

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA ANALIZAR LA VIABILIDAD
TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL SUMINISTRO ENERGÉTICO DE UN GRUPO DE
VIVIENDAS RURALES SIN CONEXIÓN A LA RED POR MEDIO DE
ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA**

WILSON GIOVANNY MEDINA PIMIENTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA ANALIZAR LA VIABILIDAD
TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL SUMINISTRO ENERGÉTICO DE UN GRUPO DE
VIVIENDAS RURALES SIN CONEXIÓN A LA RED POR MEDIO DE
ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA**

WILSON GIOVANNY MEDINA PIMIENTO

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista

Director

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Doctor Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

A mi padre Wilson Medina León

A mi madre y a mi hermano

A Dios

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, quien, con su amor, dedicación, esfuerzo siempre quiso lo mejor para mí.

A mi madre, sin su apoyo no hubiera sido posible.

A mi hermano quien siempre me ayudo y apoyo en mis decisiones.

A Dios por guiarme hacia el camino correcto en todo momento y en especial en los momentos más difíciles de mi carrera y de mi vida.

A mi familia por su apoyo, paciencia y colaboración en esta experiencia de formación como ingeniero electricista.

A la Universidad Industrial de Santander por formarme como profesional.

A las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 16 |
| 1.1 SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO | 16 |
| 1.1.1 Cobertura eléctrica..... | 19 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 19 |
| 1.2.1 Objetivo general..... | 19 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 20 |
| 1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO | 20 |
| 2. PARAMETROS DE DISEÑO DE SISTEMAS EOLICOS-FOTOVOLTAICOS.... | 21 |
| 2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 21 |
| 2.2 CONCEPTOS GENERALES SISTEMAS EÓLICOS | 26 |
| 2.2.1 Definición. | 26 |
| 2.2.2 Componentes de un sistema eólico aislado..... | 27 |
| 2.3 Compensación de potencia reactiva..... | 31 |
| 3. TENDENCIA DEL CONSUMO..... | 34 |
| 4. DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS MIXTOS FOTOVOLTAICOS Y EÓLICOS AUTÓNOMOS | 37 |
| 4.3.1 Determinación de la energía necesaria para el sistema. | 38 |
| 4.3.2 Dimensionamiento del generador eólico..... | 38 |
| 4.3.3 Cálculo de la radiación solar disponible..... | 40 |
| 4.3.4 Cálculo de la potencia necesaria para los paneles fotovoltaicos. | 40 |
| 4.3.5 Dimensionamiento de las baterías..... | 41 |
| 4.3.6 Dimensionamiento del regulador de carga..... | 42 |
| 4.3.7 Elección del inversor..... | 43 |
| 5. ANALISIS FINANCIERO..... | 44 |

| | |
|--|----|
| 6. EJEMPLOS UTILIZANDO EL SOFTWARE GREENPROJECT..... | 48 |
| 6.1. DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA | 48 |
| 6.1.1. Datos previos | 48 |
| 6.1.2. Dimensión de los dispositivos Eólicos-fotovoltaicos | 50 |
| 6.1.3. Análisis de alternativas. | 51 |
| 6.2. DEPARTAMENTO DEL CESAR..... | 52 |
| 6.2.1. Datos previos | 53 |
| 6.2.2. Dimensión de los dispositivos Eólicos-fotovoltaicos | 55 |
| 6.1.3 Análisis de alternativas. | 56 |
| 6.3 DEPARTAMENTO DEL GUAVIARE..... | 58 |
| 6.3.1. Datos previos | 58 |
| 6.3.2. Dimensión de los dispositivos Eólicos-fotovoltaicos | 60 |
| 6.3.3. Análisis de alternativas. | 62 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 64 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 65 |
| ANEXOS..... | 68 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Infraestructura existente | 17 |
| Figura 2. Composición de la generación en Colombia 2014..... | 18 |
| Figura 3. Sistema fotovoltaico Autónomo | 21 |
| Figura 4. Transformación de energía de un aerogenerador | 27 |
| Figura 5. Sistema eólico aislado | 28 |
| Figura 6. Capacidad instalada y disponible. | 50 |
| Figura 7. Datos de radiación Riohacha..... | 51 |
| Figura 8. Equipos seleccionados Riohacha | 52 |
| Figura 9. Restricciones geográficas y alternativas de conexión | 55 |
| Figura 10. Datos de radiación Valledupar | 56 |
| Figura 11. Equipos seleccionados Valledupar | 57 |
| Figura 12. Restricciones geográficas y alternativas de conexión..... | 60 |
| Figura 13. Datos de radiación San José del Guaviare..... | 61 |
| Figura 14. Equipos seleccionados San José del Guaviare. | 62 |
| Figura 15. Combinación de equipos. | 63 |
| Figura 16. Restricciones geográficas y alternativas de conexión..... | 63 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Localidades de Colombia ZNI | 34 |
| Tabla 2. Demanda de Energía acumulada por departamento | 35 |
| Tabla 3. Supuestos generales para determinar el costo de alternativas..... | 44 |
| Tabla 4. Restricciones geográficas | 45 |
| Tabla 5. Costo Interconexión SIN | 46 |
| Tabla 6. Consumo típico para algunos electrodomésticos..... | 49 |
| Tabla 7. Equipos para el diseño..... | 49 |
| Tabla 8. Costo de alternativas Riohacha | 52 |
| Tabla 9. Consumo típico para algunos electrodomésticos..... | 54 |
| Tabla 10. Equipos para el diseño..... | 54 |
| Tabla 11. Costo de alternativas Valledupar | 57 |
| Tabla 12. Consumo típico para algunos electrodomésticos..... | 59 |
| Tabla 13. Equipos para el diseño..... | 59 |
| Tabla 14. Costo de alternativas San José del Guaviare. | 63 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO A. Mapas de viento y energía eólica en Colombia | 68 |
| ANEXO B. Mapas de radiación solar de Colombia | 81 |
| ANEXO C. Equipos para el diseño. | 93 |
| ANEXO D. Guía de instalación Greenproject | 94 |

Lista de símbolos

| | |
|------------------|--|
| δ | Declinación solar. |
| HPS | Horas pico solares. |
| β | ángulo de inclinación de una superficie. |
| FI | Factor de Radiación. |
| λ | Latitud. |
| η | Eficiencia. |
| β_{optimo} | Inclinación óptima. |
| SIN | Sistema Interconectado Nacional. |
| ΔT | Incremento de temperatura. |
| ρ | Densidad del aire. |

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA ANALIZAR LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL SUMINISTRO ENERGÉTICO DE UN GRUPO DE VIVIENDAS RURALES SIN CONEXIÓN A LA RED POR MEDIO DE ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA.*

AUTORES: WILSON GIOVANNY MEDINA PIMIENTO**

PALABRAS CLAVE: Sistema fotovoltaico, sistema eólico, radiación solar.

DESCRIPCIÓN:

El aumento de demanda energética en el país ha creado la necesidad de incrementar el alcance de abastecimiento de energía eléctrica en todo el territorio nacional. Ya que un gran porcentaje del territorio colombiano no se encuentra interconectado y hay zonas donde existe alto potencial de recursos naturales de los cuales se puede obtener la cantidad de energía eléctrica necesaria para abastecerse, es necesario tener conocimiento sobre la mejor opción en el momento de llevar el servicio eléctrico a dichos lugares para tener una idea en cuanto al diseño del sistema con el fin de que sea eficiente y minimice costos.

Dicho lo anterior, en este trabajo de grado se implementa una metodología para cubrir esta necesidad para viviendas rurales aisladas de la red de distribución de energía eléctrica, buscando la mejor alternativa en cuanto a economía, impacto ambiental y energización. Con su implementación se espera determinar la mejor opción de electrificación rural haciendo una comparación entre los resultados obtenidos al interconectar la zona al Sistema Interconectado Nacional (SIN) con la energización de la misma por medio de un sistema de abastecimiento de energía verde, fotovoltaica y eólica aislado de la red (Autónomo). Para hacer más sencilla la implementación de esta metodología se muestran los resultados obtenidos por medio del software **GreenProject** donde se puede evaluar la mejor alternativa de una manera sencilla.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF A SYSTEM TO ANALIZE THE TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY ENERGY SUPPLY OF A GROUP OF RURAL HOUSSING WITHOUT CONECTION TO THE ELECTRICAL NETWORK THROUGH WIND AND SOLAR ENERGY SUPPLY.*

AUTORES: WILSON GIOVANNY MEDINA PIMIENTO**

KEYWORDS: Photovoltaic system, wind system, solar radiation.

DESCRIPTION:

Rising energy demand in the country has created the need to increase the scope of supply of electricity throughout the country. Since a large percentage of Colombian territory is not interconnected and there are areas where there is great potential for natural resources which can get the amount of electricity needed to stock up there, it is needed to have knowledge about the best option at the time of taking the Electrical service to these places to get an idea for the design of the system in order to be efficient and minimize costs.

Taking into account the above, in this degree work methodology is implemented to meet this need for rural housing isolated from the electric power distribution, looking for the best alternative in terms of economy, environmental impact and energizing. With its implementation is expected to determine the best option for rural electrification making a comparison between the results obtained by interconnecting the area to the national grid (SIN) with the energization of the same through a system of supply green energy, photovoltaic and wind isolated from the network (Autonomous System). To simplify the implementation of this methodology results are shown in GreenProject software where you can evaluate the best alternative in a simple way.

* Degree Work

** Department of physical-Mechanical Engineerings. Electrical, Electronica and Telecomuncations Engineerings School. Director. Dr. Hermann Vargas Torres

INTRODUCCIÓN

El mundo necesita energía, sin ella no podríamos vivir de ninguna forma, sin ella no podríamos subsistir, debido a que la población está en constante crecimiento ésta se necesita, y a medida que la tecnología avanza necesitamos mayor energía para poder hacer uso de ellas. En la actualidad, existen una gran variedad de equipos electrónicos diseñados para facilitar las tareas en el cotidiano vivir o simplemente hacerlas de una forma más rápida, eficiente y exacta quienes para su funcionamiento necesitan una fuente de energía, incluyendo actividades fundamentales como el alimentarse, asearse, algunas veces para continuar con algunas funciones vitales del cuerpo, muchas otras cosas como lo es el ver en la oscuridad, comunicarse a largas distancias, divertirse, ahorrar tiempo, etc.

Algunos años atrás el hombre se vio en la tarea de llevar esta energía a los hogares por lo que fue necesaria la implementación de un sistema que la pudiera llevar a ellos para vivir bien, actualizarse o sobrevivir. A pesar de tener un sistema que permite usar energía eléctrica en los hogares, el costo de generación, transmisión, distribución y los necesarios para poder hacer esto, impide energizar todos los lugares que la necesitan debido a algunos factores, en especial económicos para las empresas generadoras de este servicio, siendo poco rentable, generando costos muy elevados para poca demanda.

La energía eólica es un tipo de energía limpia que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes, es obtenida a través del viento, para esto se usan aerogeneradores que convierten energía cinética en energía mecánica que es convertida en energía eléctrica. Por otra parte, la energía solar es también muy utilizada en este tipo de situaciones que emplea el efecto fotovoltaico para generar energía eléctrica. Este otro tipo de energía se obtiene por medio de del aprovechamiento de la radiación solar que llega al planeta.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el Ministerio de Minas y Energía en su programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales –PROURE- Plan de acción al 2015 con visión al 2025, las zonas interconectadas de Colombia corresponden al 66% del territorio nacional y abarca 16 departamentos, es decir que existe un 34% aún sin una conexión al sistema interconectado nacional. Esto sucede no por falta de fuentes de generación de algún tipo sino debido a ineficiencia en infraestructura en líneas de transmisión y distribución, lo cual quiere decir que las personas que no cuentan con este servicio no disponen de energía para utilizar algún tipo de iluminación y no tienen la posibilidad de usar equipos electrónicos necesarios en algunas ocasiones para el diario vivir.

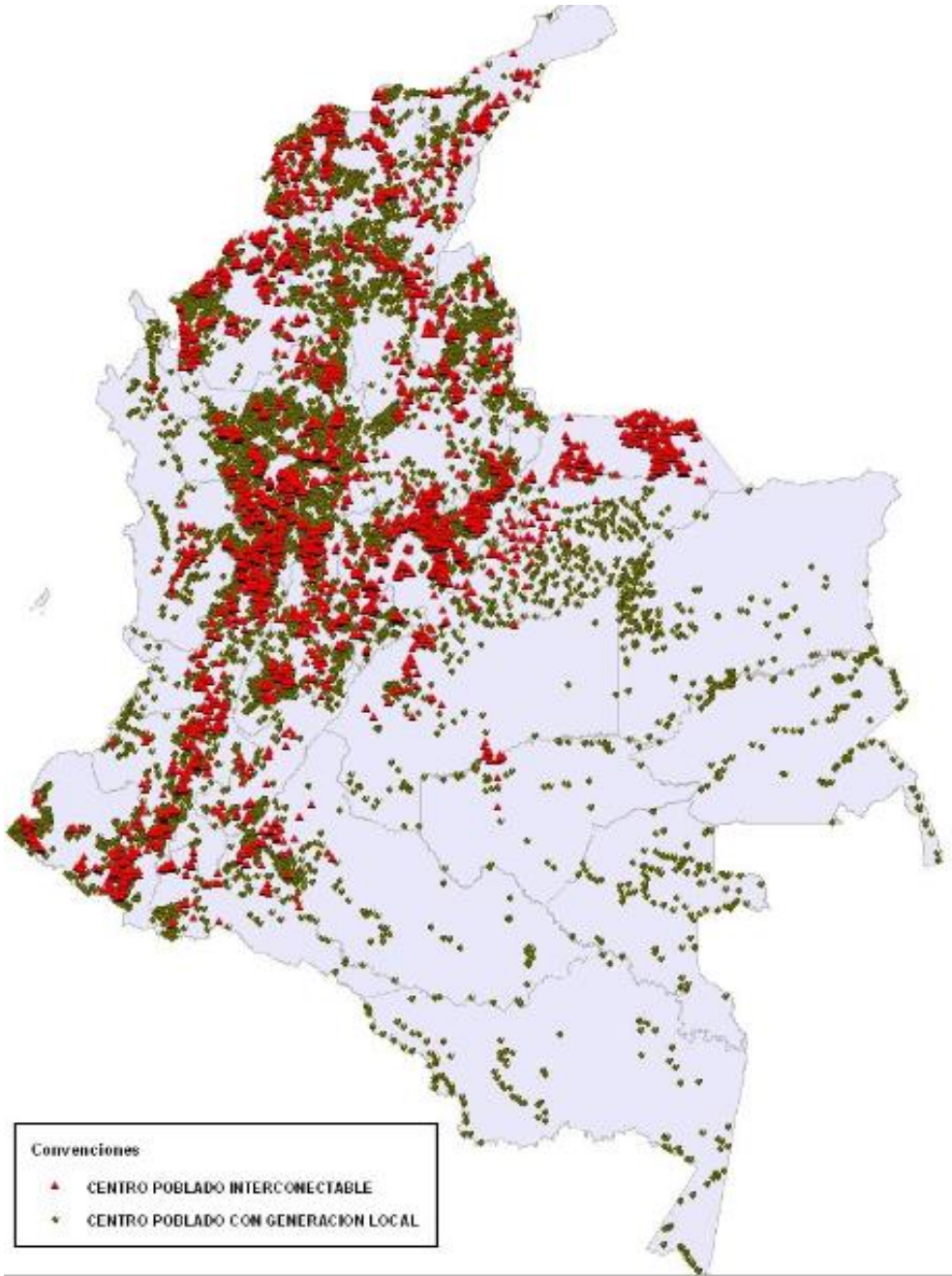
El sistema interconectado nacional (SIN) en estos momentos solo cubre el 48,1% del territorio colombiano, aunque atiende al 95% de la población.

Las energías alternativas son una forma de llevar la energía a estas zonas de una manera más económica, eficiente y de una manera más fácil de usar para los usuarios en sus distintas necesidades.

1.1 SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

En el territorio nacional el 48,1% de energía eléctrica es cubierta por el Sistema interconectado Nacional (SIN), y no obstante abastece el 98,2% del consumo de energía eléctrica total del país. El porcentaje faltante se encuentra en zonas que aún no están interconectadas (ZNI) al sistema nacional de energía eléctrica. Ver figura 1.

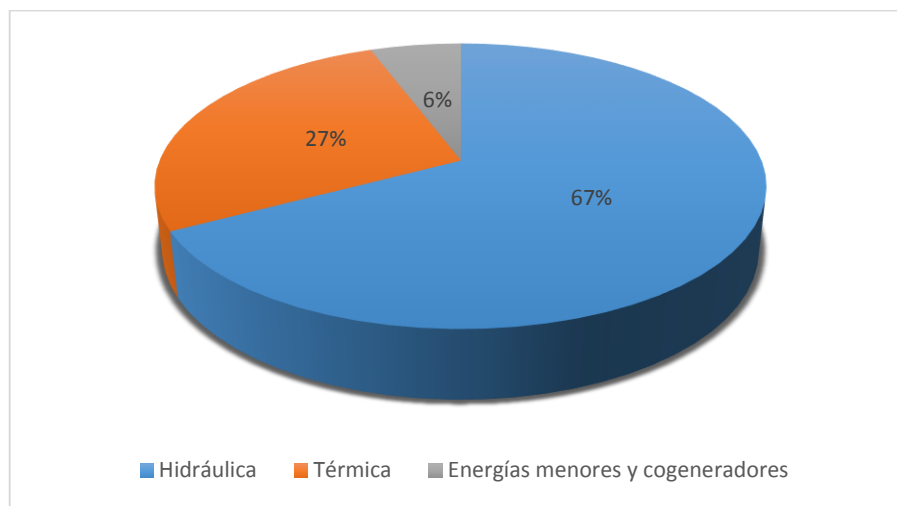
Figura 1. Infraestructura existente



Fuente: Acciones y retos para energización de las ZNI en el país

El SIN alcanzó una generación anual en 2013 de 62225 GWh, incrementando un 3,7% respecto a la energía generada en 2012. De toda la generación la participación de las plantas hasta octubre del 2014 fue así: 16863 MWh de energía térmica (27,1%), 41877,4 MWh de energía hidráulica (67,3%), 3546,8 de energías menores y cogeneradores (5,7%).

Figura 2. Composición de la generación en Colombia 2014



Fuente:XM, filial ISA

La generación hidráulica es la mayor fuente de generación en el país siendo un punto vulnerable para la generación de energía eléctrica frente a cambios climáticos. Cabe resaltar que el país posee un respaldo importante de generación térmica y esta le ha permitido responder en periodos de sequía en los últimos años.

1.1.1 Cobertura eléctrica. UPME (Unidad de Planeación Minero Energético) elaboró un plan indicativo de expansión de la cobertura con el fin de dar cumplimiento a la normativa vigente para estimar las inversiones públicas y privadas, a partir de las viviendas sin Servicio en un año base.

Con criterios técnicos y económicos se definió los interconectables en un período de planeamiento de cinco años y se calculó sus costos de inversión y AOM (Funciones técnicas y administrativas que permiten el manejo de infraestructura energética). En este periodo se obtuvo como resultado que, a diciembre de 2012, 470244 viviendas no contaban con el servicio de energía eléctrica. Se estimó un número de usuarios de 11594,208 con un total de 12064,452 viviendas, encontrando un déficit de cobertura en el 2012 del 3,96%. En el PIEC (Plan Indicativo de Expansión de cobertura de energía eléctrica) 2010-2014 se obtuvo como resultado una cobertura de 97,21%, llevándole el servicio de energía eléctrica a 252000 viviendas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general. Implementar un software que permita analizar la viabilidad técnica y económica del suministro de energía eléctrica de un grupo de viviendas rurales no conectadas al Sistema Interconectado Nacional mediante la mezcla de energía eólica y fotovoltaica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar un software que permita analizar la viabilidad del suministro de energía eléctrica a viviendas rurales sin conexión a la red mediante el uso de energía eólica y fotovoltaica.
- Elaborar un programa utilizando la herramienta Matlab que emplee el sistema descrito en el objetivo anterior.
- Emplear el software elaborado en tres ejemplos típicos.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Este documento se encuentra constituido por seis capítulos y tres apéndices.

En el capítulo 1 se muestra el planteamiento del trabajo de grado y sus objetivos brevemente.

En el capítulo 2 se muestran los parámetros de diseño para sistemas eólicos y fotovoltaicos.

En el capítulo 3 se presenta la tendencia del consumo.

En el capítulo 4 se presenta el dimensionamiento de sistemas mixtos fotovoltaicos y eólicos autónomos.

En el capítulo 5 se presenta el análisis financiero.

En el capítulo 6 se realizan ejemplos utilizando el software GreenProject.

En el capítulo 7 se muestran conclusiones y recomendaciones.

En el apéndice A se presentan los mapas de viento y energía eólica de Colombia.

En el apéndice B se presentan los mapas de radiación solar de Colombia.

En el apéndice C se presenta una lista de equipos utilizados para el diseño.

En el apéndice D se presenta una guía de instalación del software GreenProject.

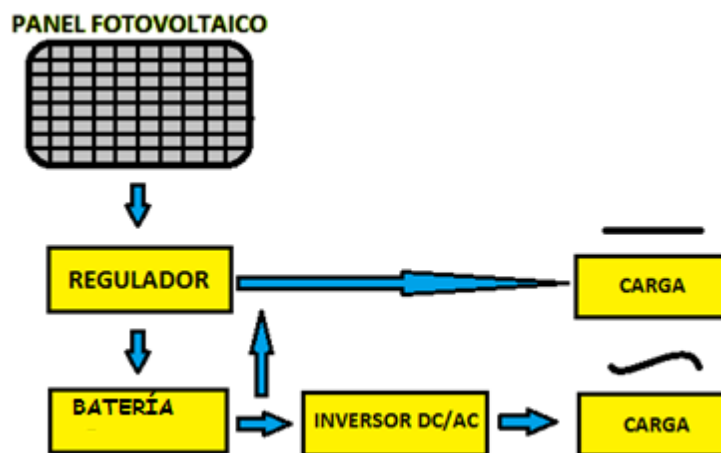
2. PARÁMETROS DE DISEÑO DE SISTEMAS EÓLICOS-FOTOVOLTAICOS

2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los componentes básicos de un generador fotovoltaico aislado son (Ver Figura 3):

- Panel fotovoltaico
- Sistema de baterías de acumulación
- Regulador de carga
- Inversor
- Baterías

Figura 3. Sistema fotovoltaico Autónomo



Fuente: CARTA GONZALES, J.A.

2.1.2 Panel fotovoltaico: Un panel fotovoltaico está formado por células que están interconectadas unas con otras. Una célula es un cristal dopado que debido a esto se convierte en un receptor de huecos y electrones y aumenta su conductividad. Esto es útil para las uniones P-N, como se mencionó en capítulos anteriores. Esta interconexión de células fotovoltaicas en serie viene recubierta con materiales necesarios para su protección, y garantizar un largo tiempo de vida útil. Lo más importante a la hora de diseñar es la potencia máxima de salida del panel la cual varía según el material con el que fue construido, entre sus características se encuentra la de voltaje-corriente la cual es la forma estándar de representar un dispositivo fotovoltaico. Entre sus parámetros se encuentran:

- **Corriente de cortocircuito I_{sc} :** Es la máxima corriente que producirá el dispositivo, que corresponden a un voltaje igual a cero.
- **Tensión de circuito abierto V_{oc} :** Es el máximo voltaje que producirá el dispositivo, que corresponden a una corriente igual a cero.
- **Potencia máxima P_{max} :** Es la máxima potencia que producirá el dispositivo, que corresponde al máximo I-V.
- **Corriente en el punto de máxima potencia:** Es el valor de la corriente para P_{max} .
- **Tensión en el punto de máxima potencia V_{mp} :** Es el valor de tensión para P_{max} .
- **Factor de forma FF :** Es el valor correspondiente al cociente entre P_{max} y el producto de I_{sc} x V_{oc} , el cual nos da una idea de la calidad del dispositivo, cuanto más alto mejor.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (4.1)$$

Hay que tener en cuenta que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo. Esta relación se puede expresar mediante:

$$t = Ta + (k \times R) \quad (4.1)$$

En donde Ta es la temperatura máxima, R es el valor de la radiación solar en mW/cm^2 y k es una constante que varía entre 0,2 y 0,4 $C * \frac{cm^2}{mW}$, todo esto depende de la velocidad del viento.

Para hallar la potencia de salida de un panel que trabaja a una temperatura Tt lo podemos hacer mediante:

$$Pt = Pp - (Pp * \delta * \Delta T) \quad (4.2)$$

Donde Pp es la potencia pico del panel a 25 C, δ es el coeficiente de degradación de la potencia y ΔT es el incremento de temperatura por sobre 25C, en otras palabras $\Delta T = Tt - 25 C$.

Anteriormente se dijo que células interconectadas entre sí con ciertas características en el material formaban un panel, un conjunto de paneles conectados en serie forman lo que se llama ramal, y ramales conectados en paralelo son llamados generador fotovoltaico el cual es el encargado de obtener la potencia deseada.

2.1.3 Baterías: Los sistemas de baterías son utilizados para almacenar la energía que se obtiene del generador fotovoltaico, aunque se pueden usar directamente, son de mayor necesidad en días en los que la energía solar es poca debido a las nubes u otros factores como en la noche cuando no hay energía de este tipo o el generador fotovoltaico no tiene potencia suficiente para abastecer el consumo.

Entre algunos de sus parámetros se encuentran:

- **Tensión nominal:** Es la tensión de uso de la batería.
- **Capacidad Amperios-hora:** Es la carga eléctrica que puede suministrar hasta llegar a su descarga total.
- **Capacidad de descarga:** Es la pérdida de carga cuando se encuentra en circuito abierto.
- **Eficiencia de carga:** Es la relación de la energía que se emplea para cargarla y la que realmente tiene almacenada.

2.1.4 Regulador de carga: Este elemento tiene como función controlar el proceso de carga de las baterías evitando la sobrecarga y sobredescarga, permitiendo un proceso de carga óptimo. Cuando ocurre una sobrecarga el regulador pone al generador fotovoltaico en circuito abierto evitando así el paso de corriente de éste hacia la batería y en caso de sobredescarga puede interrumpir el suministro de energía a los consumidores o indicar baja tensión en la batería a modo que sea inferior a los niveles de seguridad y pueda ocasionar daños.

Entre algunos de sus parámetros encontramos:

- **Tensión nominal:** Es la tensión con la que fue diseñado el regulador, la misma del sistema fotovoltaico.
- **Intensidad nominal:** Es la intensidad del campo fotovoltaico que se puede manejar, se mide en amperios. Suele coincidir con la corriente máxima a la salida del regulador.
- **Autoconsumo:** Es el porcentaje de energía que consume al operar.

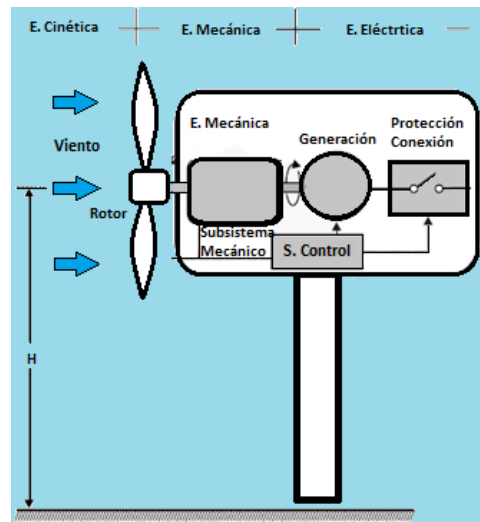
2.1.5 Inversores: Cuando se utilizan cargas con corriente alterna y la existente no proviene de la red, y se tiene un sistema en este caso fotovoltaico el cual genera corriente continua, es necesario tener un dispositivo que convierta la corriente continua en alterna, este dispositivo es electrónico y se llama inversor. Sus funciones principales son la inversión DC/AC, la modulación de la onda de salida y la regulación del valor eficaz de la tensión de salida. Pueden clasificarse en función de la forma de onda de la tensión de salida, de onda cuadrada, presenta gran contenido de armónicos, potencia de sobrecarga baja, baja regulación de voltaje, de onda modificada, muy utilizados en zonas rurales para alimentar electrodomésticos, y de onda senoidal, la mejor opción para alimentar cargas de AC, con estabilidad en la tensión y ningún problema con los armónicos. Algunos de sus parámetros son:

- **Tensión y corriente de entrada-salida.**
- **Tipo de forma de onda:** Cuadrada, cuadrada modificada, sinusoidal.
- **Límites de tensión de entrada:** Límite de tensión inferior y superior de diseño.
- **Distorsión armónica total(THD):** Con THD menor se presenta menor ruido e interferencias.
- **Potencia de salida:** Referida como potencia de operación.
- **Capacidad de sobrecarga:** Muy importante para arranque de motores con inversores de frecuencia fija.

2.2 CONCEPTOS GENERALES SISTEMAS EÓLICOS

2.2.1 Definición. Un sistema eólico aprovecha la energía cinética del viento y la transforma en energía eléctrica. Con el paso del tiempo y el avance tecnológico se ha avanzado en gran medida en cuánto a este sistema. En la antigüedad la forma más común de obtener energía del viento era mediante máquinas usadas para la molienda del grano y bombeo de agua. En la actualidad, la producción de electricidad se hace por medio de aerogeneradores, aunque aún se utilizan algunas máquinas para el bombeo mecánico de agua. En sistemas eólicos autónomos se utilizan generalmente aerogeneradores síncronos con un rectificador e inversor y baterías para el almacenamiento de la energía. Su funcionamiento consiste en que la masa de aire que pasa por las aspas se convierte en energía mecánica por medio del rotor, el cual generalmente esta acoplado a una caja multiplicadora de engranajes con el fin de incrementar el número de revoluciones del rotor hasta el número de revoluciones del generador eléctrico el cual va a girar a mayores revoluciones que el rotor. Al llegar la energía mecánica a este rotor, hace girar el generador eléctrico produciendo así energía, tal y como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Transformación de energía de un aerogenerador

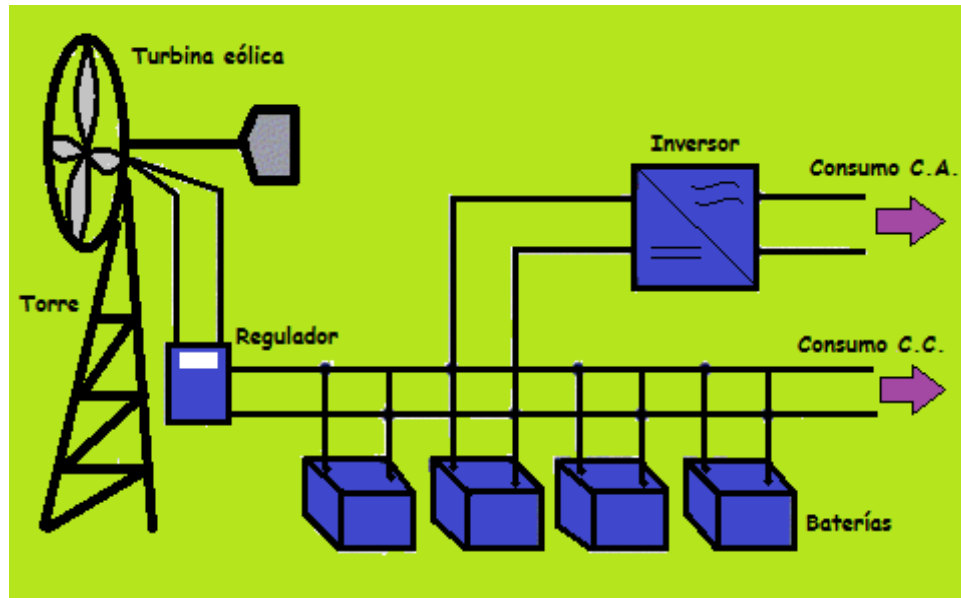


Fuente: CARTA GONALES, J.A.

2.2.2 Componentes de un sistema eólico aislado. Este sistema consta de aerogeneradores, inversores, reguladores y baterías como ya se mencionó (Figura 5), aunque el aerogenerador puede dividirse en subsistemas componentes:

- Subsistema de captación
- Subsistema de transmisión mecánica
- Subsistema de generación eléctrica
- Subsistema de orientación
- Subsistema de regulación
- Subsistema de soporte

Figura 5. Sistema eólico aislado



Fuente: CARTA GONALES, J.A.

2.2.3 Subsistema de captación: Es el responsable de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Según la posición del eje, las máquinas eólicas pueden clasificarse como de eje vertical u horizontal. Las máquinas de eje horizontal no son utilizadas en la actualidad debido a que presentaban un bajo rendimiento, necesitan ayuda para arrancar y aunque usan el generador puesto en tierra, producen menor energía.

Las palas son las componentes más importantes del rotor, ya que son quienes convierten la fuerza del viento en el par requerido para generar potencia útil. Según la cantidad de palas de los rotores, se pueden clasificar en rotores multipala o tipo hélice que son los más rápidos, presentan mejores rendimientos y por esta razón se usan para la generación de electricidad.

Según como la velocidad del viento llegue al rotor se clasifica en rotor de barlovento el cual es el más usado y en rotor de sotavento quien puede orientarse sólo debido a que sus aspas poseen una inclinación respecto del plano de giro de forma que cuando él giro describe en su trayectoria un cono.

Si las palas o aspas pueden girar con respecto a su eje longitudinal el rotor recibe el nombre de rotor de paso variable los cuales permiten una mejor producción de energía debido a que se adaptan aerodinámicamente al viento que incide sobre ellas, y rotor de paso fijo.

El componente que conecta las palas al árbol principal de transmisión y al tren de potencia recibe el nombre de buje. Existen tres tipos de bujes; bujes rígidos quienes pueden tener movimientos de rotación respecto a sus ejes longitudinales, bujes balanceantes los cuales permiten un movimiento entre las aspas y el eje del rotor, y bujes para palas articuladas que son una especie de mezcla de ambos, bujes rígidos con bisagras para las palas.

Para obtener la potencia máxima en el rotor de una turbina eólica podemos usar la expresión:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2} * \rho A v_1^3 \right) = \frac{1}{2} C_p * \rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) v_1^3 \quad (\mathbf{w}) \quad (4.3)$$

Donde A es el área barrida por el rotor, ρ la densidad del aire, v_1 la velocidad del viento aguas arriba del rotor, D el diámetro barrido por las aspas y C_p es el coeficiente de potencia del rotor que depende de la forma de la pala y está en un rango entre 0,4 Y 0,5.

Esto quiere decir que, si se dobla el diámetro del rotor, se obtendrá un área cuatro veces mayor lo que significa que también obtendrá del rotor una potencia cuatro veces mayor. Existe un ángulo α con el cual varía la fuerza que se produce en la

pala debido a su aerodinámica, llamado ángulo de ataque, esta fuerza resultante se puede descomponer en fuerza de sustentación y fuerza de arrastre.

La fuerza de sustentación es perpendicular a la dirección del viento y la fuerza de arrastre paralela.

$$F_s = \frac{1}{2}(C_s \rho v^2) ; \quad FA = \frac{1}{2}(C_a \rho v^2) \quad (4.4)$$

Ya que las palas del rotor de una turbina eólica no están estáticas, sino que giran, hay que tener en cuenta que se origina una velocidad del aire diferente a la de la velocidad del viento, entonces el par motor de un elemento de pala está dado por:

$$p_m = rF_m = r[F_s \text{Sen}(\alpha + \theta)] - F_a \text{cos}(\alpha + \theta) \quad (4.5)$$

Donde θ es el ángulo formado entre la cuerda y el plano de rotación llamado ángulo de calaje, r es la distancia del elemento de pala al eje de giro del rotor. Para que el par P_m sea máximo $F_s \text{Sen}(\alpha + \theta)$ debe ser máximo y $F_a \text{cos}(\alpha + \theta)$ mínimo.

Donde λ_o es la velocidad específica de punta de pala. La potencia mecánica del rotor está dada por:

$$P = \frac{\rho}{2} C_p(\lambda_o, \theta) A V^3 (W); \quad \lambda_o = \frac{wD}{2V} \quad (4.6)$$

2.2.4 Subsistema de transmisión mecánica: Las turbinas eólicas están compuestas por un árbol principal el cual está acoplado a la caja de engranajes y un árbol de salida acoplado a la salida de la caja de engranajes y el generador, además tienen dos tipos básicos de cajas de engranajes, de árboles paralelos y planetarios. Algunos diseños en vez de usar un multiplicador se usan elementos eléctricos o electrónicos. En la mayoría de aerogeneradores es necesario emplear un freno mecánico en la zona del tren de carga quien es capaz en la mayoría de

los casos de parar la turbina o se puede usar para evitar que la turbina gire cuando no está en funcionamiento. La forma más común de hacer el frenado es con el freno de disco. Puede ubicarse en el lado de baja o alta velocidad en la caja de engranajes.

2.2.5 Subsistema eléctrico: El generador es el encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica como ya se había mencionado. Normalmente se acostumbra a usar un alternador que puede ser de inducción (Asíncrono) o de excitación (Síncrono).

El generador asíncrono produce energía eléctrica en el estator cuando la velocidad de giro del rotor es superior a la velocidad de giro del campo magnético de excitación creado por el estator. Su velocidad de giro se puede expresar en rpm como:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (4.7)$$

El más utilizado es el de jaula de ardilla, requiere bajo nivel de mantenimiento al ser muy simple y no contar con elementos que giren en tensión eléctrica.

El generador síncrono utiliza un campo magnético giratorio que convierte la energía mecánica en energía eléctrica y giran siempre a la velocidad de sincronismo. Según la forma de crear el campo magnético se puede clasificar en generador de imanes permanentes en el rotor o electroimanes alimentados por corriente continua, este último tipo de rotor es muy utilizado. Para reducir el tamaño de la máquina y eliminar la caja multiplicadora, algunos fabricantes construyen la máquina con par de polos.

2.2.6 Subsistema de orientación: Ya que el viento incidente en la turbina cambia de dirección, el rotor debe ubicarse en posición perpendicular a él para aprovecharlo eficientemente, para esto existen dos sistemas de orientación

llamados sistema de orientación activa y pasiva. La orientación activa se hace a partir de datos obtenidos de la dirección del viento y la posición de la máquina, la cual se transmite a un sistema de actuación. La orientación pasiva se hace por medio de elementos mecánicos quienes aprovechan las fuerzas aerodinámicas del viento para las maniobras de orientación.

2.2.7 Subsistema de regulación y control: Es necesario que exista un sistema que se encargue de unir la operación de los subsistemas de control de las turbinas para obtener un trabajo óptimo en cuanto a la generación de las turbinas, para esto, el subsistema de regulación y control es el encargado de esta optimización, por lo que supervisa la máquina, gestiona las secuencias de arranque, parada, regula la potencia obtenida del viento y la del generador, envía información al operador de la central, entre otras funciones. Su función más importante es establecer elementos de control que se encargan del control de la potencia y del régimen de giro y orientación. Para lograr todo esto, este sistema puede cambiar las características aerodinámicas del rotor en caso de requerirlo o actuando en el sistema eléctrico.

En el caso de sistemas aislados, se acostumbra a utilizar regulación simple y pasiva, actuando en la fase de potencia cuando hay exceso para evitar daños por velocidades de giro excesivas. Otros sistemas más sofisticados de regulación permiten que la máquina trabaje en cualquier condición del viento y potencia modificando el ángulo de calaje de las aspas y el par generador eléctrico, esto se hace en la actualidad por medio de motores eléctricos situados en la raíz de cada aspa y con dispositivos hidráulicos. Para estos sistemas no conectados a la red el funcionamiento es inverso al de uno conectado a ella, debido la frecuencia de red para variar la velocidad del generador y la potencia de salida del generador la cual no es arbitraria y debe ser controlada en relación con la demanda instantánea del consumidor. El control de la orientación del rotor de la turbina debe tener pequeñas desviaciones en cuanto su orientación con respecto a la dirección del

viento para evitar pérdidas de potencia. También se debe tener en cuenta que la turbina debe tener un medio de control para evitar que gire siempre en el mismo sentido ya que los cables de la transmisión de energía pueden retorcerse.

2.2.8 Subsistema de soporte: Este subsistema consiste en una estructura de acero en el que se montan los subsistemas de la máquina eólica y la carcasa llamada góndola, la cual se acopla por medio de un rodamiento a la parte superior de la torre. La carcasa es una estructura que protección generalmente echa de fibra de vidrio y poliéster, y a través de él se hacen labores de mantenimiento. Para facilitar su transporte, se construyen en tramos.

2.3 Compensación de potencia reactiva

La mayoría de turbinas eólicas del mundo emplean generadores asíncronos o de inducción. Para compensar la potencia reactiva cuando nos conectamos al SIN, podemos usar un banco de condensadores. Se recomienda no compensar más del 90% de la corriente de vacío del motor para evitar autoexcitación del motor por descarga del condensador hacia el motor. Aunque el punto de conexión depende del tipo de instalación, el mejor punto de instalación del banco de condensadores es aguas abajo del interruptor general.

3. TENDENCIA DEL CONSUMO

3.1. Zonas no interconectadas en Colombia

En Colombia aún existen 32 departamentos con un número de 1448 localidades no interconectadas al SIN (Sistema Interconectado Nacional) tal y como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Localidades de Colombia ZNI

| Departamento | Localidades |
|--|-------------|
| Amazonas | 61 |
| Antioquia | 43 |
| Archipiélago de San Andrés, Providencias y Santa Catalina | 2 |
| Bolívar | 2 |
| Caquetá | 47 |
| Casanare | 3 |
| Cauca | 128 |
| Chocó | 307 |
| Guainía | 73 |
| Guaviare | 34 |
| La Guajira | 2 |
| Meta | 36 |
| Nariño | 552 |
| Putumayo | 35 |
| Valle del Cauca | 33 |
| Vaupés | 54 |
| Vichada | 36 |

Fuente: (IPSE, Instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas, CNM prestación promedio junio 2014).

3.2 Cifras energéticas con ZNI

A continuación, se presenta la demanda de energía acumulada por departamento comprendida en el periodo de junio del 2013 hasta junio del 2014.

Tabla 2. Demanda de Energía acumulada por departamento

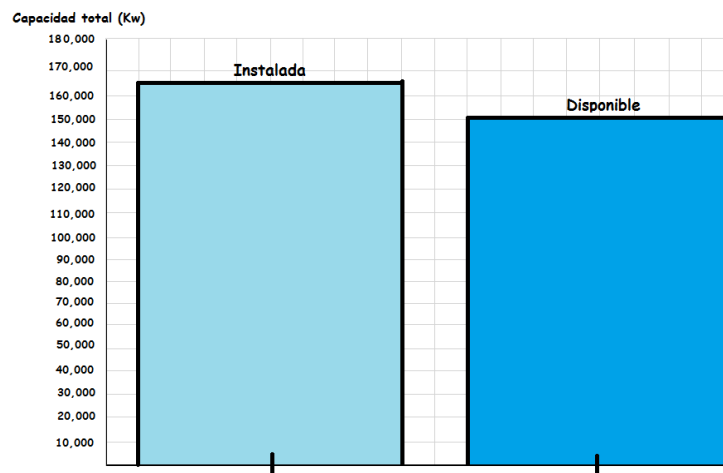
| Departamento | Demanda [MWh] |
|----------------------------|---------------|
| Archipiélago de San Andrés | 218,599 |
| Amazonas | 45,029 |
| Vichada | 26,808 |
| Chocó | 18,901 |
| Nariño | 17,052 |
| Guainia | 15,937 |
| Cauca | 15,121 |
| Putumayo | 12,285 |
| Vaupés | 9,552 |
| Meta | 1,907 |
| Antioquia | 1,745 |
| Caquetá | 671 |
| Guaviare | 561 |
| Bolívar | 332 |
| La guajira | 231 |
| Valle del Cauca | 75 |
| Total | 384,812 |

Fuente: (IPSE, Instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas).

Según esto, el Archipiélago de San Andrés es el departamento con mayor demanda energética, energía que puede suplirse por medio de diferentes tipos de energía como lo son la fotovoltaica, eólica, mareomotriz, entre otras. Igualmente, con otros departamentos.

Hay un aumento de carga en zonas no interconectadas y gran capacidad disponible para este periodo, ver figura 6.

Figura 6. Capacidad instalada y disponible.



Fuente: Fuente: (IPSE, Instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas).

La gráfica 6 ha referencia a capacidad instalada y disponible de potencia en recurso de energías limpias para zonas no interconectadas.

4. DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS MIXTOS FOTOVOLTAICOS Y EÓLICOS AUTÓNOMOS

Para dimensionar un sistema mixto de energía renovable aislado de la red, en este caso energía fotovoltaica y eólica, es necesario dimensionar el tamaño del generador fotovoltaico, las baterías y el generador eólico de manera que se pueda suministrar la energía requerida a los habitantes a partir de la radiación solar y eólica disponible existiendo un equilibrio entre diseño y su costo. Para esto, existen numerosos métodos algunos simples y otros complejos.

Aunque existan diferentes formas de hacerlo, la idea es hacer un dimensionamiento correcto en el que el generador fotovoltaico y el generador eólico puedan producir la energía necesaria para alimentar las cargas y para abastecer las baterías de modo que puedan proveer energía a los usuarios.

En sistemas mixtos lo mejor es dimensionar los componentes individuales simulando la operación del sistema bajo condiciones locales de modo que se pueda proporcionar la máxima energía renovable obtenible. En este caso se inicia con la energía aportada por el generador seleccionado.

El dimensionamiento se hará de la siguiente forma:

1. Determinación de la energía necesaria para el sistema.
2. Dimensionamiento del generador eólico.
3. Cálculo de la radiación solar disponible.
4. Cálculo de la potencia necesaria para los paneles fotovoltaicos.
5. Dimensionamiento de las baterías.
6. Dimensionamiento del regulador de carga.
7. Elección del inversor.

4.3.1 Determinación de la energía necesaria para el sistema. Para estimar el consumo es necesario realizar una lista estimando los distintos electrodomésticos que se van a usar en la vivienda incluyendo la iluminación, tomando el número y la potencia nominal de cada uno de ellos junto con las horas de uso en el día para calcular la potencia máxima instalada con unidades de Wh/d. Esto se hace para los electrodomésticos que trabajan tanto con corriente continua como corriente alterna.

$$E = \frac{E_{cc}}{\eta_b * \eta_r * \eta_c} + \frac{E_{ca}}{\eta_b * \eta_r * \eta_c * \eta_{inv}} \quad (4.8)$$

Dónde:

E es la energía total necesaria del sistema.

E_{cc} es la energía de cargas en corriente continua.

E_{ca} es la energía de cargas en corriente alterna.

η_b es la eficiencia de las baterías.

η_r es la eficiencia del regulador.

η_c es la eficiencia del cableado.

η_{inv} es la eficiencia del inversor.

Se tiene en cuenta un margen de seguridad del 20% para este consumo, entonces:

$$E_{max} = E * 1,2 \quad (4.9)$$

4.3.2 Dimensionamiento del generador eólico. Para realizar este cálculo se utilizaron los datos presentados en el Atlas de viento de UPME. Para dimensionar el generador eólico, debemos conocer su potencia. La expresión para este cálculo es la siguiente:

$$P_{eolica} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{ (w)} \quad (4.10)$$

Dónde:

ρ es la densidad del aire en el área de generación.

A es el área de las aspas.

v es la velocidad buscada.

La velocidad de viento buscada se puede encontrar de una forma sencilla por medio de la ley exponencial de hellman:

$$v(h2) = v(h1) \left[\frac{h2}{h1} \right]^b \quad (4.11)$$

Dónde:

$h1$ es la altura de referencia del viento.

$h2$ es la altura del rotor.

$v(h1)$ es la velocidad a la altura de referencia del viento.

$v(h2)$ es la velocidad a la altura del rotor.

b es el exponente de hellman.

El exponente de hellman varía dependiendo del terreno donde se ubique el generador eólico. La altura de referencia de la velocidad del viento $h1$ generalmente es de diez metros.

Teniendo esta velocidad podemos hallar la potencia eléctrica necesaria del sistema como:

$$P_{electronica} = P_{eolica} * \eta_{se} \quad (4.12)$$

Siendo η_{se} la eficiencia del sistema eléctrico.

4.3.3 Cálculo de la radiación solar disponible. La radiación solar se puede calcular de diferentes formas, en este proyecto se utilizará la información obtenida de mapas de radiación solar proporcionados por UPME. Es necesario entonces conocer el lugar en donde se desea ubicar el proyecto. Se estimará el ángulo de inclinación recomendado para un proceso óptimo β al proporcionar la latitud del lugar. Se recomienda ubicar el generador hacia el sur en el hemisferio Norte y hacia el Norte en el hemisferio Sur, igualmente una inclinación del panel que no sea menor que diez grados con respecto a la horizontal.

4.3.4 Cálculo de la potencia necesaria para los paneles fotovoltaicos. Para dimensionar el generador fotovoltaico es necesario conocer la radiación media mensual disponible sobre una superficie horizontal. Para esto se toman los valores de HPS de los mapas de radiación ya mencionados con la radiación solar más desfavorable a modo que los cálculos obtenidos reflejen la potencia mínima suministrada por el generador fotovoltaico. Cabe resaltar que los datos no son exactos debido a que hay muchos factores influyentes. Para calcular el número de paneles necesarios en paralelo es necesario calcular las horas pico solares (HPS) y la corriente diaria necesaria. De este modo tenemos:

$$HPS = \frac{\text{Insolación} \left[\frac{kWh}{m^2 \text{ día}} \right]}{\text{Irradiación} \left[\frac{W}{m^2} \right]} \quad (4.13)$$

Para calcular la corriente necesaria para los paneles primeramente es necesario saber los amperes-hora por día, además se debe tener en cuenta la tensión nominal seleccionada del sistema (se recomienda 12v para potencia menor a 1,5 Kw, 24v para potencia entre 1,5 y 5 kw y 48 o 120v para potencias mayores a 5Kw):

$$Ahd = \frac{E_{max}}{v_{sis}} \quad (4.14)$$

Luego la corriente necesaria para el sistema de paneles sería la siguiente:

$$I_p = \frac{Ahd}{HPS} \quad (4.15)$$

El número de paneles solares conectados en paralelo se halla dividiendo la corriente que aporta el arreglo fotovoltaico entre la corriente máxima del panel (si el número resultante de paneles es un número racional se aproxima a un entero):

$$P_p = \frac{I_p}{I_{max}} \quad (4.16)$$

El número de paneles en serie se obtiene dividiendo la tensión seleccionada del sistema entre la tensión máxima proporcionada por el panel (Si el número de paneles no es un número entero, se aproxima al siguiente entero):

$$P_s = \frac{v_{sis}}{v_{maxp}} \quad (4.17)$$

Finalmente, el número total de paneles se obtiene sumando multiplicando el número de panes serie por el número de paneles en paralelo:

$$P_{totales} = P_p * P_s \quad (4.18)$$

4.3.5 Dimensionamiento de las baterías. Para calcular la capacidad de almacenamiento de las baterías es necesario conocer su capacidad de descarga, el número de días que se estima que no habrá energía llamados días de autonomía y el factor de corrección por temperatura el cual generalmente es 0,9, por medio de la siguiente expresión:

$$C_b(Wh) = \frac{E_{max} * D_a}{C_d * F_{ct}} \quad (4.19)$$

Dónde:

C_b es la potencia a almacenar.

D_a son los días de autonomía.

C_d es la capacidad de descarga de las baterías.

F_{ct} es el factor de corrección por temperatura.

Debido a que las baterías comercialmente se encuentran con especificaciones de Ah, se utilizará la siguiente ecuación:

$$C_b(Ah) = \frac{C_b(Wh)}{V_b} \quad (4.20)$$

Siendo V_b la tensión especificada de alimentación de la batería. El número de baterías conectadas en serie se obtiene de la siguiente forma:

$$B_s = \frac{V_N}{V_{NB}} \quad (4.21)$$

Siendo V_N la tensión nominal del sistema y V_{NB} la tensión nominal de las baterías.

Para conocer el número de baterías requeridas en paralelo dividimos la capacidad obtenida de las baterías entre la capacidad de las baterías seleccionadas.

$$B_p = \frac{C_B}{C_{NB}} \quad (4.22)$$

4.3.6 Dimensionamiento del regulador de carga. Para esto se recomienda seleccionar un regulador para el sistema fotovoltaico y otro para el sistema eólico, lo mejor es disponer de reguladores separados para cada sistema para un funcionamiento más eficiente.

Para realizar el cálculo del tipo de regulador requerido para el sistema de energía solar se debe conocer la corriente con la que puede trabajar, esto implica conocer la corriente cortocircuito del mismo y el número de paneles conectados en serie:

$$I_{reg} = I_{sc} * \#Paneles\ serie * 1,2 \quad (4.23)$$

Se debe tener en cuenta un margen de seguridad del 15 -20% para evitar posibles accidentes o deterioro del mismo el cual impide que trabaje al límite de la corriente máxima permitida. El número total de reguladores necesarios para la instalación fotovoltaica se puede hallar de la siguiente forma:

$$Reg_{totales} = \frac{\#P_p}{I_{reg} / I_{screg}} \quad (4.24)$$

Dónde $\#P_p$ es el número de paneles conectados en paralelo, I_{screg} es la corriente de corto circuito del regulador y I_{reg} / I_{screg} es el número de reguladores que se deben conectar en grupo.

Para calcular el número de reguladores necesarios para el sistema eólico se recomienda usar un regulador de tensión por generador eólico.

4.3.7 Elección del inversor. La selección del inversor se hace con base en la potencia alterna que va a alimentar las cargas. Nuevamente se recomienda usar un margen de seguridad del 20%, de esta forma podemos conocer su potencia:

$$P_{inv} = 1,2 * P_{ca} \quad (4.25)$$

La tensión de alimentación es la misma que del banco de baterías y debe soportar esta potencia en régimen permanente.

5. ANÁLISIS FINANCIERO

Para analizar las alternativas, elección técnica y económica de este proyecto, se hace una comparación entre la alternativa de electrificación rural fotovoltaica y eólica mixta y la alternativa de interconexión a la red expuestas en el Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (Plan de expansión UPME 2013-2017).

- Se dimensiona el sistema fotovoltaico cumpliendo con la demanda estimada de 120 kWh-mes, es decir, 4 kWh-día para hacer la comparación (Tabla 3).

Tabla 3. Supuestos generales para determinar el costo de alternativas

| Parámetro | Alternativa de interconexión al SIN |
|------------------------|-------------------------------------|
| Consumo por usuario | 120 kWh-mes |
| Horas de servicio | 24 |
| Vida útil del proyecto | 30 años |
| Redes N1 | Estimadas |
| Redes N2 | UC Res. CREG 098/2008 |
| AOM | Estimadas |

Fuente: (Plan expansión UPME 2013-2017)

- Los datos de índice de precios al Productor IPP y el índice de Precios al Consumidor IPC, se obtienen del DANE.
- Los costos de las redes fueron calculados con base la Resolución CREG 097 del 2008.
- El costo para redes de nivel 1 fue tenido en cuenta de acuerdo al estudio realizado por BRP ingenieros llamado “Propuesta para revisión de los

parámetros técnicos y económicos utilizados para la definición de alternativas de prestación del servicio y ajustes a la metodología del PIEC” para la UPME.

- El costo de AOM (Administrativo, operación y mantenimiento) para redes de baja tensión está basado en la CREG para cada operador de red.
 - El sobrecosto debido a las restricciones geográficas está apoyado en la UPME.
- Las restricciones geográficas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Restricciones geográficas

| Pendiente del terreno | Criterio | Costo(Miles\$/km) |
|----------------------------|------------------|-------------------|
| Pendiente Alta | >30° | 42,217 |
| Pendiente Media | entre 10° y 30° | 10.554 |
| Pendiente Baja | <10° | 0 |
| Sin pendiente | 0 | 0 |
| Tipo de Rio | Criterio | Costo(Miles\$/km) |
| Rio principal | Alto caudal | 84,443 |
| Tipo | Criterio | Costo(Miles\$/km) |
| Vía Principal pavimentada | Distancia <12 km | 0 |
| Vía Secundaria pavimentada | Distancia <8 km | 0 |
| Carretera | Distancia<4 km | 10,554 |
| Sin vías | | 42,217 |

Fuente: (Plan expansión UPME 2013-2017)

Interconexión a la Red

Los cálculos realizados para la alternativa de interconexión están basados en criterios técnicos de cargabilidad, restricciones geográficas como ríos a cruzar, estado de las vías, pendientes para subestaciones con nivel de tensión 2 (13,2kV). Los costos de expansión se muestran a continuación en la tabla 5.

Tabla 5. Costo Interconexión SIN

| Costo de inversión | \$/usuario 2013 | \$/km dic 2013 |
|------------------------------------|-----------------|----------------|
| Trasformador | 48714 | |
| AOM Transformador (3.27%) | 1592 | |
| Inversión línea nivel de tensión 2 | | 41902380 |
| AOM Línea (3.27%) | | 1370217 |
| Red Nivel de tensión 1 | 302600 | |
| AOM Nivel de tensión 1 | 101681 | |
| Energía Aguas Arriba | 2401762 | |
| Total, Costo Comparativo | 2856349 | 43272597 |

Fuente: (Plan expansión UPME 2013-2017)

Se toman consideraciones como una regulación de voltaje $\leq 10\%$ y pérdidas $\leq 5\%$, además una unidad constructiva para línea rural por kilómetro que corresponde a la N2L28 para longitudes menos a 100 km, un poste de concreto vano tipo 1-3 hilos (3 fases sin neutro) conductor DN2-2 conductor mayor a 2 AWG y menores o iguales a 2/0 AWG con un costo de \$41902380 por km el cual tiene una estimación de 30 años como vida útil.

Para estimar el costo de interconexión al SIN se toma el modelo del Plan de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica actualizado a diciembre 2013:

$$\text{Costo } lcc. = (43272597 \times km) + \$Pendientes + \$Vías + \$Ríos + (2856349 * Vs) \quad (5.1)$$

Donde:

Costo lcc. = Costo interconexión al SIN.

\$Pendientes = Costo por pendientes en la zona.

\$Ríos = Costo Ríos cercanos.

\$Vías = Costo por vías.

Vs = viviendas sin servicio.

Generación fotovoltaica – eólica

El precio de la generación será el precio de los equipos seleccionados más 10% adicional por montaje de estructuras, junto con el precio de reposición de baterías las cuales se repondrán unas siete veces ya que el tiempo de vida de las baterías tiene un promedio de 3 años y el del proyecto de 20 años, lo que aumenta su costo y 5% destinado al mantenimiento de la instalación y equipos.

6. EJEMPLOS UTILIZANDO EL SOFTWARE GREENPROJECT

6.1. DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA

Es uno de los 32 departamentos de Colombia. Se encuentra ubicado hacia el noreste y forma parte de la región caribe. Aunque este departamento tiene un gran potencial eléctrico presenta un servicio deficiente, se logró un gran avance con la construcción del parque eólico Jepirachi con una capacidad instalada de 19,5 MW de potencia nominal.

6.1.1. Datos previos

- **Población**

Se eligió la ciudad de RIOHACHA, capital del departamento de la guajira. Es la puerta de entrada para conocer la península. En ella desemboca el río Ranchería. Se eligió también un caserío con 10 usuarios sin servicio.

- **Radiación Solar- Velocidad del viento**

Los datos de radiación solar se toman de los mapas de radiación solar de la UPME contenidos en el software ya que no se tienen los datos tomados de la zona.

- **Carga instalada**

Para determinar el consumo de los equipos como análisis de alternativas, una carga de 1,728 kwh/mes lo que equivale a 57,6 kwh/día. Se utilizaron datos de equipos presentados en la tabla 6.

Tabla 6. Consumo típico para algunos electrodomésticos

| Tipo | Potencia[Wh] |
|----------------------------|--------------|
| Lámpara Fluorescente | 40 |
| Bombilla LED bajo consumo | 13 |
| Pequeños electrodomésticos | 20 |
| Bomba de Agua típica | 400 |
| Ventilador | 35 |
| Nevera típica | 400 |
| TV(LCD 27") | 43 |
| Radio-Equipo de sonido | 120 |
| Computador | 35 |
| Plancha | 1200 |

- **Equipos para el diseño**

Ya que hay una gran diversidad de equipos en el mercado, se dispuso de una lista de algunos de ellos para este proyecto, los cuales se presentan en los anexos. Los equipos escogidos para este proyecto se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Equipos para el diseño

| Equipo | Potencia(w) | cantidad | Horas/Día | Tipo carga |
|---------------|-------------|----------|-----------|------------|
| Televisor | 43 | 1 | 6 | CA |
| Nevera | 400 | 1 | 4 | CA |
| Ventilador | 35 | 1 | 4 | CA |
| Bomba de Agua | 400 | 1 | 2 | CA |
| Iluminación | 40 | 5 | 5 | CC |

- **Días de autonomía y tensión del sistema**

Se tomaron dos días de autonomía debido a que la zona no presenta inviernos nubosos, con una tensión de 24 Voltios para el sistema.

6.1.2 Dimensión de los dispositivos Eólicos-fotovoltaicos

Al elegir el lugar de estudio para el proyecto se obtienen los datos de radiación solar para el peor mes o el más desfavorable del año, mostrando una radiación solar de $5,5 \frac{kW}{m^2}$ mostrados en la figura 8. Además, es necesario introducir la tensión del sistema, los días de autonomía y la latitud de la zona. Ver figura 8.

Figura 7. Datos de radiación Riohacha

The screenshot shows a software window titled "GREEN PROJECT" with a "RADIACION SOLAR" form. The form is divided into several sections:

- Radiación mensual [Kwh/m²]:** A table with 12 columns for months from Enero to Diciembre. The values are mostly empty, with a small value of 14.26 in the Enero column.
- Datos:** Input fields for "Latitud Norte" (11), "Tensión del sistema" (24 [V]), "Días de autonomía" (2), and "Inclinación óptima" (14.26). A button "Ingresar datos" is below.
- Opción A:** A dropdown menu set to "Riohacha", a field for "Horas Pico Solares" (5.5 [Horas]), and buttons "Ingresar datos opción A", "Ingresar datos opción B", and "Limpiar datos".
- Opción B - Radiación solar mensual [Kwh/m²]:** A table with 12 columns for months from Enero to Diciembre. The values are mostly empty.

At the bottom of the window, there are three buttons: "SALIR", "REGRESAR", and "CONTINUAR".

Al introducir el tipo de terreno el software utiliza el coeficiente de hellman, junto con la altura a la que se desea el buje, el diámetro de las aspas y la ubicación. El software muestra la velocidad del viento del lugar con los datos obtenidos del atlas de viento y energía eólica proporcionado por la UPME (3,5 m/s). Hecho esto, muestra la combinación óptima de equipos para el sistema ver figura 9.

Figura 8. Equipos seleccionados Riohacha

The screenshot shows a software interface for selecting components. The main window is titled 'GREEN PROJECT'. A central blue box titled 'COMPONENTES SELECCIONADOS' contains the following data:

| Referencia Panel | Paneles serie | Paneles paralelo | N. total paneles | Precio |
|------------------|---------------|------------------|------------------|-----------|
| 4003002 | 1 | 25 | 25 | 656034975 |

| Referencia regulador | Número de reguladores | Precio |
|----------------------|-----------------------|---------|
| XANTREZ | 7 | 9100000 |

| Referencia baterías | Baterías serie | Baterías paralelo | N. total baterías | Precio |
|---------------------|----------------|-------------------|-------------------|---------|
| SUNLIGHT | 16OPzS2500 | 2 | 4 | 5520000 |

| Marcas inversor | Referencia | Cantidad | Precio |
|-----------------|-------------------|----------|---------|
| XANTREZ | Prowatt SIW 20001 | 1 | 1309000 |

| Referencia aerogenerador | Precio unidad | Cantidad | Precio |
|--------------------------|---------------|----------|-----------|
| SOLENER | 24000000 | 6 | 144000000 |

Costo

Precio equipos e instalación:

| | | |
|------------------------------|---------------|------|
| Calcular costo total equipos | 815971975 | [\$] |
| Calcular costo instalación | 1045895771.25 | [\$] |

10% diseño + 5% mantenimiento + reposición baterías

Buttons: CARGAR DATOS, SALIR, REGRESAR, CONTINUAR.

Se eligió un inversor con potencia nominal de 2000 Watts ya que el software mostro una potencia recomendada de 1530 Watts, reguladores con tensión nominal del sistema de 24 volts, aerogeneradores de 5000 Watts ya que el software indicó que se podían obtener 2342 Watts por medio del viento y paneles de 5000 Watts.

6.1.3. Análisis de alternativas.

El costo de interconexión se obtiene utilizando la ecuación (5.1) y las restricciones geográficas de la tabla 4 los cuales para esta situación son los siguientes:

- Ríos: No se debe cruzar ningún río para llevar la red a la subestación más cercana, no implica un costo adicional.
- Pendiente: La inclinación del terreno es menor a 10 grados, se considera pendiente baja, no implica costo extra.
- Vía: La vía no se encuentra pavimentada, tiene una descripción de carretera/ferrocarril, lo que genera un costo adicional de \$10,607,000 por Km.

Se presentan los resultados de la comparación con la alternativa de interconexión a la red por medio de generación fotovoltaica y eólica mixta en la tabla 8 y la figura 10.

Tabla 8. Costo de alternativas Riohacha

| Alternativa | Precio (\$) |
|--------------------------------------|------------------|
| Costo total instalación del Proyecto | 1'045,895,771.25 |
| Costo total Interconexión a la red | 1'160,035,027 |

Figura 9. Restricciones geográficas y alternativas de conexión



Como se puede observar el software indica que es factible técnica y económicamente la instalación de un sistema de abastecimiento por medio de energía fotovoltaica y eólica mixta para 10 usuarios en la ciudad de Riohacha. Se aconseja alimentar este grupo de viviendas por medio de energía mixta eólica y fotovoltaica.

6.2. DEPARTAMENTO DEL CESAR

Es uno de los 32 departamentos de Colombia. Se encuentra ubicado hacia el noreste del país con una extensión de 22,905 Km^2 . En 2012 su incidencia de pobreza se ubicó en un 46%. Aunque tiene una cobertura del 94,34%, se desea conocer la viabilidad de su abastecimiento con energías limpias.

6.2.1. Datos previos

- **Población**

Se eligió la ciudad de Valledupar, capital del departamento del cesar. Está ubicada al nororiente de la Costa Atlántica. Se encuentra en el punto intermedio de dos cuencas de explotación carbonífera más grandes del país. Se eligió un caserío con 30 usuarios sin servicio.

- **Radiación Solar- Velocidad del viento**

Los datos de radiación solar se toman de los mapas de radiación solar de la UPME contenidos en el software ya que no se tienen los datos tomados de la zona.

- **Carga instalada**

Para determinar el consumo de los equipos como análisis de alternativas, una carga de 5190 kwh/mes lo que equivale a 173 kwh/día. Se utilizaron datos de equipos presentados en la tabla 9.

Tabla 9. Consumo típico para algunos electrodomésticos

| Tipo | Potencia[Wh] |
|----------------------------|--------------|
| Lámpara Fluorescente | 40 |
| Bombilla LED bajo consumo | 13 |
| Pequeños electrodomésticos | 20 |
| Bomba de Agua típica | 400 |
| Ventilador | 35 |
| Nevera típica | 400 |
| TV(LCD 27") | 43 |
| Radio-Equipo de sonido | 120 |
| Computador | 35 |
| Plancha | 1200 |

- **Equipos para el diseño**

Ya que hay una gran diversidad de equipos en el mercado, se dispuso de una lista de algunos de ellos para este proyecto, los cuales se presentan en los anexos. A continuación, se muestran equipos típicos para el proyecto en la tabla 10.

Tabla 10. Equipos para el diseño

| Equipo | Potencia(w) | cantidad | Horas/Día | Tipo carga |
|---------------|-------------|----------|-----------|------------|
| Televisor | 43 | 1 | 6 | CA |
| Nevera | 400 | 1 | 4 | CA |
| Ventilador | 35 | 1 | 4 | CA |
| Bomba de Agua | 400 | 1 | 2 | CA |
| Iluminación | 40 | 5 | 5 | CC |

- **Días de autonomía y tensión del sistema**

Se tomaron tres días de autonomía debido a que la zona no presenta inviernos nubosos, con una tensión de 24 voltios para el sistema.

6.2.2. Dimensión de los dispositivos Eólicos-fotovoltaicos

Al elegir el lugar de estudio para el proyecto se obtienen los datos de radiación solar para el peor mes o el más desfavorable del año, mostrando una radiación solar de $5.5 \frac{kW}{m^2}$. Además, es necesario introducir la tensión del sistema, los días de autonomía y la latitud de la zona, ver figura 11.

Figura 10. Datos de radiación Valledupar



Al introducir el tipo de terreno el software utiliza el coeficiente de hellman, junto con la altura a la que se desea el buje, el diámetro de las aspas y la ubicación. El software muestra la velocidad del viento del lugar con los datos obtenidos del atlas de viento y energía eólica proporcionado por la UPME (4 m/s). Hecho esto, muestra la combinación óptima de equipos para el sistema, ver figura 12.

Figura 11. Equipos seleccionados Valledupar

COMPONENTES SELECCIONADOS

| Referencia Panel | Paneles serie | Paneles paralelo | N. total paneles | Precio |
|--------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 435W laminates Grade-B | 1 | 105 | 105 | 42000000 |
| Referencia regulador | Número de reguladores | | Precio | |
| XANTREZ | 20 | | 26000000 | |
| Referencia baterías | Baterías serie | Baterías paralelo | N. total baterías | Precio |
| SUNLIGHT | 160PzS2500 | 2 | 8 | 22112000 |
| Marca inversor | Referencia | Cantidad | Precio | |
| XANTREZ | Prowatt SW 20001 | 1 | 1309000 | |
| Referencia aerogenerador | Precio unidad | Cantidad | Precio | |
| SOLENER | 24000000 | 18 | 432000000 | |

Precio equipos e instalación:

| | | |
|------------------------------|-----------|------|
| Calcular costo total equipos | 523421000 | [\$] |
| Calcular costo instalación | 930046150 | [\$] |

10% diseño + 5% mantenimiento + reposición baterías

Costo

CARGAR DATOS SALIR REGRESAR CONTINUAR

Se eligió un inversor con potencia nominal de 2000 Watts ya que el software mostro una potencia recomendada de 1530 Watts, reguladores con tensión nominal del sistema de 24 Volts, aerogeneradores de 5000 Watts ya que el software indicó que se podían obtener 3710,96 Watts por medio del viento y paneles de 435 Watts.

6.1.3 Análisis de alternativas. El costo de interconexión se obtiene utilizando la ecuación (5.1) y las restricciones geográficas de la tabla 4 los cuales para esta situación son los siguientes:

- Ríos: No se debe cruzar ningún río para llevar la red a la subestación más cercana, no implica un costo adicional.
- Pendiente: La inclinación del terreno es menor a 10 grados, se considera pendiente baja, no implica costo extra.
- Vía: La vía tiene presenta una característica de secundaria pavimentada, lo que no implica algún costo extra.

Se presentan los resultados de la comparación con la alternativa de interconexión a la red por medio de generación fotovoltaica y eólica mixta en la tabla 11 y la figura 13.

Tabla 11. Costo de alternativas Valledupar

| Alternativa | Precio (\$) |
|--------------------------------------|---------------|
| Costo total instalación del Proyecto | 269,578,750 |
| Costo total Interconexión a la red | 1,167,505,395 |

Figura 12. Restricciones geográficas y alternativas de conexión



El software indica que es factible técnica y económicamente la instalación de un sistema de abastecimiento por medio de energía fotovoltaica y eólica mixta para 30 usuarios en la ciudad de Valledupar. Se aconseja alimentar este grupo de viviendas por medio de energía mixta eólica y fotovoltaica.

6.3 DEPARTAMENTO DEL GUAVIARE

Es uno de los 32 departamentos de Colombia. Limita por el norte con los departamentos del Meta y Vichada, por el oriente con los departamentos de Guainía y Vaupés, por el sur con Vaupés y Caquetá y por el occidente con Caquetá y Meta. Cuenta con un porcentaje de cobertura de energía eléctrica del 80%. Se desea conocer la viabilidad de su abastecimiento con energías limpias.

6.3.1. Datos previos

- **Población**

Se eligió la ciudad de San José del Guaviare. Cuenta con una población total de 65611 habitantes con una superficie de $16,178 \text{ km}^2$. Se eligió un caserío con 50 usuarios sin servicio.

- **Radiación Solar- Velocidad del viento**

Los datos de radiación solar se toman de los mapas de radiación solar de la UPME contenidos en el software ya que no se tienen los datos tomados de la zona.

- **Carga instalada**

Para determinar el consumo de los equipos como análisis de alternativas, una carga de 8650 kwh/mes lo que equivale a 288,3 kwh/día. Se utilizaron datos de equipos presentados en la tabla 12.

Tabla 12. Consumo típico para algunos electrodomésticos

| Tipo | Potencia[Wh] |
|----------------------------|--------------|
| Lámpara Fluorescente | 40 |
| Bombilla LED bajo consumo | 13 |
| Pequeños electrodomésticos | 20 |
| Bomba de Agua típica | 400 |
| Ventilador | 35 |
| Nevera típica | 400 |
| TV(LCD 27") | 43 |
| Radio-Equipo de sonido | 120 |
| Computador | 35 |
| Plancha | 1200 |

- **Equipos para el diseño**

Ya que hay una gran diversidad de equipos en el mercado, se dispuso de una lista de algunos de ellos para este proyecto, los cuales se presentan en los anexos. Ver figura 13.

Tabla 13. Equipos para el diseño.

| Equipo | Potencia(w) | cantidad | Horas/Día | Tipo carga |
|---------------|-------------|----------|-----------|------------|
| Televisor | 43 | 1 | 6 | CA |
| Nevera | 400 | 1 | 4 | CA |
| Ventilador | 35 | 1 | 4 | CA |
| Bomba de Agua | 400 | 1 | 2 | CA |
| Iluminación | 40 | 5 | 5 | CC |

- **Días de autonomía y tensión del sistema**

Se tomaron tres días de autonomía y una tensión de 24 voltios para el sistema.

6.3.2. Dimensión de los dispositivos Eólicos-fotovoltaicos

Al elegir el lugar de estudio para el proyecto se obtienen los datos de radiación solar para el peor mes o el más desfavorable del año, mostrando una radiación solar de $4 \frac{kW}{m^2}$. Además, es necesario introducir la tensión del sistema, los días de autonomía y la latitud de la zona, ver figura 14.

Figura 13. Datos de radiación San José del Guaviare.



Al introducir el tipo de terreno el software utiliza el coeficiente de hellman, junto con la altura a la que se desea el buje, el diámetro de las aspas y la ubicación. El software muestra la velocidad del viento del lugar con los datos obtenidos del atlas de viento y energía eólica proporcionado por la UPME (2,5 m/s). Hecho esto, muestra la combinación óptima de equipos para el sistema. Ver figura 15

Figura 14. Equipos seleccionados San José del Guaviare.



Se eligió un inversor con potencia nominal de 2000 Watts ya que el software mostro una potencia recomendada de 1530 Watts, reguladores con tensión nominal del sistema de 24 volts, aerogeneradores de 5000 Watts ya que el software indicó que se podían obtener 596,721 Watts por medio del viento y paneles de 5000 Watts.

A continuación, se muestra la combinación de equipos en la figura 16.

Figura 15. Combinación de equipos.

| Referencia Panel | Panels serie | Panels paralelo | N. total panels | Precio | |
|--------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|----------|
| 4003002 | 1 | 174 | 174 | 4566003426 | |
| Referencia regulador | Número de reguladores | | Precio | | |
| XANTREZ | 34 | | 44200000 | | |
| Referencia baterías | Baterías serie | Baterías paralelo | N. total baterías | Precio | |
| SUNLIGHT | 160PzS2500 | 2 | 14 | 28 | 38696000 |
| Marca inversor | Referencia | Cantidad | Precio | | |
| XANTREZ | Prowatt SW 20001 | 1 | 1309000 | | |
| Referencia aerogenerador | Precio unidad | Cantidad | Precio | | |
| SOLENER | 24000000 | 30 | 720000000 | | |

Costo

Precio equipos e instalación:

Calcular costo total equipos: 5370208426 [\$]

Calcular costo instalación: 6724435689.9 [\$]

10% diseño + 5% mantenimiento + reposición baterías

CARGAR DATOS

SALIR

REGRESAR

CONTINUAR

6.3.3. Análisis de alternativas. El costo de interconexión se obtiene utilizando la ecuación (5.1) y las restricciones geográficas de la tabla 4 los cuales para esta situación son los siguientes:

- Ríos: No se debe cruzar ningún río para llevar la red a la subestación más cercana, no implica un costo adicional.
- Pendiente: La inclinación del terreno es menor a 10 grados, se considera pendiente baja, no implica costo extra.
- Vía: La vía tiene presenta una característica de secundaria pavimentada, lo que no implica algún costo extra

Se presentan los resultados de la comparación con la alternativa de interconexión a la red por medio de generación fotovoltaica y eólica mixta en la tabla 14 y la figura 17.

Tabla 14. Costo de alternativas San José del Guaviare.

| Alternativa | Precio (\$) |
|--------------------------------------|---------------|
| Costo total instalación del Proyecto | 6`724,435,690 |
| Costo total Interconexión a la red | 575,543,420 |

Figura 16. Restricciones geográficas y alternativas de conexión



Como se puede observar el software indica que no es factible técnica y económicamente la instalación de un sistema de abastecimiento por medio de energía fotovoltaica y eólica mixta para 50 usuarios en la ciudad de San José del Guaviare. Este resultado se debe a aspectos como la baja velocidad del viento presente, aunque la radiación solar no es mala, la combinación de equipos junto con la cantidad. Se aconseja conectarlo a la red de energía eléctrica.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Se implementó una metodología requerida para el análisis de viabilidad técnica y económica de este proyecto.
- Aunque compensar la energía reactiva de un generador eólico implica un sobre costo, el suministro con energía mixta eólica y fotovoltaica sigue siendo factible económicamente ya que es de aproximadamente 3% del costo total del proyecto.
- Los resultados presentados en este proyecto se realizaron con cálculos hechos de una forma general, realizando algunas estimaciones del consumo de los usuarios, por lo que pueden no ser exactos. Para ello se requiere un análisis más detallado de la comunidad y de la variación del consumo individualmente.
- Existen localidades en el país con una gran cantidad de recurso eólico y fotovoltaico en donde aún no se han implementado sistemas de generación para satisfacer la demanda de los usuarios presentes. GreenProject contribuye mostrando la mejor opción de implementación para electrificación rural.
- Al realizar el análisis de viabilidad en puntos de los departamentos de La Guajira, Cesar y San José del Guaviare se observó que al implementar este proyecto en una zona de poca energía proveniente del viento implica un costo elevado haciendo inútil que el sistema sea mixto.

BIBLIOGRAFÍA

ASTRONOMÍA Y FÍSICA CUÁNTICA, ciencia y curiosidades del universo,
Disponible en: <http://astrocuantic.blogspot.com/>

ATLAS DE VIENTO Y ENERGÍA EÓLICA 2006. Disponible en:
http://www.upme.gov.co/Atlas_Viento.htm

BP GLOBAL, Statistical Review of World Energy 2014, Disponible en:
<http://www.bp.cpm/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.

CARTA Gonzales, J.A. Centrales de energía renovables: Generación eléctrica con energías renovables.

CASTILLO, Alejandro. Multiobjective design for a hybrid solar-wind-battery system operation in non-interconnected áreas. Tecnura, vol.18,2014.

HERRERA, Vanessa. Sistema híbrido eólico – fotovoltaico para le generación de energía eléctrica en el departamento de turismo del ilustre municipio de baños de agua santa. Trabajo de grado Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones. Ambato Ecuador. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de ingeniería electrónica y comunicaciones. 2011. 138 p.

IPCC, cambio climático: “Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Experto sobre el Cambio Climático”, Disponible en:
<http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/argentina/Noticia%20CambioClimatico/IPCC-Inf.s%C3%ADntesis%202007.pdf>.

KEPPLER, Johannes. El secreto del Universo: Traducción, introducción y notas de Eloy Rada.

LORENZO, E. Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos. Progensa, Sevilla, 2006.

MIN. AMBIENTE COLOMBIA, Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en carbono.

MORENO, William. Metodología para determinar la factibilidad técnica y económica del abastecimiento energético de viviendas rurales aisladas de la red a partir de energía fotovoltaica. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. 2014. 135 p.

PAJE, J.K. The calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40N-40S.

PEN 2010-2030, “Plan energético Nacional”. Informe Final, Disponible en: <http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN%202010%20VERSION%20FINAL.pdf>

PLAN DE EXPANSIÓN UPME 2013-2017. Plan indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica, Disponible en: <http://www.upme.gov.co/plan-indicativo-de-cobertura-de-expansion-de-cobertura-de-energia-elctrica-#sthash.eCS705MB.dpuf>

UPME (PDFNCE), Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia, Disponible en: http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_1_Plan_Desarrollo.pdf.

UPME, Estimación de Cobertura: Metodología para la Estimación del Índice de Cobertura del Servicio de Energía Eléctrica 2012.

WORLD ENERGY CONGRESS, Disponible en <http://www.worldenergy.org/>

XM filial ISA. Informe de gestión de Sistema interconectado Nacional.

IPSE, Instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia, disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>

GUIA DE TRABAJO: El regulador fotovoltaico, disponible en: <http://www.slideshare.net/FincaIntegralEducativa/guia-de-trabajo-4-el-regulador-fv>.

Soluciones para la compensación de energía reactiva en media tensión, disponible en: http://circuitor.com/docs/MitjaTensio_SP_Cat.pdf.

Compensación de energía reactiva, disponible en: http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf.

¿Cuánto gasta un aparato eléctrico? ¿Cuánto consume?, disponible en: <http://www.electrocalculator.com/>

ANEXOS

ANEXO A. Mapas de viento y energía eólica en Colombia

Se anexan los mapas de viento y energía eólica del territorio nacional como alternativa para obtener los datos de viento en algunas ciudades del país.

Tabla A.1: Velocidad media del viento en superficie mes de enero.

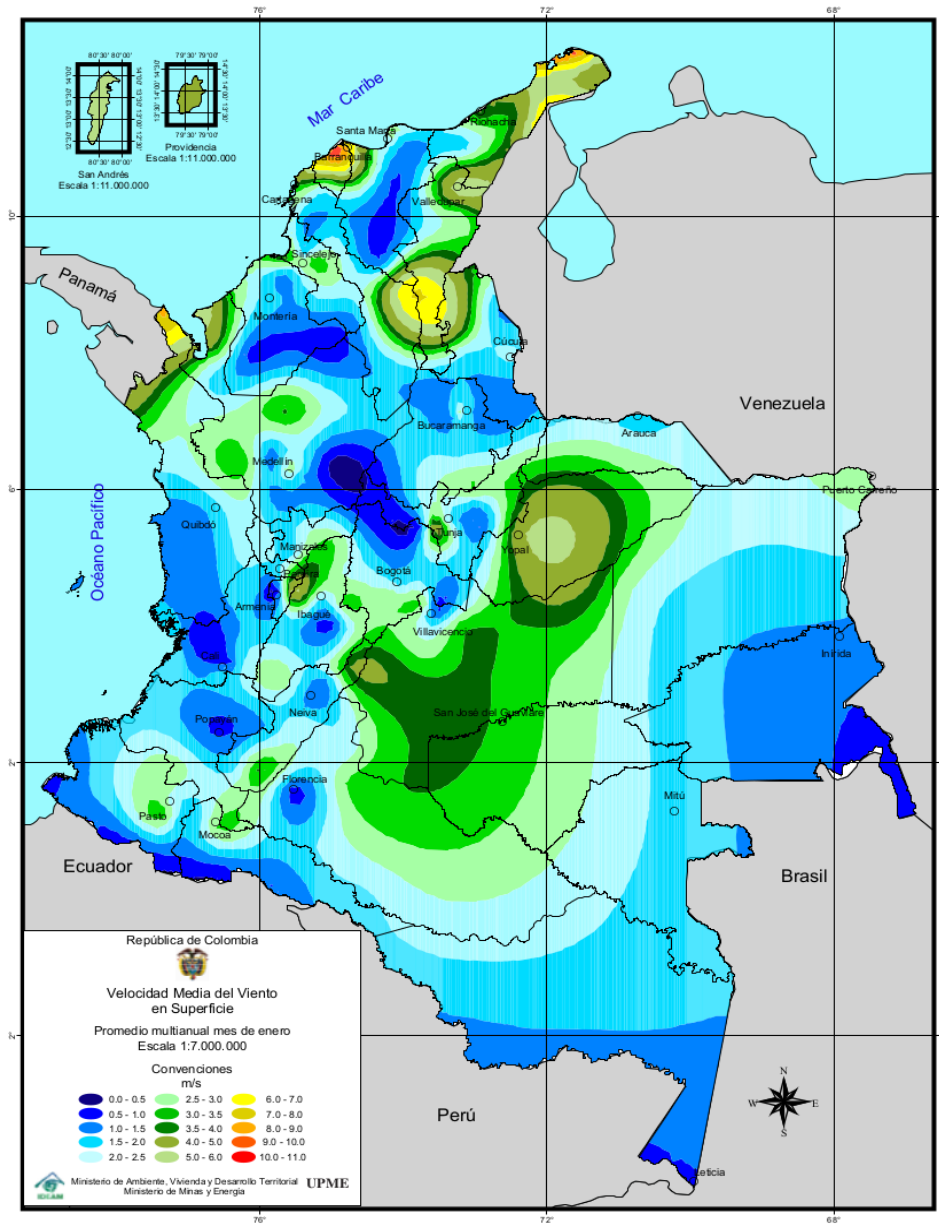


Tabla A.2: Velocidad media del viento en superficie mes de febrero.

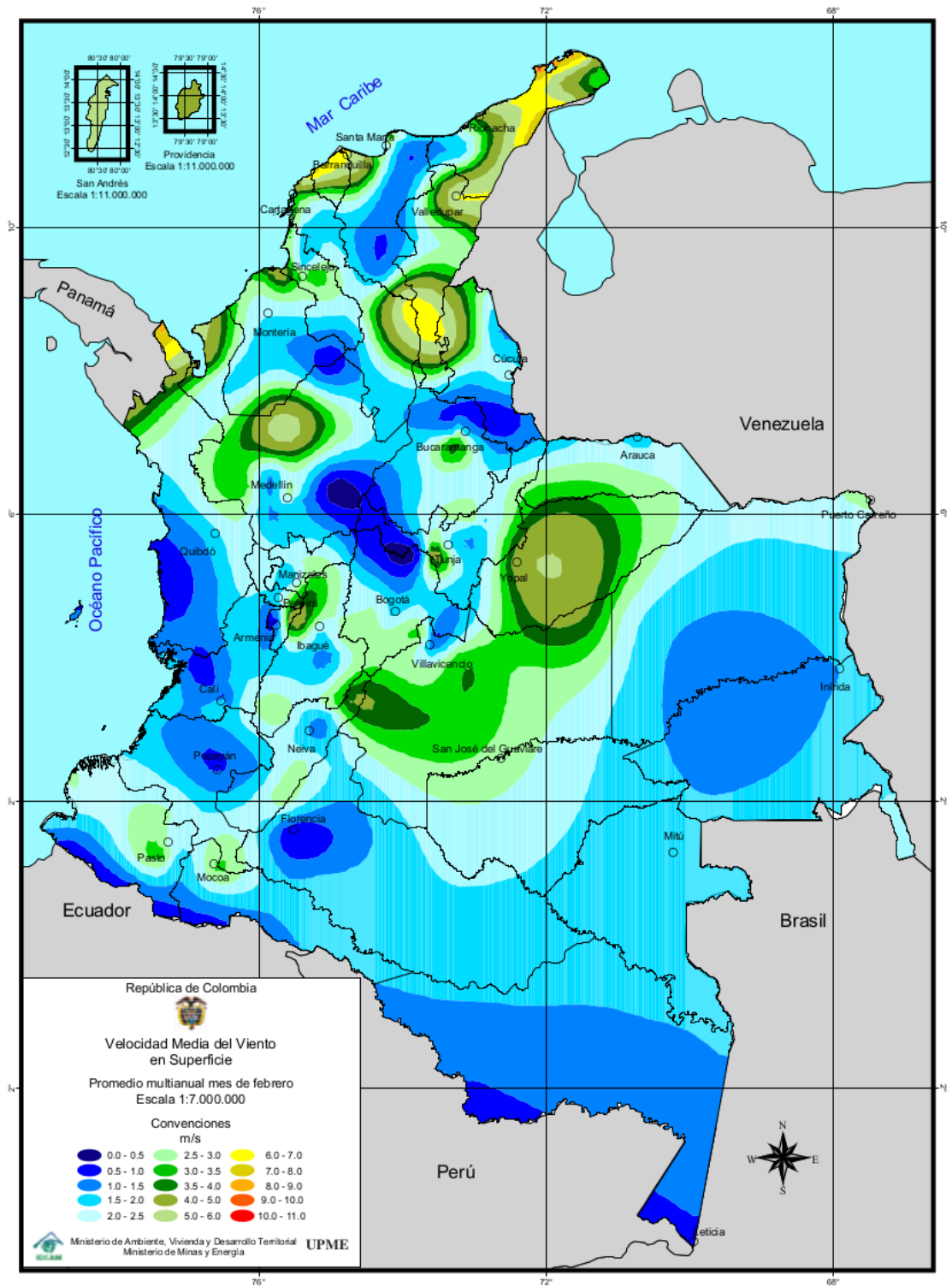


Tabla A.4: Velocidad media del viento en superficie mes de abril.

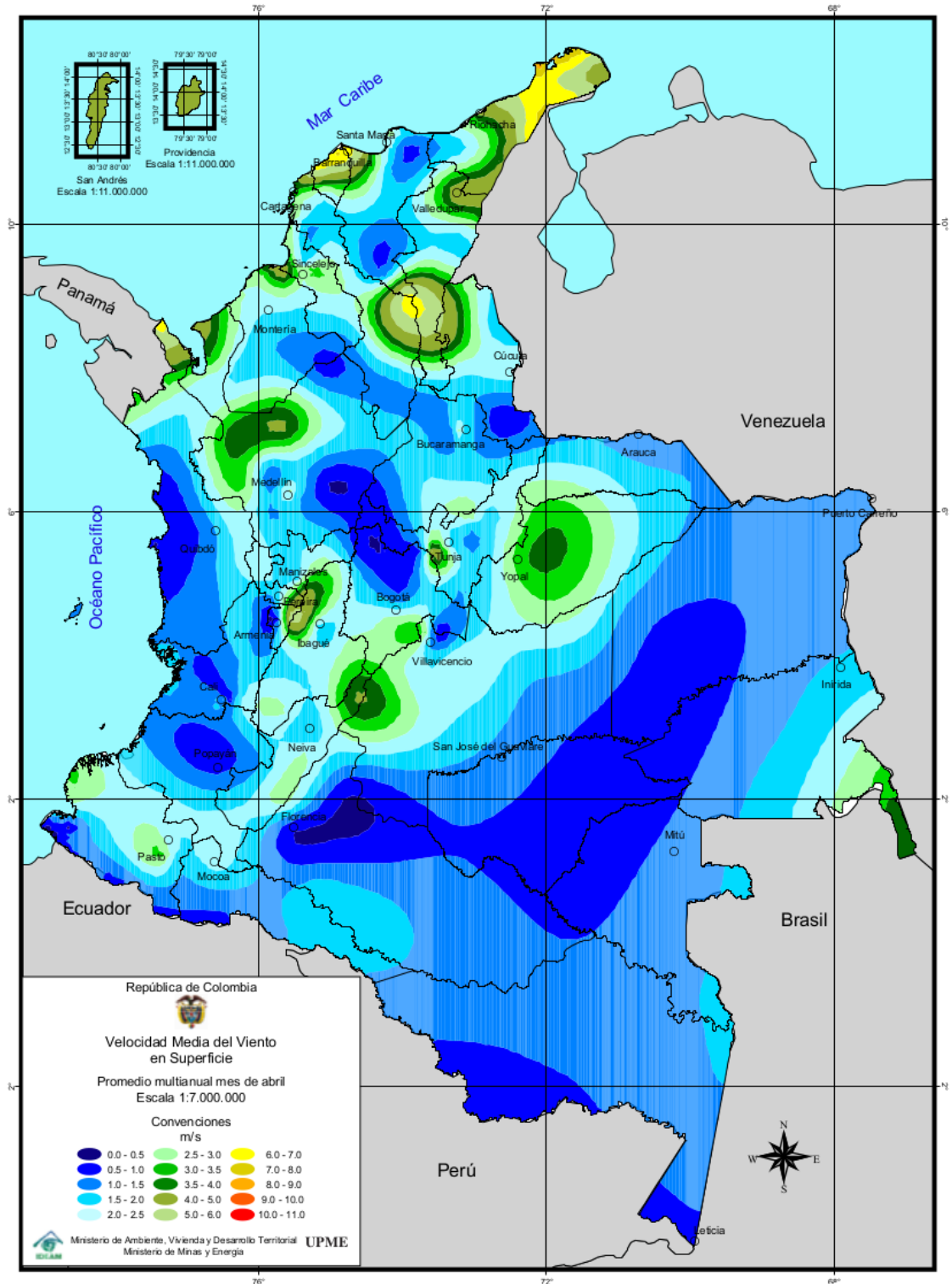


Tabla A.5: Velocidad media del viento en superficie mes de mayo.

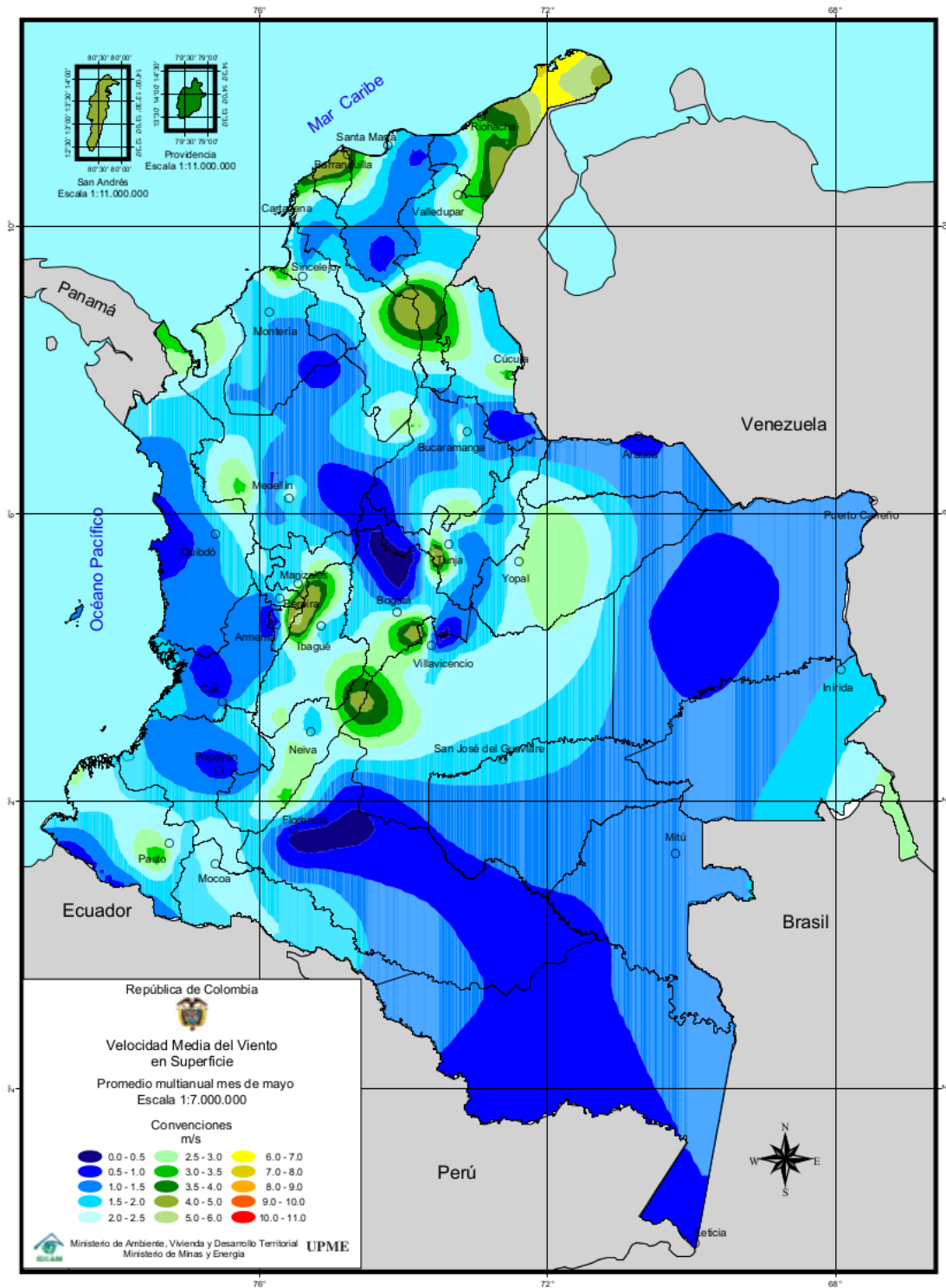


Tabla A.6: Velocidad media del viento en superficie mes de junio.

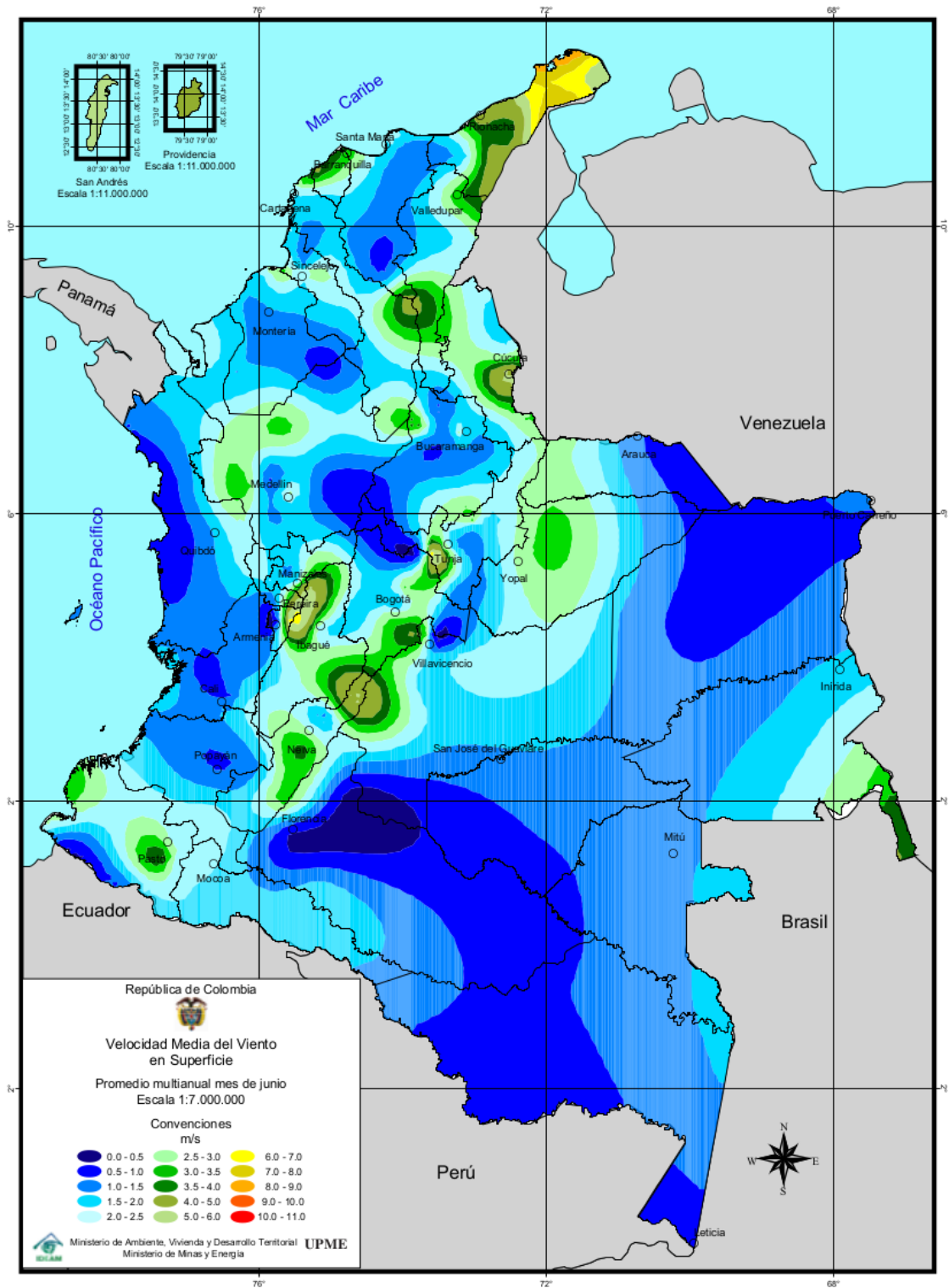


Tabla A.7: Velocidad media del viento en superficie mes de julio.

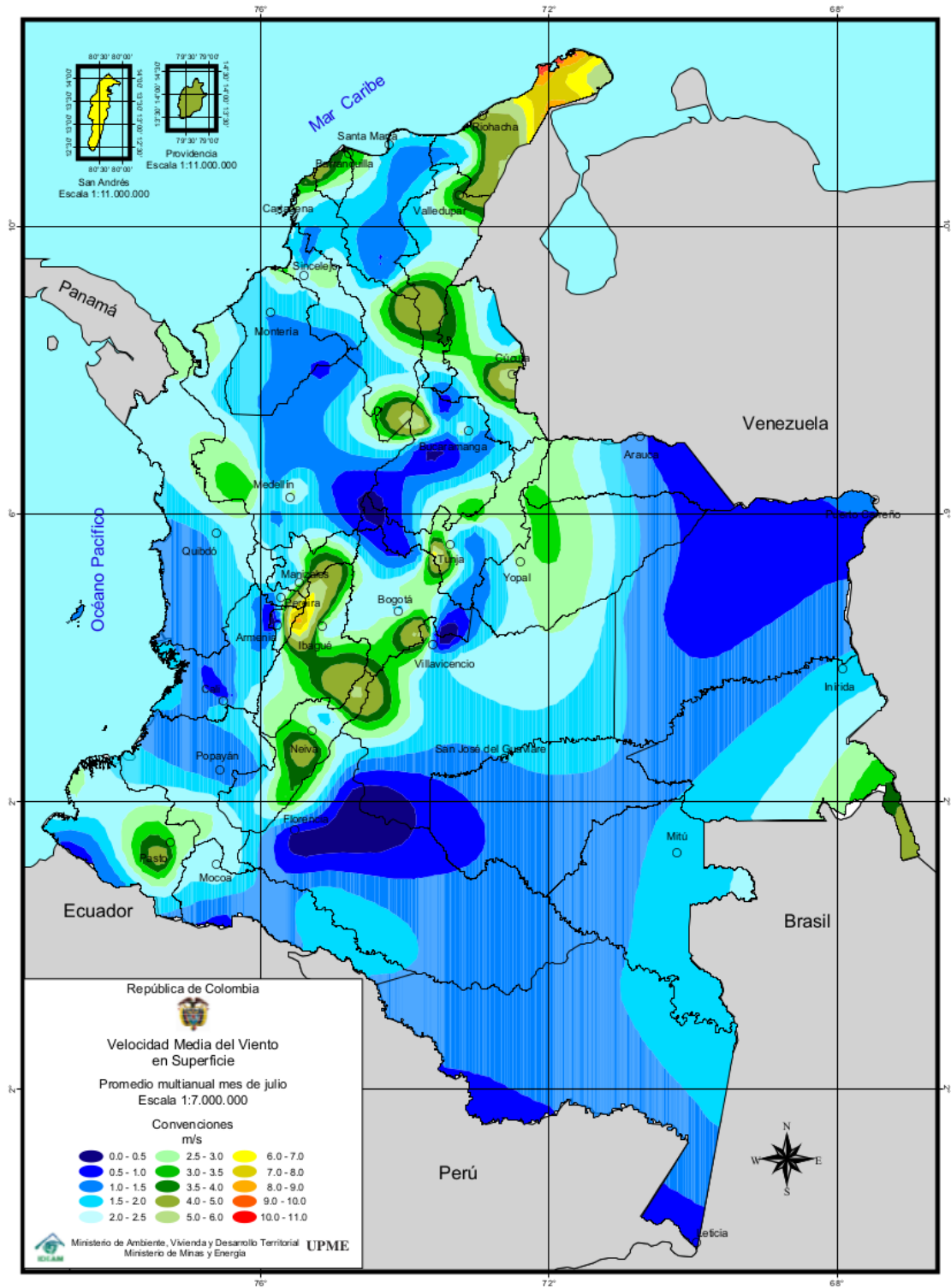


Tabla A.8: Velocidad media del viento en superficie mes de agosto.

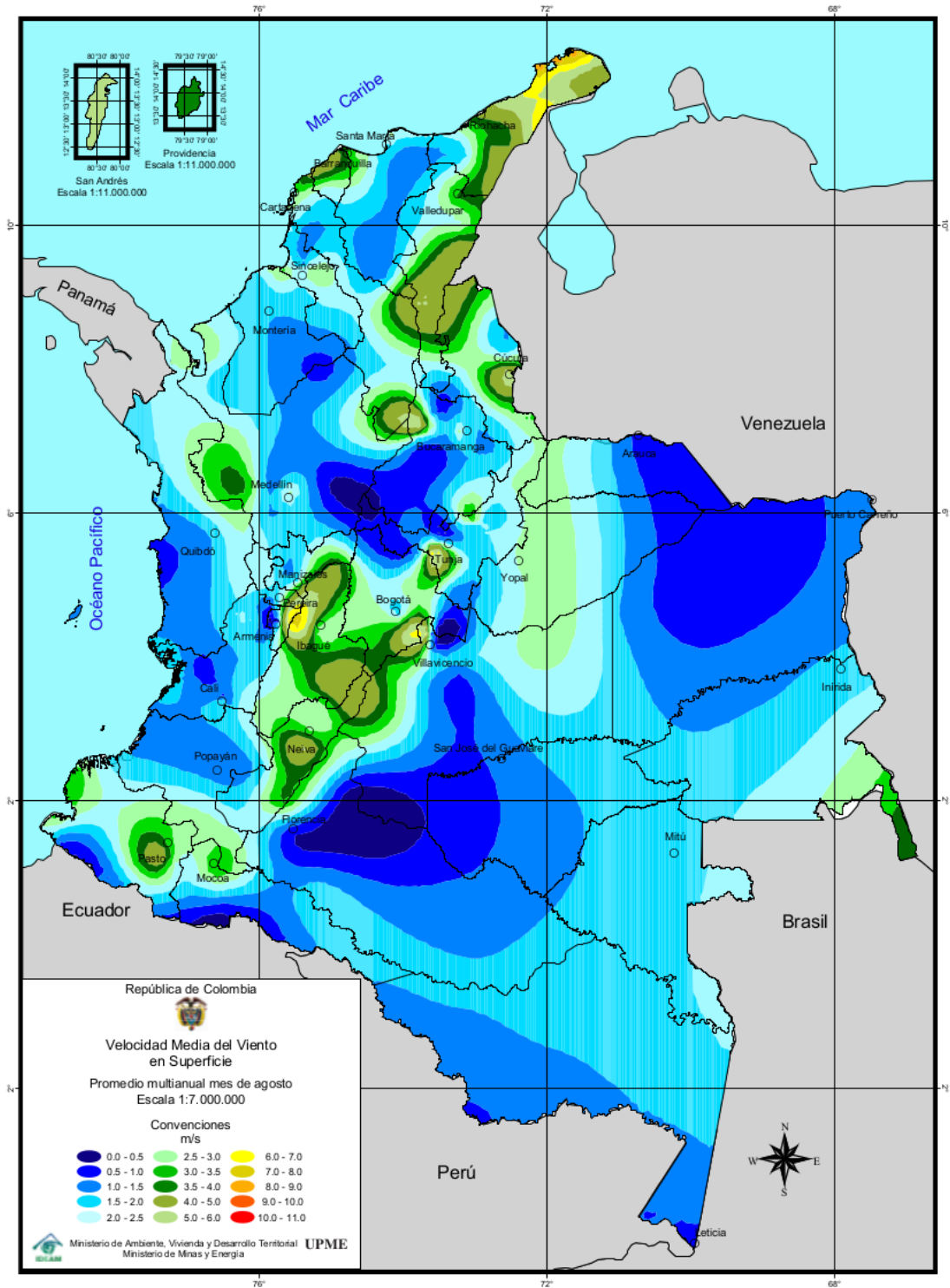


Tabla A.9: Velocidad media del viento en superficie mes de septiembre.

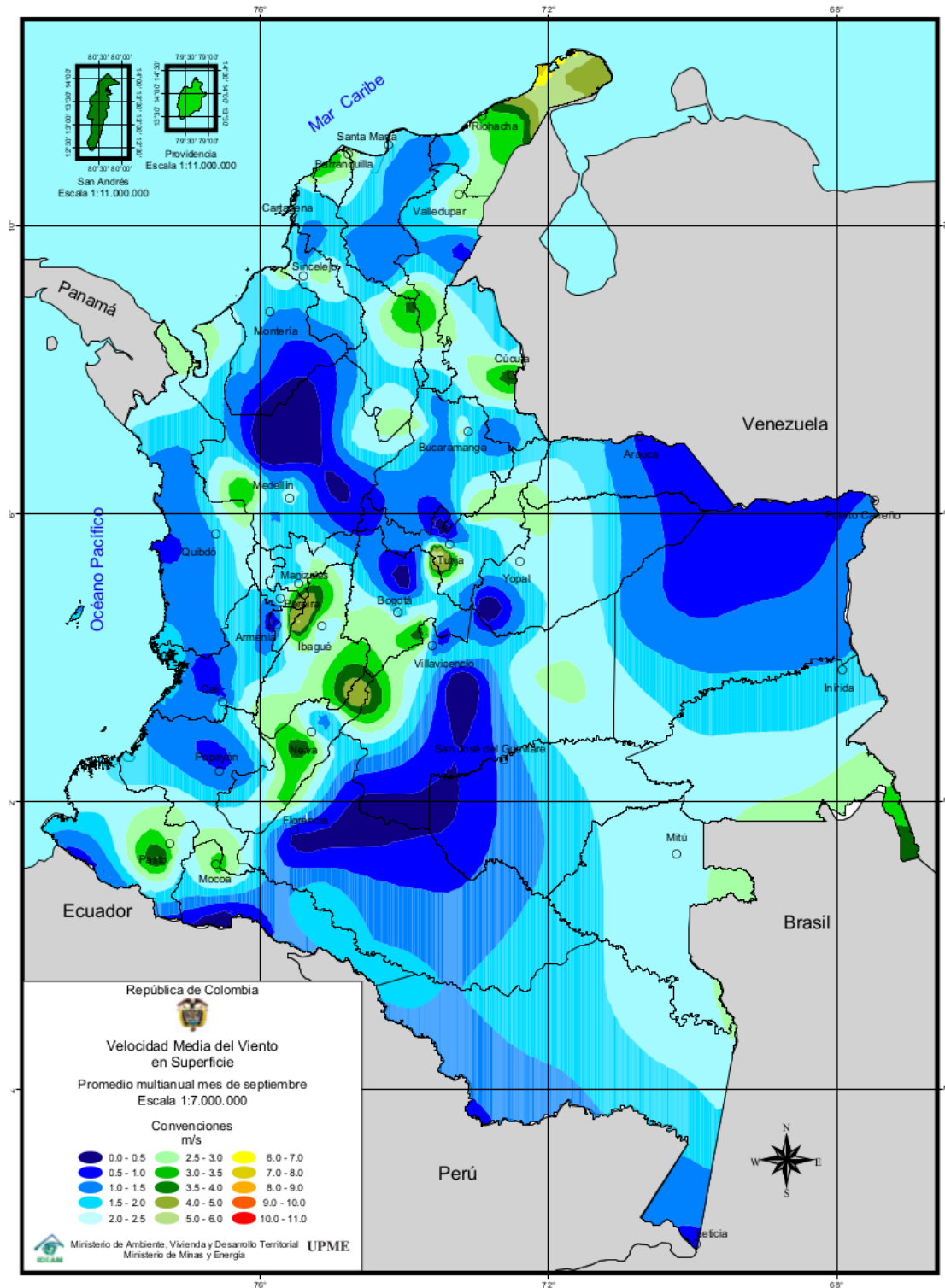


Tabla A.10: Velocidad media del viento en superficie mes de octubre.

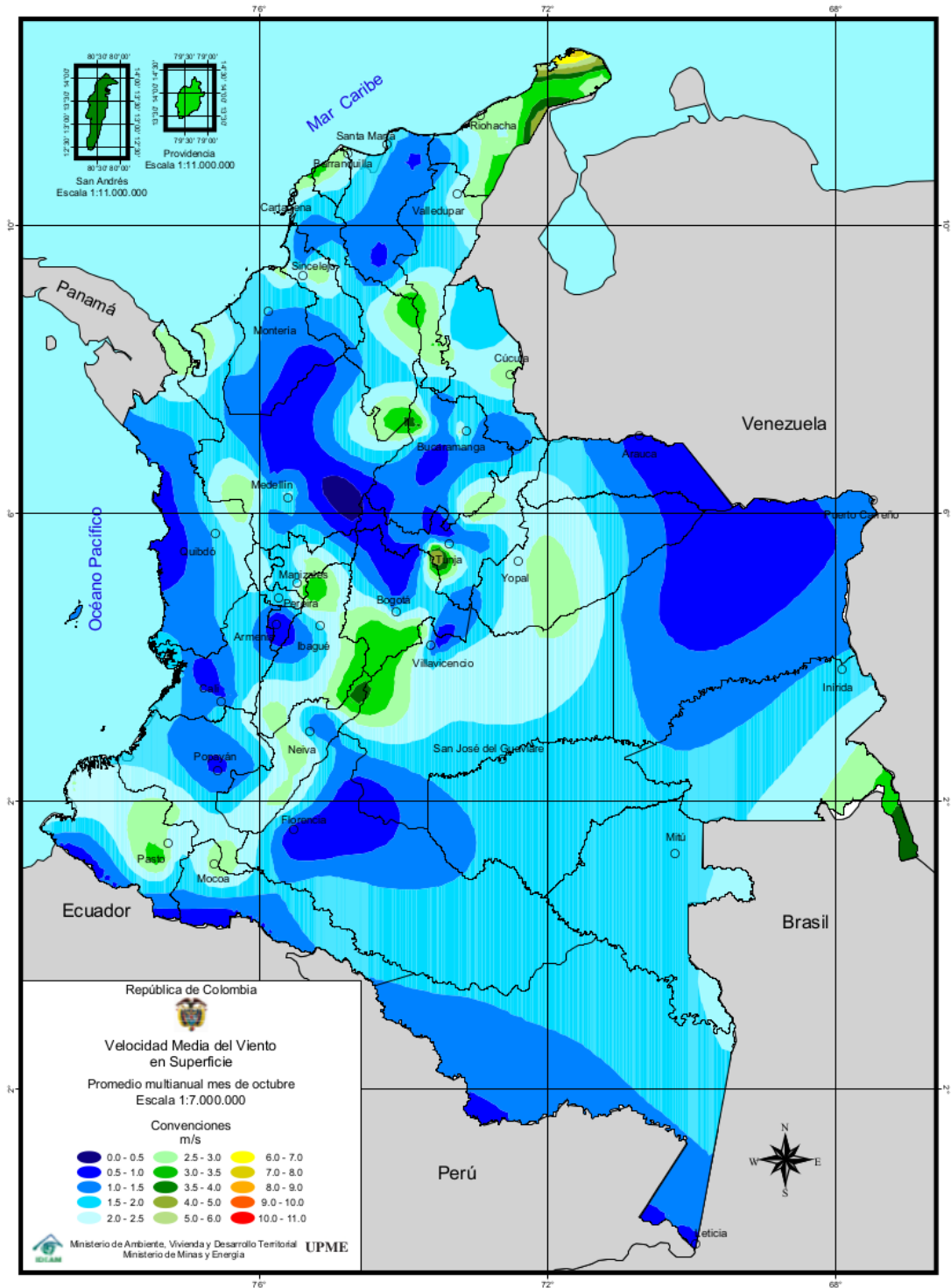


Tabla A.11: Velocidad media del viento en superficie mes de noviembre.

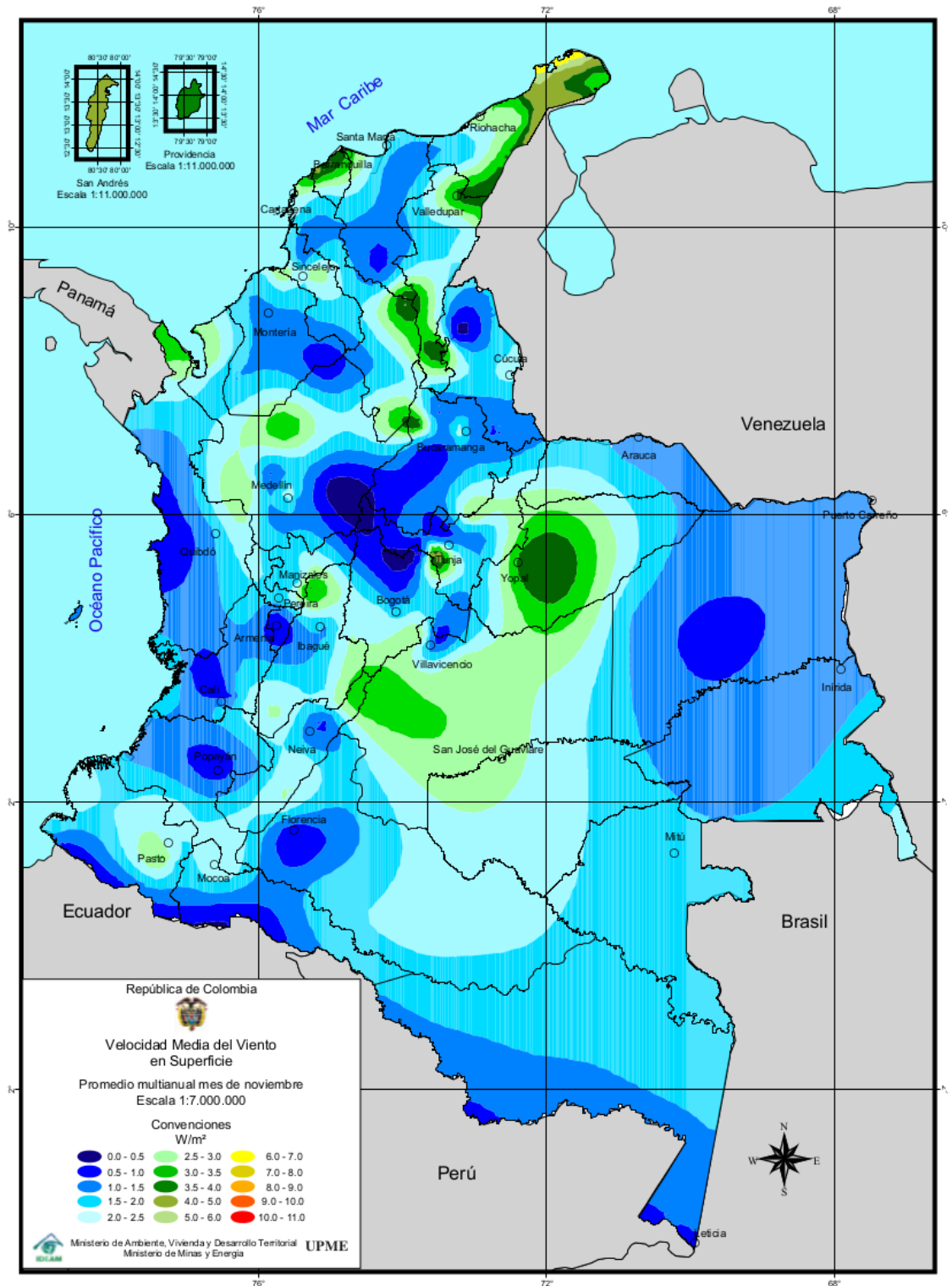
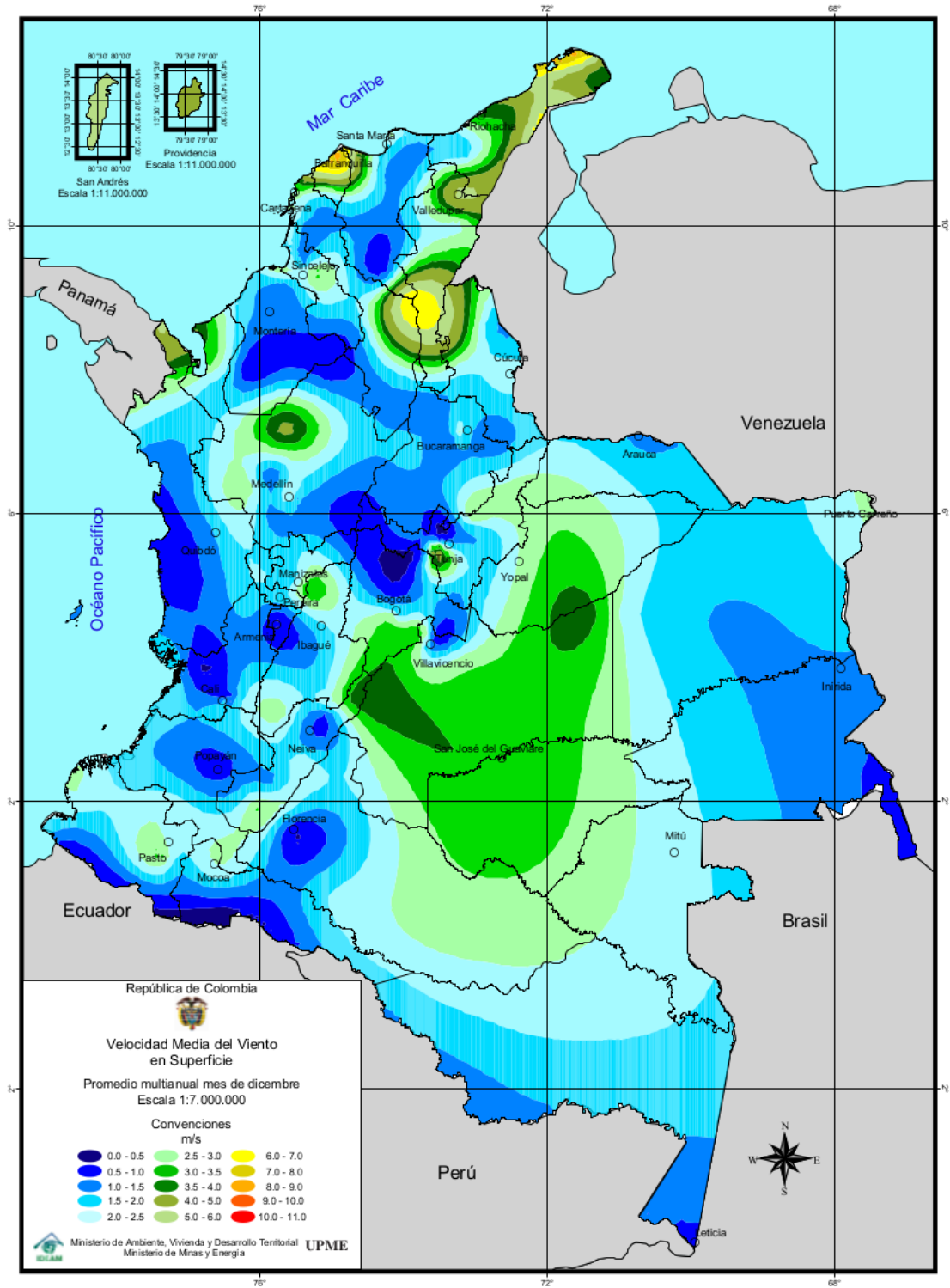


Tabla A.12: Velocidad media del viento en superficie mes de diciembre.



ANEXO B. Mapas de radiación solar de Colombia

Se anexan los mapas de radiación solar del territorio nacional como alternativa para obtener los datos de viento en algunas ciudades del país.

Tabla B.1: Radiación solar de Colombia mes de enero.

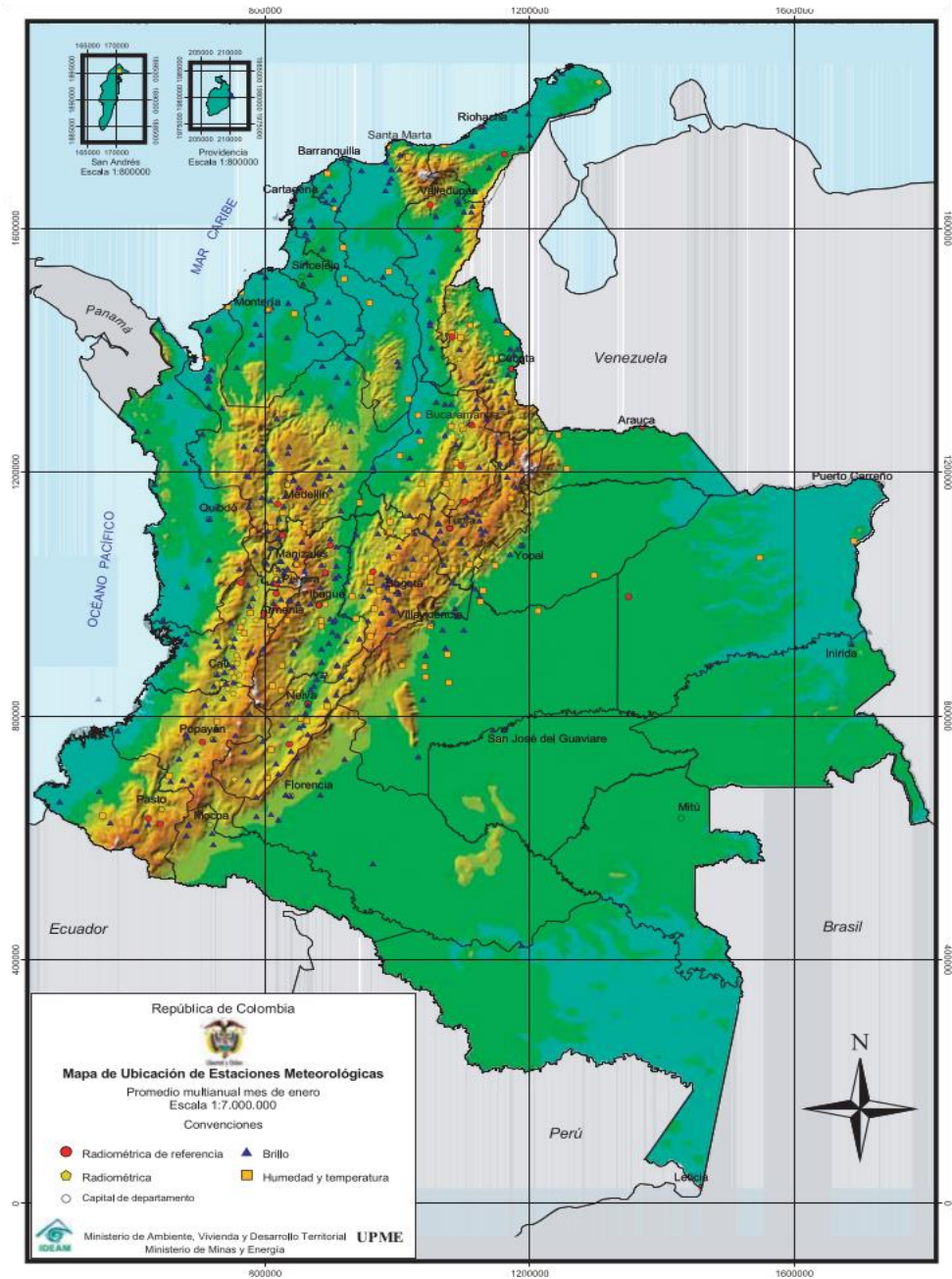


Tabla B.2: Radiación solar de Colombia mes de febrero.

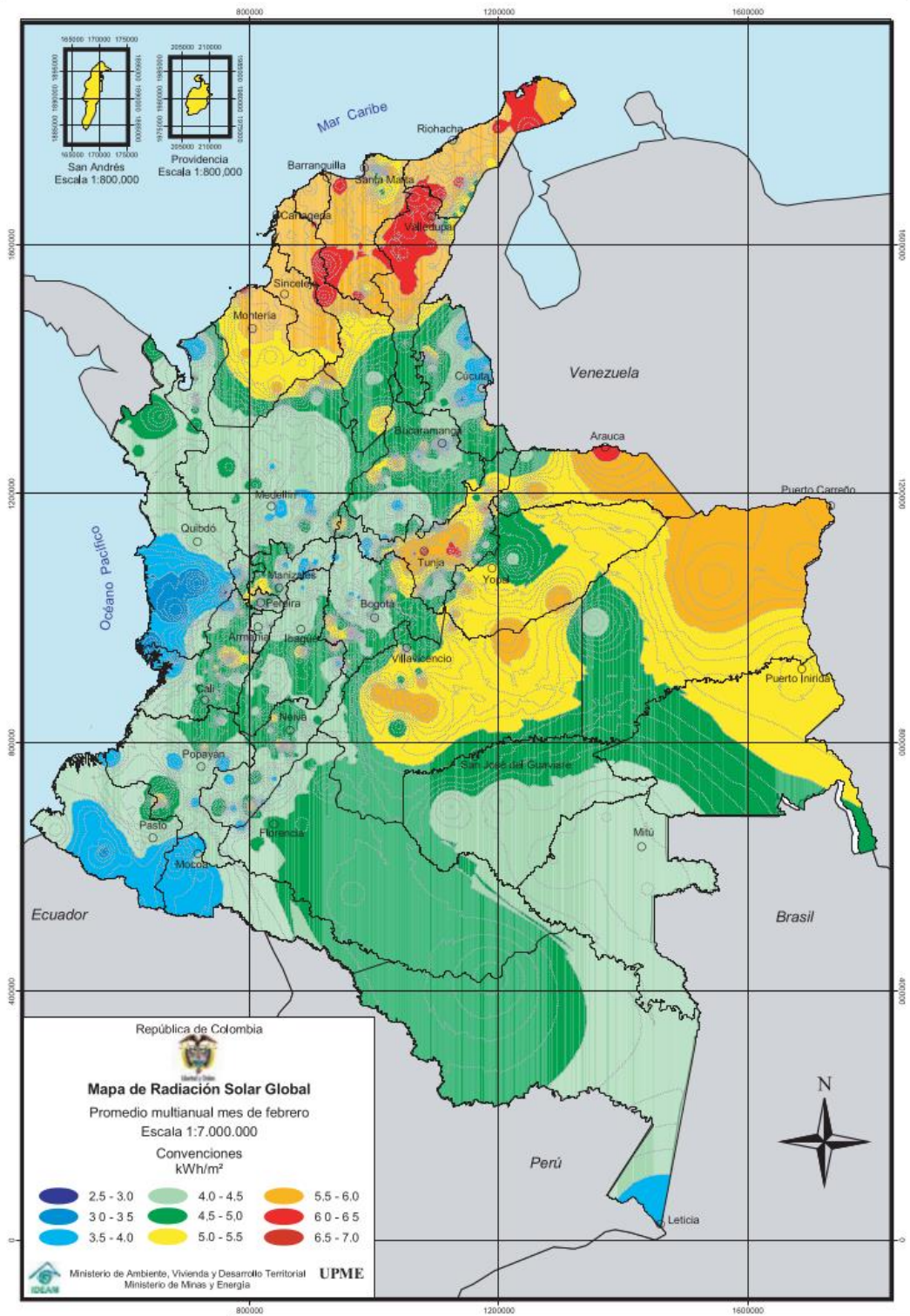


Tabla B.3: Radiación solar de Colombia mes de marzo.

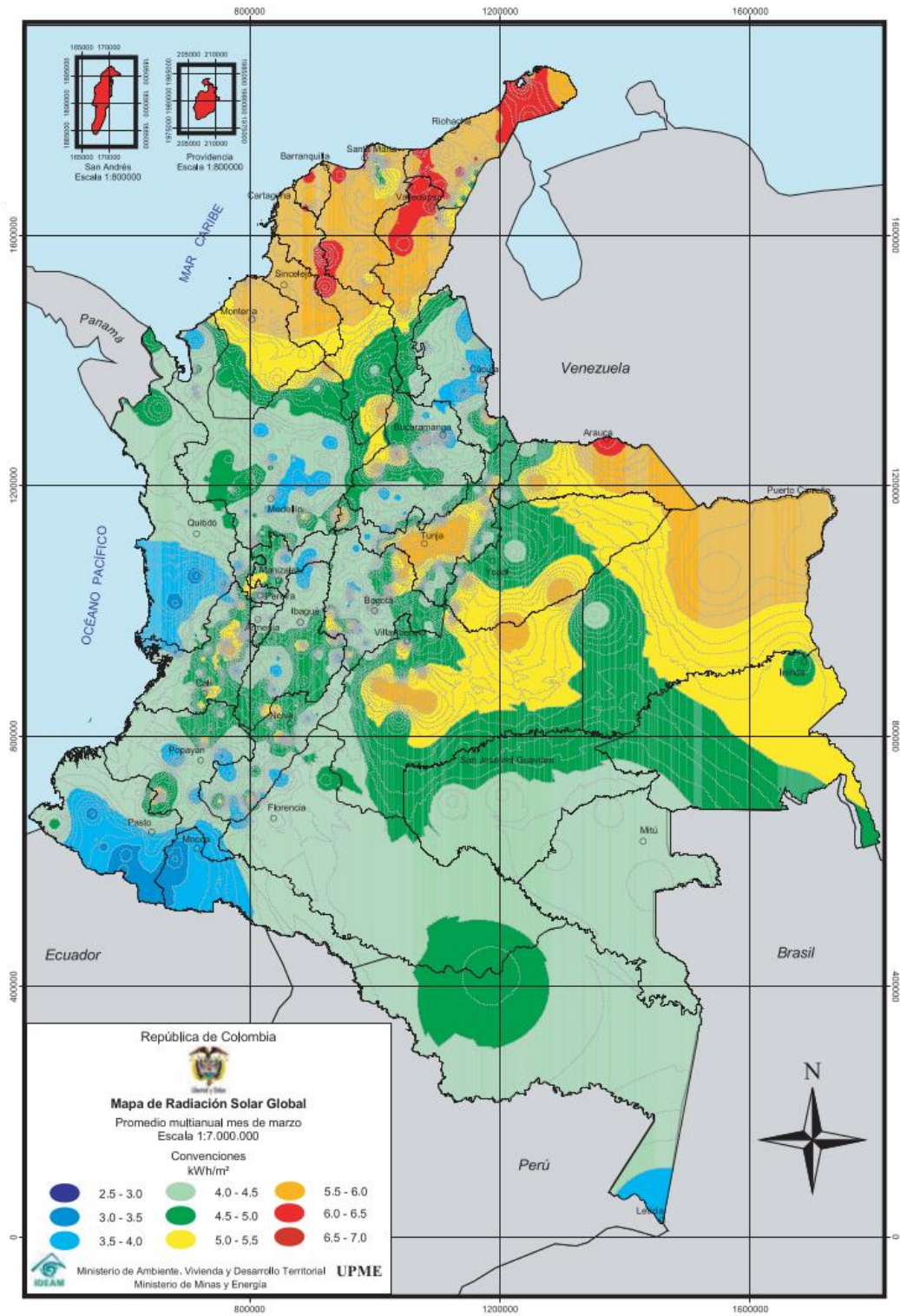


Tabla B.4: Radiación solar de Colombia mes de abril.

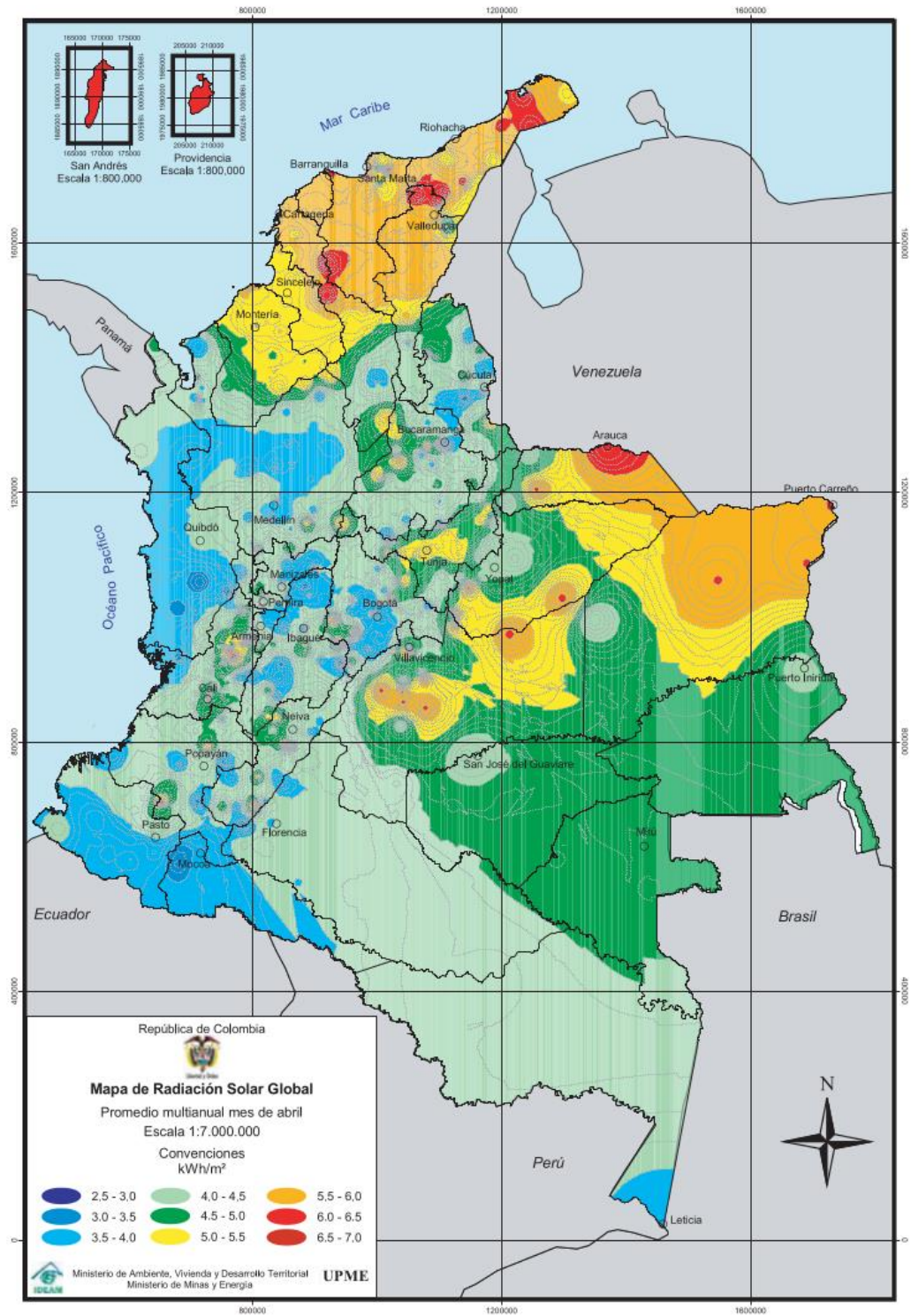


Tabla B.5: Radiación solar de Colombia mes de mayo.

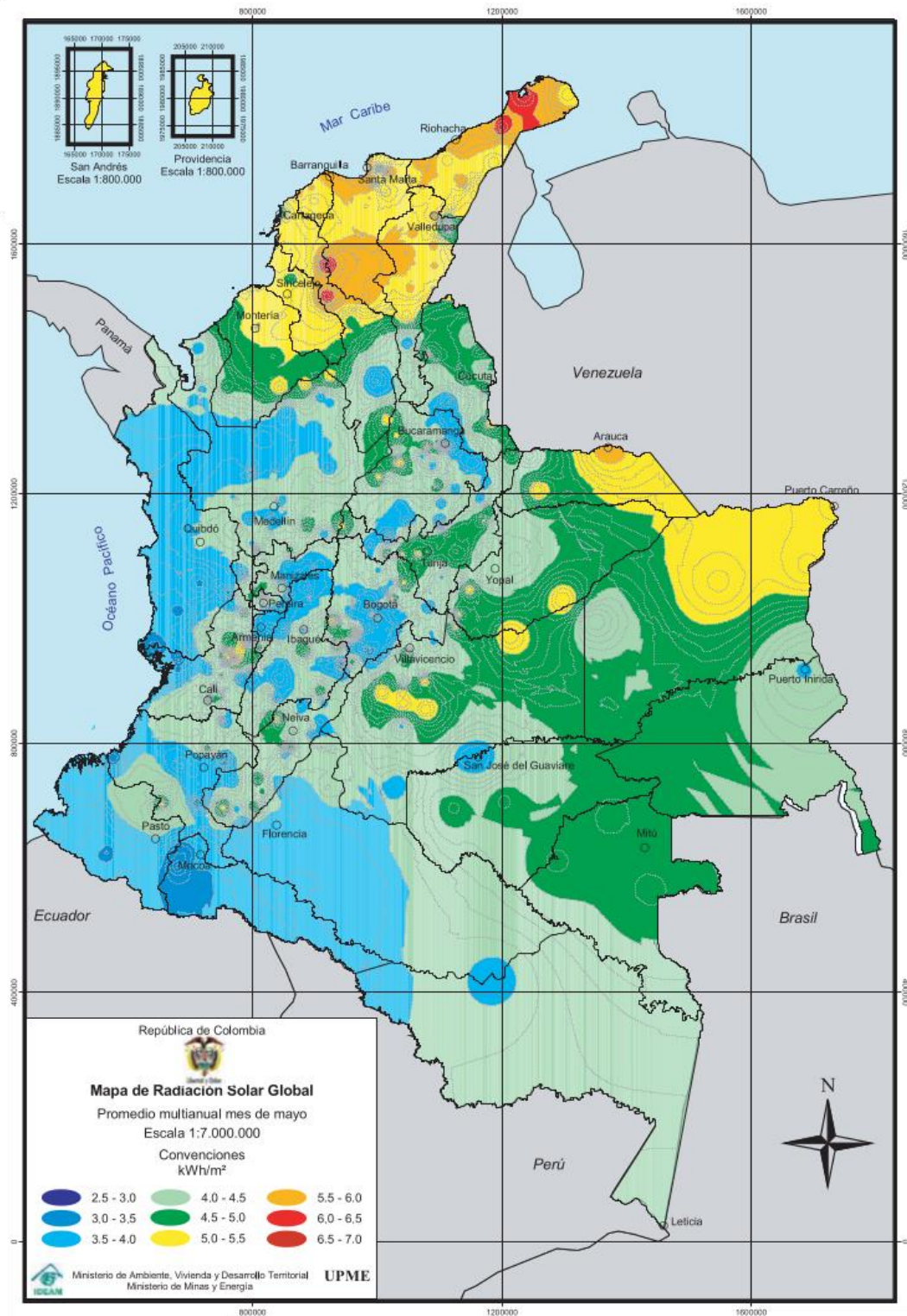


Tabla B.6: Radiación solar de Colombia mes de junio.

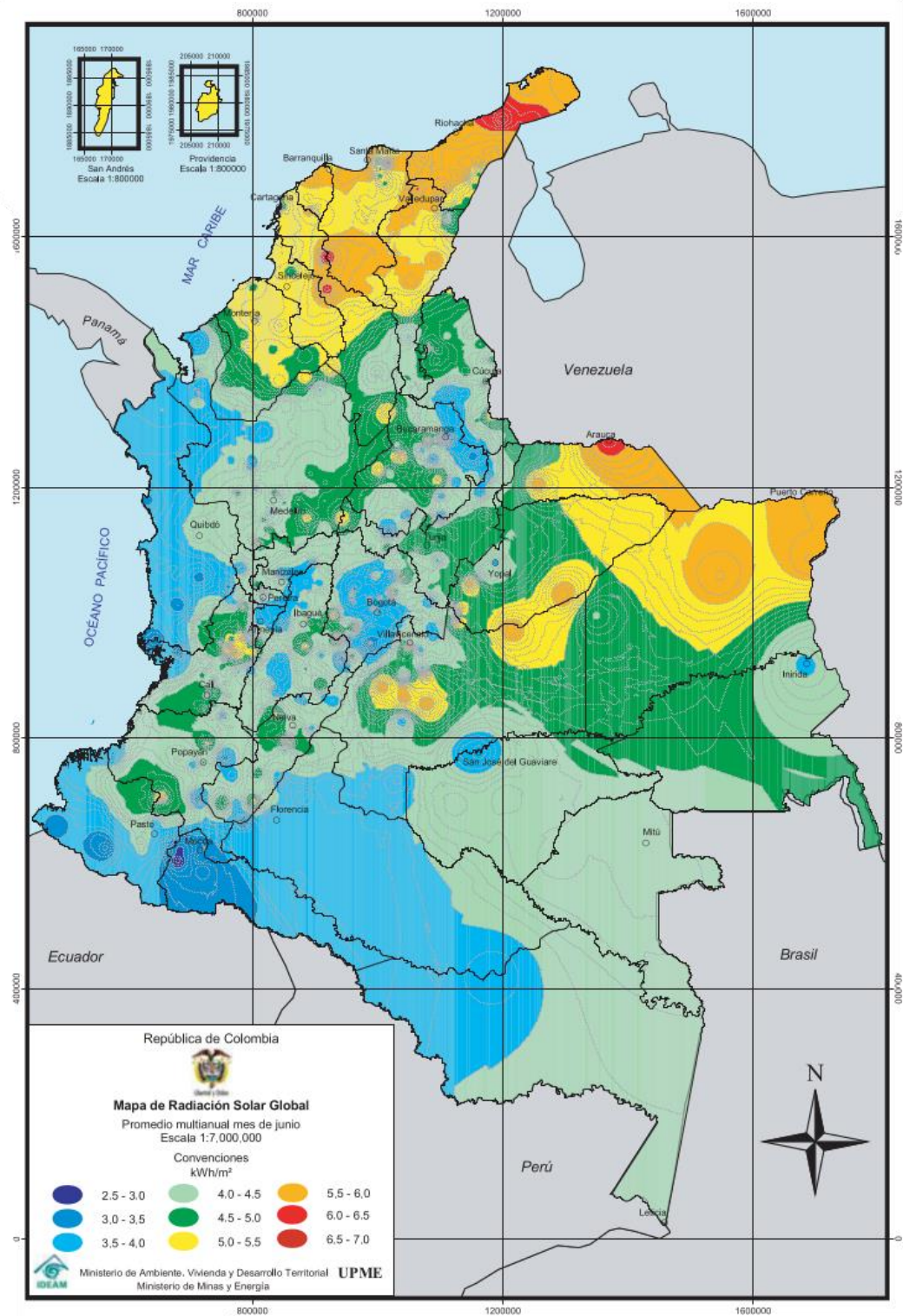


Tabla B.7: Radiación solar de Colombia mes de julio.

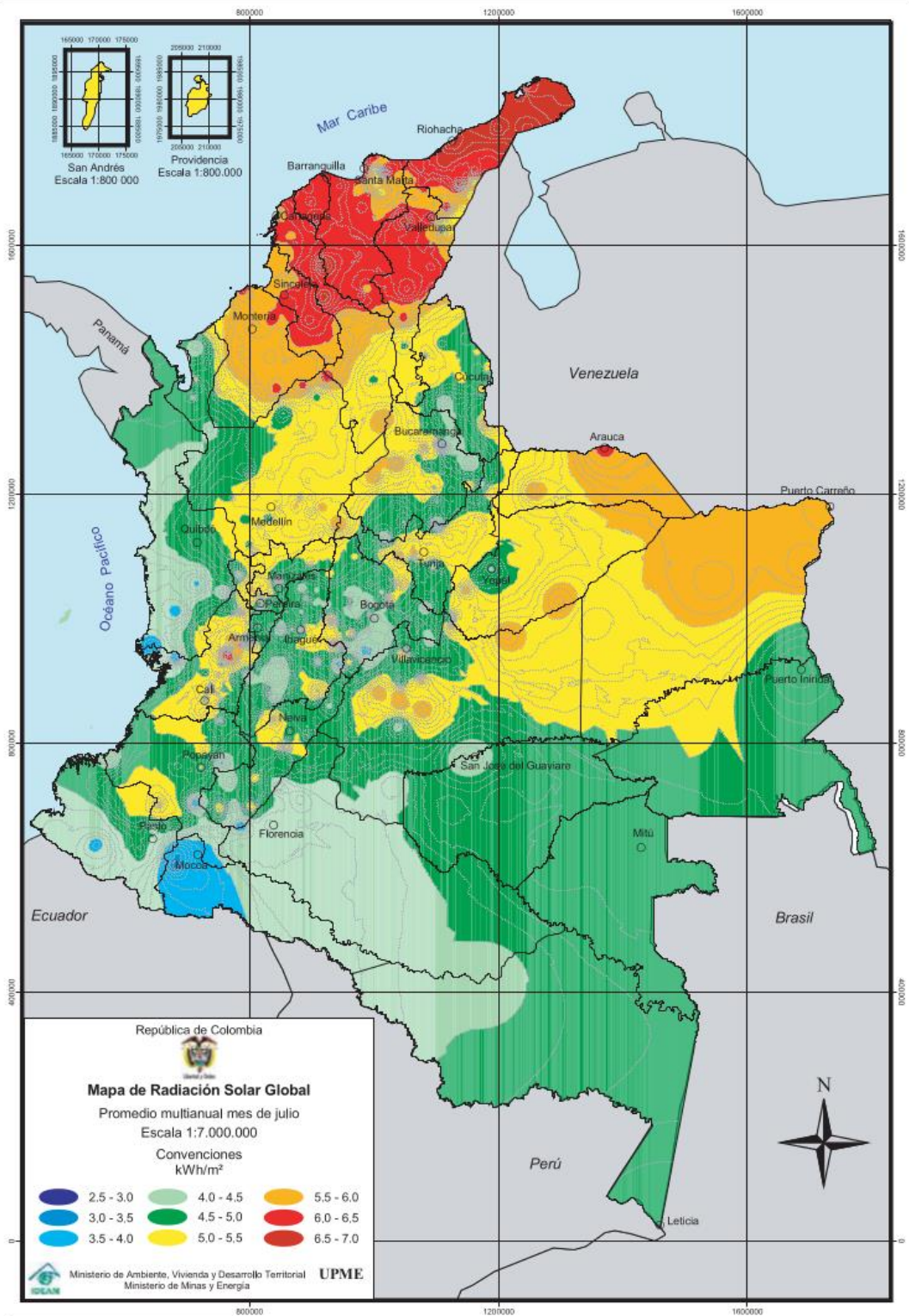


Tabla B.8: Radiación solar de Colombia mes de agosto.

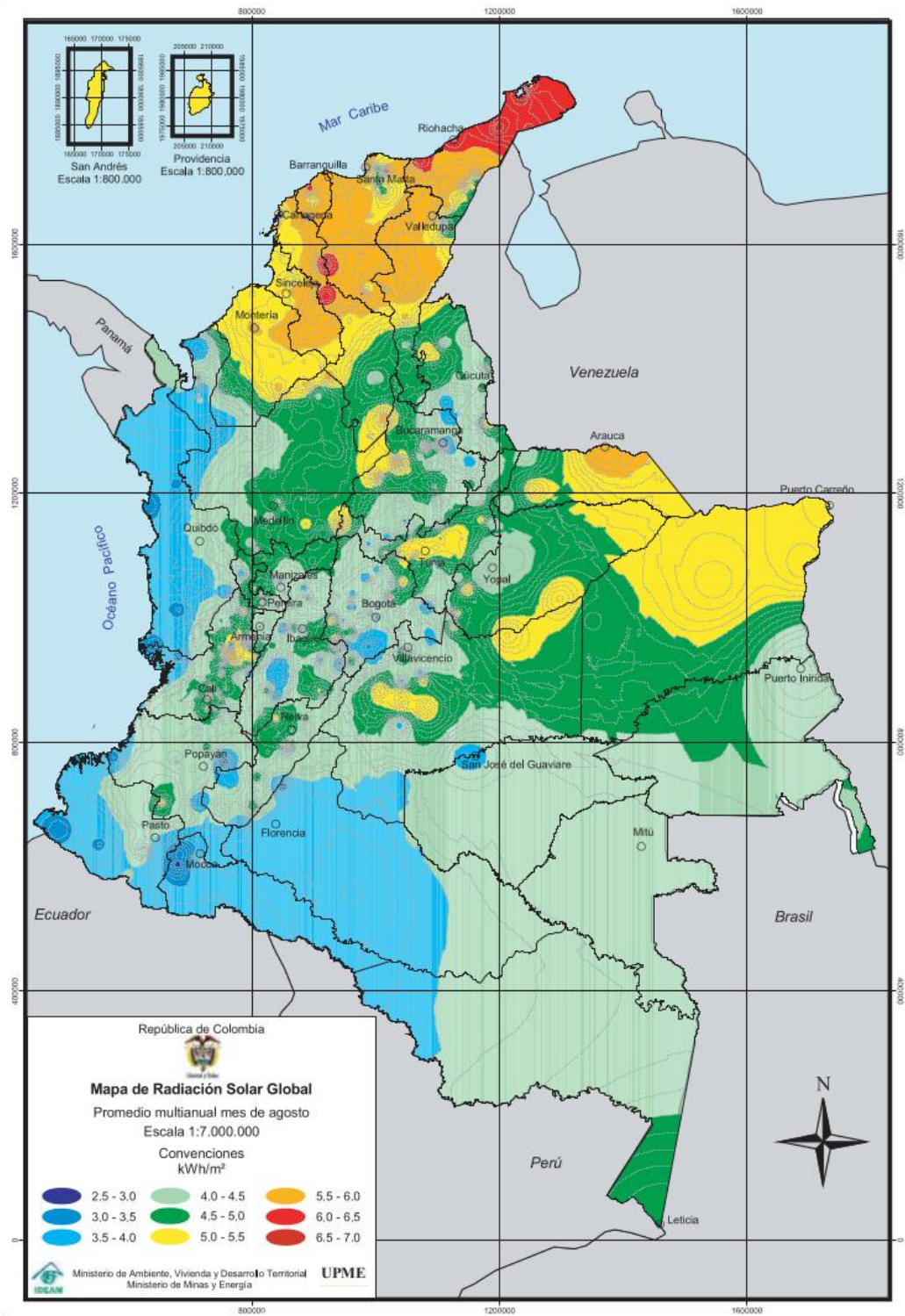


Tabla B.9: Radiación solar de Colombia mes de septiembre.

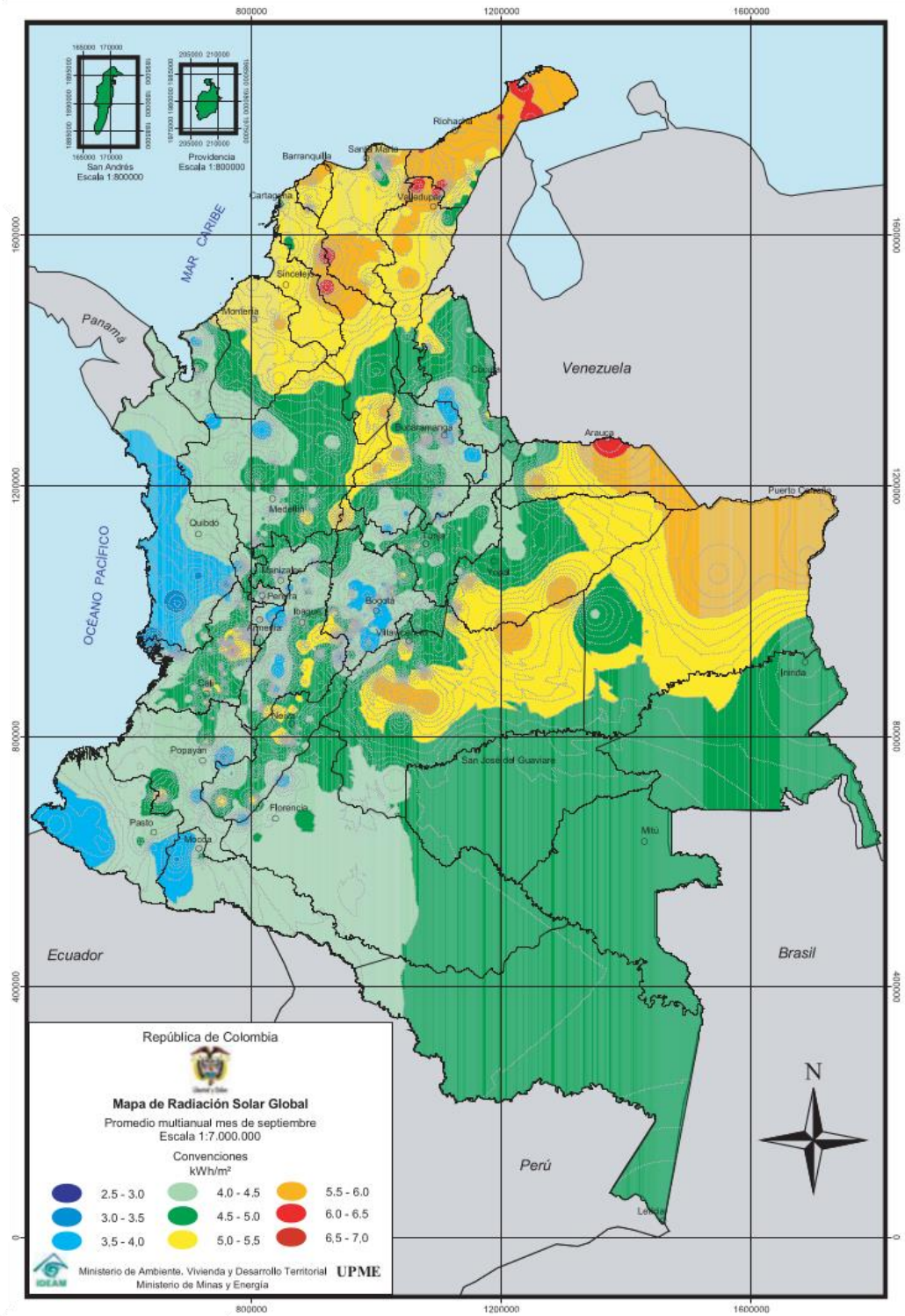


Tabla B.10: Radiación solar de Colombia mes de octubre.

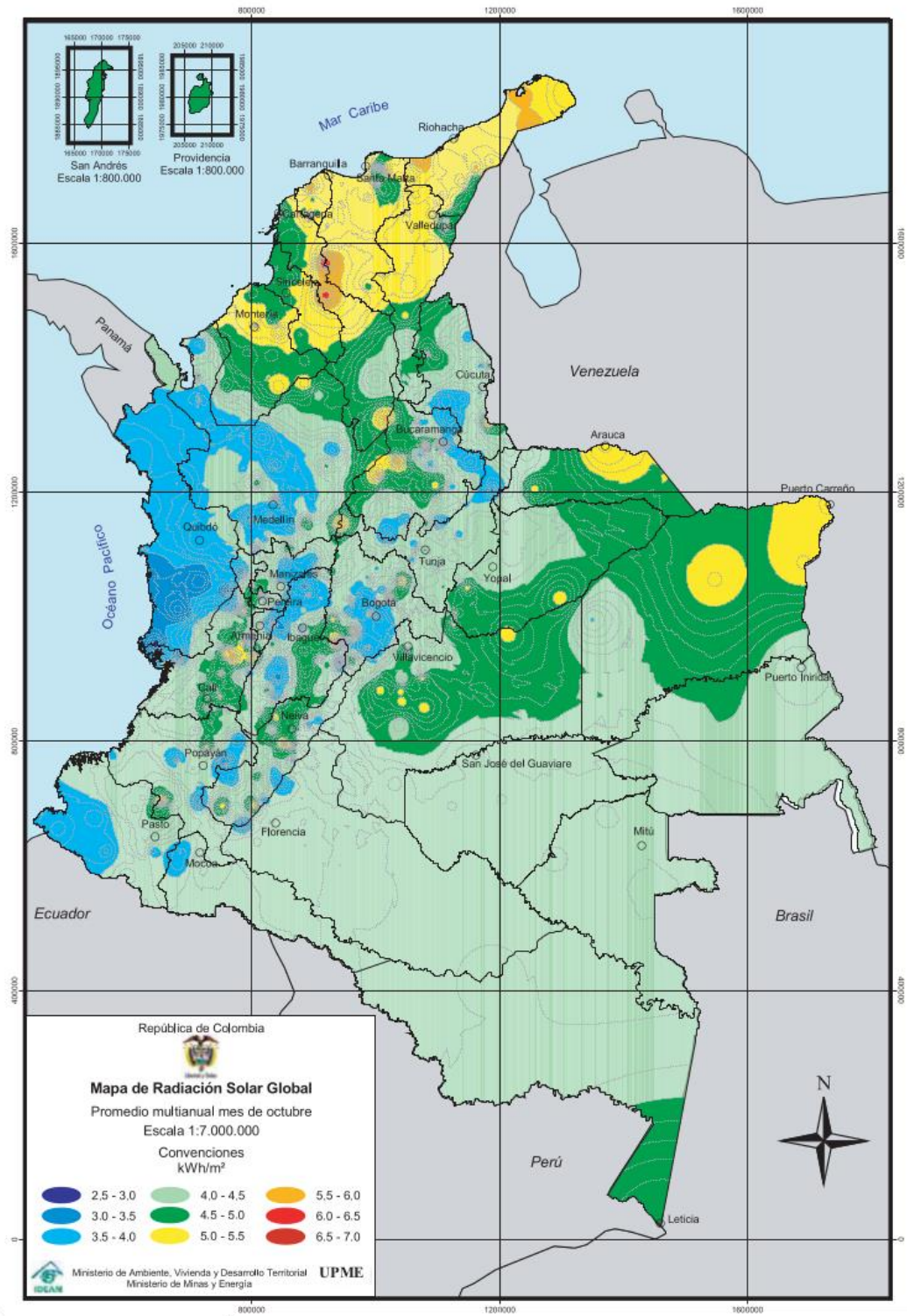


Tabla B.11: Radiación solar de Colombia mes de noviembre.

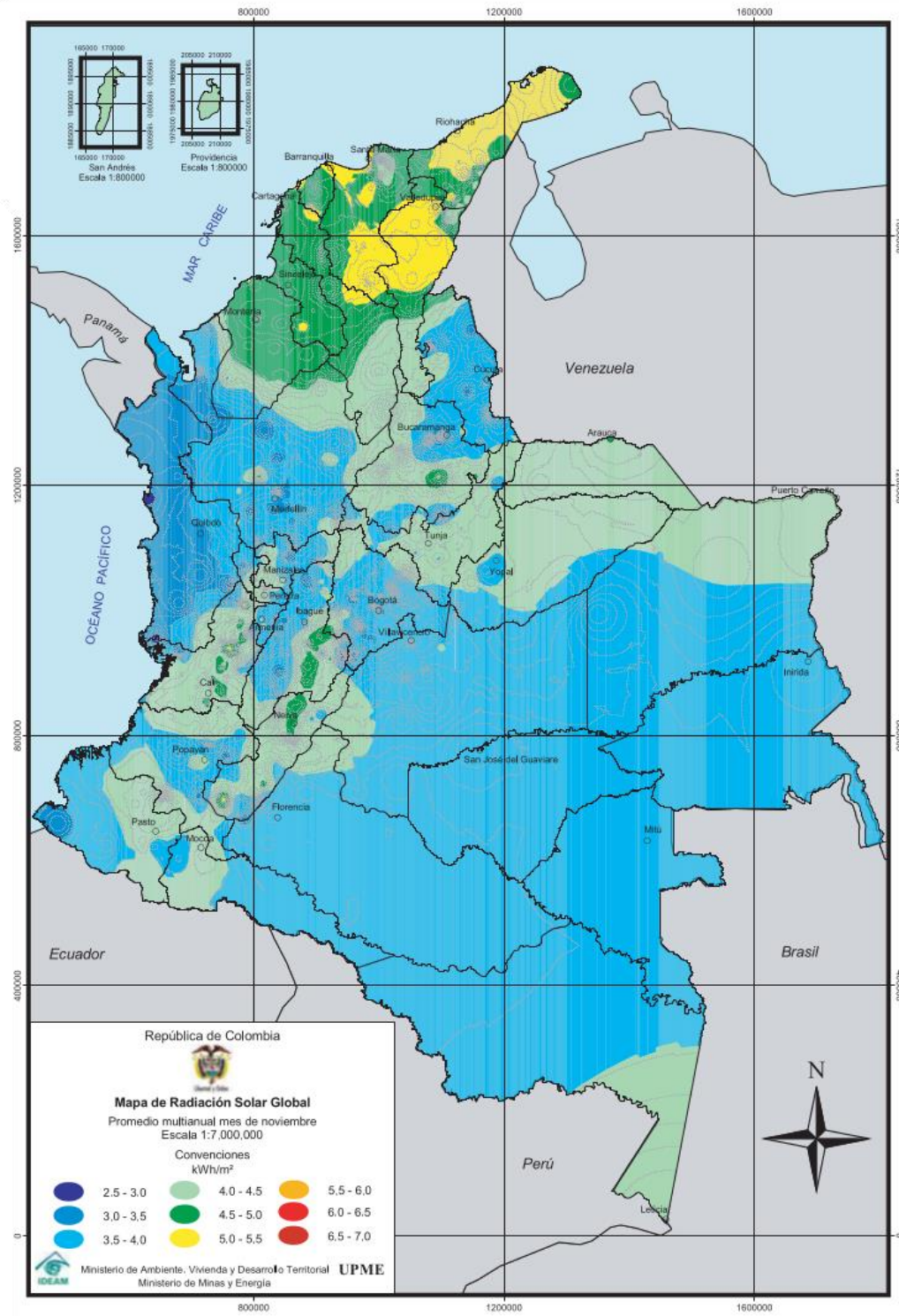
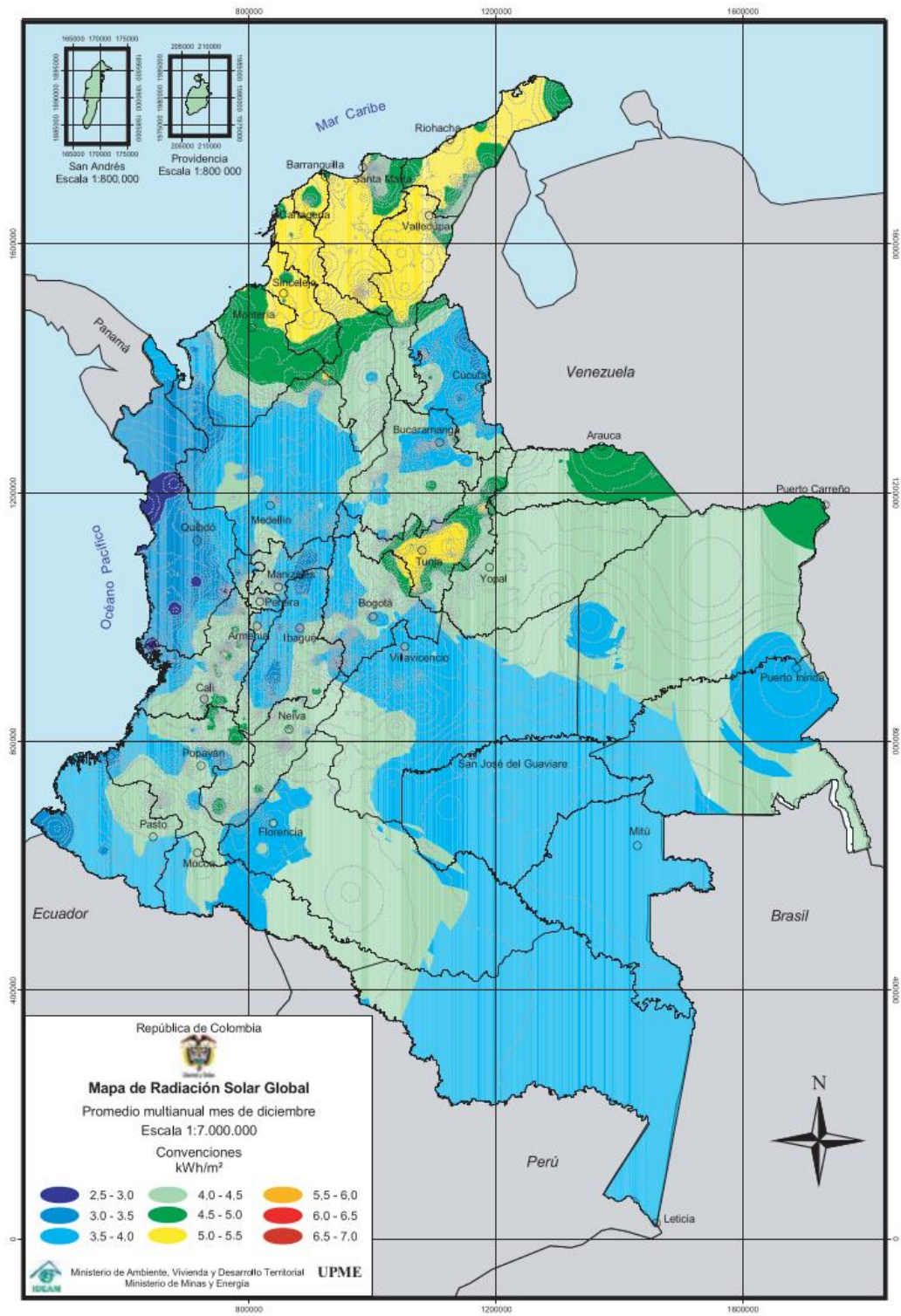


Tabla B.12: Radiación solar de Colombia mes de diciembre.



ANEXO C. Equipos para el diseño.

A continuación, se presenta una lista de equipos del mercado usados para el diseño:

Tabla C.1: Equipos del mercado

| Aerogeneradores | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-----------------------|-------------------|---------------|-------------------|----------------------|------------|
| Marca | Tensión(V) | Potencia(W) | Eficiencia max(%) | Diámetro(m) | Altura al buje(m) | Precio(\$) | |
| SOLENER(Kit) | 24 | 7500 | 52 | 4 | 3,7 | 32300000 | |
| SOLENER | 12 | 5000 | 50 | 4 | 3,7 | 24000000 | |
| BORNAY | 48 | 3000 | 51 | 4 | 3,7 | 16300000 | |
| Paneles Solares | | | | | | | |
| Marca | Referencia | Potencia(W) | Vo(V) | Isc(A) | Vmax(V) | I _{max} (A) | Precio(\$) |
| AutoSolar | 4003002 | 5000 | 38,36 | 8,71 | 30,1 | 8,28 | 26241399 |
| SUN | 435W laminates Grade-B | 435 | 85,6 | 6,43 | 30,1 | 5,97 | 400000 |
| SHARP | ND-R250A5 | 250 | 37,6 | 8,68 | 30,5 | 8,1 | 810000 |
| Reguladores | | | | | | | |
| Marca | Tensión(V) | I _{carg} (A) | Eficiencia(%) | Precio(\$) | | | |
| XANTREZ | 12 | 60 | 97,5 | 1300000 | | | |
| TRACER | 24 | 40 | 9 | 700000 | | | |
| BlueSolar | 48 | 50 | 95 | 785000 | | | |
| Baterías | | | | | | | |
| Marca | Referencia | Tensión(V) | Capacidad(Ah) | Descarga(%) | Precio(\$) | | |
| SUNLIGHT | 16OPzS2500 | 12 | 3765 | 70 | 1382000 | | |
| ROLLS | S600 C100 | 24 | 600 | 80 | 3600000 | | |
| ROLLS | AGM FULL RIVER | 48 | 440 | 80 | 8290000 | | |
| Inversores | | | | | | | |
| Marca | Referencia | Potencia(W) | V(DC-AC) | Eficiencia(%) | Precio(\$) | | |
| XANTREZ | Prowatt SW 20001 | 2000 | 12/127 | 90 | 1309000 | | |
| VICTRON | Phoenix 48/3000 | 3000 | 48/127 | 94 | 3486000 | | |
| VICTRON | Phoenix 24/5000 | 5000 | 24/127 | 94 | 3487000 | | |

ANEXO D. Guía de instalación Greenproject

D.1. Introducción

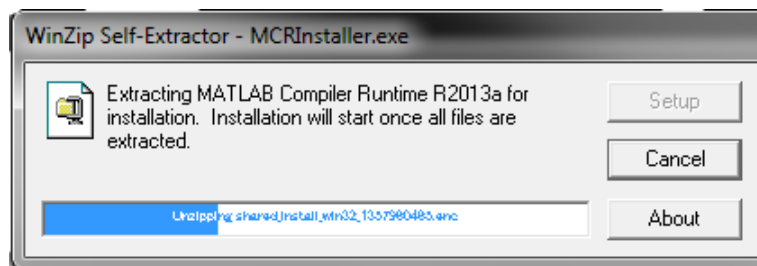
Green Project es un software creado con Matlab 2013a como herramienta para realizar un análisis de la viabilidad técnica y económica del suministro energético de viviendas rurales sin conexión a la red por medio de energía eólica y fotovoltaica mixta.

D.2. Instalación de GreenProject

Para instalar el software se debe hacer lo siguiente:

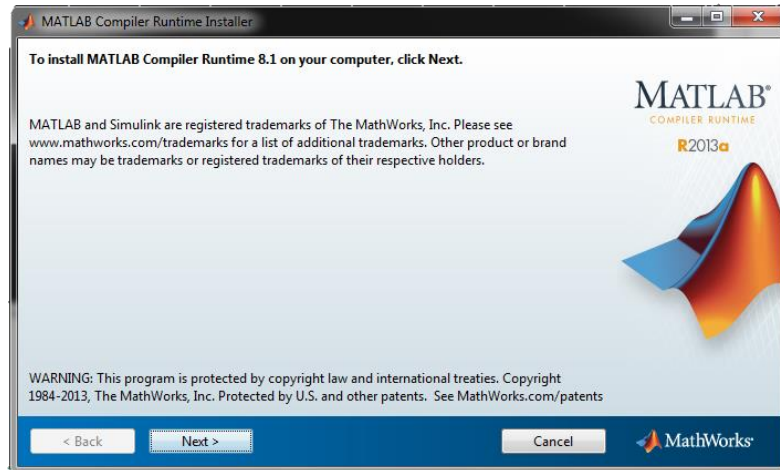
1. Dar doble click sobre el archivo Install.bat (Figura D.1). Al hacer esto, automáticamente se extraerá el MCRinstaller el cual contiene la información necesaria sobre las librerías de Matlab2013a, seguidamente se instalará automáticamente lo necesario para correr el software.

Figura D.1: Instalación de GreenProject.



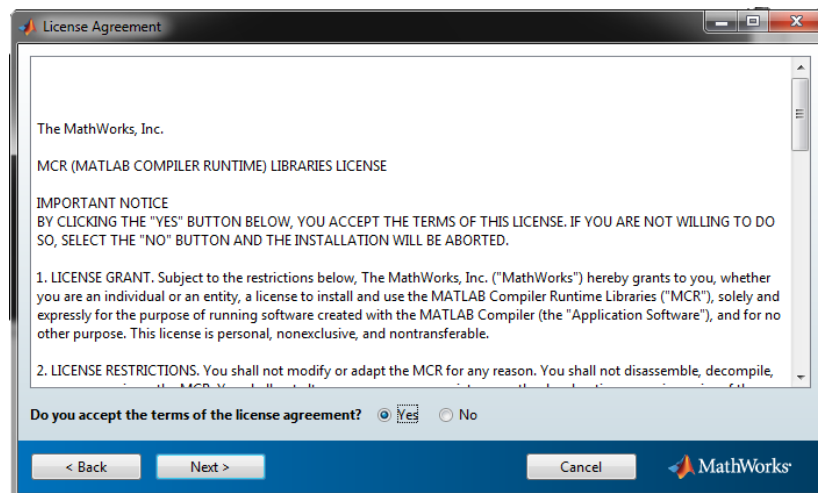
2. Luego aparecerá una ventana llamada "Matlab Compiler Runtime Installer", le damos en la opción "Next" (Figura D.2).

Figura D.2: Instalación de GreenProject.



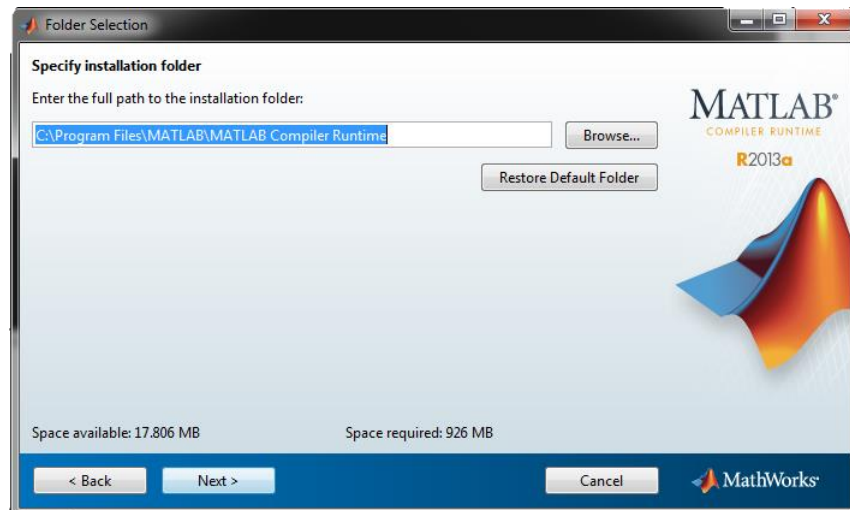
3. Se debe seleccionar una ventana con el nombre "License Agreement", en la la opción "Yes" indicando que se aceptan los términos de licencia y hace click en el botón que dice "Next" (Figura D.3).

Figura D.3: Términos de licencia.



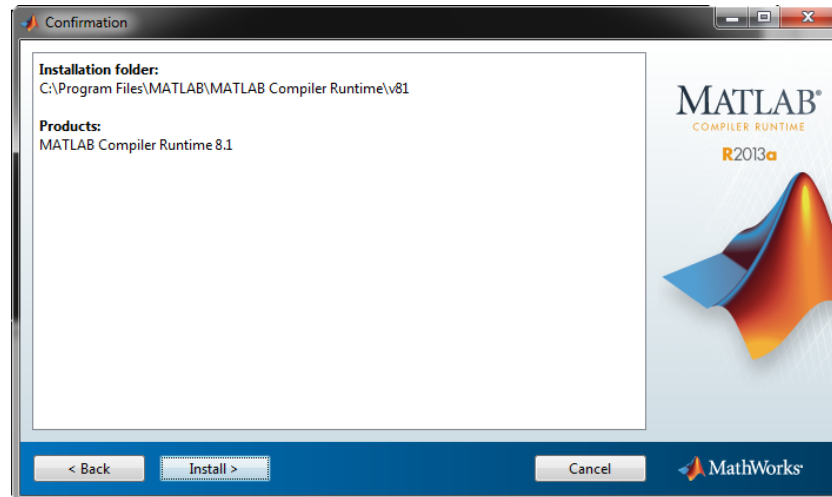
- Ahora una ventana con el nombre “Folder Selection” nos pregunta por la ubicación en donde se desea instalar el programa (Figura D.4).

Figura D.4: Selección del lugar de instalación.



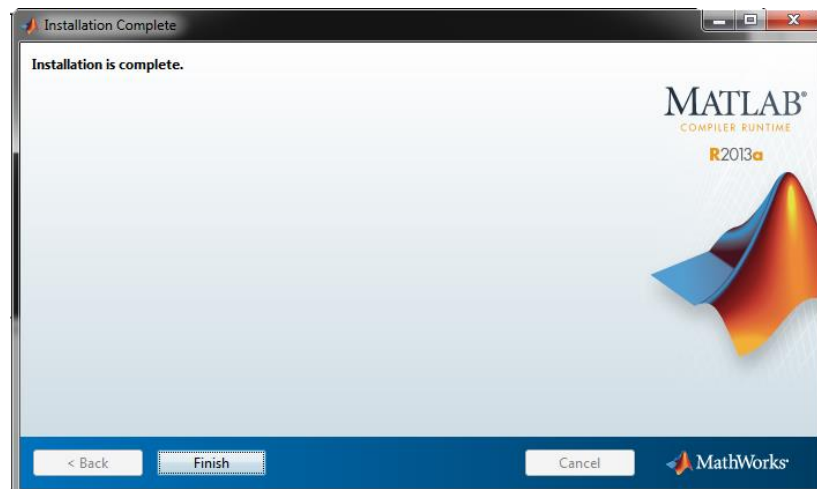
- Ahora el programa mostrará una ventana de confirmación de la instalación del software llamada “Confirmation” en la cual se debe seleccionar la opción de “Install” (Figura D.5).

Figura D.5: Instalación del software.



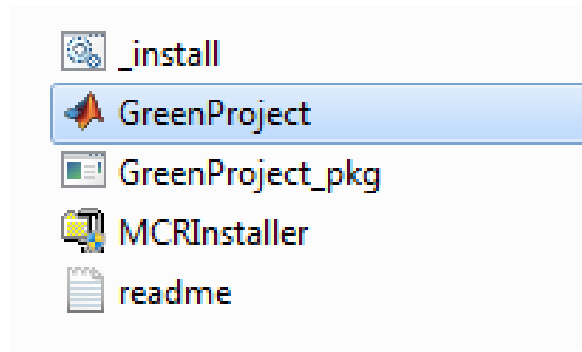
6. Finalmente, el programa mostrará una ventana llamada "Installation complete" indicando que la instalación ha terminado, allí debemos dar click en el botón "Finish" para terminar el proceso (Figura D.6).

Figura D.6: Finalización de la instalación.



7. Para inicializar el programa debemos dar doble click en el programa llamado GreenProject mostrado en la figura (Figura D.7).

Figura D.7: Iniciación del software.



D.3. Estructura del software

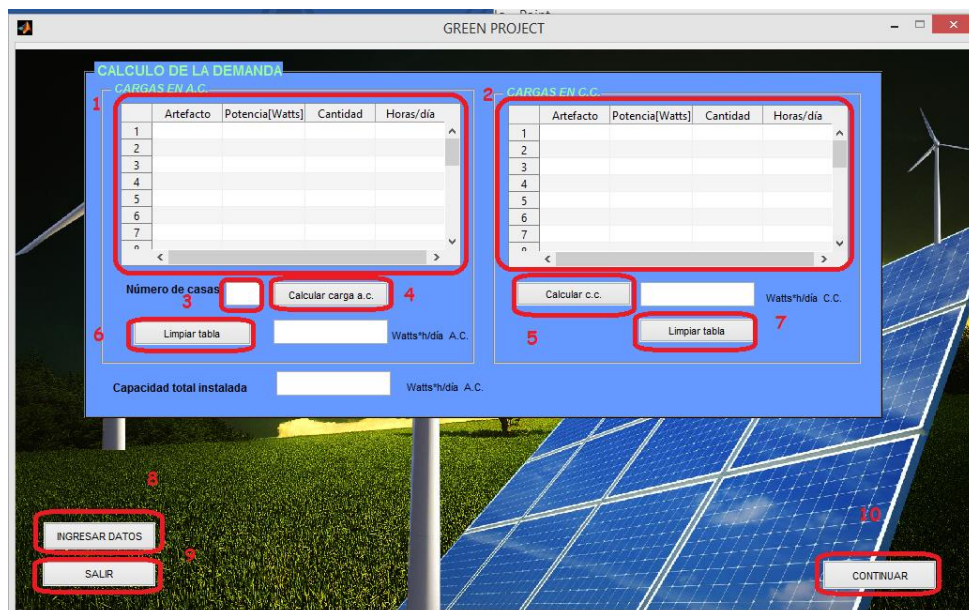
Una vez inicializado el software, se muestra una interfaz gráfica (figura D.8) donde se inicia todo el proceso de análisis, para esto se debe hacer click en el botón “continuar”. A continuación, se explica la forma en cómo se debe interactuar con él, partiendo de la figura 8.

Figura D.8: Presentación del software.



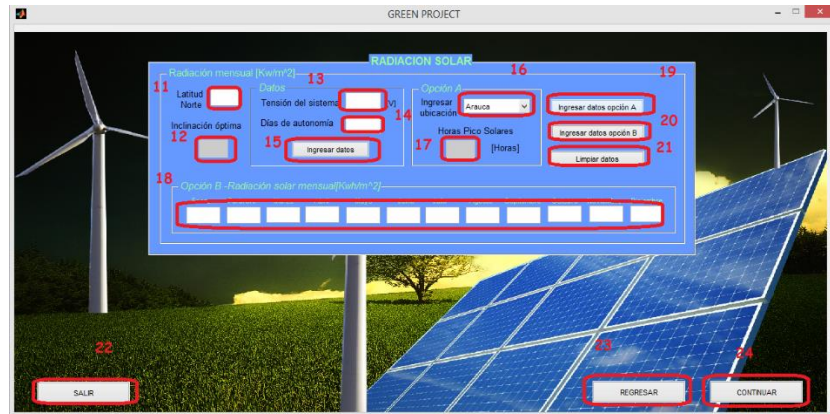
1. Se ingresan los datos de equipos electrónicos que funcionan con corriente alterna que se estimaran para el consumo de las viviendas, su potencia nominal, la cantidad y las horas de uso (Figura D.9).

Figura D.9: Consumos.



2. Ingresamos los datos de equipos electrónicos que funcionan con corriente directa que se estimaran para el consumo de las viviendas, su potencia nominal, la cantidad y las horas de uso
3. Se ingresa el número de usuarios que conformaran el análisis.
4. Realiza el cálculo de la energía necesaria por dispositivos en a.c.
5. Realiza el cálculo de la energía necesaria por dispositivos en c.c.
6. Elimina los datos ingresados en la tabla de equipos en c.a.
7. Elimina los datos ingresados en la tabla de equipos en c.c.
8. Con esta opción se ingresan los datos al sistema para realizar cálculos y muestra la energía total necesaria del sistema.
9. Sale del programa.
10. Esta opción permite continuar con el análisis pasando a la siguiente interfaz.
11. En esta opción se establece la latitud norte del lugar donde se realizará el análisis (Figura D.10).

Figura D.10: Datos de radiación solar.



12. En este cuadro el software muestra la inclinación óptima para ubicar el panel.
13. Se ingresa la tensión elegida para el diseño del sistema.
14. Se ingresa el número de días de autonomía.
15. Con esta opción se ingresan los datos al sistema para realizar cálculos.
16. En este menú llamado “PopUp menú” se selecciona la ciudad de Colombia en la que se desea realizar el análisis.
17. En este cuadro se muestran las horas pico solares del sitio escogido.
18. En estos cuadros de texto se ingresa manualmente los datos de radiación solar mensual en el año.
19. Habiendo ingresado los datos se selecciona la opción que se desea por medio de los datos internos del software.

20. Habiendo ingresado los datos se selecciona si la opción deseada por medio ingreso manual de datos.

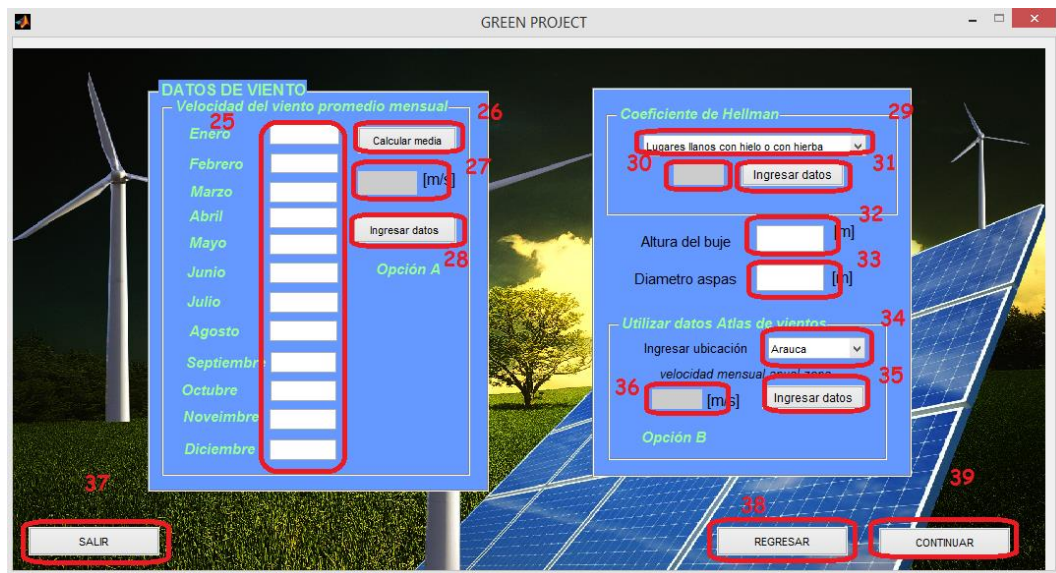
21. Con esta opción se pueden limpiar los datos ingresados en la opción 18.

22. Se sale del programa.

23. Con esta opción se regresa a los datos de la interfaz anterior.

24. En esta opción continúa el proceso de ingreso de datos para el análisis.

Figura D.11: Datos de viento.



25. En esta opción se ingresan los datos de velocidad del viento mensual manualmente.

26. Al ingresar los datos de velocidad del viento mensual manualmente, con esta opción el software calcula el promedio de ellos.

27. Muestra el promedio de los datos ingresados,
28. Ingresa los datos ingresados manualmente (opción A).
29. En este menú se elige el tipo de terreno de la zona.
30. El software muestra el coeficiente que se utilizara para realizar los cálculos de potencia eólica obtenible en el lugar.
31. Se ingresan los datos elegidos del tipo de terreno.
32. Se ingresa la altura al buque a la cual se desea realizar el análisis.
33. Se ingresa el diámetro de las aspas para el análisis.
34. En esta lista se ingresa nuevamente la ubicación de análisis del proyecto.
35. Se ingresan los datos con la información de velocidad del viento internos del software (Opción B).
36. El software nos muestra velocidad promedio mensual del peor mes del año del sitio elegido.
37. Se sale del programa.
38. Con esta opción se regresa a la interfaz anterior de datos de radiación solar.
39. Pasa a la siguiente interfaz para seguir con el análisis.

40. En esta lista podemos elegir el aerogenerador eligiendo una opción y haciendo click en el botón de importar.

Figura D.12: Datos de viento y energía eólica.



41. En este cuadro se muestra la potencia eléctrica obtenible de la zona para toma de decisiones.

42. Se ingresa en este cuadro el número de generadores que deseamos para la implementación.

43. En esta lista se elige lo referente al panel fotovoltaico eligiendo una opción de la lista y haciendo click en el botón importar.

44. Se elige el inversor de la lista, eligiendo una opción y dando click en el botón de importar.

45. En este cuadro se muestra la potencia sugerida para el inversor para la toma de decisiones.

46. Se elige un regulador para el proyecto y se hace click en importar.
47. En este cuadro se muestra información de diferentes tipos de batería, se elige una opción y hacemos click en importar.
48. Se sale del sistema con esta opción.
49. Esta opción muestra información para seleccionar la potencia obtenible del viento de la zona y la potencia requerida para el inversor.
50. Se regresa a la interfaz anterior con esta opción.
51. Haciendo click en esta opción se continua con el análisis.

Figura D.13: Costo de equipos.



52. Con esta opción se cargan los datos de los equipos seleccionados.
53. En este cuadro se muestra información de los equipos seleccionados para el diseño.
54. Con esta opción el software muestra el costo total de los equipos.
55. Esta opción muestra el costo de la instalación de los equipos.
56. Haciendo click en este botón se sale del programa.
57. Con esta opción se regresa a la interfaz anterior.
58. Hacemos click en continuar para seguir con el análisis de viabilidad del proyecto.

Figura D.14: Viabilidad del proyecto



59. En estos dos cuadros de texto se ingresa el número de kilómetros de Río y pendiente a cruzar para la interconexión. (Si existen).
60. Con estos menús se eligen las restricciones geográficas de la zona.
61. Haciendo click en esta opción se ingresan al software los datos seleccionados.
62. Se ingresa nuevamente el número de usuarios para la comparación de alternativas.
63. Se hace click en este botón y el software nos muestra el costo de interconectar el sistema a la red.
64. Finalmente, con esta opción el software determina si el proyecto es viable.
65. En este cuadro se muestra la información de la decisión de viabilidad tomada por el software.
66. En este cuadro se puede ver textualmente la viabilidad del proyecto.
67. Se sale del programa.