejores resultados, ya que puede evaluarse la presencia de zonas sombreadas por la orografía del lugar, es de uso limitado debido a su coste y disponibilidad. En estos casos, el empleo de modelos físicos y matemáticos basados en el

empleo de datos meteorológicos representa una herramienta asequible para obtener resultados rigurosos. Por tanto, es esta la técnica que utiliza para el análisis de la radiación presentada en este documento para la zona Norte del departamento de Bolívar que es donde se encuentran estaciones con datos históricos considerables [36].

#### **5.3.4. Modelo físico de Radiación**

A continuación, se detalla el modelo empleado para evaluar el potencial solar de las zonas del departamento que cuentan con datos históricos de más de cinco años, medidos por estaciones meteorológicas instaladas por el IDEAM.

##### **5.3.4.1 Modelo de radiación solar por transmisibilidad atmosférica**

El uso de modelos físicos y empíricos de radiación basados en medidas y datos de algunas regiones, son convenientes para determinar la radiación solar incidente de forma fiable [37]; no obstante, es importante señalar que son escasos los modelos que cuantifican la radiación solar considerando el efecto de la transmisibilidad atmosférica para cada lugar del planeta, por lo que su uso para una determinada región requiere primeramente una caracterización de las condiciones físicas y meteorológicas del lugar que sea objeto de estudio. El tratamiento de todas las variables hace indispensable el uso de herramientas informáticas y métodos estadísticos que minimicen los procesos de cálculo.

Para determinar el coeficiente de transmisibilidad atmosférica, se ha utilizado el modelo no espectral de Bird & Hulstrom, conocido también como modelo “C” de Iqbal [22], [38]. Su uso es debido a que este modelo identifica al conjunto de coeficientes responsables de la atenuación por la presencia de diferentes partículas. A continuación, se explica el modelo.

En 1981, Bird y Hulstrom propusieron un modelo para determinar la radiación directa y difusa a partir de la construcción de una metodología donde se tenían en cuenta consideraciones sobre ciertos elementos que atenúan la radiación solar a su paso por la atmósfera [35]. Para ello, hizo un análisis de los modelos de radiación directa de Atwater y Ball [39], Hoyt [40], Lacis y Hansen [41], ASHRAE [42] y Watt [43] y para la radiación difusa

consideraron, además de los autores citados, el modelo de Davies y Hay [44]. Como resultado de este estudio, dichos autores formularon un modelo donde se tuvo en cuenta el cálculo de parámetros de una forma fácil y práctica sin perder su rigurosidad.

Para la realización del estudio se seleccionó este modelo el cual permite determinar la radiación total ( $ITH$ ), a partir de la suma de la radiación directa ( $IDH$ ) y la radiación difusa ( $IdH$ ) en superficie horizontal para toda la banda [45].

La radiación directa en superficie horizontal se determina a partir de la ecuación (10) considerando diferentes índices de nubosidad.

$$I_{DH} = [0,9662(C_r)(\tau_{prom})]SenA \quad (\text{W/m}^2) \quad (10)$$

Donde,

$\tau_{prom}$ : es la transmitancia promedio calculada a partir de  $\tau_r$ ,  $\tau_o$ ,  $\tau_g$ ,  $\tau_w$  y  $\tau_a$  que son las transmitancias por dispersión debido a moléculas de aire, ozono, gases miscibles, vapor de agua y aerosoles, respectivamente.

$C_r$ : constante solar diaria que es función del día juliano ( $\text{W/m}^2$ ).

$0,9662$ : es el factor de corrección que se ajusta al intervalo de longitud de onda donde se concentra el 96% de la radiación.

$A$ : es el ángulo de altitud solar.

Para el coeficiente de transmisión debido a la dispersión por moléculas de aire y la transmitancia debida a gases miscibles, se debe determinar previamente el valor de la masa atmosférica ( $m_a$ ), la cual es función de la presión del lugar y de la masa relativa del aire ( $m_{rel}$ ), esta última es una relación puramente geométrica que evalúa la intersección de un rayo solar al atravesar la atmósfera considerando la curvatura de la tierra por lo que es función del ángulo de altitud solar  $A$ .

Para el coeficiente de transmisión debido a la dispersión por moléculas de aire y la transmitancia debida a gases miscibles se debe determinar previamente el valor de la masa atmosférica ( $m_a$ ), la cual es función de la presión del lugar y de la masa relativa del aire ( $m_{rel}$ ), esta última es una relación puramente geométrica que evalúa la intersección de un rayo solar

al atravesar la atmósfera considerando la curvatura de la tierra por lo que es función del ángulo de altitud solar  $A$ .

En cuanto al coeficiente de transmisión debido a la absorción del ozono se requiere del espesor de la capa de ozono correspondiente a la atmósfera de la zona donde se encuentre ubicada la estación. Para el caso estudiado, este valor fue tomado de los valores presentados en el Atlas de Radiación Solar de Colombia, donde se presentan mapas de columna total de ozono promedio multianual para cada uno de los meses del año [46].

Por otro lado, para el cálculo de la transmitancia debida al vapor de agua se requiere de información relativa a la cantidad de agua precipitable del lugar, el cual se calcula en función de la humedad relativa y la temperatura de la zona estudiada. Para la transmitancia debida a la presencia de aerosoles se emplea la parametrización realizada por Mächler [47], que se encuentra representada en el Modelo de Iqbal [48]. Esta parametrización es la que mejor se ajusta para evaluar este fenómeno a partir de la introducción del coeficiente de turbiedad de Angström [49], en la cual se consideran parámetros tales como el tamaño medio de la partícula que se establece, según diversos estudios [22],[49],[50], en  $1,3 \mu\text{m} \pm 0.2$  y una cantidad fija de aerosoles, que describe el grado de turbidez que presenta la atmósfera; este valor puede variar desde 0,0 para atmósferas extremadamente limpias, hasta 0,5 como límite máximo para atmósferas con una turbidez muy alta. Para el caso objeto de estudio, este parámetro  $\beta$  toma el valor de 0,0; 0,1; 0,2; 0,3 y 0,4, lo que representa a cinco tipos de atmósferas.

Los valores de  $\beta$  pueden medirse mediante fotometría. Cuando no existen mediciones disponibles, como en este caso puede emplearse la expresión propuesta por el modelo de Mächler tomada de Buckius y King [51], representada por la ecuación (11), donde VIS corresponde al valor de la visibilidad del cielo en km.

$$\beta = 0,55^\alpha \left( \frac{3,912}{VIS} - 0,01162 \right) (0,024722(VIS - 5) + 1,132) \quad (11)$$

En esta expresión  $\alpha$  indica el tamaño de la partícula y Mächler sugiere como valor medio aproximado el de  $1.3\mu\text{m}$ , si se trata de una atmósfera natural. De acuerdo a lo presentado en

la ecuación (10), los valores del parámetro  $\beta$  darían la visibilidad en km tal como se presenta en la Tabla 18 [51].

**Tabla 18.** Visibilidad del cielo atendiendo al parámetro  $\beta$  de Angström.

$B$	Km
0,0	340
0,1	30
0,2	11
0,3	7
0,4	<5

**Fuente:** Buckius, 1979.

El grado de turbidez también puede ser relacionado con el color del cielo. Según Perrin [52], esta relación viene indicada en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Valores típicos del coeficiente de turbidez según Perrin.

$B$	Km
0,02	Azul profundo
0,05	Azul puro
0,10	Azul claro
0,20	Azul lechoso
0,25	Blanco alternado
1,00	Blanco velado

**Fuente:** Perrin, 1963.

Así, con las tablas anteriores se define que para un  $\beta=0,0$  la atmósfera es extremadamente limpia; es decir, apenas existen partículas o moléculas que atenúan la radiación, generalmente el cielo presenta un color azul profundo. Esta condición es inusual en la Tierra. Para una  $\beta=0,1$  la atmósfera es despejada, lo que indica un cielo libre de nubosidad, de color azul que tiene lugar sólo en determinadas ocasiones. Para una  $\beta=0,2$  la atmósfera presenta unas condiciones de cielo despejado con ligera nubosidad, característica que es más común y algunos autores los identifican como un cielo de color azul claro, con algo de calima. Para

una  $\beta=0,3$  la atmósfera presenta un grado de turbidez que indica mayor nubosidad, en estas condiciones tiene un color azul pálido, con más calima. Para una  $\beta=0,4$  la atmósfera presenta un aspecto turbio; en este caso, el cielo presenta un color “lechoso” característico de la extrema calima.

En cuanto a la radiación difusa, el modelo considera el aporte de tres componentes solares: radiación difusa debida a la existencia de moléculas de aire  $I_{dr}$ , radiación difusa debida a la existencia de partículas de polvo  $I_{da}$  y radiación difusa por múltiple reflexión entre el suelo y la atmósfera  $I_{dm}$  [22].

La radiación difusa debida a la dispersión por moléculas de aire, representada por la ecuación (12), considera la cantidad de energía que ante una dispersión por moléculas gaseosas se dirige hacia la superficie terrestre; en este modelo se supone del 50%. Asimismo, se incluye la transmitancia debida exclusivamente a la absorción de los aerosoles la cual requiere del albedo debido a la dispersión de aerosoles, en este caso, Bird y Hulstrom sugieren que tome el valor de 0,9 [35].

$$I_{dr} = [0,79(C_r)(\tau_o\tau_g\tau_w\tau_{aa})(0,5) \left[ \frac{(1-\tau_r)}{(1-m_a + m_a^{1,02})} \right] \text{Sen}A \quad (\text{W/m}^2) \quad (12)$$

Para el cálculo de este parámetro se utiliza la transmitancia debida a la absorción de los aerosoles ( $\tau_{aa}$ ) la cual es función de la masa de aire ( $m_a$ ) y de la transmitancia debida a aerosoles ( $\tau_a$ ) empleada para el cálculo de la radiación directa.

En este modelo, el valor de la transmitancia por scattering ( $\tau_r$ ) evalúa el cambio de dirección que sufre la radiación solar debido a la presencia de moléculas de aire y se determina a partir de la ecuación (13).

$$\tau_r = e^{-0,0903.m_a^{0,84}(1+m_a - m_a^{1,01})} \quad (13)$$

Para su cálculo es necesario determinar la masa óptica del aire ( $m_a$ ) la cual es corregida por la presión, tal y como se sugiere en el Modelo de Atwater y Ball con la ecuación (14) [39].

$$m_a = \frac{P_T.m_{rel}}{101325} \quad (14)$$

donde  $P_T$  es la presión total del aire en Pa y se determina en función de la altitud ( $z$ ) mediante la ecuación (15).

$$P_T = 101325e^{-0.0001184*z} \quad (15)$$

Para calcular el valor de la masa de aire, se requiere evaluar primero la masa de aire relativa ( $m_{rel}$ ). Esta se determina con la ecuación (16).

$$m_{rel} = \frac{1}{\cos U + 0,15 \cdot [93,885 (U)]^{-1,253}} \quad (16)$$

La radiación difusa debida a la presencia de aerosoles, representada por la ecuación (17), se calcula a partir del Modelo C de Iqbal [48], la cual es función del porcentaje de la energía que se acerca a la superficie terrestre debido a la dispersión por aerosoles ( $F_c$ ). En este caso, su valor puede estimarse a partir de la parametrización realizada por Mac, cuyo cálculo es función de la masa atmosférica ( $m_a$ ) [36].

$$I_{da} = [0,79(C_r)(\tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa})(F_c)] \left[ \frac{(1 - \tau_{as})}{(1 - m_a + m_a^{1,02})} \right] SenA \quad (\text{W/m}^2) \quad (17)$$

En esta ecuación se utiliza la transmitancia ( $\tau_{as}$ ) que es debida a la difusión de aerosoles la cual es función de ( $\tau_a$ ) y de ( $\tau_{aa}$ ).

El cálculo de la radiación difusa por múltiple reflexión, representada por la ecuación (18), requiere disponer de los coeficientes de reflexión de la superficie ( $\rho_g$ ), estos valores generalmente se encuentran tabulados y para este trabajo se empleó el valor de 0,15. Del mismo modo, se requiere evaluar el albedo atmosférico; es decir, la múltiple reflexión entre el suelo y el cielo ( $\rho'_a$ ) el cual es función de  $F_c$  y la transmitancia debida en exclusiva a la difusión por aerosoles [50].

$$I_{dm} = [I_{DH} SenA + I_{dr} + I_{da}] \left[ \frac{(\rho_g \cdot \rho'_a)}{(1 - \rho_g \cdot \rho'_a)} \right] \quad (\text{W/m}^2) \quad (18)$$

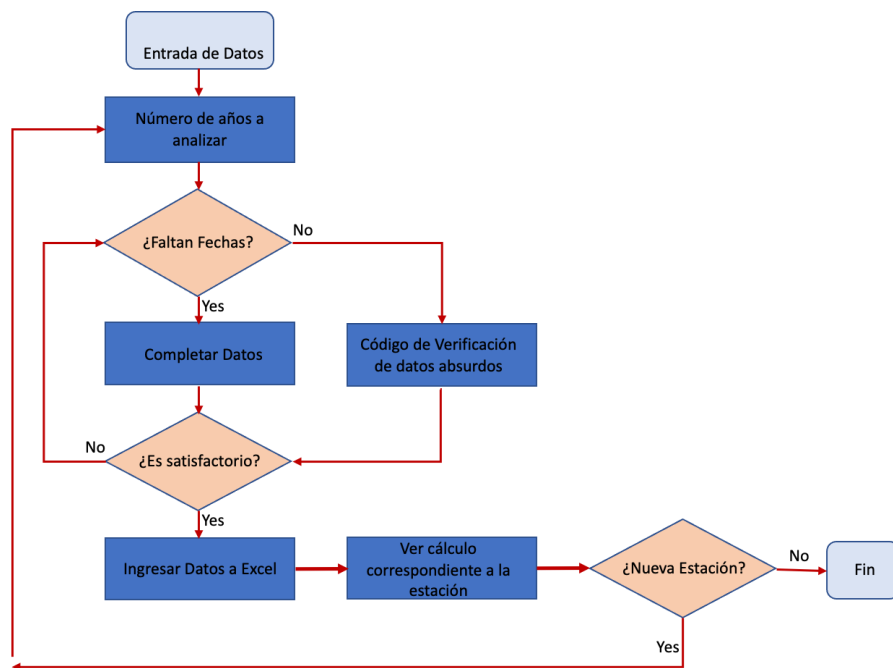
En principio, este modelo indica que la radiación solar total equivale a la suma de la radiación directa y la difusa como se presenta en la ecuación (19).

$$I_{TH} = I_{DH} + I_{dH} \quad (19)$$

#### 5.3.4.2 Adquisición y tratamiento de datos

Este estudio se realizó a partir de una serie de datos provenientes de 8 estaciones meteorológicas localizadas en la zona objeto de estudio. Las lecturas tomadas en cuenta para el mismo, son de mínimo cinco años y fueron suministradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

Los datos meteorológicos provenientes de estas estaciones son series históricas de temperatura y humedad relativa sobre una base diaria, registrada a diferentes horas del día durante un período variable de tiempo. El procesamiento de la información se complementó mediante un tratamiento matemático-estadístico en las diferentes series de tiempo, lapsos o períodos, a través de la elaboración de un código en la herramienta informática Matlab®, el cual fue programado para agilizar el tratamiento de la información y su funcionamiento se explica en el diagrama que se presenta en la Figura 25. En el Anexo 1 se presentan los códigos escritos para la organización de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas.



**Figura 25.** Algoritmo para el tratamiento de los datos meteorológicos suministrados por el IDEAMFuente: Valencia, G., Vanegas, M. y Villicaña, E.

El total de estaciones existentes en la zona de estudio con datos históricos apreciables, según el análisis de la información suministrada por el IDEAM, son 8. Estas estaciones meteorológicas y sus características se presentan en la Tabla 20.

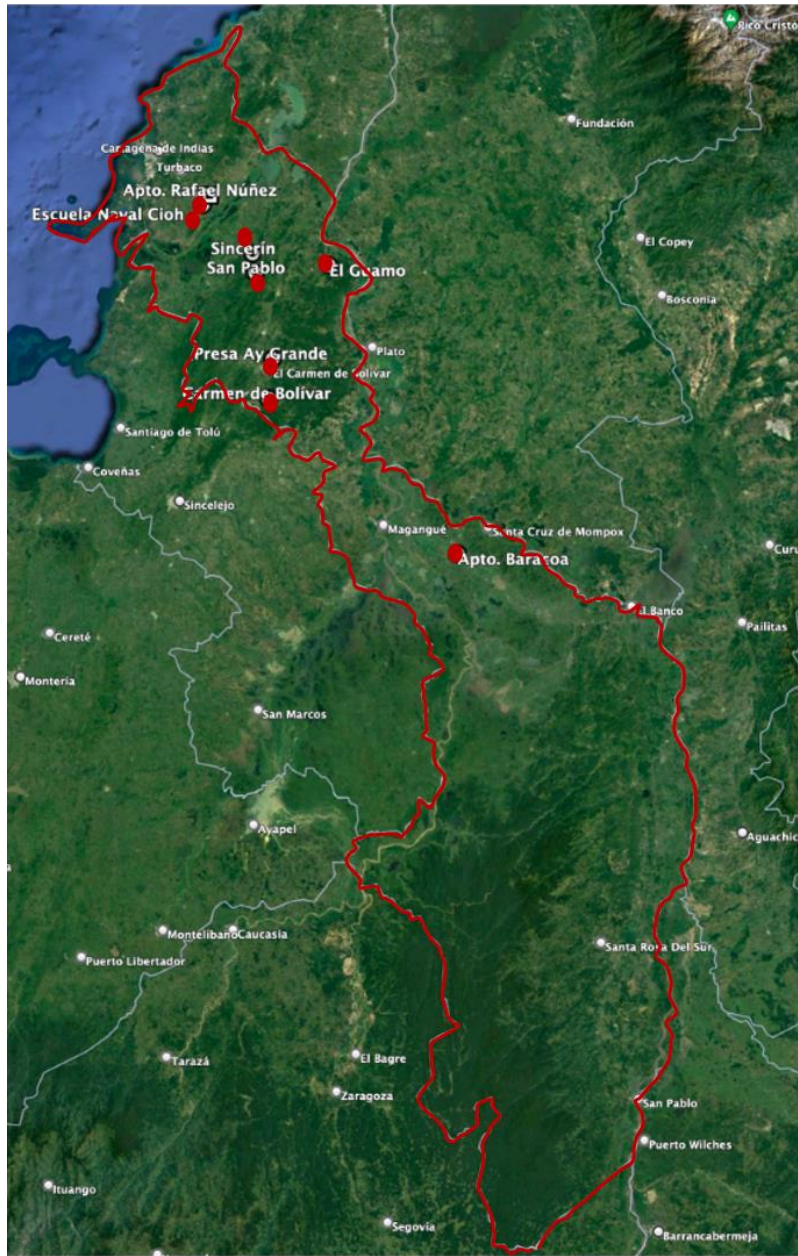
**Tabla 20.** Estaciones meteorológicas ubicadas en el departamento de Bolívar.

BOLÍVAR						
Nº	Código Id.	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Elevación (msnm)	Años de Medidas
1	14015030	Escuela Naval Cioh	10°13'48"	75°19'12"	1	1985-2012
2	14015020	Apto Rafael Núñez	10°15'36"	75°18'00"	2	1985-2014
3	29035170	Sincerín	10°04'48"	75°09'36"	10	1984-2014

4	25025100	Apto Baracoa	09°09'36"	74°30'00"	18	1984-2014
5	29035110	San Pablo	10°01'12"	75°09'00"	20	1984-2014
6	29035030	Presa Ay Grande	09°31'12"	75°11'24"	60	1984-2014
7	29015030	El Guamo	10°03'50"	74°51'07"	75	1984-2014
8	29015020	Carmen de Bolívar	09°37'48"	75°06'00"	152	1984-2014

A partir de la información meteorológica aportada por cada estación, se determinaron los factores astronómicos, geográficos y geométricos necesarios para la aplicación del modelo utilizado en este estudio. En lo relativo al análisis de los factores físicos y meteorológicos fue necesario disponer de la información climática de la región.

Para un mejor tratamiento de la información, se presenta la ubicación de las estaciones de medida en la Figura 26. Se observa que el departamento de Bolívar no tiene suficientes estaciones meteorológicas instaladas a lo largo del territorio que permitan calcular la radiación total con una mayor precisión. De las que se tiene información, se encuentran ubicadas en el centro y norte del departamento tal como se observa en la figura 26.



**Figura 26.** Ubicación de estaciones en la Región Caribe colombiana.  
**Fuente:** Google Earth Pro.

En la Tabla 21 se presentan diferentes características climáticas de las zonas analizadas en el departamento de Bolívar. Se observan diferentes variables tales como elevación (msnm), presión (Pa), temperatura (°C) y humedad relativa (%). La presión se calcula en función de la elevación por medio de la ecuación (14); la humedad relativa y temperatura se presentan como un promedio multianual de los datos medidos por las estaciones meteorológicas.

**Tabla 21.** Variables climáticas para las estaciones del departamento de Bolívar.

N°	Nombre	Elevación (msnm)	Presión (Pa)	HR* (%)	T** (°C)
1	Esc Naval Cioh	1	101313,4	82,2	27,8
2	Apto Rafael Núñez	2	101301,7	78,6	27,6
3	Sincerín	10	101208,7	81,6	27,6
4	Apto Baracoa	18	101115,8	79,5	28,2
5	San Pablo	20	101092,6	79,7	27,5
6	Presa Ay Grande	60	100629,5	81,4	27,8
7	El Guamo	75	100456,3	76,1	27,9
8	Carmen de Bolívar	152	99583,7	75,3	27,3

\*: humedad relativa. \*\*: temperatura

Fuente: Valencia, G., Vanegas, M. y Villicaña, E.

#### **5.4. Cuantificación y caracterización de la radiación solar del norte y centro del departamento de Bolívar**

Para evaluar los efectos atenuadores de la dispersión y absorción se requiere estimar la densidad de cada sustancia por unidad de sección recta que recorre la radiación [38]. Precisar con exactitud estos valores requiere del empleo de una multitud de variables físicas y meteorológicas que interactúan con la atmósfera, así como de la aplicación de modelos matemáticos que resulten efectivos para el cómputo total.

En la práctica, este parámetro se evalúa a partir de modelos matemáticos que se aplican a las medidas realizadas por las estaciones meteorológicas sin necesidad de utilizar medidores de partículas. Es de señalar, sin embargo, que aún son escasos los modelos que cuantifican la radiación solar considerando los coeficientes de atenuación atmosférica para cada lugar del planeta. Por este motivo este apartado tiene como finalidad establecer el coeficiente de transmisibilidad representativo de la atmósfera del departamento de Bolívar.

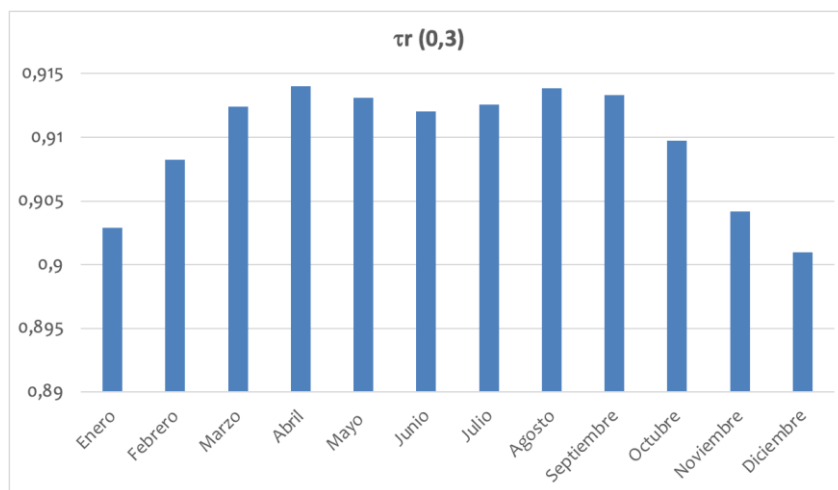
### 5.4.1. Análisis de transmitancias

Para este análisis se establecieron cinco hipotéticos estados que puede presentar la atmósfera: ( $\beta = 0,0$ ) extremadamente limpia, ( $\beta = 0,1$ ) despejada, ( $\beta = 0,2$ ) media, ( $\beta = 0,3$ ) turbia y ( $\beta = 0,4$ ) muy turbia.

A continuación, se presenta a manera de ejemplo un análisis de las transmitancias para el departamento de Bolívar teniendo en cuenta solo una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ) de acuerdo con la variación del coeficiente de turbidez de Angström. En el Anexo 2 se presentan los cálculos de las transmitancias que son responsables de la atenuación de la radiación.

#### 5.4.1.1 Transmitancia por moléculas de aire ( $\tau_r$ )

A manera de ejemplo, se presenta la transmitancia debida a la presencia de moléculas de agua en una atmósfera turbia. Para el departamento de Bolívar, esta variable presenta una mayor intensidad en los meses de marzo a septiembre, de tal forma que podría considerarse que en este período será más pronunciada la dispersión de la radiación debida a moléculas de aire (ver Figura 27).

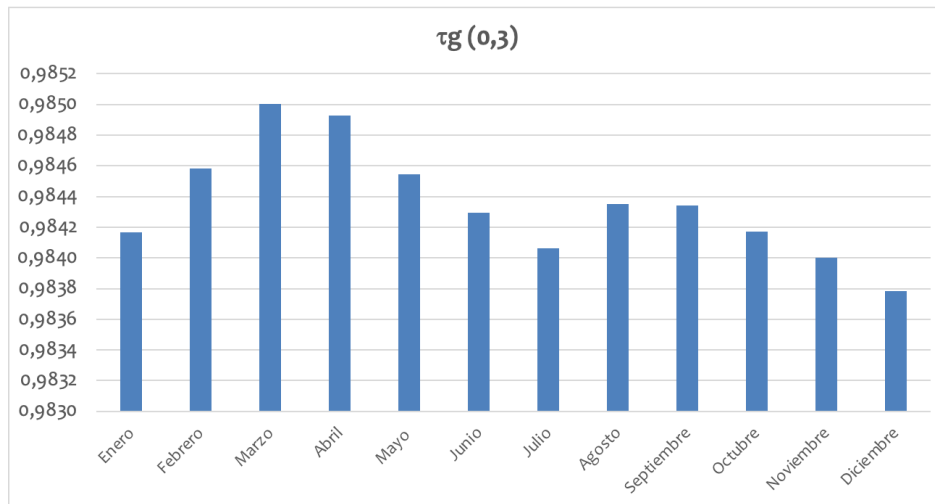


**Figura 27.** Comportamiento de la transmitancia  $\tau_r$  debida a moléculas de aire en el departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ).

**Fuente:** autores

### 5.4.1.2 Transmitancia por gases miscibles ( $\tau_g$ )

El comportamiento observado en la transmitancia debido a la presencia de gases miscibles en la atmósfera es más notorio en los meses de febrero a mayo, donde sus valores son superiores tal como se puede observar en la Figura 28.

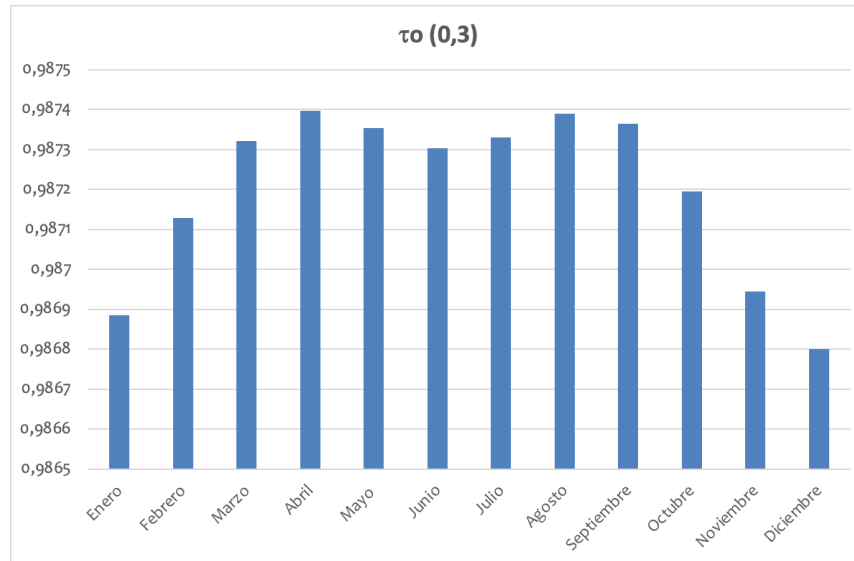


**Figura 28.** Comportamiento de la transmitancia ( $\tau_g$ ) debida a gases miscibles en el departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ).

**Fuente:** autores

### 5.4.1.3 Transmitancia por ozono( $\tau_o$ )

La presencia del ozono en la atmósfera de la zona de estudio varía según los meses del año y se establece de acuerdo con su espesor. Su valor puede determinarse teniendo en cuenta la latitud y época del año. El ozono es una molécula que absorbe radiación por lo que su estudio debe ser considerado en este análisis. El coeficiente de absorción definido por la transmitancia que presenta el ozono en el departamento de Bolívar difiere a lo largo del año, siendo los meses de marzo a septiembre donde se observa un ligero incremento indicando mayor dispersión de la radiación en esta época. En la Figura 29 se muestra la tendencia que siguen los datos.

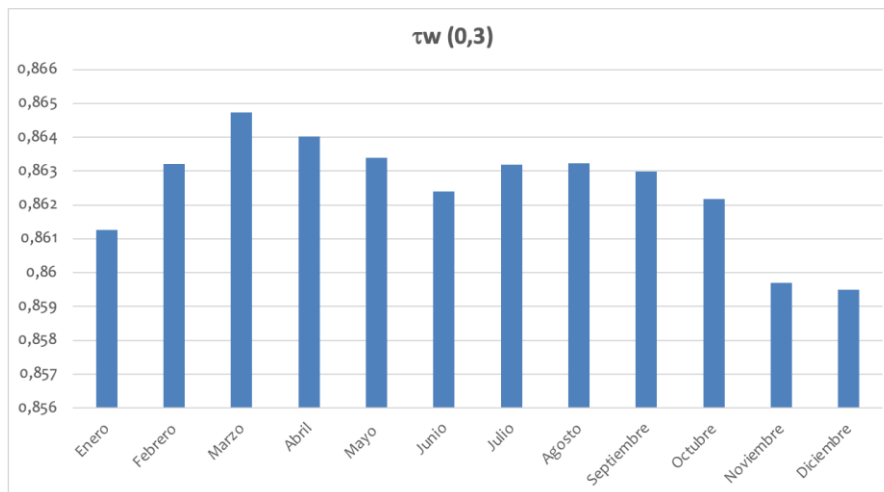


**Figura 29.** Comportamiento de la transmitancia ( $\tau_g$ ) debida al ozono en el departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ).

**Fuente:** autores

#### 5.4.1.4 Transmitancia por vapor de agua ( $\tau_w$ )

La presencia del vapor de agua resulta ser un factor importante en la atenuación de la radiación. Esto se respalda con los niveles de humedad relativa (HR) que presenta la zona estudiada y que en todo caso son mayores al 70% (Ver Figura 30).

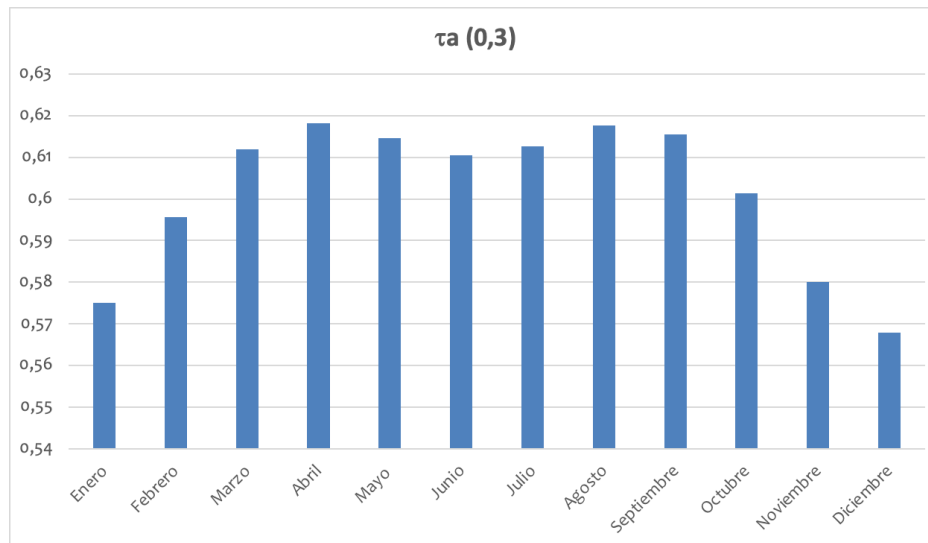


**Figura 30.** Comportamiento de la transmitancia ( $\tau_w$ ) debida al vapor de agua en el departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ).

**Fuente:** autores.

#### 5.4.1.5 Transmitancia por aerosoles ( $\tau_a$ )

En la Figura 31 se presenta la tendencia que siguen los datos de transmitancia por aerosoles para una atmósfera turbia. Se observa una variación entre la época seca y la época húmeda. Esta variación coincide con la mayor presencia de vapor de agua en la atmósfera, por lo que se puede decir que, en los meses de marzo, abril y mayo, así como julio, agosto y septiembre la nubosidad es ligeramente significativa con respecto al resto de meses del año.



**Figura 31.** Comportamiento de la transmitancia ( $\tau_a$ ) debida a aerosoles en el departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ).

**Fuente:** Autores.

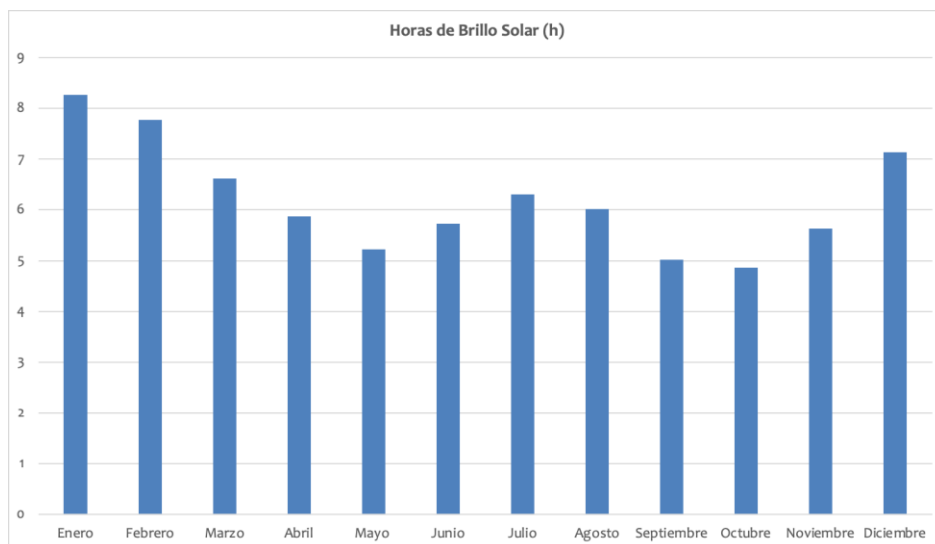
#### 5.4.2. Análisis de la radiación solar

Se procedió a evaluar la radiación directa y difusa para cada una de las estaciones meteorológicas a través del cálculo de las transmitancias. Tras realizar este cálculo y tomando los valores de brillo solar suministrados por el IDEAM se procedió a calcular las radiaciones global, directa y difusa para cada estación del departamento de Bolívar.

##### 5.4.2.1 Horas de sol o brillo solar

El brillo solar representa el tiempo total durante el cual incide la luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el ocaso. El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los

factores que determina el clima de esa localidad. En la Figura 32 se presenta el promedio histórico mensual de esta variable durante los últimos veinte años.



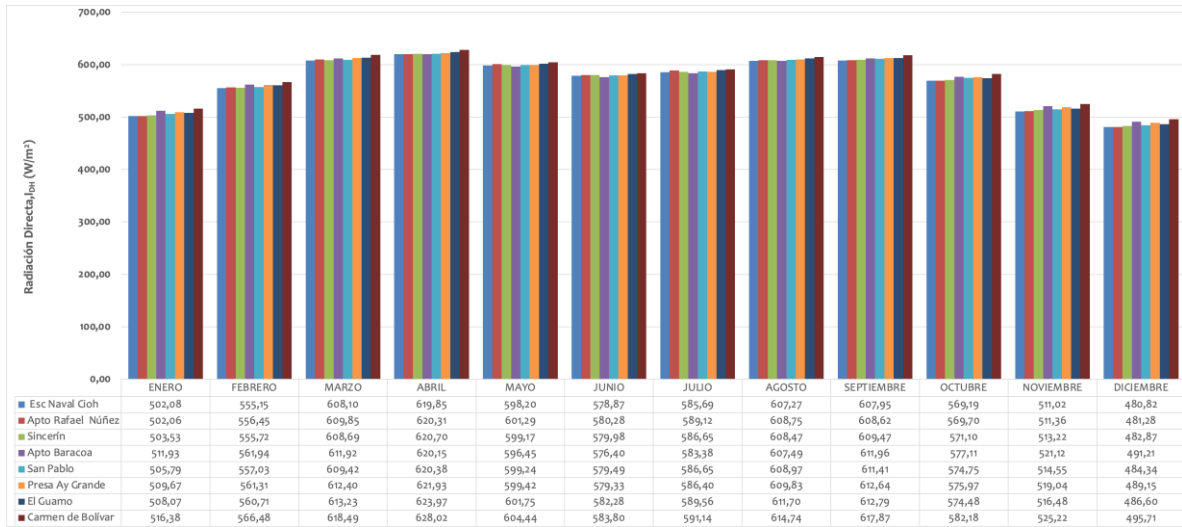
**Figura 32.** Promedio histórico mensual del brillo solar en el departamento de Bolívar.  
**Fuente:** IDEAM.

La principal característica que se observa en la tendencia que siguen estos datos es que el departamento de Bolívar presenta los valores más elevados de horas de brillo solar entre los meses de diciembre y marzo.

#### 5.4.2.2 Radiación solar directa

Con la ecuación 10 se calcula la radiación solar directa que es función de la constante solar, el ángulo de altitud solar y del producto de las transmitancias atmosféricas presentadas en los apartados anteriores. A manera de ejemplo y teniendo en cuenta el cálculo de la radiación en una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ), en la Figura 33 se presentan los datos históricos promedio de radiación directa del departamento de Bolívar para todos los meses del año de cada una de las 8 estaciones ubicadas en la zona.

Los mayores valores de radiación se observan en los meses de marzo, abril, agosto y septiembre. En general, la zona de estudio presenta un nivel de radiación promedio superior a  $570 \text{ W/m}^2$  durante todo el año, valor bastante apreciable para fines energéticos.



**Figura 33.** Promedio histórico mensual de la radiación solar directa en el norte y centro del departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ).

**Fuente:** Autores.

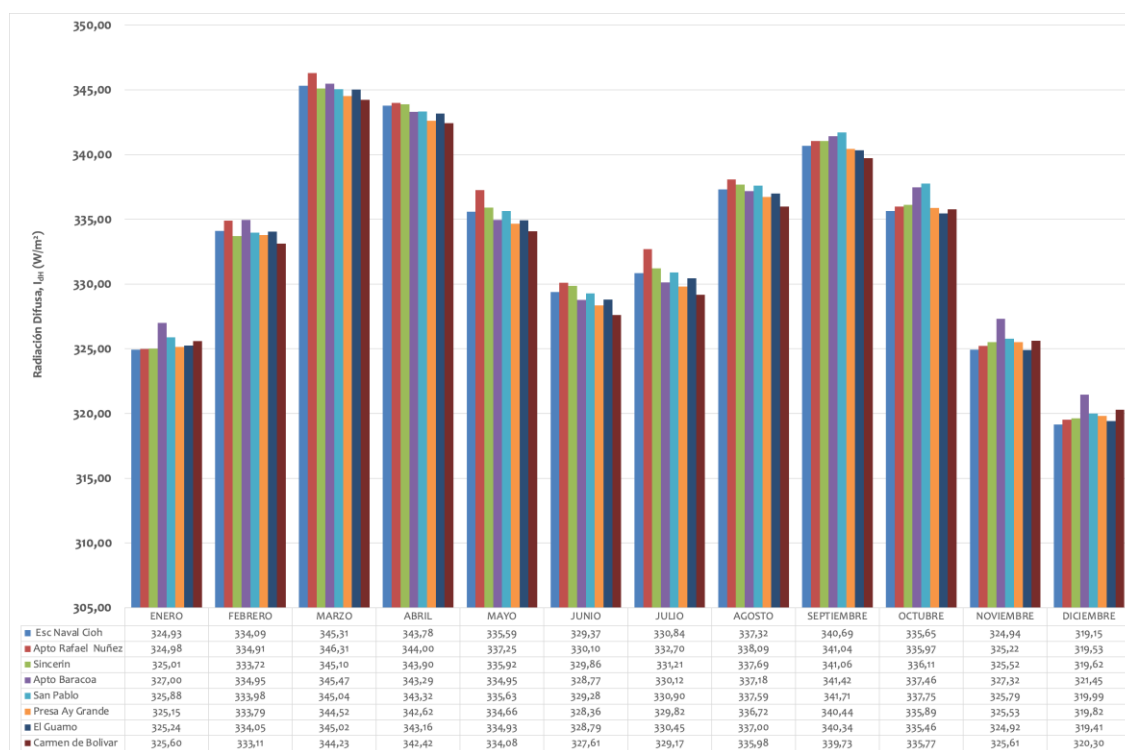
Se observa que la estación ubicada en el Carmen de Bolívar presenta valores de radiación directa un poco mayores que el resto de las estaciones lo que podría atribuirse a su ubicación a 152 msnm.

#### 5.4.2.3 Radiación solar difusa

La radiación solar difusa se calcula a partir de las radiaciones difusas debido a la presencia de moléculas de aire, partículas de polvo (aerosoles) y por múltiple reflexión entre el suelo y la atmósfera, cuyos valores se calculan a partir de las ecuaciones 12, 17 y 18, respectivamente.

En la Figura 34 se presenta la radiación difusa promedio para el departamento de Bolívar a lo largo de un año, teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ). Se observa que los mayores valores se presentan en los meses de marzo, abril y septiembre donde se presentan coberturas nubosas en la zona de estudio. De acuerdo con los datos analizados por el modelo de B&H, en los meses de noviembre, diciembre y enero se observan los menores valores para este parámetro, pero es importante recalcar que esto no siempre se cumple ya que para años atípicos como el 2022 cuando el fenómeno de La Niña está azotando a todo el país, los valores de radiación difusa se pueden ver incrementados de manera apreciable. Este comportamiento

se encuentra acorde con la tendencia que siguen las transmitancias por moléculas de aire, gases miscibles y aerosoles presentados en las Figuras 27, 28 y 31.



**Figura 34.** Promedio histórico mensual de la radiación solar difusa en el departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ).

**Fuente:** Autores.

Es importante resaltar que estas estaciones se encuentran ubicadas en la parte central y norte del departamento de Bolívar como ya se mencionó anteriormente y que la parte sur, caracterizada por un relieve irregular y por ende por variedad de climas, no tiene disponible datos históricos medidos in situ de variables meteorológicas por lo que debe procederse de otra manera para evaluar su potencial solar lo cual se tratará más adelante.

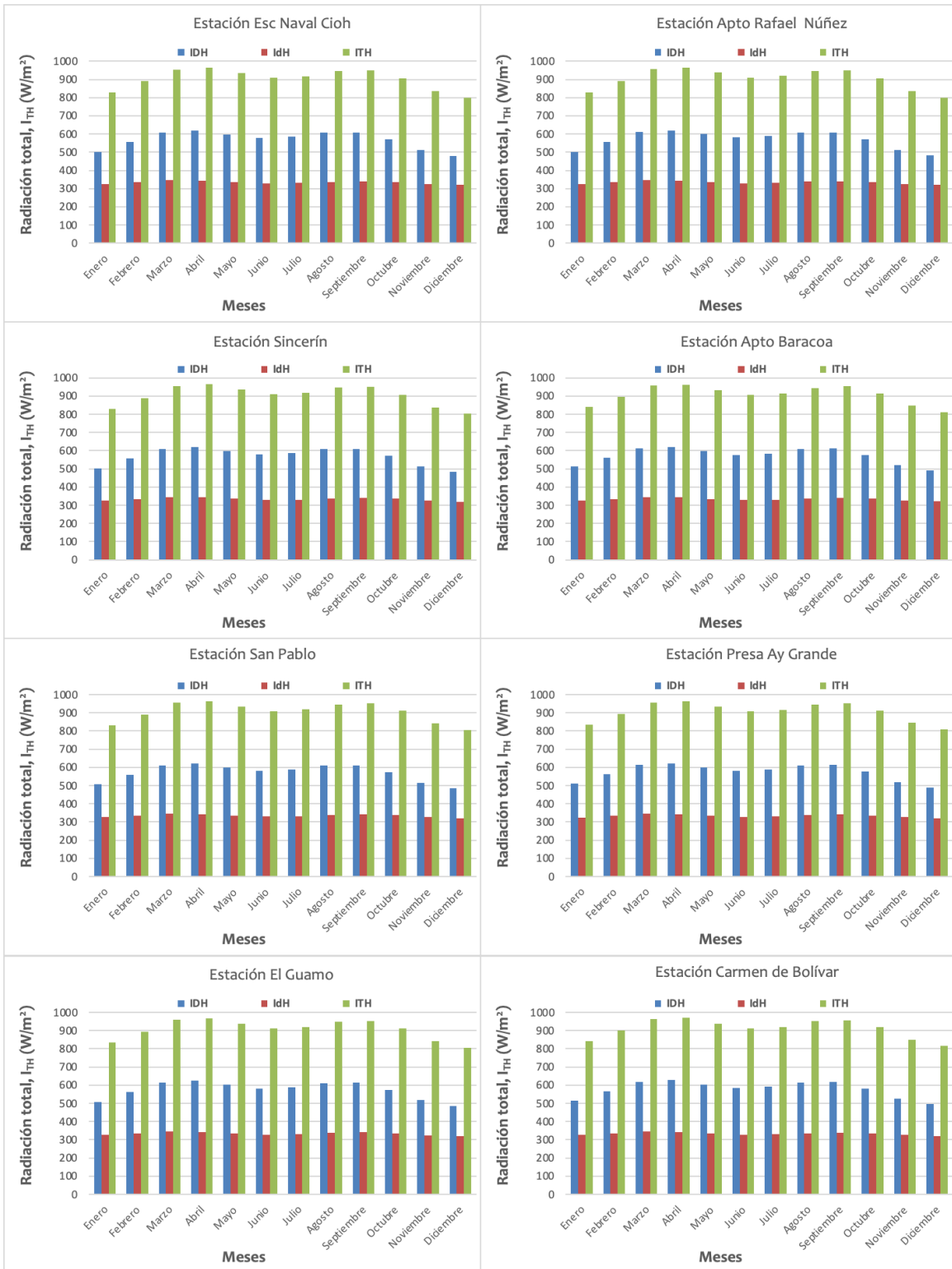
#### 5.4.2.4 Radiación solar total

A partir de la ecuación 19 se calcula la radiación solar global promedio del departamento de Bolívar. En la Figura 35 se ilustra el aporte de la radiación directa y difusa en el valor de la radiación solar global. En general, la radiación incidente en el departamento de Bolívar, teniendo en cuenta una atmósfera turbia, se encuentra demarcada por la época seca y húmeda,

siendo los meses de marzo, abril, agosto y septiembre los que presentan valores más elevados acorde a la tendencia que siguen los datos de transmitancia atmosférica discutidos en apartados anteriores.

A pesar de considerarse una atmósfera turbia para la evaluación de esta variable, la radiación es muy buena, lo que podría favorecer el desarrollo de muchos proyectos energéticos a lo largo de la región analizada hasta aquí, de acuerdo con la exigencia de cada tecnología, ya que el componente difuso es una limitante.

La radiación difusa representa aproximadamente el 37% de la radiación total incidente en la superficie de esta región lo que podría disminuir la posibilidad de instalación de proyectos con tecnologías que requieran mucha radiación directa como en el caso de la generación de energía y calor a alta temperatura donde se requieren muchas horas de sol y radiación directa ya que se deben alcanzar temperaturas superiores a 400 °C.



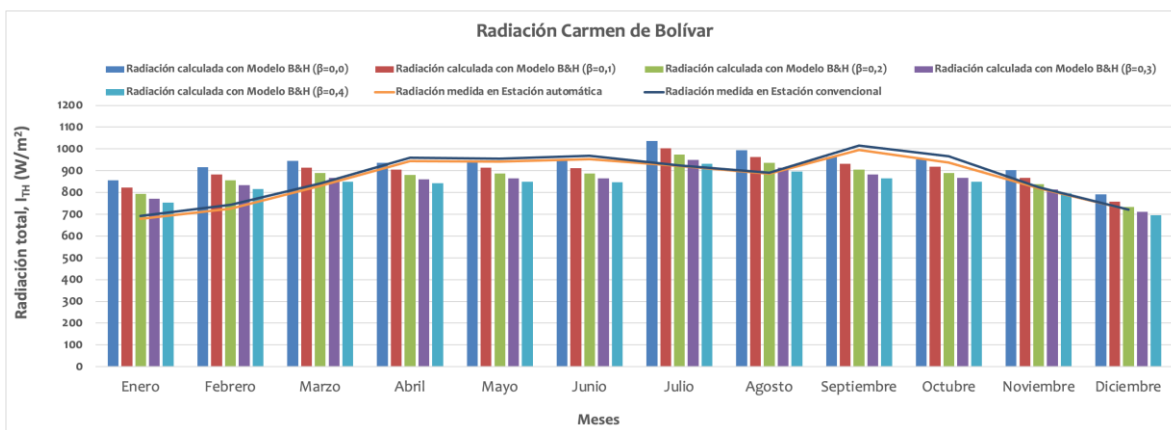
**Figura 35.** Promedio histórico mensual de la radiación solar total en el departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ).

**Fuente:** Autores.

### 5.4.3. Evaluación del modelo de Bird y Hulstrom

Una vez determinados los valores de radiación mediante el modelo propuesto, se procedió a evaluar la información obtenida con datos reales aportados por registros de estaciones meteorológicas convencionales y automáticas que miden la radiación total a través de sensores instalados en las estaciones. En el departamento de Bolívar solo existe una estación con estos sensores y es en la estación Carmen de Bolívar tal como se mencionó anteriormente, así es que se tomarán los valores medidos en esta estación para evaluar los resultados arrojados por el modelo.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por el modelo de radiación considerando distintas atmósferas; estas se encuentran identificadas por las barras verticales. La Figura 36 muestra los niveles de potencia energética máxima y mínima a lo largo de año de la estación del Carmen de Bolívar, donde se observa que existe cierta similitud en la tendencia que sigue el comportamiento de los datos de radiación calculados a través del modelo y los medidos por la estación.



**Figura 36.** Comparación de la radiación medida a través de estaciones automáticas y convencionales con la calculada a través del modelo de Bird y Hulstrom en la estación Carmen de Bolívar.

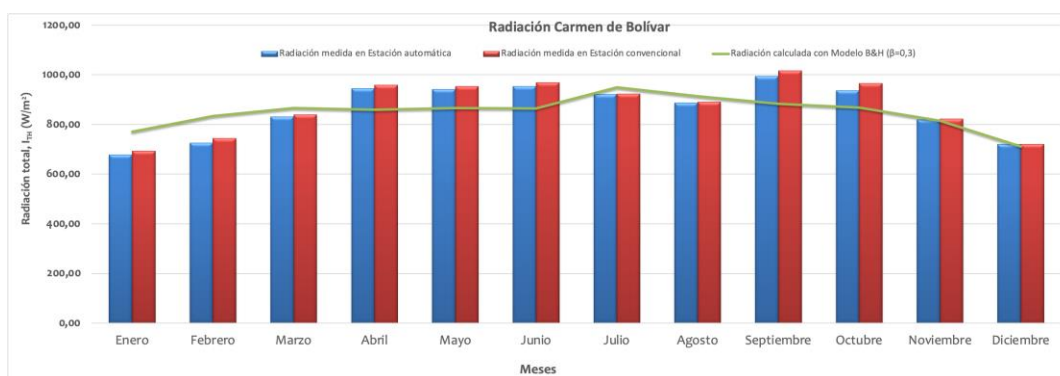
**Fuente:** Autores.

El modelo se ajusta de manera diferente a los datos medidos a lo largo del año, esto debido a que los factores físicos y meteorológicos son de difícil predicción y por tanto, al incluirlos

dentro del modelo, no representan exactamente las variaciones que tienen en condiciones reales. El modelo tampoco tiene en cuenta factores externos como la variación de las condiciones climáticas como consecuencia de fenómenos como la Niña y el Niño.

De acuerdo con lo observado en la Figura 36, el departamento de Bolívar podría considerarse que presenta diferentes comportamientos de la nubosidad de la atmósfera dependiendo de la época del año, con lo cual su radiación puede verse afectada apreciablemente. Por ejemplo, entre los meses de enero a marzo, el comportamiento que siguen los datos teóricos con respecto a los medidos por las estaciones, podría indicar que se presenta un tipo de atmósfera turbia, mientras que, en los meses de abril a junio, el comportamiento es de una atmósfera despejada, julio y agosto atmósfera turbia y de septiembre a diciembre, la atmósfera se comporta como despejada. Por tanto, la radiación va a variar de acuerdo a las condiciones climáticas presentes en cada época del año.

A manera de ejemplo y como se ha presentado en todo el documento, en la Figura 37 muestra una comparación entre la radiación medida a través de sensores en las estaciones del IDEAM instaladas en Carmen de Bolívar y la calculada con el Modelo de B&H teniendo en cuenta un coeficiente de turbidez de 0,3.



**Figura 37.** Comparación de la radiación medida en estaciones automáticas y convencionales con la calculada a través del modelo de B&H teniendo en cuenta un  $\beta=0,3$ .

**Fuente:** Autores.

En varios meses del año se observa una desviación en la medida calculada a través del modelo de B&H de aproximadamente un 12% por encima o por debajo de la medida reportada por

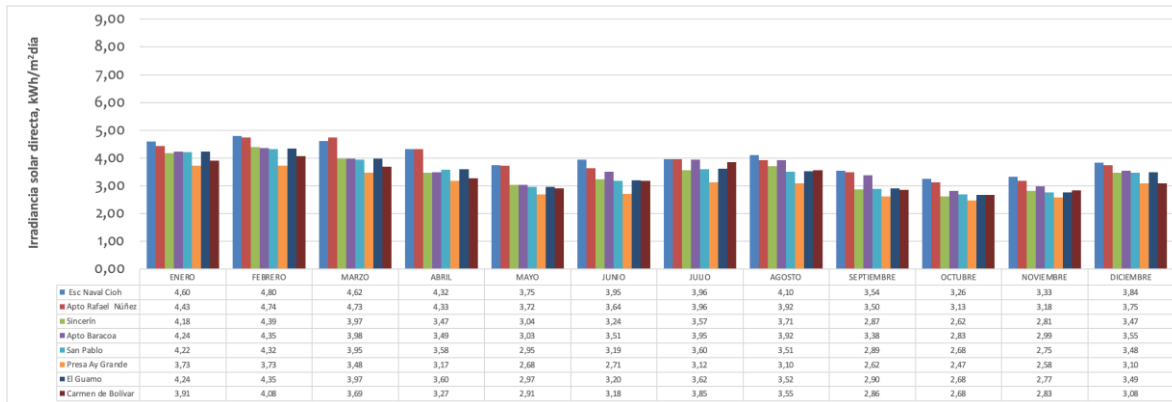
las estaciones automática y convencional del Carmen de Bolívar, pero si la radiación se presenta como un promedio multianual la desviación de la medida es solo de 2%, por lo que se puede asumir que el departamento de Bolívar maneja una atmósfera turbia con un  $\beta=0,3$  y la caracterización y cuantificación de la radiación a través del modelo de B&H arroja valores bastante aceptables.

#### **5.4.3.1 Irradiancia solar directa**

Para aclarar un poco acerca de la diferencia entre la radiación y la irradiancia, la irradiancia es el producto de la radiación por las horas de brillo solar ( $\text{W/m}^2 * \text{h/día}$ ). Por tanto, en las gráficas que se presentan a continuación, se muestra el comportamiento de la variable irradiancia directa, difusa y total.

En la Figura 38 se muestra el comportamiento de la irradiancia solar directa para el norte del departamento de Bolívar teniendo en cuenta una atmósfera turbia; en ella se observa que el nivel más alto de irradiancia directa estimado se encuentra alrededor de  $4,7 \text{ kWh/m}^2\text{día}$  en el mes de febrero y corresponde a las estaciones Esc Naval Cioh y Apto. Rafael Núñez ubicadas entre 1 y 2 msnm.

Esta zona donde se encuentran ubicadas las estaciones, se caracteriza por presentar un promedio de 9 horas de sol por lo que es lógico que esta zona presente los mayores valores de irradiancia. La estación Presa Ay Grande ubicada a 60 msnm, presenta los menores valores de irradiancia solar directa, los cuales oscilan alrededor de  $2,5 \text{ kWh/m}^2\text{día}$  en el mes de octubre dato muy importante para tener en cuenta cuando se desean implementar proyectos energéticos.



**Figura 38.** Irradiancia solar directa considerando una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ) en el norte del departamento de Bolívar.

**Fuente:** Autores.

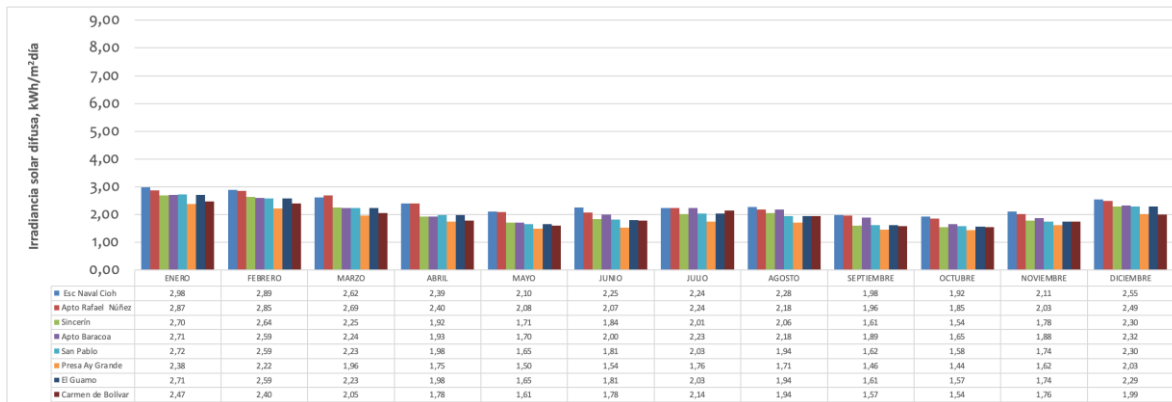
Del análisis realizado, se observa que el norte del departamento de Bolívar presenta niveles de irradiación interesantes para el desarrollo de proyectos energéticos, aunque al considerar una atmósfera turbia, los resultados obtenidos indican que tecnologías como la CSP (*Concentrated Solar Power*) no son viables en algunas zonas debido al porcentaje apreciable de nubosidad que se puede presentar a lo largo del año, lo que penalizaría la producción energética. Sin embargo, esta región ofrece posibilidades para el desarrollo de instalaciones fotovoltaicas, ya sea para conexión red o de tipo aislado.

Para sistemas de conexión a red, las zonas con mayor potencial son las que se localizan al centro y norte del departamento, mientras que, hacia el sur del departamento, aunque podría ser viable su desarrollo, esto podría verse afectado debido al alto grado de nubosidad, relieve irregular y condiciones de seguridad que caracterizan a esta zona. Más adelante se analizará el potencial solar disponible en esta zona.

#### 5.4.3.2 Irradiancia solar difusa

Los principales valores de irradiación solar difusa se presentan con mayor intensidad en la zona norte del departamento de Bolívar, siendo el nivel de irradiación difusa cercana a los 3,0 kWh/m<sup>2</sup>día para los meses de enero, febrero y marzo (estaciones Esc Naval Cioh y Apto Rafael Núñez), mientras que para el resto de meses, su valor se encuentra por debajo de los

2,0 kWh/m<sup>2</sup>día tal y como se ilustra en la Figura 39. Al desplazarse hacia el centro del departamento, se observa que esta componente de la radiación es menor lo cual es apenas lógico ya que los centros poblados son más pequeños y por ende la emisión de componentes que atenúan la radiación es mucho menor que los generados en las grandes ciudades.



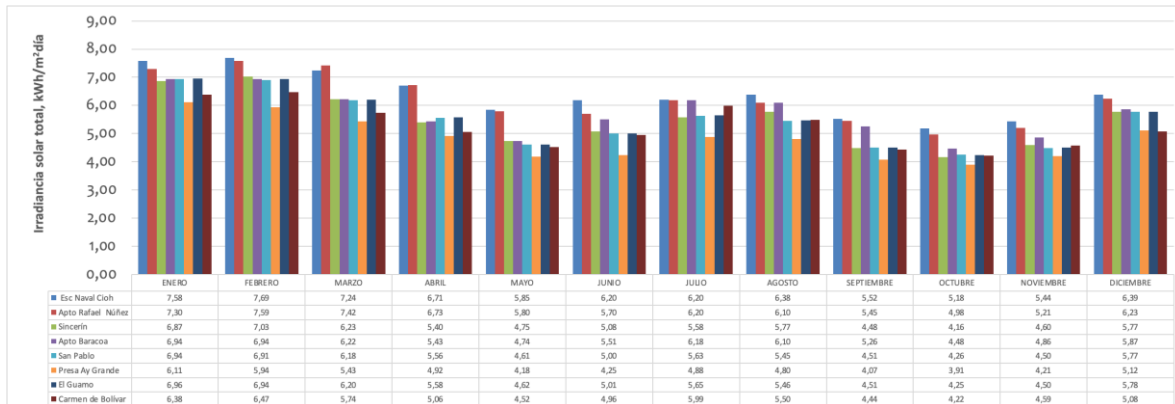
**Figura 39.** Irradiancia solar difusa considerando una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ) en el departamento de Bolívar.

**Fuente:** Autores.

Al considerarse el análisis realizado, se observa que esta región ofrece posibilidades para el desarrollo de instalaciones fotovoltaicas de tipo aislado y conectadas a red, y prácticamente en toda la región centro y norte se aconseja la implementación de sistemas solares térmicos de baja temperatura para agua caliente sanitaria y climatización de piscinas.

### 5.4.3.3 Irradiancia solar total

Finalmente, se tiene que en esta región se puede encontrar un nivel de irradiancia total superior a 7,0 kWh/m<sup>2</sup>día en la zona norte durante los primeros meses del año cuya intensidad se ve disminuida hacia los meses de mayo, septiembre, octubre y noviembre, cuando se observan valores entre 5 y 6 kWh/m<sup>2</sup>día. Hacia el centro del departamento se observan los menores niveles de irradiancia total, del orden de los 4 kWh/m<sup>2</sup>día, sobre todo en la zona donde se encuentra ubicada la estación Presa Ay Grande. Estas características de la irradiancia total en la parte centro y norte del departamento ofrece posibilidades para el desarrollo de sistemas solares con fines energéticos (ver Figura 40).



**Figura 40.** Irradiancia solar total considerando una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ) en el departamento de Bolívar.

**Fuente:** Autores.

Como se explicó anteriormente, la irradiancia es el producto de multiplicar la radiación por el número de horas de brillo solar y, por ende, es claro que las zonas que presentan mayor irradiancia total, no necesariamente son las que presentan mayor radiación, como es el caso de la zona del Carmen de Bolívar, la cual presenta excelentes valores de radiación (promedio alrededor de  $910 \text{ Wh/m}^2$ ), lo cual es un excelente valor para la implementación de proyectos energéticos.

Para una mejor visualización de la información, la Figura 41 presenta los valores promedio de irradiancia durante todo el año y la tendencia que siguen los datos de horas de brillo solar en las zonas donde se encuentran instaladas las estaciones del Centro y Norte de Bolívar.

Es evidente que la irradiancia se comporta de acuerdo a las horas de brillo solar que caracterizan a cada zona del centro y norte del departamento de Bolívar.

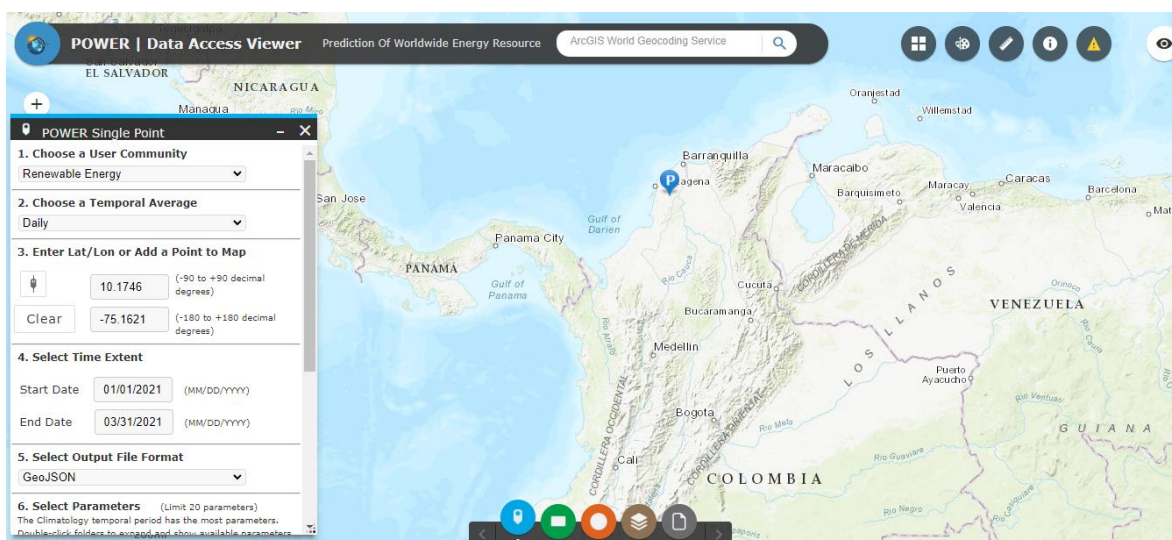


**Figura 41.** Irradiancia total y brillo solar considerando una atmósfera turbia ( $\beta=0,3$ ) en el centro y norte del departamento de Bolívar.

**Fuente:** Autores.

## 5.5. Evaluación del potencial solar del sur del departamento de Bolívar a través de datos meteorológicos recopilados por la nasa

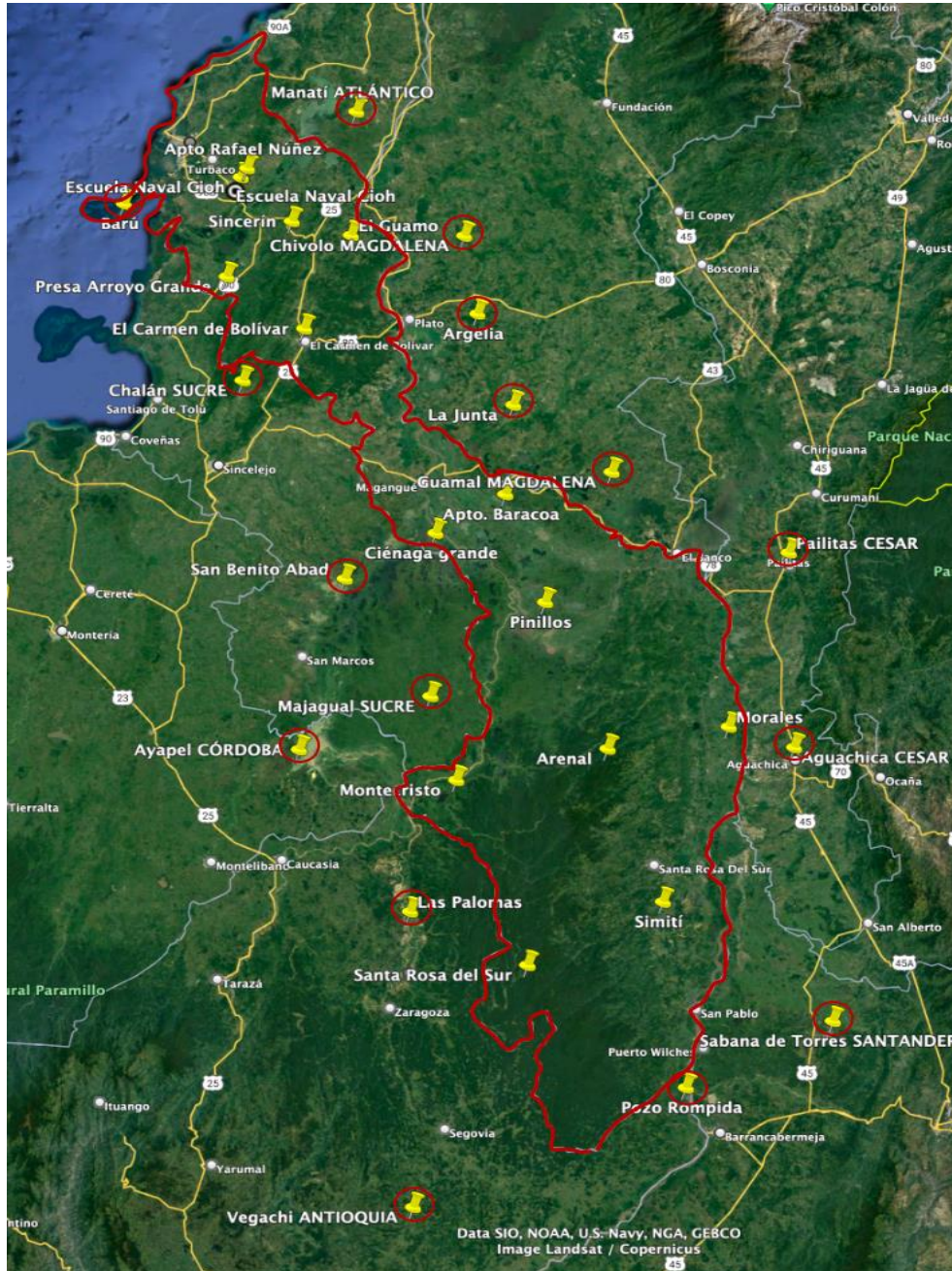
Como se explicó en el apartado 5.3.1, es posible la evaluación del potencial solar en el sur del departamento a través de la herramienta POWER Data Access Viewer, ya que no hay estaciones con datos históricos suficientes para evaluar el potencial a través del modelo de B&H en esta zona. En la Figura 42 se presenta una captura de la ventana principal de la herramienta empleada.



**Figura 42.** Ventana principal de la herramienta POWER Data Access Viewer

El procedimiento que se sigue para ingresar a la plataforma consiste en ingresar a la página <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, se ubica el punto colocando las coordenadas (latitud y longitud), luego se coloca la fecha en la cual se quiere hacer la búsqueda de los datos, se selecciona el formato en el que se requiere la información, en este caso sería .CSV, seguido se seleccionan los parámetros que se requieren analizar, se hace click en enviar y enseguida se descarga la información que se requiere para el estudio.

Por otro lado, se seleccionaron puntos ubicados estratégicamente en la zona sur del departamento de Bolívar tal como se indica en la Figura 43.



**Figura 43.** Ubicación de puntos para evaluación del potencial solar en la zona sur del departamento de Bolívar.

**Fuente:** Google Earth Pro.

En la Tabla 22 se presentan los lugares seleccionados en el sur de Bolívar para evaluar el potencial solar. Estos lugares están distribuidos en toda la zona de estudio y en su selección se tuvo en cuenta que estuvieran ubicados cerca a centros poblados pensando en la seguridad de los proyectos energéticos que pudieran implementarse en esas zonas.

**Tabla 22.** Lugares seleccionados en el sur de Bolívar para evaluar el potencial solar.

N°	Nombre	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
1	San Pablo Sur	7,08	-74,27419	309
2	Santa Rosa del Sur	7,58	-74,43925	729
3	Simití	7,79	-74,02131	159
4	Montecristo	8,20	-74,6554	26
5	Arenal	8,30	-74,18848	700
6	Morales	8,37	-73,81495	130
7	Pinillos	8,79	-74,37876	209
8	Ciénaga Grande	9,03	-74,71598	108

Fuente: Autores

También se seleccionaron lugares aledaños al departamento de Bolívar con el fin de facilitar la interpolación de los datos que requiere la herramienta ArcGIS la cual se empleará para la elaboración de los mapas solares (ver Tabla 23).

**Tabla 23.** Lugares aledaños al departamento de Bolívar.

N°	Nombre	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
1	Chalán - SUCRE	9,54	-75,31	284
2	Vegachi - ANTIOQUIA	6,72	-74,79	1113
3	Majagual - SUCRE	8,56	-74,73	30
4	Ayapel - CÓRDOBA	8,3	-75,14	31
5	Sabana de Torres - SANTANDER	7,39	-73,5	180
6	Aguachica - CESAR	8,3	-73,61	93
7	Pailitas - CESAR	8,95	-73,62	123
8	Guamal - MAGDALENA	8,24	-74,14	126
9	Chivolo - MAGDALENA	10,02	-74,62	138
10	Manatí - ATLÁNTICO	10,44	-74,95	300
11	La Junta - MAGDALENA	9,45	-74,47	32
12	San Benito Abad - SUCRE	8,93	-75,03	32
13	Barú - BOLÍVAR	10,14	-75,68	14

14	Pozo Rompida - ANTIOQUIA	7,16	-73,94	150
15	Las palomas - ANTIOQUIA	7,76	-74,8	120
16	Argelia - MAGDALENA	9,55	-74,7	86

Fuente: Autores.

### 5.5.1. Análisis de la radiación solar en el sur del departamento de Bolívar

Como se explicó en el apartado 1.3.1, para calcular las horas de brillo solar se empleó la ecuación 9. Para poder hallar este valor, se requería de la Irradiancia y de la radiación, así es que se procedió a descargar de la plataforma POWER Data Access Viewer esta información. Al analizar la información se observó que los datos de radiación diferían apreciablemente de los calculados por el modelo mientras que los valores de irradiancia presentaban una gran similitud, por lo que se procedió a calcular un factor de corrección para estos datos. A manera de ejemplo, en la Tabla 24 se presenta el cálculo del factor que se le llamó J, para la estación Carmen de Bolívar.

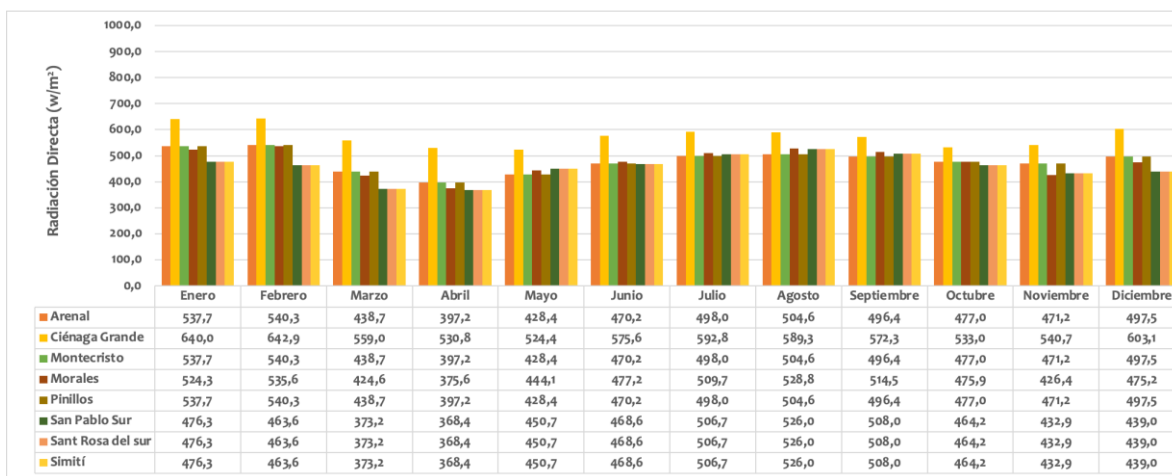
**Tabla 24.** Cálculo del factor de corrección J para los valores de radiación (W/m<sup>2</sup>) descargados de la NASA

Datos de radiación modelo B & H ( $\beta=0,3$ )	Valores de radiación descargados de la NASA	Factor J	Datos de radiación ajustados	Error	Error absoluto	% error
Radiación total (W/m <sup>2</sup> )	Radiación total (W/m <sup>2</sup> )	Modelo B&H/NASA	Datos radiación NASA*7.05 (W/m <sup>2</sup> )			
841,98	115,93	7,26	816,89	-25,09	25,09	3%
909,13	122,46	7,42	862,92	-46,21	46,21	5%
962,71	125,79	7,65	886,38	-76,33	76,33	8%
970,44	134,75	7,20	949,50	-20,93	20,93	2%
938,52	139,01	6,75	979,54	41,02	41,02	4%
911,41	137,69	6,62	970,26	58,85	58,85	6%
920,31	137,51	6,69	968,99	48,68	48,68	5%
950,71	139,00	6,84	979,48	28,77	28,77	3%
957,61	138,41	6,92	975,27	17,67	17,67	2%
917,95	131,48	6,98	926,48	8,53	8,53	1%
850,83	120,50	7,06	849,07	-1,76	1,76	0%
816,01	114,10	7,15	803,98	-12,02	12,02	1%
	<b>Promedio:</b>	<b>7,05</b>				<b>3%</b>

Fuente: Autores.

Se procedió a corregir toda la data de radiación bajada de la NASA, para junto con el valor de Irradiancia proceder a calcular las horas de brillo solar y realizar también la corrección de estos valores de acuerdo con la metodología planteada en el apartado 1.3.1. Los valores de horas de brillo solar empleados para este cálculo fueron tomados de los reportados por el IDEAM para la estación Apto. Baracoa por la cercanía a los lugares seleccionados al Sur de Bolívar.

Luego de realizar todos estos pasos se procedió a calcular los valores de la radiación, para todos los puntos seleccionados para el estudio. En las Figuras 44, 45 y 46 se presentan las radiaciones directa, difusa y total de todos los lugares seleccionados en el Sur del departamento de Bolívar.

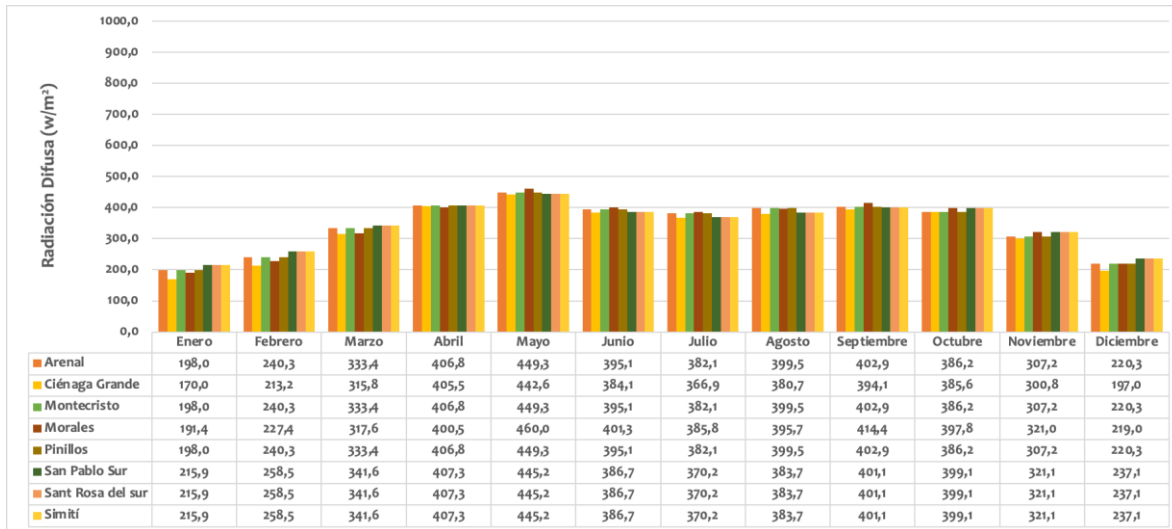


**Figura 44.** Radiación directa en la zona sur del departamento de Bolívar

**Fuente:** Autores.

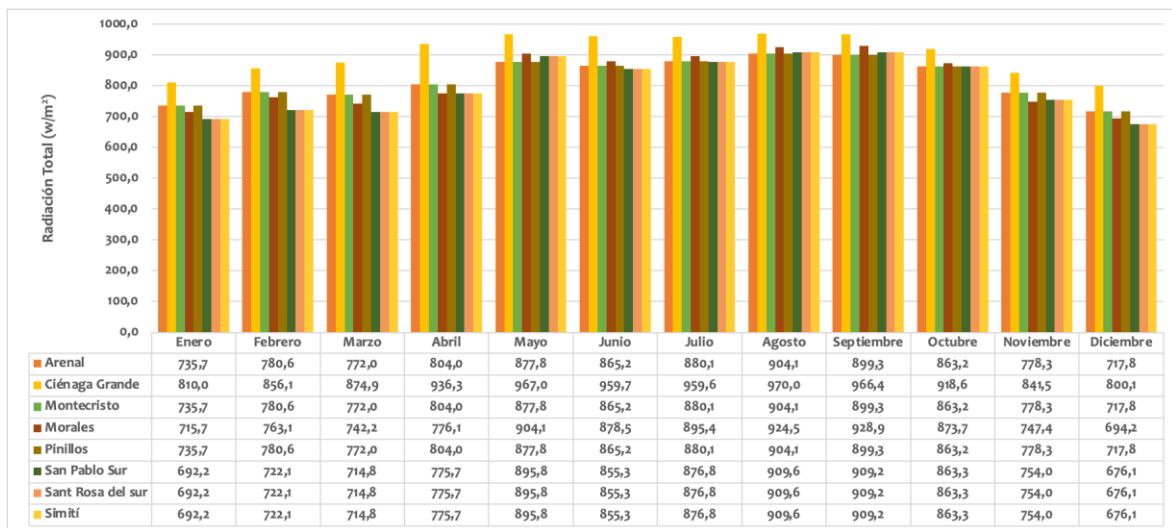
Se observan mayores valores de radiación directa en Ciénaga Grande en todos los meses del año, lo que se convierte en una gran oportunidad para el desarrollo de proyectos energéticos de tipo solar fotovoltaico.

En lo que respecta a la radiación difusa, en la Figura 45 se observa que los valores de este tipo de radiación se van incrementando a medida que van transcurriendo los meses hasta que vuelve a bajar en el mes de noviembre. Los valores de radiación difusa entre abril y octubre son de aproximadamente  $400 \text{ W/m}^2$  lo cual es muy elevado si comparamos el aporte de la radiación directa cuyo valor para esos meses es de aproximadamente  $500 \text{ W/m}^2$ . Esto no es bien visto en el momento de diseñar sistemas solares, ya que se desea que el aporte de la radiación directa sea mucho mayor que el aporte de radiación difusa. Se recomienda mirar otros factores que son importantes tales como, disposición de tierras para cultivo, poblaciones que se podrían beneficiar por la implementación de proyectos energéticos, ubicación de comunidades vulnerables, permanencia de grupos armados, facilidad de acceso a la región, entre otros factores para estudiar la viabilidad de implementar proyectos de energía solar térmica o fotovoltaica.



**Figura 45.** Radiación difusa en la zona sur del departamento de Bolívar  
Fuente: Autores.

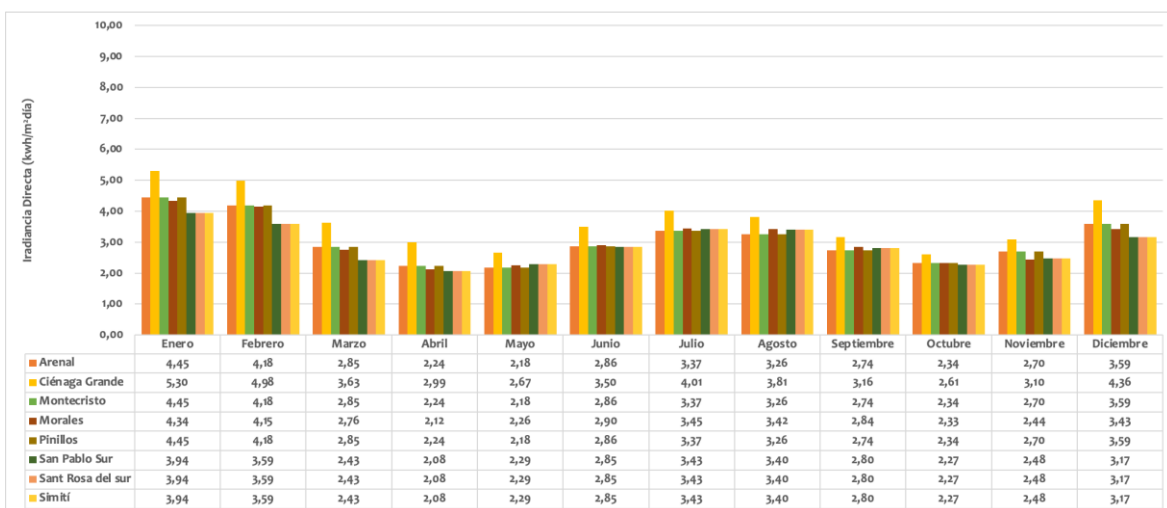
En la Figura 46 se presenta la radiación total que a pesar de ser elevada para algunos meses del año (entre mayo y octubre), aproximadamente  $900 \text{ W/m}^2$ , ya se analizó anteriormente que el aporte de la energía difusa es muy elevado.



**Figura 46.** Radiación difusa en la zona sur del departamento de Bolívar  
Fuente: Autores.

En cuanto a los valores de Irradiancia, en las Figuras 47, 48 y 49 se presenta el comportamiento de esta variable.

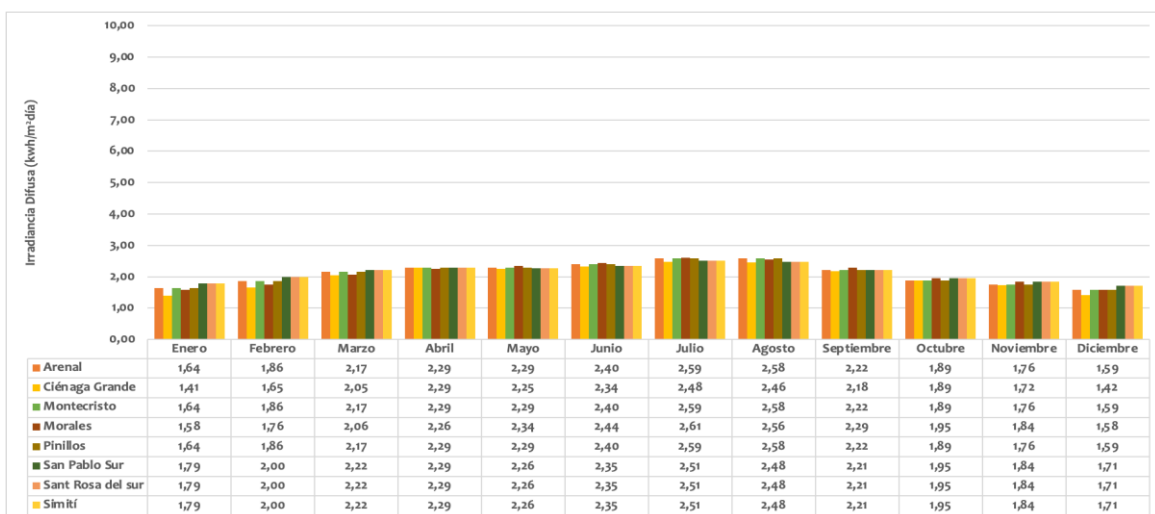
Como se explicó anteriormente, las horas de brillo solar empleadas para calcular la irradiancia en el Sur de Bolívar, son las reportadas por el IDEAM en la estación de Apto. Baracoa. La irradiancia directa es mayor en los meses de enero y febrero donde el valor sobrepasa los 4,00 kWh/m<sup>2</sup>día, mientras que para los meses de abril y mayo disminuye a la mitad indicando esto la gran influencia que tiene el clima en la irradiancia directa.



**Figura 47.** Irradiancia directa en la zona sur del departamento de Bolívar

Fuente: Autores.

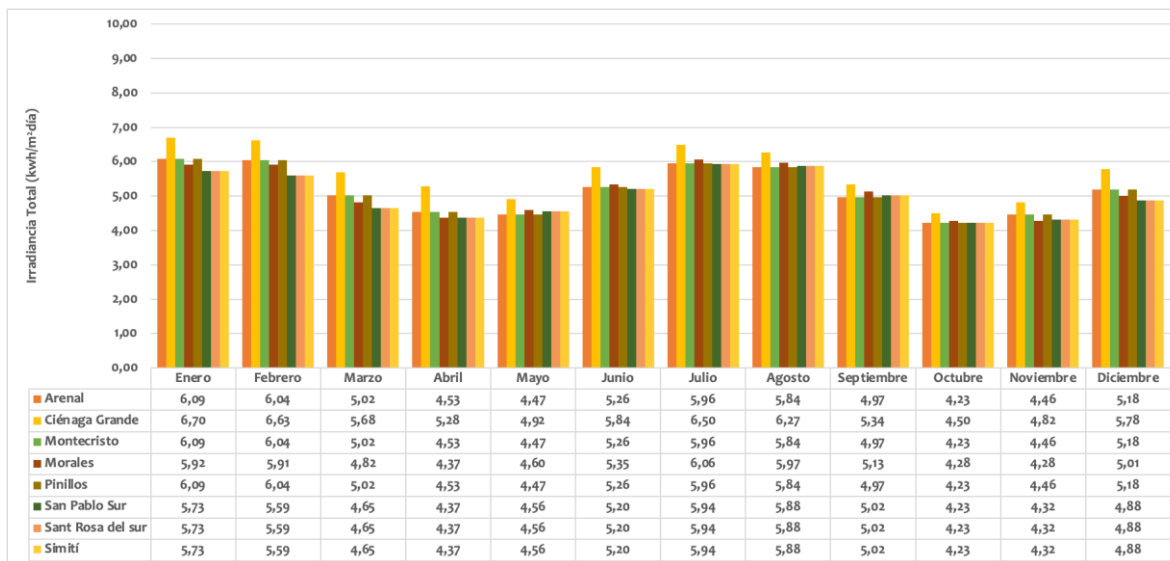
Los valores de irradiancia difusa se mantienen un valor aproximado de 2,00 kWh/m<sup>2</sup>día a lo largo del año igualando a la radiación directa en algunos meses del año.



**Figura 48.** Irradiancia difusa en la zona sur del departamento de Bolívar

Fuente: Autores.

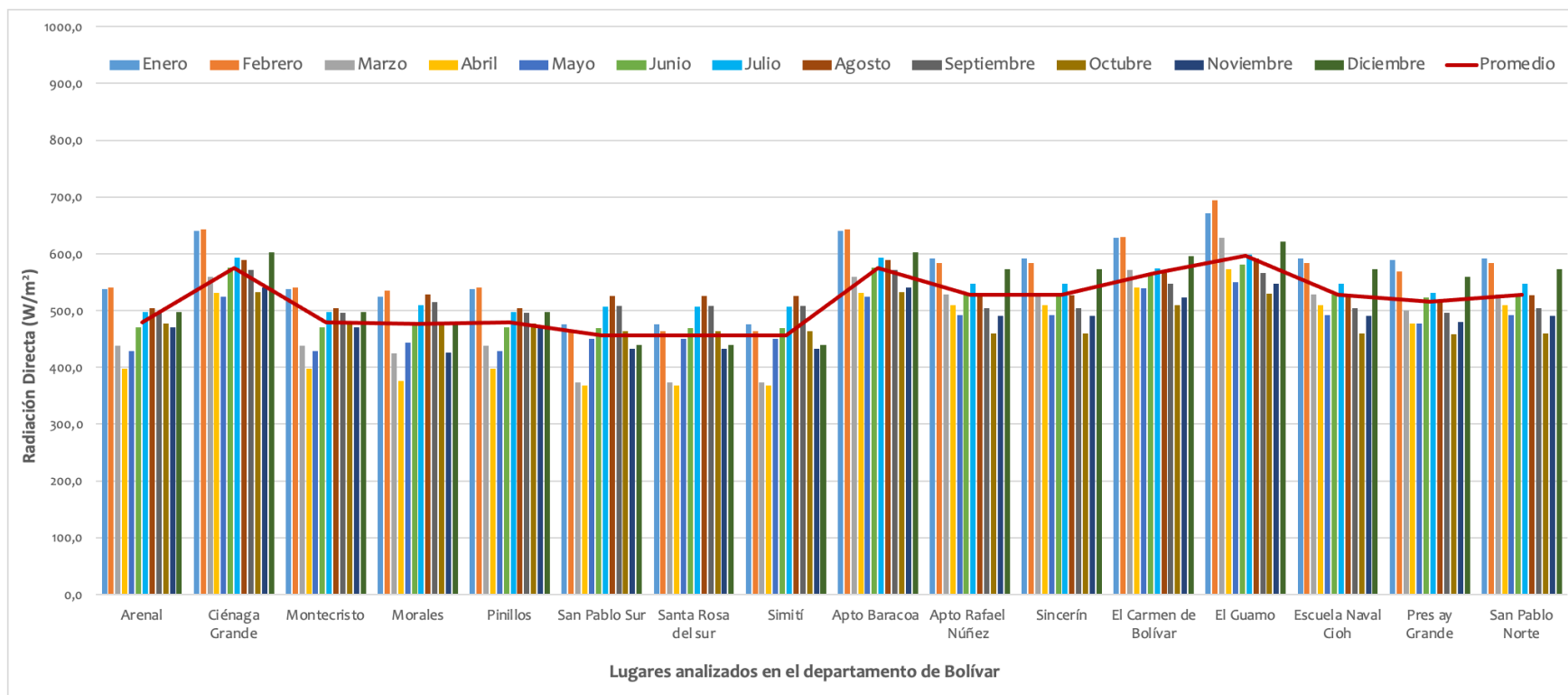
En los meses donde es más pronunciado el verano tales como enero, febrero, julio y agosto, la irradiancia total alcanza valores promedio de 6,00 kWh/m<sup>2</sup>día y el resto de los meses se mantiene por debajo de este valor.



**Figura 49.** Irradiancia total en la zona sur del departamento de Bolívar  
Fuente: Autores.

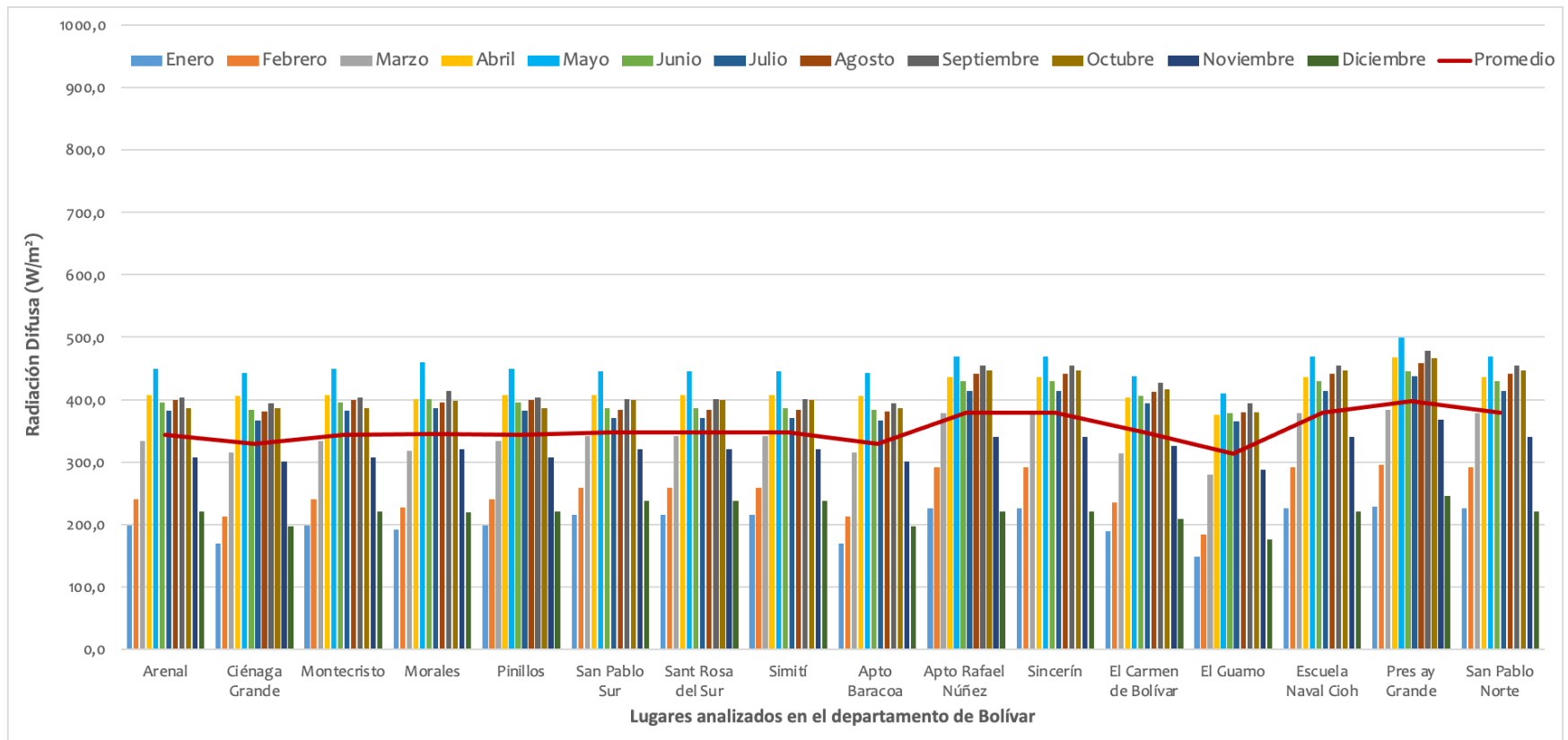
Luego de obtener todos los valores de radiación directa, difusa y total de todo el departamento a través del modelo de B&H y a través de la plataforma POWER Data Access Viewer, se procedió a organizar la información para poder presentar la información en mapas solares. Para poder presentar esta información de una forma homogénea, los valores de radiación de los lugares analizados en el Norte del departamento, también fueron bajados de la plataforma POWER Data Access Viewer y corregidos de la forma como se ha mencionado anteriormente en este apartado. En las Figuras 50 – 55 se encuentran los valores de radiación directa, difusa, total y los valores de irradiancia directa, difusa y total de todo el departamento luego de bajarlos, corregirlos y organizarlos.

En términos generales, los lugares identificados como sigue a continuación, presentan una radiación total promedio de 900 W/m<sup>2</sup>, Ciénaga Grande, Apto Baracoa, Apto Rafael Núñez, Sincerín, El Carmen de Bolívar, El Guamo, Escuela Naval Cioh, Presa Ay Grande y San Pablo Norte, valor bastante interesante para la implementación de proyectos energéticos.



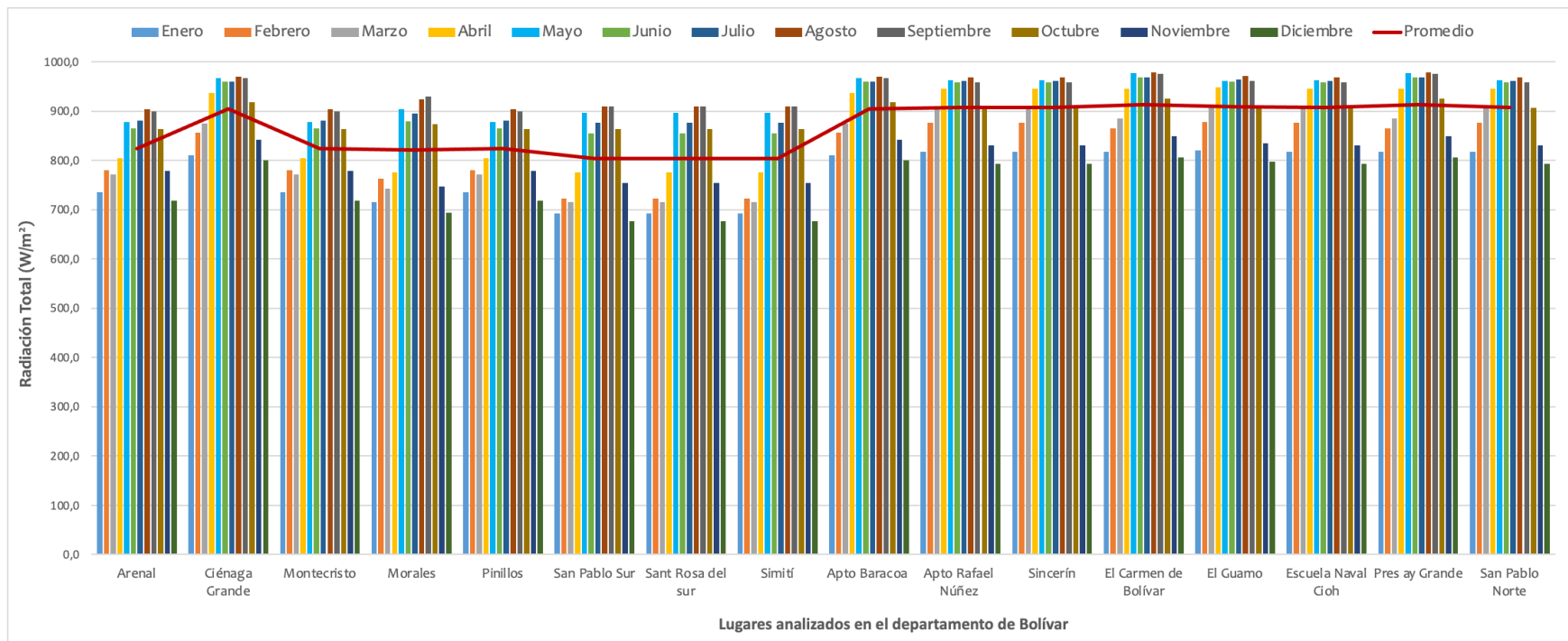
**Figura 50.** Radiación directa de todo el departamento de Bolívar de acuerdo con datos reportados por la NASA y corregidos con el factor de correlación hallado con el Modelo de Bird y Hulstrom.

Fuente: Autores.



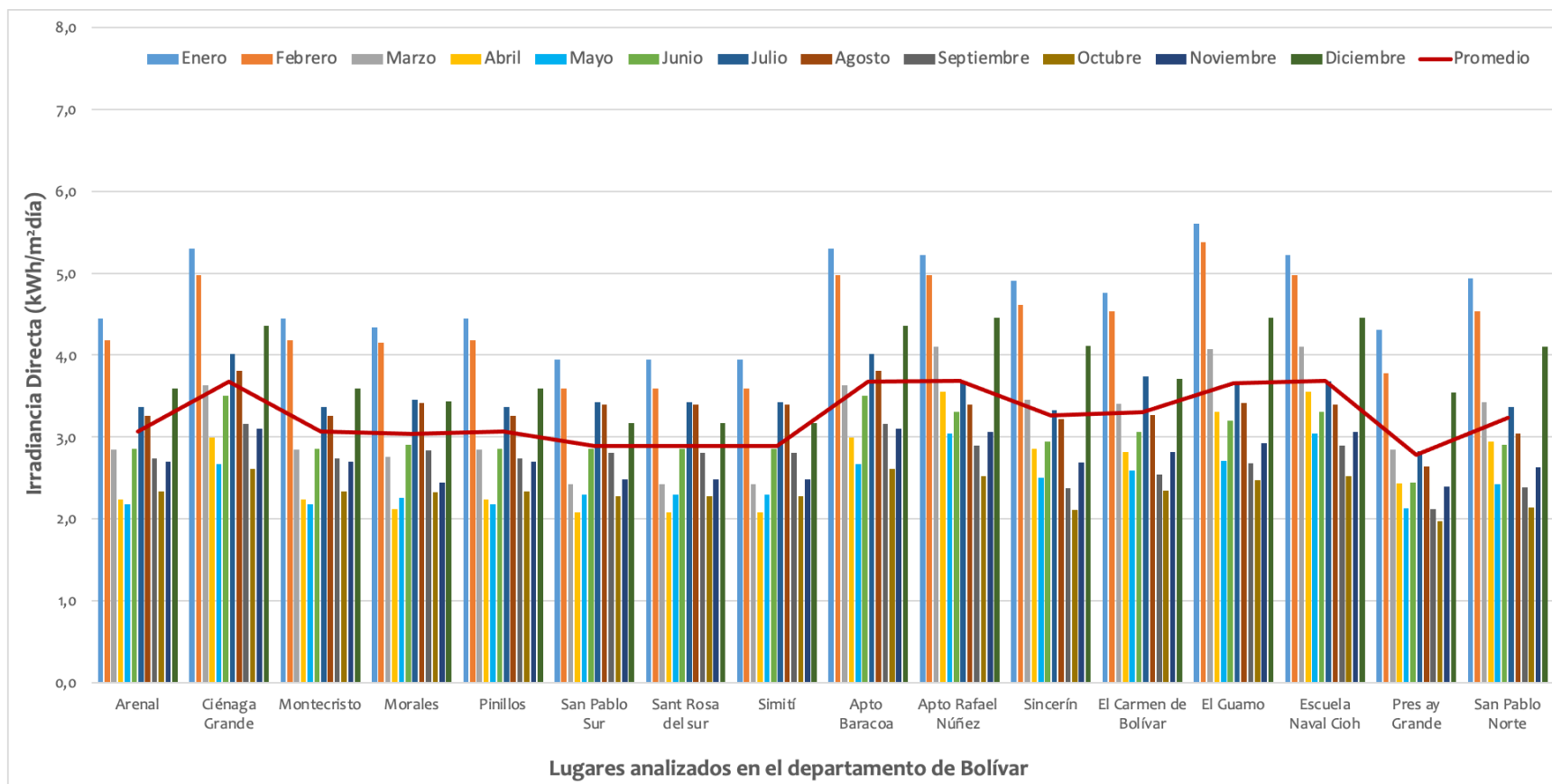
**Figura 51.** Radiación difusa de todo el departamento de Bolívar de acuerdo con datos reportados por la NASA y corregidos con el factor de correlación hallado con el Modelo de Bird y Hulstrom.

**Fuente:** Autores.



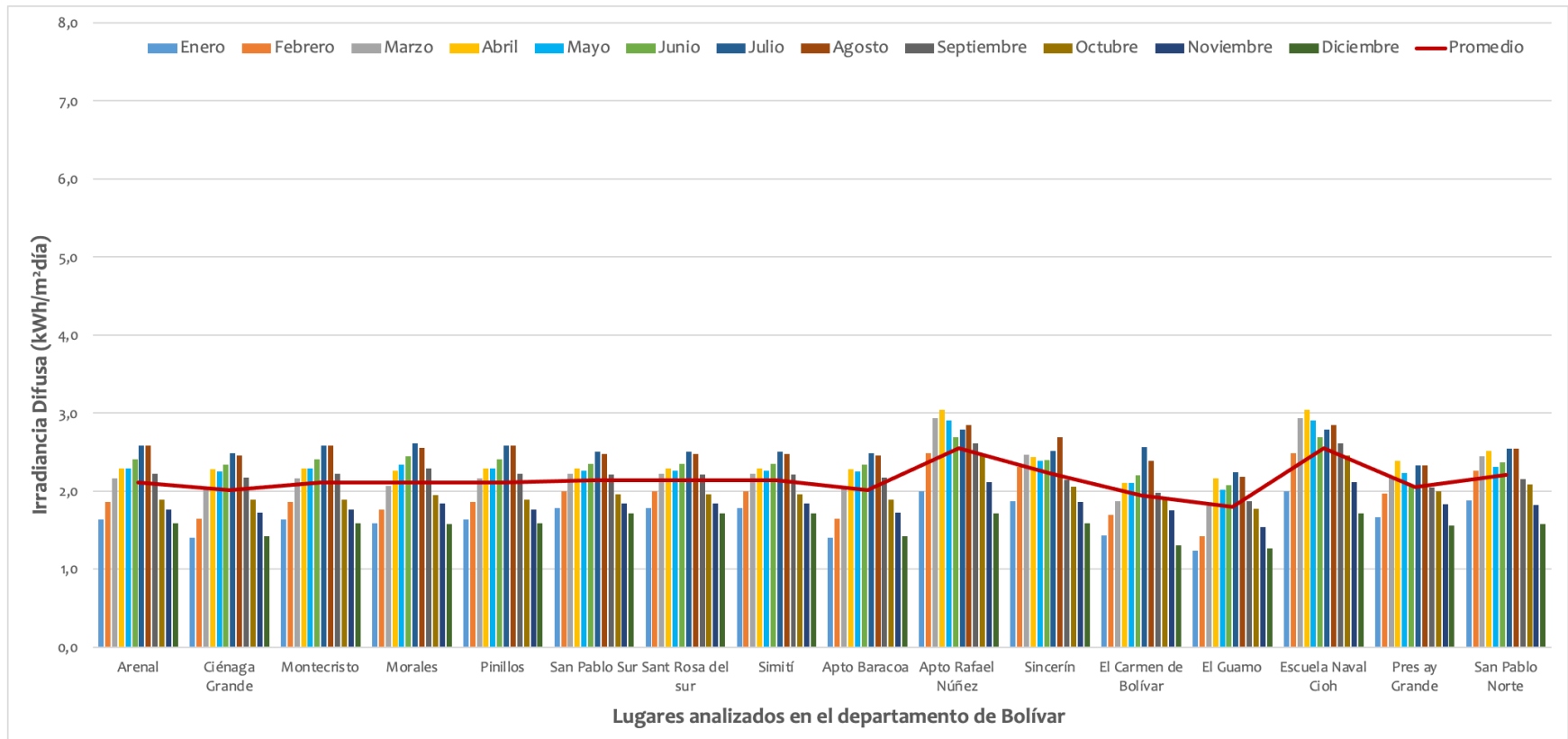
**Figura 52.** Radiación total de todo el departamento de Bolívar de acuerdo con datos reportados por la NASA y corregidos con el factor de correlación hallado con el Modelo de Bird y Hulstrom.

**Fuente:** Autores.



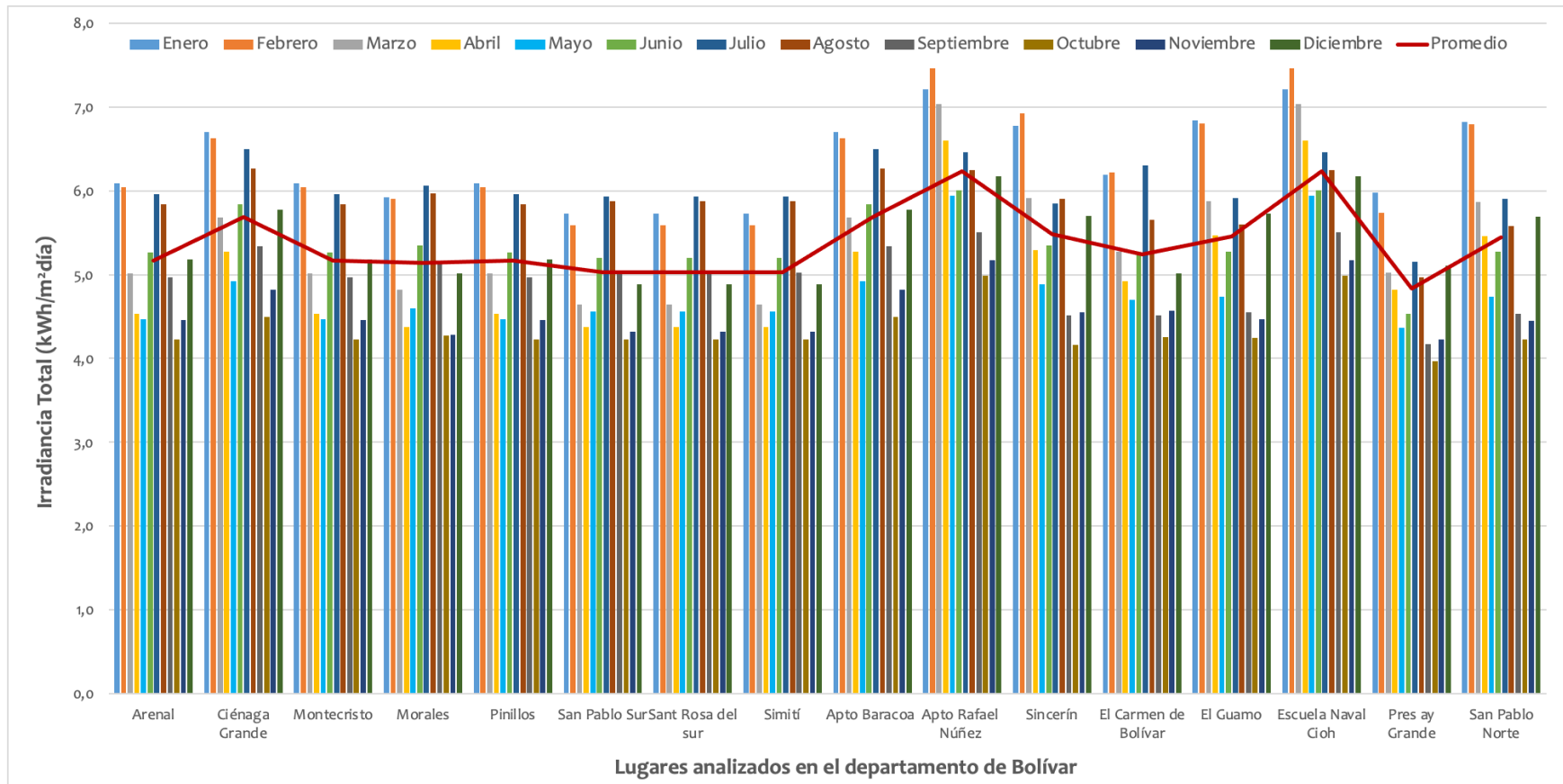
**Figura 53.** Irradiancia directa de todo el departamento de Bolívar de acuerdo con datos reportados por la NASA, corregidos con el factor de correlación hallado con el Modelo de Bird y Hulstrom y empleando horas de brillo solar reportado por IDEAM.

**Fuente:** Autores.



**Figura 54.** Irradiancia difusa de todo el departamento de Bolívar de acuerdo con datos reportados por la NASA, corregidos con el factor de correlación hallado con el Modelo de Bird y Hulstrom y empleando horas de brillo solar reportado por IDEAM.

**Fuente:** Autores.



**Figura 55.** Irradiancia total de todo el departamento de Bolívar de acuerdo con datos reportados por la NASA, corregidos con el factor de correlación hallado con el Modelo de Bird y Hulstrom y empleando horas de brillo solar reportado por IDEAM.

**Fuente:** Autor

# CAPÍTULO 6: POTENCIAL DE DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR EN EL DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR

## 6.1. Introducción

Se estudiaron diferentes lugares a lo largo del departamento de Bolívar al igual que lugares aledaños al departamento de Bolívar con el fin de poder analizar el potencial solar de la región estudiada. El total de los lugares analizados se presentan en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Lugares seleccionados para el estudio del potencial solar del departamento de Bolívar.

		Lugar	Latitud	Longitud	Altura
UBICACIONES ALEDAÑAS	1	Chalán (Sucre)	9,54	-75,31	284
	2	Vegachi (Antioquia)	6,72	-74,79	1113
	3	Majagual (Sucre)	8,56	-74,73	30
	4	Ayapel (Córdoba)	8,3	-75,14	31
	5	Sabana de Torres (Santander)	7,39	-73,50	180
	6	Aguachica (Cesar)	8,3	-73,61	93
	7	Pailitas (Cesar)	8,95	-73,62	123
	8	Guamal (Magdalena)	8,24	-74,14	126
	9	Chivolo (Magdalena)	10,02	-74,62	138
	10	Manatí (Atlántico)	10,44	-74,95	300
	11	La Junta (Magdalena)	9,45	-74,47	32
	12	San Benito Abad (Sucre)	8,93	-75,03	32
	13	Barú (Bolívar)	10,14	-75,68	14
	14	Pozo Rompida (Antioquia)	7,16	-73,94	150
	15	Las palomas (Antioquia)	7,76	-74,8	120
	16	Argelia (Magdalena)	9,55	-74,7	86
LUGARES EN EL SUR DE BOLÍVAR	1	San Pablo Sur	7,09	-74,27	309
	2	Santa Rosa del Sur	7,59	-74,44	729
	3	Simití	7,80	-74,02	159
	4	Montecristo	8,21	-74,66	26
	5	Arenal	8,31	-74,19	700
	6	Morales	8,38	-73,81	130
	7	Pinillos	8,80	-74,38	209
	8	Ciénaga Grande	9,03	-74,72	108
LUGARES EN EL NORTE DE BOLÍVAR	1	Escuela Naval Cioh	10,23	-75,32	1
	2	Apto Rafael Núñez	10,26	-75,3	2
	3	Sincerín	10,08	-75,16	10
	4	Apto Baracoa	9,16	-74,5	18
	5	San Pablo	10,02	-75,15	20
	6	Presa Ay Grande	9,52	-75,19	60
	7	El Guamo	10,02	-74,58	75
	8	Carmen de Bolívar	9,42	-75,06	152

Fuente: Autores

Por otro lado, para el desarrollo de instalaciones solares fotovoltaicas de tipo aislado se requiere un nivel de irradiancia entre 3,0 y 4,0 kWh/m<sup>2</sup>día. En lo relativo a instalaciones solares con conexión a red se requiere, además de mayor insolación (horas de sol) y lugares libres de sombras, un nivel de irradiancia superior a los 4,0 kWh/m<sup>2</sup>día. En zonas donde predomina la irradiancia difusa, no es conveniente llevar a cabo instalaciones fotovoltaicas, ya que la transformación de energía presenta un bajo rendimiento. Por esta razón, los lugares con importante nubosidad a lo largo del año no son aptos para el desarrollo de instalaciones solares fotovoltaicas con conexión a red [36].

En cuanto a los sistemas térmicos de concentración de baja temperatura (ACS), se requieren menores niveles de irradiancia solar del orden de los 2,5 y 3,0 kWh/m<sup>2</sup>día. Sin embargo, donde se requieren mayor irradiancia directa es en los sistemas térmicos de concentración de media y alta temperatura (CSP), ya que la temperatura que se debe alcanzar con esta tecnología es superior a los 400°C. Los lugares más idóneos deben tener muchas horas de sol directo, al menos 2000 kWh/m<sup>2</sup> de radiación solar por metro cuadrado al año [53].

Las mejores regiones son aquellas sin mucha humedad atmosférica, polvo o humo, como estepas, zonas de matorral, sabanas, semi-desiertos y auténticos desiertos, localizados idealmente a menos de 40 grados de latitud norte o sur. Por ello, en las zonas más prometedoras del mundo están incluidos los Estados sur-occidentales de Estados Unidos, América Central y del Sur, Norte y Sur de África, los países mediterráneos, Oriente Próximo y Oriente Medio, Irán y las planicies desérticas de India, Pakistán, la antigua Unión Soviética, China y Australia [53].

## **6.2. Solar fotovoltaica**

En general, en todo el departamento se encuentra un potencial adecuado para la implementación de sistemas solares fotovoltaicos tanto aislados como conectados a red. El potencial solar es bastante apreciable en la zona Norte del departamento y va disminuyendo a medida que se va hacia el sur debido a la presencia de relieves irregulares y vertientes hidrográficas bastante importantes.

Hay zonas con valores de irradiancia difusa bastante apreciable y en algunos meses del año estos valores casi igualan a la irradiancia directa lo que se convierte en un factor negativo para el funcionamiento adecuado de los sistemas solares fotovoltaicos.

### **6.3. Solar térmica**

La principal aplicación de la energía solar térmica radica en el calentamiento de un fluido. Son instalaciones muy sencillas, menos costosas y más fáciles para adopción en los hogares, industria y comercio en general. Para calentamiento de agua sanitaria para uso doméstico, este tipo de tecnología no tendría buena acogida en la costa Caribe colombiana debido al poco uso de agua caliente por parte de la población. Donde sí puede ser aprovechada es en el sector terciario tales como centros comerciales, grandes superficies, hospitales y hoteles, y en procesos industriales que requieren agua caliente.

Con los niveles de radiación presentados en este documento, se puede decir que en todos los lugares estudiados en el departamento de Bolívar se puede implementar este tipo de tecnología. Con respecto al desarrollo de los sistemas térmicos de concentración de media y alta temperatura, no se dispone de un recurso adecuado en todo el departamento, ya que no hay zonas desérticas apreciables.

En general, podrían encontrarse inconvenientes en la región que podrían impedir el desarrollo de esta tecnología en la región entre los que se destacan presencia de grupos armados, uso de la tierra especialmente para cultivos, presencia de comunidades vulnerables, entre otras.

# CAPÍTULO 7: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA

## 6.1. Biomasa

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas pues en ellos se producen residuos (rastros) que normalmente son dejados en el campo al consumirse sólo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos. En la agroindustria, los procesos de secado de granos generan subproductos que son usados para generación de calor en sistemas de combustión directa; tal es el caso del bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de café y la de arroz [54].

## 6.2. Importancia del maíz, el arroz y el coco en Colombia

El maíz y el arroz son los principales cultivos transitorios de la agricultura colombiana [55]. El maíz (*Zea mays*) se cultiva en todo el territorio y sus siembras se realizan en dos temporadas al año, coincidiendo con las épocas de lluvia de cada semestre. El maíz es considerado el principal cultivo de ciclo corto ya que ocupa el 15% del área agrícola, es generador del 4% de los empleos agrícolas y aporta un 3% al PIB agropecuario. El área de siembra se distribuye entre dos tipos: maíz blanco que ocupa el 33,2% de la superficie y maíz amarillo con el 66,8%, el primero dedicado principalmente a consumo humano y el segundo para consumo animal, ya sea en forma directa o como insumo para la fabricación de alimentos balanceados. La producción de ambos tipos de maíz tiene los mismos requerimientos, por lo que el área se desplaza hacia uno u otro, dependiendo de las condiciones del mercado [56].

En los cultivos de maíz, se genera una gran cantidad de materia orgánica la cual alrededor del 50% se cosecha en forma de grano y el porcentaje restante corresponde a residuos como la caña, hojas, tusa, panoja, capacho, entre otras. Según investigaciones realizadas en el departamento de Bolívar, con base en la información suministrada por la Secretaria de Agricultura de Bolívar y de la Encuesta Nacional Agropecuaria del año 2006, para una producción de maíz de 1.368.996 t/año se generan alrededor de 1.728.642 t/año de rastrojo, 369.629 t/año de tusa y 288.858 t/año de capacho. Estos residuos pueden ser utilizados en diferentes procesos como en la obtención de fibra para alimentación animal y producción de etanol o para la cobertura del suelo con el fin de protegerlo de las condiciones ambientales ya implementado en el departamento de Bolívar [57].

Los residuos generados del procesamiento del arroz (*Oryza sativa*), constituyen un valor aproximado al 20% de su producción mundial. Se estima que se generan aproximadamente 700.000.000 t/año de residuos, convirtiéndose en uno de los residuos mayoritarios de la producción agrícola en países que producen arroz [58]. Debido a que la cantidad de subproductos del arroz es elevada e industrialmente son poco reutilizados, su aprovechamiento podría enfocarse en la obtención de etanol, la sustitución del uso de carbón para la producción de energía en las plantas de procesamiento, en la adecuación del suelo y como sustrato para los cultivos, o como para la obtención de sílice como material suplementario de cemento, entre otros. En estudios realizados en el departamento del Meta, se estimó que para una producción de 2.463.689 t/año de arroz se generan alrededor de 5.789.669 t/año de residuos de tamo de arroz y 492.738 t/año de cascarilla de arroz, los cuales pueden tener un potencial energético si son reutilizados de 20.699,41 TJ/año y 7.136,53 TJ/año respectivamente [59].

Del 100% de un coco (*Cocos nucifera*) se aprovecha aproximadamente 17% que es el material comestible. En algunos casos, el endocarpio, se ocupa para la elaboración de artesanías. El resto es la fibra llamada bonote, se usa para el encendido de hornos artesanales existentes en las casas rurales de las regiones costeras, así como en la elaboración de fertilizante, también puede ocuparse como material de relleno en las azoteas. En Latinoamérica, Colombia es el país con mayor avance en la investigación sobre el uso de las fibras naturales, estudiando la fibra de coco como refuerzo en el concreto, donde las proporciones de la fibra se añadieron respecto al peso del cemento,

observando los aspectos relacionados con su tratamiento antes del mezclado; el comportamiento mecánico del concreto fue satisfactorio [59].

### **6.3. Pirolisis**

Se trata de un proceso de descomposición de biomasa a través de una oxidación incompleta en ausencia de oxígeno que genera compuestos sólidos (carbón vegetal), líquidos y gaseosos aptos como materiales para distintas industrias o como combustibles. Las cantidades relativas de los tres productos que se obtienen dependen de la temperatura a la que se opere y del tiempo de residencia utilizado en el proceso [60]. La pirólisis con aprovechamiento pleno de subproductos tuvo su gran auge antes de la difusión masiva del petróleo, ya que constituía la única fuente de ciertas sustancias (ácido acético, metanol, etc.) que luego se produjeron por la vía petroquímica. Hoy en día, sólo la producción de carbón vegetal reviste importancia cuantitativa. El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja frente a la biomasa que le dio origen, de tener un poder calórico mayor o, lo que es lo mismo, un peso menor para igual cantidad de energía, lo que permite un transporte más fácil. No obstante, debe hacerse notar que la carbonización representa una pérdida muy importante de la energía presente en la materia prima, ya que en el proceso consume gran cantidad de ella [61].

### **6.4. Biocombustibles solidos**

Los biocombustibles sólidos más importantes, combustibles de tipo primario, son los constituidos por materiales lignocelulósicos procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen este tipo de residuos. La paja, los restos de poda de vid, olivo o frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas y aclareos de las masas forestales son materia empleada en la elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario. Cáscaras de frutos secos, huesos de aceitunas y de otros frutos, residuos procedentes de la extracción del aceite de orujo en las almazaras, restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una materia prima de calidad para utilizarla como biocombustible sólido. Mediante la combustión de esta biomasa se obtiene energía que se aprovecha directamente como energía térmica o se transforma en energía

eléctrica. El poder calorífico inferior, variable con la humedad del combustible, es la característica más representativa de su calidad [62].

## **6.5. Métodos termogravimétricos (tga)**

En un análisis termogravimétrico se registra, de manera continua, la masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada, o bien en función de la temperatura, o bien en función del tiempo. En el primer caso (experimento dinámico) la temperatura de la muestra va aumentando de manera controlada (normalmente de forma lineal con el tiempo), y en el segundo (experimento isoterma), la temperatura se mantiene constante durante todo el experimento. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo o de la temperatura se denomina termograma o curva de descomposición térmica. Existen otros tipos de análisis denominados de termogravimetría diferencial donde se registra o representa la variación de masa o derivada con respecto a la temperatura o respecto al tiempo dependiendo de que el experimento sea dinámico o isoterma respectivamente [63].

## CAPITULO 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN EVALUACIÓN POTENCIAL BIOMASA

### 8.1. Caracterización de las biomásas

Las biomásas seleccionadas para este estudio correspondieron a: cascarilla de arroz, cáscara de coco y hojas de maíz. A continuación, se presentan los resultados del análisis próximo, último y análisis de componentes realizado a estas muestras según lo descrito en la metodología y consolidado en la Tabla 26.

**Tabla 26.** Análisis próximo, último y análisis de componentes de las muestras de biomasa.

<b>Análisis próximo %masa, base seca</b>			
	<b>Cáscara de Arroz</b>	<b>Cáscara de Coco</b>	<b>Hojas de Maíz</b>
<b>Humedad</b>	8.61	8.83	4.62
<b>Ceniza</b>	22.37	0.49	3.87
<b>Materia volátil</b>	72.69	92.16	83.78
<b>Carbono fijo</b>	4.94	7.35	12.35
<b>Sulfuros</b>	0.05	0.03	0.10
<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>	15.31	24.29	20.56
<b>Análisis último %masa, base seca</b>			
<b>Carbono</b>	34.60	47.7	42.30
<b>Hidrógeno</b>	4.28	5.44	5.87
<b>Nitrógeno</b>	0.30	0.06	0.46
<b>Oxígeno</b>	38.37	46.25	47.31
<b>Análisis de componentes %masa</b>			
<b>Lignina</b>	19.5830	12.3397	5.3592
<b>Holocelulosa</b>	62.3871	74.8178	63.6650
<b>Alfa-celulosa</b>	60.3279	74.4514	1.7036
<b>Hemicelulosa</b>	2.0592	0.3663	61.9614
<b>Extractivo</b>	2.35	2.64	13.96

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos del análisis último y los valores de poder calorífico mostrados en la Tabla 1 son típicos de este tipo de muestras y se relacionan con los reportados en la literatura [64], [65]. Se observó además que un mayor contenido de ceniza influye en la disminución de la energía disponible de la biomasa [66], como es el caso de la cáscara de arroz que presenta el mayor porcentaje de cenizas (22.37%) y el menor valor de poder calorífico (15.31 MJ/kg), seguido de la biomasa de hojas de maíz y cáscara de coco.

En lo que respecta a los resultados obtenidos de la composición química de materiales lignocelulosicos, se encontró que la holocelulosa existe como la composición predominante en la mayoría de estos materiales [67], [68]. Según el resultado, el contenido de holocelulosa en todas las muestras de biomasa comprendía más de la mitad de la composición sólida total, lo que demuestra que la celulosa y la hemicelulosa son el contenido principal de las biomásas en estudio.

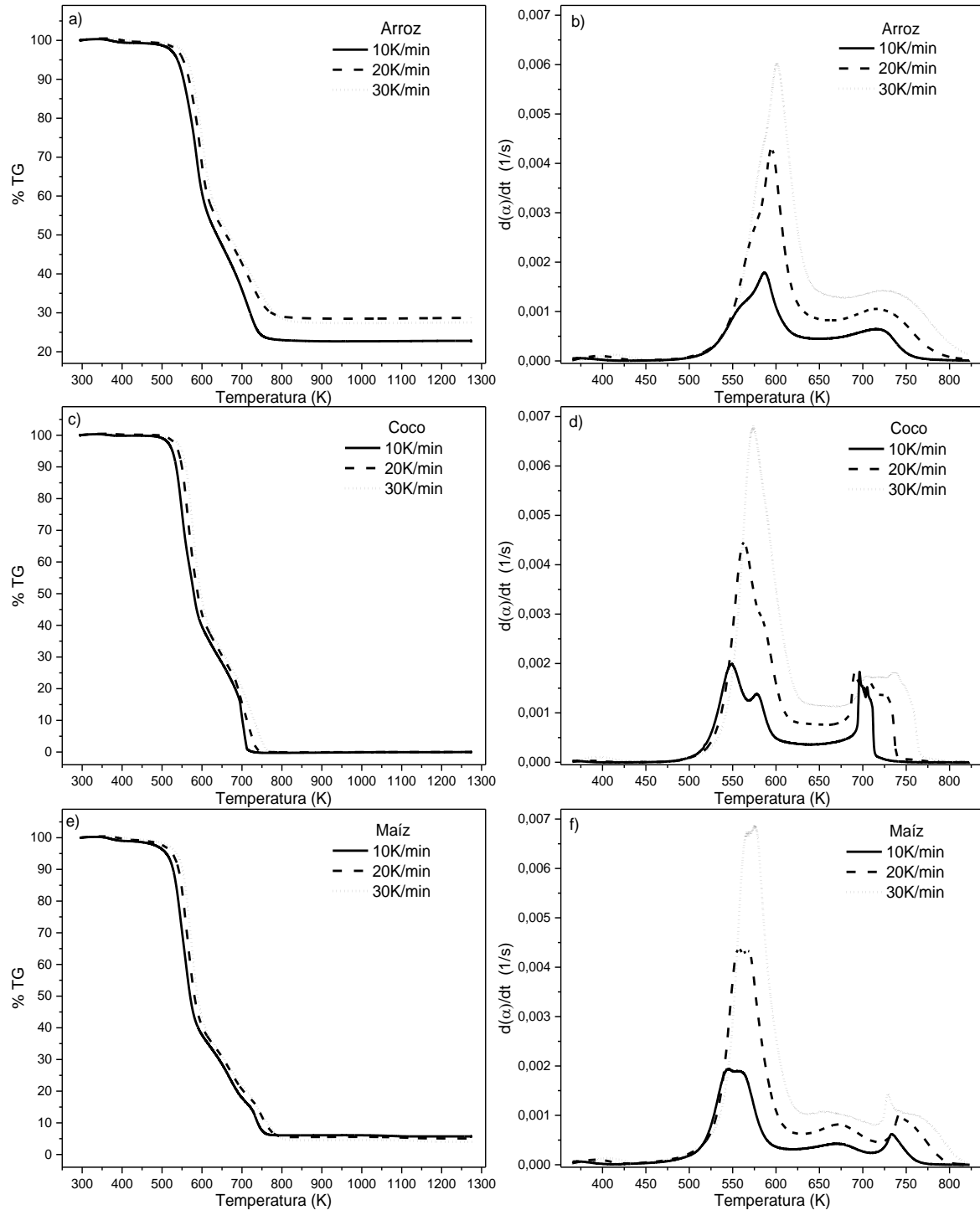
## **8.2. Análisis termogravimétrico**

Para el estudio de las características de la reacción de oxidación, cada biomasa fue sometida a un programa de calentamiento desde temperatura ambiente ( $\sim 298$  K) hasta 1273 K a una velocidad 10 K/min, 20 K/min y 30 K/min. La oxidación se llevó a cabo con aire sintético en exceso, porque el oxígeno que se encuentra diluido permite controlar la reacción exotérmica [69]. La Figura 1 muestra los perfiles termogravimétricos (TG) y térmico diferencial (DTG) obtenidos de la combustión de las muestras de biomasa en estudio. La Figura 1 (a) y 1(b) corresponden a las muestras de cascarilla de arroz tratadas a las diferentes velocidades de calentamiento (10 K/min, 20 K/min y 30 K/min), La Figura 1(c) y 1(d) corresponden a las muestras de cáscara de coco y del mismo modo se presentan los perfiles obtenidos de los tratamientos realizados a las muestras de hojas de maíz en las Figuras 1(d) y 1(e).

El comportamiento que siguen las muestras es que a mayores velocidades de calentamiento aumenta la velocidad de conversión como se aprecia en los eventos pronunciados en las curvas DTG de la Figura 56. Al disminuir la velocidad de calentamiento se disminuyen efectos de transferencia de calor, ya que se provee menos energía térmica en el tiempo, lo que conlleva a que disminuya la velocidad de conversión de las muestras. Sin embargo, a menor velocidad de

calentamiento es posible notar que la reacción de oxidación inicia a temperaturas levemente menores comparadas con las muestras tratadas a 20 y 30 K/min y del mismo modo el proceso de degradación finaliza a temperaturas inferiores cuanto menor es la tasa de calentamiento; esto sugiere que a 10 K/min el sistema requiere mayor tiempo para que se dé la combustión aumentando la capacidad térmica lo que deriva en que los eventos se presenten a temperaturas inferiores [70], [71].

Los perfiles DTG muestran que hay más de un evento durante el proceso de oxidación, estos ocurren dentro de la zona de reacción que está comprendida entre 500-800 K. Las muestras de cascarilla de arroz experimentan dos pérdidas importantes de masa lo largo de dos períodos determinados de temperatura: el primer evento ocurre en el rango de temperaturas de 525-625 K, 530-643 K y 535-657 K; el segundo ocurre entre 675-752 K, 683-776 K y 694-798 K para las muestras tratadas a 10, 20 y 30 K/min respectivamente.



**Figura 56.** Termogramas TG y DTG de la combustión de las biomásas a diferentes velocidades de calentamiento.

**Fuente:** Autor

Para las muestras de cáscara de coco también es posible evidenciar dos eventos principales de pérdida de masa que tienen lugar entre 512-600 K, 522-620 K y 530-635 K para el primer evento. El segundo evento ocurre entre 689-714 K 682-739 K y 688-766 K para las muestras tratadas a 10, 20 y 30 K/min respectivamente. De la misma forma las muestras de hojas de maíz exhiben en sus perfiles térmicos diferenciales dos zonas de reacción que se producen en el intervalo de temperaturas de 507-600 K, 513-621 K, 519-631 K para el primer evento; el segundo evento se produce 713-759 K, 726-789 K y 718-805 K para las muestras tratadas a 10, 20 y 30 K/min respectivamente.

De manera particular es posible notar que, con la disminución de la tasa de calentamiento, los perfiles termogravimétricos obtenidos de la combustión de las muestras de cáscara de coco tienen un comportamiento que evidencia la presencia de múltiples picos superpuestos sobre los picos principales de pérdida de masa. En la Figura 56 (d) la muestra de Coco10 K/min presenta un desdoblamiento en el primer evento, indicando que hay más de una estructura oxidándose a diferentes temperaturas dentro de esa primera zona de reacción, pero al aumentar la velocidad de calentamiento la ausencia de este hombro evidencia que las reacciones ocurren a temperaturas muy cercanas y que los picos se solapan dando lugar a un único evento súbito de pérdida de masa para esta zona. Por otro lado, se observa que, para el segundo evento principal de pérdida de masa, a mayores velocidades de calentamiento el pico se ensancha haciendo que la zona de reacción se prolongue hacia temperaturas mayores.

En el caso de las muestras de hojas de maíz, en la Figura 56(f) se observa una curva poco pronunciada entre los dos eventos principales de pérdida de masa, este comportamiento sugiere que la biomasa tiene más de una estructura que se oxida a diferentes temperaturas. Al igual que ocurrió al oxidar las muestras de cáscara de coco, a mayores velocidades de calentamiento el pico del segundo evento durante la oxidación de la biomasa de maíz se ensancha haciendo que la zona de reacción se extienda obteniendo temperaturas mayores para el final de reacción.

A partir de los perfiles mostrados en la Figura 56 se dedujeron los parámetros termogravimétricos consolidados en la Tabla 27; esta incluye: a) temperaturas características  $T_i$ ,  $T_p$ , y  $T_f$ , b) masa residual después de la reacción (MR) y c) máxima velocidad de conversión ( $d\alpha/dt$ ).

**Tabla 27.** Parámetros termogravimétricos deducidos de las curvas obtenidas de la combustión de las diferentes biomásas.

<b>Muestra</b>	<b><math>\beta</math> (K/min)</b>	<b><math>T_i</math> (K)</b>	<b><math>T_{p1}</math> (K)</b>	<b><math>T_{p2}</math> (K)</b>	<b><math>T_f</math> (K)</b>	<b>MR (%)</b>	<b><math>d\alpha/dt</math> (s<sup>-1</sup>)</b>
<b>Arroz</b>	10	522	586	721	752	22.75	0.00174
	20	530	595	723	776	28.65	0.00423
	30	535	601	736	798	27.51	0.00601
<b>Coco</b>	10	512	549	696	714	0.00	0.00190
	20	522	563	689	739	0.00	0.00442
	30	530	574	736	766	0.00	0.00677
<b>Maíz</b>	10	507	546	732	759	5.70	0.00195
	20	513	558	739	789	5.05	0.00438
	30	519	574	729	805	3.99	0.00688

**Fuente:** Autor

Como se observa en la Tabla 2, los valores de  $T_i$  no presentan diferencias significativas entre biomásas, pero es notable que los valores de  $T_f$  para las muestras de cáscara de coco son menores comparadas con las muestras de hojas de maíz y a su vez con las muestras de cascarilla de arroz.

Las temperaturas de máximas pérdidas de masa, para el primer evento, siguen una tendencia a aumentar de manera directa con el aumento de la velocidad de calentamiento; este comportamiento no se evidencia para las muestras en el segundo evento o zona de reacción. En términos generales, las muestras de cáscara de coco son las que presentan menor temperatura pico para este último evento. En lo que respecta a los valores de máxima velocidad de conversión, para las tres biomásas, los valores son muy cercanos y siguen la tendencia a aumentar con el aumento de la tasa de calentamiento. También se ha observado temperaturas máximas, intervalos de reacción y perfiles térmicos similares en la literatura [72], [73].

De las biomásas estudiadas, los valores de masa residual o cenizas son mayores para la biomasa de cascarilla de arroz dando como resultado entre 22-29 %, seguida las muestras de hojas de maíz cuyas cenizas se encontraron entre 5-6 %; las muestras de cáscaras de coco no dejaron ningún tipo de residuos después de la oxidación. Estos valores se relacionan con los resultados obtenidos en la caracterización de cada biomasa encontrados mediante análisis próximo.

### **8.3. Análisis cinético mediante el modelo de distribución de energías de activación (DAEM)**

El modelo de energía de activación distribuida (DAEM) se ha utilizado con éxito para describir la degradación térmica de varios materiales sólidos[74]–[77], ya sea en atmósfera inerte u oxidativa, todo el proceso de degradación térmica consiste en una serie de reacciones irreversibles de primer orden que ocurren de manera sucesiva y una dependencia de Arrhenius para la constante cinética. Las energías de activación para las reacciones involucradas se consideran distribuidas en una función de distribución gaussiana con parámetros  $E_{0,j}$  y  $\sigma_j$ . [78] [79]. Los parámetros cinéticos de reacción se derivan de varias curvas TGA que se obtienen típicamente para experimentos a baja velocidad de calentamiento constante.

En este estudio se encontró que con el uso de tres funciones gaussianas se podían modelar satisfactoriamente los datos experimentales obtenidos a partir de las muestras de biomasa estudiadas por termogravimetría asumiendo que durante el proceso de combustión ocurre la descomposición de sus tres componentes principales: hemicelulosa, celulosa y lignina[72], [80]. Por lo general, los tres componentes de manera simultánea no son claramente definidos como eventos independientes, sino que aparecen sobre las curvas DTG como dos eventos en el cual coexisten los fenómenos. El rango de temperatura evaluado con el DAEM correspondió a 453-833 K, en el que se excluye el evento de la liberación de humedad.

Las Figura 57, 58 y 59 permiten ilustrar el ajuste obtenido con tres conjuntos de reacciones DAEM para las muestras de cascarilla de arroz, cáscara de coco y hojas de maíz respectivamente, a diferentes velocidades de calentamiento. El primer pico observado en los perfiles de las diferentes biomásas corresponde a la fracción más reactiva (hemicelulosa) que es rápidamente degradada a

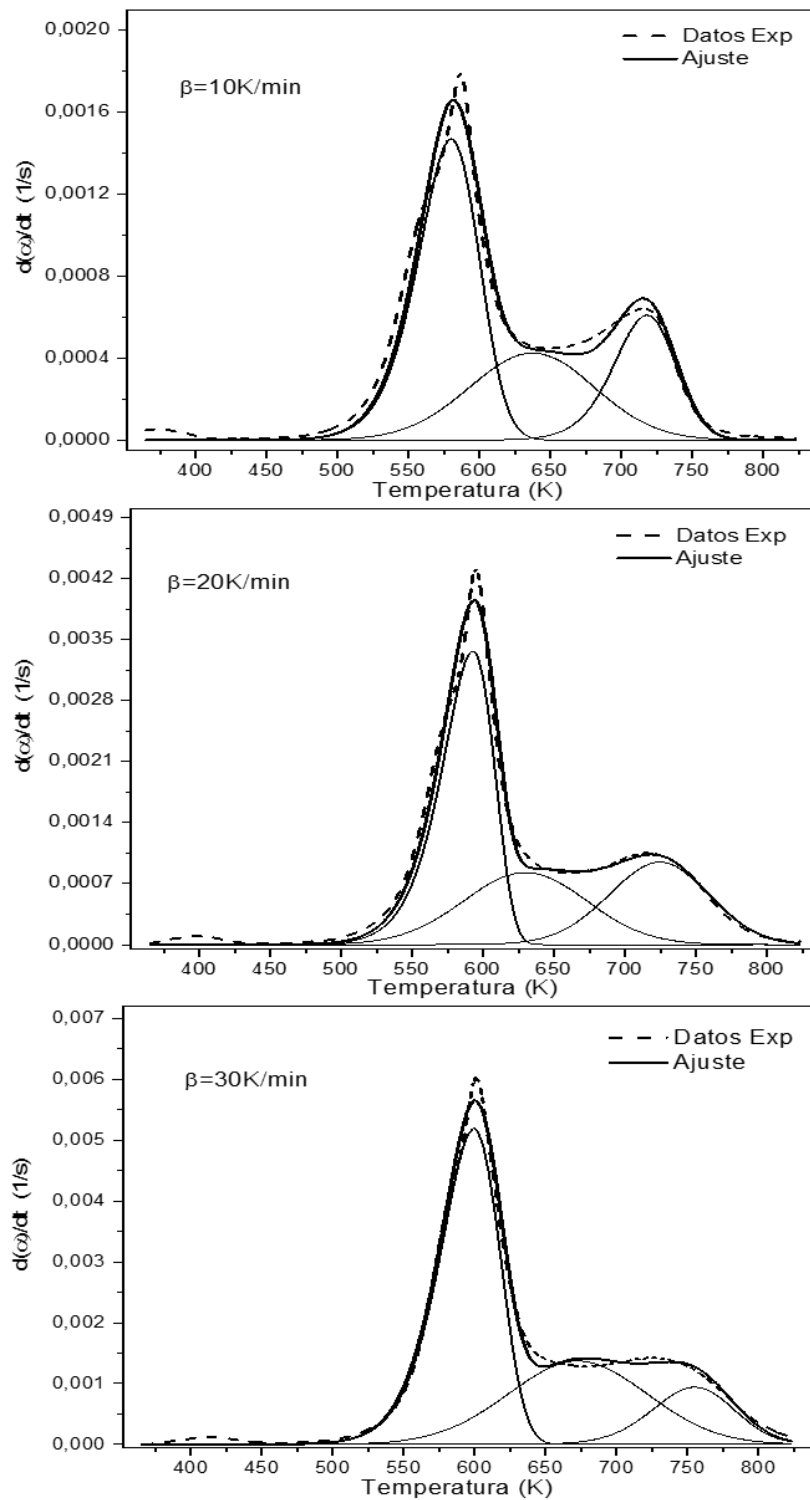


PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE

temperaturas relativamente bajas (453-623 K) desprendiendo volátiles que se oxidan en atmósfera de aire y es la responsable en gran medida de la generación de gases de combustión. Cuando la temperatura aumenta la siguiente fracción menos “blanda”, atribuida a la celulosa, es degradada térmicamente en el rango de temperaturas de 548-623 K; mientras que la fracción más difícil de oxidar se atribuye a la lignina que comprende un rango de temperatura más elevado (523-773 K)[81], [82].



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE



**Figura 57.** Ajuste del modelo DAEM a los datos DTG de las muestras de biomasa de cascarilla de arroz durante la combustión a diferentes velocidades de calentamiento.

**Fuente:** Autor

El ajuste a la curva obtenido por el modelo DAEM para las muestras de cascarilla de arroz se muestra en la Figura 2 presentado con una línea continua, mientras que los datos experimentales se muestran como una línea punteada. Es posible observar un buen ajuste del modelo a los datos experimentales a las diferentes velocidades de calentamiento.

Las curvas referentes a cada conjunto de reacción fueron representadas por los componentes principales de la biomasa: hemicelulosa, celulosa y lignina respectivamente. En la Figura 2 es posible notar que a medida que aumenta la tasa de calentamiento la combustión de hemicelulosa se ve favorecida, de la misma manera ocurre con la celulosa; sin embargo, al comparar esta última con la lignina, se evidencia que a 30 K/min la velocidad de conversión de la lignina es menor. Esto se corrobora al comparar los valores de los parámetros cinéticos obtenidos mediante el DAEM que se encuentran consolidados en la Tabla 2, más específicamente en el valor  $C_{3norm}$  que representa la contribución de la reacción parcial de la lignina a la cantidad medida[83], que a 30 K/min tiene un valor de 0.13544, mientras que a 10 y 20 K/min los valores fueron 0.21169 y 0.25417 respectivamente.

En la Tabla 28 se listan los parámetros calculados mediante este algoritmo, donde la primera energía de activación y el primer factor pre-exponencial corresponderán probablemente a la descomposición de la hemicelulosa y los segundos parámetros a la descomposición de la celulosa. Para la lignina, los parámetros de energía de activación y factor pre-exponencial corresponderán a los denotados como  $E_{03}$  y  $A_3$ .

**Tabla 28.** Parámetros cinéticos de la cascarilla de arroz obtenidos mediante DAEM

Parámetros	Arroz 10K/min	Arroz 20 K/min	Arroz 30 K/min
$C_{1norm}$	0.498	0.476	0.537
$A_1$ (1/s)	5.333E+11	1.049E+12	5.608E+11
$E_{01}$ (kJ/mol)	153.5389	155.9290	153.1281
$\sigma_{01}$ (kJ/mol)	6.155	0.007	4.179
$C_{2norm}$	0.290	0.269	0.327
$A_2$ (1/s)	9.540E+12	1.003E+14	5.519E+12
$E_{02}$ (kJ/mol)	185.1260	191.77338	187.17781
$\sigma_{02}$ (kJ/mol)	23.559	24.498	25.296
$C_{3norm}$	0.211	0.254	0.135
$A_3$ (1/s)	4.127E+17	1.060E+17	5.894E+16
$E_{03}$ (kJ/mol)	270.6743	261.9900	266.6918
$\sigma_{03}$ (kJ/mol)	11.038	22.366	15.809

Fuente: Autor

En general se observó que la energía de activación requerida en la combustión de las muestras a diferentes velocidades de calentamiento ( $\beta$ ) presenta valores similares: entre 153-156 kJ/mol para el primer conjunto de reacciones; entre 185 y 192 kJ/mol para el segundo conjunto y entre 261-270 kJ/mol para el tercer conjunto de reacciones, lo cual sugiere que la energía de activación es independiente de la velocidad de calentamiento entre 10 a 30 K/min.

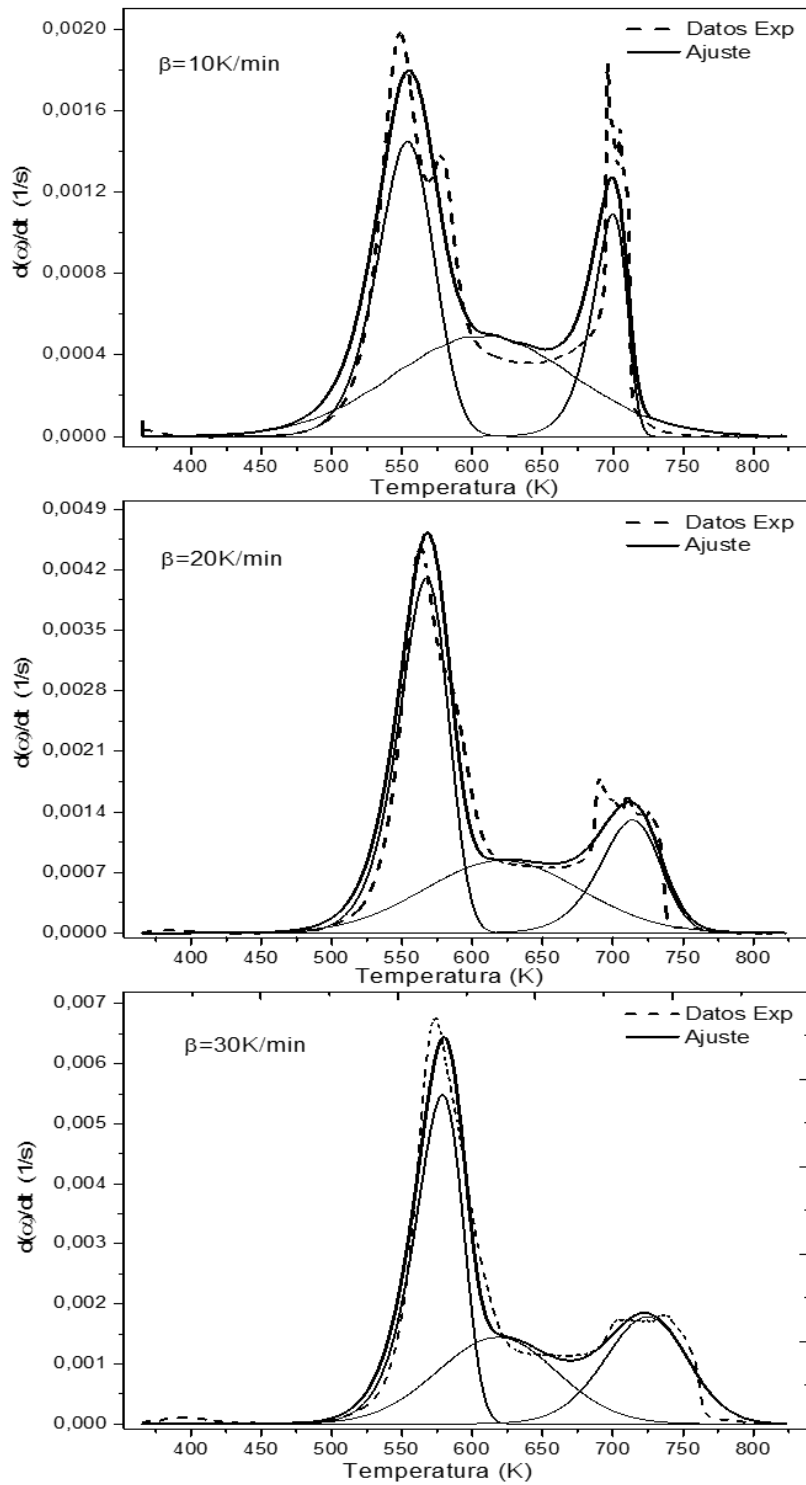
De la misma manera en que ocurre con las muestras de cascarilla arroz, al aumentar la velocidad de calentamiento ( $\beta$ ), la reacción de descomposición de hemicelulosa en las muestras de cáscara de coco se ve favorecida. Sin embargo, la velocidad de descomposición de la celulosa decrece conforme aumenta la velocidad de descomposición de la lignina. Ambos efectos pueden apreciarse en la Figura 3 y se corrobora además con los valores de  $C_{1norm}$ ,  $C_{2norm}$  y  $C_{3norm}$  consolidados en la Tabla 29.

**Tabla 29.** Parámetros cinéticos de la cáscara de coco obtenidos mediante DAEM.

Parámetros	Coco 10 K/min	Coco 20 K/min	Coco 30 K/min
$C_{1norm}$	0.391	0.492	0,454
$A_1$ (1/s)	6.311E+13	7.585E+13	5.750E+13
$E_{01}$ (kJ/mol)	168.0310	169.2301	169.2598
$\sigma_{01}$ (kJ/mol)	7.902	4.718	2.828
$C_{2norm}$	0.421	0.3109	0.289
$A_2$ (1/s)	8.440E+13	6.773E+13	4.190E+13
$E_{02}$ (kJ/mol)	187.8507	187.4075	181.4682
$\sigma_{02}$ (kJ/mol)	39.420	32.453	22.975
$C_{3norm}$	0.186	0.196	0.255
$A_3$ (1/s)	9.957E+22	1.725E+16	7.556E+16
$E_{03}$ (kJ/mol)	333.1203	246.3759	257.3382
$\sigma_{03}$ (kJ/mol)	0.646	8.769	17.028

Fuente: Autor

Se encontró que la energía de activación requerida en la combustión de biomasa de cáscara de coco a diferentes velocidades de calentamiento ( $\beta$ ) presenta valores similares: alrededor de 169 kJ/mol para el primer conjunto de reacciones; entre 181 y 188 kJ/mol para el segundo conjunto y entre 246-258 kJ/mol para el tercer conjunto de reacciones. Para este último conjunto se consiguió el menor ajuste de los datos obtenidos por DAEM a los experimentales para la muestra de Coco tratada a 10K/min, por lo que el valor de energía de activación obtenido de 333 kJ/mol es atípico y mayor que el obtenido para coco a 20 y 30 K/min (ver Figura 3).



**Figura 58.** Ajuste del modelo DAEM a los datos DTG de las muestras de biomasa de cáscara de coco durante la combustión.

Fuente: Autor

En el caso de la biomasa de hojas de maíz (Figura ), el comportamiento térmico de las muestras es similar a las biomásas estudiadas anteriormente (cascarilla de arroz y cáscara de coco), donde es posible ver un aumento en la velocidad de descomposición ( $da/dt$ ) de hemicelulosa, con el aumento de la velocidad de calentamiento ( $\beta$ ). De forma contraria, hay una disminución de la contribución de volátiles producto de la degradación de hemicelulosa denotada como  $C_{1norm}$  en la Tabla 30.

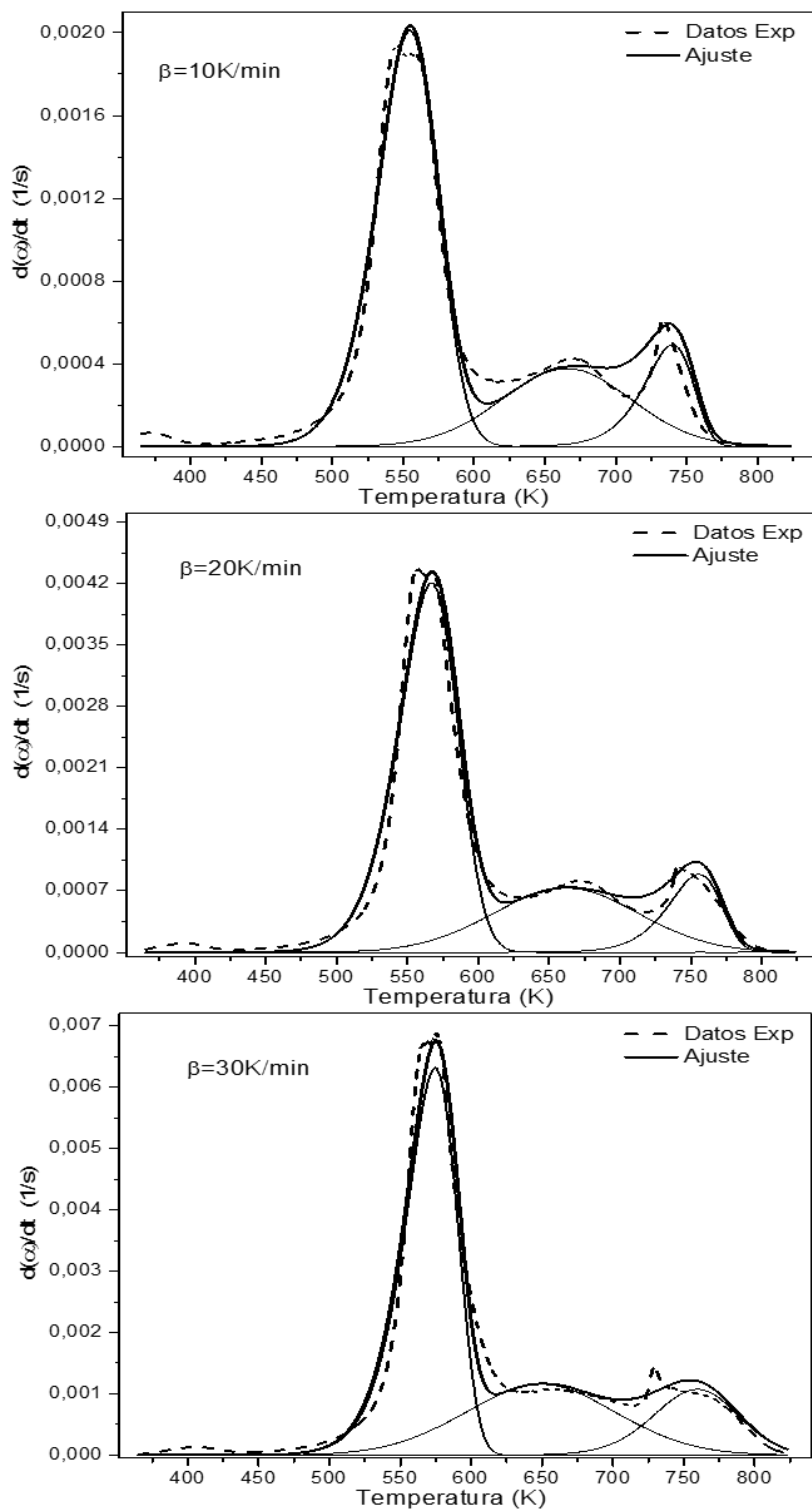
**Tabla 30.** Parámetros cinéticos de la cáscara de maíz obtenidos mediante DAEM.

Parámetros	Maíz 10K/min	Maíz 20K/min	Maíz 30K/min
$C_{1norm}$	0.62480	0.61480	0.55582
$A_1$ (1/s)	6.73145E+11	7.47278E+11	2.31962E+12
$E_{01}$ (kJ/mol)	147.74538	148.04293	153.04291
$\sigma_{01}$ (kJ/mol)	6.83976	5.72063	2.55996
$C_{2norm}$	0.24664	0.26279	0,28895
$A_2$ (1/s)	2.03446E+13	1.05836E+13	6.86335E+13
$E_{02}$ (kJ/mol)	198.12251	189.89902	193.76936
$\sigma_{02}$ (kJ/mol)	25.01945	27.79859	30.57507
$C_{3norm}$	0.12857	0.12241	0.15523
$A_3$ (1/s)	2.46043E+16	2.31721E+16	3.94684E+16
$E_{03}$ (kJ/mol)	260.89948	261.93343	265.90100
$\sigma_{03}$ (kJ/mol)	1.43238	3.57697	16.42444

Fuente: Autor



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE



**Figura 59.** Ajuste del modelo DAEM a los datos DTG de las muestras de biomasa de hojas de maíz durante la combustión.

Fuente: Autor

Al comparar los perfiles DTG obtenidos para cada biomasa y sus componentes principales es posible evidenciar que, para la biomasa de cáscara de coco, el rango de reacción de la celulosa disminuye con el aumento de  $\beta$ , mientras que la zona de reacción de la lignina aumenta. De manera particular, el comportamiento que siguen las muestras de hojas de maíz es a aumentar tanto el rango de reacción de la celulosa como el de la lignina con el aumento de  $\beta$ . Para las muestras de cascarilla de arroz no se encontró una tendencia en las zonas de reacción de los eventos.

Por otro lado, se evidenció que en general para todas las biomásas estudiadas, el aumento de la tasa de calentamiento tiene como resultado el solapamiento de los eventos de degradación de hemicelulosa y celulosa. Este hecho se ratifica con los valores de temperatura asociados al punto máximo de degradación mostrados en la Tabla 31.

**Tabla 31.** Temperaturas pico de cada componente principal de la biomasa a diferentes velocidades de calentamiento.

Muestra	Velocidad de calentamiento (K/min)	T <sub>H</sub> (K)	T <sub>C</sub> (K)	T <sub>L</sub> (K)
Arroz	10	580	639	718
	20	593	630	726
	30	599	675	756
Coco	10	553	609	699
	20	567	626	713
	30	578	621	725
Maíz	10	555	667	740
	20	567	666	756
	30	574	654	761

Fuente: Autor

\***TH:** Temperatura pico de hemicelulosa; **TC:** Temperatura pico de celulosa; **TL:** Temperatura pico de lignina.

En la Tabla 6 se observa que, para la biomasa de coco y maíz, la diferencia entre los valores de  $T_H$  y  $T_C$  es menor conforme aumenta  $\beta$ , mientras que para la biomasa de arroz este parámetro parece no incidir sobre las temperaturas a las que ocurre cada evento.

La degradación oxidativa para la hemicelulosa y celulosa ocurre a temperaturas más bajas comparadas con la lignina (Ver Tabla 6), dado que sus estructuras son amorfas, aleatorias y más “blandas”; estas diferencias en sus estructuras químicas conducen a diferentes reactividades [79], [80], por lo que la energía de activación requerida para llevar a cabo la combustión de estos polímeros orgánicos es menor. Esto quiere decir que los valores de energía de activación aumentan en el orden hemicelulosa, celulosa y finalmente lignina.

Los resultados de energía de activación para la descomposición de biomasa reportados en la literatura sugieren que hay una tendencia a aumentar dicho parámetro con el incremento de la velocidad de calentamiento [70], [84], sin embargo los resultados de este estudio sugieren que para 10, 20 y 30K/min los valores de energía de activación para cada conjunto de reacciones son similares entre velocidades ( $\beta$ ). Como puede observarse, no se tiene una diferencia significativa en las energías de activación. Algunos autores han demostrado que, en la descomposición térmica de fibras naturales, tal energía, no presenta variaciones importantes o varía muy poco después de iniciado el proceso [85].

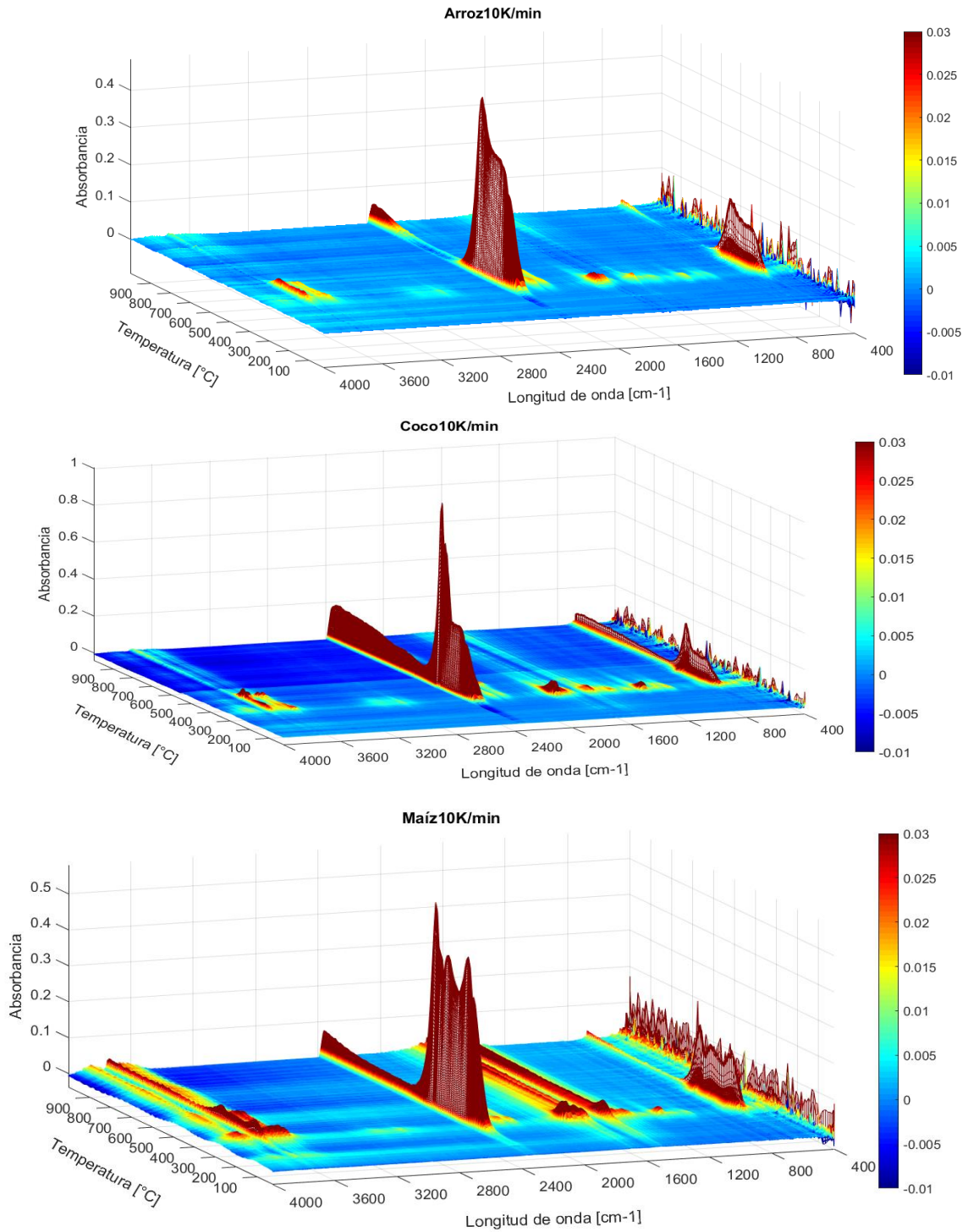
#### **8.4. Análisis FTIR de los gases de combustión**

La identificación de los principales productos gaseosos liberados del proceso de combustión de las diferentes biomásas se estudió en tiempo real utilizando un analizador termogravimétrico acoplado a un espectrofotómetro infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR). La termogravimetría ha demostrado ser una técnica muy valiosa para estudiar la combustión de una amplia gama de muestras sólidas [86]–[88]. Cuando se utiliza FTIR como una técnica complementaria se obtiene información detallada sobre la composición de productos gaseosos a medida que evolucionan durante la combustión. Cada espectro IR se obtuvo en un tiempo correspondiente a cada velocidad de calentamiento trabajada y el rango de exploración de éste fue de  $4000\text{-}400\text{cm}^{-1}$ .

La Figura 60 representa los espectros obtenidos de los gases volatilizados durante la combustión de las biomásas a una velocidad de calentamiento de 10 K/min. Estos gases se observan en el intervalo de temperaturas de 200-900 °C el cual corresponde a la zona en la que ocurren los eventos de mayor pérdida de masa.



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE



**Figura 60.** Espectros IR de los gases volatilizados durante la combustión de las biomásas a una velocidad de calentamiento de 10 K/min.

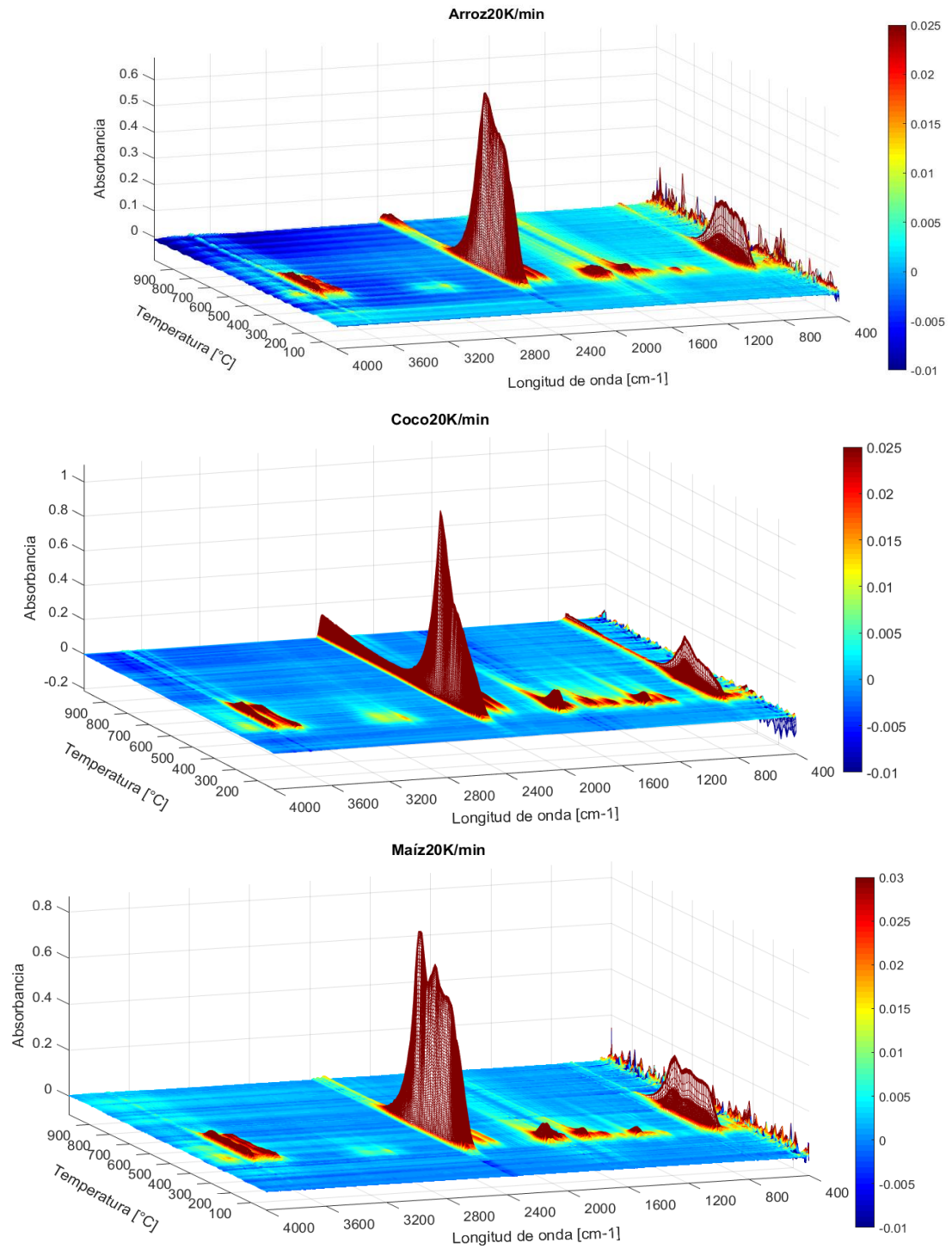
**Fuente:** Autor

En el espectro correspondiente a la muestra de cascarilla de arroz (Arroz10K/min) se observan picos de baja absorción situados entre  $3750 - 3538 \text{ cm}^{-1}$  atribuibles a las vibraciones de tensión del enlace OH de la molécula de  $\text{H}_2\text{O}$ , así como también las bandas características observadas a  $1830-1350 \text{ cm}^{-1}$  [89], [90]; de manera similar se identificó este grupo en las muestras de Coco10 K/min y Maíz10 K/min. El rango de temperatura en el que se encontraron estas vibraciones para la muestra Arroz 10 K/min fue  $300-500 \text{ }^\circ\text{C}$ , para la muestra Coco 10 K/min fue de  $300-450 \text{ }^\circ\text{C}$  y de manera particular para la muestra Maíz10 K/min dichas vibraciones inician alrededor de los  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  y se extienden hasta el final del calentamiento ( $1000^\circ\text{C}$ ).

Para las tres biomásas los picos de mayor absorción se asocian a la liberación de  $\text{CO}_2$  que pueden identificarse por la existencia única de bandas características en  $2350 \text{ cm}^{-1}$  y  $665 \text{ cm}^{-1}$  [91]; la evolución de este gas aumenta con la temperatura de combustión en las tres biomásas alcanzando su máxima producción a  $442 \text{ }^\circ\text{C}$  con una absorbancia 0.469 para Arroz10 K/min, a  $427 \text{ }^\circ\text{C}$  con una absorbancia de 1.006 para Coco10 K/min y  $466 \text{ }^\circ\text{C}$  y una absorbancia de 0.580 para Maíz10 K/min. La muestra de coco presenta el mayor valor de absorbancia para la especie  $\text{CO}_2$  y su evolución se mantiene a lo largo de la combustión. La presencia de dos picos de baja intensidad a  $2184 \text{ cm}^{-1}$  y  $2110 \text{ cm}^{-1}$  se asocia a la formación de CO [92], y a diferencia del  $\text{CO}_2$  su producción se limita al rango de temperatura de  $200-580 \text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente. La detección de  $\text{CO}_2$  y CO en este rango de temperatura sugiere que la reacción de descarboxilación (formación de CO y  $\text{CO}_2$ ) se ve favorecida simultáneamente en esta etapa de la combustión[93]. Del mismo modo que para las muestras combustionadas a una tasa de calentamiento de 10 K/min, es posible encontrar productos característicos del proceso de combustión como  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  y CO en las muestras de biomasa combustionadas a 20 K/min como se observa en la Figura 61. El pico máximo de evolución de  $\text{CO}_2$  para Arroz 20 K/min se encontró a  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  con una absorbancia de 0.670, para Coco 20 K/min este pico se encuentra a  $451 \text{ }^\circ\text{C}$  con una absorbancia de 1.098 y para Maíz 20 K/min a  $480^\circ\text{C}$  con una absorbancia de 0.865.



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE

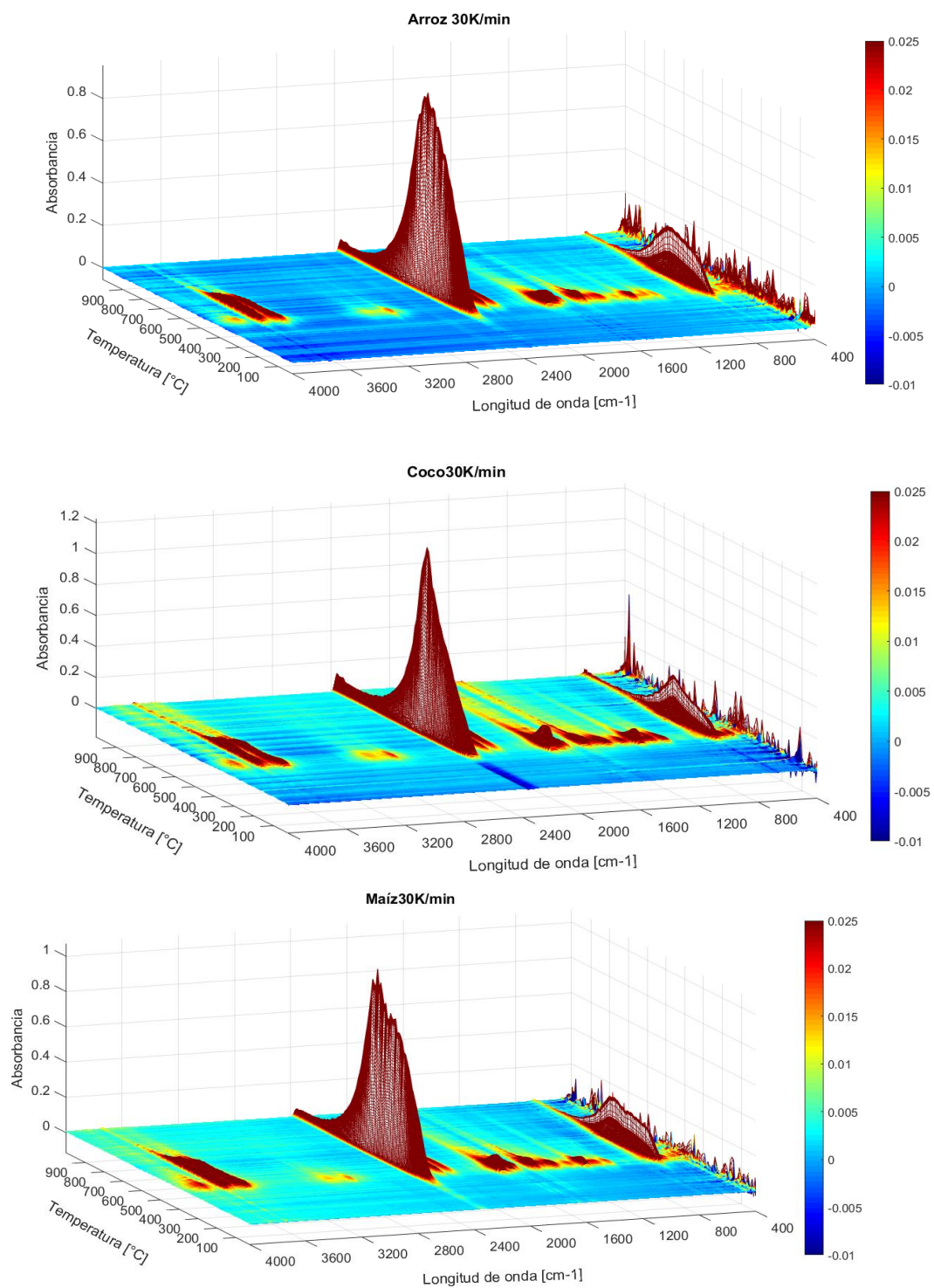


**Figura 61.** Espectros IR de los gases volatilizados durante la combustión de las biomásas a una velocidad de calentamiento de 20K/min.

Fuente: Autor

Se encontró además que con el aumento de la tasa de calentamiento es posible identificar vibraciones de baja intensidad asociadas al estiramiento del grupo metilo ( $\text{CH}_3$ ). El intervalo de  $3029\text{-}2650\text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones de tensión del enlace C-H en alcanos y generalmente indica la presencia del grupo metilo en dos bandas, simétrica y asimétrica [94]; esto se corrobora con el pico encontrado en la zona de  $1222\text{-}1120\text{ cm}^{-1}$  característico de vibraciones de estiramiento C-C en alifáticos. Las bandas de absorción donde se encuentran estas vibraciones son mayores para la muestra Coco 20 K/min.

La evolución de los gases para las muestras combustionadas a 30 K/min se muestran en la Figura 62. Dado que las intensidades de las bandas pueden usarse para estimar la cantidad relativa de los grupos funcionales[95], en estos espectros es posible evidenciar que a mayores velocidades de calentamiento hay una mayor evolución de gases de combustión ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ ) y mayor presencia de grupos alifáticos observados entre  $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ . En general, a medida que la temperatura de combustión aumenta (entre los  $200\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$ ) es posible identificar la liberación de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , e incluso la combustión de hidrocarburos más simples como  $\text{CH}_4$  según lo señalan otros autores[96], [97]. Aunque se ha encontrado que los óxidos de nitrógeno y de azufre son también productos de la combustión de diferentes biomásas[98], [99], la caracterización de las biomásas en estudio sugiere bajos niveles de nitrógeno y azufre presente en las muestras, por lo que no es posible su identificación en los espectros FTIR.



**Figura 62.** Espectros IR de los gases volatilizados durante la combustión de las biomásas a una velocidad de calentamiento de 30 K/min.

**Fuente:** Autor

En términos generales, a medida que se aumenta la tasa de calentamiento, las temperaturas de inicio de reacción y temperaturas pico se desplazan a temperaturas mayores, con la absorbancia creciendo a expensas de la velocidad.

Para estimar la magnitud de las emisiones de CO<sub>2</sub> y CO se calculó el área integral bajo la curva de los espectros FTIR en función de la temperatura[93], los resultados se muestran en la Tabla 32.

**Tabla 32.** Emisiones de CO<sub>2</sub> y CO de la combustión de las muestras de biomasa.

BIOMASA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO ( $\beta$ )	VALOR INTEGRAL DE CO <sub>2</sub>	VALOR INTEGRAL DEL CO	RELACIÓN CO <sub>2</sub> /CO
ARROZ	10	77.81	3.45	22.55
	20	142.78	5.53	25.82
	30	229.71	8.82	26.04
COCO	10	163.15	3.78	43.16
	20	175.20	8.06	21.74
	30	255.30	11.64	21.93
MAÍZ	10	112.98	6.47	17.46
	20	179.62	9.97	18.02
	30	273.09	14.31	19.08

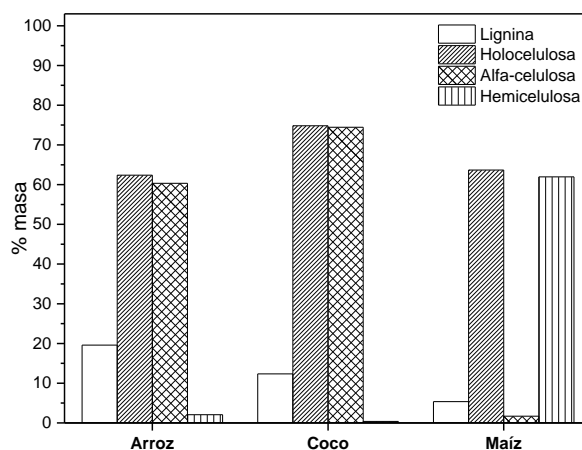
Fuente: Autor

De la Tabla 7 es posible concluir que las emisiones totales de CO<sub>2</sub> y CO estuvieron fuertemente influenciadas por la velocidad de calentamiento, al presentar mayores valores en el área de la curva del espectro a medida que aumenta la velocidad. La Tabla 7 contiene además la relación CO<sub>2</sub>/CO cuyos valores permiten inferir la eficiencia de la reacción de combustión, mientras mayor es el valor de esta relación mayor es la eficiencia[98], [100]; considerando lo anterior se concluye que la combustión de cáscara de coco tiene la mayor eficiencia asociada cuando se calienta a una tasa de 10 K/min.

## 8.5. Potencial energético

El conocimiento relacionado con el potencial energético de la biomasa contribuye a mejorar las acciones para el aprovechamiento eficiente de los residuos sólidos orgánicos con fines energéticos,

ligado a beneficios ambientales tales como la reducción de emisión de gases de efecto invernadero y la minimización de la disposición de contaminantes al suelo, agua y aire[101]. Los principales criterios utilizados para definir si la biomasa es aprovechable, en términos de potencial de uso para la producción de bioenergía, son: alto contenido de fibra y lignina, alta densidad, alto valor calorífico y bajo contenido de cenizas[102]. Debido a su influencia en el rendimiento del proceso de transformación de la biomasa en energía, en el presente estudio se determinó la composición de los constituyentes lignocelulósicos en cada una de las biomásas, encontrando que el contenido de holocelulosa en todas las muestras de biomasa comprendía más de la mitad de la composición sólida total, lo que demuestra que la celulosa y la hemicelulosa son el contenido principal de las biomásas en estudio. Esto se muestra en la Figura 63, donde se ilustra la composición de los constituyentes lignocelulósicos presentes en cada biomasa.



**Figura 63.** Composición de constituyentes lignocelulósicos presentes en cada biomasa.

**Fuente:** Autor

En lo que respecta a la lignina, el mayor contenido de ésta se encontró en la biomasa de cascarilla de arroz (19.58 %), seguido por la biomasa de cáscara de coco (12.33 %) y finalmente las hojas de maíz (5.35 %). Algunos autores señalan que una biomasa rica en fibra y lignina es deseable para su uso como combustible sólido en el proceso de combustión, puesto que se tiene un alto poder calorífico debido al alto contenido de carbono en la lignina[102]; sin embargo los resultados de este estudio sugieren que la cascarilla de arroz posee un menor poder calorífico a pesar de su alto

contenido de lignina, esto debido a que su alto contenido de cenizas condujo a una reducción en el valor calorífico y al carbono fijo.

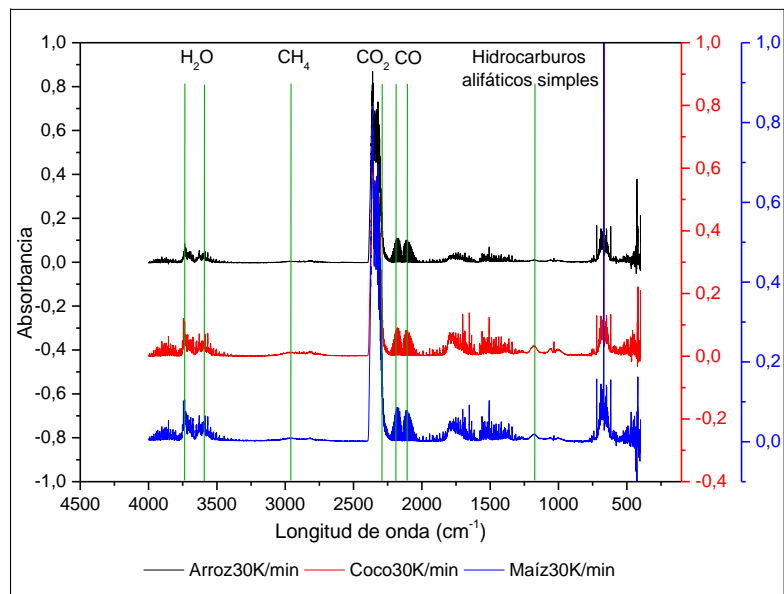
De las biomásas estudiadas la que presentó el mayor poder calorífico corresponde a la cáscara de coco con un valor de 24.29 MJ/kg, seguido de la biomasa de hojas de maíz con un valor de 20.56 MJ/kg y la biomasa de cascarilla de arroz con el menor poder calorífico (15.31 MJ/kg). Estos resultados se relacionan con el contenido de cenizas que tiene una influencia sobre el poder calorífico, en este sentido, la biomasa de cáscara de coco posee el menor contenido de ceniza (0.49 %) seguida de la biomasa de hojas de maíz (3.87 %), mientras que se reportan altos contenidos de ceniza para la biomasa de cascarilla de arroz (22.37 %); esto demuestra que un alto contenido en materia inorgánica disminuye el poder calorífico[66].

Otro aspecto importante para evaluar es el nivel de emisiones contaminantes generadas en el proceso de combustión de biomasa. Las características de emisión de gases contaminantes liberados por la combustión de las biomásas fueron estudiadas por TGA-FTIR. El uso del análisis termogravimétrico (TGA) junto con la espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es un enfoque eficaz para obtener la composición de gases evolucionados en función de su absorbancia específica a medida que la biomasa se descompone térmicamente [86], [87], [103]74].

Los contaminantes gaseosos encontrados durante la descomposición térmica de las biomásas en estudio se reportan en la Figura 64 y se listan a continuación: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) y metano ( $\text{CH}_4$ ). Otros productos de la combustión son  $\text{H}_2\text{O}$  e hidrocarburos alifáticos simples. Para una mejor visualización de los gases encontrados y teniendo en cuenta los perfiles estudiados en el FTIR a diferentes velocidades, sólo se muestra un espectro representativo por biomasa a una velocidad constante de 30 K/min.

Aunque en diversos estudios se ha encontrado que los óxidos de nitrógeno y de azufre son también productos de la combustión de diferentes biomásas, la caracterización de las biomásas en estudio

sugiere bajos niveles de nitrógeno y azufre presente en las muestras, por lo que no es posible su identificación en los espectros FTIR.



**Figura 64.** Espectros FTIR de los gases producidos por la combustión de las biomásas a 30 K/min.

**Fuente:** Autor

De acuerdo con las características de las biomásas estudiadas, la cascara de coco es un candidato potencial e idóneo para su uso en procesos de generación de energía térmica debido a su alto contenido de holocelulosa, alto valor calorífico y bajo contenido de ceniza. En lo que respecta las emisiones, se encontró una mayor producción de CO<sub>2</sub> en esta biomasa; este resultado se relaciona con una mayor disposición de carbono fijo y mayor eficiencia de la reacción. Por otro lado, la biomasa de hojas de maíz resultó ser también un buen candidato para la producción de energía térmica, de la cual se pueden obtener 20.56 MJ/kg de energía con bajos niveles de ceniza.

La cascarilla de arroz a pesar de tener un alto poder calorífico no sería potencialmente aprovechable para este proceso dada la alta cantidad de cenizas que se generan de su combustión, por lo que es importante continuar con más procesos de investigación en búsqueda de su aprovechamiento.

## **CAPITULO 9. RECURSO HÍDRICO EN EL DEPARTAMENTO DE BOLIVAR**

El departamento de Bolívar cuenta con una extensa red hidrográfica conformada por los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge y sus afluentes, ciénagas, caños, brazos y canales como el Dique, que constituyen ejes para el transporte de pasajeros y carga. Estos ambientes fluviales del complejo Magdalena – Cauca - San Jorge, según el IDEAM (2010), constituyen cerca del 70% de las áreas de ciénaga del país, conformando un sistema de amortiguación hídrica frente a los desbordes e inundaciones que anualmente se presentan.

Dos cuencas hidrográficas principales se encargan de coleccionar y evacuar casi la totalidad del agua de escorrentía producida: por los ríos Cauca y Magdalena.

### **9.1. Cuenca del río Cauca**

La cuenca del río Cauca se ubica en la porción Suroccidental del departamento y a través de ella drenan las aguas de la vertiente occidental de la Serranía de San Lucas. Entre las principales corrientes se encuentran el río Tiguí al sur, cuyas aguas son colectadas inicialmente por el río Nechí en el departamento de Antioquia y entregadas al Cauca. Al noroccidente se encuentra el río Caribona, el cual tiene como afluentes principales las quebradas Las Claras, Grande, Mantequera y Ariza entre otras. Esta cuenca termina con la confluencia del río Cauca con el brazo de Loba afluente principal del río Magdalena.

### **9.2. Cuenca del río Magdalena**

La cuenca del río Magdalena consta de cuatro sectores, a saber, vertiente oriental de la Serranía de San Lucas, Depresión Mompósina, vertiente Oriental de la Serranía de San Jacinto y Canal del Dique. En la vertiente oriental de la Serranía de San Lucas las principales corrientes son los ríos Tamar y Cimitarra al sur del Municipio de San Pablo con las quebradas Don Juan, Santo Domingo,

La Concepción y Sepultura como afluentes. El río Boque que nace en el alto del Tamar y tiene como afluentes las quebradas de Tiguicito, las Marías y San Blas. Al norte de Simití se encuentran las quebradas Tigrecita, La Fría, Honda y Norosí las cuales desembocan en los brazos de Morales y Papayal.

En el sector central o Depresión Mompósina el río Magdalena se divide inicialmente en los brazos de Loba y Mompós; posteriormente se forman el Chicagua y el Violo. Las aguas de estos brazos junto a la de los ríos Cauca y San Jorge forman un sistema extenso de ciénagas que regulan, aguas abajo, las crecidas de los ríos antes mencionados así como el contenido de humedad de los suelos; además constituyen hábitat importante para el desarrollo de la flora y la fauna.

En la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar (CSB) existen 262.957 hectáreas de ciénagas que corresponden al 13% del área total del Sur de Bolívar.

En el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional Del Dique CARDIQUE, el territorio del departamento de Bolívar dispone de 30.201 hectáreas de ciénagas con un volumen almacenado de 47.19 millones de m<sup>3</sup>, siendo las más importantes las ciénagas de Capote y Tupe localizadas en el municipio de Soplaviento, la de Carabalí y Maríalaba en el municipio de Maríalabaja y la de Jobo, Botija y Playón en el municipio de Calamar, todas asociadas a la cuenca del Canal de Dique.

En el norte del departamento en área de jurisdicción de CARDIQUE la red hidrográfica es densa, está conformada por caños y arroyos que vierten sus aguas a grandes cuerpos de agua entre los que se cuentan las numerosas ciénagas ubicadas en las márgenes del Río Magdalena y del Canal del Dique, y directamente al Mar Caribe colombiano en los municipios de Cartagena y Santa Catalina.

Entre los ecosistemas de lagunas costeras y estuarios presentes en el territorio bolivarense se encuentra el estuario correspondiente a la desembocadura del Canal del Dique. Como lagunas costeras se tiene a la Bahía de Cartagena, la Ciénaga de la Virgen o Tesca y otras pequeñas localidades en la isla Barú.

La Bahía de Cartagena tiene una fuente significativa de aguas fluviales provenientes del río Magdalena que llegan a través del canal del Dique aportando cerca de 100 m<sup>3</sup> /seg, en el extremo sur. Presenta además dos entradas de renovación de aguas oceánicas Bocachica y Bocagrande. La configuración de este recipiente marino y las corrientes de agua que recibe le han valido el calificativo de "estuario" (CIOH, 1998).

La Bahía de Cartagena también se ve influenciada por los cuerpos de agua internos formados por caños, lagos y lagunas interiores que se intercomunican y desembocan dentro de la laguna en diferentes lugares, los cuales se localizan en medio de zonas urbanizadas y que presentan en sus bordes un importante porcentaje de población de extrema pobreza. Estos cuerpos de agua principalmente son: Ciénaga de las Quintas, Caño de Bazurto, laguna de San Lázaro, laguna de Chambacú, laguna del Cabrero y Caño de Juan Angola (CIOH, 1998).

La Bahía de Barbacoas se encuentra localizada en la parte Sur del Municipio de Cartagena, donde sus aguas bañan toda la parte Sur y Sur-oriental de la Isla de Barú, llegando a influenciar las aguas marinas del Archipiélago Islas del Rosario. Es una bahía abierta comunicada con el mar Caribe, en promedio más profunda y extensa que la Bahía de Cartagena. La Bahía de Barbacoas recibe aporte de aguas continentales cargadas de sedimentos del canal del Dique a través de los caños de Matunilla y Lequerica; parte de estos sedimentos alcanzan las islas del Rosario por la dinámica imperante en la zona (CIOH, 1998).

El complejo de humedales del Canal del Dique se encuentra ubicado en la parte baja del río Magdalena, del cual se desprende por su margen izquierda a la altura del municipio de Calamar. En su recorrido de 115 Km cruza por los departamentos de Bolívar, Atlántico y Sucre, desembocando en la bahía de Cartagena, después de comunicarse con un gran número de ciénagas. Del Canal se desprenden tres brazos: el Caño Correa a la altura del km 81, que desemboca al Mar Caribe y los Caños Matunilla y Lequerica que desembocan más al Norte en la Bahía de Barbacoas y se desprenden en los kilómetros 100 y 107 respectivamente (U.del Norte, 1999; Cardique, 2002).

El Canal del Dique se subdivide en tres tramos: el primero denominado Alto Canal del Dique, que corresponde a los primeros 33 Km., destacándose en la margen izquierda las ciénagas Los Negros

y Jobo y a su derecha el embalse del Guájaro. El segundo tramo denominado Medio Canal del Dique está ubicado entre el Km. 33 y el estrecho Rocha–Correa en la abscisa del kilómetro 80, a su margen izquierda se encuentra el complejo cenagoso Capote, Tupe y Zarzal, las ciénagas Matuya, Maria La Baja, Carabalí y la Cruz, entre otras, y a su derecha las ciénagas la Ceiba y la Luisa junto con el complejo de Aguas Claras, donde se encuentran la Cienagueta y Floral. El último tramo es el Bajo Canal del Dique, que corresponde a la zona fluvio - marina, localizada desde el estrecho Rocha - Correa Km. 80, hasta la desembocadura en mar abierto en las bahías de Cartagena y Barbacoas. A su margen izquierda se encuentran las ciénagas Palotal, La Honda, Biojó y La Florecita; y a su derecha la ciénaga de Juan Gómez (Universidad del Norte, 1999; Cardique, 2002).

Los brazos más importantes son el brazo de Loba, brazo Morales, brazo Mompós, brazo Papayal, brazo Quitasol y el brazo Simití. Además del laberinto de cauces, hay numerosas quebradas y arroyos que llevan sus aguas a los tres principales ríos, brazos y ciénagas del departamento.

Las ciénagas más importantes del departamento son las de Canaletal, El Dique, El Limón, El Uvero, Garrapata, Grande, Guamalito, Iguana, Jobo, Juan Gómez, La Botija, La Victoria, María La Baja, Mojana, Morales, Morrocoyal, Nervití, Simití, Tesca o La Virgen y Tupe.

## CONCLUSIONES

La actual problemática energética mundial y la proyección de Colombia hacia un desarrollo sostenible, son variables que han motivado a realizar estudios de caracterización y aprovechamiento de los recursos energéticos, y que de manera alentadora se encuentra disponible en la región Caribe colombiana, específicamente en el Departamento de Bolívar. Los análisis realizados a partir de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas estudiadas, evidencian un alto potencial de energía eólica y solar, además de la disponibilidad energética en cultivos predominantes en el Departamento de Bolívar, los cuales debe ser más explorados y utilizados.

A partir de este estudio se determinó que la zona con mayor disponibilidad de la energía del viento entre las estaciones estudiadas que se encuentran en el Departamento de Bolívar, se encuentra alrededor de la estación Carmen de Bolívar, el que presenta un registro de velocidad predominante entre 2,5 y 4,0 m/s, durante los años estudiados.

Se evidencia el gran potencial disponible en esta zona, que incentiva la aplicación de un nuevo modelo de generación energética, en el que se implementen las tecnologías referentes a la producción de energía eléctrica a partir del recurso eólico.

Los resultados de la caracterización del recurso eólico y solar del Departamento de Bolívar son prometedores para el sistema de producción de energía en Colombia, pero aun es una fuente energética de poco aporte porcentual en el sistema nacional, donde el carbón mineral aun aporta alrededor del 45% de la producción de energía en el 2015, con una generación de energía eléctrica a partir de centrales hidráulicas en un 67%, las térmicas con un 27%, y en menor participación porcentual las plantas menores y los sistemas de cogeneradores, por lo que se hace necesario seguir aumentando la capacidad instalada en el país, con miras a obtener una matriz energética realmente diversificada.

En cuanto al recurso solar, es posible concluir que el Modelo de Bird y Hulstrom permitió evaluar la disponibilidad del recurso solar en el departamento de Bolivar de una forma sencilla con resultados óptimos y de calidad, teniendo en cuenta el grado de atenuación de la radiación.

Se logró determinar que la zona del Carmen de Bolívar presenta el valor más alto de radiación global promedio anual en el departamento, la cual presenta excelentes valores de radiación (promedio alrededor de 910 Wh/m<sup>2</sup>) que posibilitan la aplicación de tecnologías solar fotovoltaica. Las horas de brillo solar son diferente para cada uno de los zonas del departamentos y en promedio el departamento del Bolívar presenta 6,8 horas de sol, mientras que el departamento de La Guajira tiene 7,1 horas de sol siendo el punto más idóneo en el país para la aplicación el aprovechamiento de este recurso.

En general los niveles de radiación del departamento de Bolivar son apropiados para implementar las instalaciones solares de tipo eléctricos como las fotovoltaicas, tecnologías de tipo ACS y de tipo térmico como la CSP.

Referente a la disponibilidad energética de la Biomasa, se presentó la caracterizaron de tres biomosas residuales del departamento de Bolivar a través de análisis próximo, último, macrocomponentes y análisis termogravimétricos. Los resultados de la caracterización mostraron que para las tres biomosas el componente mayoritario es la holocelulosa. Particularmente, la cascarilla de arroz mostró un alto contenido de cenizas (22.37 %) lo que tiene como consecuencia una disminución considerable de su poder calorífico al compararlo con las otras dos biomosas estudiadas. El mayor poder calorífico lo presentó la cáscara de coco con un valor de 24.29 MJ/kg, lo que la hace muy llamativa para su uso directo en procesos energéticos.

Los termogramas TG y DTG de las biomosas estudiadas mostraron que la combustión de estas se lleva a cabo entre 298 y 1273 K a una velocidad de 10 K/min, 20 K/min y 30 K/min. Los resultados de los valores de la ceniza obtenidos en el Tg correspondieron con los del análisis último siendo la cascarilla de arroz la que produce más cenizas, mientras que los residuos de maíz y coco presentan valores muy pequeños de este componente.

Adicionalmente, los resultados muestran que el proceso de degradación térmica de las biomosas se compone de la combustión de hemicelulosa, celulosa y lignina. Los parámetros cinéticos del modelo (DAEM) indicaron que la distribución de energía de activación para pseudocomponentes sigue los órdenes de: E03 (lignina, entre 261 – 270 KJ/mol)> E02 (celulosa, entre 185 y 192 KJ/mol)> E01 (hemicelulosas, entre 153 – 156 KJ/mol).



**PERS BOLIVAR**  
UNIATLANTICO UPME IPSE

Los valores de humedad inicial, cenizas y poder calorífico muestran que de las tres biomásas estudiadas la que presenta mayor potencial energético es la cáscara de coco, seguida por la biomasa de las hojas de maíz y por último la cascarilla de arroz. Estos resultados demuestran el alto impacto que tiene el contenido de materia orgánica sobre el poder calorífico de las biomásas estudiadas.



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE

## ANEXO 1. CÓDIGOS EN MATLAB PARA ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS PROVENIENTES DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

```
Promedios.m
function A=Promedios(Anio,hoja)
NombreExcel='D:\Dropbox\Sol\Zona 05\Estaciones 05 sin problemas - Datos
Completos -\Estaci0n 25070';
Celdas='C2:AC15000';
Hoja=1;
P=xlsread(NombreExcel,Hoja,Celdas);
A= P(:,1)==Anio;
A= P(A,:);
xlswrite('D:\Dropbox\Sol\Zona 05\C.lculo de Par.metros
Solares\C.lculos\C.lculo por a0os - Promedios
mensuales\5.xls',A,hoja,'A2');

% Anio=1983:2013;
% for i=1:length(Anio)
%     Hoja=i;
%     Promedios(Anio(i),Hoja);
% end
```

```
Ejecutor_Corrector_Datos_Solares.m
clear all; clc
X=[4 14015030];
for i=1:length(X)
    Hoja=X(i);
    Name=['Estaci0n ' num2str(X(i,2))];
    CorrectorDeDatos_Solares(Hoja,Name);
i
end
toc
D=[1 14015010
4 14015030];
```



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE



### CorrectorDeDatos\_Solares.m

```
function P=CorrectorDeDatos_Solares(Hoja,Name)
NombreExcel='Estaciones Solares 02';
Celdas='D2:AC15000';
% Hoja=12;
% Name='Estación 25080';

P=xlsread(NombreExcel,Hoja,Celdas);
i=1;
while ~isempty(P(:,3))
    if isnan(P(i,3))
        else P(i,:)=[];
            i=i+1;
        end
        if i==length(P(:,3))+1
            break
        end
    end
end
P=Completador(P);
for Condicion=[4 5 7:26]
    x=find(isnan(P(:,Condicion)));
    Dia=P(x,3);
    Mes=P(x,2);
    for i=1:length(Dia)
        D=find(P(:,3)==Dia(i));
        M=find(P(:,2)==Mes(i));
        Intersec=intersect(D,M);
        mP=P(Intersec,Condicion);
        Positivos=mP>0;
        mP(~Positivos)=0;
        f=find(mP==0);
        mP(f)=[];
        Promedio(i)=mean(mP);
        P(x(i),Condicion)=Promedio(i);
    end
end
end

Max_Min=6;
x=find(isnan(P(:,Max_Min)));
for i=1:length(x)
    P(x(i),Max_Min)=P(x(i),Max_Min-2)-P(x(i),Max_Min-1);
end
i=1;
while ~isempty(P(:,3))
    if isnan(P(i,3))
        P(i,:)=[];
    else
        i=i+1;
    end
    if i==length(P(:,3))+1
        break
    end
end
end
xlswrite(Name,P,1,'C2');
```



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE



Completador.m ▾

```
function Minc2=Completador(P)
%Esta función corrige y completa el calendario
% clc,clear all
% tic
% NombreExcel='C:\Users\Luis F Arrieta V\Desktop\Vainas E licas\Grupo2.xls';
% Hoja=2;
% Celda='C2:BA9963';
Minc=P;
Mcon=Meses(Minc(1,1),Minc(length(Minc(:,1)),1));
a=length(Mcon(:,1))-length(Minc(:,1));
h=size(Minc);h=h(2)-3;
for i=1:2
    for j=1:length(Minc(:,1))
        Luis=find(Mcon(:,1)==Minc(j,1) & Mcon(:,2)==Minc(j,2) & Mcon(:,3)==Minc(j,3));
        Ka=size(Luis);
        if Ka(1)==0
            Minc(j,:)=[];
            Minc(length(Minc(:,1))+1,:)=Minc(length(Minc(:,1)),:);
        end
    end
end
for i=1:length(Mcon(:,1))
    if a>0
        if Minc(i,1)~=Mcon(i,1) || Minc(i,2)~=Mcon(i,2) || Minc(i,3)~=Mcon(i,3)
            Minc(length(Minc(:,1))+1,:)=zeros(1,length(Minc(1,:)));%Aumentadora
            Minc(i+1:length(Minc(:,1)),:)=Minc(i:length(Minc(:,1))-1,:);%Bajadora
            Minc(i,:)=Mcon(i,:) zeros(1,h)+NaN;%Corregidora
            a=length(Mcon(:,1))-length(Minc(:,1));
        end
    else
        if Minc(i,1)~=Mcon(i,1) || Minc(i,2)~=Mcon(i,2) || Minc(i,3)~=Mcon(i,3)
            Minc(i+1:length(Minc),:)=Minc(i:length(Minc)-1,:);%Bajadora
            Minc(i,:)=Mcon(i,:) zeros(1,h)+NaN;%Corregidora
        end
    end
end
for j=Minc(1,1):Minc(length(Minc(:,1)),1)
    Luis=find(Minc(:,1)==j);Ka=size(Luis);
end
Minc2=Minc;
```



```
calendario.m
function MATrizota=calendario(n)
x=mod(n, 4) == 0; y = mod(n, 100) == 0; z = mod(n, 400) == 0;
B=[4 6 9 11];
if (x && y && z) || (x && ~y && ~z)
    w=1; %Bisiesto
else
    w=2; %No Bisiesto
end
if w==2
    d=28;
    f=365;
    Agno=ones(f,1);Agno=Agno+n-1;
    for i=1:12
        Mes(1:31,i)=i;
    end
    Mes(31,[4 6 9 11])=0;
    Mes(29:31,2)=0;
    reshape(Mes,size(Mes));Mes(Mes==0)=[];Mes=Mes';Mes=Mes;
    for i=1:31
        Dia(1:12,i)=i;
    end
    Dia([4 6 9 11],31)=0;
    Dia(2,29:31)=0;
    Dia=reshape(Dia',31*12,1);Dia(Dia==0)=[];Dia=Dia;
else
    d=29;
    f=366;Agno=ones(f,1);Agno=Agno+n-1;
    for i=1:12
        Mes(1:31,i)=i;
    end
    Mes(31,[4 6 9 11])=0;
    Mes(30:31,2)=0;
    reshape(Mes,size(Mes));Mes(Mes==0)=[];Mes=Mes';
    for i=1:31
        Dia(1:12,i)=i;
    end
    Dia([4 6 9 11],31)=0;
    Dia(2,30:31)=0;
    Dia=reshape(Dia',31*12,1);Dia(Dia==0)=[];Dia=Dia;
end
% a(n+1-n0)=length(Agno(n+1-n0));
MATrizota=[Agno Mes Dia];
```



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE

```
Organizador_DatosOriginales.m
% clc, clear all
% tic,
% B=xlsread('D:\Dropbox\Sol\Zona 02\Datos 02\Estaciones
asdasf', 'A1:X80000');
% toc
% A=B;
% i=1;
% while ~isempty(A(:,1))
%     if sum(isnan(A(i,:)))==length(A(1,:))
%         A(i,:)=[];
%     else
%         i=i+1;
%     end
%     if i==length(A(:,1))+1
%         break
%     end
%     i
% end
% disp('°Ya eliminé las filas de NaN..!')
% disp('Ahora identificar cada calendario y estación...')
% toc
%

clear all; clc
tic
A=importdata('A2.mat','A');
A(:,4:length(A(1,:))+3)=A(:,:);
A(:,1:3)=zeros(length(A(:,1)),3);

estacion=[45020];
L=9 %Hoja
Code=2;

for i=1:length(estacion)
    B=find(A(:,23)==estacion(i));
    G=find(A(:,22)==Code);
end
F=intersect(G,B);
A(F+2,1)=A(F,23);

anhio=A(1,27):2014;
for j=1:length(anhio)
    C=find(A(:,27)==anhio(j));
    A(C+3,2)=A(C,27);
end
mes=1:12;
for k=1:length(mes)
    D=find(A(:,26)==mes(k));
    A(D+3,3)=A(D,26);
end
for i=4:length(A(:,1))
    if A(i,1:3)==zeros(1,3)
        A(i,1:3)=A(i-1,1:3);
    end
end
for i=1:length(estacion)
    B=find(A(:,1)==estacion(i));
    for j=1:length(B)
        Mfinal(j,:)=A(B(j),:);
    end
    xlswrite('Estaciones Solares 02',Mfinal,L,'C2')
end
toc,beep,beep
%
%
```



```
function M2=Meses(n0,nf)
for n=n0:nf
    i=n+1-n0;
    a=calendario(n);
    b=length(a(:,1));
    if b==365
        M_NoBis(:,3*i-2:3*i)=a;
    else
        M_Bis(:,3*i-2:3*i)=a;
        nbis(i)=n;
    end
end
nbis=nbis(end);
M_Bis(:,((nf-n0+1)*3-(nf-nbis)*3+1:(nf-n0+1)*3))=0;
M_NoBis(366,:)=0;
M=M_NoBis+M_Bis;
for i=1:length(M(1,:))/3
    j=3*i-2;
    Anios(:,i)=M(:,j);
    Mesess(:,i)=M(:,j+1);
    Dias(:,i)=M(:,j+2);
end
Anios=reshape(Anios,366*(nf-n0+1),1);
Mesess=reshape(Mesess,366*(nf-n0+1),1);
Dias=reshape(Dias,366*(nf-n0+1),1);
Anios(Anios==0)=[];
Mesess(Mesess==0)=[];
Dias(Dias==0)=[];
M2=[Anios Mesess Dias];
% % xlswrite('Grupo2',M2,3,'C2');
% for i=n0:nf
%     a=find(M2==i);i,size(a)
%     pause
% end
```

## Bibliografía

- [1] A. David and P. Espitia, “Modelación y evaluación del potencial eólico como una fuente de generación de energía eléctrica en la zona costera de cartagena,” 2013.
- [2] Y. Cancino, “MODELO DE PREDICCIÓN EÓLICA A ESCALA LOCAL CON ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE VIENTOS. APLICACIÓN A LOS PARQUES EÓLICOS A INSTALAR EN EL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO.,” 2009.
- [3] E. Espectador, “*‘La primera crisis del petróleo.’*” ELESPECTADOR.COM.
- [4] C. A. P. Guzmán, “UN Periódico,” p. 13, 2010.
- [5] L. Ernesto, M. Castro, M. Fernando, M. Olano, L. C. R. R, and H. J. Z. L, “UPME Energías Renovables.” .
- [6] I. Bellenger and L. M. Neira, “normativa de emisiones para termoelectricas,” *Daños los Contam.*, [Online]. Available: <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno09/emisiones/dano.html>.
- [7] A. G. Martínez, “Departamento de Bolívar,” vol. 16. [Online]. Available: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/bolivar/index.html>.
- [8] M. V. Noblía, “Anexo 2,” 2010. doi: 10.1016/B978-84-8086-738-2.50013-7.
- [9] E. S. Han and A. goleman, daniel; boyatzis, Richard; Mckee, *Analisis de datos con Statgraphics*, vol. 53, no. 9. 2019.
- [10] *Prob-Estad-Pa Ingenieros-Walpole-6ed(post by Q-chucho)(www.identi.es).pdf* .
- [11] *Probabilidad y estadística - Canavos.pdf* .
- [12] José Juan Cáceres Hernández, *Conceptos básicos de estadística para ciencias sociales*, Primera. Madrid, 2006.
- [13] D. Ejemplo, “Resumen Entrada de Datos Resumen del Análisis,” 2006.
- [14] A. Hern, O. Ren, and E. Ticom, “Análisis estadístico del viento como recurso energético.”
- [15] J. A. Galvis and J. D. Medina, “Evaluación de la capacidad de generación de energía eólica en el municipio de Los Santos, sector del mirador del Chicamocha,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2009.
- [16] D. W. I. Association, “La energía en el viento,” 2003. .
- [17] M. Villarrubia Lopez, *Ingeniería de la Energía Eólica*, 1st ed. España: Marcombo, 2012.
- [18] Idema and Upme, “Anexo 4: Modelamiento físico del viento y la energía eólica,” *Atlas Viento y Energía Eólica Colomb.*, 2006.
- [19] S. M. and M. H, “Numerical methods applied to global solar radiationmedelig - comparisson with measured data,” *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, pp. 777–789.
- [20] N. Noyon, *Tesis de Licenciatura: Huerta Fotovoltaica de 1.2 MW con seguimiento solar y conexión a red en Sevilla*. Departamento de Energía, Universidad de Oviedo. Asturias-España.

- [21] J. Prieto, *Fundamentos y Aplicaciones de la Energía Solar Térmica*. Servicio de Publicaciones, Universidad de Oviedo.
- [22] O. Pinazo, *Manual de climatización, Tomo II*. Servicio de Publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia.
- [23] O. Jaramillo, *Tesis de Maestría: Transporte de Energía Solar Concentrada a través de Fibras Ópticas: Acoplamiento Fibra-Concentrador y Estudio Térmico*. Morelos: UNAM.
- [24] D. Fernández, *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. España.
- [25] E. Jáuregui, “Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización,” *Dep. Meteorol. Gen. Cent. Ciencias la Atmósfera, UNAM*.
- [26] G. Navarra, “Calidad del Aire: Procesos fotoquímicos.” [Online]. Available: [http://www.navarra.es/home\\_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/La+atmosfera/Procesos+fotoquimicos.htm](http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/La+atmosfera/Procesos+fotoquimicos.htm).
- [27] C. Escamilla, “Tesis de Licenciatura: Modelo atmosférico y de radiación solar para reconocimiento de firmas espectrales,” in *Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona*.
- [28] S. Montecinos, “Determinación del coeficiente de fotodisociación del ozono. Departamento de Ciencias Físicas, Universidad de la Frontera.” Chile.
- [29] B. J. and Mulhia, “Relaciones entre la magnitud de valor máximo de ozono, la radiación solar y la temperatura ambiente en la zona metropolitana de la Ciudad de México,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, pp. 45–54,.
- [30] R. Román, “Efectos de los componentes atmosféricos sobre la radiación eritemática y modelo propuesto para la reconstrucción de series.” [Online]. Available: <http://www3.uva.es/renova/esp/Roman2010.pdf>.
- [31] R. Coca, “Introducción a la meteorología. Universidad Autónoma de Baja California.” Mexicali.
- [32] I. de T. E. ITE, “El espectro de radiación, flujos de energía entre el sol y la tierra.” [Online]. Available: [https://fjferreer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/3\\_el\\_espectro\\_de\\_radiacin.html](https://fjferreer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/3_el_espectro_de_radiacin.html).
- [33] B., *La concentración de aerosoles en la atmósfera inhibe la lluvia en la Ciudad de México*. Departamento de Física de Nubes, UNAM. México.
- [34] C. Raichijk, “Estimación del índice de turbidez de Linke para distintas localidades de Argentina,” in *Departamento de Ciencias Básicas, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable, Argentina*.
- [35] B. R. and H. R., “A simplified clear sky model for direct and difusse insolation on horizontal surfaces,” *Sol. Energy Res. Institute, EEUU*.
- [36] O. Villicaña, P.-S. Gutiérrez-Trashorras, and X. Bernat, “Solar energy potential in the coastal zone of the Gulf of Mexico,” *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 534 – 542.
- [37] C. Ertekin and O. Yaldiz, “Comparison of some existing models for estimating global

- solar radiation for Antalya (Turkey,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, pp. 311–330,.
- [38] J. Bosca, *Tesis Doctoral. Contribución al estudio de la radiación solar y de la determinación de la turbiedad atmosférica. Aplicaciones a Valencia y Sevilla*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- [39] M. Atwater and J. Ball, “A surface solar radiation model for cloudy atmosphere,” *Mon. Weather Rev.*, pp. 879–888,.
- [40] D. Hoyt, “A model for calculation of solar global insolation,” *Sol. Energy*, pp. 27–35,.
- [41] A. Lacis and J. Hansen, “A parametrization for the absorption in solar radiation in the Earth’s Atmosphere,” *J. Atmos. Sci.*, pp. 118–133,.
- [42] A.S.H.R.A.E., “Handbook of fundamentals.” New York.
- [43] O. Watt, *On the nature and distribution of solar radiation*. Departamento de Energía de EEUU.
- [44] J. Davies, “Calculation of the solar radiation incident on a horizontal surface, Canadian Atmospheric Environment Service,” *First Can. Sol. Radiat. Data Work*.
- [45] J. Bosca, “Contribución al estudio de la radiación solar y de la determinación de la turbiedad atmosférica. Aplicaciones a Valencia y Sevilla,” *Tesis Dr. Univ. Politécnica Val.*
- [46] U.P.M.E.-I.D.E.A.M., “Atlas de radiación solar de Colombia [Internet], Bogotá. Disponible desde.” [Online]. Available: <http://www.si3ea.gov.co/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/en-US/Default.aspx>.
- [47] M. Mächler, “Parameterization of solar irradiation under clear skies. Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Columbia.” Vancouver, Canada.
- [48] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. Toronto: Academic Press.
- [49] A. Angström, “Techniques of determining the turbidity of the atmosphere,” *Eppley Found. Res. Tellus*, vol. XIII.
- [50] J. Cañada, J. M. Pinazo, and J. V Bosca, “Determination of Angström’s Turbidity Coefficient at Valencia,” *Renew. Energy*, vol. 3, pp. 621–626,.
- [51] R. Buckius and R. King, “Direct solar transmittance for clear sky,” *Sol. Energy*, pp. 297–301,.
- [52] B., *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*. Ciel et Terre.
- [53] C. Richter, “Energía Solar Térmica de Concentración, Perspectiva Mundial. Greenpeace & Asociación Europea de la Energía Solar.” [Online]. Available: <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/090713.pdf>.
- [54] *Manuales sobre energía renovable*. Biomasa, San José, Costa Rica: ©Copyright.
- [55] J. CHICA, Y. TIRADO, and J. BARRETO, “Indicadores de competitividad del cultivo del arroz en Colombia y Estados Unidos,” *Rev. Cienc. Agr.*, vol. 33, no. 2, p. 31, doi: 10.22267/rcia.163302.49.
- [56] J. Ospina, *Manual técnico del cultivo de maíz bajo buenas prácticas agrícolas*, Medellín. Colombia: Gobernación de Antioquia, Secretaria de agricultura y desarrollo rural.

- [57] D. Núñez, “Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta,” *Tecnura*, vol. 16, no. 34, pp. 142–156.
- [58] N. Molina, O. Fragozo, and L. Vizcaino, “Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural,” *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 25, no. 2, pp. 99–116.
- [59] S. Quintero and L. Gonzales, *Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto*. Ingeniería y desarrollo.
- [60] E. Cerda, *Energía obtenida a partir de biomasa*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- [61] S. Energía, E. Renovables, and Copyright, “Energías.” .
- [62] S. Romero, “Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles,” *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat*, vol. 104, no. 2, p. 15.
- [63] “Métodos de análisis térmico,” *Tema*, vol. 10.
- [64] M. K. D. Rambo, F. L. Schmidt, and M. M. C. Ferreira, “Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities,” *Talanta*, vol. 144, pp. 696–703,.
- [65] S. Fonseca, H. A. Rodríguez, and G. Camargo, “Characterization of Waste Corn of the Municipality of Ventaquemada, Colombia,” *Av. en Ciencias e Ing*, vol. 8, no. 2, pp. 29–36  
..
- [66] K. Raveendran and A. Ganesh, “Heating value of biomass and biomass pyrolysis products,” *Fuel*, vol. 75, no. 15, pp. 1715–1720, 1996, doi: 10.1016/S0016-2361(96)00158-5.
- [67] B. Xiao, X. Sun, and R. Sun, “Chemical, structural, and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw,” *Polym. Degrad. Stab*, vol. 74, pp. 307–319,.
- [68] S. A. Arni, M. Zilli, and A. Converti, “Solubilization of lignin components of food concern from sugarcane bagasse by alkaline hydrolysis,” *Cienc. y Tecnol. Aliment*, vol. 5, no. 4, pp. 271–277,.
- [69] M. C. V. Chamorro, *Estudio del mecanismo de grafitización de antracitas sudafricanas tratadas térmicamente*. Universidad de Oviedo.
- [70] A. Melgar, D. Borge, and J. F. Pérez, “Kinetic study of the biomass devolatilization process in particles sizes between 2-19 mm by means of thermogravimetric analysis,” *DYNA*, vol. 75, no. 155, pp. 123–131, 2008.
- [71] M. V. Kok and E. Özgür, “Thermal analysis and kinetics of biomass samples,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 106, pp. 739–743, 2013, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.10.010.
- [72] M. V. Kok and E. Ozgur, “Characterization of lignocellulose biomass and model compounds by thermogravimetry,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 39, no. 2, pp. 134–139, 2017, doi: 10.1080/15567036.2016.1214643.
- [73] N. Shukry, F. Ishak, and Z. Sefain, “DTA study of thermal degradation of bagasse and rice

- straw hemicelluloses,” *J. Therm. Anal.*, vol. 37, no. 5, pp. 915–926, 1991, doi: 10.1007/BF01932789.
- [74] J. Cai, W. Wu, and R. Liu, “An overview of distributed activation energy model and its application in the pyrolysis of lignocellulosic biomass,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 236–246, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.052.
- [75] M. Hu *et al.*, “Thermogravimetric kinetics of lignocellulosic biomass slow pyrolysis using distributed activation energy model, Fraser-Suzuki deconvolution, and iso-conversional method,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 118, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.058.
- [76] G. Várhegyi, P. Szabó, and M. J. Antal, “Kinetics of charcoal devolatilization,” *Energy and Fuels*, vol. 16, no. 3, pp. 724–731, 2002, doi: 10.1021/ef010227v.
- [77] A. L. Santander Oliveros, E. Ortiz Muñoz, I. E. Piñeres Ariza, C. S. Ariza Barraza, and A. R. Albis Arrieta, “Estudio TG-MS de la gasificación del carbonizado de la cáscara de Copoazú (*Theobroma Glandiflorum*),” *Inge Cuc*, vol. 15, no. 1, pp. 25–35, 2019, doi: 10.17981/ingecuc.15.1.2019.03.
- [78] K. Miura, “A New and Simple Method to Estimate  $f(E)$  and  $k_0(E)$  in the Distributed Activation Energy Model from Three Sets of Experimental Data,” *Energy and Fuels*, vol. 9, no. 2, pp. 302–307, 1995, doi: 10.1021/ef00050a014.
- [79] X. Ren, J. Chen, G. Li, Y. Wang, X. Lang, and S. Fan, “Thermal oxidative degradation kinetics of agricultural residues using distributed activation energy model and global kinetic model,” *Bioresour. Technol.*, vol. 261, no. March, pp. 403–411, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.04.047.
- [80] M. Carrier *et al.*, “Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 298–307, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.08.067.
- [81] J. J. A. Flores and J. G. R. Quiñones, “Study of kinetics in thermogravimetric processes of lignocellulosic materials,” *Maderas Cienc. y Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 221–238, 2018, doi: 10.4067/S0718-221X2018005002601.
- [82] S. Martínez-Lozano, *Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña*, vol. GI-910, no. 4. 2009.
- [83] G. Várhegyi, P. Szabó, and M. J. Antal, “Kinetics of Charcoal Devolatilization .,” pp. 1–16, 2002, doi: 10.1021/ef010227v.
- [84] M. Arango Muñoz, E. Arenas Castiblanco, and F. Cortés, “Determinación de parámetros cinéticos para la pirólisis rápida de aserrín de pino pátula,” *Boletín del Grup. Español del Carbón*, no. 38, pp. 9–11, 2015.
- [85] F. Yao, Q. Wu, Y. Lei, W. Guo, and Y. Xu, “Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, no. 1, pp. 90–98, 2008, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.10.012.
- [86] O. Fasina and B. Littlefield, “TG-FTIR analysis of pecan shells thermal decomposition,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 102, pp. 61–66, 2012, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.04.015.



- [87] C. Wang, Y. Wu, Q. Liu, H. Yang, and F. Wang, "Analysis of the behaviour of pollutant gas emissions during wheat straw/coal cofiring by TG-FTIR," *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 5, pp. 1037–1041, 2011, doi: 10.1016/j.fuproc.2010.12.029.
- [88] Y. Zhai *et al.*, "Pyrolysis characteristics and kinetics of sewage sludge for different sizes and heating rates," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 107, no. 3, pp. 1015–1022, 2012, doi: 10.1007/s10973-011-1644-0.
- [89] P. J. Larkin, *IR and Raman Spectroscopy: Principles and Spectral Interpretation*, vol. 9, no. 10. United States: Elsevier Science Publishing Co Inc, 2011.
- [90] Q. Liu, S. Wang, Y. Zheng, Z. Luo, and K. Cen, "Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 82, no. 1, pp. 170–177, 2008, doi: 10.1016/j.jaap.2008.03.007.
- [91] G. Socrates, *Infrared and Raman characteristic group frequencies. Tables and charts*, 3rd ed. 2001.
- [92] Z. Ma, D. Chen, J. Gu, B. Bao, and Q. Zhang, "Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA-FTIR and model-free integral methods," *Energy Convers. Manag.*, vol. 89, pp. 251–259, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.09.074.
- [93] G. K. Parshetti, A. Quek, R. Betha, and R. Balasubramanian, "TGA-FTIR investigation of co-combustion characteristics of blends of hydrothermally carbonized oil palm biomass (EFB) and coal," *Fuel Process. Technol.*, vol. 118, pp. 228–234, 2014, doi: 10.1016/j.fuproc.2013.09.010.
- [94] M. Vanegas, K. Tamargo, J. Xiberta, A. Tascón, M. Alonso, and J. M. D., "Estudio del mecanismo de grafitización de antracitas sudafricanas," Universidad de Oviedo, Oviedo, España, 2012.
- [95] P. Larkin, *IR and Raman Spectroscopy- Principles and Spectral Interpretation*, vol. 9, no. 10. 2011.
- [96] S. Jingai, R. Yan, H. Chen, B. Wang, D. H. Lee, and D. T. Liang, "Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal sludge by thermogravimetry-fourier transform infrared analysis (TG-FTIR)," *Energy Fuels*, vol. 22, no. 1, pp. 38–45, 2008, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.807-809.1169.
- [97] N. Gao, A. Li, C. Quan, L. Du, and Y. Duan, "TG-FTIR and Py-GC/MS analysis on pyrolysis and combustion of pine sawdust," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 100, pp. 26–32, 2013, doi: 10.1016/j.jaap.2012.11.009.
- [98] W. Permchart and V. I. Kouprianov, "Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels," *Bioresour. Technol.*, vol. 92, no. 1, pp. 83–91, 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2003.07.005.
- [99] B. R. T. Simoneit, *Biomass burning - A review of organic tracers for smoke from incomplete combustion*, vol. 17, no. 3. 2002.
- [100] A. Demirbas, "Hazardous emissions from combustion of biomass," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 30, no. 2, pp. 170–178, 2008, doi:



PERS BOLIVAR  
UNIATLANTICO UPME IPSE

10.1080/00908310600712406.

- [101] H. Escalante, J. Orduz, H. Zapata, M. Cardona, and M. Duarte, “Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia.” doi: 10.2307/j.ctv6mtd7t.10.
- [102] A. C. Marafon, A. D. Santiago, A. F. C. Amaral, A. N. Bierhals, H. L. Paiva, and V. dos S. Guimarães, “Uso da Biomassa para a Geração de Energia,” *Doc. / Embrapa Tabuleiros Costeiros*, vol. 211, pp. 1–29, 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.29341.51687.
- [103] G. Di Nola, W. de Jong, and H. Spliethoff, “TG-FTIR characterization of coal and biomass single fuels and blends under slow heating rate conditions: Partitioning of the fuel-bound nitrogen,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, no. 1, pp. 103–115, 2010, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.09.001.