



Atlas del potencial energético solar y eólico del Paraguay





Atlas del potencial energético solar y eólico del Paraguay

Convenio PTI-PY/Itaipu N° 4500031993/2014

Proyecto: Mapeo del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay



Responsables del Proyecto PESE-PY

Director General Paraguayo Itaipu Binacional

Dr. James Spalding

Director de Coordinación Ejecutivo Itaipu Binacional

Ing. Pedro Domaniczky Lanik

Directora Ejecutiva Parque Tecnológico Itaipu -Paraguay

Dra. María Teresa Peralta

Directora Técnica Parque Tecnológico Itaipu -Paraguay

Dra. Myriam Torres de Segovia

Directora Administrativa Financiera Parque Tecnológico Itaipu -Paraguay

Lic. Nelly Salerno de Garcete

Coordinación del Proyecto PTI-PY

Ing. Juan Domaniczky

Líder de Proyecto

Ing. Luis Gill Mairhofer

Fiscalización Itaipu Binacional

Ing. Carlos Romero

Co-Coordinación del Proyecto PTI-PY

Arq. Jorge Acuña Fretes

Gestor Itaipu Binacional

Ing. Emigdio Espínola

Dr. Pedro Gardel

Equipo de trabajo

El estudio del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay fue realizado por el equipo de profesionales que se menciona a continuación:

PTI-PY:

Ing. Luis Gill Mairhofer

Lic. Martha Ayala

Arq. Raquel Areco

Ing. Teddy Limousin

Lic. Anabela González

Ing. Enrique Buzarquis

Ing. Marcelo Barboza

Lic. Roxana Sánchez

Ing. Ruth Cuenca

Lic. Sebastián Zárate

COLABORADORES

INTN:

Ing. Roque Báez

DINAC:

Lic. Julián Báez Benítez

Lic. Fernando Pio Barrios

Núcleo S.A.:

Ing. Aníbal Rendón

Ing. Carlos Duarte

Lic. Nilsa Duarte

Lic. Viviane Guimaraes

Lic. Lorena Ríos

Consultores externos:

Dr. Ángel Rincón

Dr. César Aguirre

Lic. Armando Brizuela

Ing. Julián Cáceres

Ing. Eduardo Ortigoza

Ing. Arturo González

Itaipu Binacional

De La Residenta, 1075

Asunción - Paraguay

www.itaipu.gov.py

Parque Tecnológico de Itaipu

Súper Carretera km 21 1/2

Hernandarias - Paraguay

www.pti.org.py

ISBN: 978-99967-861-0-5

Asunción - Paraguay

2016

Prefacio9

Resumen ejecutivo..... 11

1. Panorama energético 13

1.1. Energía: conceptos básicos..... 14

1.2. Energía: panorama mundial 16

1.3. Energía: panorama regional..... 18

1.4. Energía: panorama nacional..... 19

2. Infraestructura e informaciones previas 21

2.1. Datos estadísticos y de infraestructura 22

2.2. Clima y geografía 27

 Los aspectos climáticos y topográficos 27

2.3. Trabajos anteriores 28

3. Red de estaciones de medición energética 37

4. Metodología 41

4.1. Conceptos básicos y métodos..... 47

 SIG y sus aplicaciones en estudios energéticos..... 47

4.2. Desarrollo 49

 4.2.1. Obtención y procesamiento de datos de estaciones 49

 4.2.2. Modelación numérica-modelo de meso-escala WRF-ARW..... 50

 4.2.3. Validación de la modelización numérica del modelo..... 53

 4.2.4. Métodos de determinación del potencial energético..... 54

 4.2.5. Proceso de mapeo 55

4.3. Presentación de resultados..... 60

5. Potencial energético solar..... 61

5.1. Principios de la energía solar..... 62

6. Potencial energético eólico 77

6.1. Principios de la energía eólica 78

7. Conclusiones 101

8. Apéndices..... 103

8.1. Atlas solar y eólico online..... 104

8.2. Conceptos físicos y matemáticos utilizados 105

 8.2.1. Ley de Hellmann 105

 8.2.2. Potencial y energía del viento..... 105

 8.2.3. Distribución de Weibull 106

8.3. Estaciones meteorológicas empleadas por el proyecto PESE-PY en el Paraguay y países limítrofes 108

8.4. Validación de la modelación meteorológica realizada por el modelo WRF-ARW..... 110

 8.4.1. Configuración del modelo meteorológico WRF-ARW 110

 8.4.2. Parámetros de validación estadística 110

 8.4.3. Metodología de la validación del modelo meteorológico WRF-ARW..... 112

 8.4.4. Resultados de la validación de las variables meteorológicas simuladas de viento y Sol 113

 8.4.5. Discusión de resultados de la validación..... 123

Lista de gráficos e imágenes..... 127

Referencias 129

ALyC	América Latina y el Caribe
ANDE	Administración Nacional de Electricidad
CIIG	Centro de Innovación en Información Geográfica
CITE	Centro de Innovación en Tecnologías Energéticas
COP 21	Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DINAC	Dirección de Nacional de Aeronáutica Civil
DMH	Dirección de Meteorología e Hidrología
ER.GP	Asesoría en Energías Renovables-Itaipu Binacional
INTN	Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología
PEP	Prospectiva Energética para la República del Paraguay 2013-2040
PESE-PY	Proyecto Mapeo del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay
PTI-PY	Parque Tecnológico de Itaipu-Paraguay
REN 21	Red de Políticas de Energía Renovable para el Siglo 21
RMSE	<i>Root mean square error</i> (error de la raíz cuadrada de la media)
SELAC	Seguridad Energética para Localidades Aisladas del Chaco
SIG	Sistema de Información Geográfica
VMME	Viceministerio de Minas y Energías
WRF-ARF	<i>Weather Research and Forecasting-Advanced Research Weather</i>

Temperatura media del aire a 2m año tipo (°C)	29
Humedad relativa media año año tipo (%).....	31
Presión atmosférica media año tipo (hPa)	33
Densidad media del aire año tipo (kg/m ³).....	35
Modelo digital de terreno (MDT)	43
Mapa de rugosidad.....	45
Energía solar media anual acumulada año tipo (kWh/m ² - año).....	65
Energía solar media diaria anual año tipo (kWh/m ² - día)	67
Energía solar media estacional año tipo (kWh/m ² - día)	69
Energía solar media mensual año tipo (kWh/m ² - día)	71
Meses enero, febrero, marzo y abril	
Energía solar media mensual año tipo (kWh/m ² - día)	73
Meses mayo, junio, julio y agosto	
Energía solar media mensual año tipo (kWh/m ² - día)	75
Meses setiembre, octubre, noviembre y diciembre	
Energía eólica acumulada anual año tipo a 80 metros (kWh/m ² - año).....	81
Energía eólica acumulada anual año tipo a 50 metros (kWh/m ² - año).....	83
Energía eólica acumulada anual año tipo a 10 metros (kWh/m ² - año).....	85
Energía eólica media estacional a 80 metros año tipo (kWh/m ²)	87
Dirección y velocidad media del viento a 80 metros año tipo (m/s).....	89
Dirección y velocidad media del viento a 50 metros año tipo (m/s).....	91
Dirección y velocidad media del viento a 10 metros año tipo (m/s).....	93
Velocidad del viento a 80 metros media mensual año tipo (m/s)	95
Meses enero, febrero, marzo y abril	
Velocidad del viento a 80 metros media mensual - año tipo (m/s)	97
Meses mayo, junio, julio y agosto	
Velocidad del viento a 80 metros media mensual - año tipo (m/s)	99
Meses setiembre, octubre, noviembre y diciembre	

Prefacio

En un mundo cada vez mas requirente de energía para su desarrollo, con los desafíos relacionados al cambio climático y la tendencia mundial para sustituir las fuentes convencionales (petróleo y gas), ratificando el compromiso asumido por Paraguay en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (2015), así como el Objetivo N° 7 de Desarrollo Sostenible, “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos”, hace innegable la importancia de promover la utilización de las fuentes de energía renovable.

Recientes estudios indican un aumento en la utilización de la energía eólica y solar en varias partes del mundo - lo cual comprueba la madurez de la tecnología relacionada -, por otra parte, la puesta en vigencia por primera vez en la historia del país de la Política Energética de la República del Paraguay 2040, aprobada por Decreto N° 6.092 del 10 de octubre de 2016, propone el aprovechamiento del vasto potencial de fuentes de energía renovable con que se cuenta. El correcto aprovechamiento de las mismas requiere conocer en detalle la zona de mayor potencial para centrar la atención en posibilidades de inversión.

Con esta finalidad presentamos el “Atlas del potencial energético Solar y Eólico del Paraguay” desarrollado conjuntamente por la Itaipu Binacional y el Parque Tecnológico Itaipu – Paraguay, contando además con el apoyo del Viceministerio de Minas y Energía, de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil, del Instituto Nacional de Tecnología Normalización y Metrología, y de la empresa Núcleo S.A.

Finalmente, los resultados presentados en este atlas – compartido también como portal web con mapas interactivos en formato digital – indican el potencial energético solar y eólico del Paraguay en valores de promedio anual, mensual y estacional, constituyéndose un importante aporte para la definición de políticas, estrategias y planes energéticos afines, fomentando además la participación del sector privado.

Dr. James Spalding
Director General Paraguayo
Itaipu Binacional

Resumen ejecutivo

El **Atlas del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay** es el resultado del trabajo realizado en el marco del Proyecto Mapeo del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay (PESE-PY), que tuvo como objetivo principal determinar el Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay con resolución espacial y temporal mejorada, por medio de simulaciones meteorológicas de un modelo de meso-escala y una campaña de mediciones de variables que cumplan las normas internacionales. Constituye un emprendimiento científico-tecnológico impulsado por la Itaipu Binacional, a través de la Asesoría en Energías Renovables (ER.GP), del Parque Tecnológico Itaipu-Paraguay (PTI-PY), del Centro de Innovación en Tecnologías Energéticas (CITE) y del Centro de Innovación en Información Geográfica (CIIG).

Si bien Paraguay cuenta actualmente con una importante fuente de energía limpia y renovable provenientes de las centrales hidroeléctricas de Itaipú, Yacyretá y Acaray, según las proyecciones de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE) y los resultados obtenidos en el proyecto de Prospectiva Energética para la República del Paraguay 2013-2040 (PEP), la demanda a nivel nacional, debido al sostenido incremento, podría no ser atendida a mediano y largo plazo solamente con las fuentes de energía disponibles en la actualidad. Esto hace necesaria la introducción de nuevas fuentes de energía para atender dicho incremento de la demanda.

A través de los resultados del Atlas se pretende incentivar la utilización de la energía renovable; específicamente la solar y la eólica, buscando diversificar la matriz energética nacional, con el objetivo de impulsar políticas, planes y proyectos de inversiones en este

sector, que podrán estar destinados tanto a actores del sector público como del sector privado.

El proyecto PESE-PY fue desarrollado por un equipo multidisciplinario de trabajo y la colaboración de especialistas nacionales y referentes internacionales del sector, como también instituciones del sector público y privado, buscando mejorar la calidad de los resultados. Entre dichas instituciones se destacan la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC), el Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN) y Núcleo S.A. (Personal).

En el proceso se implementó una red de estaciones de medición energética de alta precisión instaladas según las Normas Internacionales, distribuidas adecuadamente en todo el país, las cuales envían constantemente información a un centro remoto de monitoreo. Cabe destacar, que para este estudio se realizaron mediciones a alturas de 10, 50 y 80 metros, de forma sistemática, en un determinado periodo de tiempo, siendo pionero en ese tipo de mediciones a nivel país.

La metodología desarrollada contempla la utilización de métodos estadísticos y técnicas de información geográfica en función a los datos de estaciones meteorológicas y la aplicación de un modelo de simulación meteorológica de meso-escala. Cabe mencionar, que este modelo se ha implementado y configurado para la ejecución de simulaciones sobre la geografía del país.

Los resultados se presentan en formato de mapas impresos y también en formato interactivo a través de una web: <http://pese.pti.org.py/>.

1. Panorama energético



1.1. Energía: conceptos básicos

La energía se encuentra rodeándonos todo el tiempo y se revela en diversos aspectos. El concepto de energía está relacionado con la capacidad de generar movimiento o lograr la transformación de algo. La energía es una propiedad asociada a los objetos y sustancias y se manifiesta en las transformaciones que ocurren en la naturaleza. Por tratarse de un concepto amplio, y para delimitarla de algún modo, se puede decir que se concibe como “la medida de capacidad de un sistema, para proporcionar trabajo por medio de movimiento, luz, calor”.

En tecnología y economía, el término energía se refiere a un recurso natural, incluyendo a las tecnologías y métodos asociados para extraerla, transformarla y luego darle un uso industrial o económico.

Generalmente se hace una distinción entre dos tipos o estilos de energías en función a su característica principal, las mismas son:

■ **Energías no renovables:** se caracterizan principalmente por ser un recurso finito. Por ejemplo: los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), entre otros.

■ **Energías renovables:** se crean en un flujo continuo y se disipan a través de ciclos naturales, que se estiman inagotables, ya que su regeneración es incesante. Algunos ejemplos son: la energía solar, la energía eólica, biomasa, energía geotérmica, entre otras¹.

En la actualidad se utilizan todavía distintas unidades para cuantificar la energía, a pesar que el Sistema Internacional de Unidades ha sido declarado prioritario o único en la mayoría de los países desde su instauración en 1960. Este sistema establece que la unidad de energía es denominada “Joule” [J]. 1 Joule se define como la fuerza de 1 Newton [N] multiplicado por la distancia de 1 metro [m]. La desventaja del Joule es que representa a escala humana una cantidad muy pequeña, lo que exige el uso de múltiplos de 1000 con su respectivo prefijo.

Las energías renovables se crean en un flujo continuo y se disipan a través de ciclos naturales, que se estiman inagotables, ya que su regeneración es incesante.

Especialmente, pero no solo en el ámbito de la electricidad, se utiliza, a menudo, la unidad kWh (kilowatt hora) para medir la cantidad de energía, que también deriva del Sistema Internacional. El watt (W) es la unidad de potencia en ese sistema. 1 W representa la energía de 1 J “utilizada” en 1 s de tiempo. Dado que también es una cantidad muy pequeña, se utilizan generalmente sus múltiplos de 1000 como kW y MW.

La caloría (cal) fue antes la unidad básica de energía. Hoy se usa casi solo para indicar el contenido de energía en los alimentos. La unidad BTU (British Thermal Unit) se utiliza en el Paraguay casi exclusivamente en el ámbito de los acondicionadores de aire. Para medir el consumo anual de energía de un país o región se usan generalmente toneladas equivalentes de petróleo (TEP), que corresponde a la energía que contiene una tonelada de petróleo estándar².

Para facilitar la conversión de las unidades de energía entre sí se utilizan factores de conversión como los representados en la siguiente tabla:

Tabla de prefijos numéricos

Cantidad numérica	Cantidad en letras	Prefijo	Sigla
10 ³	Mil	Kilo	k
10 ⁶	Millón	Mega	M
10 ⁹	Mil millones	Giga	G
10 ¹²	Billón	Tera	T
10 ¹⁵	Mil billones	Peta	P

Tabla de factores de conversión entre unidades de energía

	J=Ws	kWh	Kcal	BTU	TEP
J=Ws	1	277,8 x 10 ⁹	239 x 10 ⁶	948,4 x 10 ⁶	23,9 x 10 ¹²
kWh	3,6 x 10 ⁶	1	860	3413	86,0 x 10 ⁶
Kcal	4187	1,16 x 10 ³	1	3,97	100 x 10 ⁹
BTU	1055	293 x 10 ⁶	0,25	1	25,2 x 10 ⁹
TEP	41,9 x 10 ⁹	11 630	10 x 10 ⁶	39,7 x 10 ⁶	1

¹ Oviedo-Salazar, J. L., Badii, M.H., Guillen, A., y Serrato, O. L. (2015). Historia y Uso de Energías Renovables. History and Use of Renewable Energies. Daena: International Journal of Good Conscience, 10(1), 1-18.

² Bécker, D. y Belt, C. (2011). Situación de las Energías Renovables en el Paraguay. Publicado por GIZ GmbH en el marco de la medida autofinanciada “Fomento de las energías renovables y la eficiencia energética”.

1.2. Energía: panorama mundial

Actualmente, estamos por afrontar una crisis energética a nivel mundial. El creciente consumo, las fluctuaciones en el precio del petróleo y gas, además de los problemas climáticos que conlleva el uso de las fuentes de energía convencionales, exigen que todas las políticas de los Gobiernos se centren en alternativas de generación y medidas de eficiencia energética.

En el gráfico se puede observar que las principales fuentes primarias de energía en la actualidad siguen siendo el petróleo, el gas natural y el carbón, siendo éstas fuentes de muy alto impacto ambiental y de carácter no renovable. Por otra parte, se muestra además en la última década un importante crecimiento de las fuentes primarias de energía renovable.

Según el tratado firmado en la Conferencia de las Partes (COP21) en París, en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 195 países acordaron limitar el calentamiento global a menos de 2 grados centígrados al final de este siglo. La gran mayoría se comprometió a incrementar el uso de la energía renovable e implementar medidas de eficiencia energética. Esto supone un histórico punto de inflexión que se debe aprovechar para impulsar la generación de energías limpias y el fomento de la eficiencia energética.

Por otro lado, el reporte de la Situación Mundial de Energías Renovables 2016 (REN 21), indica que la capacidad de generación de energía renovable ha mostrado un crecimiento muy importante en la última década, alcanzando un total de 1849 GW para finales del año 2015. Particularmente, la energía eólica y solar fotovoltaica presentaron un crecimiento vertiginoso en la última década, como se puede observar en el gráfico de la página 15.

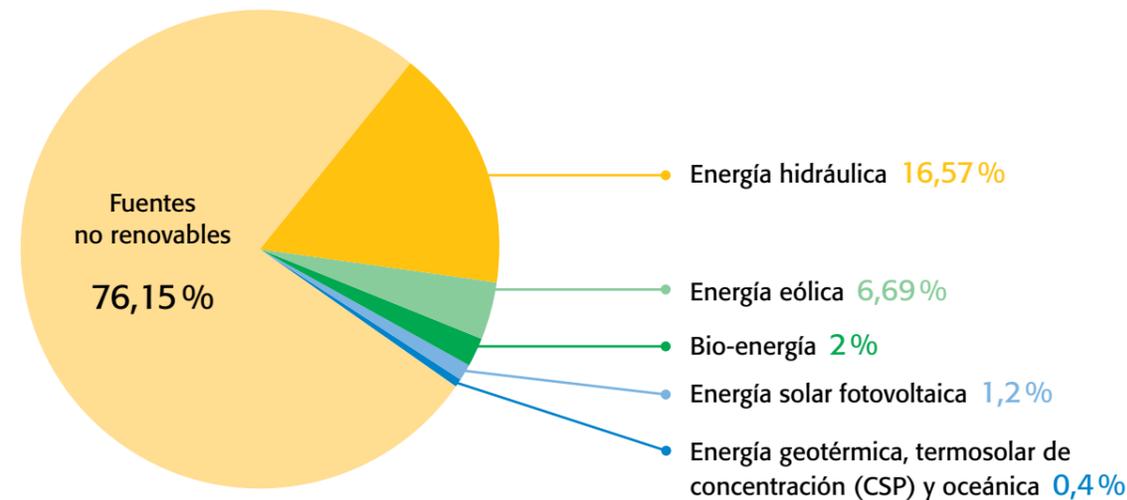
Al presente, según REN 21, la capacidad instalada de generación de energías renovables es suficiente para generar aproximadamente el 24% de energía eléctrica a nivel mundial. Además, los avances tecnológicos, la expansión en los mercados y mejoras en las condiciones de financiamiento han contribuido a reducir los costos para los sistemas de generación fotovoltaicos y eólicos.

Por mucho tiempo y bajo condiciones favorables (disponibilidad de recursos y buen marco regulatorio), la electricidad derivada de las hidroeléctricas, las fuentes geotérmicas y la biomasa han sido muy competitivas con la proveniente de combustibles fósiles.

Sin embargo, las fuentes fotovoltaicas y eólicas también son competitivas en cuanto a costo con las fuentes

Participación de las fuentes de energía para la generación de electricidad a nivel mundial para el año 2015

Fuente: Situación Mundial de Energías Renovables 2016 (REN 21)

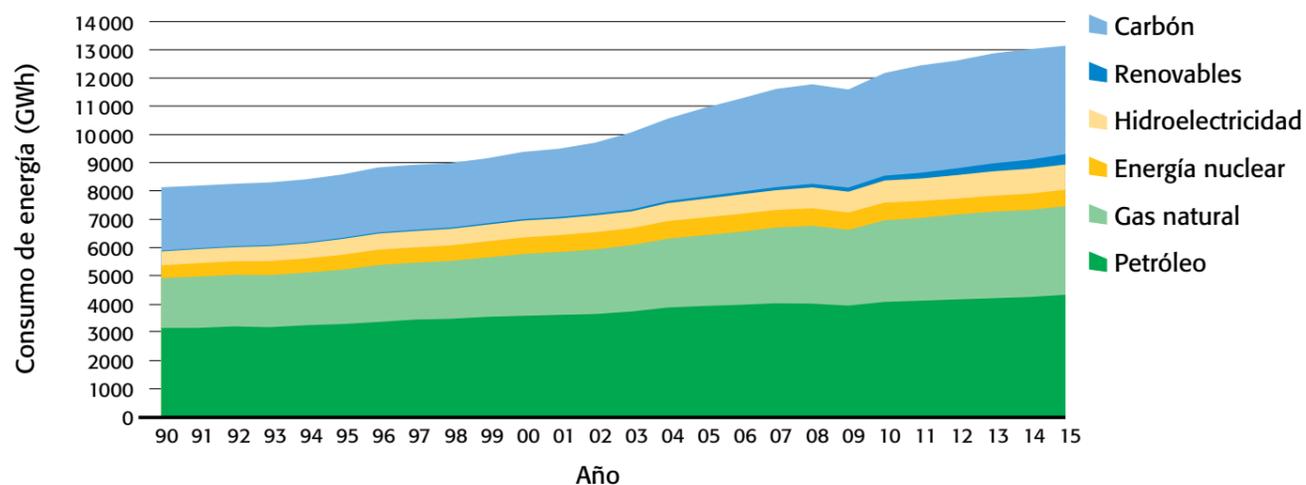


de combustibles fósiles. La energía eólica fue la de mejor desempeño en relación efectividad-costo en el año 2015 en muchos mercados, como por ejemplo los de Brasil, Canadá, México, Nueva Zelanda, Estados Unidos, entre otros.

En el caso de la energía solar fotovoltaica, entre los años 2010 y 2015 se observó un despliegue récord en

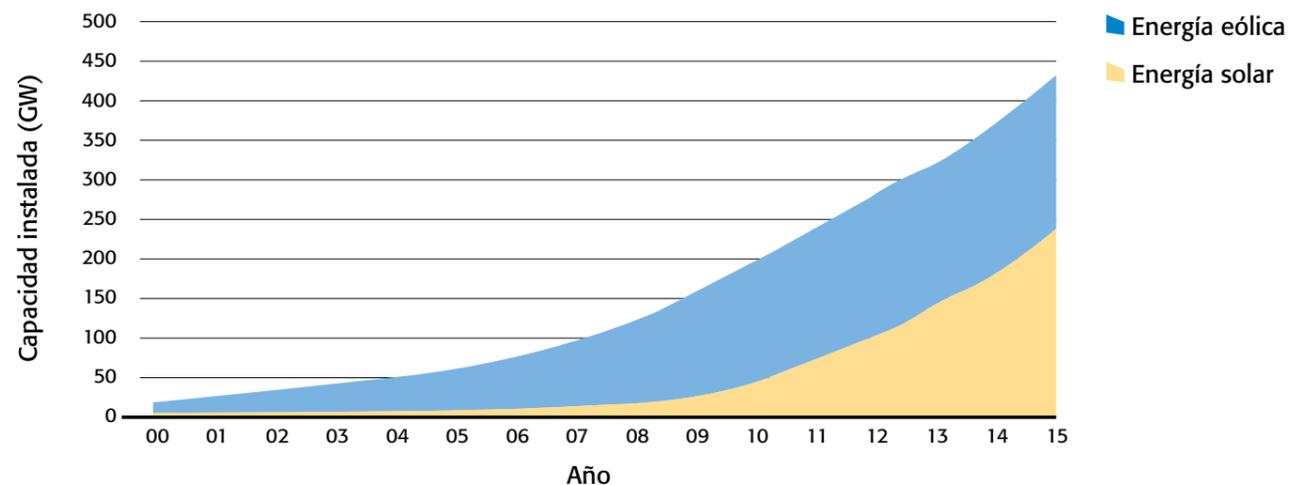
capacidad instalada en países como China (48 veces), Japón (10 veces) y Estados Unidos (10 veces). Por otra parte, los países europeos siguen aumentando su capacidad de generación, pero de manera menos acelerada que en años anteriores, a pesar de seguir siendo los de mayor capacidad instalada en el mundo, superando en conjunto los 100 GW de capacidad de generación fotovoltaica en el año 2016.

Consumo de energía a nivel mundial (1990-2015)



Fuente: BP Statistical Review of World Energy June 2016

Capacidad instalada de generación solar y eólica periodo (2000-2015)



Fuente: BP Statistical Review of World Energy June 2016

1.3. Energía: panorama regional

Parque Eólico Campos Neutrais (Brasil)



Reúne tres grandes parques eólicos: Geribatu, Chuí y Hermenegildo. Entre los tres suman una potencia instalada de 583 MW.
Fuente: http://www2.eletrosul.gov.br/gdi/gdi/cl_pesquisa.php?pg=d_abre&cd=jekedb7;%7BScfi

En el caso de América Latina y el Caribe (ALyC) se ha experimentado un fuerte impulso en las tecnologías de energía solar fotovoltaica y eólica en respuesta al impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica con grandes embalses, las variaciones imprevisibles del precio del petróleo, necesidad de diversificación en la matriz energética, entre otros estímulos.³

Por ejemplo, Brasil, Chile y Uruguay invirtieron más de US\$ 1000 millones en energías renovables, especialmente en el ámbito de la energía eólica y solar fotovoltaica en el año 2014.⁴

Los países de la región alcanzaron una alta participación de las energías renovables para la generación de electricidad. Por ejemplo, en el año 2015 Costa Rica generó el 99% de su electricidad con fuentes renovables al igual que Uruguay con un 92,8% del total generado. América Latina sigue siendo uno de los mercados de más rápido crecimiento de la energía eólica y solar fotovoltaica en el mismo periodo.

Brasil fue el segundo país a nivel mundial en cuanto a la generación de energía hidroeléctrica y cuarto en energía eólica.

Varios países, entre ellos Chile, México y Perú realizaron adjudicaciones para la construcción de parques generadores en el año 2015 y principios del año 2016, lo que permitió obtener los costos más bajos de energía a nivel mundial, debido en parte a los enormes recursos energéticos renovables de la región.

Planta termo-solar Atacama 1 (Chile)



Cuenta con una potencia termo-solar de 110MW además con una potencia solar fotovoltaica instalada de 100 MW.
Fuente: Abengoa Solar. http://www.abengoasolar.com/web/es/plantas_solares/plantas_propias/chile/

1.4. Energía: panorama nacional

En el caso de Paraguay, se puede resaltar la gran capacidad de producción de energía hidroeléctrica ya que cuenta con tres grandes centrales: Itaipu (Paraguay-Brasil), con una potencia instalada de 14 000 MW, de las cuales el 50% corresponde a Paraguay; Yacyretá (Paraguay-Argentina), con una potencia instalada de 3200 MW, de las cuales 1600 MW pertenecen a Paraguay y Acaray (Paraguay) con una potencia instalada de 210 MW⁵.

Según datos del Balance Energético Nacional del año 2014, la producción primaria de energía se distribuye en hidroenergía con un 67% y biomasa con un 33%. De este 67% de hidroenergía producida, el 80,7% es exportado a Brasil y Argentina.

La energía eléctrica ocupa solo un 17,9% dentro del consumo final de energía, lo que representa un contrasentido, ya que se cuenta con una gran producción pero bajo consumo de energía eléctrica. La configuración restante en cuanto al consumo final de energía se complementa con los derivados del petróleo en un 37,7% y la biomasa un 44,4%.⁶

Dada esta coyuntura energética, la alta disponibilidad actual de energía eléctrica no propicia el desarrollo de proyectos basados en fuentes alternativas, sin embargo

Piranómetro



Proyecto PESE-PY.
Fuente: PTI-PY

el VMME, la Itaipu Binacional, el PTI-PY, la ANDE y otras instituciones, se encuentran promoviendo el fomento y la utilización energías alternativas.⁷

Centrales de producción de energía en Paraguay

Central hidroeléctrica	Potencia instalada	Corresponde a Paraguay
Itaipu (Paraguay-Brasil)	14 000 MW	7000 MW
Yacyretá (Paraguay-Argentina)	3200 MW	1600 MW
Acaray (Paraguay)	210 MW	210 MW
Total		8810 MW

³ World Energy Council (2014). Consejo Mundial de la Energía (CME).

⁴ Energía solar al día. Disponible online en: <http://energiasolaraldia.com/brasil-chile-uru-guay-los-invirtieron-mas-energias-renova-bles-america-del-sur-2015/>. (Consultado 30/08/2016).

⁵ Coronel, T., et al. (2016). Estado del arte de generación distribuida y energía solar fotovoltaica en Paraguay. XII Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo. Paraguay.

⁶ Viceministerio de Minas y Energía (2015). Balance Energético Nacional 2014. Asunción, Paraguay.

⁷ Gill, L. y Báez, J. (2013). Mapeo del potencial energético solar y eólico del Paraguay y de sus recursos hidroenergéticos en cuencas de la región Oriental.

Paneles Solares instalados por la PTI-PY en Joel Estigarribia - Chaco Paraguayo



Fuente: PTI-PY

El excedente energético con el que cuenta Paraguay, hoy en día debido a las centrales hidroeléctricas, se verá reducido en los próximos años, hasta que eventualmente la demanda nacional iguale a la generación de estas centrales. Algunos estudios indican que este momento clave podría darse alrededor del año 2030 (Plan Maestro-ANDE),⁸ en el caso de un gran crecimiento y desarrollo económico del país.

De acuerdo a la Prospectiva Energética para la República del Paraguay (PTI-PY/Itaipu), cualquier problemática del sector energético se puede solucionar de manera viable con una planificación apropiada, ya que el país cuenta con una adecuada cantidad de recursos naturales para enfrentar cualquier escenario de cambio con respecto a los procesos referentes a la producción del sector energético (PEP).⁹

Ante este escenario, si bien, la generación de energía hidroeléctrica es considerada energía renovable, la diversificación de la matriz energética es una tendencia

a nivel mundial y más aún enfocada hacia las fuentes alternativas.

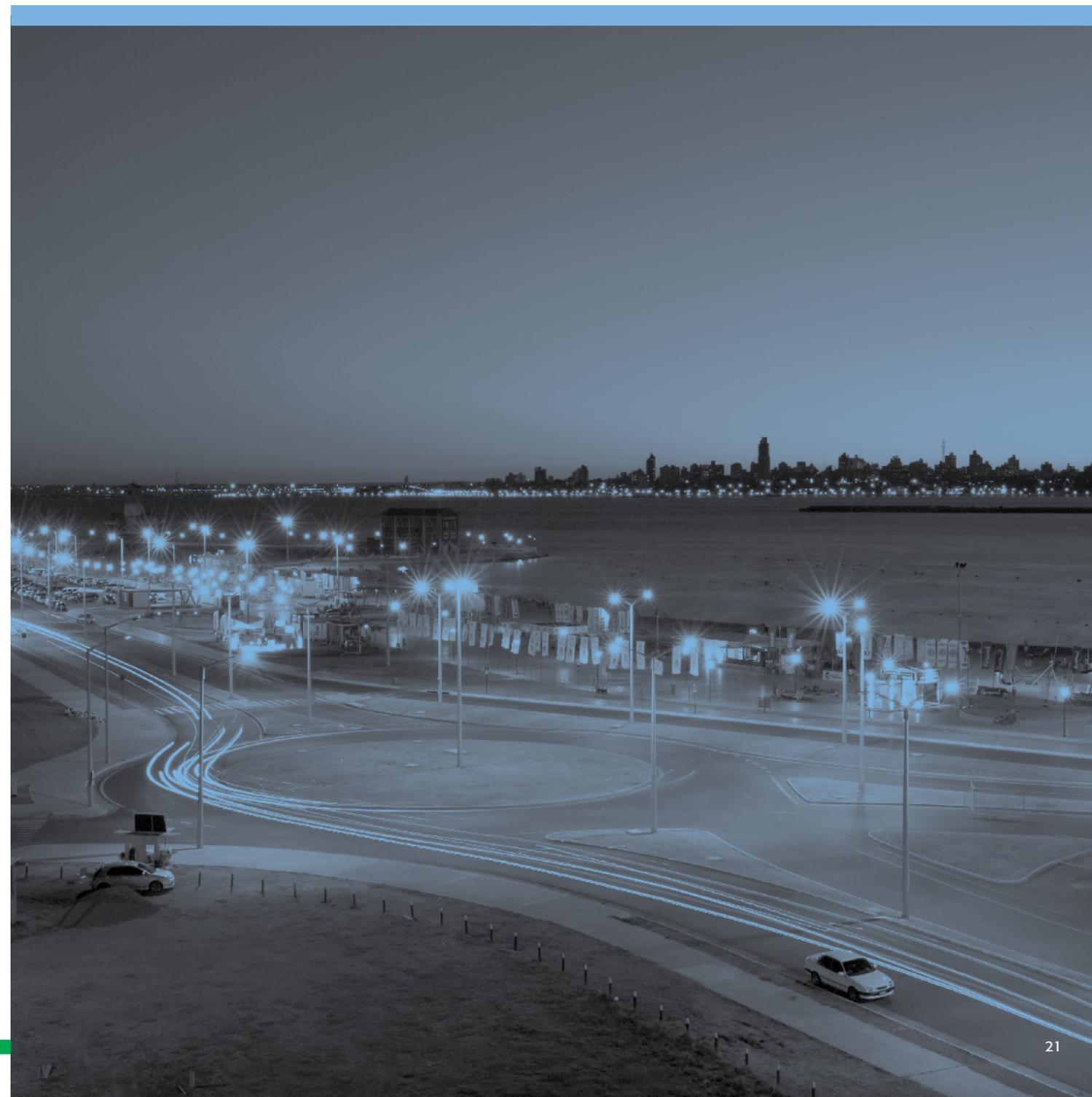
El Paraguay no está ajeno a ello y con compromisos asumidos como, por ejemplo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2015, XXI Conferencia Internacional sobre Cambio Climático o 21.ª Conferencia de las Partes, además del Plan Nacional de Desarrollo - Paraguay 2030, para asegurar el abastecimiento energético a largo plazo, es necesario incentivar, desarrollar, orientar y evaluar otras opciones de generación energética, entre ellas se encuentran la energía solar y eólica en el Paraguay.

Entre los proyectos destacables de aplicación de estas tecnologías alternativas en los últimos tiempos, se puede mencionar el proyecto SELAC en Joel Estigarribia y Lagerenza (PTI-PY/Itaipu), el proyecto Energización de Centros Comunitarios Indígenas de Zonas Aisladas, con Energía Solar (Itaipu-INTN), instalación de calefones solares y otros.

⁸ Administración Nacional de Electricidad (ANDE), Plan Maestro de Generación y Transmisión de Corto y Mediano Plazo. Periodo 2014-2023. Gaceta Oficial.

⁹ Parque Tecnológico Itaipu-Paraguay, Itaipu Binacional, Fundación Bariloche (2016). Elaboración de la prospectiva energética para la República del Paraguay años 2013-2040

2. Infraestructura e informaciones previas



2.1. Datos estadísticos y de infraestructura

Para determinar las áreas recomendables para el desarrollo de futuros emprendimientos energéticos eólico/solar en los distintos puntos del país, es importante el análisis de la infraestructura vial y la red eléctrica, además de los datos estadísticos y de población.

El Paraguay es un país que cuenta con una extensión territorial de 406 752 km². Está dividido en dos regiones naturales bien definidas, la región Occidental o Chaco que representa el 61% del territorio nacional; y la región Oriental que completa con el 39% el total de la extensión del país.

Cuenta con cerca de 7 millones de habitantes según el censo realizado en el año 2012.

La paraguaya es una economía pequeña y abierta. Durante la última década, ha crecido a un promedio de 5% anual, gracias a la gran disponibilidad y explotación de los recursos naturales, tanto para la producción de materia prima, productos, bienes y servicios, incluyendo a la energía.

En cuanto a la infraestructura, el Paraguay cuenta con el siguiente detalle:

Transporte

En el Paraguay existen 32 207 kilómetros de caminos y rutas, tanto en la Región Oriental como Occidental. De este total, 5474 kilómetros corresponden a pavimentos, 9,72 kilómetros son adoquinados, 1501 kilómetros están empedrados, 1012 kilómetros son enripiados y 24 209 kilómetros son caminos de tierra.

Con respecto a la movilidad ferroviaria, la misma es utilizada para fines turísticos, a excepción de los trenes de carga que funcionan en la ciudad de Encarnación y sirven como medio de conexión con los puertos fluviales, movilizan anualmente 200 000 Kg. de carga, principalmente granos de soja.

Cabe destacar que Ferrocarriles del Paraguay S.A. es la única empresa pública que sigue en vías de privatización, por lo que se están realizando estudios internacionales de inversión para el sector.

Con respecto al transporte marítimo, varios ríos y sus afluentes cruzan el territorio del Paraguay, lo que favorece al desarrollo del sector portuario y de transporte marítimo. Los ríos más importantes son el Paraguay y el Paraná, que son navegables todo el año en casi todo su trayecto. Sobre el río Paraguay existen 63 terminales portuarias entre privadas y estatales. La más importante de ellas es el puerto de Asunción, el principal del país. Este puerto dispone de 900 metros de muelle lineal para el atraque de embarcaciones mayores, una playa de 26 500 m² de superficie para contenedores cargados y otra de 51 250 m² para contenedores vacíos. Otros puertos de relevancia son el de Villeta, que tiene una playa de almacenamiento de contenedores cargados y vacíos de 60 000 m², y el de PETROPAR, donde llegan todas las importaciones de derivados de petróleo. Sobre el río Paraná existen, actualmente un total de 52 terminales portuarias privadas o públicas, siendo la más importante la de Ciudad del Este, hasta donde llega gran parte de las importaciones de productos de alta tecnología que se comercializan en la ciudad. A partir del año 1994, con el fin de desarrollar la infraestructura portuaria en todos sus aspectos, se promulgó la Ley 414/94 De Puertos Privados, donde se autoriza la construcción y explotación de puertos privados, los cuales deben contar con instalaciones y equipamientos adecuados para los usuarios. Las tasas que se cobren por el uso de estos puertos son definidas directamente por las empresas operadoras. Además, los puertos pueden beneficiarse de los incentivos fiscales a la inversión de capital.

Para fomentar la salida de sus productos por vía marítima hacia los principales destinos del mundo, Paraguay posee una gran cantidad de depósitos francos en diferentes países de la región.

Mapa de rutas principales en Paraguay



Fuente: "CIIG/PTI. Elaboración propia. (2016)

Puerto de Asunción



Fuente: Gentileza Fernando Allen

Servicio telefónico

Al año 2013, a nivel nacional existían 1 280 455 terminales de línea fija y 6 085 461 de teléfonos móviles.

Domicilios

Existe un total de 1 745 449 domicilios particulares permanentes, de los cuales 60,13% son urbanos y 39,87% rurales. De estos, el 99,0% poseen conexión eléctrica. La cobertura del servicio de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario en el 2015 alcanza un total de 71% y los domicilios con cobertura de alcantarillado sanitario con redes cloacales de 11%. El 47,2% de los domicilios en Paraguay cuentan con servicio de recolección de basuras.

Salud

En el año 2014, dentro del sector público, la cobertura de atención a la salud para un 95% de la población

total del país, está a cargo del Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social y del Instituto de Previsión Social, constituyéndose en las dos instituciones más importantes para la atención de la salud a la población. Ambas cuentan con establecimientos de salud de diversa complejidad, distribuidos por el territorio nacional

En cuanto a la cobertura de seguro médico, el 12,5% cuenta con seguro social, y el 7,8% otro tipo de seguro, cuando que el restante 78% no posee ningún tipo de seguro.

La energía eléctrica, a través de las centrales hidroeléctricas binacionales de Itaipu y Yacyretá, junto con la producción agrícola y ganadera, altamente productivas y modernas, lideran las actividades económicas, tras representar más del 60% de todas las exportaciones paraguayas en el año 2015.

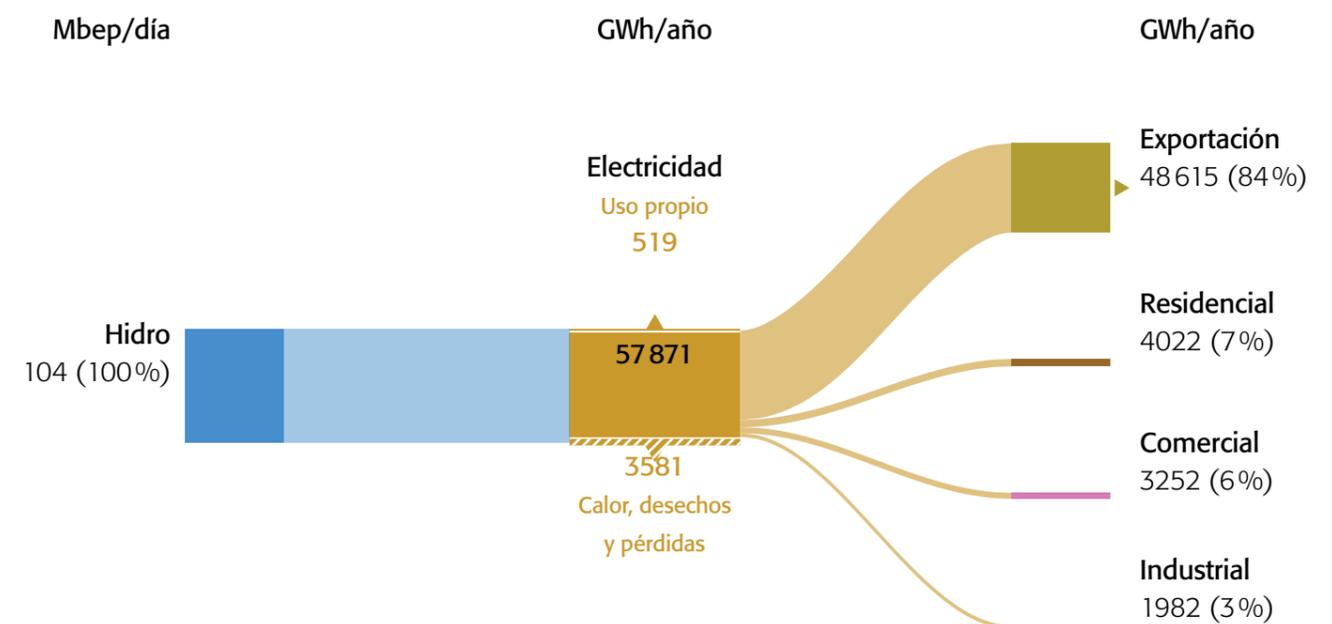
En cuanto a **consumo final de energía eléctrica**, como se mencionó en el apartado de panorama energético nacional, es exiguo comparado con otras fuentes energéticas. Además aproximadamente el 87% es exportada y el resto se utiliza a nivel residencial (7%), comercial (6%) y escasamente en la industria (3%).¹⁰

La energía eléctrica es transmitida y distribuida por la ANDE mediante una red denominada Sistema Interconectado Nacional (SIN). El mismo se divide por conveniencia operativa en dos subsistemas no sincronizados; por un lado, el Subsistema 1, cuya fuente de suministro principal es la Central Hidroeléctrica Itaipu, y abastece gran parte de la Región Oriental y el total de la Región Occidental; por otro lado, el

Subsistema 2, cuya fuente de alimentación principal es la Central Hidroeléctrica Yacyretá, y abastece la parte del sur/suroeste de la Región Oriental. Cabe destacar, que la demanda de energía en la Región Occidental representa aproximadamente 1% del total nacional. Justamente, esta región ha tenido un crecimiento económico y social muy acelerado en los últimos años, sin embargo, la infraestructura eléctrica no acompaña dicho crecimiento. Mientras que más del 50% de la demanda está concentrada en Asunción y el área metropolitana.

Además, según la ANDE, en el año 2015, las pérdidas totales en la distribución y transmisión representan casi un 25,3% del total producido.

Matriz de electricidad del Paraguay (2013). Usos finales de la energía eléctrica

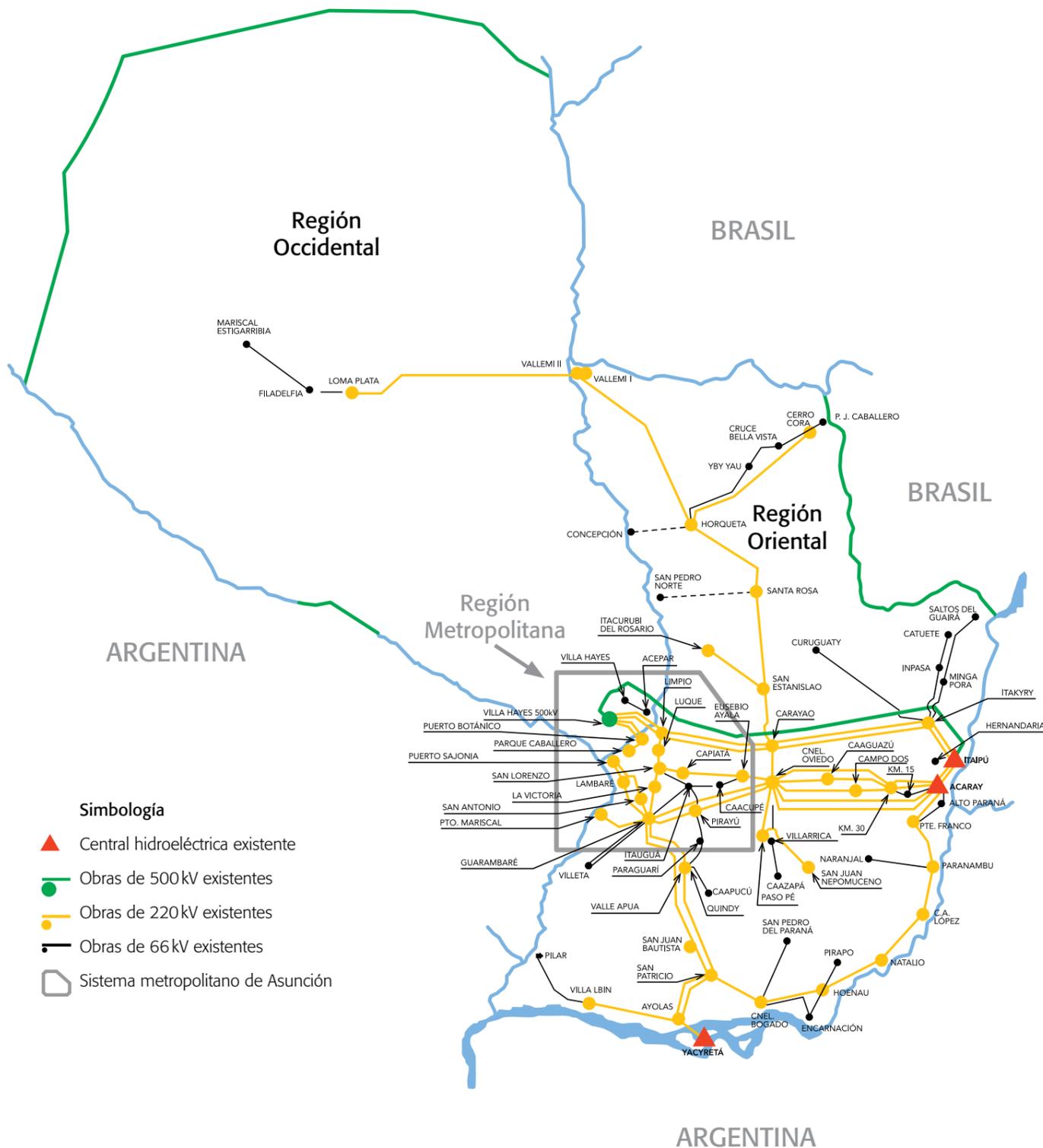


Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo. <http://www.iadb.org/en/topics/energy/energy-database>

¹⁰ Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Desarrollo Sostenible. Disponible online en: <http://www.iadb.org/en/topics/energy/ener-gy-database/energy-database,19144.html>

2.2. Clima y geografía

BOLIVIA



Los aspectos climáticos y topográficos

El clima del Paraguay presenta una gran variabilidad, el noroeste del Chaco es del tipo semiárido, tornándose subhúmedo y megatermal en la cuenca del río Paraguay y noroeste de la región Oriental, y húmedo mesotermal en el resto de dicha región, con índices máximos de humedad en los departamentos de Alto Paraná, Itapúa y Canindeyú.

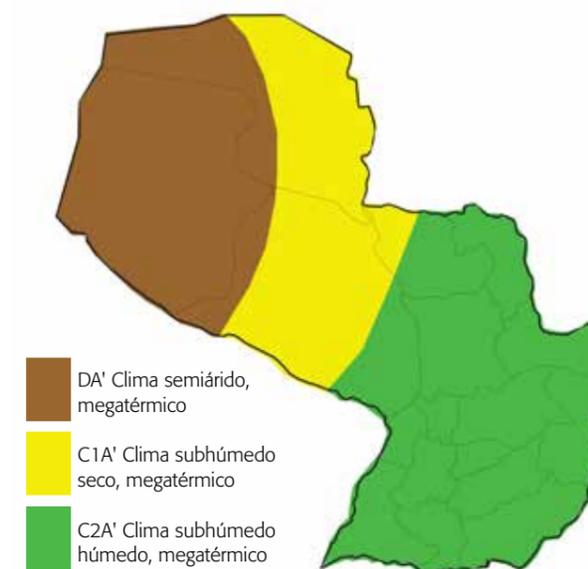
A pesar que Paraguay posee una extensión territorial pequeña y una topografía homogénea, se observan variaciones espaciales y temporales de la temperatura.

La temperatura media anual oscila entre 21°C en el sureste de la región Oriental a más de 25°C en el norte del Chaco. La sequía y las inundaciones forman parte

del escenario climático del Paraguay; el verano es largo, caluroso y húmedo, mientras que el invierno es breve, suave y seco, aunque suelen registrarse frecuentes heladas entre los meses de junio a agosto.

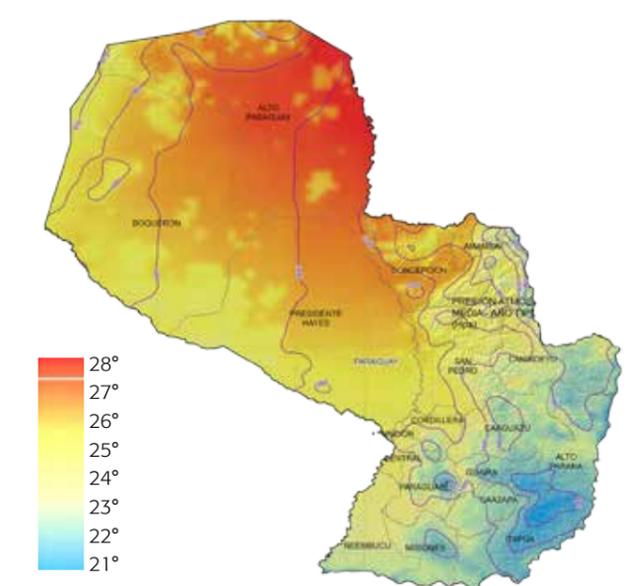
Por su situación geográfica, el Paraguay se encuentra ubicado en el borde Occidental del anticiclón subtropical del atlántico y este sistema de presión es en gran medida el responsable del transporte de aire cálido y húmedo desde el océano Atlántico tropical, pasando por el pantanal del Mato Grosso, hacia el Paraguay. Por consiguiente, el régimen de viento dominante es del cuadrante nordeste, siendo frecuentemente perturbado por vientos del sur producto de la incursión de frentes fríos procedentes del extremo austral de Sudamérica. Estos frentes fríos de origen polar, irrumpen con frecuencia durante el invierno.

Clasificación climática del Paraguay según Thornthwaite



Fuente: DMH - DINAC

Mapa de temperatura media anual (año tipo)



Fuente: PTI-PY – Realizado en función a modelación meteorológica de meso-escala WRF-ARW, en el marco del Proyecto PESE-PY

2.3. Trabajos anteriores

En el país se han realizado trabajos relacionados al área de estimación del potencial energético solar y eólico, entre los cuales se destacan los siguientes:

■ Estimación de la distribución de la radiación solar global en la República del Paraguay.

Fuente: Grossi Gallegos, H., Castell, M., García, M., y Atienza, G. (1994). *Estimación de la distribución de la radiación solar global en la República del Paraguay*. Asunción.

■ Distribución de la energía media anual del viento (kWh/m²)

Fuente: Brizuela, A; Báez, J; Castillo, A; Pérez, A; Castell, M; Enciso, E. (1999). *El Recurso Eólico en Paraguay*

■ Distribución espacial de la energía solar en kWh/m² día para varias localidades del Paraguay

Fuente: Realizado por el PNUD/GEF/GVME (2002)

■ Velocidad y frecuencia del viento en el Paraguay

Fuente: Proyecto ERERD, Viceministerio de Minas y Energía (2002)

■ Potencial de energía eólica y solar en el Chaco Paraguayo

Fuente: Báez, J. (2011) *Evaluación del potencial de energía eólica y solar en el Chaco Paraguayo*.

■ Estudio de radiación solar promedio por año

Fuente: Realizado por el Viceministerio de Minas y Energía con la Cooperación Alemana y el CIN (2013)

■ Estudio de velocidad del viento a 10 metros de altura, promedio anual

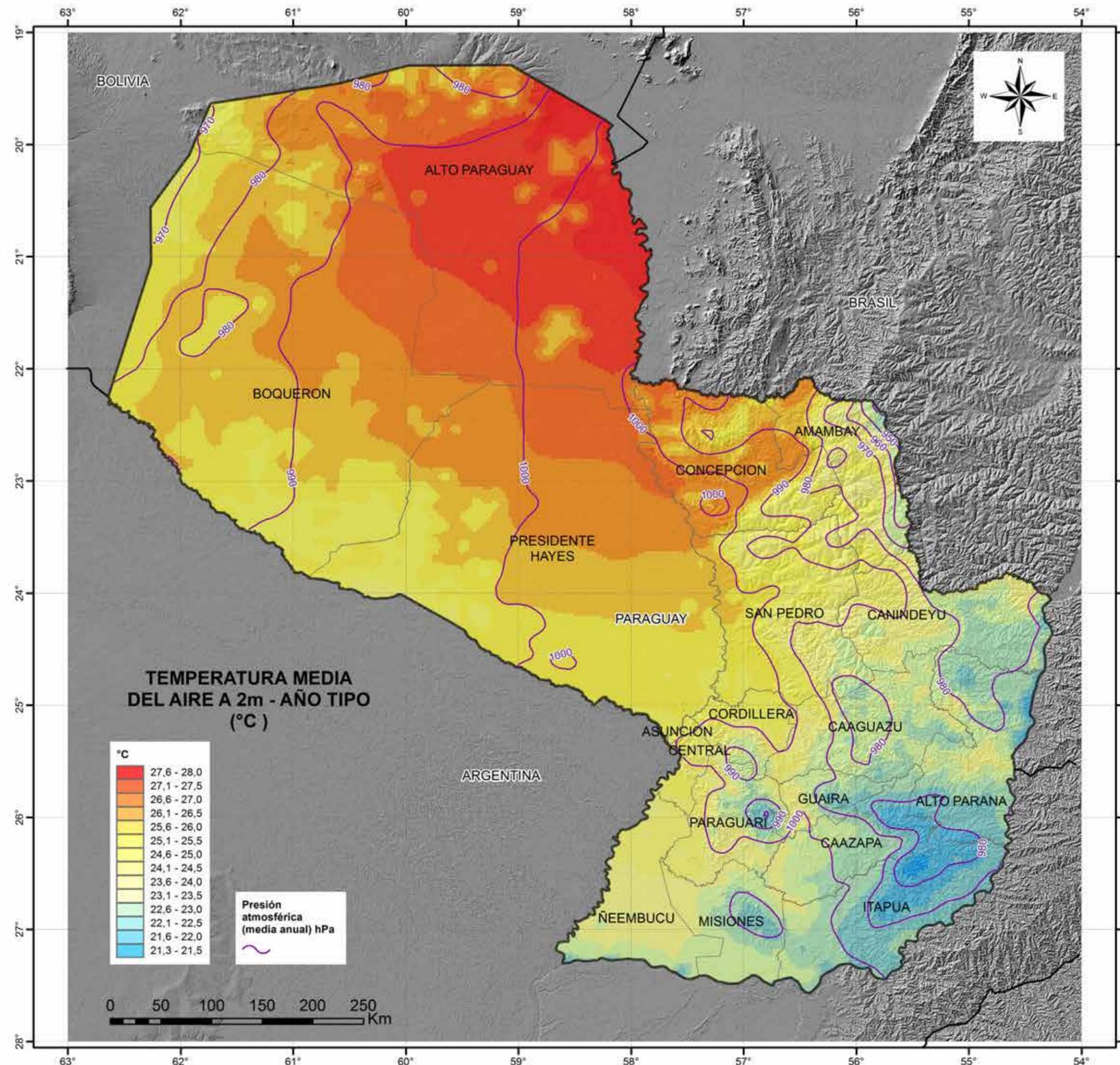
Fuente: Realizado por el Viceministerio de Minas y Energía con la Cooperación Alemana y el CIN (2013)

■ Mapeo del potencial energético solar y eólico del Paraguay y de sus recursos hidroenergéticos en cuencas de la región Oriental

Fuente: Gill, L. y Báez, J. (2013). *Mapeo del Potencial*

Energético Solar y Eólico del Paraguay y de sus recursos hidroenergéticos en cuencas de la región Oriental. Carrera de Ingeniería Ambiental. Universidad Católica Ntra. Sra. de la Asunción, Paraguay.

Por otra parte, los trabajos realizados para conocer las distribuciones de energía solar y eólica ya llevan más de una década y no han sido actualizados. Pero estos trabajos anteriores permitieron realizar un análisis de los potenciales existentes en el Paraguay y se obtuvo una noción básica de las zonas con mayor influencia de las variables mencionadas, lo cual sirvió de insumo para establecer los sitios de interés para la instalación de nuevas estaciones meteorológicas en puntos donde aún no se contaba.



Proyecto: POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR Y EÓLICO DEL PARAGUAY (PESE_PY)

Convenio ITAIPU - PTI-PY n°: 4500031993/2014

TEMPERATURA MEDIA DEL AIRE A 2m - AÑO TIPO (°C)

Datos de TEMPERATURA DEL AIRE a 2m, del modelo meso-escalar

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

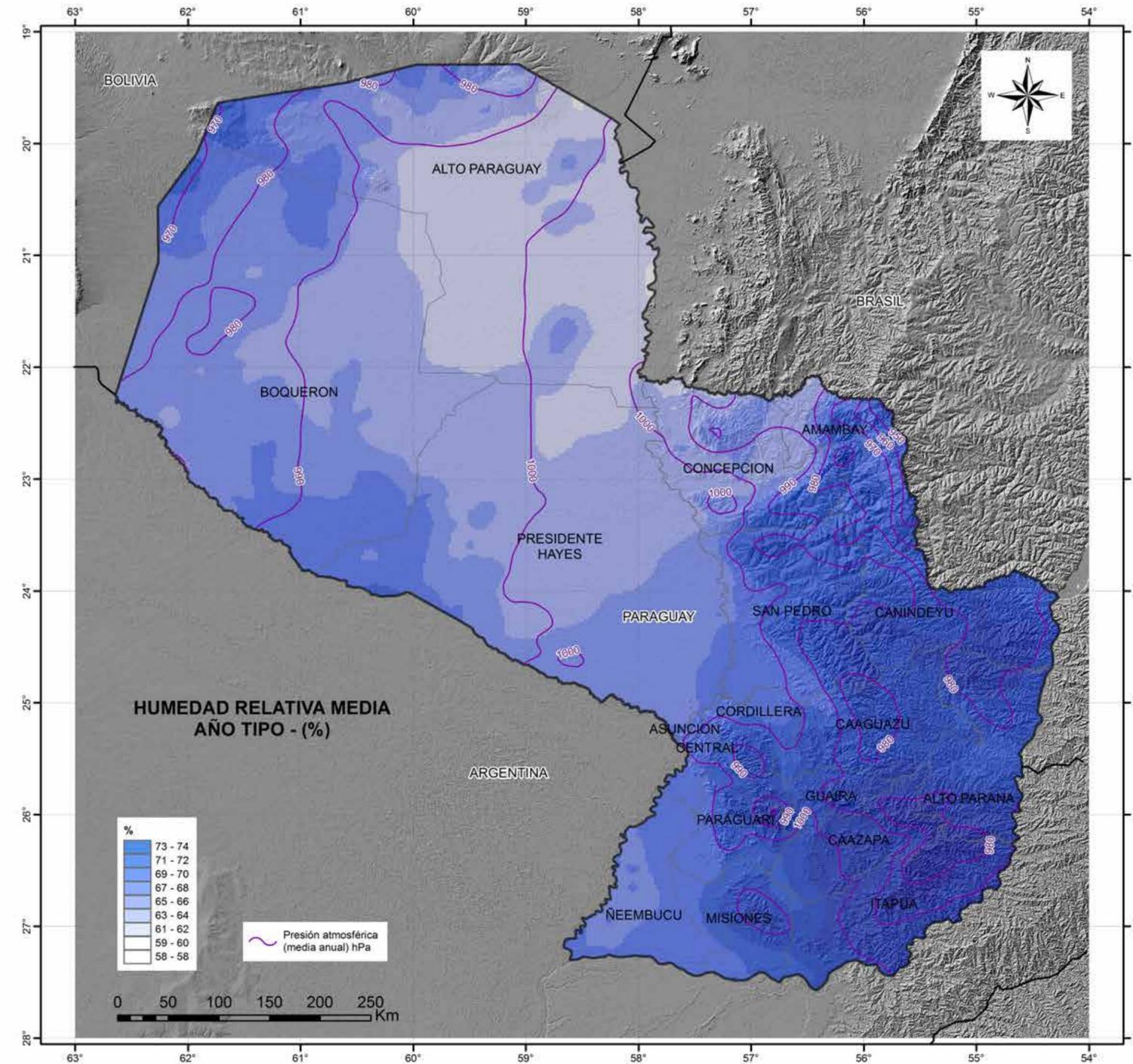
Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016

HUMEDAD RELATIVA MEDIA AÑO TIPO - (%)

Datos de HUMEDAD RELATIVA MEDIA, del modelo meso-escalar

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016



HUMEDAD RELATIVA MEDIA AÑO TIPO - (%)

%
73 - 74
71 - 72
69 - 70
67 - 68
65 - 66
63 - 64
61 - 62
59 - 60
58 - 58

Presión atmosférica (media anual) hPa

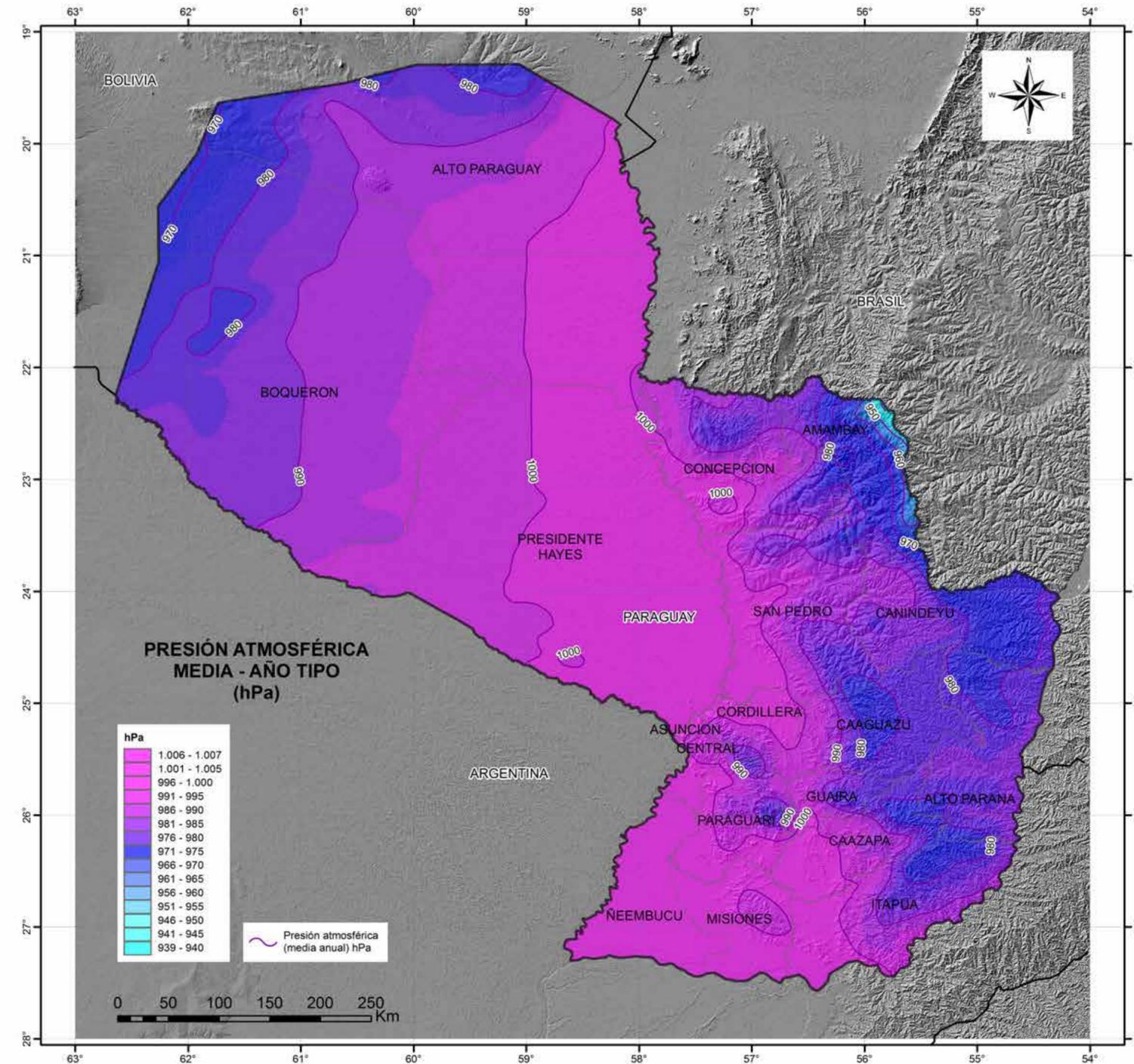
0 50 100 150 200 250 Km

PRESIÓN ATMOSFÉRICA MEDIA - AÑO TIPO (hPa)

Datos de PRESIÓN ATMOSFÉRICA MEDIA, del modelo meso-escalar

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016



PRESIÓN ATMOSFÉRICA MEDIA - AÑO TIPO (hPa)

hPa
1.006 - 1.007
1.001 - 1.005
996 - 1.000
991 - 995
986 - 990
981 - 985
976 - 980
971 - 975
966 - 970
961 - 965
956 - 960
951 - 955
946 - 950
941 - 945
939 - 940

Presión atmosférica (media anual) hPa

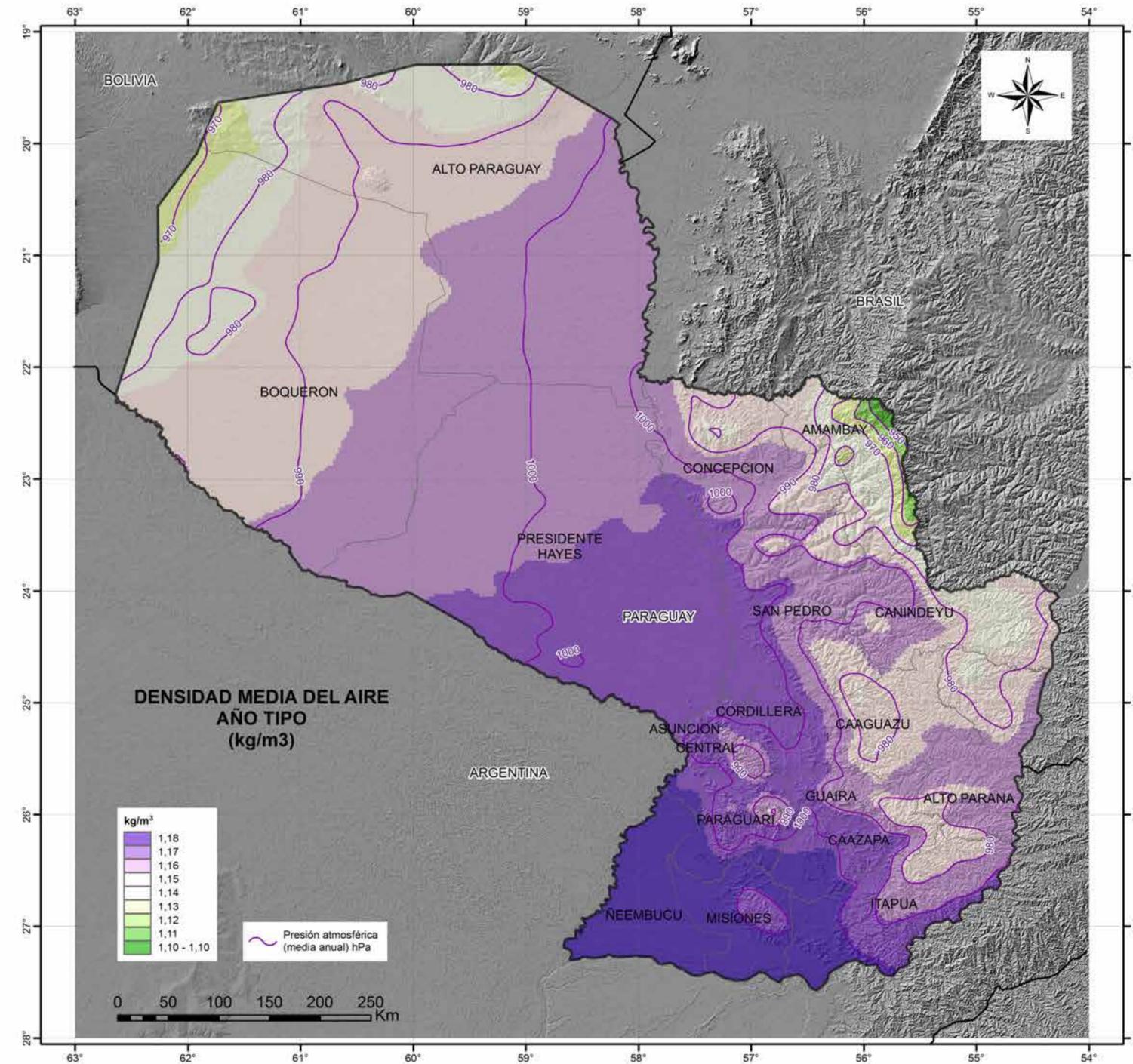
0 50 100 150 200 250 Km

DENSIDAD MEDIA DEL AIRE AÑO TIPO (kg/m³)

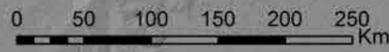
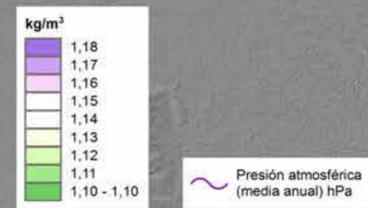
Datos de DENSIDAD MEDIA DEL AIRE, del modelo meso-escalar

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016



DENSIDAD MEDIA DEL AIRE AÑO TIPO (kg/m³)



3.Red de estaciones de medición energética



En el marco del proyecto fueron adquiridas e instaladas 10 (diez) estaciones meteorológicas automáticas, de alta precisión, estratégicamente distribuidas en el territorio nacional, con el fin de integrarlas a la red de estaciones existentes, como así también validar los resultados obtenidos en el presente estudio.

Dichas estaciones se encuentran en pleno funcionamiento y transmitiendo desde las localidades de: Mayor Pablo Lagerenza, Mayor Infante Rivarola, Puerto Casado, 15 de Agosto, Loma Plata, Pedro Juan Caballero, Paraguari, Villarrica, Caazapá y Pilar. Cabe destacar, que en el caso de los sensores eólicos, los mismos se encuentran ubicados a alturas de entre 50 y 80 metros, lo cual posiciona al Paraguay a la vanguardia en este tipo de estudios a nivel regional.

Primeramente, se establecieron los criterios de calidad de los sensores a adquirir, específicamente los piranómetros, anemómetros y veletas, mediante la elaboración de las especificaciones técnicas.

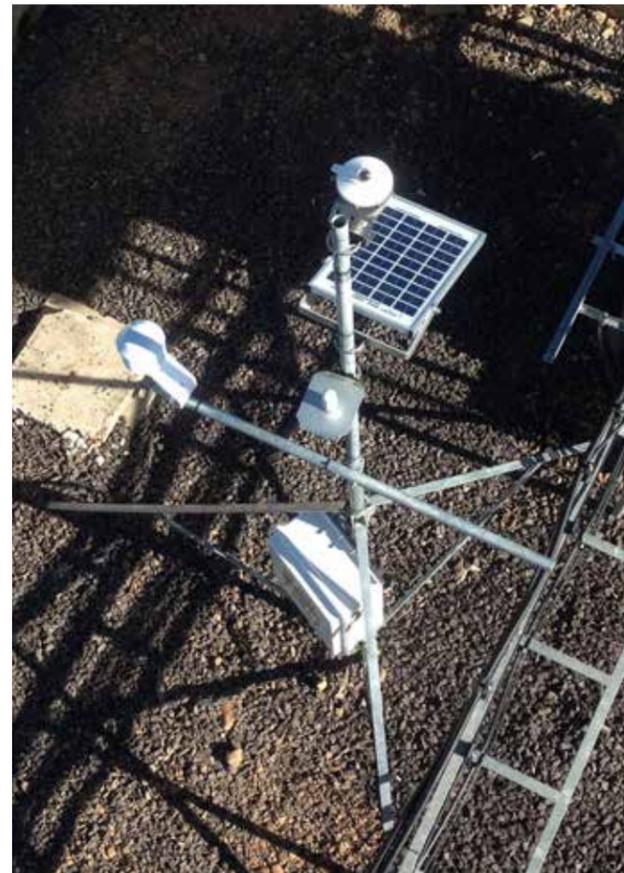
En este sentido, el PTI-PY firmó un convenio específico con la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC), que a través de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) aportó el conocimiento técnico y la experiencia necesaria para la incorporación de estas estaciones

Verificación de Piranómetros en el INTN



Fuente: Acervo PTI-PY

Estación meteorológica



Fuente: PTI-PY. Proyecto PESE-PY

meteorológicas, de manera a que las mismas cumplan con los criterios internacionales de medición energética, principalmente la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos-OMM-N8 y la norma IEC61400-12-1.

El convenio con la DINAC significó también un aporte significativo para el fortalecimiento de las capacidades técnicas en la gestión de datos provenientes de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país.

Por otro lado, de manera a validar la precisión y calibración de dichos sensores se firmó un acuerdo con el Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN).

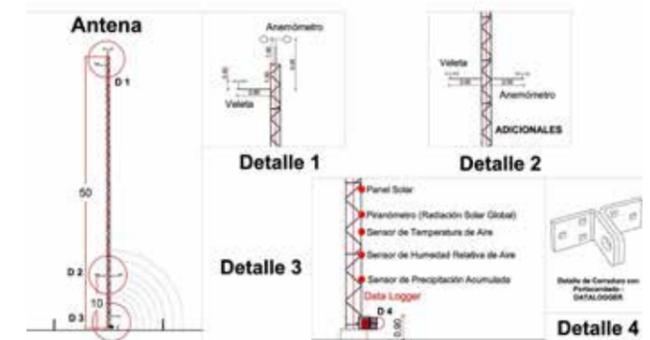
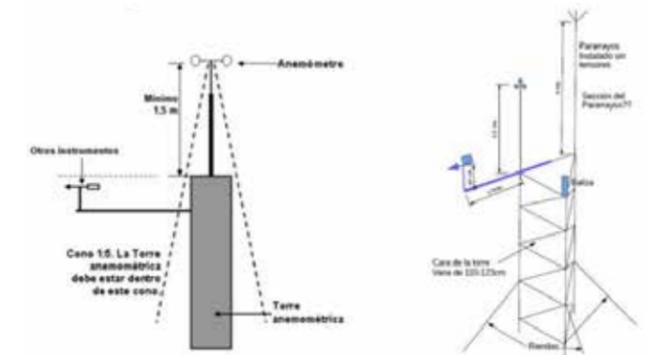
Los sensores eólicos se encuentran ubicados a alturas de entre 50 y 80 metros, lo cual posiciona al Paraguay a la vanguardia en este tipo de estudios a nivel regional.

Normas internacionales tenidas en cuenta para la adquisición e instalación de sensores eólicos y de radiación solar.

Guía de instrumentos y métodos de Observación Meteorológicos - Organización Meteorológica Mundial

International Standard - IEC 61400-12-1

Plano de instalación de antena y estación meteorológica para Mayor Pablo Lagerenza



Por último, y ante la intención de montar los sensores eólicos a una altura de medición superior a la comúnmente registrada (10m), se estableció un convenio de cooperación técnica con la empresa Núcleo S.A. (Personal), la cual permitió la utilización de sus antenas de transmisión para el montaje de sensores eólicos a alturas de entre 50 y 80 metros, como también la transmisión de la información medida a una central remota.

Una vez instaladas, las estaciones envían la información medida a un centro remoto, pudiendo ser visualizado en tiempo real mediante una plataforma web establecida para el efecto. Cada estación cuenta con diferentes sensores, un datalogger y un sistema autónomo de energía (fotovoltaica).

Sensores ubicados en altura



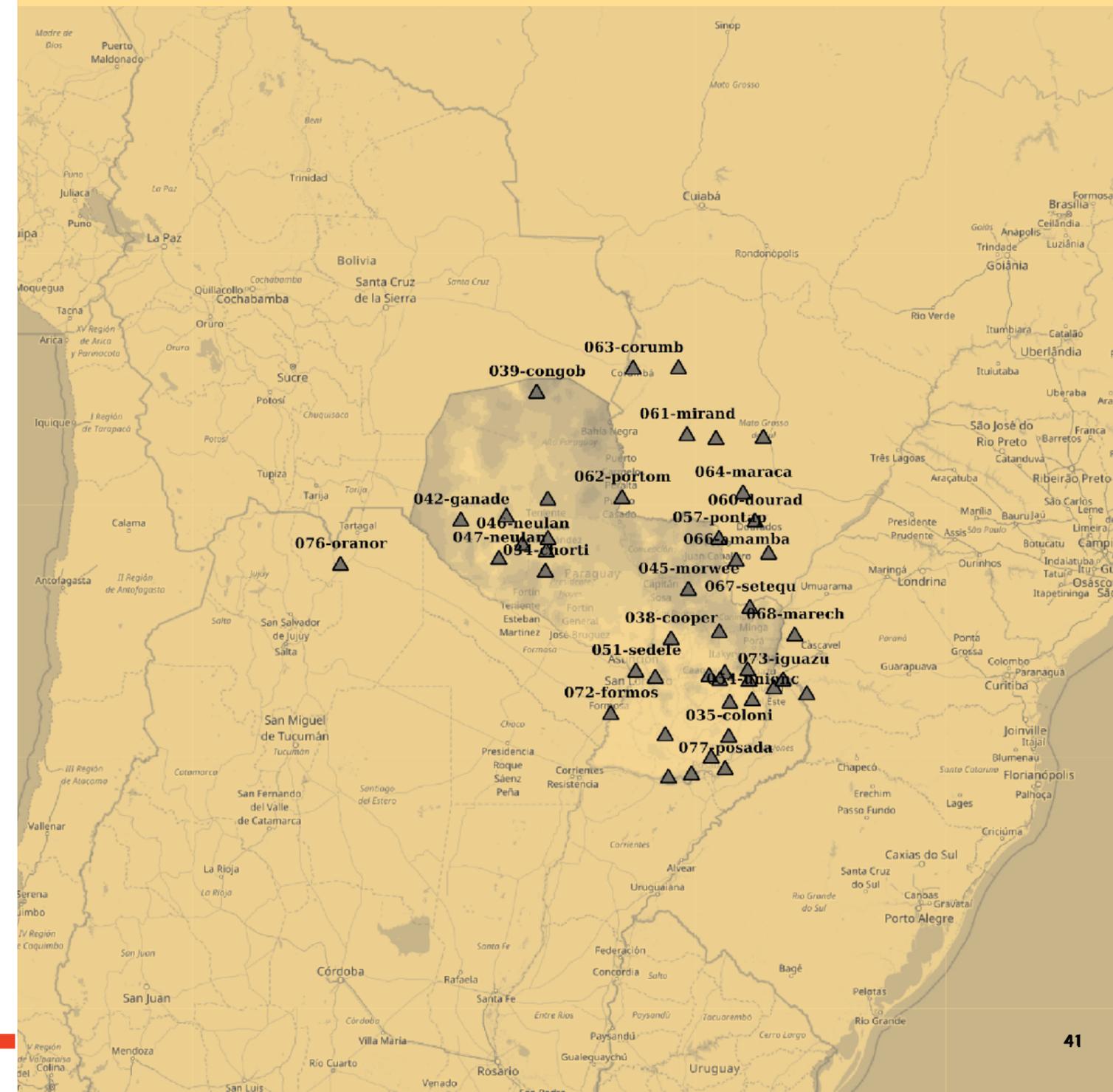
Fuente: Acervo PTI-PY

Antena de transmisión de la empresa Núcleo S.A. en la localidad de Mayor Infante Rivarola, Chaco Paraguayo



SENSOR	REQUERIMIENTOS GENERALES
Anemómetro (intensidad del viento)	<ul style="list-style-type: none"> a. Rango de medición: 1 a 50 m/s b. Precisión: $\pm 0,1$ m/s c. Condiciones de operación: -50 a +50 °C d. Generales <ul style="list-style-type: none"> d.1. Anemómetro de bobina fija d.2. Resistente a la humedad y altas temperaturas
Veleta (dirección del viento)	<ul style="list-style-type: none"> a. Rango de medición: 0 a 352 ° b. Precisión: $\pm 5^\circ$ c. Condiciones de operación: -50 a +50 °C d. Generales: <ul style="list-style-type: none"> d.3. Veleta con potenciómetro plástico de precisión d.4. Resistente a la humedad y altas temperaturas
Piranómetro (radiación solar)	<ul style="list-style-type: none"> a. Espectro de luz medible: 300 a 2800 nm b. Sensibilidad: 5 a 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ c. Error direccional (hasta 80 ° a 1000 W/m^2): +/- 2% d. Sensibilidad de dependencia a la temperatura: +/- 5% (-10 °C a +40 °C) e. Rango de temperatura de operación: -40 °C a +80 °C f. Irradiancia solar máxima: 2000 W/m^2
Temperatura y humedad relativa del aire	<p>Temperatura del aire:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Transductor o elemento sensible: Sensor de diferencia de banda de energía b. Rango de medición: - 40 a + 70 °C c. Resolución de salida: 0,01 °C d. Precisión: $\pm 0,3$ °C a 25 °C; $\pm 0,4$ °C entre +5 °C y +40 °C e. Constante de tiempo del sensor: < 120 s f. Tensión de alimentación: 7 a 18 VDC g. Corriente de alimentación: 120 μA en reposo; 1,7 mA en medición (para alimentación de 12 Vdc) h. Generales: <ul style="list-style-type: none"> a. Contenido en un abrigo meteorológico elaborado con materiales anticorrosivos (aluminio, policarbonato) que lo proteja de la radiación b. Ventilado naturalmente dentro de un abrigo para protección contra radiación solar <p>Humedad relativa del aire:</p> <ul style="list-style-type: none"> i. Transductor o elemento sensible: Elemento capacitivo j. Rango de medición: 0 a 100% HR k. Precisión: (a 25 °C) $\pm 2\%$ (entre el 10% al 90% del rango) l. Estabilidad: hasta 1% RH/año m. Constante de tiempo del sensor: < 20 s n. Resolución de salida: 0,03 % HR o. Generales: Contenido dentro del mismo abrigo del sensor para temperatura ambiente
Pluviómetro (precipitación acumulada)	<ul style="list-style-type: none"> a. Principio de funcionamiento: conteo de pulsos (tips) b. Boca colectora: 150 mm o mayor c. Resolución: 1 tip d. Precisión: 1% hasta 50 mm/hora e. Condiciones de operación: 0 a +50 °C f. Requerimientos generales: <ul style="list-style-type: none"> f.1. Tipo cubeta basculante f.2. Aluminio anodizado f.3. Resistente a la humedad y altas temperaturas
Barómetro (presión atmosférica)	<ul style="list-style-type: none"> a. Rango de medición: 600 a 1100 hPa b. Rango de operación: -40 a +60 °C c. Precisión: $\pm 0,5$ hPa a 20 °C; ± 1 hPa entre 0 y +40 °C d. Resolución: $\pm 0,01$ hPa e. Linealidad: $\pm 0,4$ hPa f. Tiempo de respuesta: < 100 ms g. Tensión de alimentación: 9,5 a 28 Vdc h. Corriente de alimentación: 1 μA en reposo; 3 mA en actividad

4. Metodología



El proceso metodológico fue desarrollado en varias etapas, a partir de la necesidad de contar con la cantidad y calidad de información necesaria como insumo para la determinación del potencial energético solar y eólico disponible en el Paraguay.

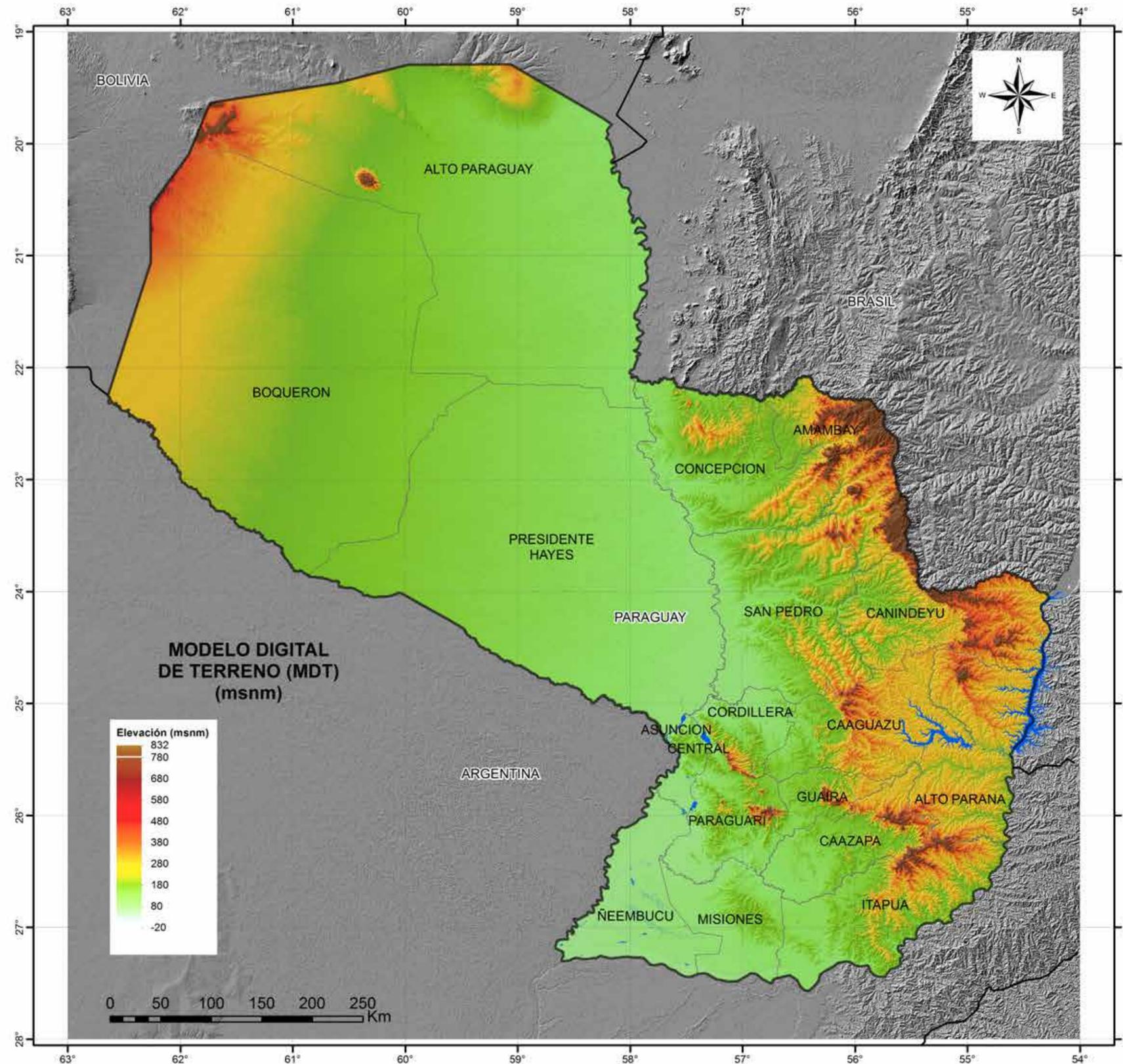
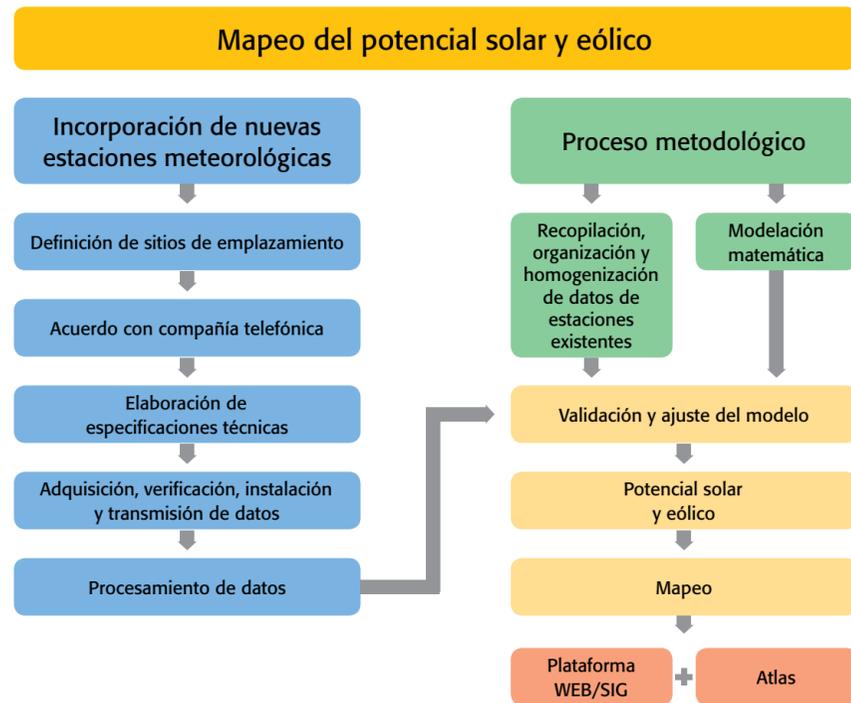
Luego del análisis de las condiciones climáticas y geográficas del país y los trabajos anteriores realizados en el área, se prosiguió a la obtención de un Modelo Digital de Terreno (MDT).

El MDT fue elaborado utilizando escenas de la misión Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) versión 3

(año 2015), de la NASA, de 30 m de tamaño de pixel (resolución espacial), para lo cual se elaboró un mosaico cubriendo todo el Paraguay.

A continuación, se exponen los principios básicos de los SIG, además se detalla el desarrollo metodológico del proyecto, que consta del proceso de obtención y procesamiento de datos de estaciones meteorológicas, la utilización de una modelación numérica de meso-escala, la validación del modelo, los métodos de determinación del potencial energético solar y eólico y el proceso de mapeo.

Esquema de trabajo. Proyecto PESE-PY



Proyecto: POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR Y EÓLICO DEL PARAGUAY (PESE_PY)

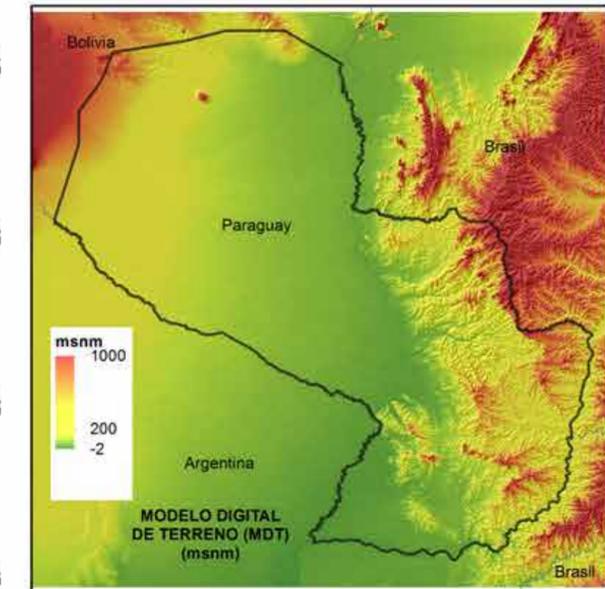
Convenio ITAIPU - PTI-PY n°: 4500031993/2014

MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

Modelo de Elevación de Terreno (MDT) procesado con datos del SRTM V3, de 30m de resolución espacial

Fuente:
1) NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Versión 3

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016

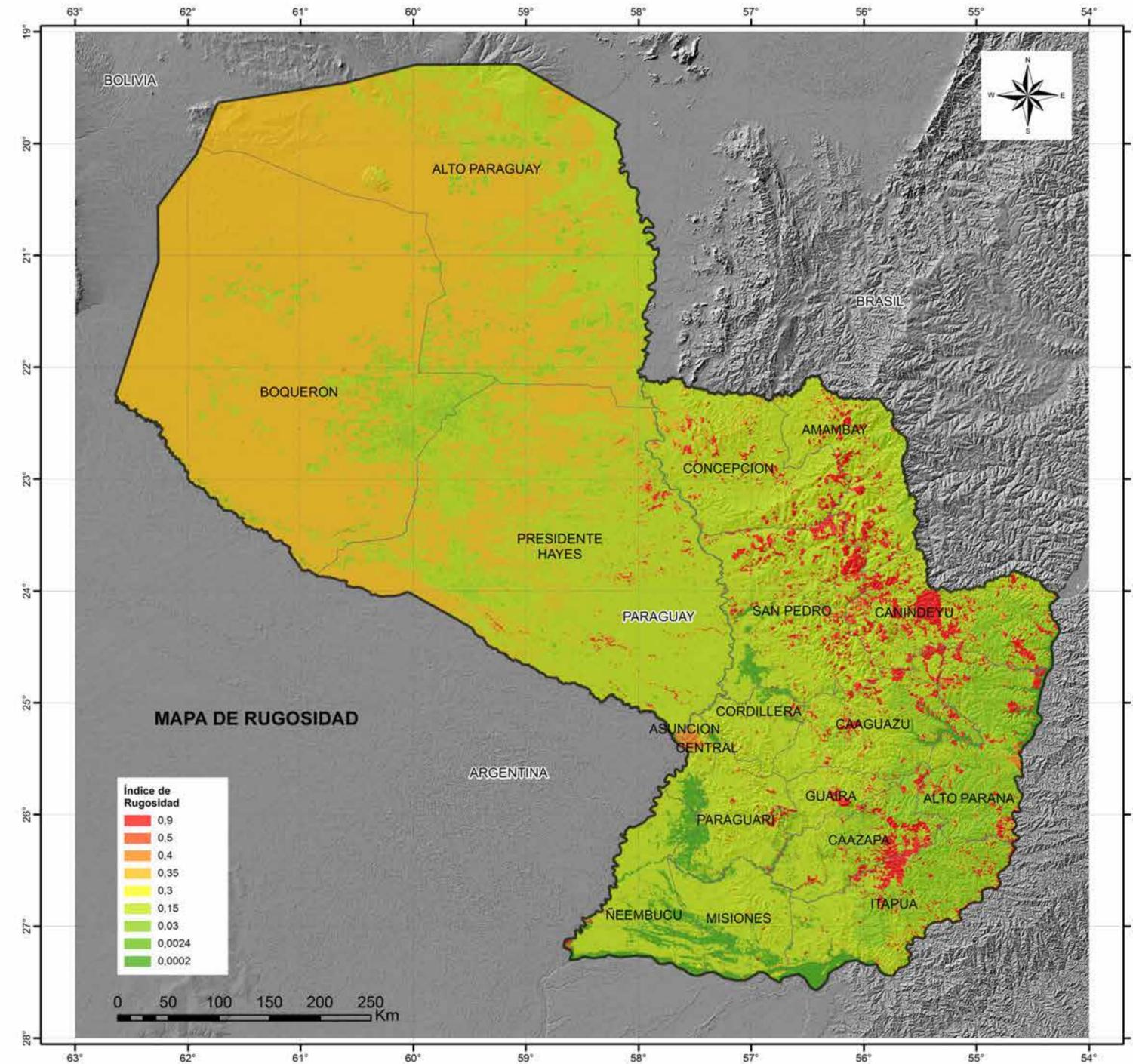


MAPA DE RUGOSIDAD

Mapa de rugosidad generado a partir de uso de la tierra y correspondiente índice de rugosidad.

Fuente:
1) Índice de Rugosidad: Proyecto SWERA
[http://en.openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_\(SWERA\)](http://en.openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA))
2) Uso de la tierra: USGS - 2001/2010

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016



4.1. Conceptos básicos y métodos

Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta fundamental a la hora de aprovechar los recursos energéticos de un área determinada, principalmente los de origen renovable disponible en un territorio, ya que permiten integrar todos los datos necesarios en una fuente de información geográfica.

SIG y sus aplicaciones en estudios energéticos

Un **Sistema de Información Geográfica** (SIG) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas, la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión. La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida, sencilla y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar nueva información que no podríamos obtener de otra forma.¹¹

Para este caso, los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta fundamental a la hora de aprovechar los recursos energéticos de un área determinada, principalmente los de origen renovable disponible en un territorio, ya que permiten integrar todos los datos necesarios en una fuente de información geográfica como, por ejemplo, una serie de mapas descriptivos. Para tal efecto, es necesario realizar la determinación espacio-temporal de los niveles del potencial energético, identificando para una región establecida, factores como la infraestructura disponible (vías de comunicación, centros poblacionales, etc.), el tipo y uso de suelo, entre otros.

Teniendo en cuenta lo mencionado y que las fuentes de energías renovables se encuentran dispersas a lo largo de los territorios, parece natural el uso de un sistema de información geográfica para el proyecto. Para determinar los niveles de potencialidad energética se requiere contar con ciertos datos medidos y procesarlos

¹¹ Sistema de Información Geográfica (2016). Disponible online en: <https://langluerben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/> (Consultado 26 de agosto 2016).

4.2. Desarrollo

Los Sistemas de Información Geográfica ofrecen sobradas herramientas para el procesamiento y análisis de datos; la visualización gráfica en forma de mapas temáticos permite la lectura ágil de situaciones, patrones, tendencias, que ayudan a los planificadores y gestores en la toma de decisiones.

de forma tal que se pueda representar los resultados obtenidos en un marco geográfico.

Para el estudio de diferentes tipos de energía renovables, los cuales están estrechamente vinculados a una elevada variabilidad asociada a fenómenos meteorológicos, tales como la precipitación, la velocidad y dirección del viento, la radiación solar, entre otros, lo ideal es disponer de una estación meteorológica en cada punto dentro de un área geográfica, que realice la medida de estas variables. Sin embargo, debido a razones primordialmente económicas existe una escasez en la disponibilidad de datos con suficiente cobertura del territorio.

Por lo tanto, la estimación de variables meteorológicas a nivel espacial se realiza mediante el uso de diferentes metodologías. Entre ellas se incluyen: la utilización de datos de estaciones cercanas (válida solamente para estaciones en terreno plano y con una separación menor a 10km entre ellas), la interpolación-extrapolación de series temporales de estaciones (entre 20-30km de distancia entre ellas), el uso de modelos de interpolación que tienen en cuenta la topografía (precisan una densidad del orden de 100km) y finalmente el uso de modelos de tratamiento de imágenes de satélites.

La interpolación de datos representa la metodología más ampliamente utilizada debido a su simplicidad. El objetivo de una interpolación espacial es crear una superficie que represente el fenómeno analizado de la mejor forma posible, a partir de un conjunto de valores conocidos. Existen diferentes métodos de interpolación y alguno de los más utilizados son el de Kriging, el de ponderación de distancias inversas (IDW: Inverse Distance Weighting) y el de splines.

Actualmente se utiliza frecuentemente la disciplina geomática para los estudios energéticos de todo tipo y en sus diversas etapas, tanto en la de generación de datos (como ser la captada por satélites u otro tipo de plataforma espacial, con sensores cada vez más especializados y por estaciones telemétricas asociadas a una coordenada geográfica) como en la de procesamiento de tales datos y la correspondiente divulgación.

Los Sistemas de Información Geográfica ofrecen sobradas herramientas para el procesamiento y análisis de datos; la visualización gráfica en forma de mapas temáticos permite la lectura ágil de situaciones, patrones, tendencias, que ayudan a los planificadores y gestores en la toma de decisiones.

4.2.1. Obtención y procesamiento de datos de estaciones

Se ha realizado un trabajo de identificación, recopilación, homogeneización y estudios de consistencia de datos históricos, provenientes de estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del país, considerando también las estaciones de países vecinos que estén próximas a nuestra frontera, totalizando unas 150 estaciones analizadas.

Entre las instituciones que han aportado datos meteorológicos se encuentran la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección Nacional de Aeropuertos Civiles (DINAC) de Paraguay, la base de datos de Agroclimate Fecoprod de la Federación de Cooperativas de Producción (FECOPROD LTDA), el Instituto Nacional de Meteorología (INMET) de Brasil y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina.

Estaciones Meteorológicas Analizadas



Fuente: DMH-DINAC, FECOPROD LTDA, INMET y SMN

Se han verificado diversos parámetros entre los registros meteorológicos de las estaciones analizadas, como la ubicación geográfica, la altura de los sensores, la tecnología empleada, el nivel de mantenimiento, los periodos y frecuencia de medición, el estado de las series (valores nulos, fuera de rango, etc.), el formato de archivo, el sistema de comunicación, las unidades de medida y por último, un análisis de consistencia de los datos medidos.

El procesamiento de los datos de estaciones ha comprendido básicamente las siguientes tareas:

- Depurado de archivos duplicados y archivos sin datos.
- Estandarización del formato de los archivos.
- Unificación de las unidades y la frecuencia de las variables medidas.

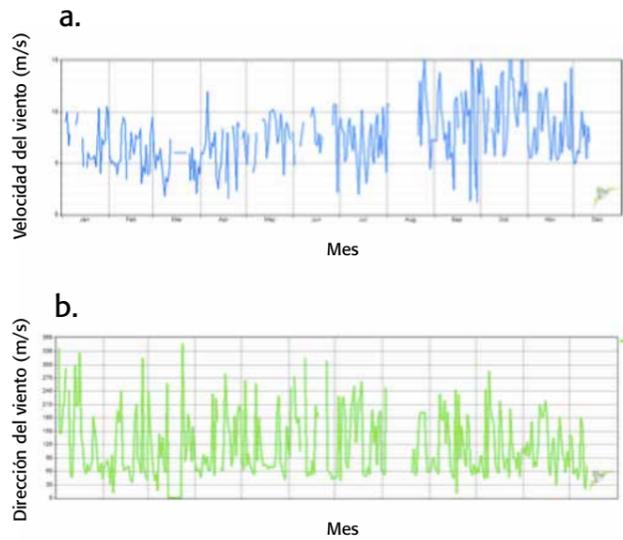
Finalmente, y luego de un proceso de selección, se realizó un tratamiento de control de datos de estaciones, el cual consiste en un proceso de evaluación de la evolución gráfica de las variables de viento y radiación solar.

Por una parte, la evolución de la velocidad y la dirección del viento son analizadas a partir de un criterio de coherencia temporal con el propósito de determinar continuidad en la medida y eliminar posibles errores de los sensores meteorológicos

La siguiente figura muestra la evolución gráfica anual de la velocidad y dirección del viento para una estación evaluada en el proceso de control de calidad. Se observa una favorable evolución de las variables a lo largo del año y con un rango de medida entre 0 y 15 m/s para velocidad y entre 0 y 360° para dirección.

Por otra parte, se comparó la evolución anual de la irradiación solar diaria de las estaciones con la curva de atenuación teórica extraterrestre. Dicha curva se obtiene

Evolución gráfica anual de a. Velocidad del viento y b. Dirección del viento para una estación evaluada en el proceso de control de calidad

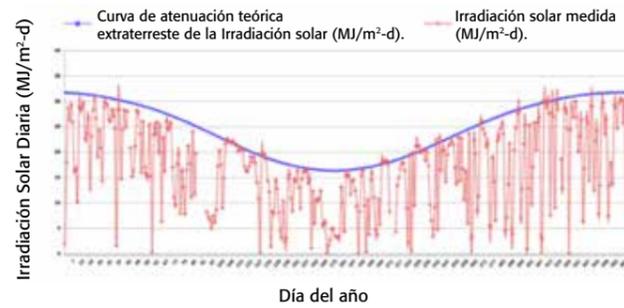


analíticamente a partir de ecuaciones del cálculo de la posición solar para una transmisividad atmosférica determinada a nivel del mar y bajo condiciones de cielo despejado para Paraguay. La transmisividad atmosférica depende de la presión atmosférica, espesor óptico, la elevación solar y la latitud que comprende el trópico de Capricornio a 23° 26' 14" Sur (-23,437222°).

A modo de ejemplo, en el siguiente gráfico se puede visualizar un comportamiento favorable de la irradiación a lo largo del año con valores próximos a la curva teórica y en un rango 0 a 30MJ/m².

En base a los criterios de selección, se obtuvieron 45 estaciones (ver apéndice 8.3: estaciones meteorológicas empleadas por el proyecto PESE-PY, página 108), que constituyen la base de datos con las observaciones para las variables de viento y radiación solar recopiladas en el marco del proyecto. Este resultado generó un registro histórico de datos

Evolución gráfica de la irradiación solar diaria con respecto a la curva de atenuación teórica extraterrestre



organizados y homogéneos, de manera tal que podrá ser la base para estandarizar futuros registros y sacar un mayor provecho de la información disponible.

Pese a que varias estaciones fueron descartadas, principalmente por presentar un bajo nivel de calidad de datos, varias otras sirvieron como insumo fundamental para contrastar sus resultados con los de la modelación meteorológica (modelo meso-escala). De igual manera, los datos obtenidos por dichas estaciones fueron claves para la metodología de determinación del potencial energético eólico.

4.2.2. Modelación numérica-Modelo de meso-escala WRF-ARW

En esta sección, se presenta la metodología empleada para llevar a cabo la modelación numérica, y en

particular, la descripción del modelo numérico de pronóstico meteorológico ejecutado en el marco de este proyecto.

Los modelos numéricos de pronóstico meteorológico son una representación computacional física y dinámica de la atmósfera y de la superficie terrestre, que plantean un conjunto de principios de conservación de la masa, del momento y de la energía que gobierna el movimiento del fluido atmosférico respecto a un sistema de coordenadas cartesianas discretas. Es decir, un modelo meteorológico numérico es una simplificación abstracta de la atmósfera real, la cual es válida para un cierto dominio y escala de tiempo, el cual se establece a través de una discretización numérica, que permite definir una malla tridimensional, que comprende la superficie topográfica y la capa atmosférica.

La formulación matemática de los modelos meteorológicos implica una considerable complejidad y tiempo de cálculo debido a la escala espacial y temporal empleada. Dichas ecuaciones describen el movimiento horizontal desde la escala sinóptica (escalas espaciales del orden de 1000km), hasta la escala de los torbellinos turbulentos más pequeños. Incluir este rango de escalas espaciales en una solución numérica, supera la capacidad de cálculo de los computadores convencionales, lo que obliga a elevados requerimientos de computación, que implica una significativa reducción en el tiempo de cálculo y un elevado conocimiento en el campo de las ciencias atmosféricas.

Los modelos de meso-escala son imprescindibles para la predicción dinámica de variables meteorológicas de alta resolución. Las aplicaciones de las salidas de estos modelos tienen un rango muy amplio de aplicaciones en diversos campos, siendo uno de ellos, la modelización numérica en ingeniería energética.

Por ejemplo, para estimar el flujo de la radiación solar en la superficie, los modelos utilizan parametrizaciones que simulan los procesos físicos en la atmósfera. Las parametrizaciones se basan en datos colectados en superficie o por medio de satélites.¹²

Simulación meteorológica para el mapeo

La modelación meteorológica realizada para este proyecto ha empleado el modelo Weather Research and Forecasting (WRF).¹³ El mismo, representa el desarrollo de un proyecto impulsado por el National Center of Atmospheric Research (NCAR) y el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) de Estados Unidos.

En la actualidad, este modelo incorpora los últimos avances en modelización meteorológica de meso-escala y es el modelo de referencia a nivel mundial, que se utiliza como herramienta de investigación y de predicción operacional del tiempo. El Advanced Research of Weather Research and Forecasting (WRF-ARW, v3.3), es el núcleo dinámico del modelo, seleccionado para las simulaciones de la radiación solar global y los campos de viento para Paraguay.

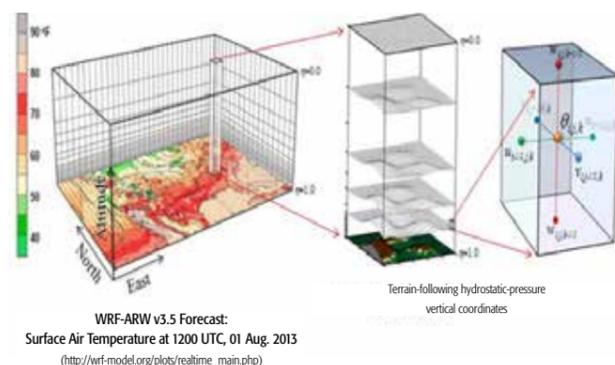
La configuración y aplicación de la modelación numérica del modelo se realizó en el Supercomputador Atlante del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), España, mediante la consultoría realizada por el Ph. D Ing. Angel Rincón, especialista contratado por el PTI-PY para este proyecto.

Para llevar a cabo el diagnóstico del potencial de energía eólica y solar en el territorio paraguayo, se estableció una modelización numérica del modelo WRF-ARW. Dicha metodología se fundamenta en el hecho que el cubrimiento espacio-temporal de las estaciones de medida del viento y el Sol, no cubren de manera representativa el territorio paraguayo.

¹² Pereira, E.B., et al. (2006). Atlas brasileiro de energia solar. INPE.

¹³ Skamarock, W., et al. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3: NCAR Technical Note TN-475+ STR. National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA.

Esquema de la discretización numérica espacial que realiza la simulación del modelo WRF-ARW en función de las capas verticales



Fuente: Skamarock, W., et al. (2008).

Por lo tanto, la aplicación de la metodología basada únicamente en la interpolación de observaciones provenientes de estaciones meteorológicas, afectaría la calidad de la información obtenida del proyecto. Cabe mencionar que en la publicación de Pérez, *et al.* (1997), se demuestra que cuando las distancias entre las estaciones de una red de estaciones son superiores a 45 km, los datos interpolados cuentan con un menor nivel de fiabilidad.

En síntesis, se obtuvieron estimaciones numéricas de variables meteorológicas del territorio de Paraguay, con una resolución espacial de 10 km x 10 km y una resolución temporal horaria a partir de un periodo de registro de 20 años (1994-2014), que permitió obtener un año meteorológico tipo.

El dominio de trabajo para la presente modelación se estableció a través de una discretización numérica espacial que define una malla tridimensional que

comprende la superficie topográfica y la capa atmosférica.

Por una parte, la discretización vertical se precisa mediante coordenadas que siguen el terreno en función de las distintas variaciones topográficas. Y por la otra parte, la discretización horizontal define las variables escalares en el centro de la celda (como por ejemplo temperatura, presión o humedad específica) y las variables vectoriales en las caras laterales de la celda (como las componentes horizontales del viento).

Previo a la ejecución de las simulaciones, se ha realizado una recopilación de información proveniente de datos meteorológicos de Reanalysis DS090.0 (NCEP/NCAR, 1994); ERA-Interim, procedentes del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts); además de los datos del MERRA de la Global Modeling and Assimilation Office, dependiente de la NASA.

Finalmente, se ejecutaron las simulaciones y se obtuvieron las siguientes variables meteorológicas para el dominio de Paraguay:

- **Velocidad máxima y media del viento** (m/s) a 10, 50 y 80 metros de altitud, en promedio anual, estacional y mensual.
- **Dirección del viento** (°) a 10, 50 y 80 metros de altitud.
- **Radiación solar máxima y media** (W/m²), en promedio anual, estacional y mensual.
- **Presión atmosférica mínima** (hPa), máxima y media.
- **Humedad relativa mínima** (%), máxima y media.
- **Densidad del aire mínima** (kg/m³), máxima y media.
- **Temperatura máxima y media del aire** (°C) a 2 m de altitud.

4.2.3. Validación de la modelización numérica del modelo

El principal objetivo de una validación numérica para un modelo de simulación meteorológica es analizar el comportamiento del modelo para detectar puntos fuertes y debilidades del mismo. Por tal motivo, la información proporcionada por la validación permite analizar la capacidad de simulación del modelo para variables meteorológicas y evidenciar limitaciones sobre el área geográfica de Paraguay. A través de dicha validación, se detectan posibles discrepancias con los datos simulados, se estudian sus causas y se identifican áreas de mejora o problemas asociados a los mismos. En consecuencia, a través de la validación se identifican las características de la modelización, con el fin de establecer futuras líneas de mejora y evaluación de los recursos energéticos renovables en Paraguay.

En la actualidad, la gran mayoría de estudios científicos que implementan protocolos de validación de modelos numéricos de simulación, utilizan la evaluación de los resultados cuantitativos. En concreto, aquellos en donde se cuantifica el análisis, implementan el uso de estadísticos simples como el error cuadrático medio, el error absoluto medio o el sesgo (ver apéndice 8.3: validación de la modelación meteorológica, página 112).

Para nuestro caso, en donde se realiza la validación de las simulaciones del modelo WRF-ARW para estimar el potencial del recurso eólico y solar para el área geográfica de Paraguay, se utiliza el cálculo de estadísticos clásicos para variables continuas sobre las estaciones de la región del Chaco, región Central, Sureste, Este y Nordeste. Por lo tanto, en el Anexo 8.4 se describen detalladamente los parámetros estadísticos y la metodología de validación de la modelización numérica del modelo WRF-ARW. De igual manera, se incluyen los resultados, el análisis y la discusión de la validación, en donde en términos generales se concluye:

■ Los resultados de la validación anual del modelo WRF-ARW realizado en este estudio, demuestran una favorable capacidad en la reproducción de la velocidad y dirección del viento, y la radiación solar con niveles de incertidumbre que coinciden con los resultados de otros trabajos de investigación similares.

■ La validación anual de la velocidad y dirección del viento, simuladas a lo largo del año para las estaciones, establece valores aceptables de incertidumbre con errores medios de sesgo (Bias) de 0.9 m/s y -5.8°, respectivamente. El RMSE (*Root mean square error*) es igual a 1.7 m/s para la velocidad del viento.

■ La validación anual de la radiación solar muestra niveles bajos de incertidumbre con Bias inferiores al 5% a lo largo del año para todas las estaciones.

■ El cubrimiento espacial de las estaciones de medida utilizadas para la validación se considera insuficiente para evaluar la amplia variabilidad espacio-temporal y las fluctuaciones atmosféricas del viento y la radiación solar en Paraguay. Por lo tanto, aunque los resultados de la validación evidencian un grado de reproducción favorable del modelo, se sugiere realizar una actualización de dicha validación con las nuevas estaciones instaladas dentro del desarrollo del proyecto. La posterior validación que incluya el mejoramiento del cubrimiento espacial sobre la geografía del país y del cubrimiento temporal de como mínimo un año de mediciones, pretende contribuir en el desarrollo de un área de investigación que permita mejorar la evaluación a mediano y largo plazo del potencial del recurso eólico y solar del Paraguay.

A su vez, mediante un taller de trabajo realizado entre el equipo del proyecto PESE-PY y los expertos Dr. César Aguirre y Lic. Armando Brizuela, de la Facultad de Ciencias Agropecuarias –UNER– y CONICET –Entre Ríos, Argentina–, se pudo comprobar que tanto los datos de velocidad media anual del viento de la

simulación meteorológica para el mapeo solar y eólico del Paraguay-modelo de meso-escala WRF-ARW, como los provenientes de estaciones meteorológicas, a 10 metros, son análogos y presentan un patrón de distribución espacial similar en el territorio paraguayo.

4.2.4. Métodos de determinación del potencial energético

Determinación del potencial energético solar

Existen básicamente dos métodos de recopilación de datos para determinar el recurso energético solar de una región dada: a través de una red de sensores distribuidos en una región en conjunto con técnicas de interpolación de los datos colectados; o el uso de modelos computacionales para estimar la radiación solar incidente.

Como ya se ha descrito en el apartado anterior, en el presente proyecto se utilizó como información base datos de irradiación solar global generados a partir de un modelo de meso-escala. Dichos datos fueron contrastados y validados con mediciones realizadas a través de estaciones meteorológicas.

Con los datos disponibles, la determinación del potencial energético solar se obtuvo a partir de los siguientes criterios:

Un minuto de insolación es una medida de la energía recibida por un metro cuadrado durante un minuto, o lo que es lo mismo, 1 minuto de insolación = irradiación (W/m^2) x 60 segundos. El resultado se expresa en unidades de Joules por metro cuadrado (J/m^2), Watts-hora por metro cuadrado (Wh/m^2) o kilowatts-hora por metro cuadrado (kWh/m^2). Generalmente se reporta este valor como una acumulación de energía horaria, diaria, estacional o anual.

Importante: en cuanto a la conversión de unidades, la radiación solar medida habitualmente en las estaciones meteorológicas es ofrecida en unidades de potencia (W/m^2), valor medio diario.

Determinación del potencial energético eólico

Modelar el campo del viento en superficie es complejo, ya que este tiene variaciones temporales y espaciales, embebidas dentro de una dinámica de mayor escala. No obstante, una verificación del comportamiento de esta variable meteorológica está acompañada de las mediciones realizadas a través de anemómetros y veletas, instrumentación que hace parte de las estaciones meteorológicas, los cuales miden y grafican continuamente las características vectoriales del viento como son la dirección y la velocidad.¹⁴

Existen varios métodos para determinar el potencial energético eólico. La elección del método está sujeto a la disponibilidad de datos, y sobre todo, su distribución espacio-temporal.

A continuación, se detallan los métodos de determinación del potencial energético eólico aplicados.

Primeramente se realizó un análisis comparativo de distintas estrategias (modelación numérica meso-escalar y registros anemométricos históricos) para estimar el recurso eólico.

Luego, se realizó un contraste de valores obtenidos con el modelo meso-escala WRF-ARW y con las mediciones de las estaciones en el territorio paraguayo y países limítrofes. Los gráficos siguientes, muestran el ciclo horario para la velocidad del viento simulada y observada en un año, además de la evolución anual de la velocidad de viento diaria, que fueron simulados y recabados en la estación meteorológica de Foz de Iguazu A846-Paraná.

Se puso en evidencia la dependencia de la energía respecto del promedio de las velocidades al cubo y de la dificultad de contar con ese tipo de datos.

Como alternativa se aplicó la distribución de probabilidades de Weibull, usando la metodología de aproximación que propuso Justus (1977) y que posibilita estimar los parámetros "c" y "k" y con ellos el promedio mencionado.

Específicamente, se utilizaron los métodos WEI1 y WEI2-A para la determinación de los parámetros Weibull (ver detalle de ecuaciones en el Apéndice, apartado 8.2.3., página 106).

Finalmente, se obtuvieron valores de energía eólica disponible en Paraguay, a diferentes alturas, como se describe a continuación:

■ A 10 metros de altura con simulación de velocidad media usando el modelo WRF-ARW y el valor interpolado de varianza de estaciones (Método WEI1).

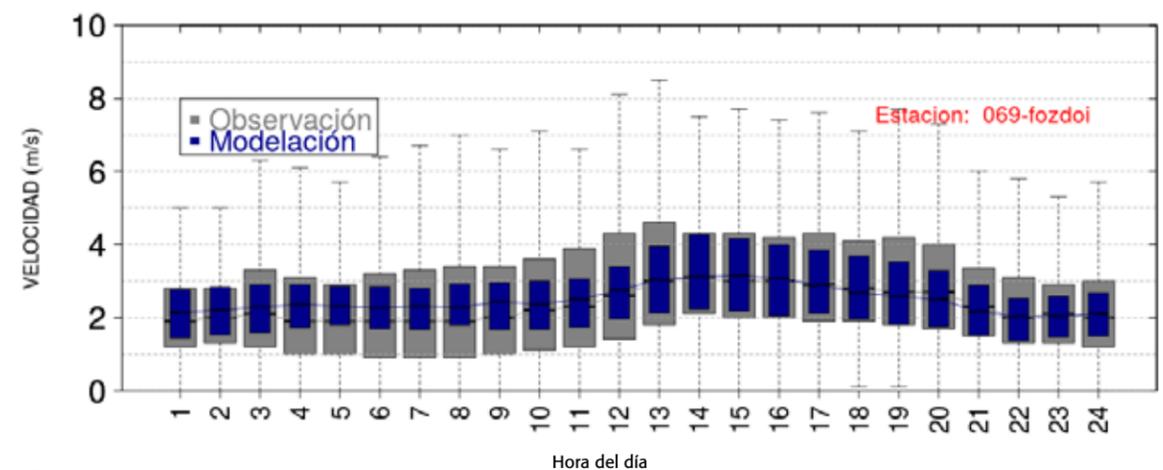
■ A 50 y a 80 metros de altura con simulación de velocidad media usando el modelo WRF-ARW y asumiendo varianza alta para estimar "c" y "k" de Weibull (Método WEI2-A).

4.2.2. Proceso de mapeo

Para el procesamiento de los datos que fueron utilizados para el mapeo se contó con cinco niveles de datos:

- Datos históricos procedentes de estudios anteriores.
- Datos de estaciones meteorológicas nacionales y de países limítrofes.
- Datos (iniciales) de la red de estaciones meteorológicas instaladas en el marco del proyecto PESE-PY.
- Datos de la simulación meteorológica para el mapeo solar y eólico de Paraguay (modelo numérico de meso-escala WRF-ARW).
- Datos complementarios o referenciales, como ser Modelo Digital de Terreno, Uso de la Tierra (para la

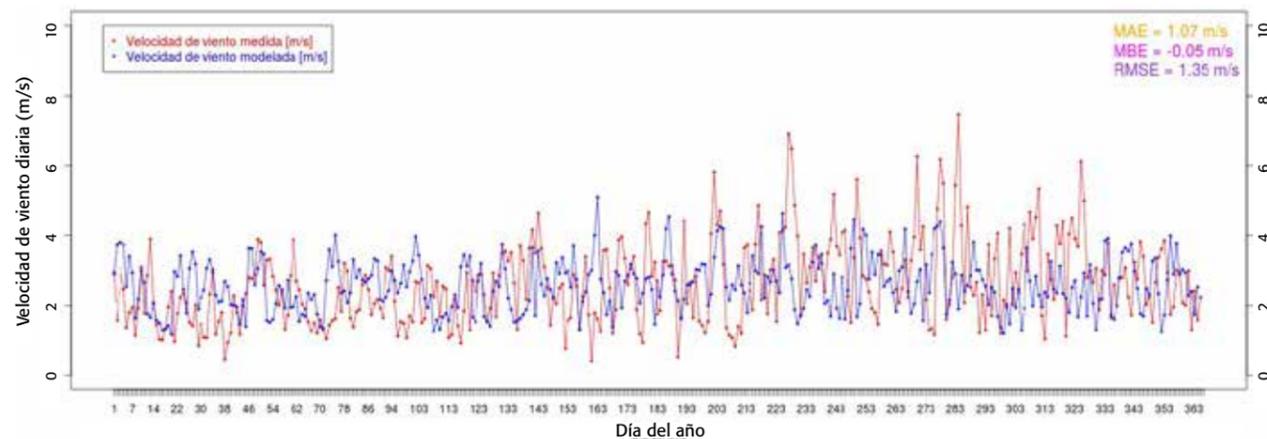
Ciclo horario para la velocidad del viento simulada y observada en un año. Estación Meteorológica Foz de Iguazú A846 - Paraná



Fuente: PTI-PY

¹⁴ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia (2006). Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia. Bogotá, Colombia.

Evolución anual de la velocidad de viento diaria simulada y observada en un año. Estación Meteorológica Foz de Iguazú A846 - Paraná



Fuente: PTI-PY

el cálculo de los coeficientes de rugosidad), Áreas protegidas, caminos, etc.

Los datos históricos fueron mapeados y se utilizaron para contrastar los resultados del presente estudio.

Los datos de estaciones meteorológicas fueron compilados, ordenados, procesados y filtrados, para luego ser mapeados. Los datos de las estaciones instaladas en el marco del proyecto fueron consultados como referencia circunstancial, ya que no se cuenta aún con series importantes para su utilización como fuente de datos.

Los datos de estaciones se mapearon a partir de tablas que se transformaron en capas de puntos georreferenciados y a partir de ello se aplicaron geoprocesos de interpolación.

Para el modelo meso-escala, se obtuvieron datos de la simulación meteorológica para el Paraguay

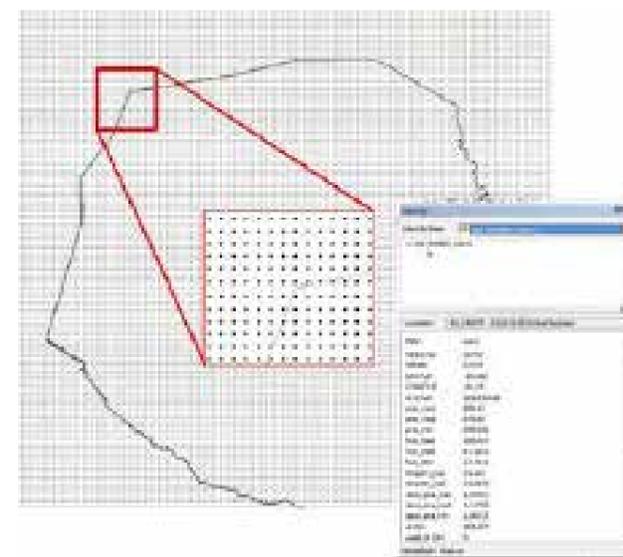
correspondiente a 20 años de registros, dichos datos, con formato de salida en formato texto, con los valores correspondientes para variables meteorológicas (ver apartado de Simulación meteorológica para el mapeo solar y eólico de Paraguay) una malla de puntos distribuida sobre el territorio paraguayo cada cinco kilómetros. Para el proceso de mapeo, el archivo texto fue convertido a tabla de base de datos, agregándose los campos con fórmulas para las operaciones de cálculo de energía (solar y eólica), posteriormente esta tabla fue exportada a una geodatabase utilizando el software ArcGIS®.

Como la tabla mencionada posee datos de coordenadas geográficas, utilizando geoprocesos, se transformó dicha tabla en una capa de puntos, con todos los valores de las variables asociadas a cada punto.

A partir de aquí, el procesamiento de dichos puntos se realizó por dos vías:

a. Utilizando geoprocesos de interpolación tipo spline se generaron capas de tipo raster para cada una de las variables y en algunos casos combinando las capas resultantes. Este procedimiento se utilizó tanto para las variables de entrada (velocidad de viento, densidad del aire, irradiación, etc.) como para las de resultados (energía solar acumulada anual, media estacional, etc.). Una limitación de las capas tipo raster es que solamente se puede asociar una variable a cada píxel (mínima expresión del raster). Para disminuir el efecto de "pixelado" de la imagen resultante de la interpolación, se utilizó un valor de píxel de 2,5 x 2,5 km. Cabe mencionar que la separación de los puntos, tanto en la dirección X como la Y no es constante, por lo que hubo que promediar el tamaño del píxel de salida. El proceso de interpolación fue diagramado y guardado como herramienta replicable, utilizando herramientas de ArcGIS®, con el objetivo de automatizar la actualización de los mapas constantemente (según período a establecer), según se ilustra en la siguiente figura.

Capa de puntos. Modelo mesoescalar



Fuente: PTI-PY

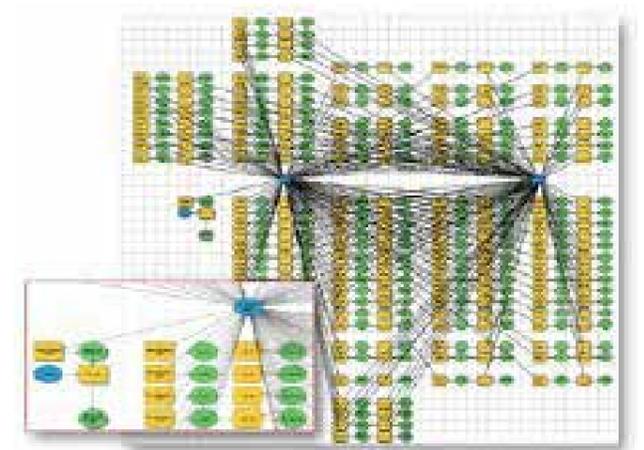
Las interpolaciones se generaron:

i. Para toda la capa de puntos (cubren el Paraguay y área circundante) con el objeto de conocer el comportamiento de las variables en el contexto inmediato y

ii. Dentro de los límites de Paraguay, de manera a conocer el comportamiento de las variables exclusivamente dentro del territorio paraguayo.

b. Por otra parte, la capa de puntos antes mencionada se procesó utilizando la herramienta polígonos Thiessen, con lo que se generó una capa de polígonos colindantes, donde cada uno de los polígonos "absorbe" los datos de todas las variables asociadas al punto y puede ser representada como raster, para cualquiera de las variables seleccionadas. La ventaja en este caso es que en una sola capa de datos (en formato geodatabase) se dispone de la tabla asociada con todas las variables relacionadas a cada polígono.

Diagrama de la generación automatizada de las interpolaciones por variable (model builder de ArcGIS®)



Fuente: PTI-PY

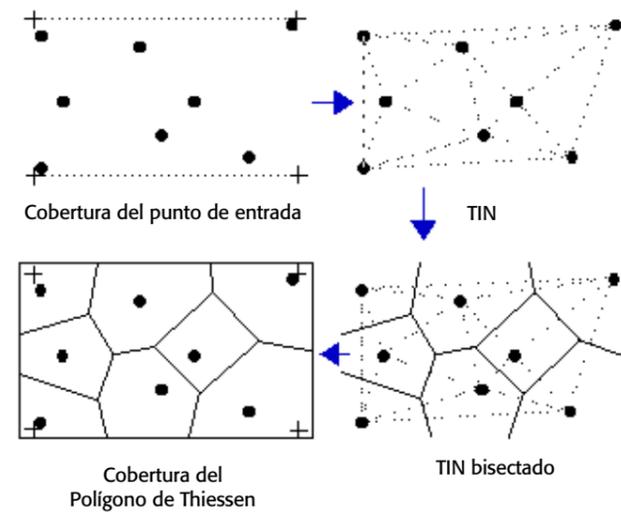
El tamaño del polígono resultante es proporcional a la separación X-Y entre puntos. En la figura siguiente se presenta un diagrama del concepto de polígonos Thiessen y una imagen de la capa polígono resultante para el estudio (que en este caso, como la separación X-Y de los puntos es casi uniforme, los polígonos de salida son casi cuadrados).

Finalmente se probaron los resultados utilizando herramientas SIG de análisis espacial, del tipo álgebra de capas raster.

Los mapas resultantes de interpolación se utilizaron para confeccionar los mapas del Atlas (por su mejor apariencia) y la capa de polígonos Thiessen se utiliza como fuente en la plataforma web.

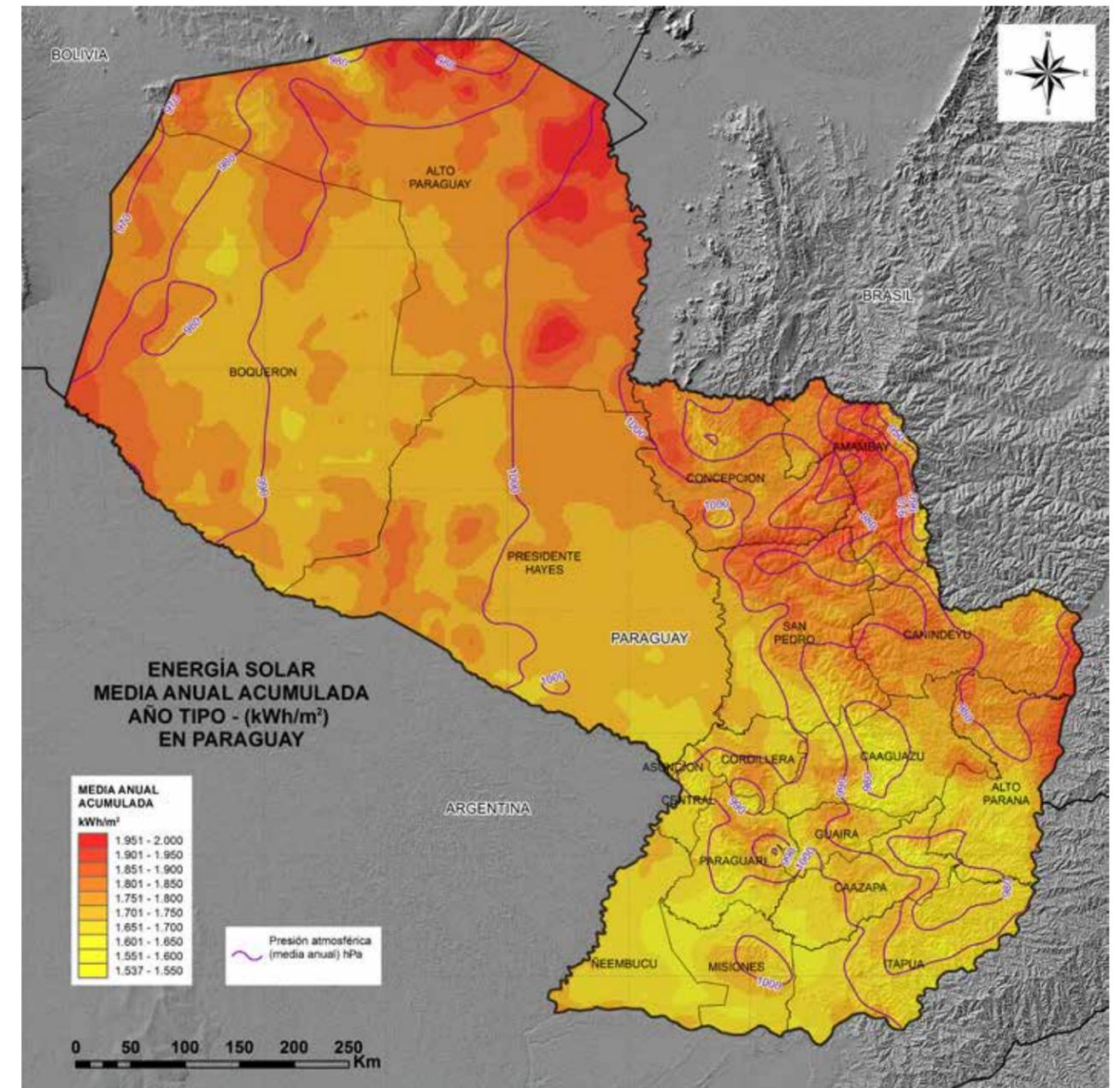
Como resultado de la interpolación realizada, se obtuvo el siguiente mapa descriptivo, donde se puede observar la estimación de energía solar media acumulada a nivel país.

Proceso Thiessen



Fuente: PTI-PY

Interpolación de los datos para el territorio paraguayo

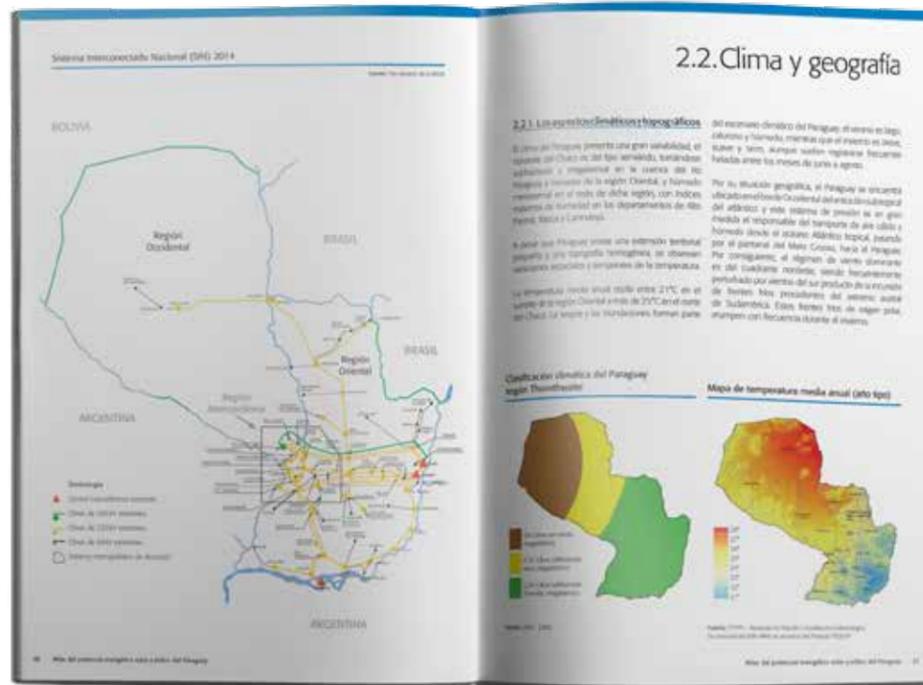


Fuente: PTI-PY

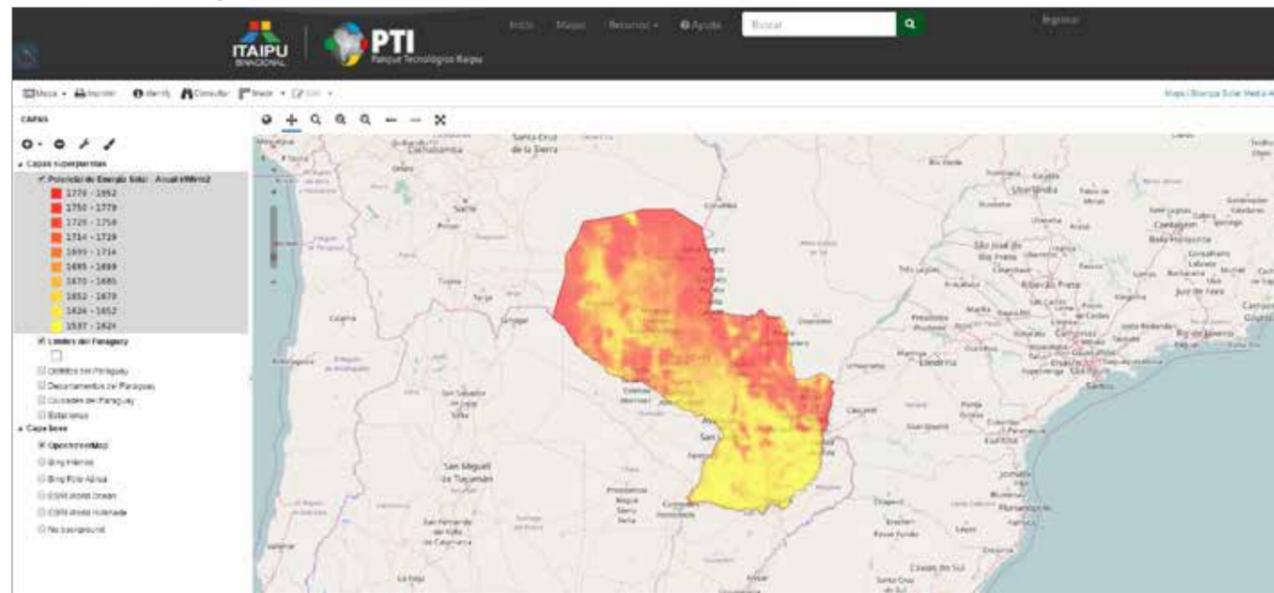
4.3. Presentación de resultados

Una vez aplicada la metodología propuesta, los resultados del proyecto se presentan en formato de atlas impreso, además, se presenta a través de una plataforma web/SIG donde pueden ser visualizados de manera dinámica, los mapas del Paraguay que

reflejan el potencial energético (solar y eólico), así como también acceder a informaciones relevantes acerca de los antecedentes, base de datos de las variables y el desarrollo del proyecto.



www.pese.pti.org.py



5. Potencial energético solar



5.1. Principios de la energía solar

La energía solar es una fuente de energía renovable, que se encuentra en auge en los últimos años por tratarse de un recurso inagotable y respetuoso con el medio ambiente.

Es sabido que prácticamente la totalidad de las fuentes de energía disponibles, a excepción de la energía nuclear, la geotérmica y la energía derivada de las mareas oceánicas, provienen del Sol.

Debido a la influencia del Sol sobre nuestro planeta y gracias a los fenómenos climatológicos, los saltos hidráulicos o el viento permiten la producción de energía. Por otro lado, las fuentes denominadas convencionales de energía como el petróleo, el gas natural, la biomasa y los biocombustibles tienen su origen, aunque parezca lejano, en energía proveniente del astro rey.

Adicionalmente, es importante destacar que no toda la energía emitida por el Sol es aprovechable a nivel terrestre, aunque la irradiación solar captada por nuestro planeta es uno de los parámetros principales que gobiernan el balance energético de la Tierra. En ese sentido, se entiende como energía solar la porción de irradiación solar interceptada por la Tierra y que constituye, como recurso energético terrestre, la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance.

Así, el conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable ya que facilita el aprovechamiento adecuado de este recurso energético mediante el uso de sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil.

Estas tecnologías se pueden dividir en sistemas fotovoltaicos o térmicos para la producción de electricidad, destilación solar para separación de sustancias contaminantes, climatización de edificaciones como tecnología fuente de confort térmico, así también como fuente directa de producción de biomasa.

El aprovechamiento de la energía solar está condicionado principalmente por dos aspectos: de la intensidad de la irradiación solar recibida por la Tierra, la que su vez depende de los ciclos diarios y anuales y de la latitud del lugar de aplicación sobre la superficie terrestre, y de las condiciones climatológicas y meteorológicas imperantes.

Por lo tanto, para el aprovechamiento de la irradiación solar como fuente de energía se requiere del conocimiento de la cantidad y distribución de la irradiación solar que incide en un lugar determinado y de su variación temporal a lo largo de los ciclos anual y diario.

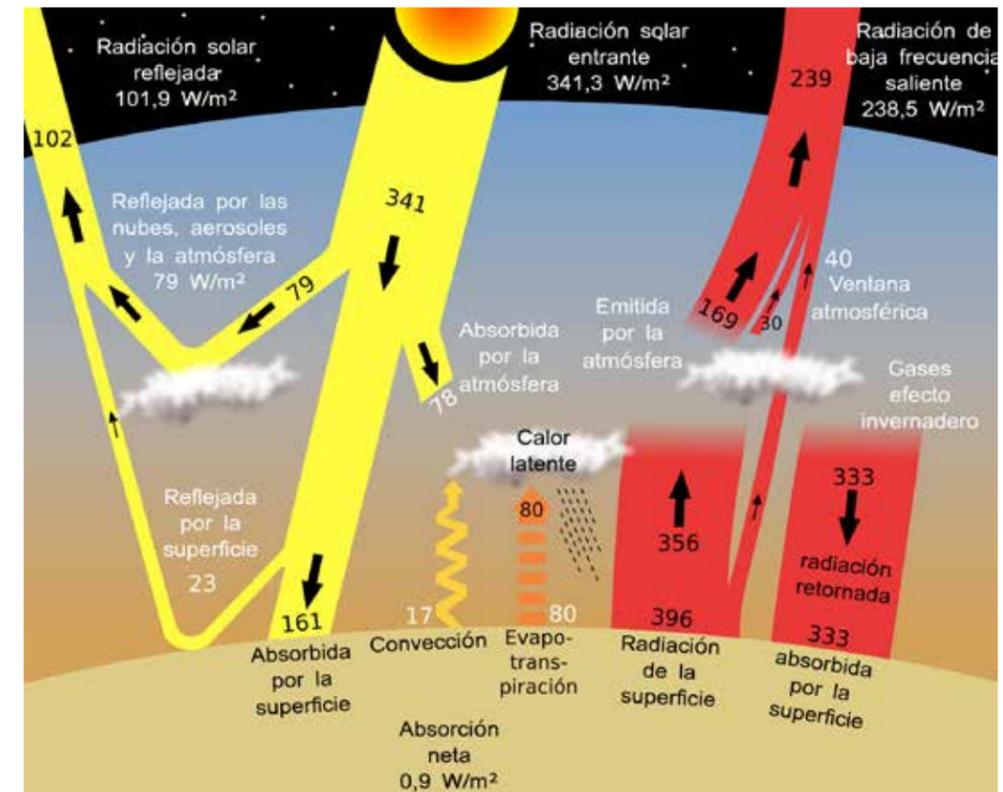
Este atlas, en su apartado de radiación solar brinda información que cuantifica la energía solar que incide sobre la superficie del país. Esto es importante para el caso de las zonas apartadas de las redes nacionales de transporte y distribución de energía eléctrica, ya que esta información es necesaria para el dimensionamiento de sistemas o aplicaciones tecnológicas que a partir de la energía solar permiten el desarrollo de proyectos tendientes al abastecimiento de energía eléctrica con el fin de satisfacer diversos requerimientos tendientes a mejorar la calidad de vida de los usuarios.

La radiación que atraviesa la superficie del Sol tiene una potencia de alrededor de 60 MW/m², llegando al tope de la atmósfera terrestre sólo algo más de 1,3 kW/m²; este valor es conocido como constante solar (I_{cs}), la cual varía ± 3,3% (según la variación de la distancia Tierra-Sol) y se la define como la energía proveniente del Sol que, por unidad de tiempo, es recibida en la unidad de área por una superficie perpendicular a la radiación ubicada en el espacio a la distancia media Tierra-Sol.

$$I_{cs} = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$$

Para calcular la cantidad media de energía solar

Distribución de la energía solar llegada a la superficie terrestre



Fuente: ERASMUS+. <http://www.erasmus-sun.eu/wp-content/uploads/a.png>

que llega a nuestro planeta por metro cuadrado de superficie, hay que multiplicar la constante solar por toda el área del círculo de la Tierra y dividirlo por toda la superficie de la misma, lo que da un valor aproximado de 342 W/m², que es lo que se suele llamar constante solar media.

La intensidad de energía real que se dispone en la superficie terrestre es mucho menor a la mencionada, esto debido a diversos factores, en especial los factores astronómicos y factores climáticos.

Los factores astronómicos dependen de la geometría Tierra-Sol y están en función a la posición relativa de ambos y al lugar de la tierra a ser considerado en un momento dado.

Los factores climáticos son los responsables de que se produzca una atenuación en la cantidad de energía que podría alcanzar la superficie de la tierra.

Estos factores, a diferencia de los astronómicos, no son fácilmente cuantificables. Los componentes de la atmósfera son los responsables de dicha atenuación mediante procesos de reflexión, dispersión y de absorción por parte de elementos que la constituyen como ser vapor de agua, aerosoles, ozono y nubes, siendo la nubosidad componente principal a la hora de establecer la variabilidad de la energía solar en un determinado territorio.

Es importante destacar también, que casi la mitad de la radiación incidente vuelve al espacio a causa de la reflexión, antes de alcanzar la superficie.

Piránometro de Kipp & Zonen, instalado en Mayor Infante Rivarola



Fuente: PTI-PY PESE-PY

La **radiación difusa** es la que se recibe después de haber cambiado su dirección por los procesos de refracción y reflexión que ocurren en la atmósfera.

En un día despejado, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa, por el contrario, en un día nublado no existe radiación directa y la totalidad de la radiación que incide es la difusa.

Para el presente proyecto se tuvo en cuenta toda la radiación observada en una superficie horizontal terrestre, es decir, la radiación global.

La energía de la radiación solar que se recibe en una superficie determinada en un instante dado se le conoce como **Irradiancia** y se mide en unidades de vatios (o watts, en inglés) por metro cuadrado (m^2).

Irradiancia = W/m^2

La **insolación**, también conocida como irradiación o exposición radiante, corresponde a la integración de la irradiancia en un período determinado. En otras palabras es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado.

Insolación = Wh/m^2

Tecnología de medición

El instrumento más usado en la medición de la radiación solar es el piránometro. Este aparato (también llamado solarímetro) mide la radiación global sobre una superficie horizontal, en pocas palabras, es un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (kilovatios por metro cuadrado) en un campo de 180° .

En el apartado 4 "Metodología", se detalla el método de determinación del potencial energético solar en función a la información disponible.

A partir del Sol, se puede producir energía eléctrica, mediante métodos térmicos o fotovoltaicos.

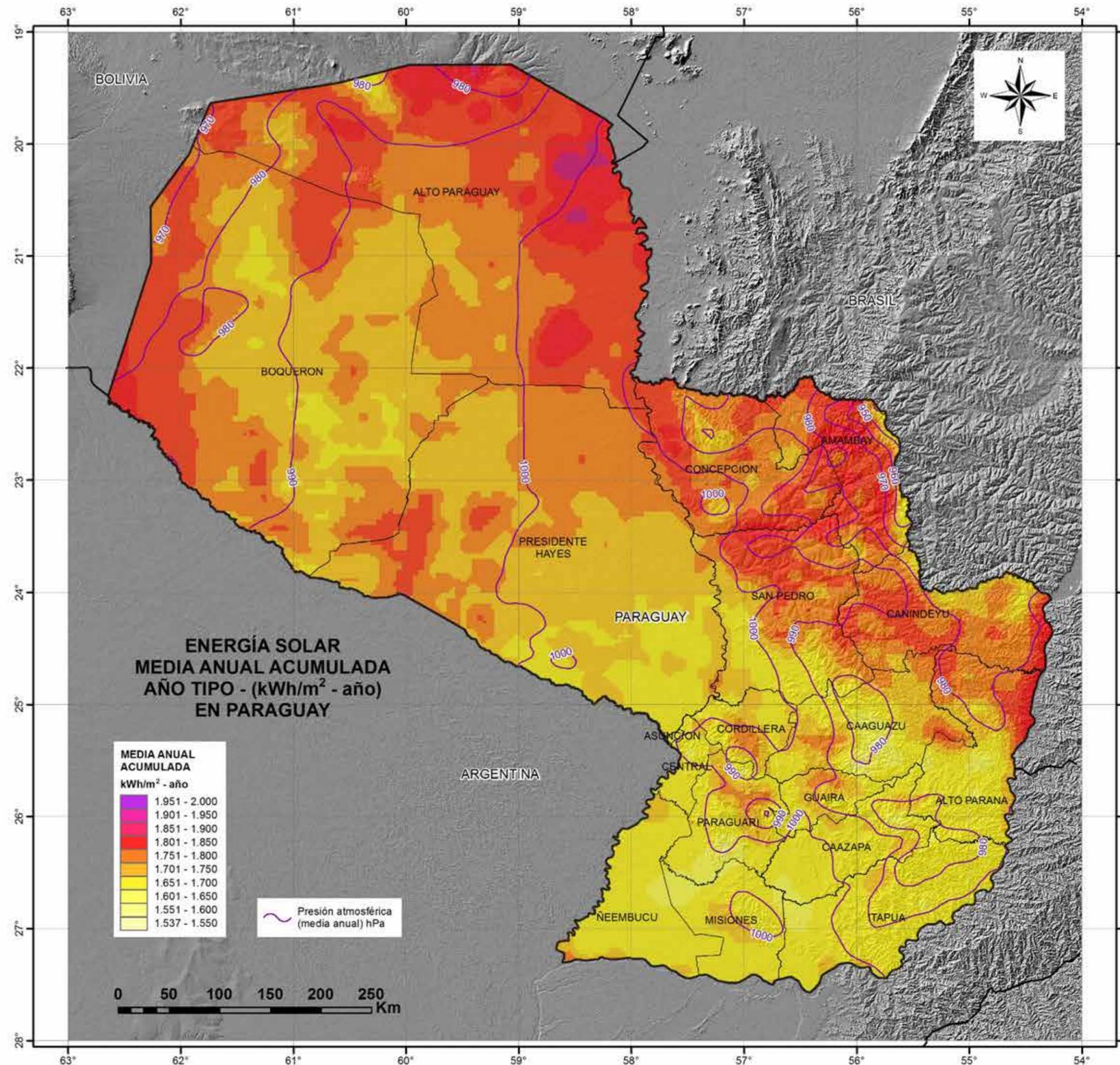
Para comprender mejor la transformación de la energía solar en energía eléctrica, se debe tener en cuenta algunas métricas básicas, las cuales se presenta a continuación.

Métricas

Con respecto a la radiación solar incidente en la superficie terrestre, esta se denomina **Radiación Global** (a veces conocida también como total o hemisférica), y es la suma de dos otros tipos de radiación, la **directa** y la **difusa**, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$R_{global} = R_{directa} + R_{difusa}$$

La **radiación directa** es aquella que se recibe en la superficie terrestre sin que esta haya sufrido ninguno de los procesos previamente mencionados al pasar por la atmósfera.



Proyecto: POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR Y EÓLICO DEL PARAGUAY (PESE_PY)

Convenio ITAIPU - PTI-PY n°: 4500031993/2014

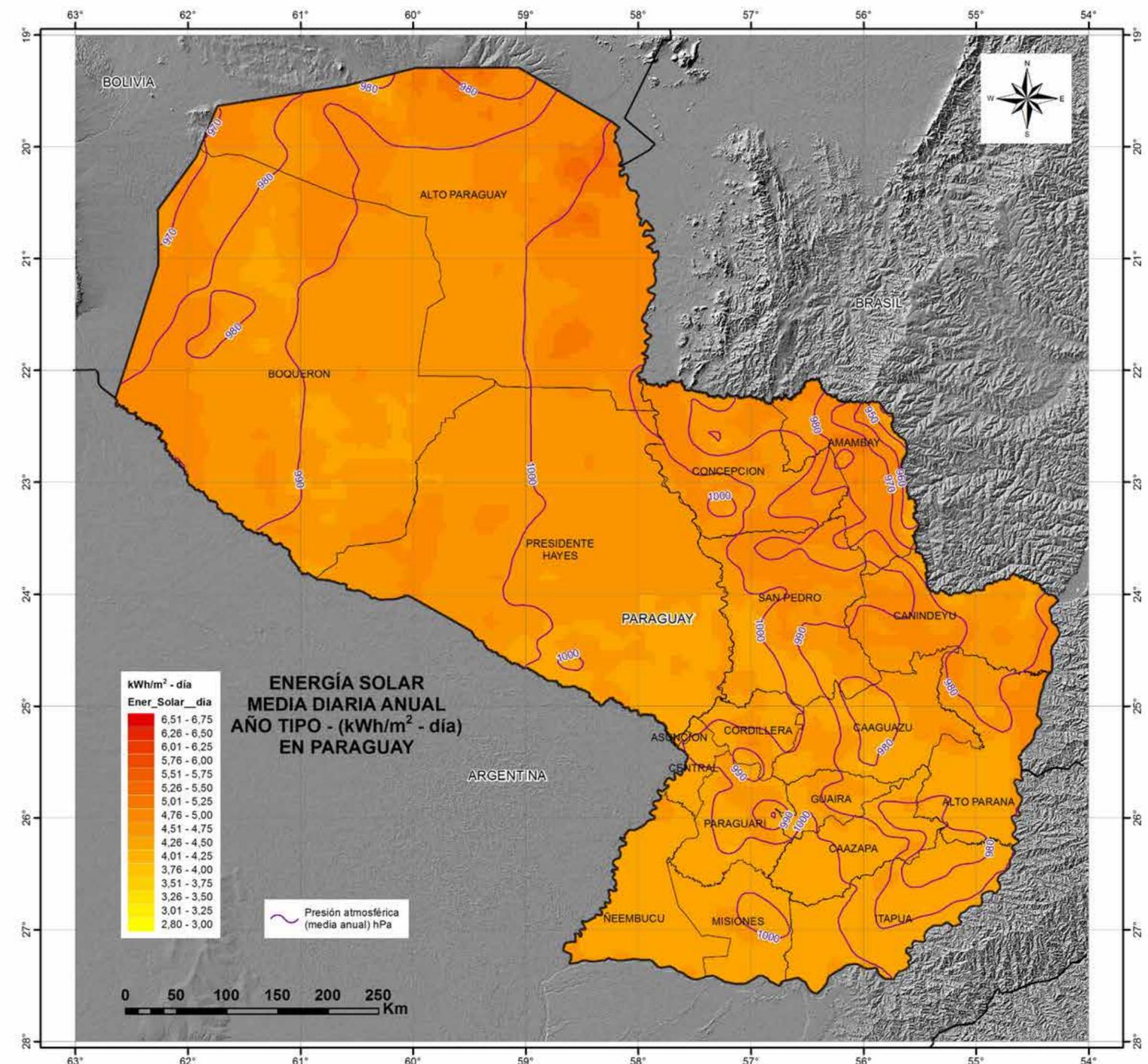
ENERGÍA SOLAR MEDIA ANUAL ACUMULADA AÑO TIPO - (kWh/m^2 - año)

Cuantificación de la **ENERGÍA SOLAR MEDIA ANUAL** (media diaria acumulada en un año), por unidad de superficie, en función de la Irradiación Solar en un lugar

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula $c/ 1^\circ$
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016





ENERGÍA SOLAR MEDIA DIARIA ANUAL AÑO TIPO - (kWh/m² - día)

Cuantificación de la ENERGÍA SOLAR MEDIA ANUAL (media diaria acumulada en un año), por unidad de superficie, en función de la Irradiación Solar en un lugar

Fuente:
 1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

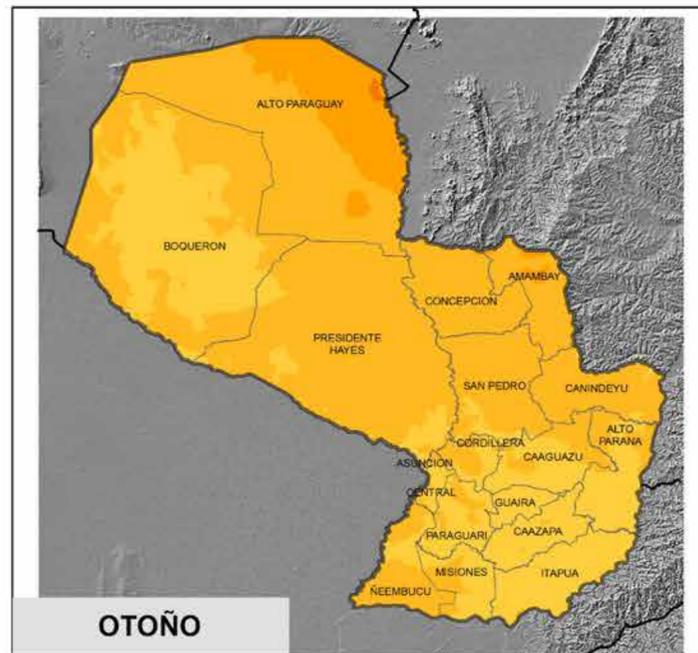
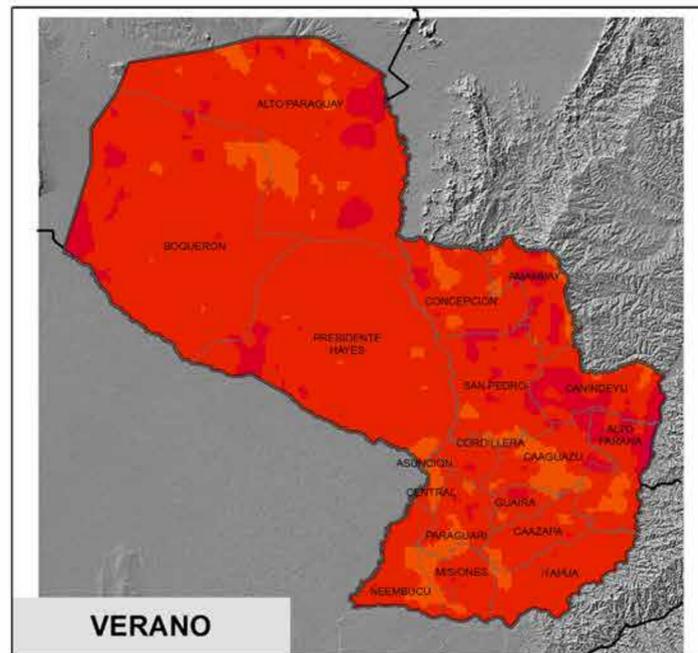
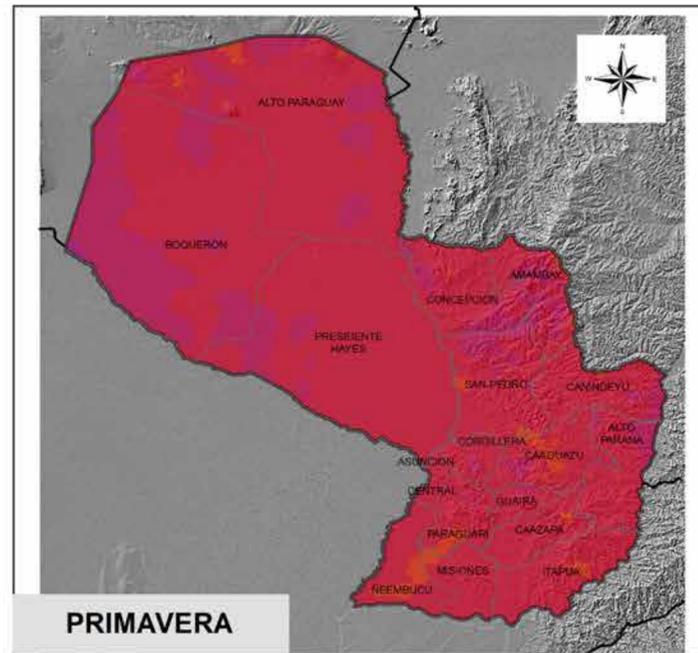
Proyección geográfica: Transversal de Mercator
 Elipsoide: WGS84
 Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
 Geoprosesamiento: CIIG/PTI
 Septiembre 2016

ENERGÍA SOLAR MEDIA ESTACIONAL (año tipo) (kWh/m² - día)

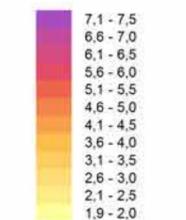
Cuantificación del potencial energético solar, correspondiente al valor medio diario de energía, para cada estación, para un año tipo.

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
Geoprosesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016



kWh/m² - día



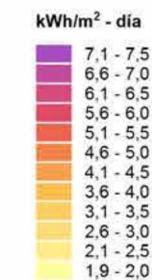
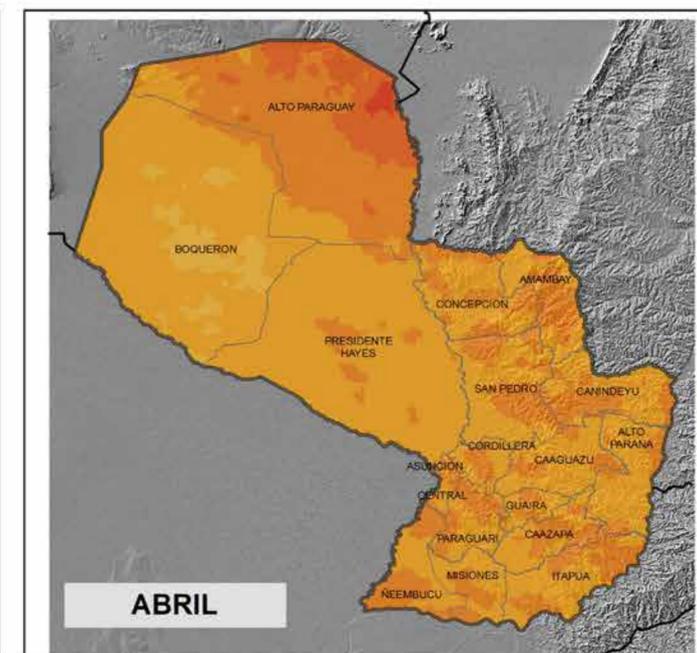
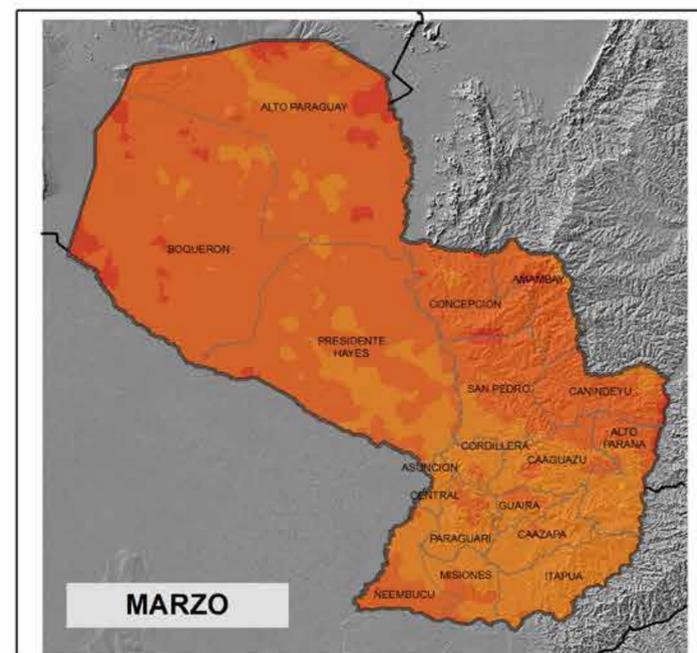
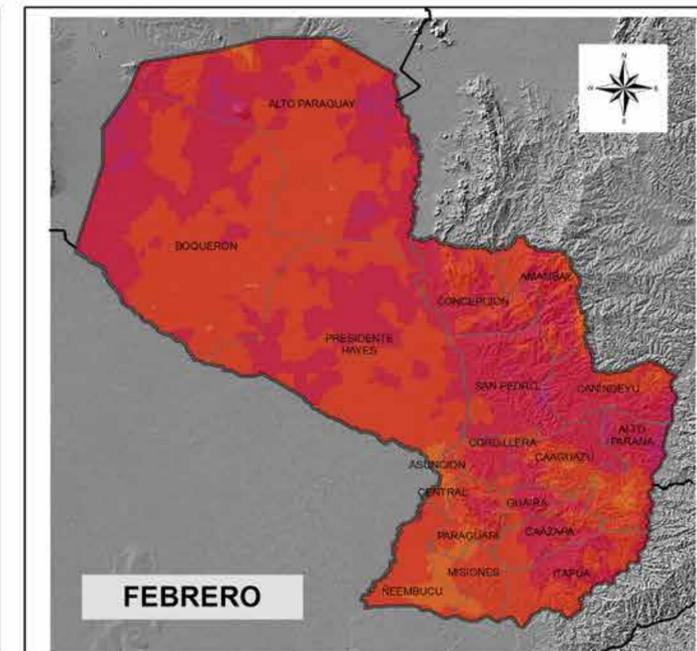
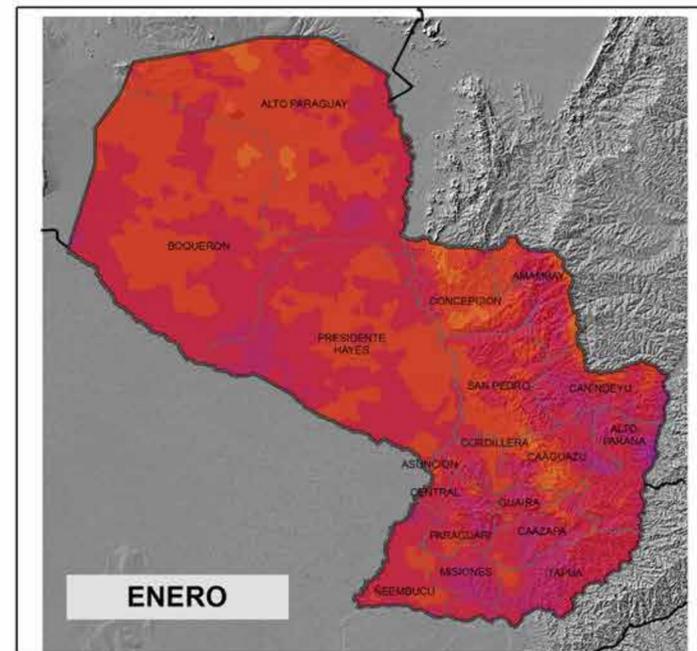
ENERGÍA SOLAR MEDIA MENSUAL (año tipo) (kWh/m² - día)

Cuantificación del potencial energético solar, correspondiente al valor medio diario de energía, para cada MES, para un año tipo.

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016

Meses: ENERO, FEBRERO, MARZO y ABRIL



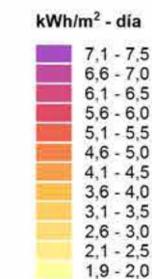
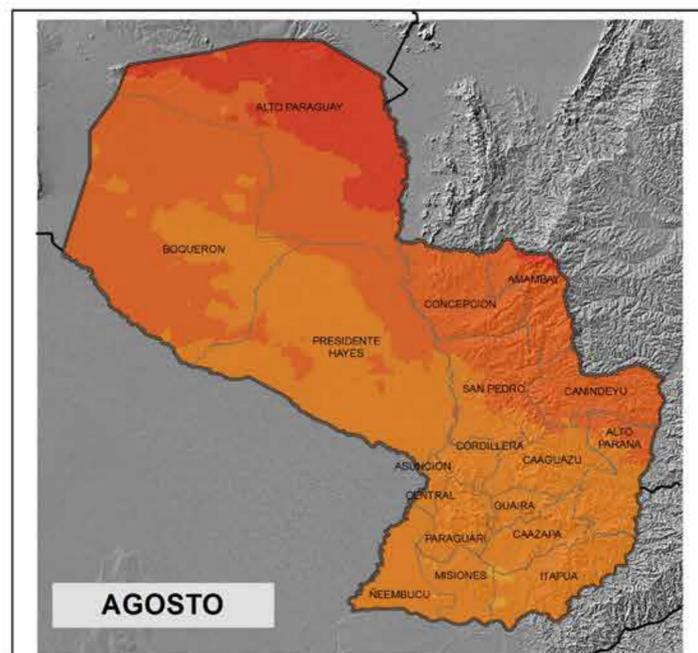
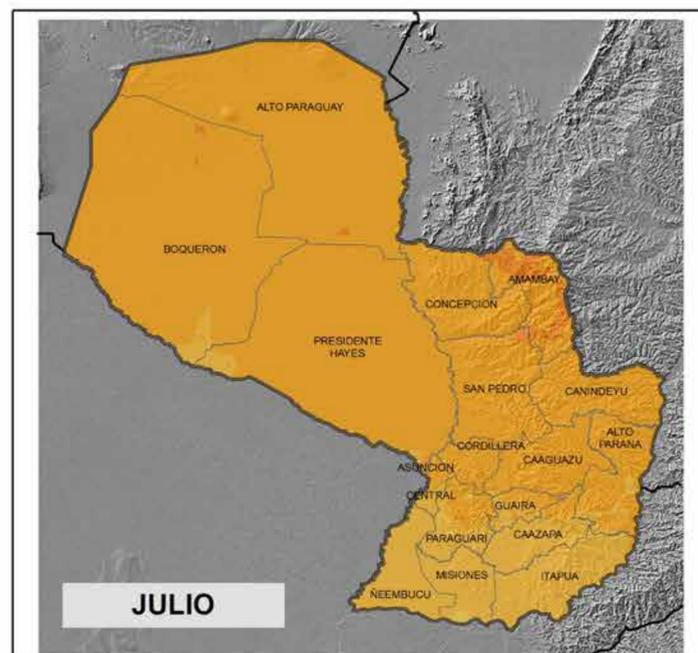
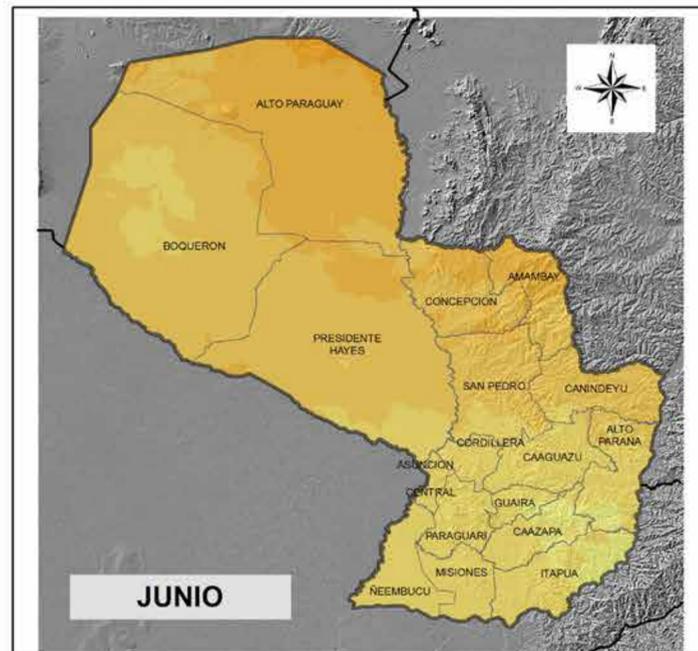
ENERGÍA SOLAR MEDIA MENSUAL (año tipo) (kWh/m² - día)

Cuantificación del potencial energético solar, correspondiente al valor medio diario de energía, para cada MES, para un año tipo.

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016

Meses: MAYO, JUNIO, JULIO y AGOSTO



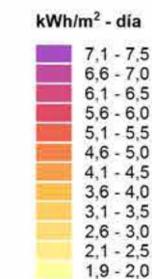
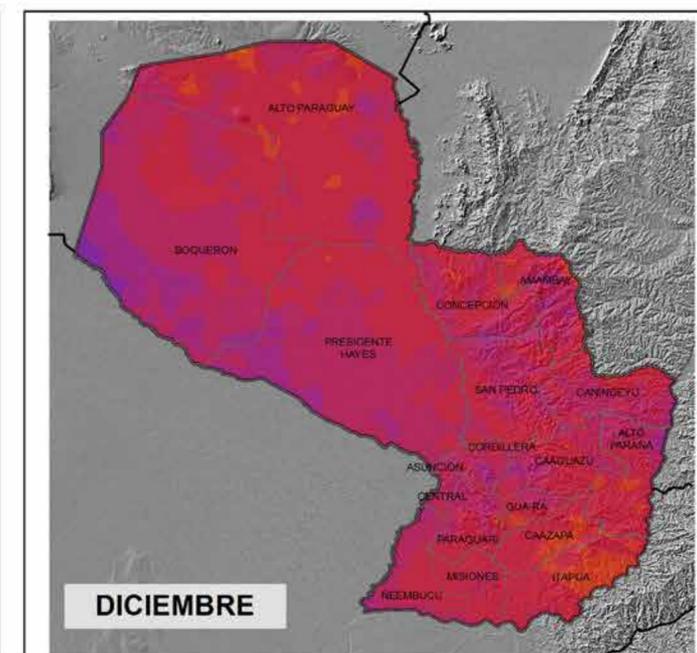
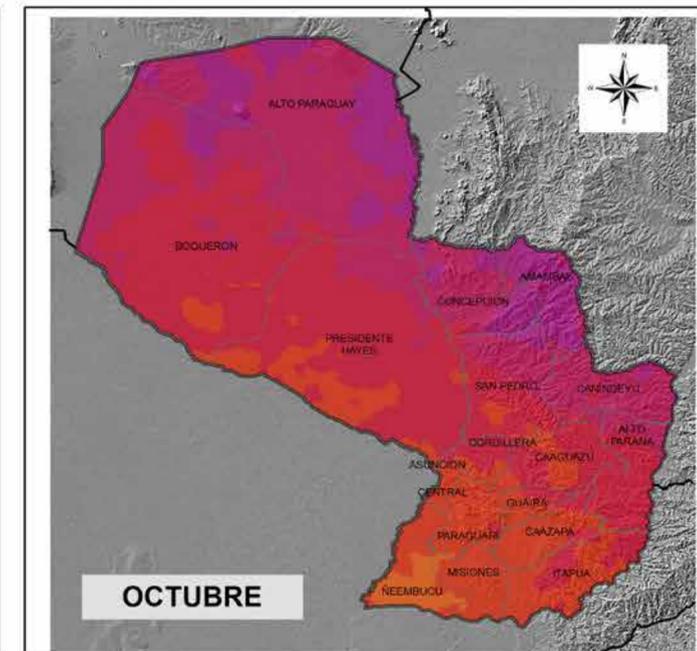
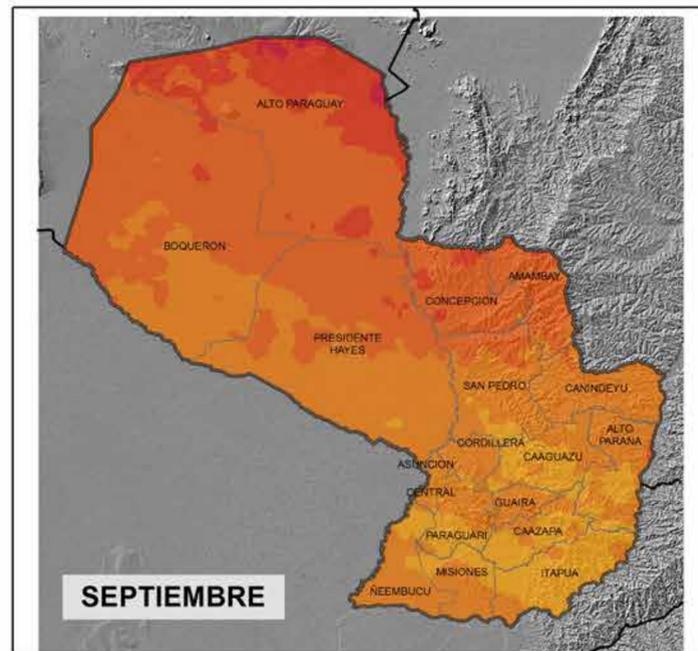
ENERGÍA SOLAR MEDIA MENSUAL (año tipo) (kWh/m² - día)

Cuantificación del potencial energético solar, correspondiente al valor medio diario de energía, para cada MES, para un año tipo.

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016

Meses: SEPTIEMBRE, OCTUBRE, NOVIEMBRE y DICIEMBRE



6. Potencial energético eólico



6.1. Principios de la energía eólica

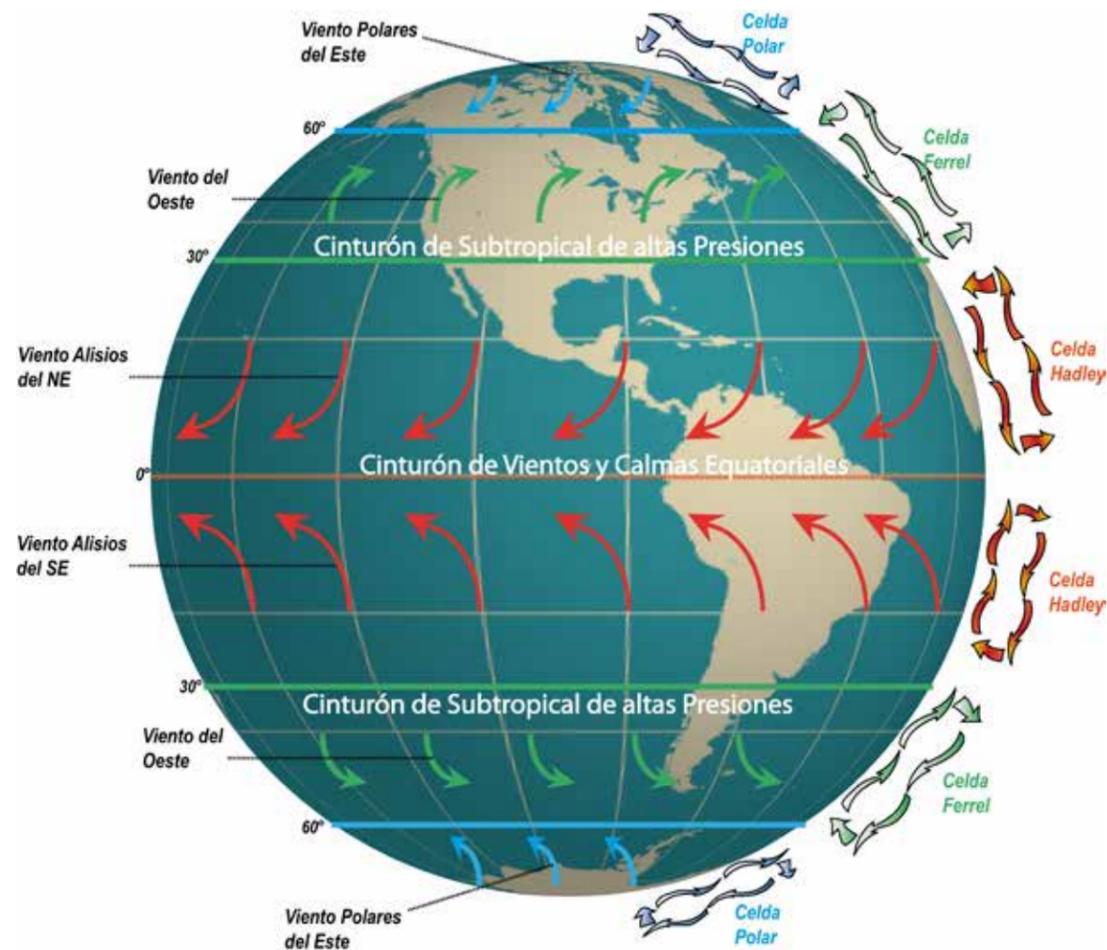
La energía eólica es una fuente de energía renovable que aprovecha fundamentalmente los movimientos de las masas de aire o vientos para la generación de electricidad.

Los vientos son causados de forma indirecta por el Sol. A través de los rayos que emite el mismo y mediante la rotación de la Tierra, se originan calentamientos dispares en la superficie terrestre siendo el principal causante de los vientos. Los vientos son masas de aire

predominantemente horizontales. En este contexto, se puede decir que la energía eólica es una forma indirecta de energía solar, ya que gracias a la diferencia de temperatura y presión causada por el Sol inducen al movimiento de las grandes masas de aire.

Pero el viento no solamente depende de los factores físicos de gran escala, sino también de los factores regionales y locales, como ser la rugosidad del terreno o la orografía de una determinada zona.

Circulación general del aire en la Tierra



Fuente: <http://escritura.proyectolatin.org/introduccion-al-estudio-de-fuentes-renovables-de-energia/formacion-y-circulacion-del-viento/>

La **rugosidad** tiende a frenar el movimiento del aire conforme su proximidad con el suelo, por otra parte la orografía juega un papel importante, ya que la velocidad del viento sufre una aceleración al remontar colinas o cadenas montañosas.¹⁶ En ciertas partes el efecto del relieve puede ser predominante; se manifiesta en la formación de turbulencias, brisas de mar y tierra, brisas de valle y montañas con patrón estacional y diario.¹⁷

Tecnología de medición

Para conocer mejor las características energéticas en un determinado lugar o región se requiere conocer los datos, y que éstos sean de un tiempo considerablemente largos, medidos en lugares bien establecidos, a la altura correspondiente.¹⁸

El objetivo principal del relevamiento de datos de vientos es conocer la intensidad media en un determinado tiempo y la dirección predominante. Estos datos se obtienen principalmente a través de dos tipos de sensores, el anemómetro, que mide la intensidad del viento (v/s); y la veleta, que mide la dirección (en grados sexagesimales).

A la hora de colocar los instrumentos para la recolección de informaciones se debe tener en cuenta que los mismos deben estar posicionados en lugares expuestos a todas las direcciones y sin obstáculos en su entorno que puedan crear turbulencias.

Actualmente, mediante las estaciones meteorológicas automáticas, dichos datos son medidos por los diferentes sensores, almacenados en un registrador de datos o datalogger, y mediante un sistema de comunicación, enviados a un centro remoto para su control y registro.

La metodología de determinación del potencial energético eólico en función a los datos con los que se cuentan, está detallado en el apartado "Metodología".

Anemómetro en Villarrica.



Fuente: PTI-PY

Veleta en Villarrica.



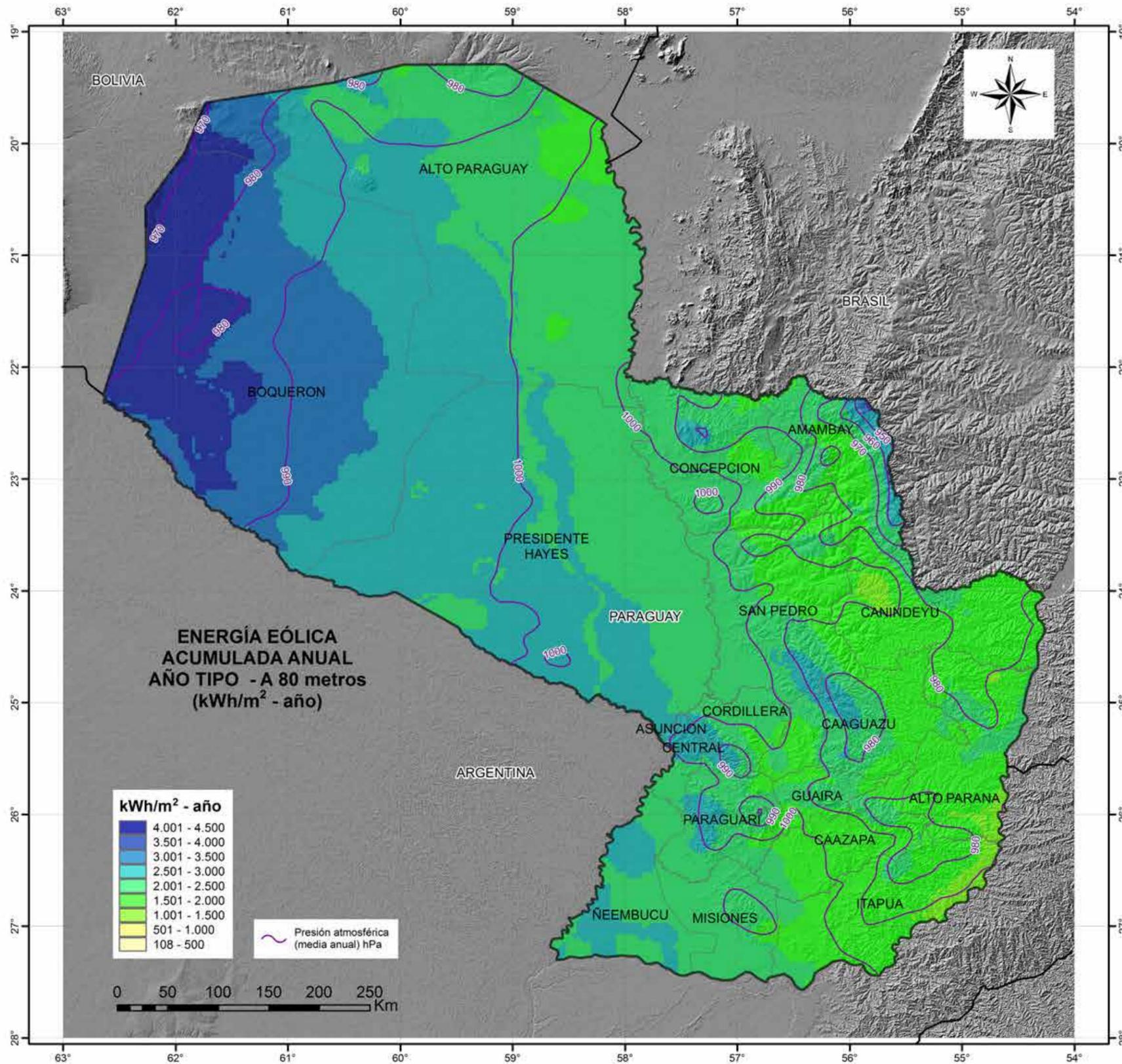
Fuente: PTI-PY

Montaje de Aerogenerador pequeño en Joel Estigarribia. Proyecto SELAC (PTI-PY/Itaipu)



Fuente: PTI-PY

16 Gill, L. y Báez, J. (2013). Mapeo del potencial energético solar y eólico del Paraguay y de sus recursos hidroenergéticos en cuencas de la región Oriental
17 Brizuela, A., Aguirre, C., Baéz, J., Pastén, A., Pérez, N., Castell, M.E. y Enciso, E. (1997). El Recurso Eólico en Paraguay. Fondo Argentino de cooperación Horizontal, Instituto Nacional de Tecnología y Normalización, Dirección Nacional de Aeronáutica Civil. Asunción, Paraguay. Pag. 84.
18 Ibiz



Proyecto: POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR Y EÓLICO DEL PARAGUAY (PESE_PY)

Convenio ITAIPU - PTI-PY n°: 4500031993/2014

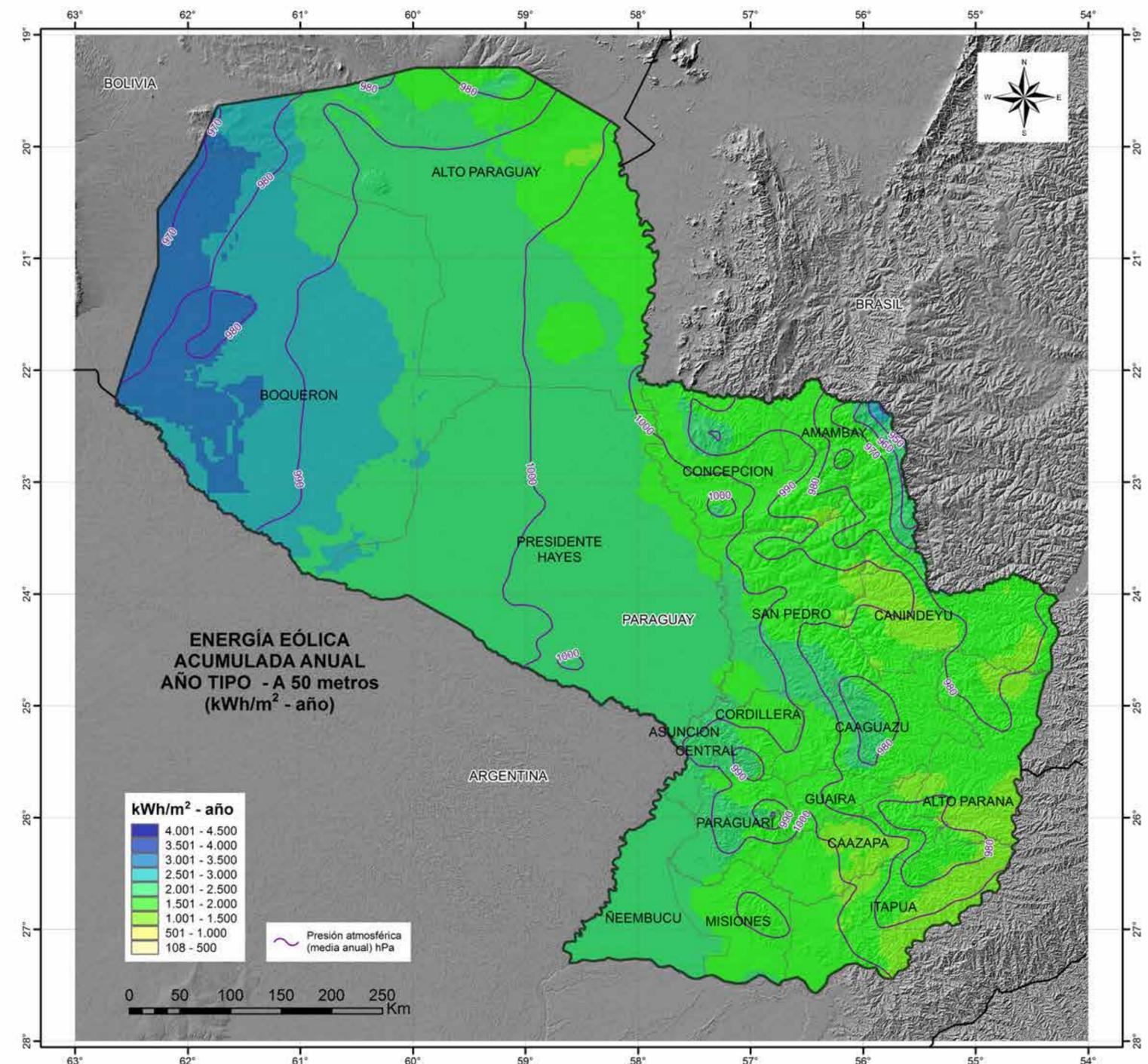
ENERGÍA EÓLICA ACUMULADA ANUAL AÑO TIPO - A 80 metros (kWh/m² - año)

Cuantificación de la ENERGÍA EÓLICA ANUAL por unidad de superficie, según ecuación de Weibull.

Fuente:
 1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.
 2) El Recurso Eólico en Paraguay; Fondo Argentino de Cooperación Horizontal, Instituto Nacional de Tecnología y Normalización (INTN), Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC); 1997

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
 Elipsoide: WGS84
 Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
 Geoprocesamiento: CIIG/PTI
 Septiembre 2016



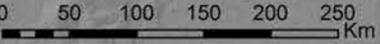


ENERGÍA EÓLICA ACUMULADA ANUAL AÑO TIPO - A 50 metros (kWh/m² - año)

kWh/m² - año

4.001 - 4.500
3.501 - 4.000
3.001 - 3.500
2.501 - 3.000
2.001 - 2.500
1.501 - 2.000
1.001 - 1.500
501 - 1.000
108 - 500

Presión atmosférica (media anual) hPa

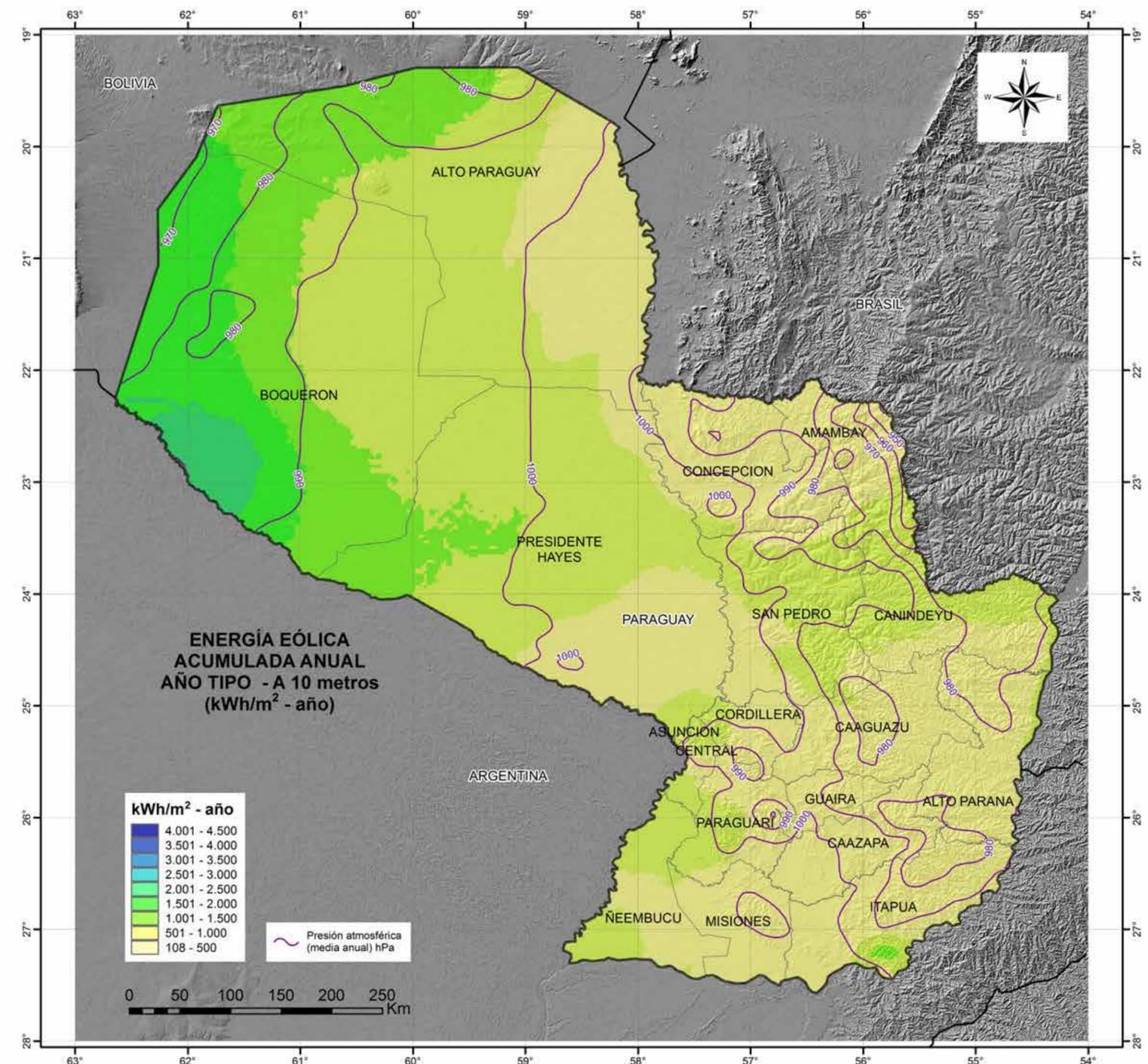


ENERGÍA EÓLICA ACUMULADA ANUAL AÑO TIPO - A 50 metros (kWh/m² - año)

Cuantificación de la ENERGÍA EÓLICA ANUAL por unidad de superficie, según ecuación de Weibull.

Fuente:
 1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.
 2) El Recurso Eólico en Paraguay; Fondo Argentino de Cooperación Horizontal, Instituto Nacional de Tecnología y Normalización (INTN), Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC); 1997

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
 Elipsoide: WGS84
 Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
 Geoprocesamiento: CIIG/PTI
 Septiembre 2016



ENERGÍA EÓLICA ACUMULADA ANUAL AÑO TIPO - A 10 metros (kWh/m² - año)

Cuantificación de la ENERGÍA EÓLICA ANUAL por unidad de superficie, según ecuación de Weibull.

Fuente:
 1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.
 2) El Recurso Eólico en Paraguay; Fondo Argentino de Cooperación Horizontal, Instituto Nacional de Tecnología y Normalización (INTN), Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC); 1997

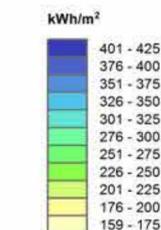
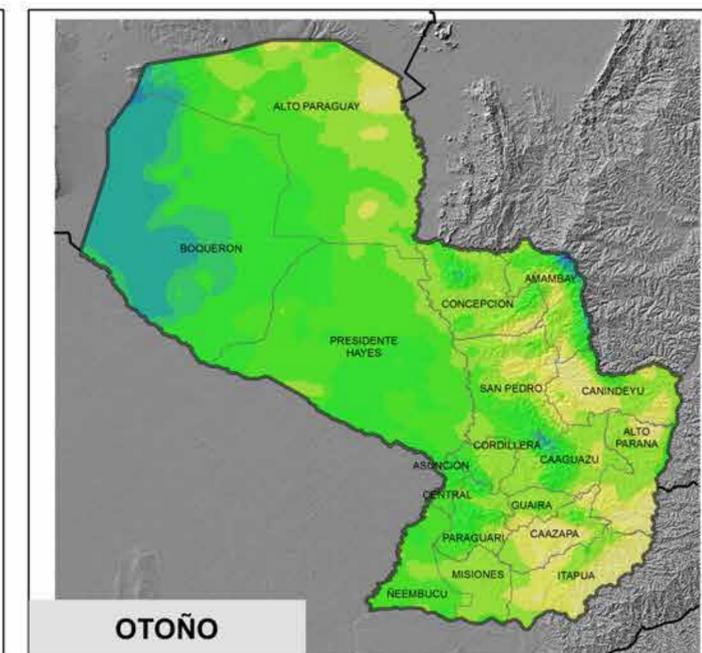
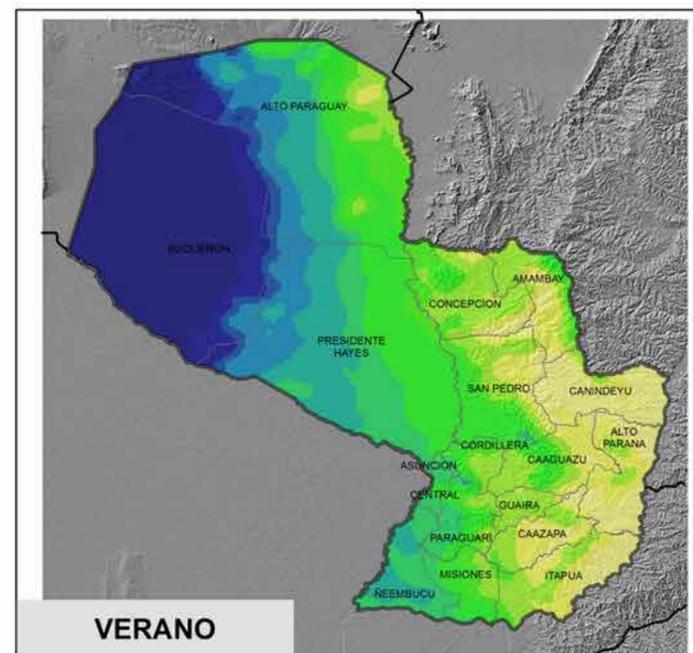
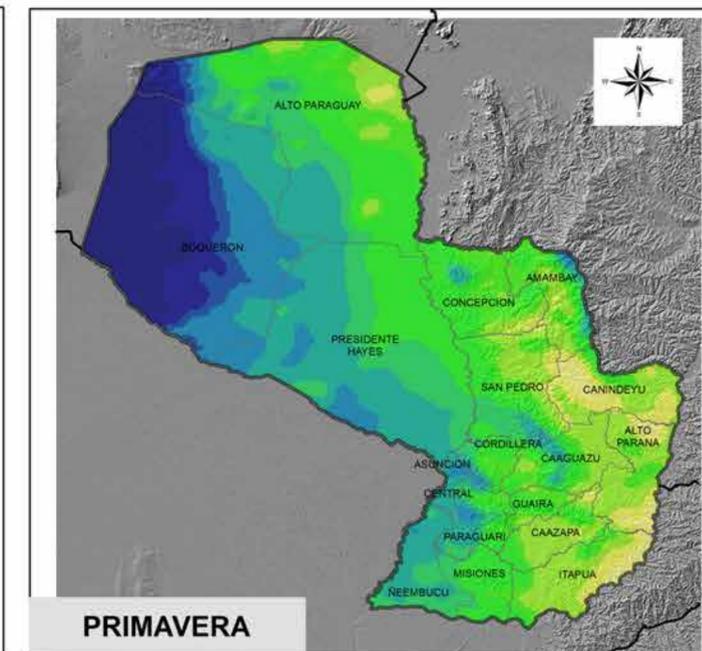
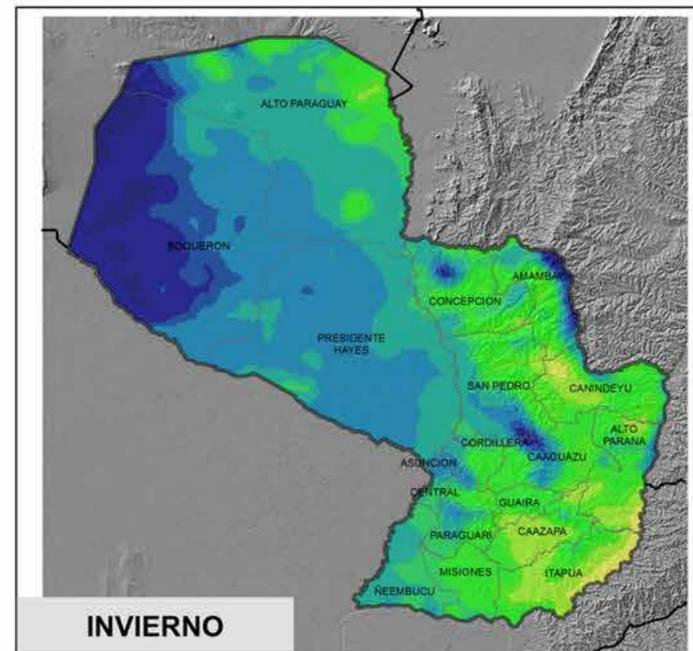
Proyección geográfica: Transversal de Mercator
 Elipsoide: WGS84
 Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
 Geoprocesamiento: CIIG/PTI
 Septiembre 2016

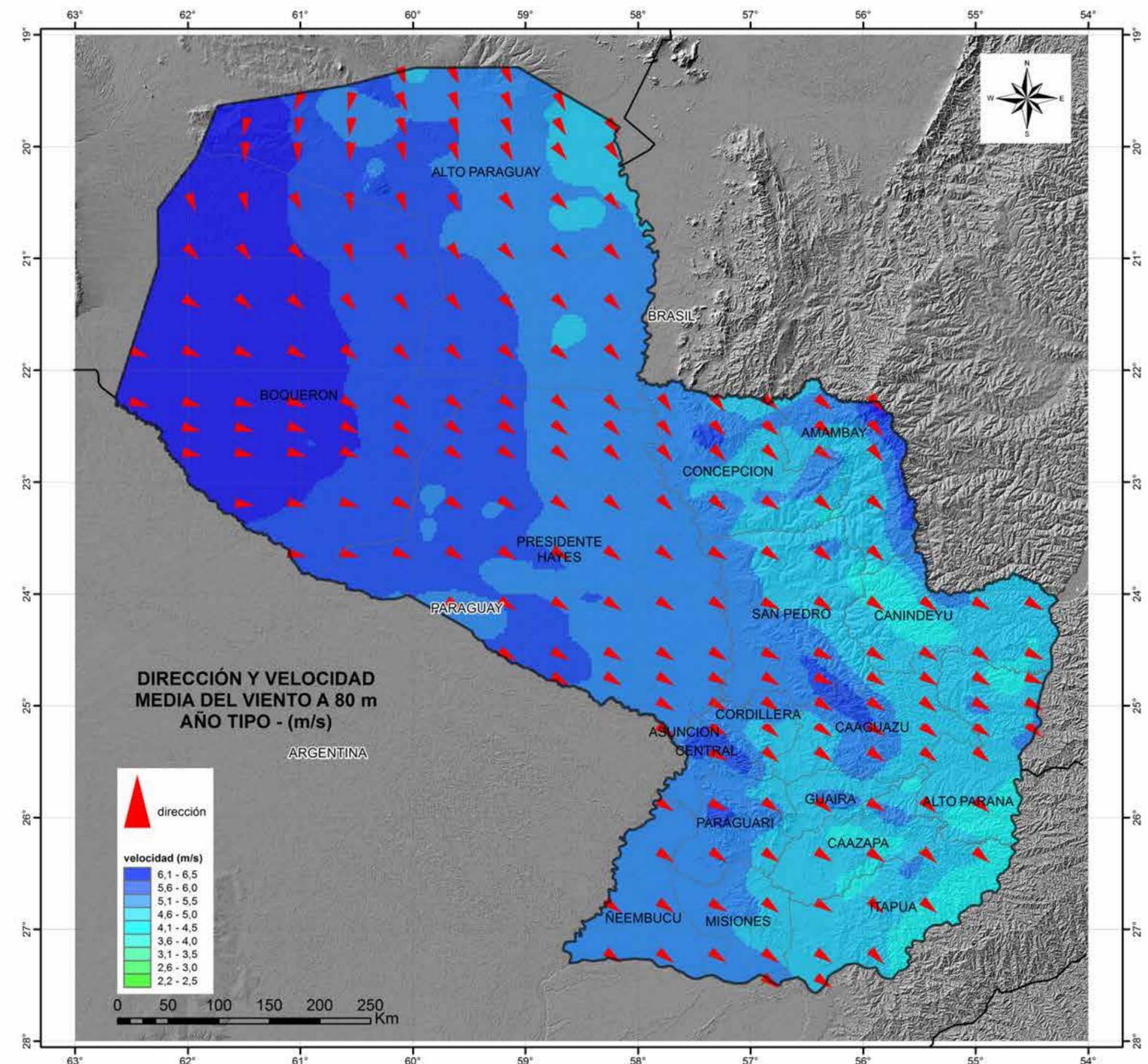
**ENERGÍA EÓLICA
MEDIA ESTACIONAL A 80m
(año tipo) - (kWh/m²)**

Cuantificación del POTENCIAL ENERGÉTICO EÓLICO a 80m, correspondiente al valor medio acumulado de energía, durante cada estación, para un año tipo.

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016



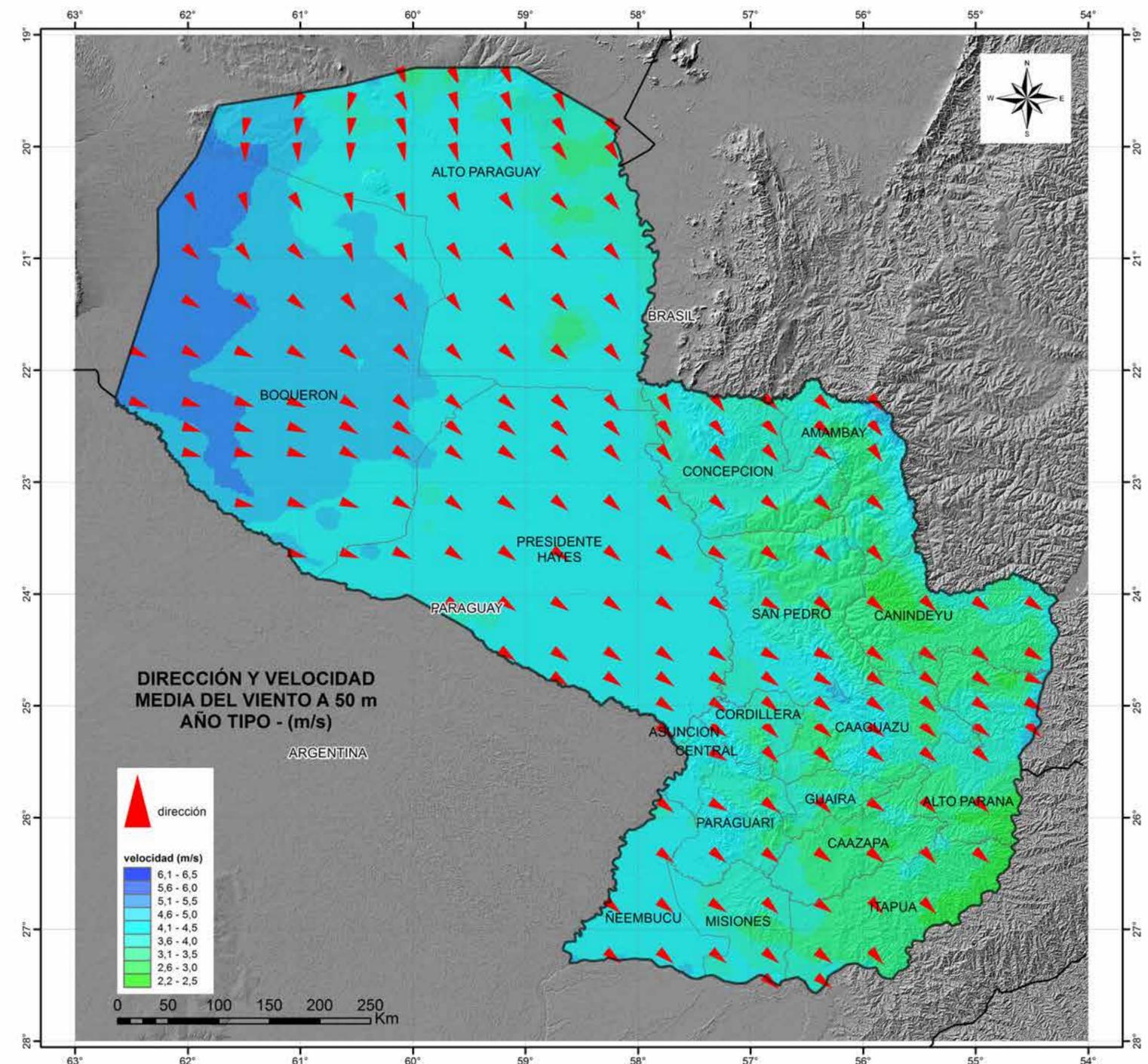


DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO A 80 m AÑO TIPO - (m/s)

DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO, A 80 m, AÑO TIPO, con base en datos del modelo meso-escalar

Fuente:
 1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
 Elipsoide: WGS84
 Coordenadas: geográficas, graticula 1°
 Geoprocesamiento: CIIG/PTI
 Septiembre 2016



DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO A 50 m AÑO TIPO - (m/s)

dirección

velocidad (m/s)

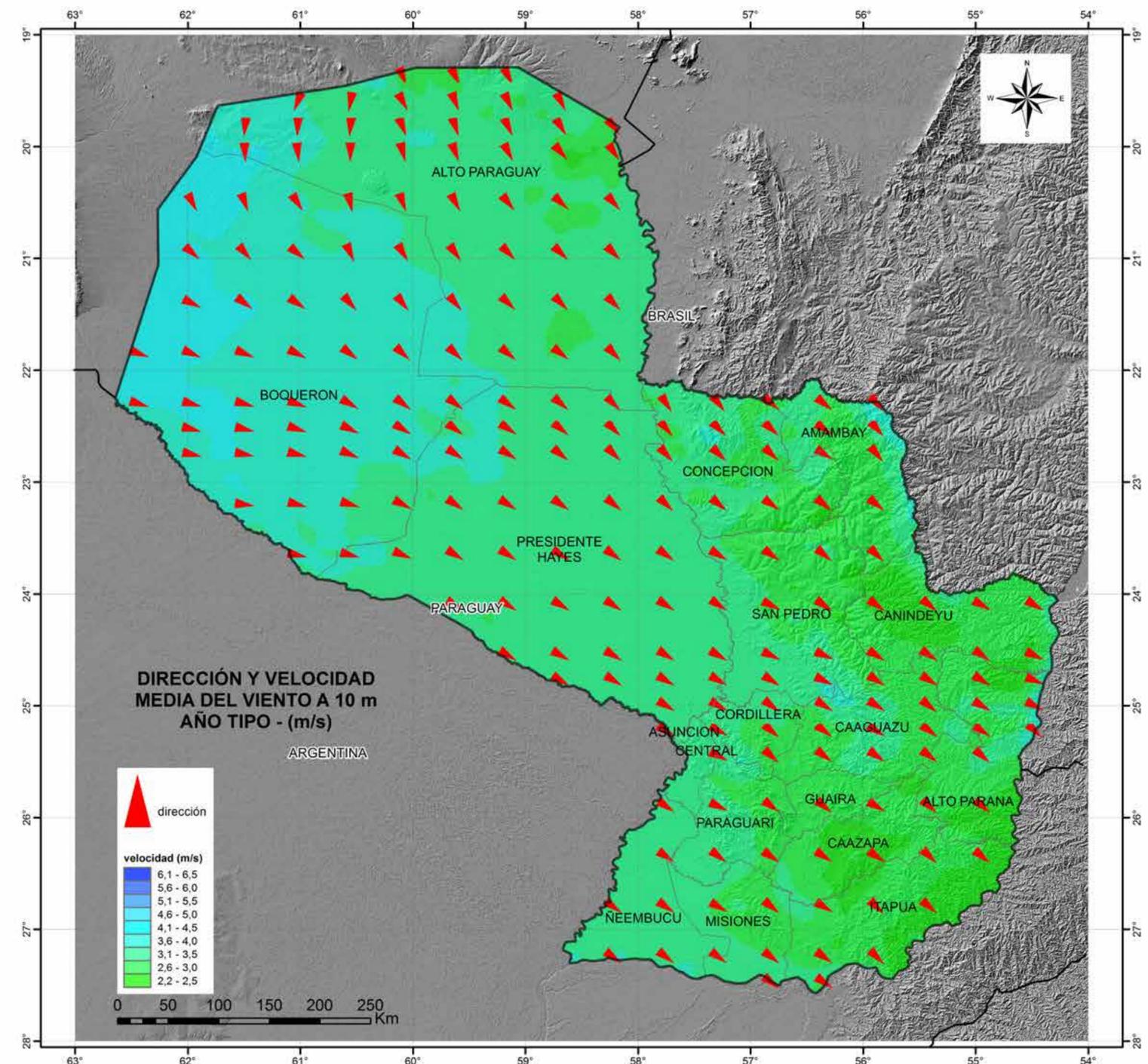
- 6,1 - 6,5
- 5,6 - 6,0
- 5,1 - 5,5
- 4,6 - 5,0
- 4,1 - 4,5
- 3,6 - 4,0
- 3,1 - 3,5
- 2,6 - 3,0
- 2,2 - 2,5

DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO A 50 m AÑO TIPO - (m/s)

DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO, A 50 m, AÑO TIPO, con base en datos del modelo meso-escalar

Fuente:
 1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
 Elipsoide: WGS84
 Coordenadas: geográficas, graticula 1°
 Geoprocesamiento: CIIG/PTI
 Septiembre 2016



DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO A 10 m AÑO TIPO - (m/s)

dirección

velocidad (m/s)

- 6,1 - 6,5
- 5,6 - 6,0
- 5,1 - 5,5
- 4,6 - 5,0
- 4,1 - 4,5
- 3,6 - 4,0
- 3,1 - 3,5
- 2,6 - 3,0
- 2,2 - 2,5

Proyecto: POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR Y EÓLICO DEL PARAGUAY (PESE_PY)

Convenio ITAIPIU - PTI-PY n°: 4500031993/2014

DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO A 10 m AÑO TIPO - (m/s)

DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO, A 10 m, AÑO TIPO, con base en datos del modelo meso-escalar

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016



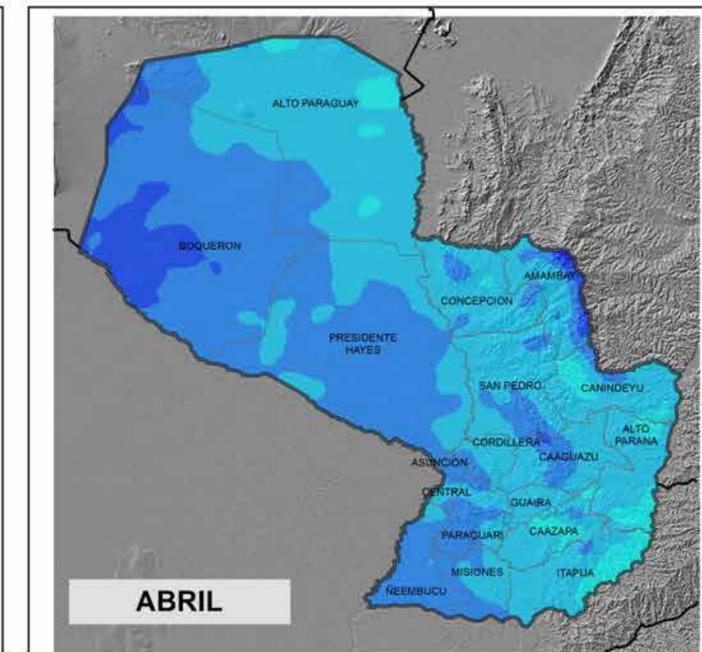
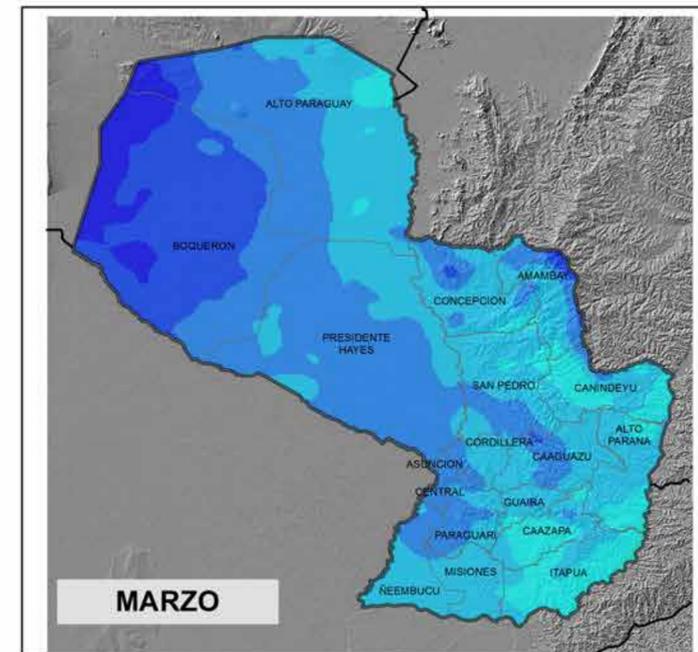
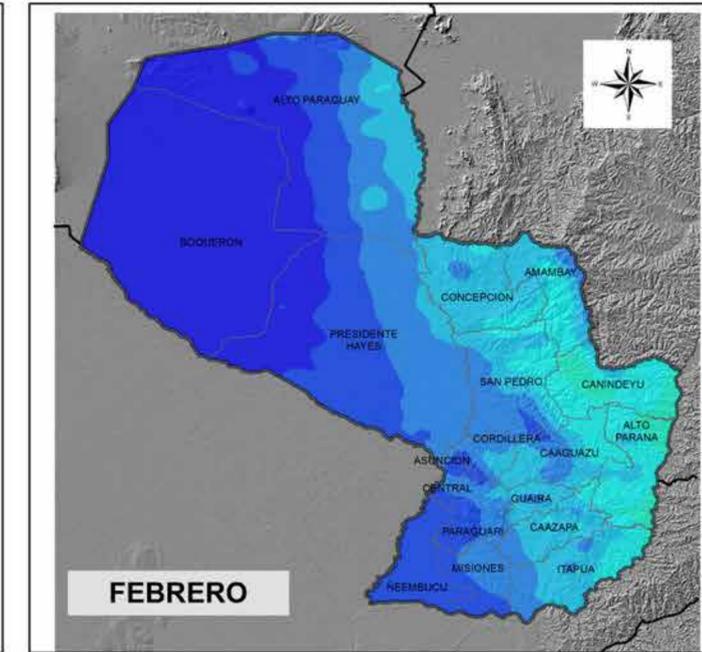
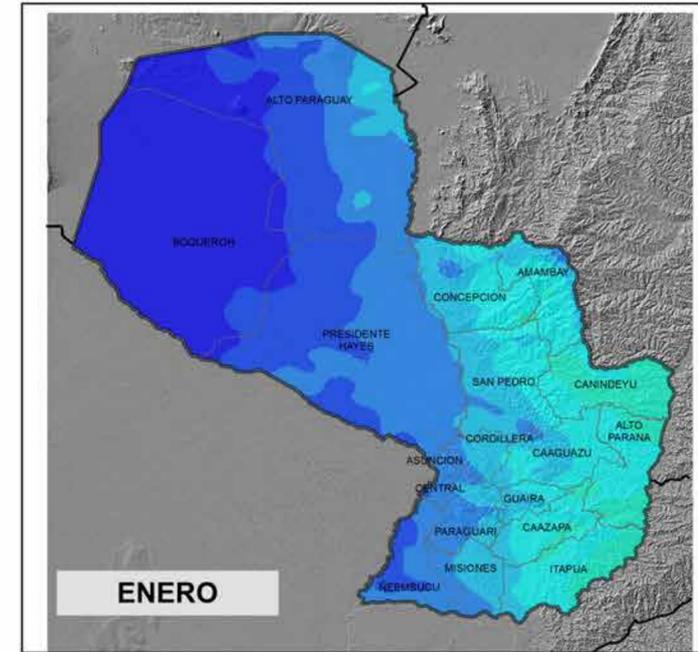
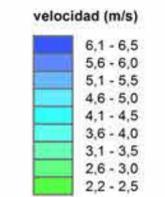
VELOCIDAD DEL VIENTO A 80M MEDIA MENSUAL - AÑO TIPO (m/s)

VELOCIDAD DEL VIENTO, A 80 m, MEDIA MENSUAL según datos del modelo meso-escalar

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016

Meses: ENERO, FEBRERO MARZO y ABRIL



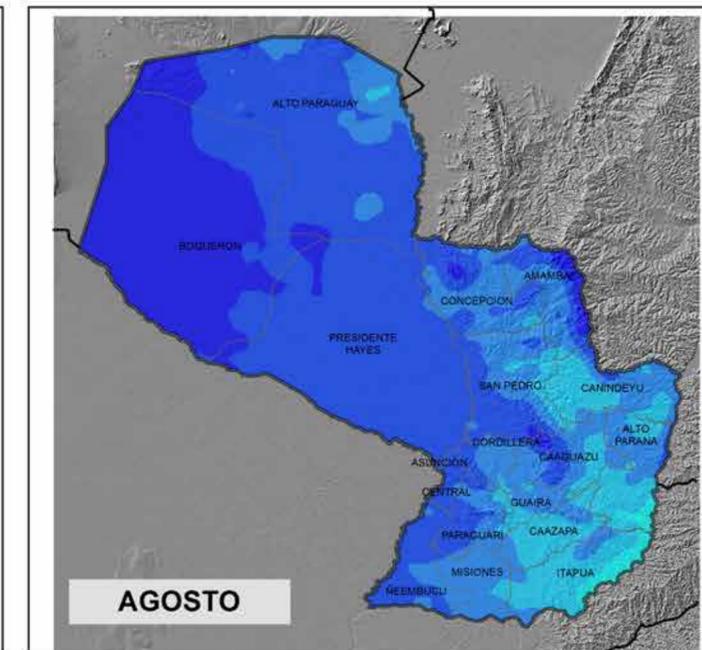
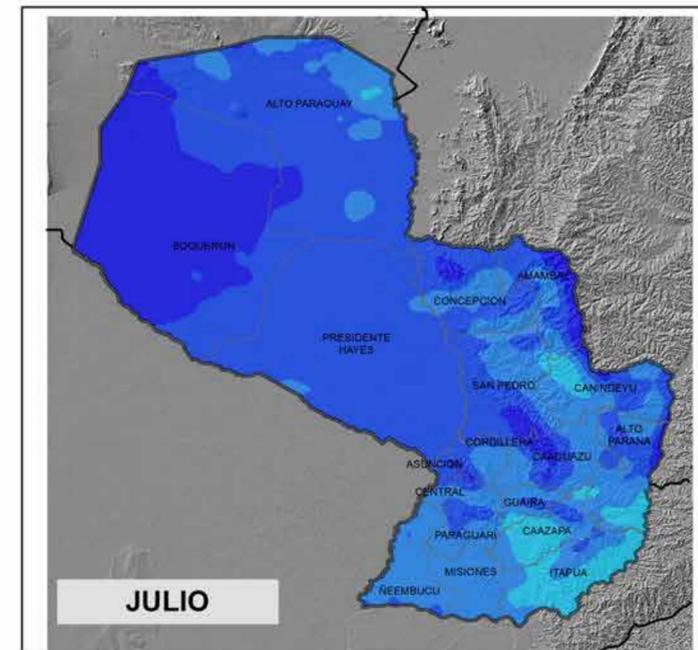
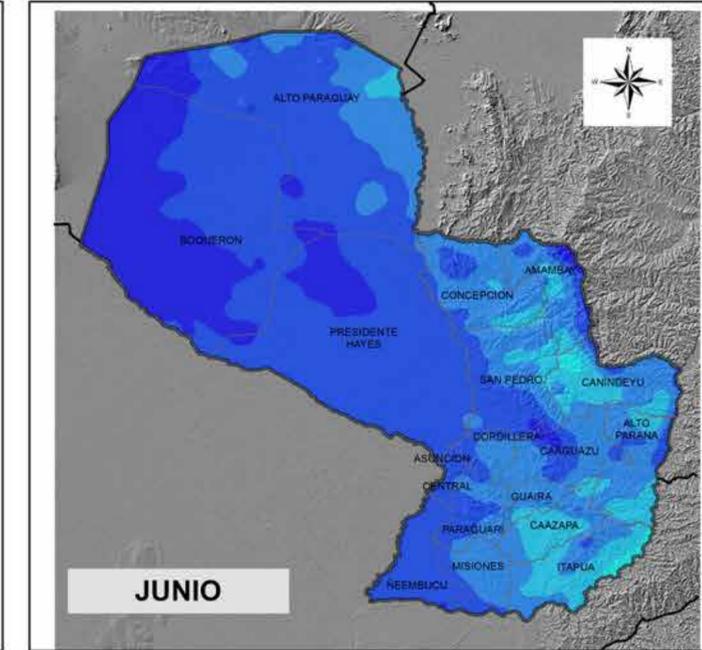
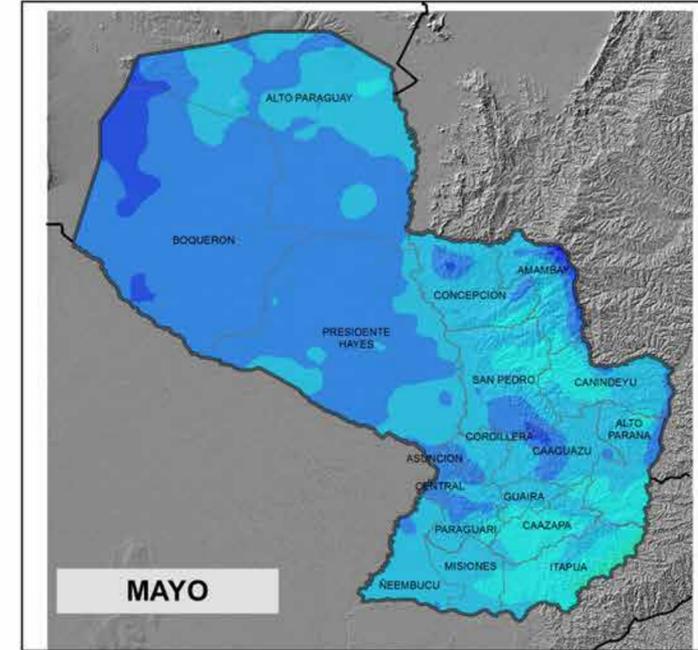
VELOCIDAD DEL VIENTO A 80M MEDIA MENSUAL - AÑO TIPO (m/s)

VELOCIDAD DEL VIENTO, A 80 m, MEDIA MENSUAL según datos del modelo meso-escalar

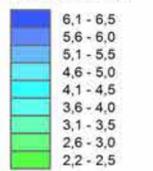
Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016

Meses: MAYO, JUNIO JULIO y AGOSTO



velocidad (m/seg)



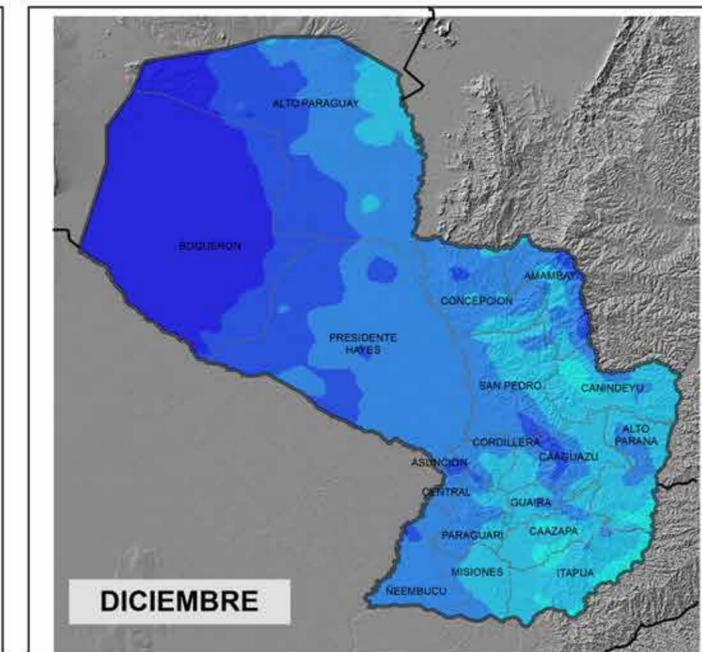
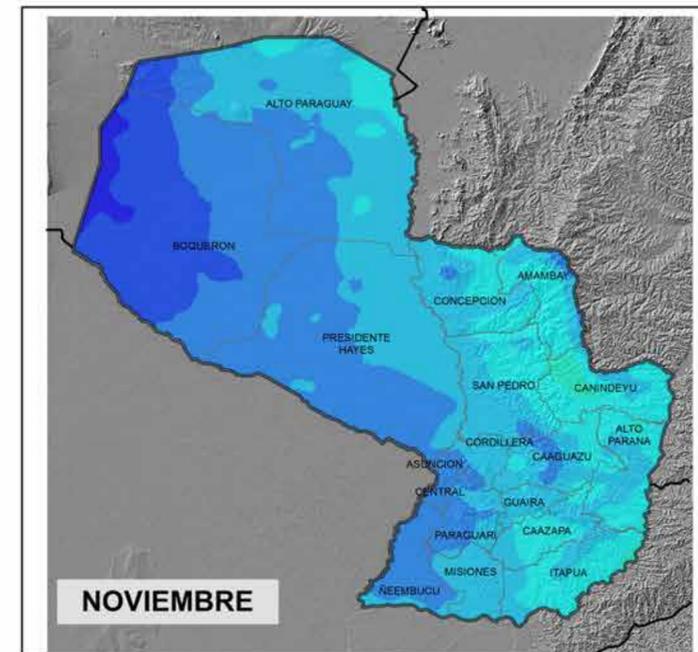
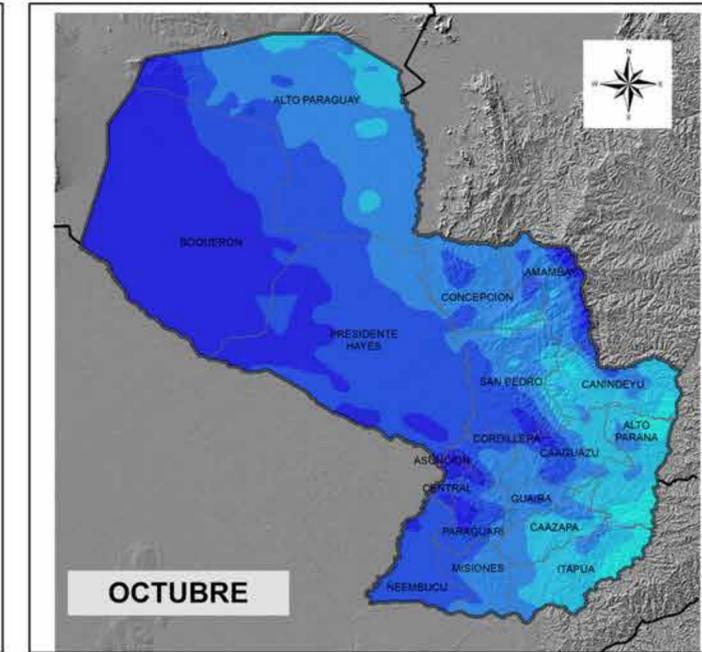
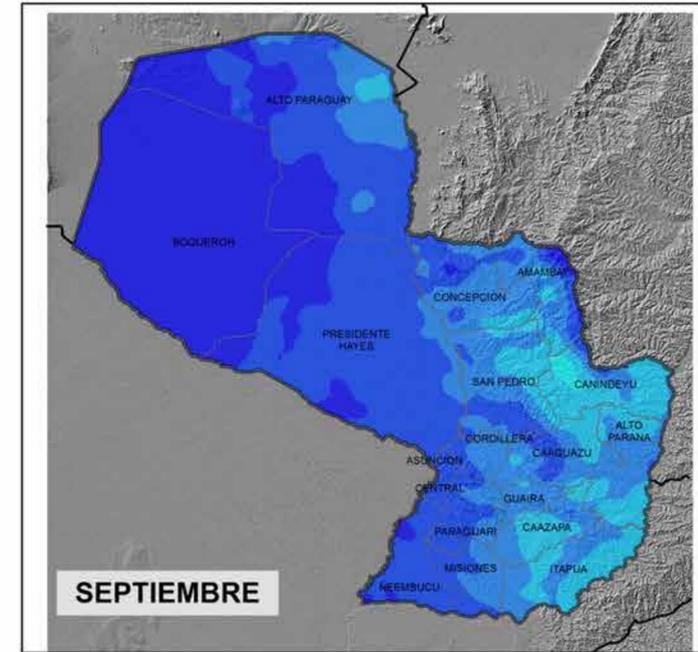
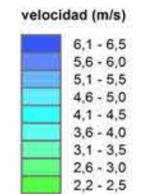
VELOCIDAD DEL VIENTO A 80M MEDIA MENSUAL - AÑO TIPO (m/s)

VELOCIDAD DEL VIENTO, A 80 m, MEDIA MENSUAL según datos del modelo meso-escalar

Fuente:
1) Simulación meteorológica meso-escalar, mediante modelo Weather Research & Forecasting (WRF-ARW) realizada en el Supercomputador Atlante del Gobierno de Canarias (España) con datos provenientes del National Center of Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos.

Proyección geográfica: Transversal de Mercator
Elipsoide: WGS84
Coordenadas: geográficas, graticula c/ 1°
Geoprocesamiento: CIIG/PTI
Septiembre 2016

Meses: SEPTIEMBRE, OCTUBRE, NOVIEMBRE y DICIEMBRE



7. Conclusiones

En cuanto al **potencial energético solar**, se encuentra representado en *energía solar media diaria acumulada en un año por unidad de superficie* ($\text{kWh/m}^2\text{-año}$). Este mapa denota un considerable potencial en todo el territorio, con tendencia positiva hacia el norte del país, registrando cifras máximas que rondan entre los 1850 a 2000 $\text{kWh/m}^2\text{-año}$, especialmente entre los departamentos de Alto Paraguay, Boquerón, Concepción, Amambay, San Pedro, Canindeyú y Alto Paraná.

Por otro lado, se representa el potencial solar en mapas de medias estacionales y mensuales, los cuales presentan un evidente incremento en verano y primavera, especialmente entre los meses de octubre a marzo. En contrapartida, se registran valores mínimos entre los meses de mayo y junio.

En el caso de los mapas de **potencial energético eólico**, atendiendo a que dicho potencial varía de acuerdo a la altura, las cifras se encuentran representadas a 10 m, 50 m y 80 m, en promedios anuales y estacionales como también se indica dirección predominante. Dicho potencial se encuentra representado en *energía eólica por unidad de superficie* (kWh/m^2).

En dichos mapas puede apreciarse un significativo incremento en la predominancia e intensidad de los vientos en el noroeste del país, especialmente entre los departamentos de Boquerón y Alto Paraná, registrando promedios de velocidad de viento que alcanzan los 6,5 m/s y representan entre 3500 y 4500 $\text{kWh/m}^2\text{-año}$, según la Ecuación de Weibull.

En cuanto a los mapas de dirección del viento, los mismos coinciden en que la dirección predominante tiene una tendencia de noroeste a sureste.

8. Apéndices

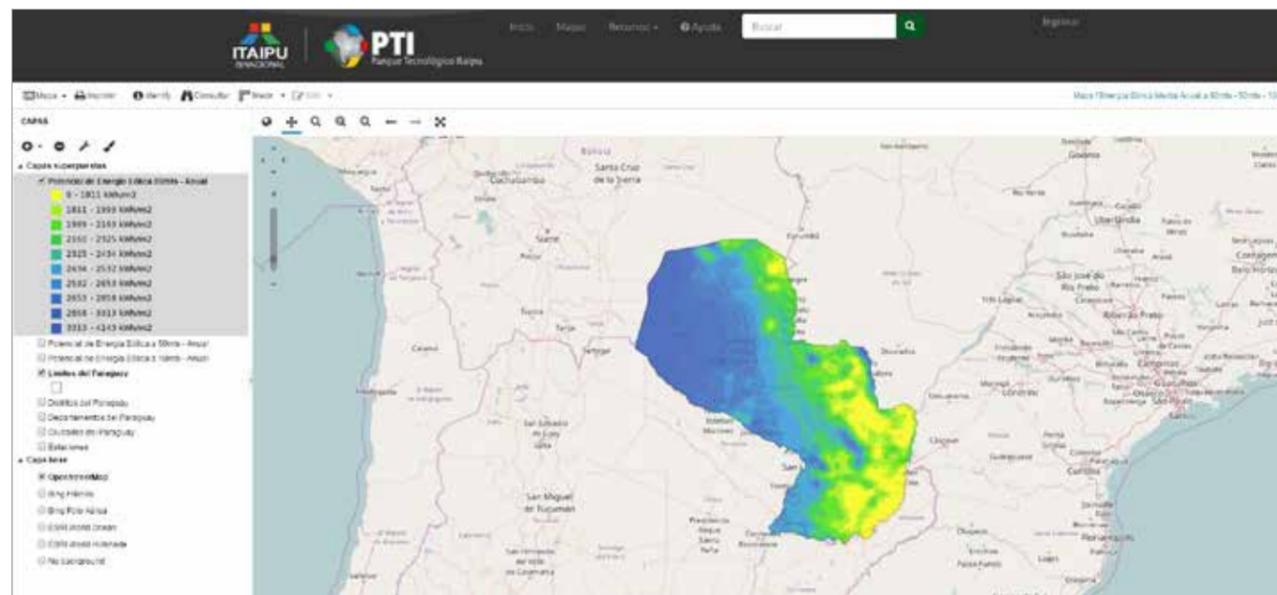


8.1. Atlas solar y eólico online pese.pti.org.py



En este sitio se presenta la primera versión del mapa de recurso energético solar y eólico para Paraguay, realizado a partir de datos de estaciones meteorológicas, un modelo climático de meso-escala y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para integrar datos disponibles y generados al componente espacial, y de esta manera mejorar el grado de visualización, con la fiabilidad suficiente para permitir una primera evaluación del potencial referido.

La dirección del sitio es <http://pese.pti.org.py/> y es una herramienta que presenta un Sistema de Información Geográfica para identificar el potencial energético eólico y solar en todo el territorio nacional, brindando datos como el potencial promedio por año, por estaciones y mensuales.



8.2. Conceptos físicos y matemáticos utilizados

8.2.1. Ley de Hellmann

La velocidad del viento varía con la altura y depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno sobre el cual se desplazan las masas de aire. La variación de velocidad puede representarse mediante la Ley de Hellmann, que tiene la siguiente expresión:

$$(1) \quad V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha$$

En donde V_h es la velocidad del viento a la altura h , V_{10} es la velocidad del viento a 10 metros de altura y α es el exponente de Hellman, que varía con la rugosidad del terreno, cuyos valores vienen indicados en la tabla de abajo:

Valores de rugosidad del terreno

Lugares llanos con hielo o hierba	$\alpha = 0,08 \div 0,12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0,14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0,13 \div 0,16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0,2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0,2 \div 0,26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0,25 \div 0,4$

8.2.2. Potencial y energía del viento

El potencial eólico se puede calcular a través de la fórmula de la Energía Cinética del viento, donde se representa por la siguiente fórmula:

$$(2) \quad E = \frac{1}{2} m V^2$$

La potencia disponible del viento, en un área A , en el intervalo de tiempo Δt , se puede expresar en función de la velocidad del viento V :

$$(3) \quad m = \rho (A e)$$

Donde ρ es la densidad del aire ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$) y e es el espacio recorrido por una partícula viajando a la velocidad V del aire en dirección perpendicular al área A del flujo:

$$(4) \quad e = V \Delta t$$

Reemplazando (4) en (3):

$$(5) \quad m = \rho A V \Delta t$$

Si en (2) se introduce la expresión (5):

$$(6) \quad E = \frac{1}{2} \rho A V^3 \Delta t$$

En esta expresión se supone que la velocidad V se mantiene constante en el intervalo de tiempo Δt . Llevando la expresión al límite para $\Delta t \rightarrow 0$ la suposición anterior puede considerarse válida.

$$(7) \quad dE = \frac{1}{2} \rho A V^3 dt$$

Al integrar los valores de energía para un periodo de tiempo **T** resulta:

$$(8) \quad E = \frac{1}{2} \rho A \int_0^T V^3 \Delta t$$

El promedio de las velocidades al cubo ($\overline{V^3}$) en el tiempo **T** se define por:

$$(9) \quad \overline{V^3} = 1/T \int_0^T V^3 dt$$

Y puede utilizarse si se conoce la curva $V = f(t)$

En el caso de observaciones puntuales se utilizan en el cálculo de la velocidad cúbica media la expresión:

$$(10) \quad \overline{V^3} = (1/N) \sum_{i=1}^N V_j^3$$

Donde **N** es la cantidad de observaciones horarias obtenidas durante el periodo **T** considerando.

Introduciendo (9) ó (10) en (8), la energía y la potencia del viento por unidad de área para ese intervalo de tiempo son:

$$(11) \quad (E/A) = \frac{1}{2} \rho \overline{V^3} T$$

$$(12) \quad (P/A) = \frac{1}{2} \rho \overline{V^3}$$

Haciendo uso de la ecuación (11) se obtiene la energía media por unidad de área para el período **T** de interés.

8.2.3. Distribución de Weibull

La distancia estadística de Weibull se caracteriza por dos parámetros: uno de escala (**C**, medido en m/s) y el otro de forma (**k**, adimensional). La frecuencia de ocurrencia de una velocidad y está representada matemáticamente por:

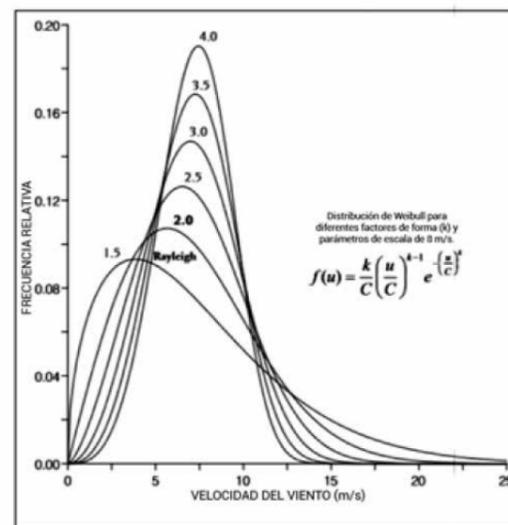
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}$$

En el gráfico de abajo se puede apreciar la Distribución de Weibull para diferentes factores de forma. En caso de que el factor de forma sea igual a 2, se deriva la Distribución de Rayleigh, caracterizada por el factor de escala (**C**, medido en m/s), que representa, en este caso, la velocidad media del viento.

$$f(u) = \frac{2}{c} \left(\frac{u}{c}\right) e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^2}$$

Para ser más general, la Distribución de Weibull presenta mejor la estadística de la velocidad del viento, una vez que el factor de forma se puede asumir valores bastantes superiores a 2.

Distribución de Weibull para diferentes factores de forma



La función de la densidad de probabilidad acumulativa, **F(u)**, asociada a la probabilidad de la velocidad del viento sea mayor que lo que se expresa por:

$$F(u) = \int_0^u f(u) du = CT \left(1 + \frac{1}{K}\right)$$

Donde la función Gama (G) está definida por:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$$

En la tabla de abajo se presenta la función Gama para diversos valores de **k**.

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (\text{W/m}^2)$$

Función Gama para diferentes valores de k

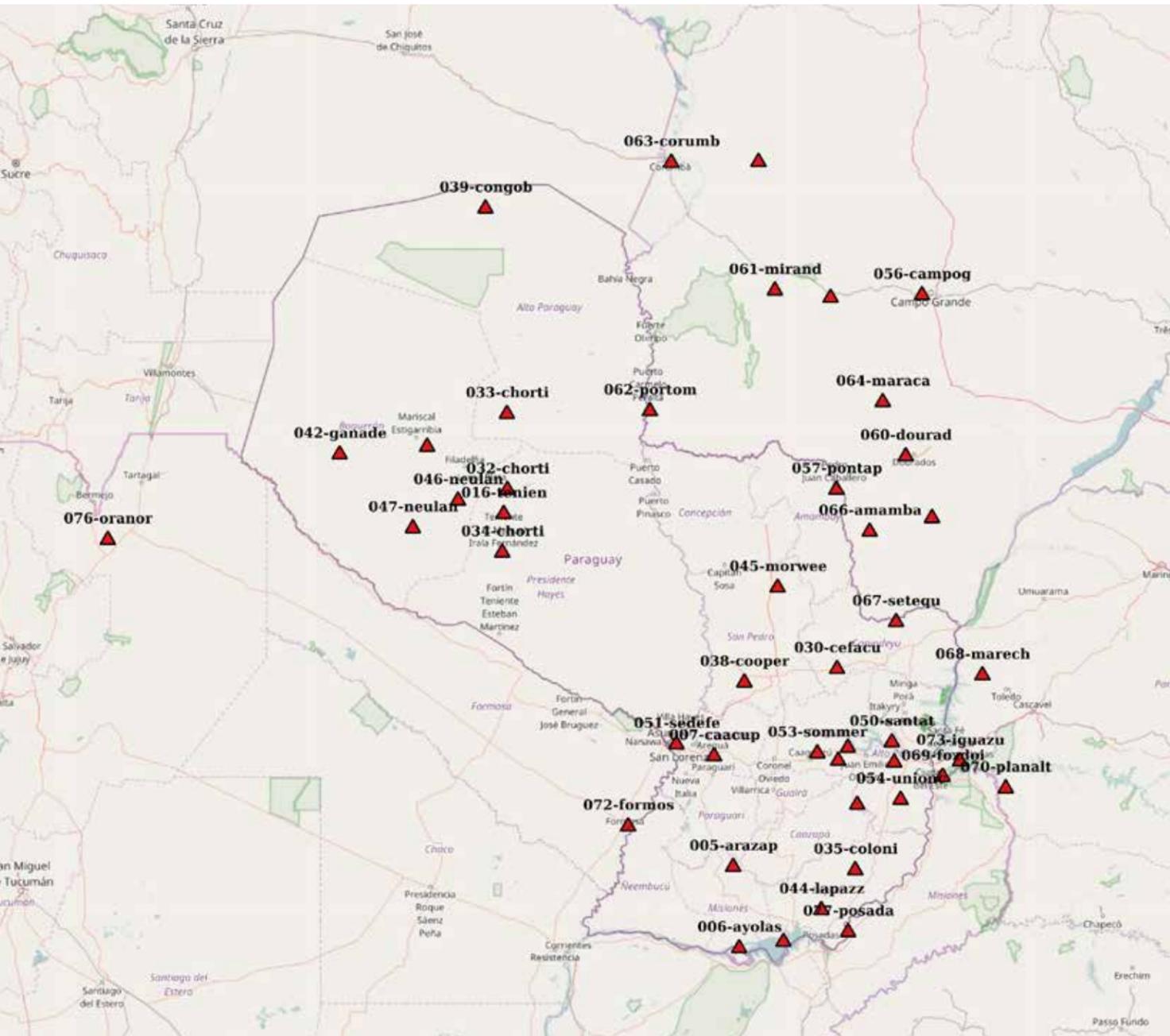
1,6	0,896574	2,5	0,887264
1,7	0,892245	2,6	0,888210
1,8	0,889287	2,7	0,889283
1,9	0,887363	2,8	0,890451
2,0	0,886227	2,9	0,891690
2,1	0,885694	3,0	0,892980
2,2	0,885625	3,5	0,899747
2,3	0,885915	4,0	0,906402
2,4	0,886482	5,0	0,918169

Variación del flujo de potencia eólica con una velocidad media del viento y el factor de forma Weibull (k)

Weibull k	1.75	2.00	2.25	2.50	3.00	4.00
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	4.2	4.4	4.6	4.7	4.9	5.1
150	4.8	5.1	5.2	5.4	5.6	5.9
200	5.3	5.6	5.8	5.9	6.2	6.4
250	5.7	6.0	6.2	6.4	6.6	6.9
300	6.1	6.4	6.6	6.8	7.1	7.4
350	6.4	6.7	6.9	7.1	7.4	7.7
400	6.7	7.0	7.3	7.5	7.8	8.1
450	6.9	7.3	7.5	7.8	8.1	8.4
500	7.2	7.5	7.8	8.0	8.4	8.7
600	7.6	8.0	8.3	8.5	8.9	9.3
700	8.0	8.4	8.7	9.0	9.3	9.8
800	8.4	8.8	9.1	9.4	9.8	10.2
900	8.7	9.2	9.5	9.8	10.2	10.6
1000	9.0	9.5	9.8	10.1	10.5	11

19 Rohatgi, J.S. y Nelson, V. (1994). Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power. Alternative Energy Institute - West Texas A&M University.

8.3. Estaciones meteorológicas empleadas por el proyecto PESE-PY en el Paraguay y países limítrofes



Fuente: Atlas solar y eólico online. <http://pese.pti.org.py/maps/96/view>

No.	Cod PESE-PY	Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Localidad	Departamento	País	Cubrimiento temporal de la dirección y velocidad del viento	Cubrimiento temporal de la irradiación solar
1	005-arazap	Arazape	-26.542352	-56.918258	74	Arazape	Misiones	Paraguay	2013 - 2015	2013 - 2014 - 2015
2	006-ayolas	Ayolas	-27.386256	-56.847938	66	Junta Municipal de Ayolas	Misiones	Paraguay	2015	No
3	007-caacup	Caacupé	-25.385878	-57.140766	268	Caacupé	Cordillera	Paraguay	2012 - 2015	2014 (5 meses) - 2015
4	016-tenien	Teniente Irala Fernández	-22.813960	-59.585729	119	Pai Pukú - Irala Fernández	Pdte. Hayes	Paraguay	2012 - 2013 - 2015	2015
5	023-sarcos	San Cosme y San Damián	-27.320149	-56.332048	125	San Cosme y San Damián	Itapúa	Paraguay	No	2014 (8 meses) - 2015
6	029-bergh	Berghal	-25.2965	-55.583	262	R. Oriental	Caaguazú	Paraguay	No	2014 (8 meses) - 2014 (10 meses) - 2015
7	030-cefacu	Cefapar	-24.4652	-55.7086	187	R. Oriental	Canindeyú	Paraguay	No	2015
8	031-cooper	Choritzer (Campo León)	-25.4523	-55.0455	266	R. Oriental	Alto Paraná	Paraguay	No	2013 (9 meses) - 2014 (11 meses) - 2015
9	032-chorti	Choritzer (Las Palmas)	-22.5552	-59.5428	121	R. Occidental	Pdte. Hayes	Paraguay	No	2013 - 2014 - 2015
10	033-chorti	Choritzer (Paratodo)	-21.7365	-59.5486	125	R. Occidental	Alto Paraguay	Paraguay	No	2013 - 2014 - 2015
11	034-chorti	Colonias Unidas (Edelira)	-23.226	-59.6026	119	R. Occidental	Pdte. Hayes	Paraguay	No	2013 - 2014
12	035-coloni	Cooperativa Friesland	-26.5766	-55.4975	299	R. Oriental	Itapúa	Paraguay	No	2013 - 2014 - 2015
13	038-cooper	Est. Congo Belga	-24.6085	-56.7873	104	R. Oriental	San Pedro	Paraguay	No	2013 - 2014 - 2015
14	039-congob	Fernheim (Campo)	-19.5	-59.7981	153	R. Occidental	Alto Paraguay	Paraguay	No	2015
15	040-ferihe	Fernheim (Campo)	-22.0904	-60.4768	161	R. Occidental	Boquerón	Paraguay	No	2013 (11 meses) - 2014 (11 meses)
16	042-ganade	Canadega (Esperanza)	-22.1736	-61.4947	209	R. Occidental	Boquerón	Paraguay	No	2014 (3 meses) - 2015
17	044-lapazz	La Paz (Itapúa)	-26.9908	-55.8921	213	R. Oriental	Itapúa	Paraguay	No	2013 - 2015
18	045-monwee	Monweena	-23.6	-56.4	207	R. Oriental	San Pedro	Paraguay	No	2013 (6 meses) - 2014 (10 meses)
19	046-neulan	Neuland (Centro)	-22.6714	-60.1175	138	R. Occidental	Boquerón	Paraguay	No	2013 - 2014 - 2015
20	047-neulan	Neuland (Prizal)	-22.9658	-60.6426	158	R. Occidental	Boquerón	Paraguay	No	2013
21	048-pindoo	Pindo	-25.8932	-55.4738	301	R. Oriental	Alto Paraná	Paraguay	No	2013 - 2014 (9 meses) - 2015
22	050-santat	Santa Teresa	-25.2396	-55.0721	249	R. Oriental	Caaguazú	Paraguay	No	2013 (4 meses) - 2014 (5 meses) - 2015
23	051-sedefe	Sede Fecoprod	-25.2616	-57.5784	74	R. Oriental	Central	Paraguay	No	2013 - 2014
24	052-sommer	Sommerfeld (Caaguazú)	-25.4337	-55.6958	262	R. Oriental	Caaguazú	Paraguay	No	2014 (5 meses) - 2015
25	053-sommer	Sommerfeld (Caaguazú)	-25.3555	-55.9386	301	R. Oriental	Caaguazú	Paraguay	No	2013 - 2014 - 2015
26	054-unionc	Unión Curupayty	-25.8425	-54.9712	257	R. Oriental	Alto Paraná	Paraguay	No	2013 - 2014 - 2015
27	056-campog	Campo Grande-A702	-20.447195	-54.722615	528	Campo Grande	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
28	057-pontap	Ponta Pora-A703	-22.552448	-55.716317	668	Ponta Pora	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
29	058-nhumir	Nhumirim-A717	-18.988681	-56.622868	102	Nhumirim	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
30	059-aquida	Aquidauana-A719	-20.475420	-55.784006	151	Aquidauana	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
31	060-dourad	Dourados-A721	-22.193920	-54.911355	463	Dourados	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
32	061-mirand	Miranda-A722	-20.395950	-56.431736	132	Miranda	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
33	062-portom	Porto Murtinho-A723	-21.705850	-57.886546	79	Porto Murtinho	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
34	063-corumb	Corumbá-A724	-18.996667	-57.6375	112	Corumbá	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
35	064-maraca	Maracajú-A731	-21.609036	-55.177531	389	Maracajú	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
36	065-juti	Juti-A749	-22.857210	-54.605634	375	Juti	Mato Grosso del Sur	Brasil	No	2009
37	066-amamba	Amambai-A750	-23.002530	-55.329357	434	Amambai	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009 (11 meses)	2009 (11 meses)
38	067-setequ	Sete Quedas-A751	-23.966893	-55.024227	398	Sete Quedas	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
39	068-marech	Marechal Candido Rondón-A820	-24.533303	-54.019248	392	Marechal Candido Rondón	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
40	069-fozdoi	Foz do Iguaçu-A846	-25.601834	-54.485065	235	Foz do Iguaçu	Paraná	Brasil	2009	2009
41	070-planalt	Planalto-A855	-25.721863	-53.747920	399	Planalto	Mato Grosso del Sur	Brasil	2009	2009
42	072-formos	Formosa	-26.12	-58.14	60	Aeropuerto Formosa	Formosa	Argentina	2009 (Velocidad viento)	No
43	073-iguazu	Iguazú	-25.44	-54.28	270	Aeropuerto Iguazu	Misiones	Argentina	2009 (Velocidad viento)	No
44	076-oranor	Oran	-23.09	-64.19	357	Aeropuerto Orán	Salta	Argentina	2009 (Velocidad viento)	No
45	077-posada	Posadas	-27.22	-55.58	125	Aeropuerto Posadas	Misiones	Argentina	2009 (Velocidad viento)	No

8.4. Validación de la modelación meteorológica realizada por el modelo WRF-ARW

Este apéndice presenta la validación de la modelación numérica realizada por el modelo meteorológico WRF-ARW²⁰ para la zona geográfica de Paraguay. El primer apartado presenta la configuración establecida para las simulaciones realizadas por el modelo meteorológico. En el segundo se establecen los parámetros de la validación. El tercer apartado, presenta la metodología de validación con los resultados para las variables de viento y radiación solar, en función a la variación temporal para el año tipo. El último realiza la discusión de los resultados y presenta la comparación con estudios previos.

8.4.1. Configuración del modelo meteorológico WRF-ARW

La configuración establecida para ejecutar las simulaciones del modelo meteorológico WRF-ARW comprende las parametrizaciones físicas, definición de los dominios espaciales de trabajo y las resoluciones espacio-temporales, definidas en base a trabajos de investigación para simulación meteorológica del viento (Jorba, 2005) y la radiación solar (Rincón, 2013). Por lo tanto, el cuadro 1 resume las características principales de las parametrizaciones físicas utilizadas en las simulaciones del modelo WRF-ARW para el presente estudio.

8.4.2. Parámetros de validación estadística

La validación de las variables meteorológicas consiste en la evaluación de la medida de precisión del valor modelado en relación al grado de correspondencia

con observaciones medidas en estaciones meteorológicas. La *International Energy Agency Solar Heating and Cooling*, a través del proyecto MESOR²¹, establece las directrices para la utilización de los parámetros de calidad en la validación de variables energéticas provenientes de la meteorología mediante modelización (Beyer, *et al.*, 2009).

La validación de las variables simuladas para el presente estudio, se realiza mediante los siguientes parámetros estadísticos (Pielke, 1984): el error absoluto medio (*Mean Absolute Error*, MAE), el Bias o desviación media (*Mean Bias Error*, MBE) y el error cuadrático medio o error global (*Root Mean Square Error*, RMSE). De manera similar, se utilizan los valores relativos porcentuales del MAE, MBE y el RMSE, denominados *Relative Mean Absolute Error* (rMAE), *Relative Mean Bias Error* (rMBE) y *Relative Root Mean Square Error* (rRMSE). Estos estadísticos permiten medir la precisión de la simulación. Por precisión se entiende como el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores simulados y valores observados. Por su parte, los valores observados son aquellos obtenidos en estaciones de medidas meteorológicas.

La validación de las variables del viento y radiación solar también incluye la utilización de parámetros de distribución estadística que permiten analizar la variación de la posición central (mediana, 50%) y las medidas de posición no central como el primer cuartil (25%) y el tercer cuartil (75%). Por lo tanto, para la comparación de variables meteorológicas de medidas de estaciones se ha calculado el MAE, Bias, RMSE, rMAE, rMBE, rRMSE y valores de distribución estadística para cada día, teniendo así una evolución temporal del error que permite analizar el comportamiento de la simulación para el año meteorológico tipo.

Características de las parametrizaciones físicas utilizadas para las simulaciones del modelo WRF-ARW en Paraguay

Tipo de parametrización	Esquema	Características principales
Microfísica	WSM3-class	Diagnóstico de la concentración de hielo basado en la estimación de su masa. Implementa tres categorías para definir el estado del agua: vapor, cloud water/ice y rain/snow (Hong, <i>et al.</i> , 2004).
Cumulus	Kain-Fritsch	Implementa un modelo de nube simple con las corrientes húmedas ascendentes y descendentes, incluyendo efectos como el arrastre y la microfísica simple (Kain y Fritsch, 1993).
Capa Superficial	Monin-Obukhov	Incluye parametrizaciones de la subcapa viscosa sobre la superficie del agua y la superficie terrestre (Monin y Obukhov, 1954; Janjic, 2002).
Modelo Tierra-Superficie	Noah LSM	Desarrollado en conjunto por NCAR y NCEP (Chen y Dudhia, 2001), es un modelo que posee la capacidad de estimar la temperatura del suelo (en cuatro capas), la humedad, la predicción de la cubierta de nieve, la evapotranspiración, el drenaje del suelo y la escorrentía. Además, tiene en cuenta las categorías de la vegetación, la fracción mensual de vegetación y las texturas del suelo. El esquema proporciona los flujos de calor sensible y latente con el esquema de la capa límite.
Capa límite planetaria (PBL)	Yonsei University	Hong y Pan. (1996) proponen utilizar el término del gradiente para representar los flujos debido a los gradientes no locales.
Radiación atmosférica	RRTM-LW para radiación de onda larga	Mlawer, <i>et al.</i> (1997) propone el método <i>correlated-k</i> , el cual utiliza tablas preestablecidas de vapor de agua, ozono, dióxido de carbono y trazas de gases. También realiza la contabilización del espesor óptico de las nubes.
	MM5-SW para radiación de onda corta	Integración simple del flujo solar descendente que representa la dispersión para un cielo claro, la absorción del vapor de agua, y el albedo y la absorción producida por las nubes (Lacis y Hansen, 1974; Dudhia, 1989).

²⁰ Rincón, A. (2015). Validación anual de una modelización meteorológica del modelo WRF-ARW para evaluar el potencial del recurso eólico y solar en Paraguay. Reportes técnicos de consultoría especializada para proyecto PESE-PY - Fundación Parque Tecnológico de Itaipu (PTI-PY), Hernandarias, Paraguay.

²¹ Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge (www.mesor.net).

Características de las estaciones meteorológicas utilizadas para la validación del modelo WRF-ARW en la zona geográfica de Paraguay

Nº.	Código PESE-PY	Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Departamento	País
1	038-cooper	Cooperativa Friesland	-24.6085	-56.7873	104	San Pedro	Paraguay
2	046-neulan	Neuland (Centro)	-22.6714	-60.1175	138	Boquerón	Paraguay
3	057-pontap	Ponta Pora-A703	-22.552448	-55.716317	668	Mato Grosso del Sur	Brasil
4	062-portom	Porto Murtinho-A723	-21.705850	-57.886546	79	Mato Grosso del Sur	Brasil
5	069-fozdoi	Foz do Iguacu-A846	-25.601834	-54.483065	235	Paraná	Brasil

8.4.3. Metodología de la validación del modelo meteorológico WRF-ARW

La metodología empleada para las validaciones es la verificación celda-punto, utilizada por trabajos de investigación desarrollados para validación de modelos meteorológicos y de calidad de aire en el grupo de Ciencias de la Tierra del Centro Nacional de Supercomputación de España (Rincón, 2013; Basart, *et al.*, 2012; Pay, 2011; Jorba, 2005). En dicha metodología se comparan observaciones puntuales con los valores de las celdas donde se sitúan las observaciones.

En nuestro caso, no se analizan todos los puntos del dominio de Paraguay, sólo se centra en los puntos donde hay observación. Esta metodología supone que los dos valores son comparables, aunque la observación es un valor temporal y espacialmente puntual, a diferencia del resultado modelizado, que es un valor temporal y espacialmente promediado. La metodología celda-punto compara los resultados del modelo con las observaciones. Para realizar la comparación con las observaciones se escogen los datos del modelo correspondientes a la celda más próxima a la localización de la observación. Cabe mencionar que no se realizan interpolaciones con los datos del modelo que requieran un ajuste al punto específico de la observación.

Por otra parte, la problemática que se plantea al analizar la calidad de las simulaciones con un análisis

estadístico, es que los resultados de la simulación, aunque presenten un buen comportamiento, los parámetros estadísticos podrían ser poco representativos debido a un decalaje temporal en la simulación de los fenómenos dentro del dominio. No obstante, para intentar detectar dichos casos inciertos, se compara puntualmente la evolución de las variables para algunas estaciones significativas. En nuestro caso se han extraído de la base de datos de las estaciones de medida del proyecto, cinco estaciones representativas que muestran un elevado cubrimiento temporal de las variables de viento y Sol. El cuadro 2 presenta las estaciones seleccionadas para la validación de las simulaciones realizadas por el modelo WRF-ARW.

Datos disponibles para la validación:

Para la validación de la simulación meteorológica se utilizaron medidas en superficie tratadas y analizadas previamente. Aunque el objeto de la validación se centra en las variables de viento y radiación solar, se incluyen adicionalmente otras variables meteorológicas. Por lo tanto, la información disponible en cada una de las estaciones de medida corresponde a:

- Estación 038 - cooper:** irradiancia solar horaria en $W \cdot m^{-2}$
- Estación 046 - neulan:** irradiancia solar horaria en $W \cdot m^{-2}$
- Estación 057 - pontap:** velocidad del viento horaria a 10m en $m \cdot s^{-1}$, dirección del viento horaria a 10m

en $^{\circ}$, irradiancia solar horaria en $W \cdot m^{-2}$, temperatura del aire horaria en $^{\circ}C$, presión atmosférica horaria en hPa y humedad relativa horaria en %.

4. Estación 062 - portom: velocidad del viento horaria a 10m en $m \cdot s^{-1}$, dirección del viento horaria a 10m en $^{\circ}$, irradiancia solar horaria en $W \cdot m^{-2}$, temperatura del aire horaria en $^{\circ}C$, presión atmosférica horaria en hPa y humedad relativa horaria en %.

5. Estación 069 - fozdoi: velocidad del viento horaria a 10m en $m \cdot s^{-1}$, dirección del viento horaria a 10m en $^{\circ}$, irradiancia solar horaria en $W \cdot m^{-2}$, temperatura del aire horaria en $^{\circ}C$, presión atmosférica horaria en hPa y humedad relativa horaria en %.

8.4.4. Resultados de la validación de las variables meteorológicas simuladas de viento y Sol

Con el objeto de facilitar la visualización de la información proporcionada por la validación, se presentan los resultados en base diaria para las variables de dirección y velocidad de viento y radiación solar. Por un lado, los registros horarios de velocidad y dirección del viento, son promediados a registros diarios. Por otro lado, los registros de potencia solar horaria expresada mediante la irradiancia solar es convertida a energía solar diaria denominada irradiancia solar.

En síntesis, los resultados de la validación diaria de velocidad y dirección de viento e irradiancia solar del modelo meteorológico WRF-ARW para las 5 estaciones seleccionadas en el área geográfica de Paraguay, se presentan a continuación.

En términos generales, se destacan resultados favorables de los parámetros estadísticos con valores cercanos al ideal (igual a cero) para las variables de viento e irradiancia solar (marcados en color azul). En

Resultados de los parámetros estadísticos para la validación anual de las simulaciones meteorológicas de viento y Sol para Paraguay

Parámetro	Velocidad ($m \cdot s^{-1}$)	Dirección ($^{\circ}$)	Irradiancia ($MJ \cdot m^{-2}$)
1. Estación 038 - cooper			
MAE	-	-	5.2
MBE	-	-	-1.7
RMSE	-	-	6.5
rMAE (%)	-	-	29.8
rMBE (%)	-	-	-9.9
rRMSE (%)	-	-	37.1
2. Estación 046 - neulan			
MAE	-	-	5.1
MBE	-	-	-1.3
RMSE	-	-	6.4
rMAE (%)	-	-	29.2
rMBE (%)	-	-	-7.7
rRMSE (%)	-	-	36.7
3. Estación 057 - pontap			
MAE	1.6	77.9	7.4
MBE	1.4	-2.7	-0.7
RMSE	2.0	97.1	9.1
rMAE (%)	65.3	57.6	44.9
rMBE (%)	58.0	-2.0	-3.9
rRMSE (%)	80.6	71.8	55.2
4. Estación 062 - portom			
MAE	1.6	58.9	6.8
MBE	1.4	-12.5	-0.3
RMSE	1.9	74.8	8.6
rMAE (%)	85.1	38.0	37.6
rMBE (%)	75.3	-8.1	-1.9
rRMSE (%)	102.1	48.3	47.9
5. Estación 069 - fozdoi			
MAE	1.1	55.4	7.9
MBE	-0.1	-2.0	-0.1
RMSE	1.4	69.4	10.0
rMAE (%)	40.7	38.5	46.3
rMBE (%)	19.0	-1.4	-0.3
rRMSE (%)	51.4	48.3	59.0
Promedio total de estaciones			
MAE	1.4	64.0	6.5
MBE	0.9	-5.8	-0.8
RMSE	1.7	80.4	8.1
rMAE (%)	63.7	44.7	37.6
rMBE (%)	50.1	-3.8	-4.7

concreto para el promedio de todas las estaciones, el MBE (Bias) de la velocidad del viento, la dirección y la irradiación solar presentan los siguientes resultados: $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $-5,8^\circ$ y $-0,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente.

Por su parte, el MAE y RMSE demuestran errores absolutos y globales poco significativos entre las diferencias de las observaciones y los valores simulados. Es importante destacar una particularidad en la estimación del error para la dirección del viento, debido a que dicha variable es de tipo cíclico y bidireccional. Para analizar por separado la dirección, se debería utilizar la diferencia entre la dirección simulada y la dirección observada "v", ya que se pueden tener dos valores, uno positivo y otro negativo. Al trabajar con el valor mínimo, los resultados al promediar los estadísticos no incluirán una desviación por método de cálculo que no represente la diferencia real entre las medidas.

Por tal motivo, en el análisis de la incertidumbre de la dirección de viento simulada, destaca una leve tendencia negativa del modelo en la estimación de la dirección del viento con un Bias de $-5,8^\circ$ ($r\text{MBE}=3,8\%$) y un MAE de 64° ($r\text{MAE}=44,7\%$) para todas las estaciones a lo largo del año.

Resultados para la velocidad del viento a 10m de altitud:

La figura 1 presenta la evolución diaria de la variable para todas las estaciones a lo largo del año. Por su parte, la figura 2 presenta la evolución interhoraria de la velocidad promedio diaria del viento simulado y observado en las cinco estaciones analizadas para el año tipo. La comparación del rango horario intercuartil para el ciclo diario del año en cada estación, se define por las dimensiones del rectángulo donde el límite inferior corresponde al primer cuartil 25%, la línea central negra a la mediana (50%) y el límite superior al tercer cuartil 75%. Las líneas punteadas indican los valores atípicos máximos y mínimos.

La figura 2a, que corresponde a la estación 057-pontap y la figura 2b de la estación 062-portom, permiten determinar la sobreestimación del modelo para la primera mitad del ciclo diario (de 1 a 13 horas). Por el contrario, para la segunda mitad del ciclo diario en las mismas estaciones y para la estación 069-fozdoi (figura 2c), se observa una favorable estimación del modelo para todo el rango horario del año.

Resultados para la dirección del viento a 10m de altitud:

La figura 3 presenta la evolución anual de los valores comparados para la dirección del viento en las estaciones analizadas. De acuerdo a lo comentado anteriormente sobre la particularidad de los parámetros estadísticos para la dirección de viento modelada, los gráficos permiten corroborar una tendencia favorable en la estimación para todas las estaciones.

La evolución de la estimación a lo largo del año se complementa con los diagramas de cajas de la figura 4. Las estaciones 057-pontap (figura 4a) y 069-fozdoi (figura 4c), con un Bias de -2° , se debe a la diferencia que presenta el límite superior de los datos observados para el tercer cuartil 75% (figuras 4a y 4c) durante la primera mitad del ciclo diario (de 1 a 12 horas). Sin embargo, la mediana horaria que representa la distribución del 50% de los datos para el mismo rango horario, presenta un comportamiento similar entre la simulación y la observación.

Por su parte, la estación 062-portom (figura 4b) con un Bias de $-12,5^\circ$, demuestra una acusada subestimación del modelo para la primera mitad del ciclo diario. La razón se debe a que la mediana de los valores modelizados es inferior a la mediana de las observaciones. Cabe resaltar, que en base a los rangos intercuantiles de todas las estaciones analizadas, las estimaciones del modelo para la segunda mitad del día (de 14 a 23 horas) son significativas y demuestran un grado satisfactorio de reproducción de la dirección del viento.

Figura 1: Evolución anual de la velocidad del viento simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación instaladas a 10 metros de altura

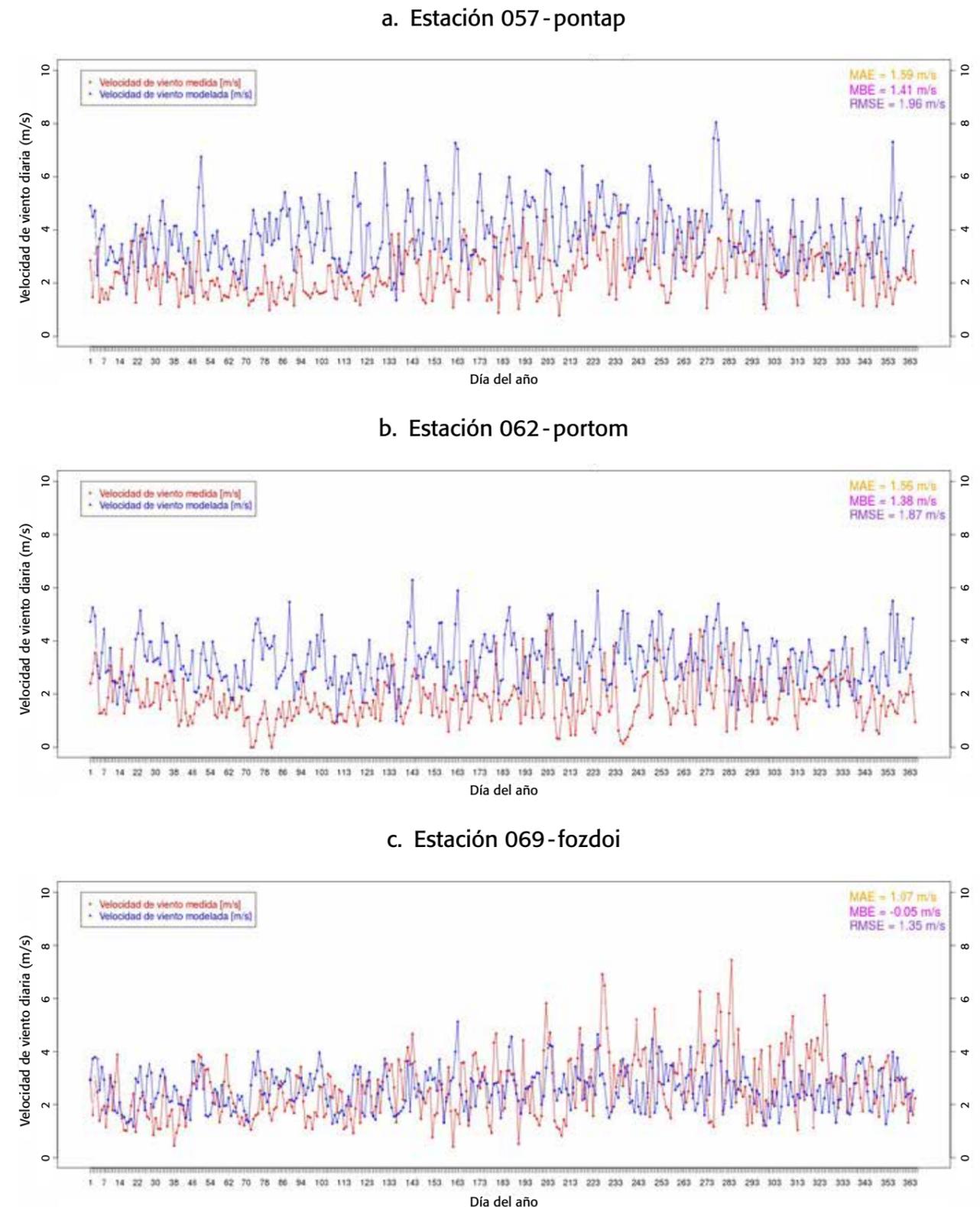


Figura 2: Diagrama de cajas de la velocidad del viento simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación

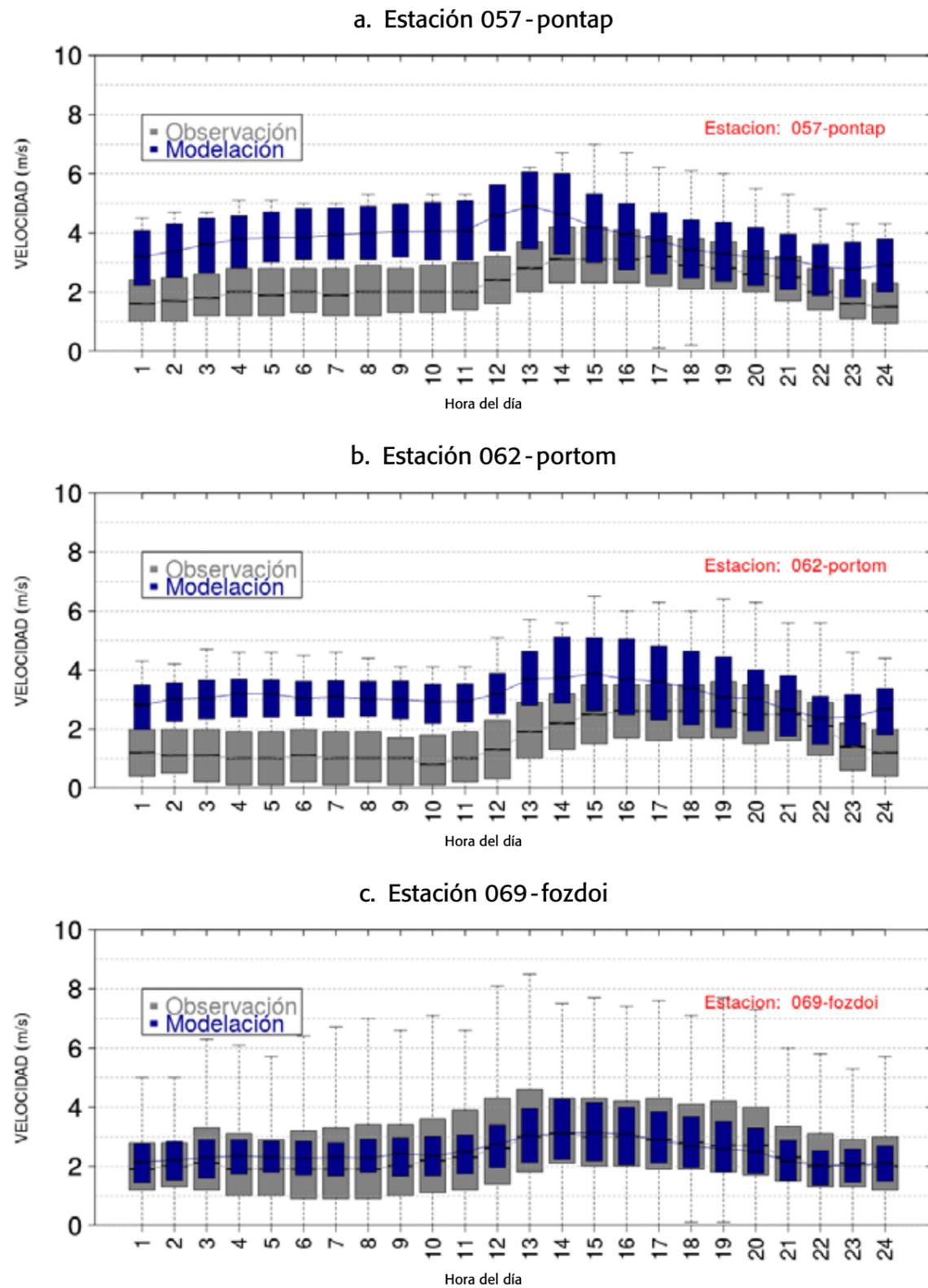


Figura 3: Evolución anual de la dirección del viento simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación

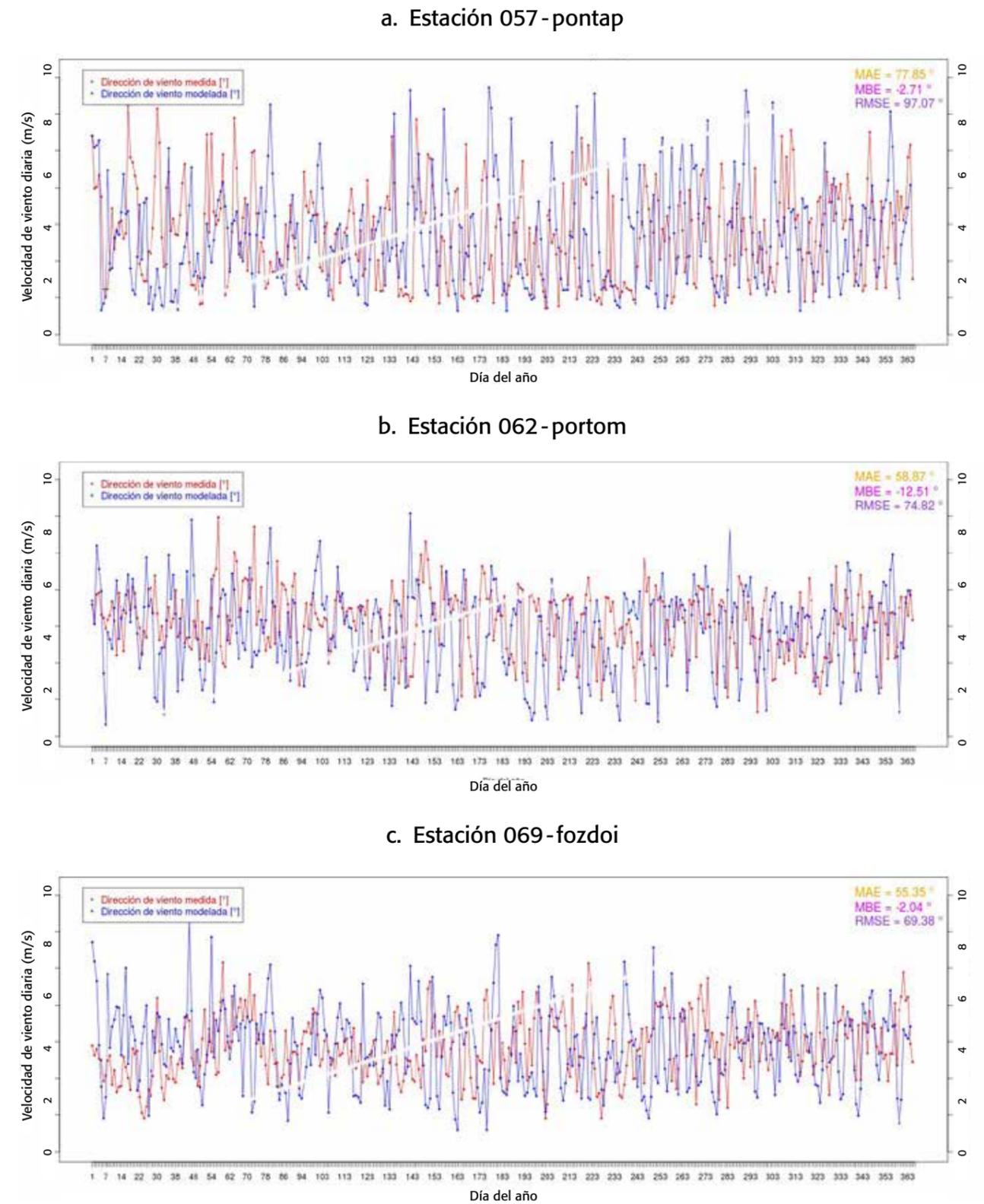


Figura 4: Diagrama de cajas de la dirección del viento simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación

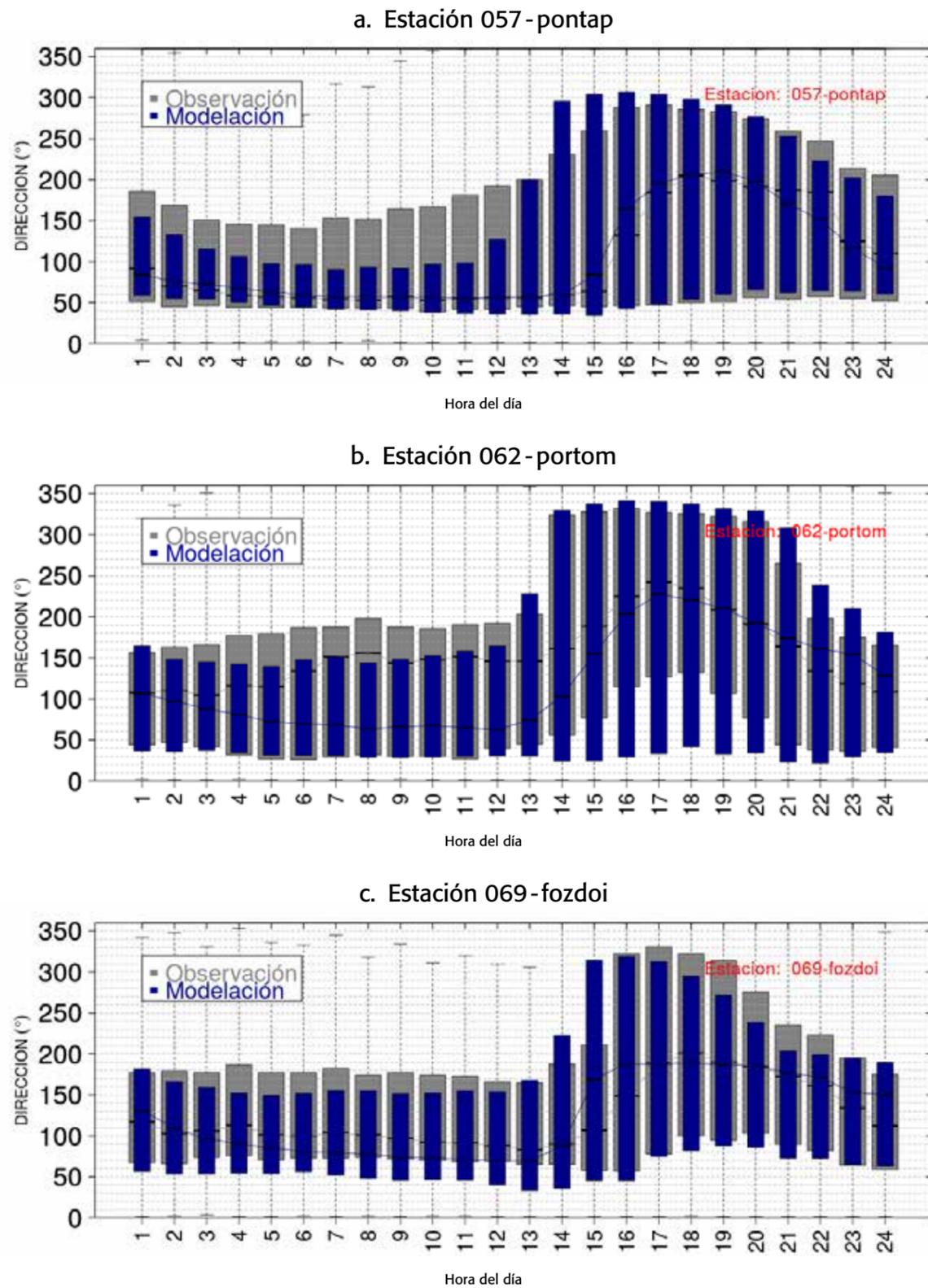


Figura 5: Evolución anual de la irradiación solar simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación

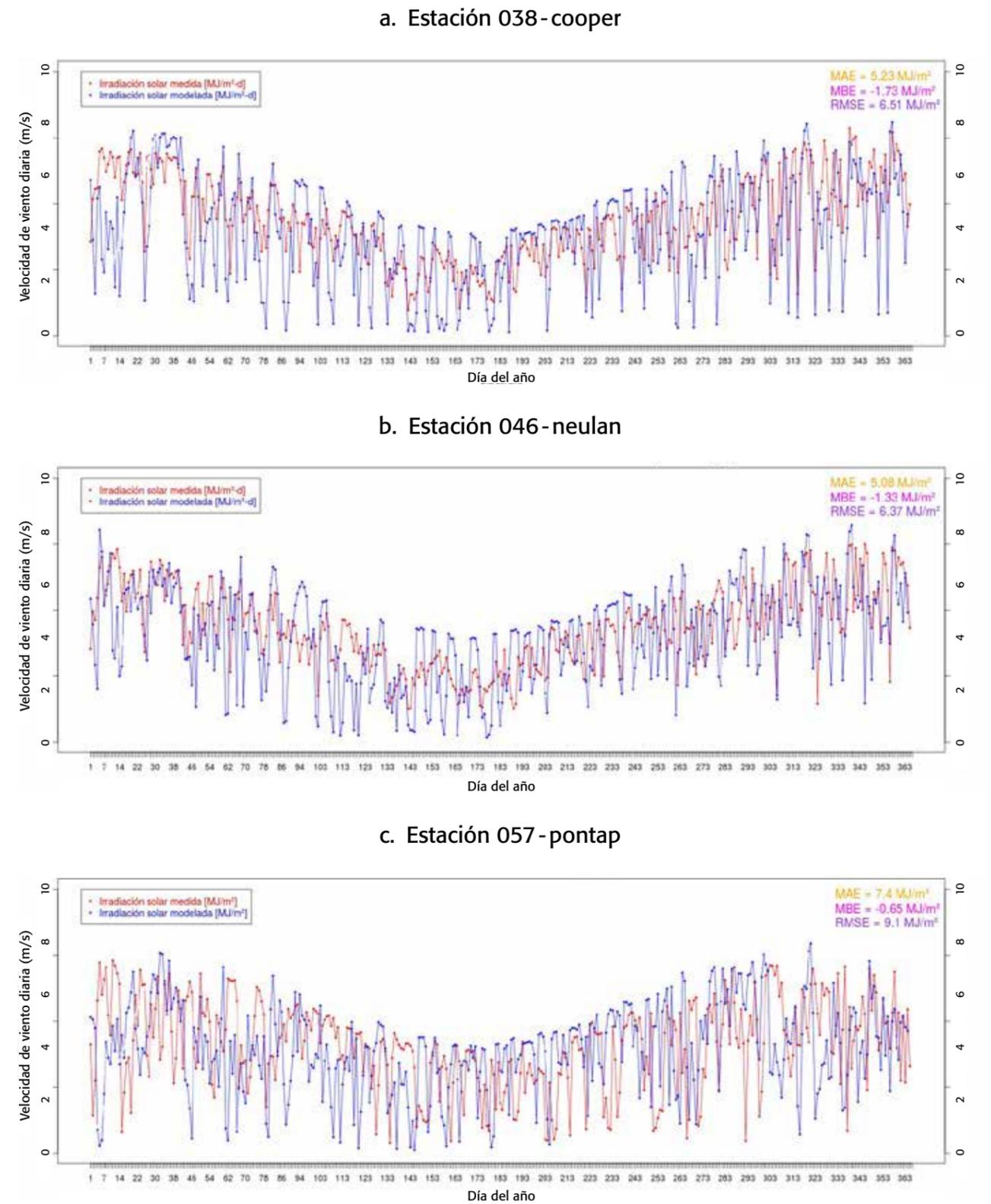
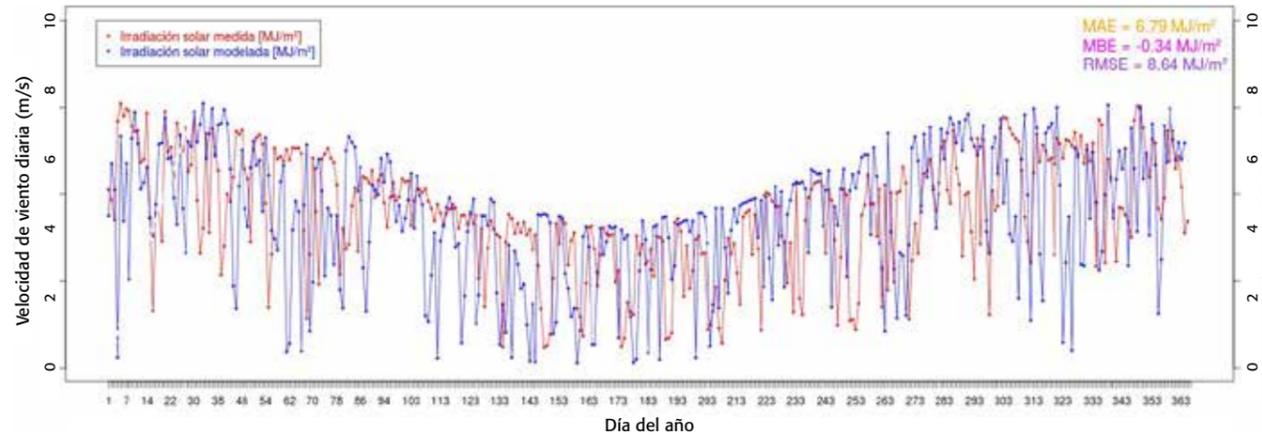
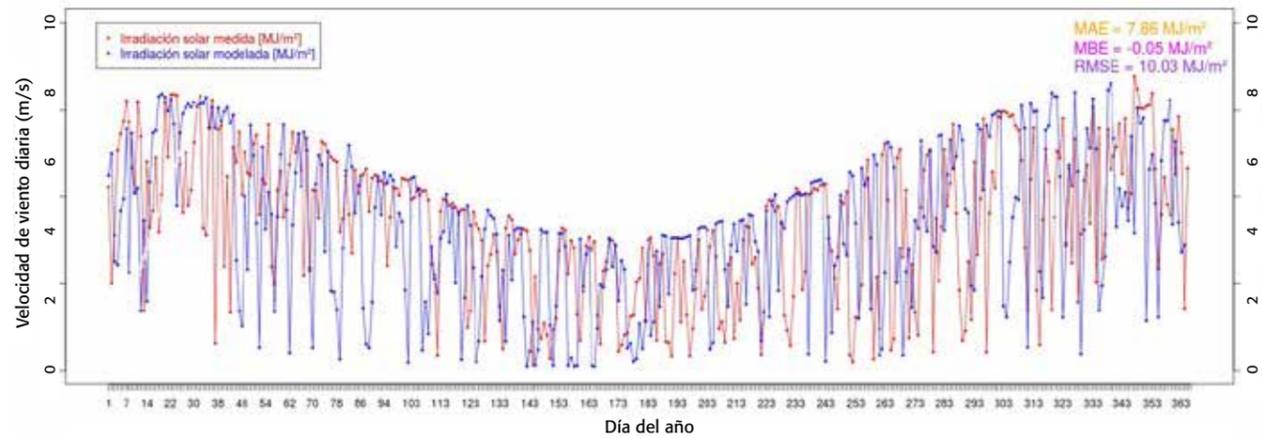


Figura 6: Diagrama de cajas de la irradiación solar simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación

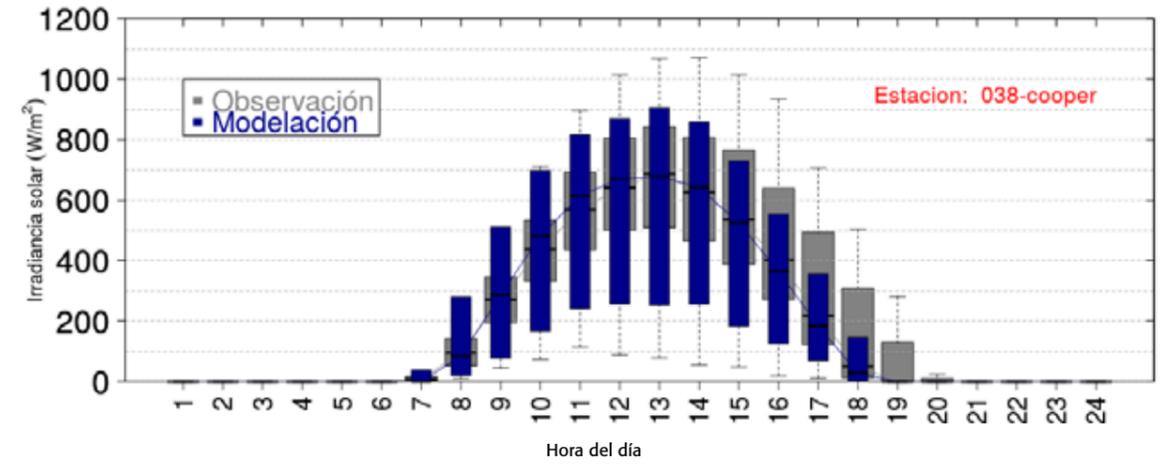
d. Estación 062 - portom



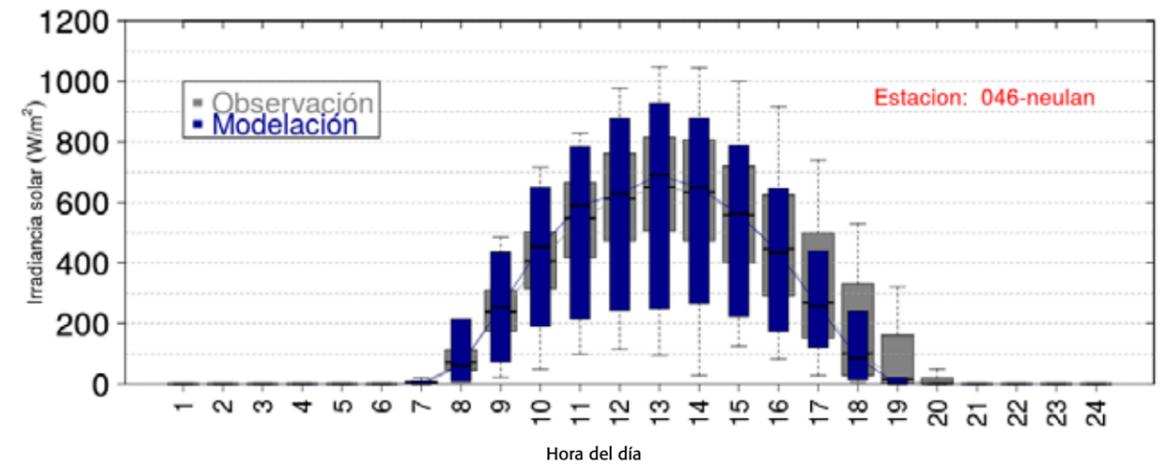
e. Estación 069 - fozdoi



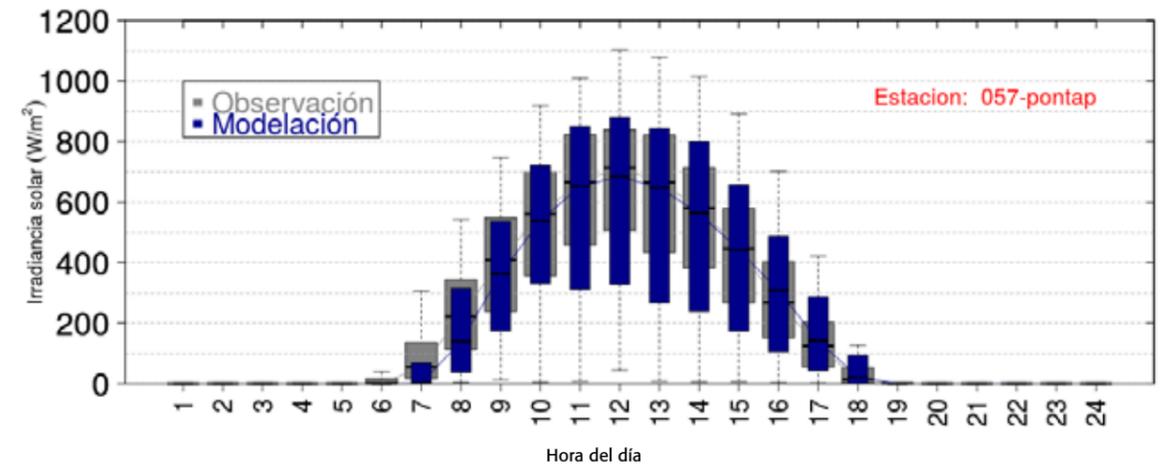
a. Estación 038 - cooper

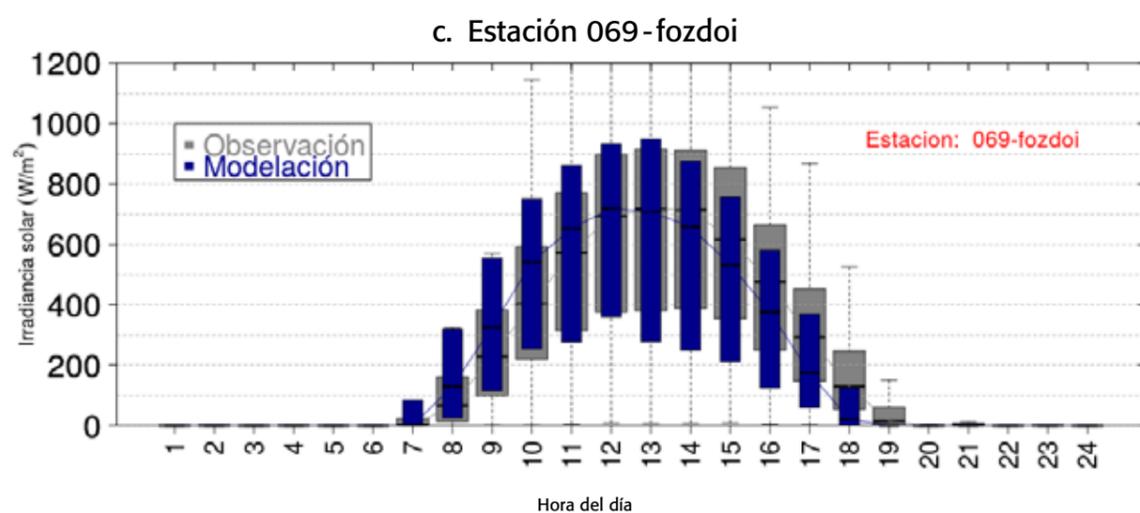
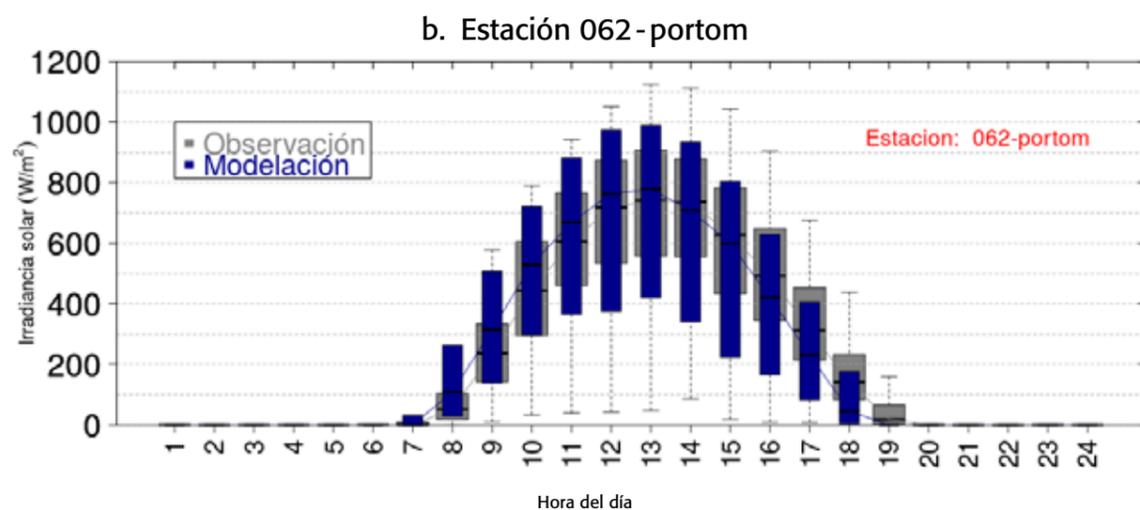


b. Estación 046 - neulan



c. Estación 057 - pontap





Resultados de la validación para la irradiación solar:

La figura 5 de la evolución anual de los valores comparados y la figura 6 de los rangos horarios intercuartiles, presentan los resultados de la validación de la irradiación solar para todas las estaciones analizadas a lo largo del año tipo. Se observa un nivel de precisión satisfactorio en todas las estaciones para la irradiación modelizada con bajos errores de MAE, Bias y RMSE. Los resultados de la tendencia diaria para la irradiación solar (figura 5) demuestra una reproducción favorable de la variabilidad entre los meses de mayor radiación solar en el año (enero, febrero, marzo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre), con valores de irradiación diaria superior a $20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$. Sin embargo, las estaciones de 038-cooper (figura 5a) en el Chaco Paraguayo y 046-neulan (figura 5b) en el interior del país, demuestran una sobreestimación del modelo con valores relativos del MAE y RMSE que oscilan entre 29.8 y 37.1 % (ver cuadro 3).

Por su parte, el comportamiento de la irradiación solar simulada para todas las estaciones durante el ciclo diario entre las horas de Sol (7 a 19 horas), presenta rangos intercuartiles similares entre las observaciones y las modelizaciones a lo largo del año (figura 6).

En concreto, los gráficos permiten establecer una tendencia más acusada con un menor error absoluto y global (MAE y RMSE) para las estaciones de Paraguay de 038-cooper (figuras 5a y 6a) y 046-neulan (figuras 5b y 6b), en comparación con las estaciones de Brasil de 057-pontap (figuras 5c y 6c), 062-portom (figuras 5d y 6d) y 069-fozdoi (figuras 5e y 6e).

8.4.5. Discusión de resultados de la validación

La validación de las simulaciones de viento e irradiación solar en modo diagnóstico, permite analizar el grado de precisión de las parametrizaciones físicas utilizadas

por la configuración establecida en el modelo meteorológico WRF-ARW con una resolución temporal horaria y espacial de $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ para Paraguay. De esta manera, mediante los resultados de los parámetros estadísticos expuestos anteriormente, se evalúan las variables estimadas por las parametrizaciones físicas del modelo.

Los resultados de la validación para la velocidad y dirección del viento presentan niveles de incertidumbre aceptables en relación a la comparación realizada a través de otros estudios previos. El Bias que equivale a $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y -5.8° para la velocidad y dirección, se compara con el estudio más reciente realizado por Carvalho, *et al.* (2014a), el cual corresponde a $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y -0.11° , respectivamente. La comparación del RMSE de la velocidad del viento ($1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) con dicho trabajo ($1.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), es numéricamente similar. En dicho estudio, se demuestra la elevada sensibilidad y capacidad de reproducción del viento simulada por el modelo WRF en 12 estaciones en Portugal, a través de las parametrizaciones físicas mencionadas anteriormente.

El comportamiento del modelo que se observa para la velocidad del viento en las estaciones de 057-pontap (figura 1a) y 062-portom (figura 1b), se podría asociar a la incidencia de la superficie sobre los vientos de meso-escala que son afectados por la rugosidad superficial del viento a 10m. En este contexto, los resultados se comparan con la validación de Draxl, *et al.* (2014) realizada para viento y temperatura superficial por la parametrización de la PBL de Yonsei University Scheme. Los autores demuestran que las simulaciones de temperatura tienden a ser ligeramente más calientes que las observaciones, lo que podría explicarse por una inicialización de la humedad del suelo incorrecta.

En definitiva, se reflejan valores de incertidumbre próximos a $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y similares a los obtenidos para las

estaciones de este estudio en el este y nordeste del Paraguay. No obstante, la estación del sureste (figura 1c), evidencia los mejores resultados en la estimación de la velocidad con errores inferiores a $1.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

De igual manera, Wang y Jin (2014) evidencian discrepancias en la velocidad del viento de baja altitud (10m) y demuestran un incremento de los errores de los vientos simulados a mayor altura y cuando las velocidades del viento observadas son inferiores a $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Además, los autores concluyen que el viento simulado de baja altitud es más preciso en las horas de la tarde que en la mañana, el cual suele presentar mayor inestabilidad. Esta afirmación explica el comportamiento del modelo en las horas de la mañana para los diagramas de cajas de las estaciones de 057-pontan (figura 2a) y 062-portom (figura 2b).

Finalmente, como se muestra en el cuadro 4, los resultados obtenidos por el presente estudio presentan una similitud numérica con los valores de incertidumbre (Bias y RMSE) de los trabajos desarrollados por Castro, *et al.* (2014) y Carvalho, *et al.* (2012).

Comportamiento de la validación del modelo para la irradiación solar:

Los resultados de la validación anual de la irradiación solar simulada permiten concluir que las simulaciones presentan una buena reproducción con un Bias promedio anual de $-0.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ y un rMBE promedio anual de -4.7% para todas las estaciones a lo largo del año. De la misma manera, la incertidumbre absoluta (MAE) y global (RMSE) con valores de 6.5 y $8.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, evidencian en términos generales una favorable capacidad de ajuste del modelo.

Un análisis detallado de la variabilidad que se observa para algunos días del año entre la evolución de la irradiación solar simulada y observada de las estaciones paraguayas (figura 5a y figura 5b), podría deberse a la temporalidad asociada a los cambios

producidos por condiciones atmosféricas específicas, que el modelo no logra captar en su totalidad. A nivel estadístico, dicho comportamiento se asocia a elevados valores de incertidumbre relativa absoluta y global para el promedio de las estaciones ($r\text{MAE}=37.6\%$ y $r\text{RMSE}=47.2\%$ del cuadro 3). Los mismos se comparan con otras contribuciones científicas que establecen una deficiencia en la reproducción de la extinción atmosférica producida por las condiciones ópticas de los aerosoles y la compleja microfísica de las nubes del esquema de transferencia radiativa de onda corta de Dudhia (1989).

La revisión bibliográfica realizada por Rincón (2013), establece que los trabajos que evalúan el esquema radiativo de Dudhia (1989) del modelo WRF-ARW para diferentes latitudes geográficas, presentan resultados similares a los obtenidos por la presente validación para los parámetros analizados. En este sentido, los trabajos propuestos por Armstrong (2000) y Zamora, *et al.* (2003, 2005) para simulaciones en Estados Unidos, evalúan la parametrización radiativa para un mes de verano del año 1997. Los autores obtienen resultados que sobrestiman la irradiación en cielos despejados y la subestiman en cielos totalmente nublados ($\text{Bias} = 1.2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Dichas discrepancias están relacionadas con un cálculo excesivo de la fracción nubosa y el vapor de agua en las capas altas de la troposfera. En este sentido, el trabajo de Guichard, *et al.* (2003) concluye que los aerosoles y los pronósticos de las nubes tipo cirros, son los responsables de la mayoría de las diferencias entre el modelo y las observaciones.

Zamora, *et al.* (2003) obtiene una sobrestimación de hasta $2.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ para cielos despejados del esquema de Dudhia (1989). Sin embargo, establece una estimación favorable para valores del espesor óptico de aerosoles (Aerosol Optical Depth, AOD) cercanos a 0.1 con un error de 3-4%. De este modo, Zamora, *et al.* (2005) concluye que con elevados valores del AOD ($\text{AOD} > 0.1$) en cielos despejados y distintos ángulos

Cuadro 4: Comparación de los resultados de la presente validación en relación a trabajos que evalúan simulaciones de viento e irradiación solar del modelo WRF-ARW

Referencia	Variable evaluada	Resultados de la validación			
		Bias	RMSE	rMBE	rRMSE
Carvalho, <i>et al.</i> (2014a)	Velocidad del viento	$0.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$1.87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	-	-
Carvalho, <i>et al.</i> (2014b)	Velocidad del viento	$0.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$2.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	-	-
Castro, <i>et al.</i> (2014)	Velocidad del viento	-	$2.88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	-20.3%	-
Draxl, <i>et al.</i> (2014)	Velocidad del viento	$1.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$2.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	-	-
Wang y Jin (2014)	Velocidad del viento	-	$3.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	-	-
Carvalho, <i>et al.</i> (2012)	Velocidad del viento	$-1.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$3.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	-	-
Carvalho, <i>et al.</i> (2014a)	Dirección del viento	-0.11°	36.8°	-	-
Carvalho, <i>et al.</i> (2014b)	Dirección del viento	-0.35°	35.0°	-	-
Carvalho, <i>et al.</i> (2012)	Dirección del viento	-3.0°	56.0°	-	-
Armstrong (2000)	Irradiación solar	$2.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	-	-	-
Chou, <i>et al.</i> (2002)	Irradiación solar	$2.8\text{-}5.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	-	-	-
Zamora, <i>et al.</i> (2003, 2005)	Irradiación solar	$2.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	-	-	-
Heinemann, <i>et al.</i> (2006)	Irradiación solar	-	-	• Cielos despejados: 14.7 % • Cielos nublados: 64.4 % • Cielos totalmente nublados: 129 %	-
Ruiz-Arias, <i>et al.</i> (2008)	Irradiación solar	$2.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$8.6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	-	-
Remund, <i>et al.</i> (2008)	Irradiación solar	$2.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$6.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	-	-
Lorenz, <i>et al.</i> (2009)	Irradiación solar	-	-	-	• Europa Central: 40-60 % • Sur de España: 20-35 %
Mathiesen y Kleissl (2011)	Irradiación solar	• Cielos despejados: $4.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ • Cielos nublados: $2.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ • Cielos totalmente nublados: $4.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$3.4 \text{ a } 3.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	12-15 %	32-33 %
Lara-Fanego, <i>et al.</i> (2011)	Irradiación solar	$0.6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$3.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	• Cielos despejados: 4% • Cielos nublados: 20 % • Cielos totalmente nublados: 60 %	• Cielos despejados: 10% • Cielos nublados: 50% • Cielos totalmente nublados: 100 %
Rincón (2013)	Irradiación solar	$0.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$3.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	9.8%	51 %
Este trabajo	Velocidad de viento	$0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$1.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	50.1 %	78.0 %
	Dirección de viento	-5.8°	80.4°	-3.8 %	56.1 %
	Irradiación solar	$-0.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$8.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	-4.7 %	47.2 %
	Temperatura	2°C	5.6°C	3.1 %	24.1 %

cenitales, la parametrización de Dudhia (1989) obtiene resultados que sobrestiman la irradiación solar entre 2.3 y 2.8 MJ·m⁻². Por consiguiente, los autores relacionan la sobrestimación con un calentamiento excesivo de la superficie terrestre como consecuencia de un enfriamiento superficial insuficiente durante las horas nocturnas. Heinemann, *et al.* (2006) evalúan las predicciones de irradiación solar global con el modelo MM5 en Alemania. Para tal efecto, en función del estado atmosférico obtienen valores máximos de Bias iguales a: 14.7% para cielos despejados, 64.4% para cielos nublados y 129% para cielos totalmente nublados. Mientras que el trabajo realizado por Lorenz, *et al.* (2009) obtiene un rRMSE para Europa Central de 40-60% y el sur de la península Ibérica de 20-35%. Resultados similares obtienen Remund, *et al.* (2008) y Pérez, *et al.* (2009) para Estados Unidos.

Finalmente, los estudios más recientes realizados por Rincón (2013) y Lara-Fanego, *et al.* (2011), evalúan el modelo WRF-ARW a través de un elevado número de estaciones ubicadas en España (Comunidad de Andalucía y Cataluña) realizadas durante los años 2004, 2007, 2008 y 2009. De igual manera, los autores obtienen una sobrestimación del esquema de Dudhia (1989) para todas las estaciones con un rMBE inferior al 10% (0.6 MJ·m⁻²) y un rRMSE mayor al 50% (3.8 MJ·m⁻²). En conclusión, los autores coinciden en relacionar los resultados de la validación con la variabilidad temporal y las condiciones analizadas en el presente estudio.

En base a lo expuesto anteriormente, el cuadro 4 permite comparar los resultados entre la validación de viento e irradiación solar realizada en el presente estudio y los diferentes trabajos referenciados.

Panorama energético

Tabla de prefijos numéricos.....	14
Tabla de factores de conversión entre unidades de energía.....	15
Consumo de energía a nivel mundial (1990-2015)	16
Participación de las fuentes de energía para la generación de electricidad a nivel mundial para el año 2015	17
Capacidad instalada de generación solar y eólica periodo (2000-2015).....	17
Parque Eólico Campos Neutrais (Brasil).....	18
Planta termo-solar Atacama 1 (Chile)	18
Proyecto PESE-PY. Sensores meteorológicos.....	19
Centrales de producción de energía en Paraguay.....	19
Paneles Solares instalados por la PTI-PY en Joel Estigarribia -Chaco Paraguay	20

Infraestructura e informaciones previas

Mapa de rutas principales en Paraguay.....	23
Puerto de Asunción	24
Matriz de electricidad del Paraguay (2013). Usos finales de la energía eléctrica	25
Sistema Interconectado Nacional (SIN) 2014.....	26
Clasificación climática del Paraguay según Thornthwaite	27
Mapa de temperatura media anual (año tipo)	27

Red de estaciones de medición energética

Verificación de Piranómetros en el INTN.....	38
Estación meteorológica	38
Normas internacionales tenidas en cuenta para la adquisición e instalación de sensores eólicos y de radiación solar.....	39
Plano de instalación de antena y estación meteorológica para Mayor Pablo Lagerenza	39
Sensores de altura.....	39
Antena de transmisión de la empresa Núcleo S.A. en la localidad de Mayor Infante Rivarola, Chaco Paraguayo.....	39
Instrumentos de medición energética	40

Metodología

Esquema de trabajo. Proyecto PESE-PY.....	42
Estaciones Meteorológicas Analizadas.....	49
Evolución gráfica anual de velocidad y dirección del viento	50
Evolución gráfica de la irradiación solar diaria con respecto a la curva de atenuación teórica extraterrestre	50
Esquema de la discretización numérica espacial que realiza la simulación del modelo WRF-ARW	52
Ciclo horario para la velocidad del viento simulada y observada en un año. Estación Meteorológica Foz de Iguazú A846.....	55
Evolución anual de la velocidad de viento diaria simulada y observada en un año. Estación Meteorológica Foz de Iguazú A846.....	56
Capa de puntos. Modelo meso-escalar	57
Diagrama de la generación automatizada de las interpolaciones por variable (model builder de ArcGIS®).....	57
Proceso Thiessen	58
Interpolación de los datos para el territorio paraguayo	59

Potencial energético solar

Distribución de la energía solar llegada a la superficie terrestre.....	63
Piranómetro de Kipp & Zonen, instalado en Mayor Infante Rivarola - Paraguay.....	64

Potencial energético eólico

Circulación general del aire en la Tierra	78
Anemómetro	79
Veleta.....	79
Montaje de Aerogenerador pequeño en Joel Estigarribia. Proyecto SELAC (PTI-PY/Itaipu).....	79

Apéndices

Valores de rugosidad del terreno.....	105
Distribución de Weibull para diferentes factores de forma.....	106
Función Gama para diferentes valores de k.....	107
Variación del flujo de potencia eólica con una velocidad media del viento y el factor de forma Weibull (k).....	107
Estaciones meteorológicas establecidas por el proyecto PESE-PY para el área geográfica del Paraguay	108
Características de las parametrizaciones físicas utilizadas para las simulaciones del modelo WRF-ARW en Paraguay.....	111
Características de las estaciones meteorológicas utilizadas para la validación del modelo WRF-ARW en Paraguay.....	112
Resultados de los parámetros estadísticos para la validación anual de las simulaciones meteorológicas de viento y sol	113
Evolución anual de la velocidad del viento simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación	115
Diagrama de cajas de la velocidad del viento simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación.....	116
Evolución anual de la dirección del viento simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación.....	117
Diagrama de cajas de la dirección del viento simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación.....	118
Evolución anual de la irradiación solar simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación.....	119
Diagrama de cajas de la irradiación solar simulada y observada a través de las estaciones meteorológicas de validación.....	121
Comparación de los resultados de la presente validación en relación a trabajos que evalúan simulaciones de viento e irradiación solar del modelo WRF-ARW.....	125

Administración Nacional de Electricidad (ANDE), Plan Maestro de Generación y Transmisión de Corto y Mediano Plazo. Periodo 2014-2023. Gaceta Oficial. Disponible online en: http://www.ande.gov.py/plan_maestro_2014_2023.php

Armstrong, M. (2000). *Comparison of MM5 forecast shortwave radiation with data obtained from the atmospheric radiation measurement program.* Master's thesis, Master of Science Scholarly Paper, University of Maryland, USA, p. 17, 18

Basart, S., Pérez, C., Nickovic, S., Cuevas, E. y Baldasano, J. M. (2012). *Development and evaluation of the BSC-DREAM8b dust regional model over Northern Africa, the Mediterranean and the Middle East.* Tellus B, p. 64. 3

Bécker, D. y Belt, C. (2011). *Situación de las Energías Renovables en el Paraguay.* Publicado por GIZ GmbH en el marco de la medida autofinanciada "Fomento de las energías renovables y la eficiencia energética"

Beyer, H., Polo, J., Suri, M., Torres, J., Lorenz, E., Muller, S., Hoyer-Klick, C. y Ineichen, P. (2009). *Report on Benchmarking of Radiation Products.* D 1.1.3 Report under Contract No. 038665 of Project MESoR. Technical report, p. 1

Brizuela, A., Aguirre, C., Baéz, J., Pastén, A., Pérez, N., Castell, M.E. y Enciso, E. (1997). *El Recurso Eólico en Paraguay.* Fondo Argentino de cooperación Horizontal, Instituto Nacional de Tecnología y Normalización, Dirección Nacional de Aeronáutica Civil. Asunción, Paraguay, p. 84.

Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. y Santos, C. (2012). *A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy.* Environmental Modelling & Software, 33:23-34, p. 16, 18

Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. y Santos, C. S. (2014a). *Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for onshore and offshore areas in the Iberian Peninsula.* Applied Energy, 135:234-246, p. 15, 18

Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. y Santos, C. S. (2014b). *WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal.* Applied Energy, 117:116-126, p. 18

Castro, F., Silva Santos, C. y Lopes da Costa, J. (2014). *One-way mesoscale-microscale coupling for the simulation of atmospheric flows over complex terrain.* Wind Energy, p. 16, 18

Chen, F. y Dudhia, J. (2001). *Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity.* Monthly Weather Review, 129(4):569-585, p. 2

Chou, S., Tanajura, C., Xue, Y. y Nobre, C. (2002). *Validation of the coupled Eta/SSiB model over South America.* Journal of geophysical research, 107(D20):8088, p. 18

Coronel, T., Buzarquis, E., Riveros, E. y Blanco, G. (2016). *Estado del arte de generación distribuida y energía solar fotovoltaica en Paraguay.* XII Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo. Paraguay.

Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Desarrollo Sostenible. Disponible online en: <http://www.iadb.org/en/topics/energy/ener-gy-database/energy-database,19144.html>

Draxl, C., Hahmann, A. N., Peña, A. y Giebel, G. (2014). *Evaluating winds and vertical wind shear from Weather Research and Forecasting model forecasts using seven planetary boundary layer schemes.* Wind Energy, 17(1):39-55, p. 15, 18

Dudhia, J. (1989). *Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model.* J. Atmos. Sci., 46 (20):3077-3107, doi:10.1175/1520-0469, p. 2, 16, 17, 18

Energía solar a día. Disponible online en: <http://energiasolaraldia.com/brasil-chile-uru-guay-los-invirtieron-mas-energias-renovables-america-del-sur-2015/>. (Consultado 30/08/2016).

Gill, L. y Báez, J. (2013). *Mapeo del Potencial Energético Solar y Eólico del Paraguay y de sus recursos hidroenergéticos en cuencas de la región Oriental*. Carrera de Ingeniería Ambiental. Universidad Católica Ntra. Sra. de la Asunción, Paraguay.

Guichard, F., Parsons, D., Dudhia, J. y Bresch, J. (2003). *Evaluating Mesoscale Model Predictions of Clouds and Radiation with SGP ARM Data over a Seasonal Timescale*. Monthly weather review, 131(5):926-944, p. 17

Heinemann, D., Lorenz, E. y Girodo, M. (2006). *Solar irradiance forecasting for the management of solar energy systems*. Energy and Semiconductor Research Laboratory, Energy Meteorology Group, Oldenburg University, p. 17, 18

Hong, S.-Y. y Pan., H.-L. (1996). *Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model*. Mon. Weather Rev., (124 (10)):2322-2339, doi:10.1175/1520-0493, p. 2

Hong, S.-Y., Dudhia, J. y Chen, S.-H. (2004). *A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation*. Mon. Weather Rev., 132(1):103-120, doi:10.1175/1520-0493, p. 2

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia (2006). *Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia*. Bogotá, Colombia.

Janjic, Z. (2002). *Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model*. NCEP Office Note, 437:61, p. 2

Jorba, O. (2005). *Simulación de los campos de viento de la Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas*. PhD tesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España, p. 1, 3

Justus, C. G., Hargraves, W. R. y Yalcin, Ali. *Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators*. Journal of applied meteorology, 1976, vol. 15, n° 7, p. 673-678.

Kain, J. S. y Fritsch, J. M. (1993). *Convective Parameterization for Mesoscale Models: The Kain-Fritsch Scheme*. The representation of cumulus convection in numerical models. In Emanuel, K. A. y Eds., D. R., editors, Amer. Meteor. Soc., p. 165-170.

Lacis, A. y Hansen, J. (1974). *A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere*. Journal of Atmospheric Sciences, 31:118-133, p. 2

Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J., Pozo-Vazquez, D., Santos-Alamillos, F. y Tovar-Pescador, J. (2011). *Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain)*. Solar Energy, p. 17, 18

Lorenz, E., Remund, J., Müller, S., Traunmüller, W., Steinmaurer, G., Pozo, D., Ruiz-Arias, J., Fanego, V., Ramirez, L., Romeo, M., Kurz, C., Pomares, L. y Guerrero, C. (2009). *Benchmarking of different approaches to forecast solar irradiance. Proceedings of 24th European Photovoltaic and Solar Energy Conference and Exhibition*. Hamburg, Germany, p. 17, 18

Mathiesen, P. y Kleissl, J. (2011). *Evaluation of Numerical Weather Prediction for intra-day solar forecasting in the continental United States*. Solar Energy, 85(5):967-977, p. 18

Mlawer, E., Taubman, S., Brown, P., Iacono, M. y Clough, S. (1997). *Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave*. Journal of Geophysical Research, 102(D14):16663-16, p. 2

Monin, A. y Obukhov, A. (1954). *Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere*. Trudy Geofiz. Inst. Acad. Nauk SSSR, 24(151):163-187, p. 2

National Centers For Environmental Prediction/ National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 1994. NCEP/NCAR Global Reanalysis Products, 1948-continuing. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. Disponible en línea en: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds090.0/>.

Oviedo-Salazar, J. L., Badii, M.H., Guillen, A., y Serrato, O. L. (2015). *Historia y Uso de Energías Renovables. History and Use of Renewable Energies*. Daena: International Journal of Good Conscience, 10(1), 1-18.

Pay, M. (2011). *Regional and urban evaluation of an air quality modelling system in the European and Spanish domains*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Barcelona, España, p. 3

Pereira, E. B., Ramos Martins, F., Luna de Abreu, S. y Rütther, R. (2006). *Atlas brasileiro de energia solar*. INPE.

Pérez, R., Kivalov, S., Schlemmer, J., Hemker Jr., K., Renne, D. y Hoff, T. (2009). *Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US*. Proceedings of the ASES Annual Conference, Buffalo, New York, p. 17

Pielke, R. A. (1984). *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press, Orlando, p. 1

Remund, J., Perez, R. y Lorenz, E. (2008). *Comparison of solar radiation forecasts for the USA*. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, p. 17, 18

REN21, Paris Secretariat. *Renewables 2016 Global Status Report*. 2016.

Rincón A. (2013). *Sistema de pronóstico de radiación solar a corto plazo a partir de un modelo meteorológico y técnicas de post-proceso para España*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Barcelona, España, p. 1, 3, 17, 18

Rohatgi, J.S. y Nelson, V. (1994). *Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power*. Alternative Energy Institute - West Texas A&M University.

Ruiz-Arias, J., Pozo-Vázquez, D., Sánchez-Sánchez, N., Montavez, J., Hayas Barru, A. y Tovar-Pescador, J. (2008). *Evaluation of two MM5-PBL parameterizations for solar radiation and temperature estimation in the South-Eastern area of the Iberian Peninsula*. Il Nuovo Cimento C, 31:825-842, p. 18

REN 21 (2016). *Renewables 2016 Global status report*. Disponible en línea en: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf Consultado el 23 de diciembre de 2016.

Sistema de Información Geográfica (2016). Disponible online en: <https://langluerben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/> (Consultado 26 de agosto 2016).

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W. y Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3: NCAR Technical Note TN-475+ STR*. National Center for Atmospheric Research Boulder. Colorado, USA.

Viceministerio de Minas y Energía (2015). *Balance Energético Nacional 2014*. Asunción, Paraguay.

Wang, C. y Jin, S. (2014). *Error features and their possible causes in simulated low-level winds by WRF at a wind farm*. Wind Energy, 17(9):1315-1325, p. 16, 18

World Energy Council (2014). Consejo Mundial de la Energía (CME).

Zamora, R., Dutton, E., Trainer, M., Mckeen, S., Wilczak, J. y Hou, Y. (2005). *The accuracy of solar irradiance calculations used in mesoscale numerical weather prediction*. Mon. Weather Rev., 133:783-792, p. 17, 18

Zamora, R., Salomon, S., Dutton, E., Bao, J., Trainer, M., Portmann, R. W., White, A., Nelson, D. y Mcnider, R.T. (2003). *Comparing MM5 radiative fluxes with observations gathered during the 1995 and 1999 Nashville southern oxidant studies*. Journal of Geophysical Research, 108(D2):4050, p. 17, 18

Atlas del potencial
energético solar y eólico
del Paraguay

Asunción, Paraguay
2016

Parque Tecnológico Itaipu-Paraguay
Central Hidroeléctrica Itaipu
Tel.: +595 61 599 0115
www.pti.org.py

