



5 de junio de 2009

Informe Final

Atlas Eólico de Bolivia

Un proyecto para la Corporación Financiera Internacional
(IFC – Siglas en ingles)

Derechos de Autor © 2008 3TIER, Inc. Todos los derechos reservados. 3TIER reclama derechos de autor sobre todo texto y gráficas de propiedad y sujeta a derechos de autor en este Informe, el diseño general de este Informe, y la selección, disposición y presentación de todos los materiales en este Informe. La reproducción y redistribución fuera del alcance del contrato entre IFC y 3TIER quedan prohibidas sin el permiso expreso por escrito de 3TIER. Las solicitudes de permiso deben dirigirse a panama@3tier.com.

tel: 206.325.1573
fax: 206.325.1518
panama@3tier.com
www.3tiergroup.com
3TIER North America
2001 Sixth Avenue
Suite 2100
Seattle, WA 98121

TABLA DE CONTENIDO

I. Introducción	1
A. Antecedentes	1
B. Objetivo del Proyecto	2
II. Metodología	4
TAREA I – Informe Inicial	4
TAREA II – Procesamiento de Datos	4
<i>Modelo Atmosférico</i>	4
<i>Datos de Ingreso</i>	6
<i>Simulaciones Informáticas</i>	7
TAREA III - Validación de Datos	7
TAREA IV - Borrador del Informe Final	9
TAREA V – Divulgación	9
TAREA VI – Informe Final y Atlas Eólico	11
TAREA VII - Taller de Capacitación y Presentación Final	11
III. Climatología de Bolivia	12
IV. Resultados	15
A. Validación	15
<i>Resumen</i>	15
<i>Estadísticas de Validación</i>	16
<i>Tablas de Estadísticas de Validación (Estaciones NCEP ADP)</i>	17
<i>Sesgo de la Simulación</i>	20
<i>Ciclo Mensual / Estacional</i>	21
<i>Ciclo Diurno</i>	22
<i>Conclusión sobre la Validación</i>	22
B. Mapas	24
V. El Potencial para la Energía Eólica en Bolivia	27
A. Fundamentos del Recurso Eólico	27
B. Distribución Espacial del Recurso Eólico	28
C. Densidad de la Potencia Eólica	29
VI. El Atlas Eólico de Bolivia en Contexto	31
A. Resumen	31
B. Análisis Adicional	33
C. Recursos Gratuitos Adicionales	35
Apéndice I: Cálculo de los Parámetros Weibull	I-1
Apéndice II: Mapas	II-1
A. Contenido	II-1
B. Acerca de los Mapas	II-26
C. Como utilizar los mapas digitales en formato GeoPDF	II-27
Apéndice III: Validación Adicional (Rosas de Viento)	III-1

I. Introducción

Este informe resume el recurso eólico que tiene Bolivia, calculado a tres alturas sobre el nivel del suelo (20, 50, y 80 m) basado en los resultados de simulaciones meteorológicas sofisticadas elaboradas por 3TIER® Environmental Forecast Group, Inc. (3TIER) para la Corporación Financiera Internacional (IFC – siglas en inglés). Esto se llevó a cabo como parte del financiamiento actual del IFC hacia Transportadora de Electricidad (TDE), la empresa más grande de transmisión de electricidad en Bolivia.

Los resultados presentados en este informe servirán de base para la evaluación preliminar de sitios identificados durante la fase de prospección del desarrollo de proyectos eólicos. Antes de tomar cualquier decisión sobre inversiones en lugares específicos, la parte interesada en explotar los recursos eólicos en Bolivia debe, como elemento de su análisis detallado de factibilidad, atender lo siguiente:

- Visitar el lugar y revisar factores topográficos, ambientales, y logísticos que pudieran afectar la instalación y/u operación exitosa de turbinas eólicas o líneas de transmisión (si aplica);
- Recolectar mediciones (durante un período no menor a 12 meses) en sitio a la altura de buje de la turbina deseada (varía según equipo) utilizando un dispositivo meteorológico correctamente instalado y calibrado (anemómetro u otro) o verificar el recurso eólico en un lugar aledaño a partir de datos recolectados en dicho lugar. Para medir la disponibilidad del recurso eólico con la mayor precisión posible, es necesario recolectar mediciones eólicas durante periodos extendidos de tiempo;
- Para sistemas de energía sin conexión a la red, confirmar que la “oferta” de viento (momentos cuando sopla el viento y con qué fuerza) coincide con la demanda esperada de energía y/o planificar para tener energía de respaldo utilizando baterías u otras fuentes de energía;
- Considerar la variabilidad a largo plazo del recurso eólico; y
- Obtener los permisos necesarios de las autoridades sectoriales de Bolivia para trabajos de ingeniería, cumplir con las leyes de medio ambiente, etc.

A. Antecedentes

El contrato entre 3TIER y IFC para este proyecto fue iniciado como parte de la relación en curso entre el IFC y el TDE, la empresa más grande de transmisión de electricidad en Bolivia y beneficiaria de financiamiento proveniente del IFC en forma de préstamo. Bajo su programa de responsabilidad social corporativa, TDE, una empresa que forma

parte del consorcio español Red Eléctrica de España, ha emprendido un programa para promover el acceso y uso de energías renovables en Bolivia y en particular en las zonas vecinas a sus instalaciones en comunidades rurales aisladas. Como parte de su contribución al desarrollo de la energía eólica en Bolivia, TDE procesó información recolectada durante 10 años en 201 estaciones meteorológicas y comenzó a distribuir los resultados de sus análisis en abril de 2008.

El **IFC**, un miembro del Grupo Banco Mundial, fomenta el crecimiento económico sostenible en los países en vías de desarrollo con el financiamiento de inversiones en el sector privado, la movilización de capital privado en mercados financieros locales e internacionales, y la provisión de servicios de asesoría y mitigación de riesgos para empresas y gobiernos. La visión del IFC es que todas las personas deben tener la oportunidad para escapar de la pobreza y mejorar sus vidas. En el año fiscal 2008, el IFC comprometió US\$11.4 mil millones y movilizó US\$4.8 mil millones más a través de sindicaciones y financiamiento estructurado para 372 inversiones en 85 países en vías de desarrollo. El IFC también proporcionó servicios de asesoría en 97 países. Para mayor información, visite www.ifc.org.

Con sede en Cochabamba, **TDE** es la empresa principal de Bolivia en transmisión de energía. Actualmente, TDE es propietaria y opera el 74% de la red del sistema interconectado nacional de Bolivia. Su sistema tiene 2,187 km de líneas de transmisión de 230 KV, 115 KV, y 69 KV y sub-estaciones en varias partes de Bolivia. El sistema interconecta los departamentos de La Paz, Cochabamba, Santa Cruz, Oruro, Chuquisaca y Potosí, y facilita la transmisión de potencia y energía entre los generadores, distribuidores, y clientes no-regulados. Una subsidiaria del operador de sistema español Red Eléctrica de España es dueña de TDE. Para mayor información visite www.tde.com.bo.

Establecido en 1999 y con casa matriz en Seattle, Washington (EEUU), **3TIER** es uno de los proveedores independientes más grandes de evaluación y pronóstico para la energía eólica, solar e hidráulica a nivel mundial. La oficina regional de 3TIER para Latinoamérica y el Caribe, ubicada en la Ciudad de Panamá, jugó un papel importante en el desarrollo del Atlas Eólico de Bolivia. 3TIER tiene oficinas adicionales en Alemania, India, y Australia. Para mayor información, visite www.3tier.com.

B. Objetivo del Proyecto

Según los Términos de Referencia definidos en el contrato entre 3TIER y el IFC:

- El objetivo de este contrato a corto plazo es preparar una base de datos geográficos del potencial de energía eólica en Bolivia.
- El proyecto creará un mapa del recurso eólico a lo largo del país. Cuando se concluya este trabajo, los datos que resulten de este proyecto serán compartidos tanto dentro de las oficinas de desarrollo de proyecto de TDE como

con autoridades públicas, cuya responsabilidad incluye iniciativas de electrificación rural y con entidades y empresas interesadas del sector energía. A través de un acuerdo con la Universidad Católica de Bolivia (UCB), TDE proporcionará acceso universal e indefinido a los mapas y la base de datos de la cual proviene la información provista al IFC por 3TIER.

- Se elaborará información sobre el potencial eólico en un formato electrónico accesible, fácil de utilizar y disponible en Internet o en CD's. Se espera que la firma consultora [3TIER] prepare un plan para TDE que permita que la base de datos sea mantenida adecuadamente y/o mejorada al pasar el tiempo. Una vez completados estos estudios, TDE en conjunto con el IFC promoverá la divulgación de esta información a todas las partes interesadas.

II. Metodología

TAREA I – Informe Inicial

3TIER generó este informe basado en una misión conjunta a Bolivia efectuada por el IFC y 3TIER en Abril de 2008 y también en las actividades internas de 3TIER. En el informe ofrecieron un plan detallado para la ejecución del proyecto.

TAREA II – Procesamiento de Datos

Modelo Atmosférico

La evaluación del recurso eólico a lo largo de Bolivia presentada en este informe se basa en un año aleatorio de datos simulados (1 de enero al 31 de diciembre) generados por un modelo de condiciones atmosféricas de tipo no-hidrostático regional utilizando ecuaciones primitivas. 3TIER utilizó la versión 3.0 del modelo de Predicción Numérica del Tiempo (PNT) llamado Modelo para la Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF – siglas en inglés).¹ El modelo WRF ha sido desarrollado por un consorcio formado por agencias nacionales de gobierno y universidades en los Estados Unidos y representa la nueva generación en modelos de pronóstico del tiempo. 3TIER utiliza este modelo para sus proyectos de evaluación de potencial y de pronóstico de energía y caudales. Con el modelo WRF, 3TIER construyó un año entero de datos, y de forma similar generó datos para cada día del año calendario y lo atribuyó aleatoriamente a un año escogido de un período de 10 años (1998-2007).

El modelo WRF utiliza una configuración de grilla anidada. El alcance de la grilla más gruesa fue seleccionado para captar el efecto de eventos sinópticos de tiempo en el recurso eólico dentro de la región de interés, y también para permitir que el modelo desarrolle circulaciones térmicas regionales. Las grillas cada vez más finas de 54.0 km, 18 km, 6 km y 2 km fueron aplicadas para simular el efecto de topografía local y circulaciones atmosféricas en la escala local. La Tabla 1 ofrece detalles sobre la configuración final del modelo WRF:

¹ Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, J.G. Powers, 2005: *A description of the Advanced Research WRF Version 2*. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR, Boulder, Colorado, 88p.

Tabla 1: Configuración del Modelo

Parámetro	Detalle
Modelo a mesoescala de Predicción Numérica del Tiempo	WRF
Resolución horizontal del área válido de estudio	2 km
Número de Niveles Verticales	31
Base de Datos para Elevación	3 segundos SRTM
Base de Datos para Vegetación	0.15 grados NESDIS
Clasificación de suelos	30 segundos USGS
Parámetros de la Superficie	Modelo Monin-Obukhov de similitudes
Parámetros de la Capa Limítrofe	Modelo YSU (MRF con Arrastre)
Esquema de la superficie de la tierra	Modelo de difusividad de suelos con 5 capas

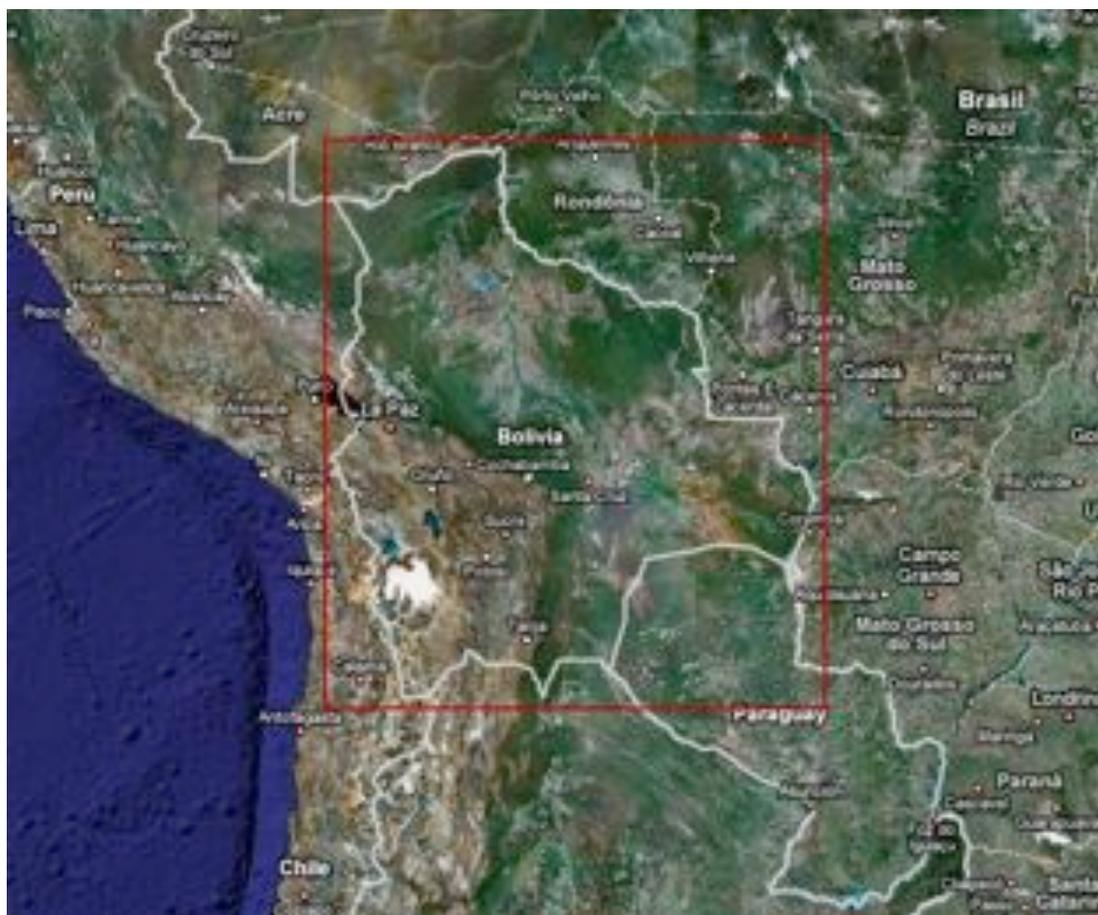


Figura 1: El rectángulo rojo que rodea Bolivia marca el área válida de estudio del dominio de grilla con una resolución de 2 km aplicada en este proyecto.

Datos de Ingreso

Archivo Global del Estado del Tiempo: Los datos de ingreso principales para una evaluación del recurso eólico son los archivos históricos globales del clima (*Global Weather Archive* en inglés), que son mantenidos por centros operacionales de pronósticos del tiempo en todo el mundo, incluyendo el Centro Nacional de Pronósticos Ambientales de Estados Unidos (NCEP). Estos archivos globales representan el estado completo de la atmósfera en todo el planeta y son resultado de análisis informáticos sofisticados de la superficie disponible y de observaciones a niveles más altos. Cada período de análisis combina decenas de miles de medidas individuales tomadas en todo el globo terrestre en un estado físico consistente.

Cada período de tiempo analizado combina decenas de miles de mediciones individuales alrededor del globo terrestre en un estado físico consistente. Los reanálisis NCEP/NCAR² incluyen el modelo espectral operacional global de 1995, con 28 niveles verticales tipo “sigma” y un truncamiento triangulado y horizontal de 62 ondas, equivalente a 210 km aproximadamente. El esquema de análisis es definido como variacional y tridimensional proyectado en un espacio espectral.

Debido la necesidad de representar el globo terrestre entero, el conjunto de reanálisis de datos NCEP/NCAR se mantiene con una resolución horizontal relativamente gruesa, pero no incluye por sí sola los detalles necesarios para resolver el patrón de circulación de viento sobre regiones geográficas más pequeñas o sobre un solo proyecto. Sin embargo, estos datos nos permiten producir una buena representación de la historia de patrones espaciales de la atmósfera a larga escala (ej. la posición de sistemas de alta y baja presión; la localización del chorro de aire - jet stream en inglés), también el estado general del océano (ej. las temperaturas en la superficie del océano) y las características de la superficie del suelo (ej. la humedad del suelo). 3TIER mantiene archivos de datos climáticos globales de la NCEP de más de 40 años en su casa matriz en Seattle, WA, EEUU. Combinando estos datos de baja resolución con datos de alta resolución de caracterización del uso de la tierra y con modelos climáticos numéricos de alta resolución, 3TIER reconstruye con precisión los campos de viento regionales en sitios específicos.

Datos con alta resolución de topografía, cobertura de vegetación, y del suelo: Para este proyecto 3TIER utilizó un juego de datos topográficos de alta resolución (3 segundos de arco – aproximadamente 90 m) dispuesto por la Misión del Trasbordador Espacial para medir la Topografía con Radar (SRTM³ – siglas en inglés). Adicionalmente, el modelo WRF utiliza un mapa global con 24 categorías de uso de suelo a 30 segundos de arco (USGS), un mapa global a 5 grados de arco de textura de suelo (FAO), y una fracción climatológica mensual de vegetación verde de 0.15 grados (NESDIS).

² Disponible en inglés en línea en: www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis.html

³ Información disponible en: <http://srtm.usgs.gov>

Simulaciones Informáticas

3TIER implementó el modelo WRF con una configuración de grilla anidada. La simulación incluyó cuatro dominios anidados (rectángulos concéntricos). El dominio exterior tiene una resolución de 54 km y los otros tres dominios tienen resoluciones cada vez más finas de 18 km, 6 km, y 2 km. El dominio central tiene una resolución espacial de 2 km y cubre todo Bolivia (véase la Figura 1), y una zona de amortiguamiento en cada dirección para evitar las distorsiones que pueden ocurrir en este tipo de simulaciones en los bordes de la grilla (denominados “grid edge effects” en inglés). Para cada día individual, se generó una simulación de 47 horas. 3TIER descartó las primeras 23 horas de cada simulación para permitir una inicialización correcta del modelo, y utilizó las últimas 24 horas de cada simulación para la evaluación posterior del recurso eólico. Se hicieron estudios de sensibilidad para determinar el tiempo de anticipación necesario para inicializar la simulación. Se simuló un año extrayendo de la base de datos históricos de reanálisis NCEP/NCAR días individuales del período de 10 años entre 1998 y 2007, para que los mismos sirvieran como condiciones limítrofes para las simulaciones tipo PNT. 3TIER solamente extrajo datos del período satelital de la base de datos históricos de reanálisis (de 1979 en adelante) para evitar discrepancias estadísticas debido a cambios en el sistema global de observación de la atmósfera superior.

Para este proyecto, 3TIER aplicó la versión 3.0 del modelo WRF. Después de correr varias simulaciones de prueba con configuraciones diferentes y comparar los resultados con datos disponibles en el dominio público a una resolución gruesa, 3TIER terminó las simulaciones informáticas a una resolución de 2 km (lo cual dio como resultado los llamados datos “crudos” que después fueron sujetos a validación).

TAREA III - Validación de Datos

El análisis de 3TIER sobre los resultados de la simulación para este proyecto se enfocó en dos elementos de los campos simulados de viento: consistencia interna y comparación con datos observados. La primera parte de la evaluación determinó si los campos simulados fueron sujetos a inestabilidades numéricas y artefactos de simulación, los cuales hubieran sido directamente relacionados con la configuración e implementación del modelo. También se pasaron los datos “crudos” por controles cuantitativos de estabilidad numérica basados en límites Courant, inspección ocular de los campos de velocidad del viento enfocada en la detección de inestabilidades tipo dos-delta-t y olas falsas estancadas (denominadas “spurious standing waves” en inglés), y un análisis cualitativo de la distribución de viento en cada punto de la grilla.

La segunda parte de la evaluación que 3TIER llevó a cabo dependió de la disponibilidad de datos observados contra los cuales se podían comparar los resultados de las simulaciones informáticas. 3TIER analizó los resultados de las simulaciones de este proyecto para compararlos con datos recolectados en Bolivia durante períodos de tiempo que coincidieron con los diez años de datos de reanálisis aplicados (1998-2007). Este proceso incluyó una comparación entre medias simuladas y medias observadas, falta de concordancia entre los dos juegos de datos,

distribuciones diurnas, y parámetros Weibull, como también estadísticas de correlación calculadas sobre diferentes escalas de tiempo. Del IFC, 3TIER recibió datos observados del juego de datos de JICA, así como de la evaluación del recurso eólico efectuado por la CRE cerca de Santa Cruz, y datos de la agencia gubernamental de meteorología de Bolivia (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología -SENAMHI).

Idealmente, los datos observados que se utilizan para comparación con resultados simulados deberían haber sido recolectados utilizando un instrumento de medición ubicado por lo menos a 20 m sobre la superficie del suelo, para lo cual la altura de medición fue identificada para cada lugar de recolección de datos. Los datos deberían haber sido recolectados en intervalos horarios durante un período consecutivo de 12 meses. Los datos proporcionados también deberían incluir las coordenadas precisas en los cuales fue instalado el instrumento de medición.

Desafortunadamente, ninguno de los tres juegos de datos mencionados arriba contaba con estas tres características. Además, los datos proporcionados por el IFC provenientes de CRE, SENAMHI, y JICA no coincidieron lo suficiente con el año aleatorio que simuló 3TIER a partir del período de 10 años de datos de reanálisis para permitir el análisis detallado precisado en los Términos de Referencia para este proyecto. El análisis resumido de 3TIER incluyó los datos observados del estudio de JICA y datos de 3 torres meteorológicas adicionales en el norte de Chile ubicadas dentro del dominio rectangular simulado por Bolivia.⁴ Para facilitar un mejor análisis estadístico de validación, 3TIER también bajó de Internet datos correspondientes a 22 estaciones meteorológicas del juego de datos denominado en inglés “Global Surface Observations” mantenidos por el grupo de Procesamiento Automatizado de Datos (ADP – siglas en inglés) del Centro Nacional de Predicción Atmosférica de los Estados Unidos (NCEP – siglas en inglés).⁵

3TIER evaluó la calidad del recurso eólico simulado con respecto a datos observados cualitativa y cuantitativamente. Las evaluaciones cualitativas incluyeron inspecciones oculares de las características anuales, estacionales, mensuales, y diurnas de los resultados de las simulaciones informáticas efectuadas por 3TIER y una revisión de lo que se conoce de la meteorología de Bolivia. La cantidad y calidad de observaciones meteorológicas no le permitió a 3TIER efectuar una corrección basada en las estadísticas de salida del modelo (denominadas en inglés Model Output Statistics - MOS) en los campos de viento simulados para Bolivia.

Para ver los resultados del proceso de validación, por favor lea la sección IV - A que comienza en la página 15.

4 3TIER obtuvo estos datos del sitio de Internet de un estudio de recursos renovables de energía en Chile por el Gobierno de Chile y PNUD con fondos del GEF. (Véase http://www.renovables-rural.cl/actividades/fr_actividades.html par mayor información).

5 3TIER obtuvo esta información de la Sección de Apoyo de Datos del Centro Nacional para la Investigación de la Atmósfera (NCAR – siglas en inglés) en el siguiente enlace: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds464.0/>

TAREA IV - Borrador del Informe Final

El reporte asociado con esta tarea fue una serie de datos que 3TIER calculó utilizando los resultados de la simulación y entregó al IFC. Los juegos de datos sobre una grilla horizontal de 2 km x 2 km incluyeron lo siguiente:

- a) Los promedios anuales y mensuales de velocidad del viento, densidad de potencia eólica, parámetro Weibull k (forma), temperatura y densidad del aire A 20m, 50m, y 80m sobre el nivel de la superficie;
- b) Elevación del modelo, rugosidad, y uso de suelo;
- c) Rosas de viento y potencia anuales y mensuales (16 sectores radiales) y distribución de la frecuencia de velocidad del viento (barras de 1m/s) para cada punto de grilla de 2 km x 2 km;
- d) Ángulo de inclinación en la dirección de la pendiente máxima. Para este entregable, 3TIER calculó el ángulo de inclinación según la resolución de un minuto de arco (aproximadamente 2km) para el juego de datos correspondiente a Bolivia, utilizando la topografía SRTM de NASA con una resolución de 90m. Primero, 3TIER definió cifras de elevación para cada punto en la grilla de 2 km a través de interpolación bilineal desde los cuatro puntos SRTM a su alrededor. Después, 3TIER calculó el ángulo de inclinación entre cada punto de la grilla de 2 km y los ocho puntos a su alrededor. El resultado fue una fracción y por lo tanto un valor de 0.2 indica un ángulo de inclinación de 20% (un cambio de 400 m en elevación que ocurre al recorrer una distancia horizontal de 2 km). El juego de datos entregado a IFC contiene para cada punto de la grilla de 2 km el resultado de los 8 cálculos de ángulo de inclinación con el mayor valor absoluto⁶; y
- e) Cálculos del promedio anual de producción de energía a una altura de buje de 80 m basado en la turbina GE 1.5sle.⁷

TAREA V – Divulgación

3TIER facilitó talleres en Cochabamba y La Paz el pasado 9 y 10 de marzo de 2009 para presentar los resultados de este proyecto, y hizo disponible el Atlas Eólico de

⁶ Un representación especial de este juego de datos en un mapa de Bolivia advertiría a usuarios del atlas eólico de topografía compleja y la probabilidad de turbulencia local en aquellas zonas con un ángulo extremo de inclinación (>20%). Tanto TDE como UCB pueden proporcionar los datos necesarios para crear tal representación.

⁷ En vez de utilizar curvas de potencia disponibles de GE para cada densidad de aire, 3TIER utilizó una curva de potencia para una atmósfera estándar a 15 grados centígrado con un factor de intensidad de turbulencia de 10%, que a la vez fue multiplicado por el cambio de densidad de aire. Por lo tanto, la producción de energía en este juego de datos tenderá al alza cuando hay alta densidad de aire y a la baja cuando hay baja densidad de aire.

Bolivia en <http://firstlook.3tier.com> como anticipación a estas actividades para facilitar a los usuarios interactuar con la información antes de los talleres.

La divulgación final del Atlas Eólico de Bolivia permite a los usuarios de FirstLook explorar de manera interactiva el recurso eólico cuando siguen los pasos descritos a continuación:

1. Registrarse como usuario de FirstLook® en <http://firstlook.3tier.com> al seguir las instrucciones allí dispuestas en la sección de preguntas frecuentes (FAQ en inglés) bajo el título “Account.” El proceso de registro se inicia durante la primera visita a FirstLook del usuario cuando el o ella pulse cualquiera de los dos hipervínculos en la lengüeta denominada “wind”: (i) “Please login to display free wind speed data” en el centro del mapa o (ii) “Login or register” debajo del mapa.⁸
2. Navegar por el mapa disponible en línea en el enlace <http://firstlook.3tier.com>;
3. Revisar detalles adicionales para cada punto de interés tales como densidad de potencia eólica, promedios mensuales y anuales de velocidad del viento, y factor de capacidad a partir de la ventana emergente expandida accesible al pulsar en donde dice “Click Here” en la esquina derecha inferior de la ventana emergente regular;
4. Obtener Informes Estándares (Standard) mediante cupones disponibles a través de TDE; y
5. Obtener Informes Profesionales (que incluyen una serie de tiempo para un punto específico) con un descuento de 50% utilizando cupones disponibles de TDE.

Según el contrato entre 3TIER y el IFC, los cupones serán proporcionados a través de TDE a los usuarios calificados del Atlas Eólico de Bolivia durante los primeros 12 meses después de la fecha de este Informe Final. Los usuarios interesados deberán visitar el hipervínculo denominado “Atlas Eólico” en el sitio Internet de TDE (www.tde.com.bo) para solicitar cupones FirstLook para Bolivia.

Registrarse en FirstLook es un proceso gratuito que solamente se hace una vez. La Tabla 2 compara los Informes Estándares (Standard) con los informes Profesionales del Atlas Eólico de Bolivia:

⁸ 3TIER utilizará la información proporcionada por cada usuario durante el proceso de registro de acuerdo con la Política de Privacidad (Privacy Policy) publicada en el sitio FirstLook.

Tabla 2: Comparación de Características de los Informes FirstLook

CARACTERÍSTICA	Informe Estándar	Informe Profesional
Mapa	X	X
Velocidad del viento y Factor de Capacidad por Mes	X	X
Distribución de Velocidad del viento y Potencia por Hora	X	X
Direcciones Anuales de Velocidades del Viento y Potencia (Rosas de Viento y Potencia - Promedios Anuales)	X	X
Direcciones Mensuales de Velocidades del Viento y (Rosas de Viento y Potencia – Promedios Mensuales)		X
Ciclo Diurno de Viento y Potencia basado en promedios anuales	X	X
Variabilidad Mensual del Ciclo Diurno de Viento y Potencia		X
Tablas de Velocidades y Potencia promedios por hora (Anual)	X	X
Tablas de Velocidades y Potencia promedios por hora (Mensual)		X
Archivo de Datos en formato CSV		X
Precio Sin Cupón (USD)	\$1000	\$2500
Precio Con Cupón (USD)	\$0	\$1250

TAREA VI – Informe Final y Atlas Eólico

El presente informe fue elaborado a través de la recopilación de los resultados de varios análisis hechos durante el proyecto.

TAREA VII - Taller de Capacitación y Presentación Final

3TIER facilitó talleres de capacitación en Cochabamba y La Paz para presentar el Informe Final durante la semana del 9 de marzo. Tal como los términos de referencia lo estipulan, los talleres fueron expuestos en español y trataron los siguientes temas:

- Cómo se elaboró el Atlas Eólico.
- Fortalezas y debilidades de la metodología.
- Explicación de los resultados de validación.
- Explicación de la plataforma de Internet para visualizar el atlas (FirstLook).
- Cómo interpretar los resultados de los Informes FirstLook.
- Recomendaciones sobre pasos futuros adecuados para las evaluaciones detalladas del potencial eólico en lugares específicos.

III. Climatología de Bolivia

Esta sección se refiere a la climatología de Bolivia y cómo se relaciona con el Atlas Eólico de Bolivia. El Glosario de La Sociedad Meteorológica de Estados Unidos define climatología como, “la descripción y estudio científico del clima.” Una distinción fundamental es la escala de tiempo asociada con el estudio del estado del tiempo (corto plazo) y del clima (mediano a largo plazo). La misma fuente nota bajo su definición del estado del tiempo que, “tal como se distingue de clima, el estado del tiempo consiste de las variaciones a corto plazo (minutos a días) en la atmósfera.”⁹

Según C. David Whiteman en su libro, *Mountain Meteorology*, los cuatro factores determinantes del clima son: latitud, altitud o elevación, “continentalidad” (distancia del mar), y nivel de exposición a circulaciones regionales.¹⁰ El factor determinante del clima de Bolivia que afecta al recurso eólico es la complejidad y variabilidad de la topografía del país. La superficie total de Bolivia (1,098,580 km²) varía mucho en elevación desde un punto bajo de aproximadamente 90 metros sobre el nivel del mar (msnm) cerca de la frontera entre Bolivia y Paraguay hasta un punto alto de 6,541 msnm (Nevado Sajama - 18.11° S, 68.88° W). De acuerdo con la elevación, el clima y el recurso eólico también varían mucho. El modelo WRF que 3TIER aplicó trata esta topografía compleja a través del uso de un sistema vertical de coordenadas tipo sigma que sigue el perfil del terreno. En un terreno complejo, el sistema de coordenadas sigma permite una resolución vertical alta justo sobre el nivel de la superficie, sin importar su elevación. Adicionalmente, la metodología de grillas anidadas descrita antes en este informe permite que el modelo WRF identifique los impactos de factores meteorológicos fuera de Bolivia (circulaciones regionales) sobre el recurso eólico dentro del país.

El artículo de Ismael Montes de Oca denominado “*Geografía y Clima de Bolivia*” menciona que, “el clima reinante en Bolivia es muy variado y depende fundamentalmente de la latitud, la altitud, la existencia de elevadas montañas, la presencia de zonas planas y sobre todo de la circulación de los alisios. [. . .] Las temperaturas se relacionan con tres regiones latitudinales climáticas: tropical, subtropical y templada.”¹¹ Montes de Oca también detalla las condiciones climáticas en cada una de las siete unidades fisiográficas de Bolivia. Estas unidades incluyen el “altiplano” entre 3500 y 4000 msnm, ubicado en la esquina sudoeste de Bolivia y las “llanuras,” zonas tropicales bajas a aproximadamente 500 msnm en una franja que cruza Bolivia diagonalmente entre Cobija en su esquina noroeste y Trinidad en el centro del país que incluye la ciudad de Santa Cruz.

⁹ Este glosario está disponible en inglés en el siguiente URL: <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>

¹⁰ C. David Whiteman, *Mountain Meteorology Fundamentals and Applications* (New York, NY: Oxford University Press, 2000) 3.

¹¹ Artículo en formato PDF bajado el 21 de octubre de 2008 desde el enlace: <http://www.ifeanet.org/publicaciones/anfitrionoai.php?art=749>.

Los modelos a mesoescala como WRF tienen un alto grado de precisión para identificar la distribución sobre un espacio dado del recurso eólico, pero aún así son solamente simulaciones basadas en presunciones fundamentales. Por ende, no deben ser la única base para identificar las medias anuales de velocidad del viento. Tal como se nota en otras partes de este informe, recolectar mediciones en sitio con un dispositivo de medición que ha sido correctamente calibrado es un paso necesario en cualquier lugar que parece tener un recurso eólico prometedor para buscar mayor precisión en las velocidades específicas del viento. 3TIER prestó mucha atención a las condiciones en áreas montañosas cuando elaboró el Atlas Eólico de Bolivia. Este Atlas tiene una resolución de 2 kilómetros, lo cual quiere decir que la simulación que hizo 3TIER generó valores para cada punto en una grilla horizontal de 2 km x 2 km. La herramienta FirstLook muestra un rango de la media anual de velocidad del viento en su mapa navegable en línea en vez de una cifra única para hacerle frente al tema de la incertidumbre.

Una fuerza que dirige el clima de Bolivia y forma su recurso eólico es la radiación solar fuerte que llega a la superficie en muchas partes del país, especialmente en su esquina suroeste. La imagen adjunta del mapa en línea de irradiancia global horizontal elaborado por 3TIER muestra las medias anuales sobre la región mencionada, que comienza al norte del Lago Titicaca en la frontera entre Perú y Bolivia, se extiende hacia el sureste hasta aproximadamente 100 km al suroeste de Santa Cruz, y continúa hacia el sur a través de Tarija en la región de Bolivia donde se cultivan uvas para la producción de vino.



Figura 2: Irradiancia Global Horizontal sobre Bolivia, visualizado en FirstLook

Mediante la validación del recurso eólico simulado para Bolivia en relación con los datos observados, 3TIER identificó varios parámetros de simulación empleados para simulaciones de prueba cuya configuración se tuvo que ajustar para captar correctamente el impacto de la radiación solar sobre la intensidad y variabilidad del recurso eólico de Bolivia. El resultado final de la simulación con los parámetros iniciales ajustados fue una mayor coherencia en el ciclo estacional del recurso eólico simulado frente a los datos observados.

IV. Resultados

A. Validación

Resumen

3TIER comparó las velocidades simuladas con tres juegos de datos observados de velocidades del viento, recolectados en 35 lugares dentro del dominio de simulación en Bolivia, Brasil, y Chile:

- 1) Velocidades del viento a 20 m, medidas en 10 torres altas entre el final de enero y principios de diciembre del año 2000 como parte del estudio comisionado por la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA – siglas en inglés).¹² Las ubicaciones de las torres están marcadas en la parte izquierda de la Figura 3.
- 2) Velocidades del viento a 20 m medidas entre octubre de 2003 y diciembre de 2004 en 3 torres adicionales en el norte de Chile ubicadas dentro del dominio simulado para Bolivia.¹³ Las ubicaciones de estas torres están marcadas en la parte izquierda de la figura 3.
- 3) Velocidades del viento a 10 m, medidas en 22 estaciones meteorológicas del juego de datos denominado NCEP ADP por sus siglas en inglés y proveniente de la Unidad de Procesamiento Automatizado de Datos del Centro Nacional para la Predicción del Tiempo de Estados Unidos. Estas estaciones están ubicadas mayoritariamente en Bolivia, pero incluyen algunas en Brasil. La parte derecha de la Figura 3 marca las ubicaciones de estas estaciones. La Tabla 2 contiene sus nombres y geo-referencias.

3TIER también revisó la consistencia entre datos simulados de velocidad del viento y un cuarto juego de velocidades del viento recolectado cerca de Santa Cruz, Bolivia entre 1993 y 1995 por encargo de la Cooperativa Rural de Electricidad – CRE); no obstante, esas observaciones no figuran en este informe porque:

- (i) No estaba disponible un juego completo de datos;
- (ii) No estaban disponibles las coordenadas para los anemómetros utilizados para recolectar datos de velocidad del viento; y

¹² El estudio completo, denominado en inglés “The study on rural electrification implementation plan by renewable energy in the Republic of Bolivia” está disponible por la biblioteca en línea de JICA en el siguiente enlace <http://lvzopac.jica.go.jp/library/indexeng.html> al seleccionar “Catalog Search” y ingresar como palabras claves “Bolivia Renewable Energy”. 3TIER obtuvo los datos observados de el IFC.

¹³ 3TIER obtuvo estos datos del sitio de Internet de un estudio de recursos renovables de energía del Gobierno de Chile en conjunto con el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), elaborado con fondos del GEF (Global Environment Facility – siglas en inglés). (Véase http://www.renovables-rural.cl/actividades/fr_actividades.html).

- (iii) Los datos del estudio CRE fueron recolectados fuera del período de 10 años utilizado como referencia para la simulación (1998-2007).

Estos factores impidieron que 3TIER comparara “manzana con manzana” los datos simulados con los datos recolectados del estudio CRE. Sin embargo, las diferencias entre los datos simulados y los datos observados del estudio CRE parecen consistentes con aquellas que encontró 3TIER entre los datos simulados y los datos observados en los 35 lugares mencionados arriba.

Estadísticas de Validación

La Figura 3 presenta mapas señalados con colores de la media anual de vientos simulados menos la media anual de vientos observados para ambos juegos de datos observados. Cifras positivas indican que las velocidades del viento simuladas fueron mayores a las observadas y cifras negativas indican que las velocidades del viento simuladas fueron menores. Porque las torres altas están ubicadas exclusivamente en la parte oeste de Bolivia y zonas aledañas de Chile, 3TIER escogió las estaciones meteorológicas utilizadas para este análisis por su distribución espacial, que complementa la distribución de dichas torres. Las estaciones meteorológicas (derecha) cubren el resto de Bolivia y zonas aledañas de Brasil que están dentro del dominio de simulación.

La validación elaborada por 3TIER solamente comparó datos observados con datos simulados en aquellos momentos para los cuales las cifras correspondientes existían en ambos juegos de datos. La escasez de datos observados en las torres altas durante gran parte del período simulado puede haber contribuido a un aumento en las estadísticas de error en los lugares de las torres altas (izquierda).

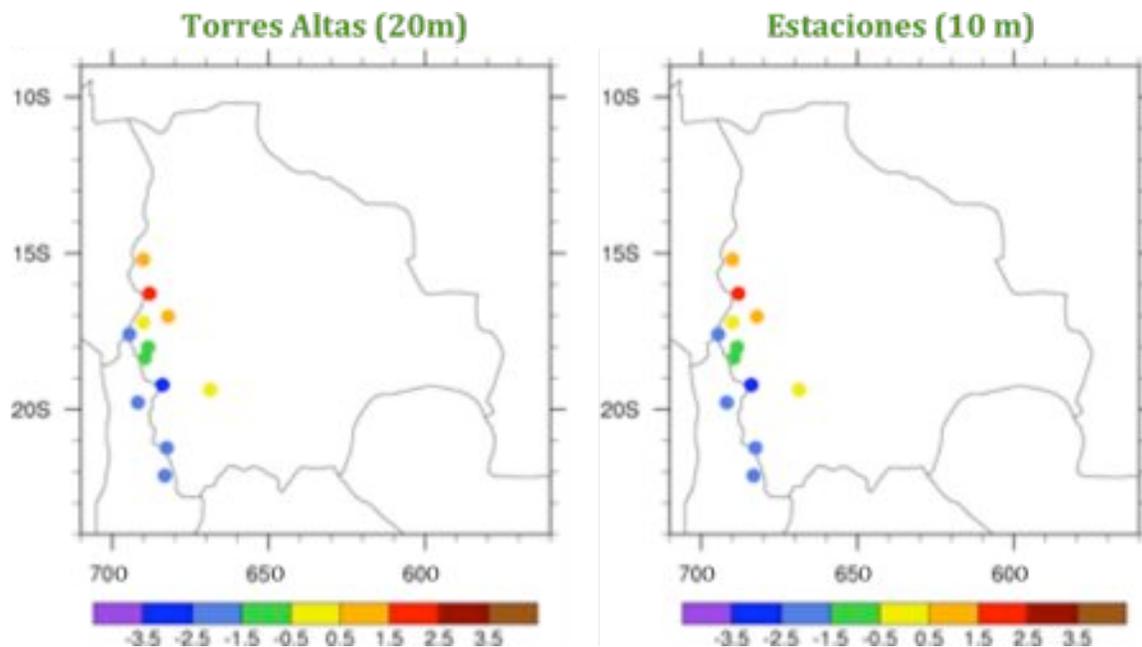


Figura 3: Mapas de diferencias entre velocidades del viento simuladas y observadas para las observaciones recolectadas en torres altas de 20 m (izquierda) y para las observaciones recolectadas en estaciones meteorológicas a 10 m (derecha). La unidad de medida es metro por segundo (m/s) y cada color representa el rango de sesgo mostrado en la leyenda al pie de la figura. Por ejemplo, puntos amarillos representan sitios de validación en los cuales los vientos simulados por 3TIER estuvieron entre 0.5 m/s menor y 0.5 m/s mayor a los vientos observados.

Tablas de Estadísticas de Validación (Estaciones NCEP ADP)

3TIER calculó estadísticas de validación para las 22 estaciones meteorológicas del juego NCEP ADP, las cuales se detallan a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3: Estadísticas Resumidas de Validación por Estación de Observación

ID de Estación	Nombre de Estación	Lat. (Obs.)	Long. (Obs.)	Lat. (Sim.)	Long. (Sim.)	Fecha de Inicio	Fecha Final	Coinc. entre Sim. y Obs. (horas)	Media. de Vel. de viento (Obs) (m/s)	Media. de Vel. de viento (Sim) (m/s)	% Error (Sim-Obs.) / Obs.
SBCR	Corumbá, Brasil	-19.00	-57.65	-19.0083	-57.6417	1998/03/31	2007/02/05	2950	2.99	2.76	-7.6
SBRB	Rio Branco, Brasil	-10.00	-67.80	-10.0083	-67.8083	1998/03/31	2007/02/26	4737	2.21	1.69	-23.5
SBVH	Vilhena Aeroporto, Brasil	-12.73	-60.13	-12.7250	-60.1250	1998/03/31	2006/04/15	1516	3.08	2.48	-19.5
SLCB	Cochabamba, Bolivia	-17.45	-66.10	-17.4583	-66.0917	1998/03/31	2007/02/26	2888	3.22	3.00	-7.0
SLCO	Cobija, Bolivia	-11.08	-68.87	-11.0750	-68.8750	1998/08/16	2007/02/26	1942	2.85	2.23	-21.7
SLCP	Concepción, Bolivia	-16.25	-62.10	-16.2583	-62.0917	1998/08/16	2007/02/26	1608	4.08	4.10	+0.7
SLET	Santa Cruz/El Trompillo, Bolivia	-17.80	-63.17	-17.8083	-63.1750	1998/08/16	2007/02/26	2807	6.03	5.87	-2.6
SLJE	San José De Chiquitos, Bolivia	-17.83	-60.75	-17.8250	-60.7417	1998/08/16	2007/02/26	1490	3.46	4.18	+20.8
SLJO	San Joaquín, Bolivia	-13.07	-64.67	-13.0750	-64.6750	1998/08/16	2007/02/10	1574	3.32	2.42	-27.2
SLLP	La Paz/Alto, Bolivia	-16.52	-68.18	-16.5250	-68.1750	1998/03/31	2007/02/26	7178	3.34	3.75	+12.3
SLOR	Oruro, Bolivia	-18.05	-67.07	-18.0583	-67.0750	1998/08/16	2007/02/26	1833	4.03	5.19	+28.8
SLPO	Potosí, Bolivia	-19.53	-65.72	-19.5250	-65.7250	1998/08/26	2007/02/26	1365	4.60	4.79	+4.0
SLPS	Puerto Suárez, Bolivia	-19.00	-57.73	-19.0083	-57.7250	1998/08/16	2007/02/26	2354	3.55	3.07	-13.6
SLRB	Robore, Bolivia	-18.32	-59.75	-18.3250	-59.7417	1998/08/16	2007/02/26	1609	4.29	4.01	-6.4
SLRI	Riberalta, Bolivia	-11.02	-66.12	-11.0250	-66.1250	1998/08/16	2007/02/26	1515	2.95	2.03	-31.1
SLRY	Reyes, Bolivia	-14.30	-67.37	-14.3083	-67.3750	1998/08/16	2007/02/26	1874	3.44	2.97	-13.8
SLSA	Santa Ana, Bolivia	-13.72	-65.58	-13.7250	-65.5750	1998/08/16	2007/02/26	2867	4.22	2.53	-40.1
SLSI	San Ignacio De Velasco, Bolivia	-16.37	-60.95	-16.3750	-60.9417	1998/08/16	2007/02/26	2182	3.71	4.12	+11.2
SLSU	Sucre, Bolivia	-19.02	-65.27	-19.0250	-65.2750	1998/08/16	2007/02/26	1929	3.11	4.30	+38.5
SLTJ	Tarija, Bolivia	-21.53	-64.72	-21.5250	-64.7250	1998/03/31	2007/02/26	1965	4.29	4.26	-0.6
SLVR	Viru-Viru, Bolivia	-17.65	-63.13	-17.6583	-63.1250	1998/03/31	2007/02/26	6441	5.30	5.48	+3.4
SLYA	Yacuiba, Bolivia	-22.02	-63.70	-22.0250	-63.6917	1998/08/16	2007/02/26	1966	4.00	3.77	-5.8

Fuente de Datos: 3TIER obtuvo esta información observada del juego denominado “Global Surface Operations” proveniente del Centro de Procesamiento Automatizado de Datos en el Centro Nacional para la Predicción Ambiental de Estados Unidos(NCEP – siglas en inglés). Se obtuvieron los datos de la Unidad de Apoyo de Datos del Centro Nacional de Investigación de la Atmósfera (NCAR- siglas en inglés desde el enlace <http://dss.ucar.edu/datasets/ds464.0/>

Altura de medición: Se asume que es 10 m, el estándar para la medición del viento en una estación meteorológica.

Abreviaciones en Tabla 3: En la tabla marcada Estadísticas Resumidas de Validación por Estación de Observación:

- “Lat (Obs.)” son los latitudes y “Lon (Obs.)” son los longitudes de las estaciones NCEP ADP data. El juego de datos NCEP ADP solamente proporcionó estos hasta una precisión de 0.01 grados.
- “Lat. (Sim.)” es la latitud y “Lon. (Sim.)” es la longitud del punto más cercano en la grilla de simulación.
- “Coinc. entre Sim y Obs.” es la cantidad total de horas en las cuales existían tanto datos observados como datos simulados, siendo estas las horas utilizadas para validación. Faltan horas de datos en la mayoría de las estaciones.
- “Media de Vel. de Viento (Obs.)” es la media de la velocidad del viento observada, expresada en metros por segundo, correspondiente solamente a aquellas horas para las cuales existían tanto datos observados como datos simulados.
- “Media de Vel. de Viento (Sim.)” es la media de las velocidades del viento simuladas, expresada en m/s, correspondiente solamente a aquellas horas para las cuales existían tanto datos observados como datos simulados.
- “%Error” es el porcentaje de error en la velocidad del viento simulada, calculado como (Media de Velocidad del Viento Simulada – Media de Velocidad del Viento Observada) / Media de Velocidad del Viento Observada.

Tabla 4: Estadísticas Resumidas de Sesgo y Error (Datos NCEP ADP)

Media del sesgo de velocidad del viento	-0.14 m/s	-4.58%
Error Medio Absoluto (MAE – siglas en inglés)	0.53 m/s	15.46 %
Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE – siglas en inglés)	0.67 m/s	19.46 %

En la tabla resumida arriba, la media del sesgo de velocidad del viento, Error Medio Absoluto (MAE – siglas en inglés), y Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE – siglas en inglés) son presentados tanto en m/s como también como porcentajes de error. Las cifras fueron calculadas como (Media de velocidad del viento simulada – Media de velocidad del viento observada) / Media de velocidad del viento observada.

Sesgo de la Simulación

A continuación se presentan histogramas de las medias anuales de las diferencias entre velocidades del viento simuladas y las observadas para cada juego de datos. La magnitud de las diferencias es consistente con aquellas que 3TIER ha encontrado para juegos de datos similares en otras partes del mundo. Las diferencias con respecto a las estaciones meteorológicas son menores que aquellas que normalmente se encuentran para juegos de datos generados por simulaciones con una resolución de 5 km. Mientras la diferencia entre datos simulados y datos observados en torres altas es mayor a lo que 3TIER ha encontrado en otros lugares, las torres fueron ubicadas en terreno montañoso, lo cual tiende a incrementar los errores hallados en el juego de datos simulados. También, el número de muestras varió según el punto. En las torres altas (figura izquierda), el número de muestras horarias utilizadas para calcular la media anual estuvo entre 436 y 793 con un promedio de 627. En las estaciones NCEP ADP (figura derecha), el número de muestras horarias utilizadas para calcular la media anual estuvo entre 1490 y 7178, con un promedio de 2483. El número mínimo de muestras horarias durante en cada mes fue de 42 para las torres altas y 72 para las estaciones NCEP ADP.

El análisis de 3TIER indica que las velocidades del viento simuladas tiene un sesgo sistemáticamente bajo cerca de la frontera entre Chile y Bolivia y en el norte de Bolivia. En otras partes de Bolivia, las velocidades del viento simuladas tienen un sesgo positivo pequeño o ligeramente alto. Sobre todo, basado en el sesgo ligeramente bajo al promedio de velocidades del viento simuladas relativo a velocidades del viento observadas, 3TIER considera un poco conservadoras las velocidades del viento simuladas para Bolivia.

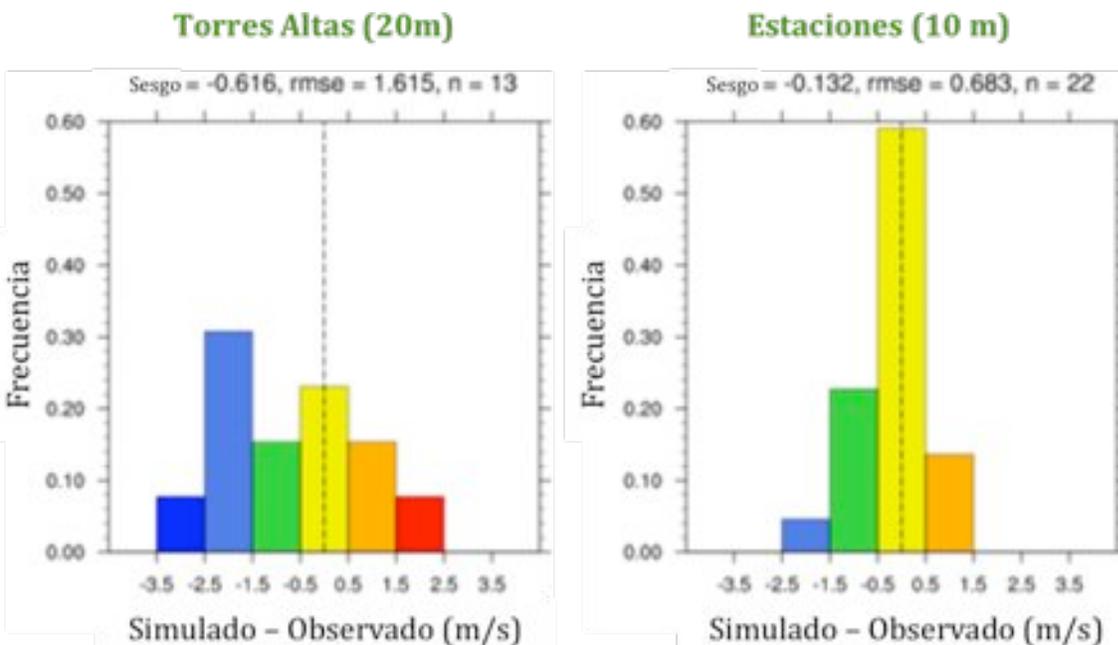


Figura 4: Histogramas de velocidades del viento simuladas menos la media anual de velocidades del viento observadas para: velocidades del viento simuladas (izquierda) menos los datos observados en torres altas a 20 m, y velocidades del viento simuladas (derecha) menos los datos observados a 10 metros en las estaciones meteorológicas. La unidad de medida para sesgo es metro por segundo (m/s). Los colores de las barras verticales son los mismos que se utilizó para la representación especial de sesgo por sitio de validación en la Figura 3. Por ejemplo, barras amarillas representan sitios de validación en los cuales los vientos simulados por 3TIER estuvieron entre 0.5 m/s menor y 0.5 m/s mayor a los vientos observados.

Ciclo Mensual / Estacional

3TIER comparó los ciclos estacionales entre las velocidades del viento simuladas y las observadas, considerando la media de cada juego de datos. El ciclo estacional para los datos simulados se compara favorablemente con el ciclo estacional para ambos juegos de datos observados aunque el traslape menor entre los datos simulados y los datos observados para las torres altas crea un ciclo estacional bastante complejo para comparación con las torres.

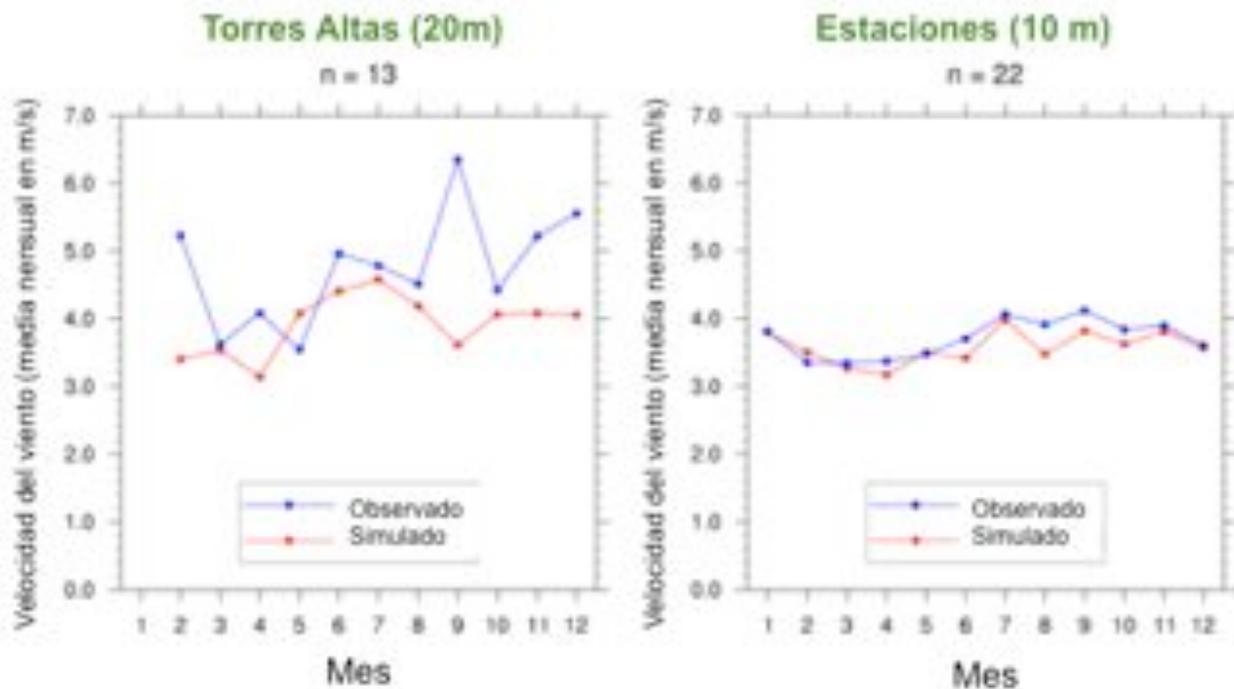


Figura 5: Ciclo estacional de la media mensual de velocidad del viento para datos simulados y observados correspondiente a: la velocidad del viento a 20 m en 13 torres altas (promedio - izquierda) y la velocidad del viento a 10 metros en 22 estaciones meteorológicas (promedio - derecha). La unidad de medida es metro por segundo (m/s).

Ciclo Diurno

3TIER comparó los ciclos diurnos de la velocidad del viento para los datos simulados y observados con base en el promedio de cada juego de datos. La comparación con las estaciones meteorológicas indica que la sincronización del ciclo diurno es buena en esos lugares, aunque la amplitud del ciclo diurno para los datos simulados difiere de aquel de los datos observados. La comparación con las torres altas indica que el máximo y el mínimo en el ciclo diurno simulado tienden a ocurrir un par de horas más tarde en estos lugares. Estos resultados son consistentes con la validación de juegos de datos simulados en otros proyectos. Mientras los ciclos estacionales de los datos simulados tienden a aproximarse cercanamente, el ciclo diurno de los datos simulados tiende a ser una aproximación razonable, aunque no tan cercana con los datos observados. Aunque el ciclo diurno fue muy diferente en las torres altas (izquierda abajo) del ciclo diurno en las estaciones meteorológicas (derecha abajo), la simulación captó las diferencias en magnitud relativa entre las dos, con los desfases de tiempo mencionados arriba.

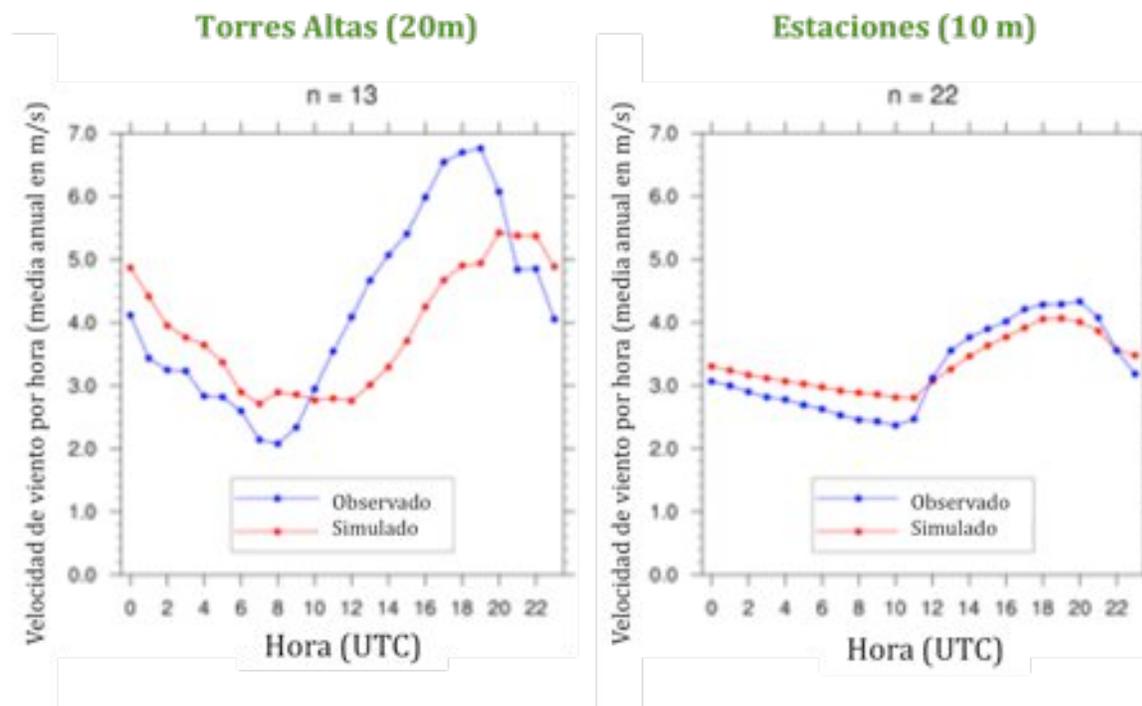


Figura 6: Ciclo diurno de la media de velocidad del viento por hora para datos simulados y observados de: velocidad del viento a 20 m en 13 torres altas (promedio de todas - izquierda) y velocidad del viento a 10 m en 22 estaciones meteorológicas (promedio de todos - derecha). La unidad de medida es metro por segundo (m/s).

Conclusión sobre la Validación

La validación de datos simulados contra los datos observados en 35 lugares a lo largo del dominio rectangular de simulación de Bolivia arrojaron resultados parecidos a aquellos obtenidos en otras regiones en las cuales 3TIER ha hecho análisis de

validación sobre los resultados de sus simulaciones. En general, la magnitud de las velocidades del viento simuladas tendía a ser ligeramente menor de aquella de las observadas. Para ciclos estacionales y diurnos, la comparación entre datos simulados y datos observados también resultó consistente con las validaciones elaboradas por 3TIER de los resultados de otras simulaciones. Con respecto a dirección, 3TIER hizo un análisis de rosas de viento que compara las direcciones simuladas y observadas de viento en las 22 estaciones NCEP ADP a nivel mensual y anual. Por solicitud del IFC, 3TIER incluyó dicho análisis en el Apéndice III al final de este informe.

Las comparaciones futuras entre datos simulados y otros datos recolectados con anemómetros instalados en torres altas dentro del dominio de simulación para Bolivia probablemente confirmarán el sesgo ligeramente bajo que 3TIER identificó durante su validación. Los valores en cada esquina de cada cuadro de 2 km x 2 km de la grilla de simulación representan promedios sobre el espacio que las rodea. Las velocidades del viento observadas en lugares que no sean puntos de la grilla de simulación tenderán a superar las velocidades simuladas, especialmente en lugares seleccionados para recolectar datos expresamente por contar con un recurso eólico muy robusto. Por ejemplo, un anemómetro ubicado en la cima de una cordillera entre dos puntos de la grilla de simulación probablemente marcará velocidades del viento mayores a aquellas simuladas en los puntos adyacentes de la grilla.

B. Mapas

Mapas navegables e interactivos de las medias anuales de velocidad del viento a 20, 50 y 80 metros están disponibles gratis en: <http://firstlook.3tier.com>. Además, el IFC ha financiado una nueva funcionalidad en FirstLook que permite que los usuarios de los mapas accedan a información adicional de utilidad para una evaluación preliminar de sitio en lugares específicos a través de una ventana emergente expandida. A continuación, se muestra una vista de pantalla que incluye el recurso eólico de Bolivia a 80 m sobre el nivel del suelo:



Figura 7: El recurso eólico de Bolivia a 80 m, tal como se visualiza en FirstLook

Para acceder a la ventana emergente expandida mencionada arriba, los visitantes de FirstLook deben pulsar en donde dice “Click Here” en la esquina derecha inferior de la ventana emergente que aparece sobre de la flecha anaranjada indicando el sitio seleccionado en Bolivia. Esta ventana emergente expandida solamente está disponible para lugares dentro de Bolivia y el IFC ha pactado con 3TIER para que se mantenga el acceso gratuito a la ventana expandida durante 3 años contados a partir de la fecha de este Informe Final.

El Apéndice II contiene los siguientes 23 mapas elaborados por 3TIER para este proyecto:

- (1) Media anual de velocidad del viento a 20m
- (2) Media anual de velocidad del viento a 50m
- (3) Media anual de velocidad del viento a 80m
- (4) Valores para el parámetro A de Weibull a 20m
- (5) Valores para el parámetro k de Weibull a 20m
- (6) Valores para el parámetro A de Weibull 50m
- (7) Valores para el parámetro k de Weibull 50m
- (8) Valores para el parámetro A de Weibull 80m
- (9) Valores para el parámetro k de Weibull 80m
- (10) Factor de Capacidad Anual a 80 m (turbina GE 1.5 sle)¹⁴
- (11) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Anual)
- (12) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Enero)
- (13) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Febrero)
- (14) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Marzo)
- (15) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Abril)
- (16) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Mayo)
- (17) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Junio)
- (18) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Julio)
- (19) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Agosto)
- (20) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Septiembre)
- (21) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Octubre)
- (22) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Noviembre)
- (23) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Diciembre)

¹⁴ Factor de Capacidad Anual es denominado “Annual Power Capacity” en la ventana emergente expandida disponible en FirstLook. Expresado como un porcentaje, este variable es una razón entre la producción real (en este caso simulada) de energía dividido por la producción teórica durante un año entero. Para este ejemplo, una turbina GE 1.5 sle que opera a su capacidad máxima durante un año generaría 13,410 megavatio horas de energía (1.5 megavatios x 24 horas x 365 días); no obstante, turbinas eólicas no siempre operan a su capacidad máxima debido a la variabilidad del recurso eólico. Un factor de capacidad anual de 35% en un lugar significa que se podría esperar la generación por una turbina GE 1.5 sle de 4,599 megavatio horas de energía promediado sobre el año en ese lugar. En vez de utilizar curvas de potencia proporcionadas por GE para cada densidad de aire, 3TIER utilizó una curva de potencia para una atmósfera estándar a 15 grados centígrado con un factor de intensidad de turbulencia de 10%, que a la vez fue multiplicado por el cambio de densidad de aire. Por lo tanto, la producción de energía en este juego de datos tenderá al alza cuando hay alta densidad de aire y a la baja cuando hay baja densidad de aire.

Los pixeles de data en estos mapas tienen una resolución de 0.016666 grados; no obstante, dado que los mapas representan la curvatura de la tierra en una superficie plana, la medida lineal de cada píxel varía según el latitud. En el rango de latitudes cubierto por el Atlas Eólico de Bolivia (entre 9.7 grados sur y 22.9 grados sur), 0.016666 grados equivale a distancias este-oeste entre aproximadamente 1.8270 km y 1.7088 km y distancias norte-sur entre aproximadamente 1.8415 km y 2.2135 km.¹⁵ Por solicitud del IFC, 3TIER utilizó un método de interpolación denominado “punto más cercano” (nearest-neighbor interpolation en ingles) para asignar los colores a los mapas impresos y sus correspondientes archivos digitales, estos últimos disponibles de TDE. A través de dicho método, 3TIER no alisó las transiciones entre colores entre puntos de la grilla de análisis. Cambios abruptos visibles al acercarse sobre un lugar específico en los mencionados archivos digitales deben alertar a los usuarios del Atlas Eólico de Bolivia que alguna condición (posiblemente un elemento topográfico pronunciado) que podría causar tales cambios.

Como figura en sus respectivas leyendas, los mapas incluyen la red de transmisión de Bolivia, las áreas protegidas, vías terrestres, fronteras internacionales, nombres de ciudades, los nombres de los 9 Departamentos de Bolivia, y las divisiones entre ellos. TDE coadyuvó en la provisión de esta información importante a 3TIER para el Atlas Eólico de Bolivia.

La versión digital de este informe ha sido configurada con un formato que facilita bajarlo vía Internet. No obstante, las versiones impresas de este informe incluyen cada mapa en formato de 11” x 17”. Mapas digitales en formato PNG y formato GeoPDF también están disponibles a través de TDE. El Apéndice II describe como utilizar los mapas en formato GeoPDF, lo cual que requiere el software gratuito Adobe Reader (Versión 9.1 o la más reciente), disponible para descarga en <http://get.adobe.com/reader/>.

¹⁵ Una herramienta básica para calcular la distancia lineal entre dos puntos para los cuales se conoce el latitud y el longitud está disponible en línea en el sitio web del Centro de Datos sobre Terremotos del Norte de California (Northern California Earthquake Data Center en ingles) con el URL: <http://www.ncedc.org/convert/distance.html>.

V. El Potencial para la Energía Eólica en Bolivia

A. *Fundamentos del Recurso Eólico*

Ninguna fórmula única define “el mejor recurso eólico” porque muchas variables afectan el éxito posible de un proyecto de energía eólica. La cantidad de energía que puede ser generada por una turbina eólica se ve afectada por la velocidad del viento, la densidad del aire, el diámetro del rotor y las eficiencias de la turbina y el sistema eléctrico. Como generador de energía eólica, deberá seleccionar el rotor con diámetro más grande y la turbina y el sistema eléctrico más eficiente, dentro de los parámetros económicos compatibles con su aplicación. La velocidad del viento permanece como el factor único más importante en la determinación del éxito de su proyecto y no podrá hacer mucho para cambiar ello, mas allá de seleccionar el lugar óptimo para la instalación de la turbina. Debido a que la potencia varía como el cubo de la velocidad del viento, un aumento en un momento dado de 25% en la velocidad del viento da como resultado que la salida de potencia de su turbina podría potencialmente duplicarse en ese mismo momento. Al considerar la media anual de velocidad del viento, la relación entre velocidad de viento y producción de potencia es más compleja y depende de la distribución de velocidades durante el período para el cual se calculó la media.

Desafortunadamente, las altas velocidades del viento por sí solas no son suficientes. El momento adecuado es crucial para determinar si su recurso eólico es apropiado o no. Los vientos de alta velocidad durante el invierno suministran poco beneficio económico si su demanda pico es para las necesidades de enfriamiento durante el verano. Del mismo modo, un sistema residencial sin conexión a la red de distribución requerirá de mayor capacidad de almacenamiento de energía si es que los vientos más fuertes ocurren durante la noche en vez de durante el día. El mejor recurso eólico es aquel que proporciona vientos de alta velocidad cuando la electricidad generada tiene el valor más alto.

Las turbinas eólicas funcionan lo mejor posible dentro del rango de velocidades para el cual su fabricante las diseñó, el cual varía según el tamaño y el uso deseado del equipo. En el límite inferior del rango mencionado se encuentra la velocidad de arranque (denominada “cut-in speed” en inglés), cuando una turbina comienza a generar potencia. La velocidad de corte de una turbina, cuando deja de generar potencia, se encuentra en el límite superior del rango. Por ejemplo la turbina 1.5 sle del fabricante GE, utilizada por 3TIER en FirstLook como equipo ejemplar a 80 m, tiene una velocidad de arranque de 3.5 m/s y una velocidad de corte de 25 m/s. Dentro del rango está la velocidad nominal de cada turbina, entendida como la velocidad más baja en la cual esa turbina genera su potencia nominal (1.5 MW).

Mientras que un estudio de datos recolectados por un anemómetro proporcionará la mayor precisión posible con respecto a la información de sincronización mencionada arriba, un informe FirstLook puede proporcionar una aproximación preliminar que ha sido diseñada para facilitar la toma de decisión relacionada con la instalación o no de

un anemómetro. El IFC ha hecho provisiones para la emisión de cupones de descuento a usuarios calificados del Atlas Eólico de Bolivia. Los usuarios interesados deberán visitar el hipervínculo denominado “Atlas Eólico” en el sitio Internet de TDE (www.tde.com.bo) para solicitar cupones FirstLook para Bolivia.

B. Distribución Espacial del Recurso Eólico

3TIER revisó las medias anuales de velocidad del viento a tres alturas de buje (20, 50, y 80 m) utilizando la barra de colores en la leyenda del mapa, que se extiende entre menos de tres y más de nueve metros por segundo. En la barra de colores, colores fríos (morado, azul, moviendo hacia verde) representa velocidades de viento bajas mientras los colores cálidos (amarillo, naranja, moviendo hacia rojo) representan velocidades de viento cada vez mayores. Al buscar secciones anaranjadas y rojas de los mapas a las tres alturas, 3TIER notó que el recurso eólico más robusto en Bolivia parece estar concentrado en cuatro sectores:

- 1) Alrededor de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, en su mayoría al sur y al oeste del centro urbano;
- 2) En la frontera suroeste de Bolivia con Chile y Argentina en el Departamento de Potosí;
- 3) En un “corredor” que va más ó menos de este a oeste entre las ciudades de Santa Cruz y La Paz que corre al sur de la línea de transmisión de 230 KV entre Santa Cruz y Cochabamba y ligeramente al norte de la misma entre Cochabamba y La Paz; y
- 4) En un “corredor” más o menos norte-sur entre el área justo al este de la ciudad de Oruro y al oeste de la ciudad de Potosí.

El recurso eólico en el norte de Bolivia está limitado. Aparte de las áreas protegidas en el centro del Departamento de La Paz, parece haber muy poco recurso eólico al norte de Trinidad (14.84° S, 60.93° W).

Otro área con un recurso eólico aparentemente fuerte es la orilla del famoso lago Titicaca al noroeste de La Paz. Cualquiera que sea el motivo, en las áreas en las cuales el desarrollo esté prohibido, será muy importante su evaluación individual. El Atlas Eólico de Bolivia identifica las áreas protegidas dentro o cerca de los primeros 3 sectores identificados arriba. Por ejemplo, en el sector 2, La Reserva Nacional de Fauna Andina Eduardo Avaroa cubre la esquina suroeste de Bolivia. El sector 3 incluye 2 parques nacionales (Carrasco y Amboro). La coordinación cercana con las autoridades de gobierno cuya responsabilidad incluye mantener estas áreas protegidas también será un elemento importante en el proceso para cualquier persona o empresa que desee aprovechar la energía eólica en estas áreas.

Tal como se sugiere arriba en la Sección V. A. del presente informe, cuando el viento sopla y como lo hace frecuentemente resulta más relevante que la media anual de velocidad de viento al elegir sitios para análisis futuro. La distribución de frecuencia de velocidades de viento (también conocido como la distribución Weibull) es una función

de densidad de probabilidades con la forma de una campana asimétrica que muestra la relación entre cada velocidad de viento (eje horizontal) y el porcentaje de tiempo durante el cual esa velocidad ocurre en un lugar dado (eje vertical). La distribución Weibull tiene dos parámetros que ingenieros y promotores de proyectos suelen estudiar con frecuencia: A (escala) y k (forma).¹⁶

C. Densidad de la Potencia Eólica

El resultado de los cálculos efectuados por 3TIER de Densidad de Potencia Eólica ofrece un filtro adicional más allá de una revisión de las medias anuales de velocidad de viento. La Densidad de Potencia Eólica cuantifica la cantidad de vatios de potencia que están disponibles para cada metro cuadrado dentro del radio de las aspas de una turbina eólica (también conocido como el “área barrida por las aspas,” – “swept area” en inglés). Este cálculo considera velocidad de viento, densidad de aire y la distribución de frecuencia para velocidades de viento. 3TIER utilizó la siguiente fórmula para calcular Densidad de Potencia Eólica (DPE):

$$DPE = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\rho)(v_i^3) \text{ en la cual}$$

n = el número de registros considerados para efectuar el cálculo

ρ = la densidad de aire (kg/m^3)

v_i^3 = la velocidad de viento $i^{\text{ésima}}$ a la tercera potencia (m/s)

La unidad de medida para Densidad de Potencia eólica es vatios por metro cuadrado (W/m^2).

La sección de preguntas frecuentes (FAQ – siglas en inglés) de la página de Internet de la Asociación Americana de Energía Eólica (AWEA – siglas en inglés) resume la relevancia de la densidad de potencia eólica en: <http://www.awea.org/faq/basicwr.html>

Al revisar mapas de la media anual de la densidad de potencia eólica en Bolivia, 3TIER notó una reducción del alcance de los sectores 1-4 con respecto a los mapas de la media anual de velocidad del viento. Tal como se evidencia en la fórmula arriba, la densidad de potencia eólica varía directamente en proporción con la densidad de aire. Por lo tanto, en lugares con densidades bajas de aire, se deben esperar densidades

¹⁶ El Apéndice I describe como estos parámetros fueron calculados para este proyecto. Dado que 3TIER desarrolló los parámetros Weibull presentados en este informe a partir de los resultados de una simulación, solo se aproximarán a aquellos que uno encuentra en el mundo real. Solamente medición a largo plazo con un anemómetro o otro dispositivo correctamente calibrado puede asegurar el cálculo preciso de la distribución de frecuencia para velocidades de viento y la función de densidad de probabilidad relacionada con ella.

bajas de potencia eólica. Muchos de los lugares incluidos en los sectores 2 a 4 descritos arriba están situados a elevaciones mucho mayores al nivel del mar, donde aire menos denso ejerce menor fuerza sobre las aspas de una turbina eólica a una velocidad dada de lo que ejercería a la misma velocidad si la turbina estuviera situada al nivel del mar.

Otro método para revisar la elevación y densidad de la potencia eólica para cualquier lugar en Bolivia es utilizar la funcionalidad de la ventana emergente expandida que el IFC ha provisionada en el sitio FirstLook. Tal como elimina la necesidad para interpolaciones oculares al permitir la selección de un lugar exacto, dicho método permite revisar la densidad de la potencia eólica relativa en múltiples alturas de buje (20, 50, y 80 m).

VI. El Atlas Eólico de Bolivia en Contexto

A. Resumen

El Atlas Eólico de Bolivia es el primero de una serie de pasos necesarios para desarrollar con éxito un proyecto de energía eólica. Una guía detallada al desarrollo de un proyecto de energía eólica supera el alcance de este proyecto, pero la siguiente gráfica sugiere una progresión lógica de pasos hacia la operación exitosa de un central eólico:



La gráfica arriba denomina como si fuera un semáforo las actividades futuras necesarias para el desarrollo de un proyecto eólico. El Atlas Eólico de Bolivia es una herramienta adecuada para la fase de prospección y por lo tanto ese bloque es verde. Este informe y algunos de los recursos disponibles en FirstLook permiten hacer un análisis preliminar del recurso y por lo tanto ese bloque es amarillo. Los demás bloques son rojos porque sólo el Atlas Eólico de Bolivia no es suficiente para guiar las decisiones necesarias para tomar esos pasos.

El resultado del análisis efectuado por 3TIER está basado en simulaciones informáticas y datos observados. Las simulaciones fueron generadas por un modelo de Predicción Numérica del Tiempo (PNT) similar a aquel utilizado por servicios gubernamentales de meteorología para producir pronósticos locales del tiempo. El modelo PNT simula las circulaciones atmosféricas y contabiliza los efectos del uso de la tierra y la topografía. 3TIER realizó las simulaciones para Bolivia a una resolución espacial de 2 km. Las cifras presentadas para cualquier lugar entre los puntos en la grilla de 2 km x 2 km están interpoladas. Desafortunadamente, los modelos solamente ofrecen una aproximación del mundo real. La información de fuentes de libre acceso al público provenientes de estaciones meteorológicas y otras fuentes que indican la velocidad de los vientos fue utilizada para validar los resultados de la simulación y puede ser utilizada para estimar el nivel de incertidumbre asociado con las velocidades del viento presentado en FirstLook.

La potencia generada a una velocidad específica del viento depende del equipo instalado en el sitio. Las diferentes turbinas eólicas tienen diferentes velocidades nominales. La velocidad nominal del viento es la velocidad a la cual una turbina produce su potencia nominal. Si dos turbinas eólicas tienen la misma potencia nominal, pero una tiene una velocidad nominal mucho más baja que la otra, la turbina con la velocidad nominal menor típicamente producirá más potencia cuando se promedia durante un período prolongado de tiempo. La función que relaciona la potencia con la velocidad del viento se denomina curva de potencia y es diferente para cada turbina. Para generar informes en FirstLook, 3TIER utiliza las siguientes tres turbinas estándares según la altura de buje seleccionada:

- 80 m: Turbina Modelo GE 1.5sle
- 50m: Turbina Modelo Vestas V52
- 20m: Turbina Modelo Bergey XL.1

Usuarios del Atlas Eólico de Bolivia no deben tomar decisiones sobre el diseño o construcción de una central eólica basado exclusivamente en la información contenida en este informe o disponible en FirstLook. El Atlas Eólico de Bolivia fue diseñado para proporcionar una evaluación realista del recurso eólico en cualquier punto específico; no obstante son de esperar varianzas entre el viento y el funcionamiento de turbinas simulado y real. Esto se debe en parte al promediar de datos de topografía y uso de suelo hasta la resolución de la grilla de simulación (2 km). En la práctica, rugosidad, obstáculos, y efectos de orografía y trazado de turbinas causarán que la producción de cada turbina en las condiciones y topografía reales difiera de la producción simulada con el modelo PNT. Los usuarios deben de mantenerse conscientes de las limitaciones del análisis de datos para un juego de puntos de grilla con una distancia horizontal de 2 km entre si.

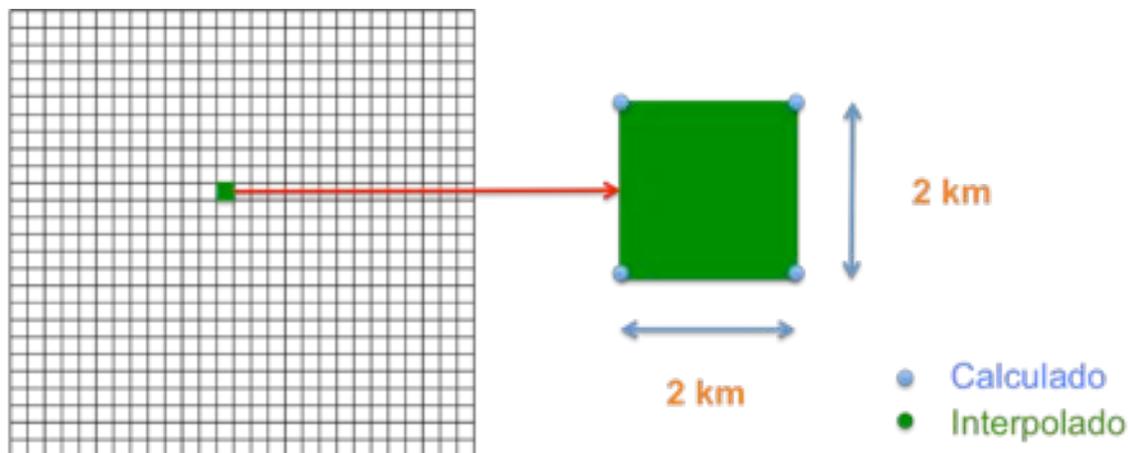


Figura 8: La gráfica arriba muestra la resolución horizontal de la simulación PNT utilizada para crear el Atlas Eólico de Bolivia. El modelo WRF calcula cifras meteorológicas discretas (velocidad del viento, temperatura, presión atmosférica, etc.) para cada esquina de cada celda en la grilla de 2 km x 2 km. Al iniciar la simulación 3TIER atribuyó a cada punto de la grilla información sobre uso de suelo, elevación y rugosidad.

Dada la resolución de 2 km del modelo PNT empleado, el recurso eólico en un punto puede ser distinto del estimado disponible en FirstLook. Mientras las simulaciones informáticas incorporaron los efectos del terreno sobre las condiciones atmosféricas, algunas características locales del terreno (especialmente en áreas montañosas de Bolivia) pueden ser demasiado pequeñas para que la simulación las capte. Estas limitaciones son una parte inherente de cualquier estimado de velocidad del viento o de potencia. Solamente con observaciones cuidadosamente recolectadas a largo plazo en la ubicación futura de una turbina se podría obtener una evaluación inequívoca del recurso eólico en ese sitio. Dado que recolectar observaciones así consume mucho tiempo y recursos financieros, hacerlo solamente debe ser considerado para lugares en los cuales el recurso eólico es suficiente para justificar la inversión necesaria.

B. Análisis Adicional

Después de identificar sitios para proyectos a partir de las áreas denominadas como de interés para evaluación adicional, 3TIER recomienda procurar la asistencia de profesionales calificados para la elaboración de los siguientes estudios complementarios para guiar la toma de decisiones sobre el desarrollo de la energía eólica, descripciones de las cuales han sido asociados con los pasos enumerados en la gráfica proporcionada en la Sección VI A:

- 3. Selección de Lugares para Medir – Elegir precisamente donde se debe recolectar datos requiere de una visita al sitio. Durante la visita, hay que fijarse

con cuidado en la orografía¹⁷ local, los obstáculos al viento, y la elaboración de una evaluación de rugosidad¹⁸ para el sitio.

- 4 Recolección de datos meteorológicos relevantes *in situ*: (Velocidad y dirección del viento, temperatura, y presión atmosférica) Los datos recolectados servirán para corroborar o refutar los resultados de la simulación informática de 3TIER. El dispositivo de medición (anemómetro u otro) debe ser: (i) correctamente calibrado¹⁹, (ii) instalado en un mástil alto con un diseño adecuado, y (iii) su montaje junto con cualquier *boom* debe cumplir con los estándares de la industria eólica;
- 5. Extrapolación a partir de datos recolectados *in situ* - Existen varias metodologías para la extrapolación tanto en espacio como en tiempo a partir de datos recolectados *in situ* utilizando torres meteorológicas. Incluyen: (i) simulación a micro-escala con herramientas de software como WAsP o WindPro (extrapolación en espacio) y (ii) investigación de datos eólicos recolectados en otros sitios adyacentes al sitio actual de medición para la normalización de los datos a un año medio de viento (extrapolación en tiempo).
- 5. Análisis de la variabilidad del recurso eólico durante el mediano a largo plazo – Otro método para extrapolar en el tiempo involucra el uso adicional de modelos tipo PNT. Tal análisis es muy importante para facilitar la planificación del despacho de potencia porque el viento es el “combustible” para un proyecto de energía eólica y por lo tanto uno de los motores principales de los ingresos financieros de cada proyecto. Dado que el recurso eólico varía de año a año igual a lo que puede variar de mes a mes, contextualizar un juego de datos observados recolectados durante un año o dos en un registro histórico de 15 a 20 años facilitará un estimado más preciso de los ingresos de cada proyecto, a la vez que toma en cuenta años con un recurso eólico débil, normal, y fuerte en términos relativos. Ya que sobreestimar el viento es el error más problemático, subestimar el recurso eólico esperado durante los primeros años que opera un proyecto puede causar que las entidades financieras diseñen una estructura de pagos para un préstamo que no es consistente con la producción real del proyecto.
- 5. Evaluación de la demanda para producción futura - El alcance de este

¹⁷ Según el Diccionario de la Real Academia Española, disponible en línea a través de la siguiente enlace: <http://www.rae.es/rae.html>, la definición de orografía es, “1. f. Parte de la geografía física que trata de la descripción de las montañas.”

¹⁸ La Asociación Danesa de la Industria Eólica ofrece una descripción en español del concepto de rugosidad en el siguiente enlace: <http://www.windpower.org/ES/tour/wres/shear.htm>

¹⁹ Se efectúa la calibración de un anemómetro en instalaciones cerradas (túneles de viento) en las cuales cada dispositivo puede ser expuesto a viento de una velocidad conocida con turbulencia mínima. Se hace ajustes al anemómetro para asegurar que mide la velocidad de viento conocida con un grado aceptable de precisión. Los distribuidores de estos equipos utilizan diferentes estándares de calibración y deben poder proporcionar detalles relacionados con la calibración de sus anemómetros.

aspecto dependerá del uso destinado para la energía eólica en cada lugar seleccionado. Aquellos que instalan turbinas eólicas para apoyar una actividad específica con una demanda energética intensiva (como podría ser una planta desalinizadora) tendrán prioridades distintas a aquellos que motivan al dueño de un pequeño hotel ecológico sin conexión a la red de transmisión que desea suplementar la producción de su mini-turbina hidráulica o una unidad gubernamental de planificación que utiliza datos de viento para identificar lugares donde plantas diesel independientes ya existentes podrían ser utilizados con mayor eficiencia en conjunto con sistemas eólicos. Para permitir la verificación de la utilidad de un equipo para una aplicación específica, algunos fabricantes de turbinas o sus representantes también ofrecen testimoniales sobre aquellos clientes que han utilizado sus turbinas exitosamente.

- 6. Evaluación de posibles impactos ambientales, sociales y económicos: (Características geológicas y geotécnicas, geomorfología, uso de suelos, estudios de ruido, ecosistema (flora y fauna), acceso terrestre, efectos y/o beneficios para comunidades aledañas, etc.);
- 6. Evaluación de amenazas naturales a la infraestructura de generación: (Amenazas sísmicas, actividad volcánica, erosión);
- 6. Estudios de la integración de energía eólica a la red: Este tipo de análisis debe enfocarse en la operación eficiente del sistema completo de transmisión y distribución. Debe considerar tanto la disponibilidad y ubicación de sistemas de transmisión dentro de una distancia razonable del punto de generación de energía eólica como también las condiciones regulatorias en el sector energético de Bolivia que afectan la habilidad de consumidores para comprar energía proveniente de fuentes renovables como el viento.

C. Recursos Gratuitos Adicionales

- *RETScreen International* (www.etscreen.net) ofrece múltiples recursos didácticos, incluyendo un juego de software denominado RETScreen, diseñado para facilitar el análisis de proyectos de energía renovable. El sitio también ofrece un libro didáctico electrónico con un capítulo dedicado exclusivamente al desarrollo de proyectos de energía renovable. Muchos de los materiales que provee RETScreen también han sido traducido del inglés a varios otros idiomas, incluyendo el español.
- El sitio de Internet de *La Asociación Danesa de la Industria Eólica (The Danish Wind Industry Association)* tiene una sección muy útil denominada “know how,” incluyendo todo, desde un guía para niños llamado “Viento con Moliner” hasta una “visita guiada” que describe muchos de los fundamentos de la energía eólica. Visite <http://www.windpower.org> para mayor información.
- La sección denominada “Resources” de la página de Internet de la Asociación

Norteamericana de Energía Eólica (AWEA – siglas in inglés) también contiene mucha información de utilidad como referencia. Visite <http://www.awea.org/>. El Manual para la Selección de Sitios para Energía Eólica (*Wind Energy Siting Handbook en inglés*) está disponible en el siguiente URL:
http://www.awea.org/sitinghandbook/download_center.html

Apéndice I: Cálculo de los Parámetros Weibull

A solicitud del IFC, 3TIER calculó los parámetros Weibull para el Atlas Eólico de Bolivia según los lineamientos definidos por el Laboratorio Nacional para la Energía Sostenible (RISØ) en la Universidad Técnica de Dinamarca – (DTU – siglas en inglés) para la elaboración del Atlas Eólico de Europa, y de una manera apropiada para simulaciones de tipo Predicción Numérica del Tiempo (PNT) a mesoescala.

La distribución Weibull, que muestra en formato gráfico la probabilidad que el viento soplará con cada velocidad dada, se define en la Formula #1:

$$f(v) = \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad \text{FÓRMULA \#1}$$

Las variables utilizadas en esta fórmula y presentadas en el Atlas Eólico de Bolivia son:

- **A**: el factor o parámetro de escala con unidades de medida de velocidad del viento. (Nota: Algunas fórmulas para la distribución Weibull identifican a este parámetro como c.)
- **k**: un factor sin dimensión de forma. Al incrementarse el valor de **k**, la distribución se torna mas angosta y alta. Cuando **k=2**, la llamada “Distribución Rayleigh” ocurre. Para aplicaciones de energía eólica, el valor del parámetro **k** tiene un significado clave. Tal como lo menciona la Asociación Danesa de la Industria Eólica en su sitio de Internet, muchos fabricantes de turbinas publican estadísticas de desempeño para los equipos que producen de acuerdo con una distribución Rayleigh.

La variable **v** refiere a velocidad del viento y se mide en metros por segundo.

La formula #2 define el valor de **A** según la media de velocidad del viento (**V**) y el parámetro de forma (**k**).

$$A = \frac{V}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad \text{FÓRMULA \#2}$$

La fórmula #3 define la densidad de potencia eólica (**E**) para una distribución Weibull con una media de velocidad del viento de **V** y un parámetro de forma de (**k**).

$$E = \frac{1}{2} \rho V^3 \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \right] = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad \text{FÓRMULA \#3}$$

Las especificaciones para el cálculo del parámetro Weibull k en el Atlas Eólico de Europa (Risø, 1989 – Véase <http://www.windatlas.dk/Europe/About.html>) indican el uso de un proceso iterativo para identificar el valor de k para cada distribución Weibull con las siguientes características:

1. La que mejor coincida con la frecuencia en la cual ocurren velocidades del viento mayores a la media de velocidad del viento, y ;
2. La que mantiene la cantidad total de energía eólica E que se ha identificado a partir de la distribución de probabilidades para las velocidades del viento observadas.

La metodología para el Atlas Eólico de Europa no incluye velocidades del viento que ocurren menos del 1% del tiempo en el cálculo de los parámetros Weibull (ej. las velocidades del viento más altas en la “cola” lejana de la distribución de frecuencia). Esta práctica es razonable al utilizar datos observados porque los eventos extremos de viento pueden afectar fuertemente la distribución de velocidades del viento y los parámetros de Weibull que resultan de ella. No obstante, los modelos de Predicción Numérica del Tiempo (PNT) tienden a subestimar la magnitud de eventos extremos de viento y por lo tanto a subestimar su variabilidad verdadera y observada. Por ende, excluir velocidades del viento que ocurren menos del 1% del tiempo no es necesario y podría hasta ser un detrimento para el cálculo de parámetros Weibull de un juego de datos generados por un modelo tipo PNT a mesoescala.

Referencias Adicionales:

Los usuarios del Atlas Eólico de Bolivia que estén interesados en obtener mayor información pueden acceder a una descripción sencilla de la distribución Weibull tal como se aplica a la energía eólica y una guía para el uso de Microsoft Excel para el análisis Weibull en los siguientes enlaces:

Descripción de la distribución Weibull en la página de la Asociación Danesa de la Industria Eólica: <http://www.windpower.org/en/tour/wres/weibull.htm>

Dorner, W.K., “Using Microsoft Excel for Weibull Analysis”, http://www.qualitydigest.com/jan99/html/body_weibull.html

Apéndice II: Mapas

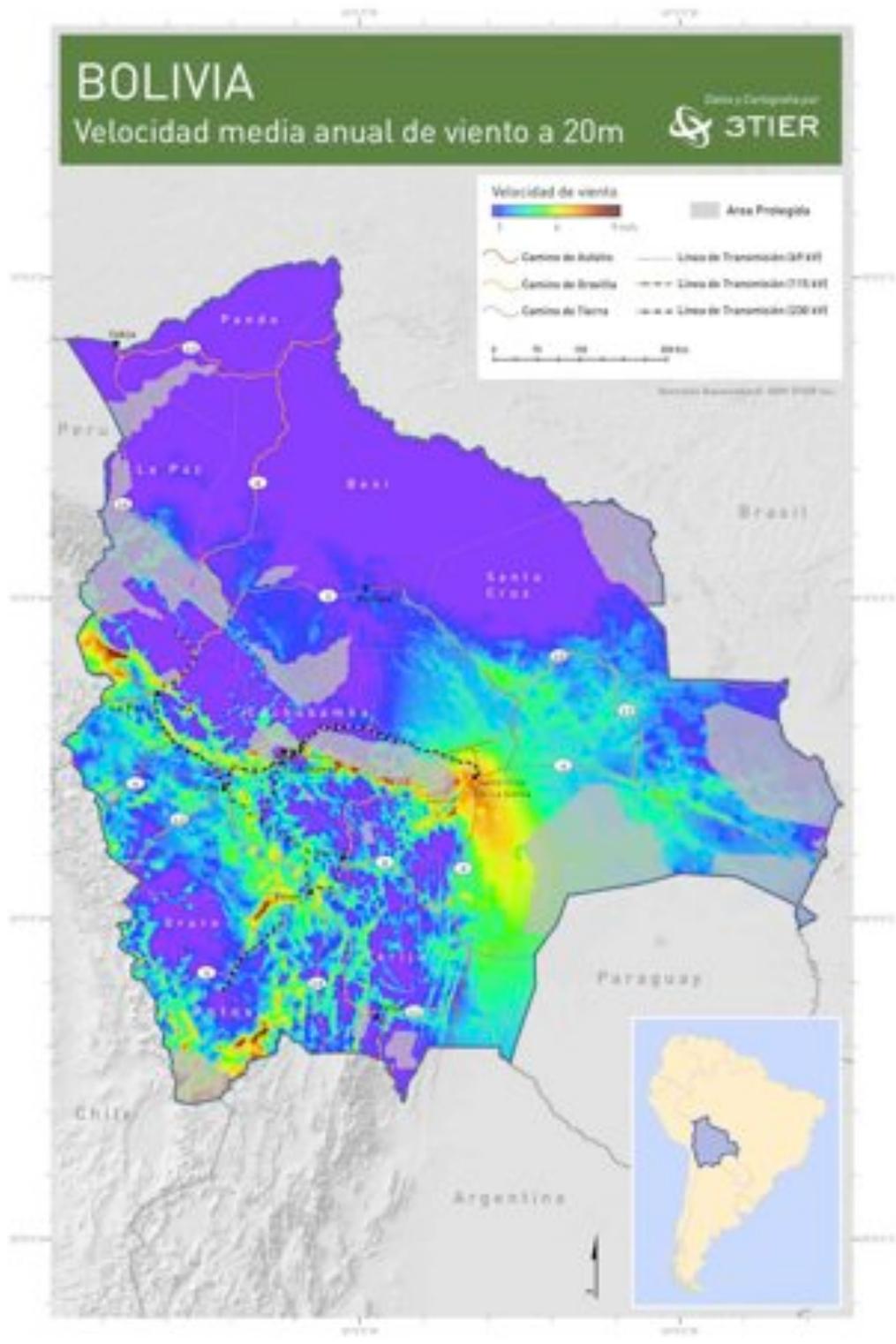
A. Contenido

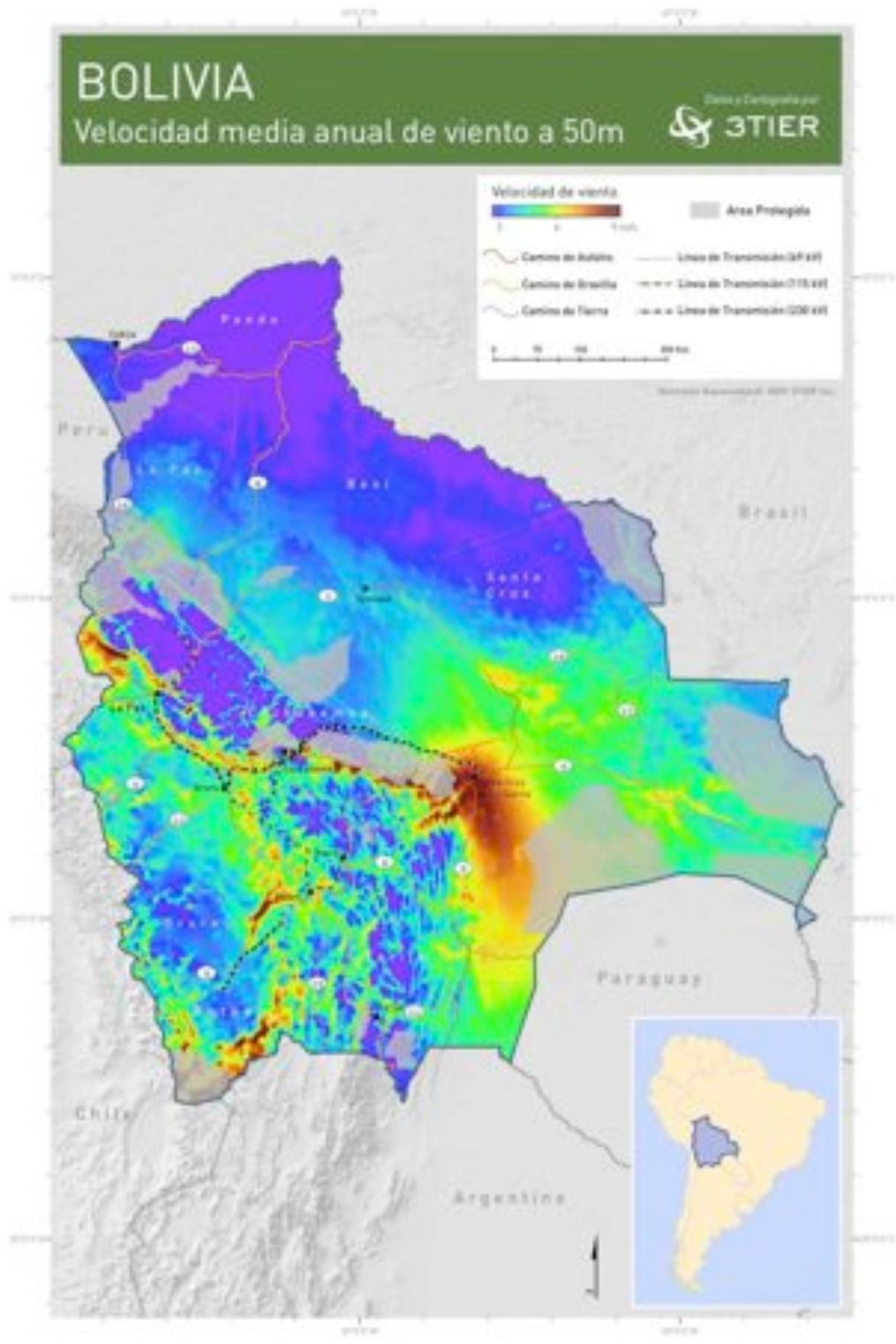
Junto con instrucciones para el uso de los mapas digitales disponible de TDE, este apéndice contiene los siguientes 23 mapas elaborados por 3TIER para este proyecto:

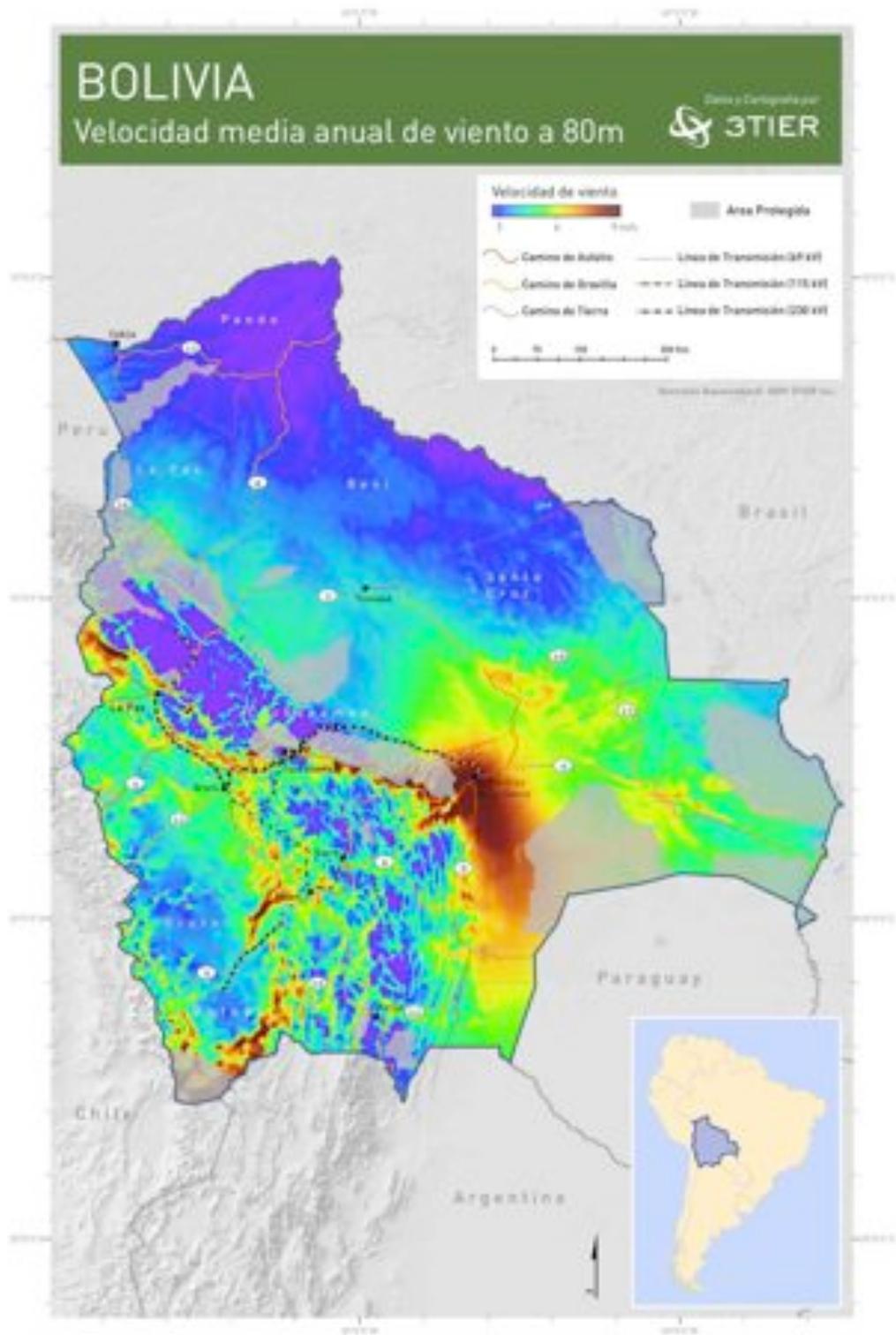
- (1) Media anual de velocidad del viento a 20m
- (2) Media anual de velocidad del viento a 50m
- (3) Media anual de velocidad del viento a 80m
- (4) Valores para el parámetro A de Weibull a 20m
- (5) Valores para el parámetro k de Weibull a 20m
- (6) Valores para el parámetro A de Weibull 50m
- (7) Valores para el parámetro k de Weibull 50m
- (8) Valores para el parámetro A de Weibull 80m
- (9) Valores para el parámetro k de Weibull 80m
- (10) Factor de Capacidad Anual a 80 m (turbina GE 1.5 sle)²⁰
- (11) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Anual)
- (12) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Enero)
- (13) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Febrero)
- (14) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Marzo)
- (15) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Abril)
- (16) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Mayo)
- (17) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Junio)
- (18) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Julio)
- (19) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Agosto)
- (20) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Septiembre)

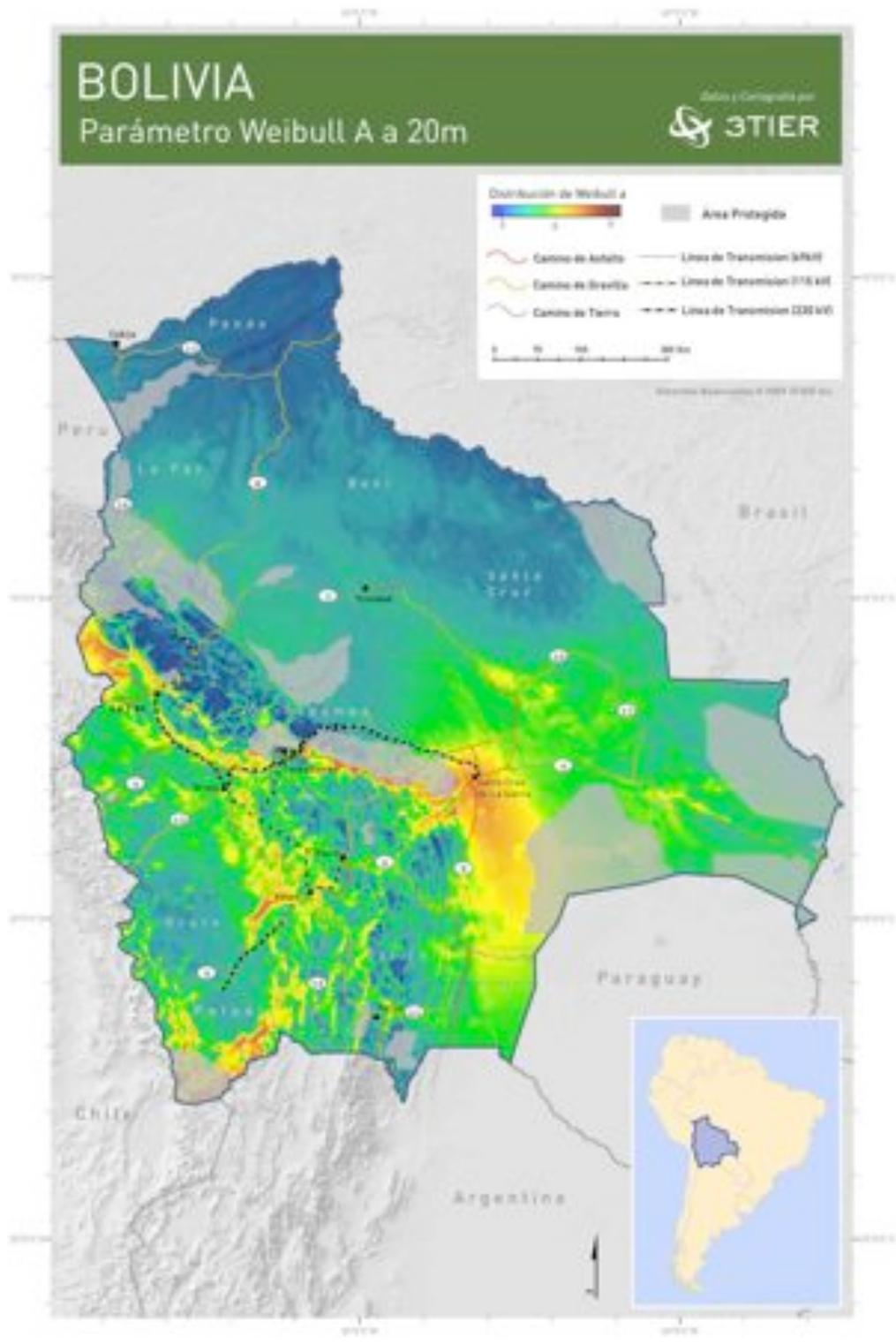
²⁰ Factor de Capacidad Anual es denominada “Annual Power Capacity” en la ventana emergente expandida disponible en FirstLook. Expresado como un porcentaje, este variable es una razón entre la producción real (en este caso simulada) de energía dividido por la producción teórica durante un año entero. Para este ejemplo, una turbina GE 1.5 sle que opera a su capacidad máxima durante un año generaría 13,410 megavatio horas de energía (1.5 megavatios x 24 horas x 365 días); no obstante, turbinas eólicas no siempre operan a su capacidad máxima debido a la variabilidad del recurso eólico. Un factor de capacidad anual de 35% en un lugar significa que se podría esperar la generación por una turbina GE 1.5 sle de 4,599 megavatio horas de energía promediado sobre el año en ese lugar. En vez de utilizar curvas de potencia proporcionadas por GE para cada densidad de aire, 3TIER utilizó una curva de potencia para una atmósfera estándar a 15 grados centígrado con un factor de intensidad de turbulencia de 10%, que a la vez fue multiplicado por el cambio de densidad de aire. Por lo tanto, la producción de energía en este juego de datos tenderá al alza cuando hay alta densidad de aire y a la baja cuando hay baja densidad de aire.

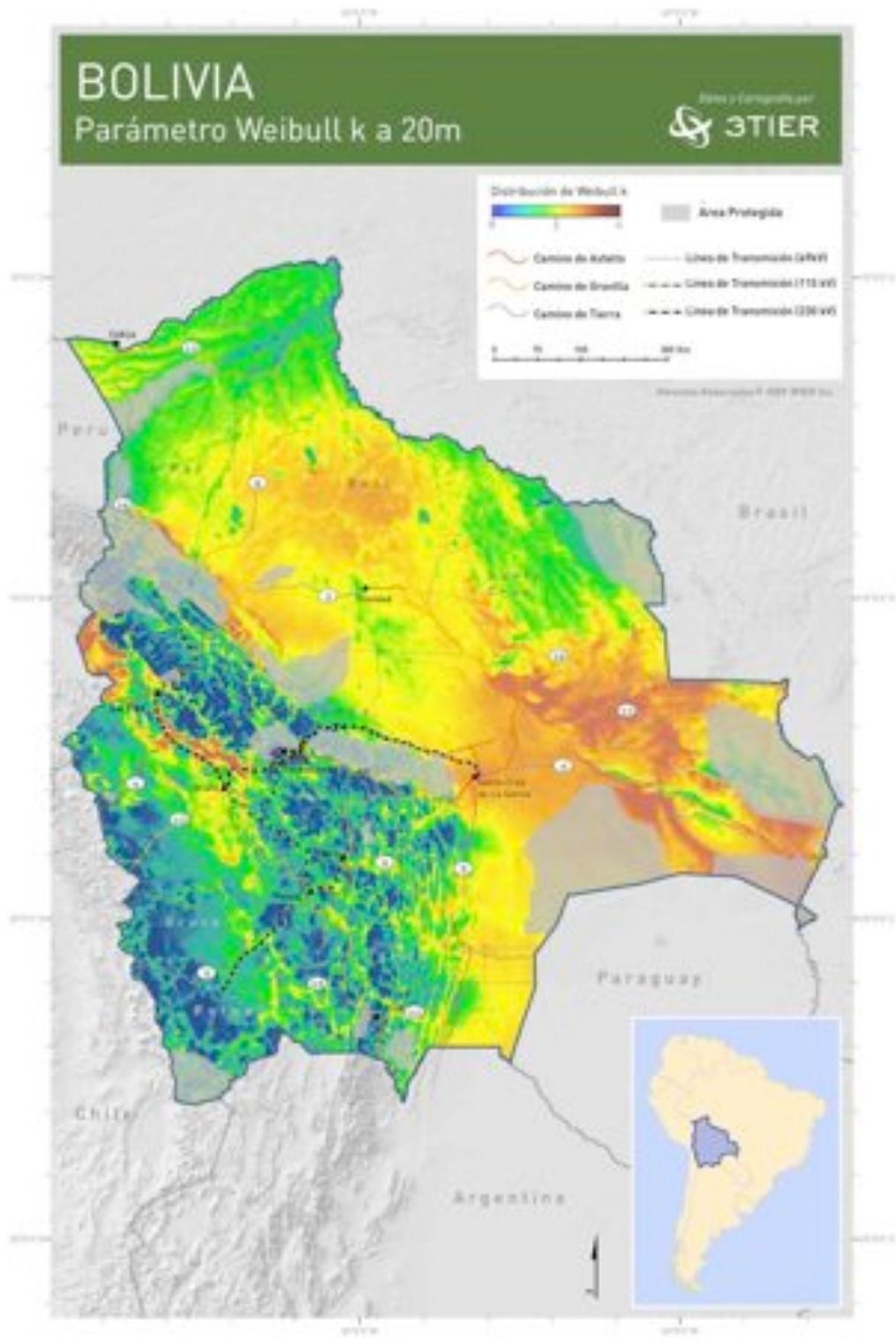
- (21) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Octubre)
- (22) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Noviembre)
- (23) Densidad Media de Potencia Eólica a 80 m (Diciembre)

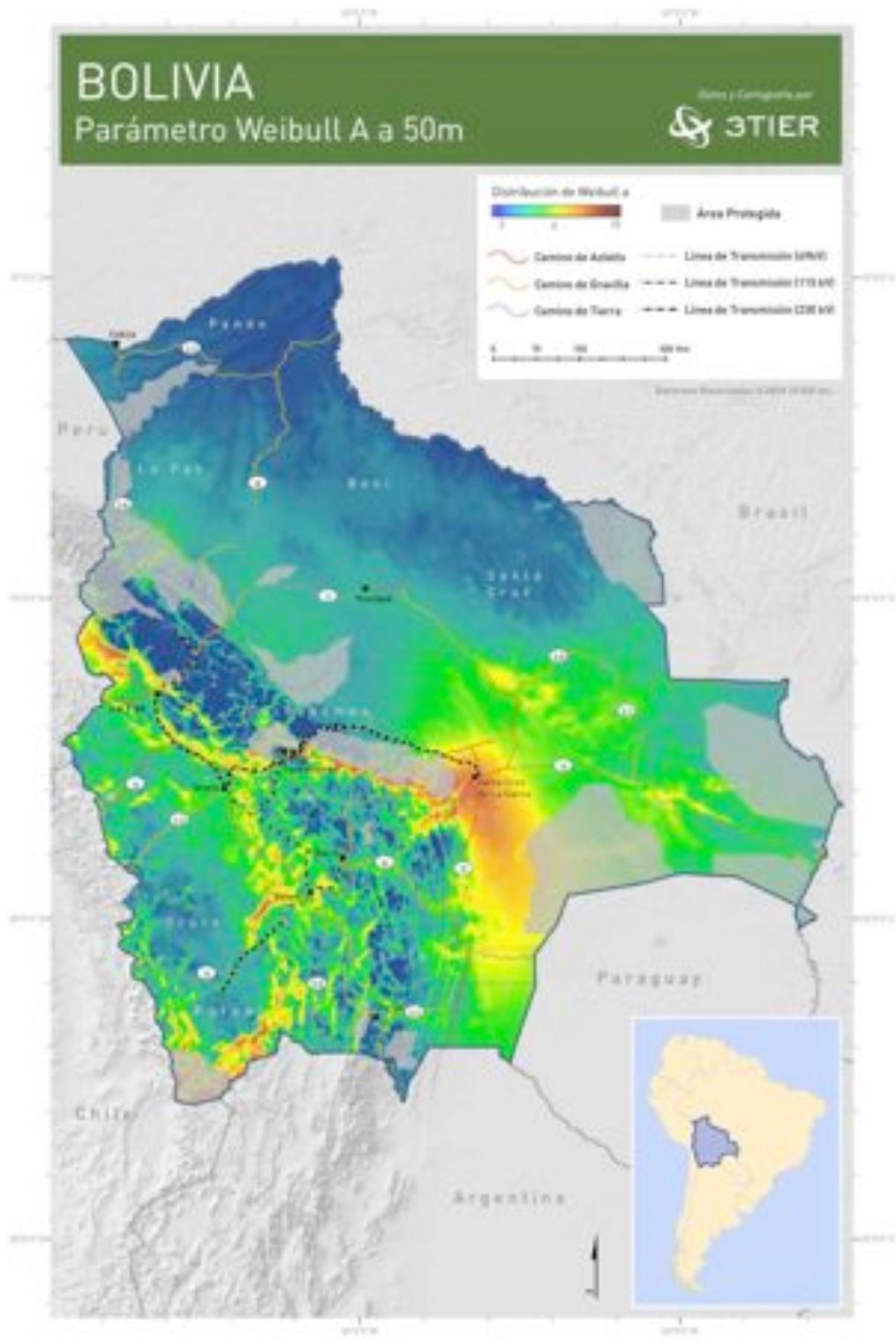


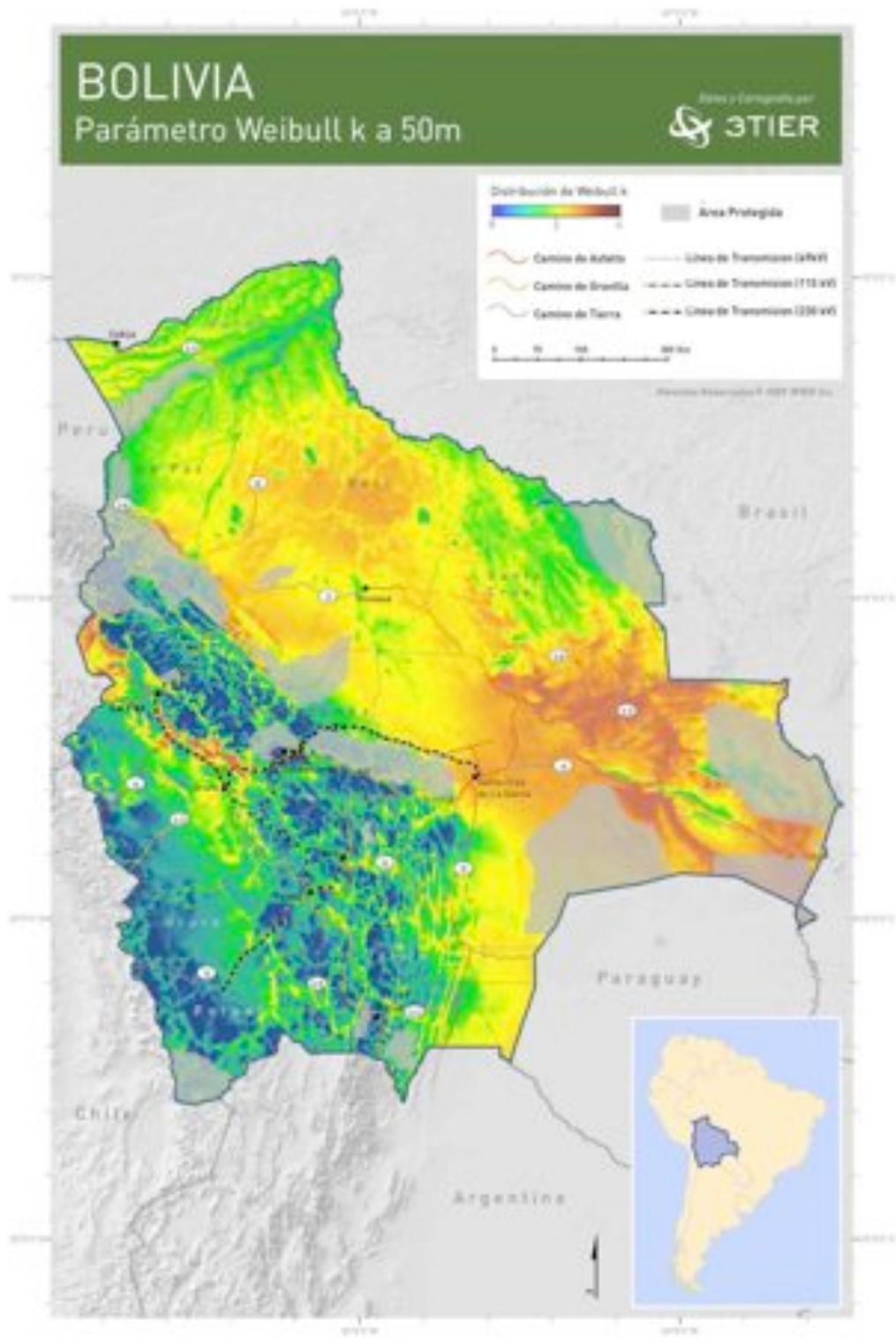


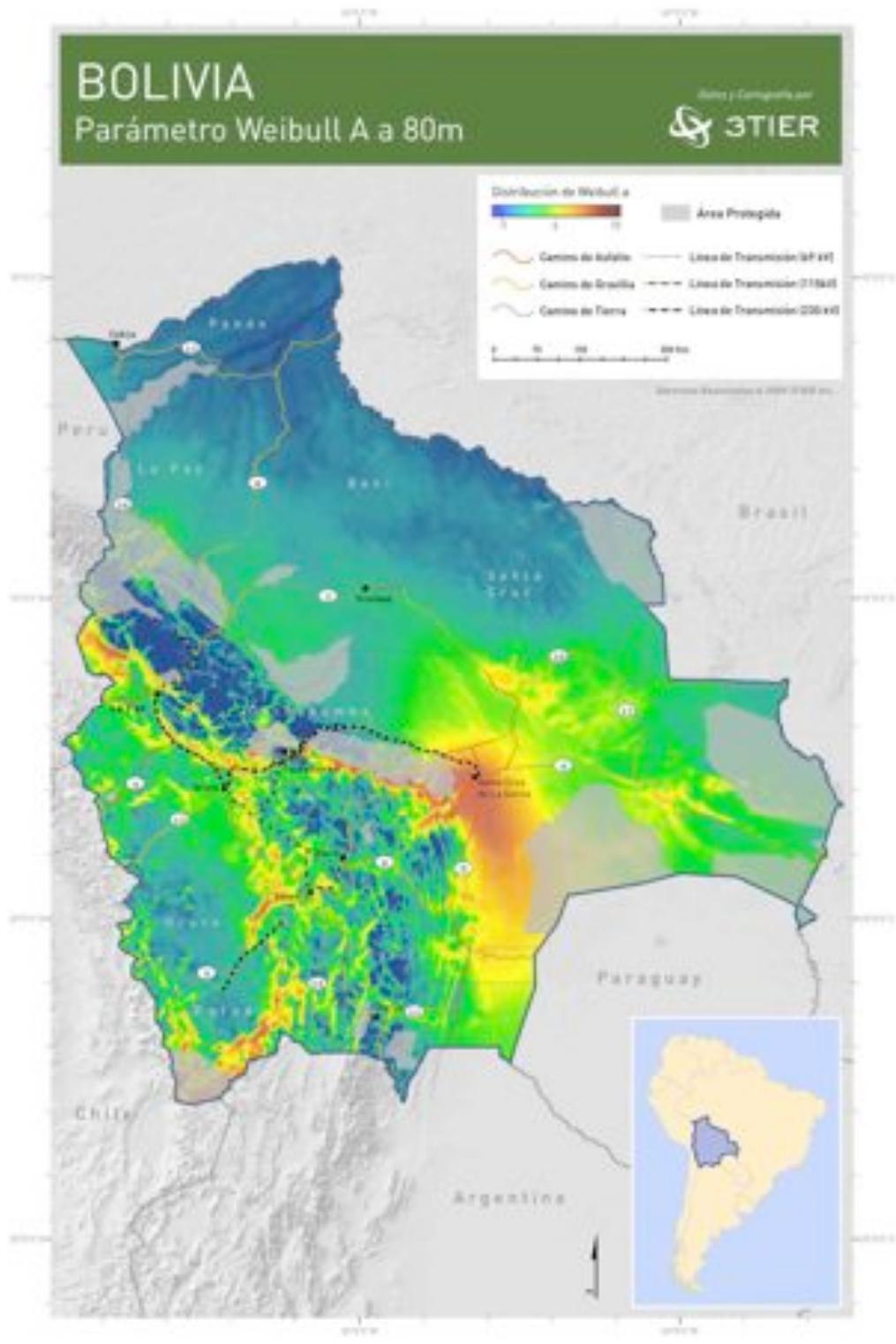


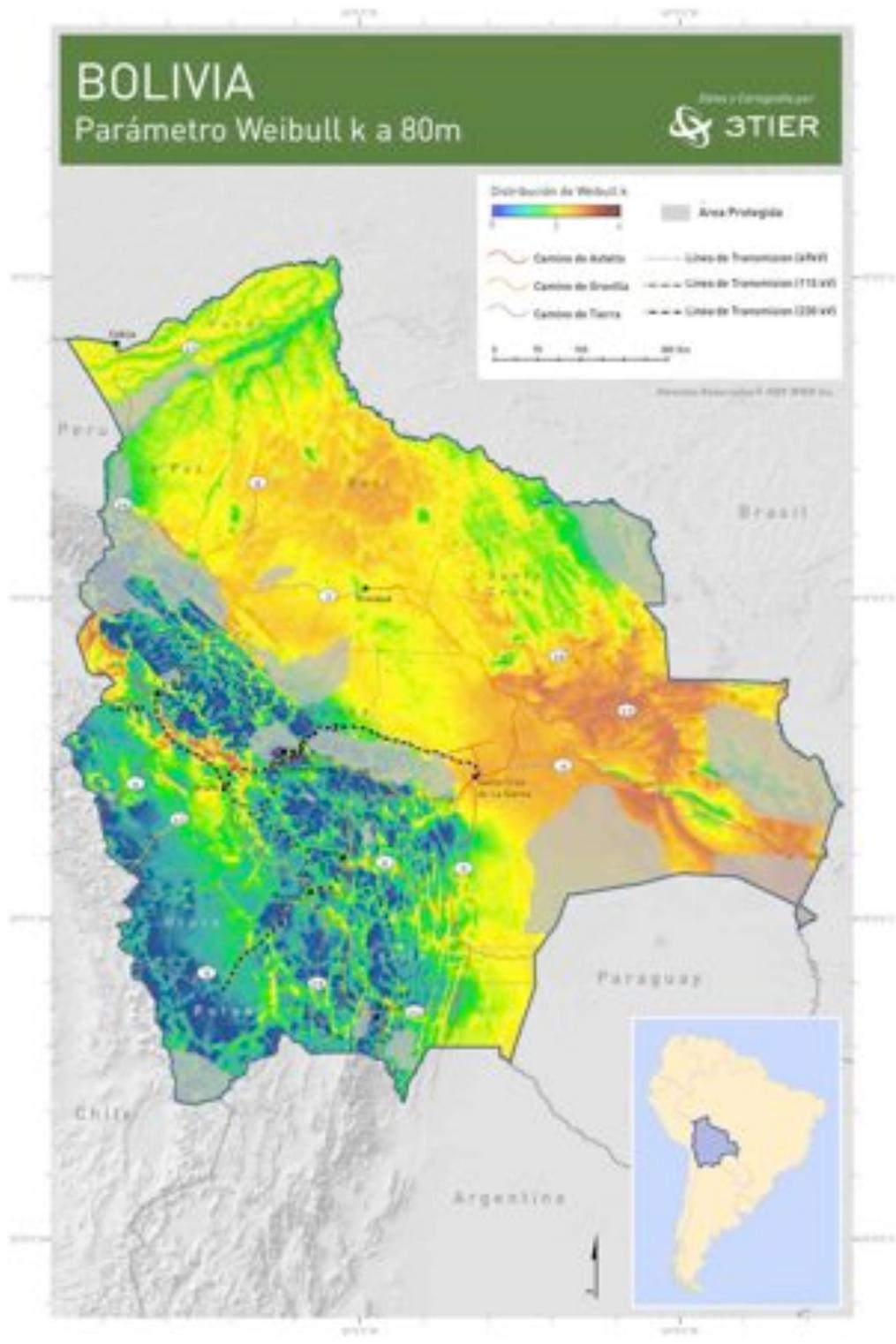


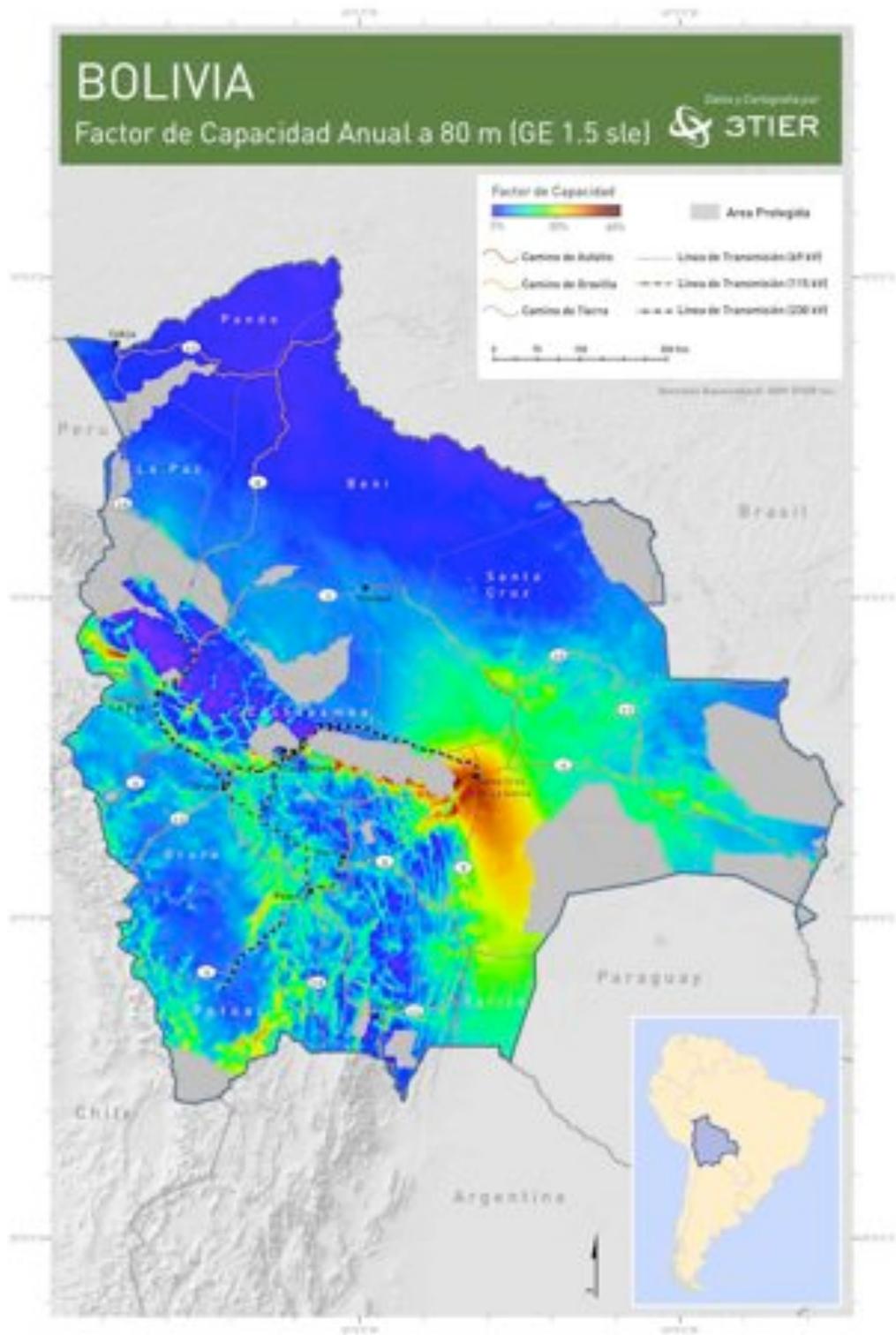


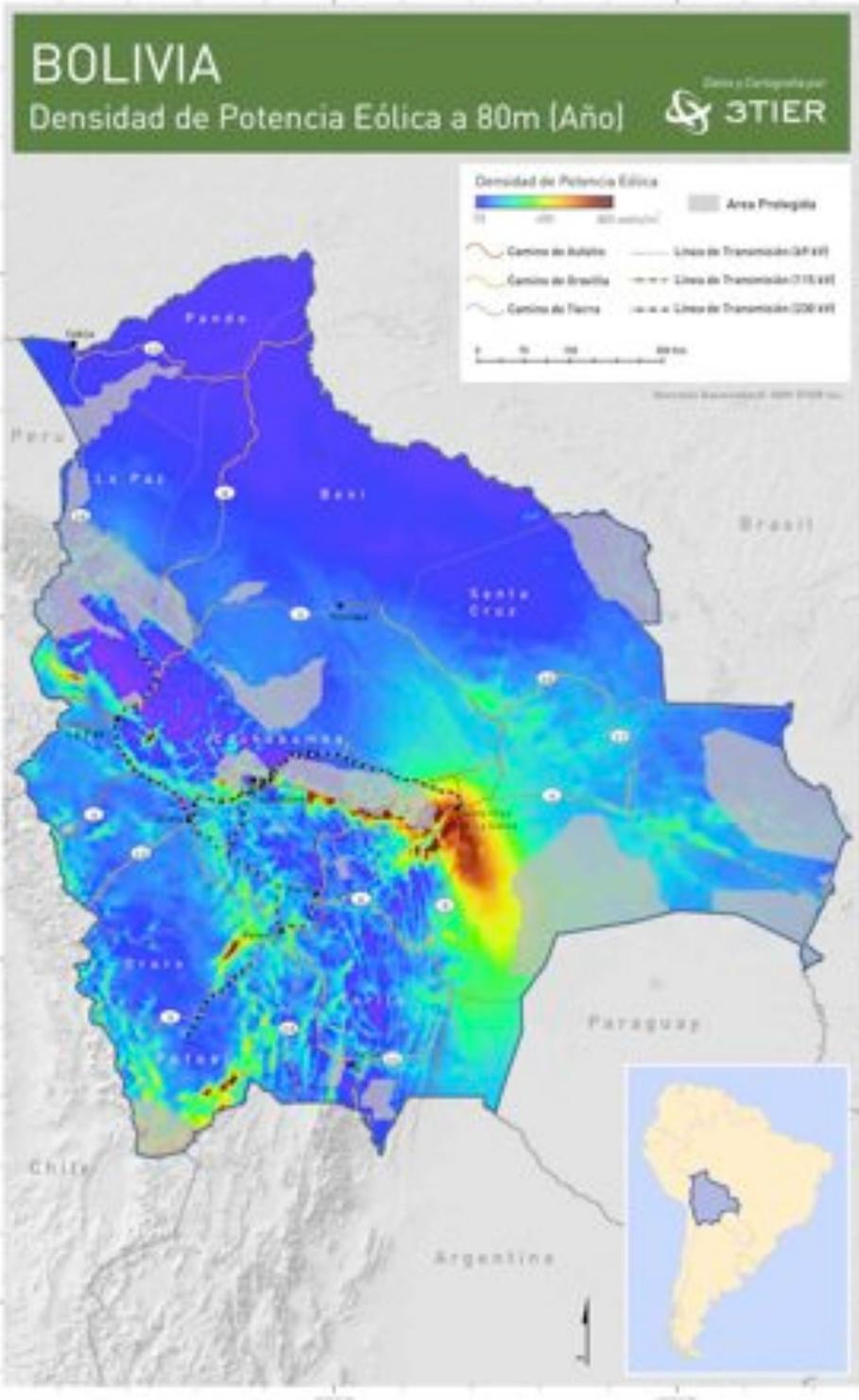


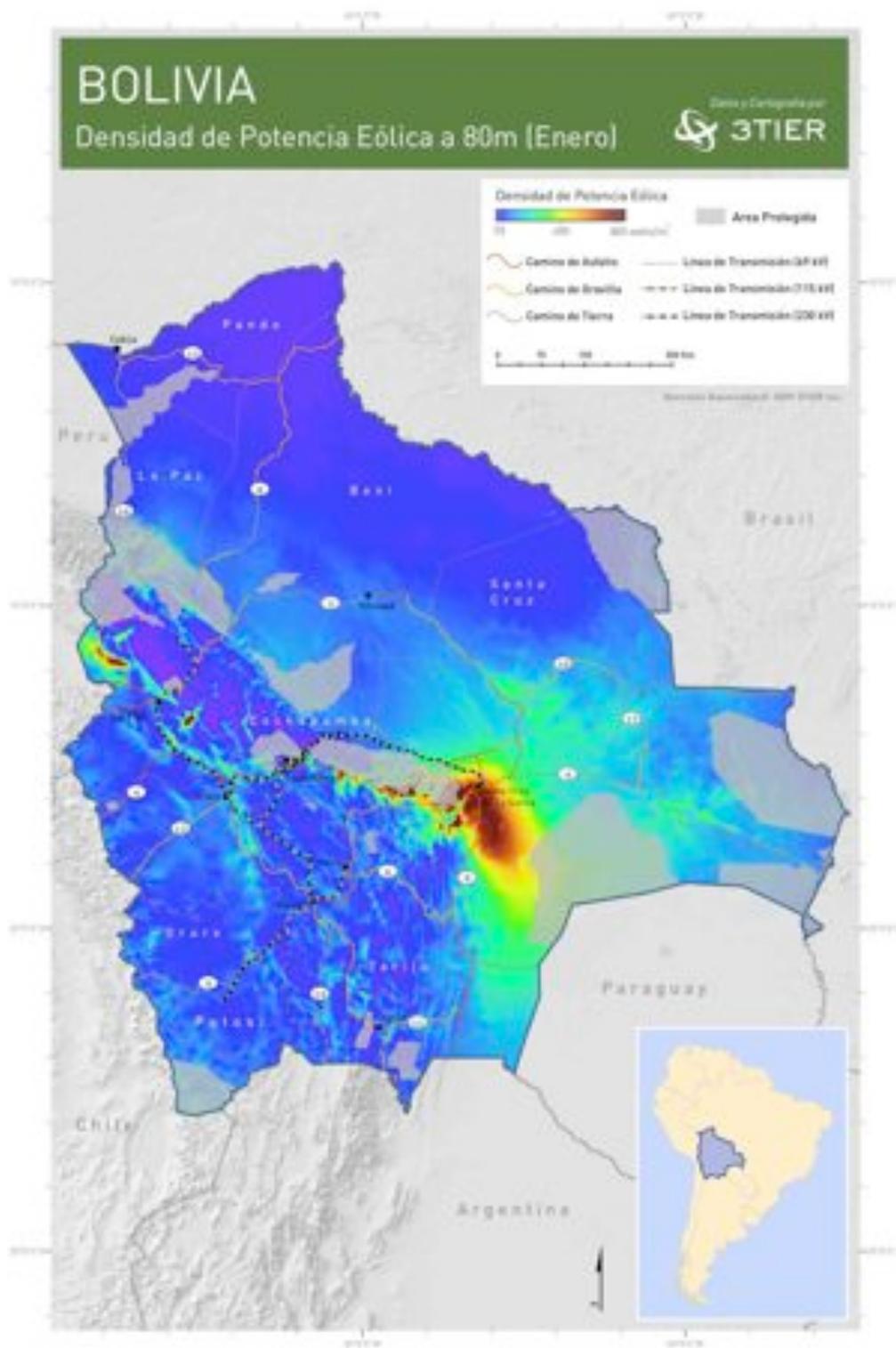


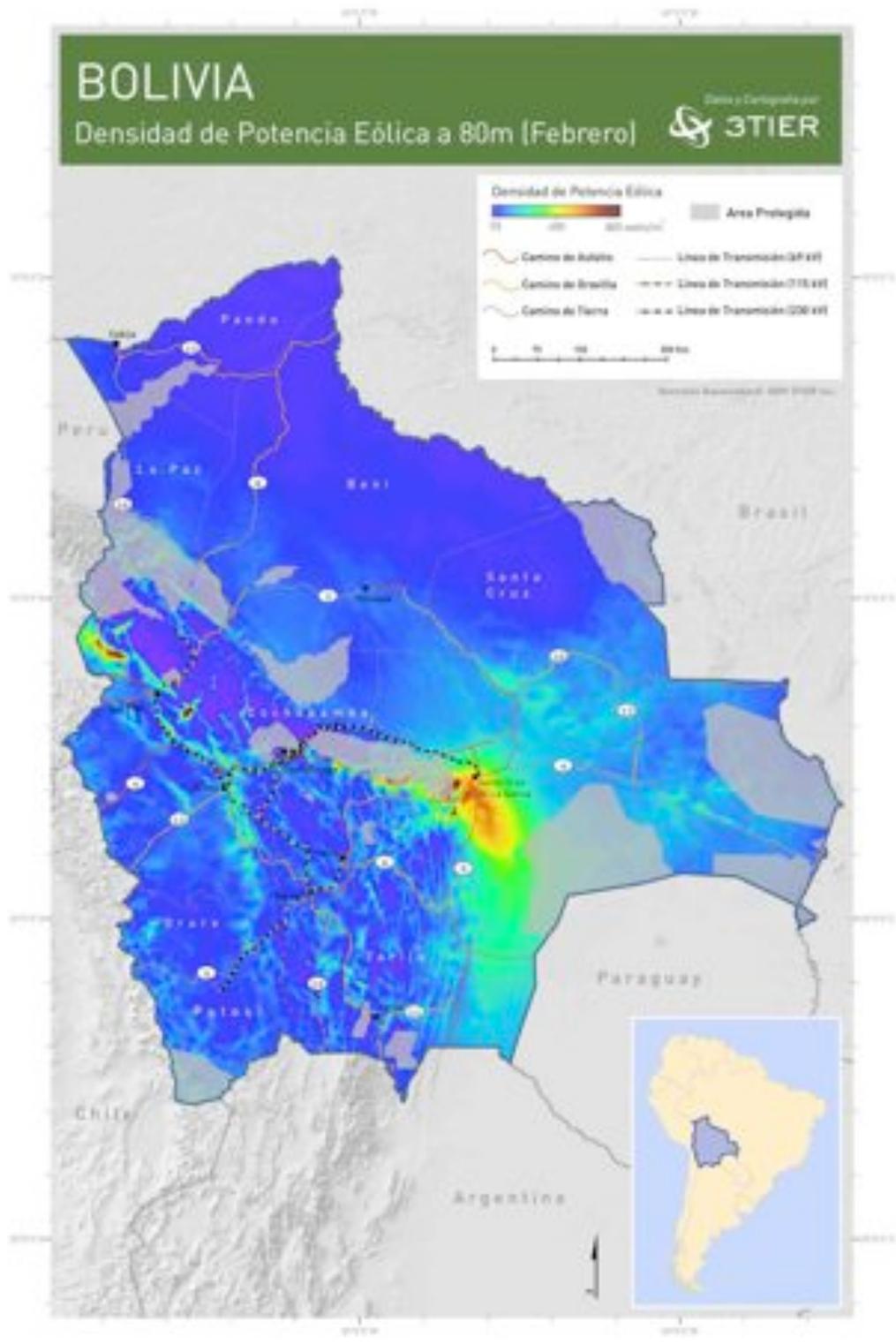


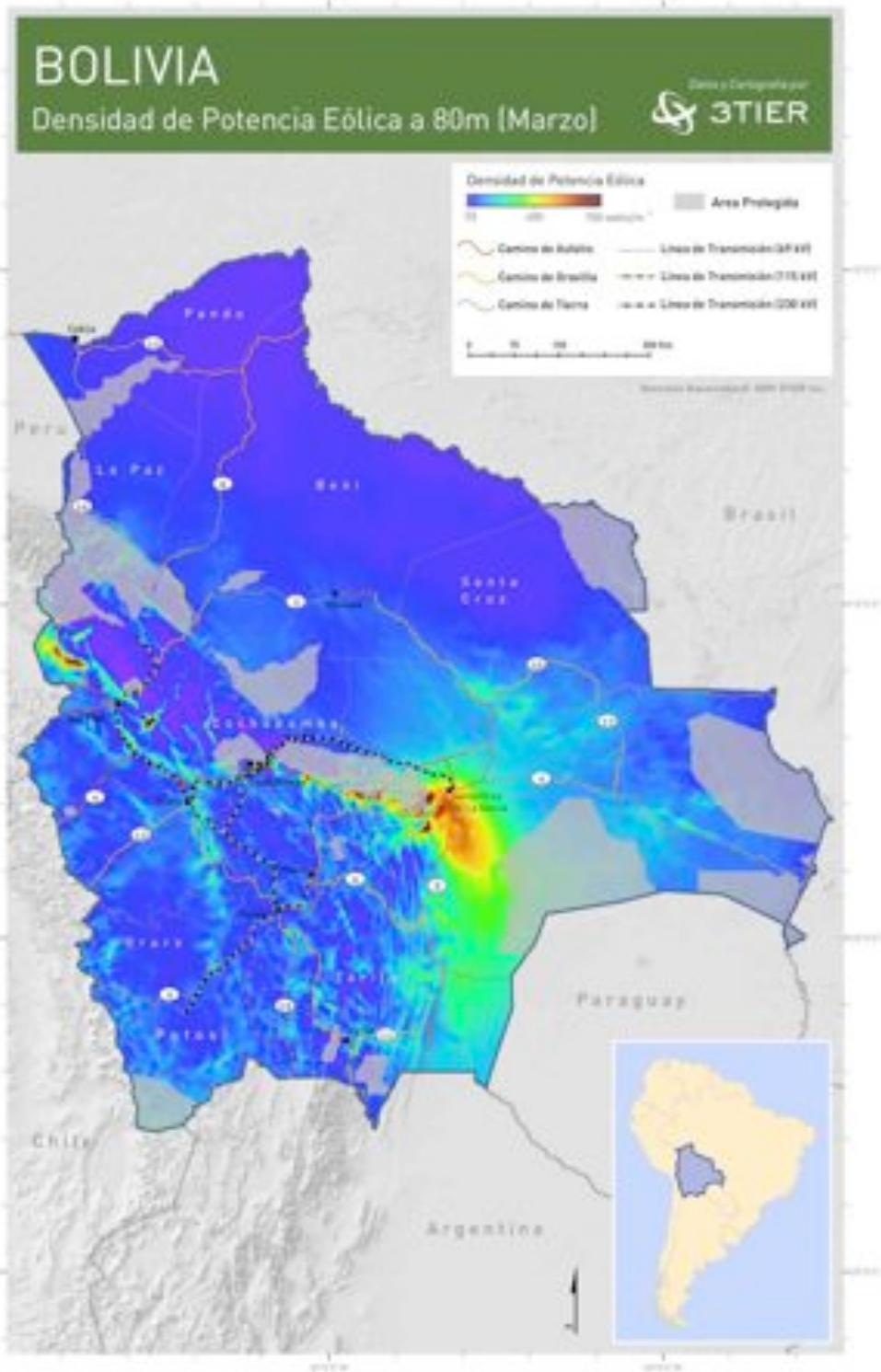


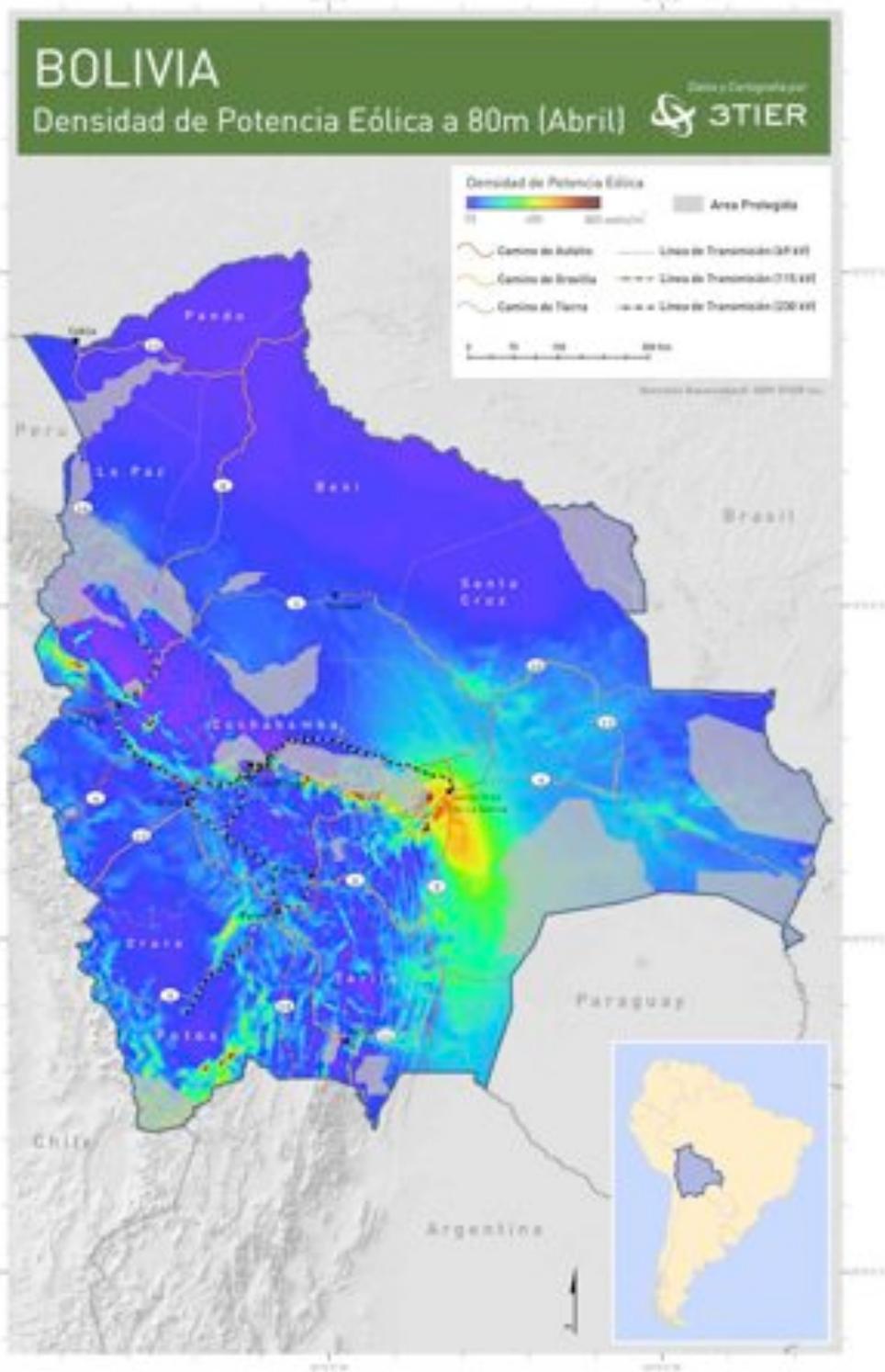


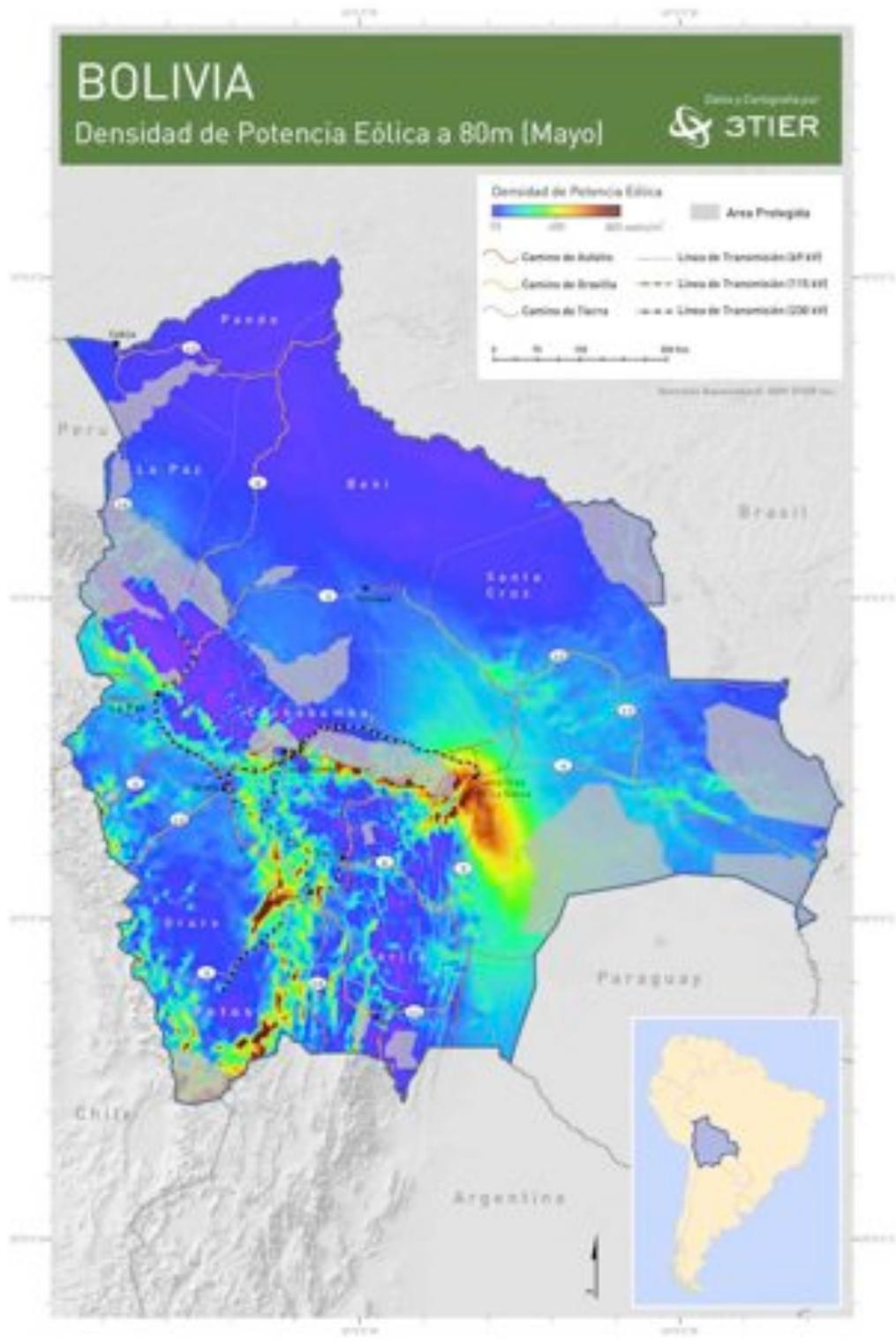


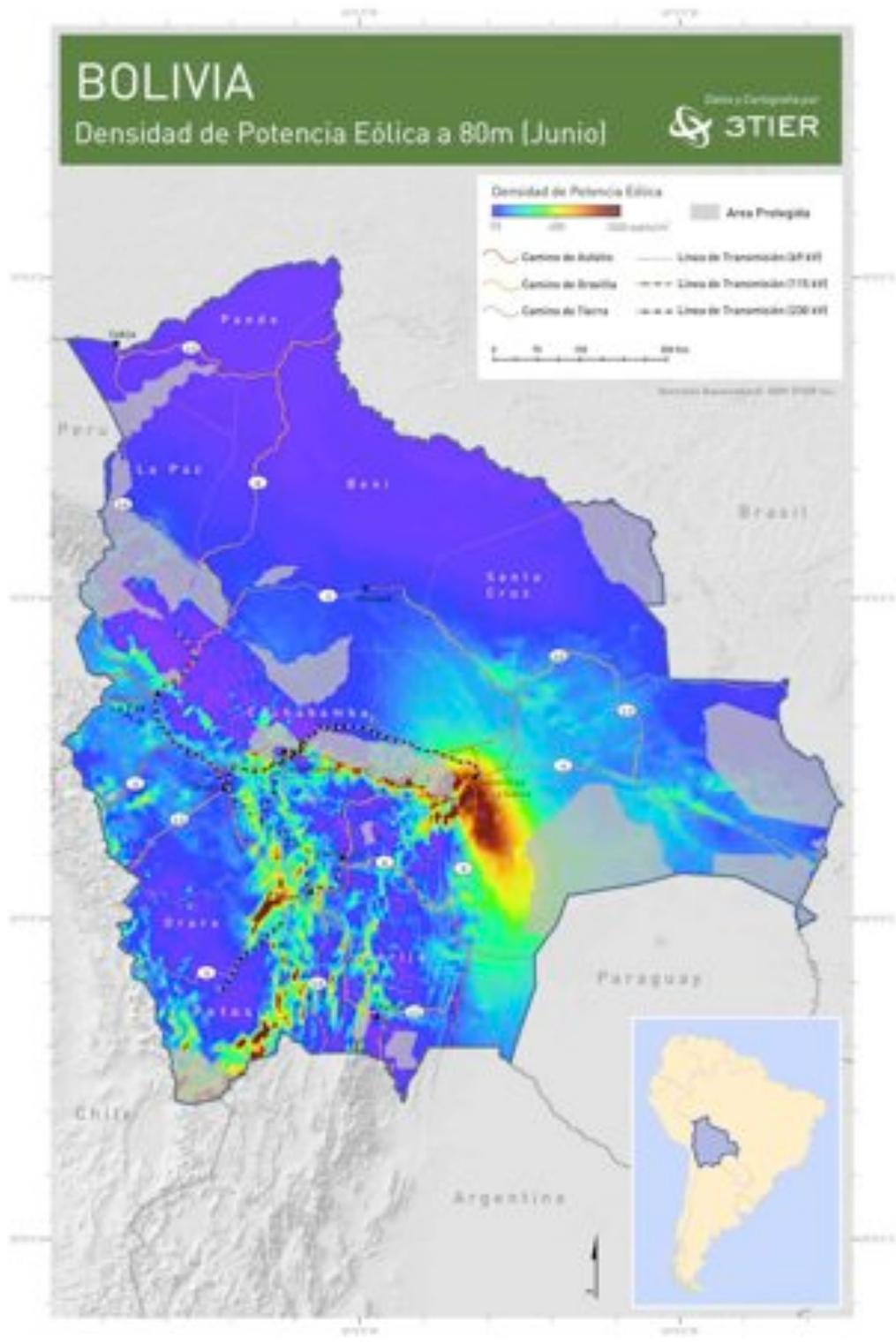


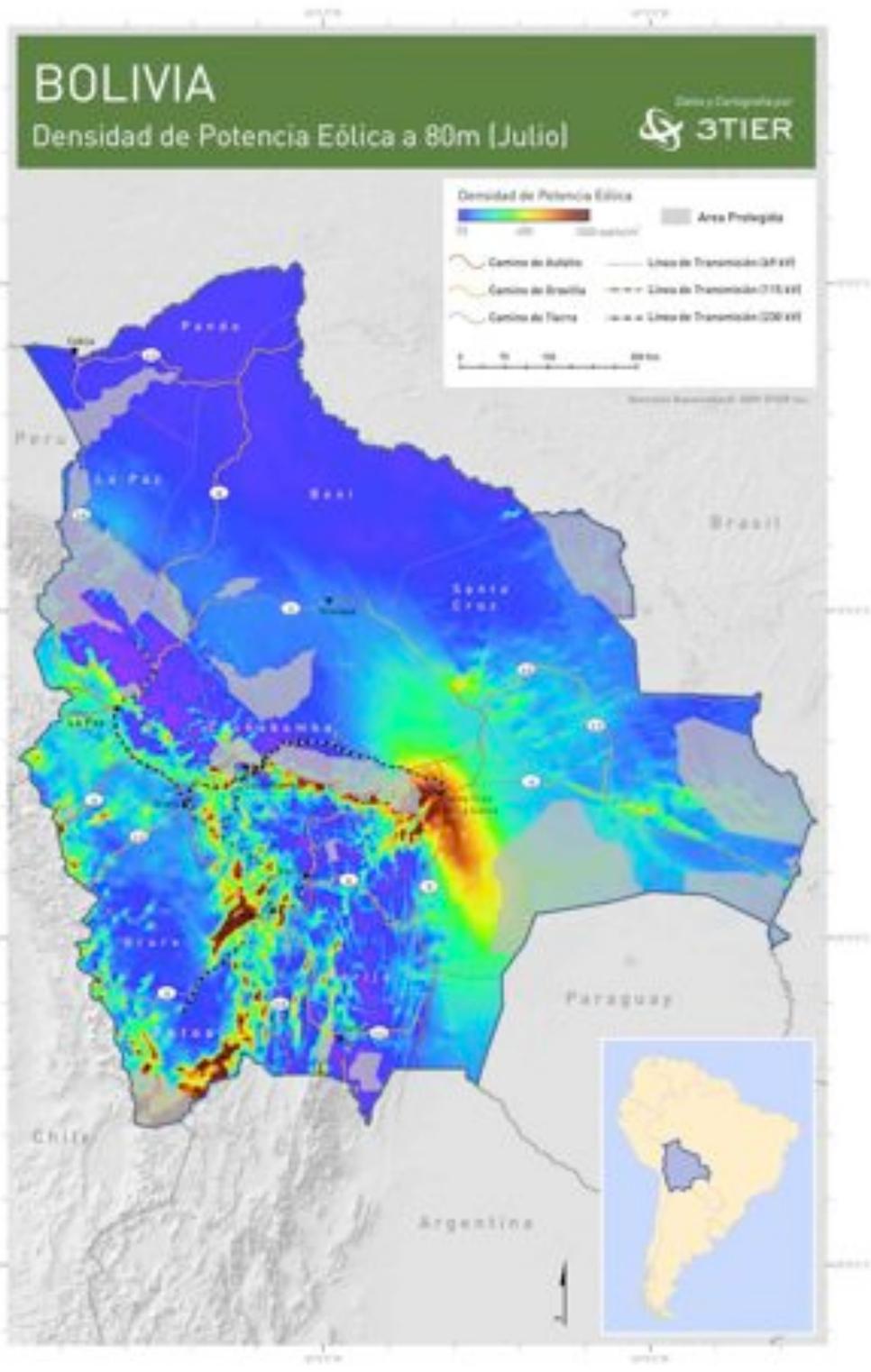


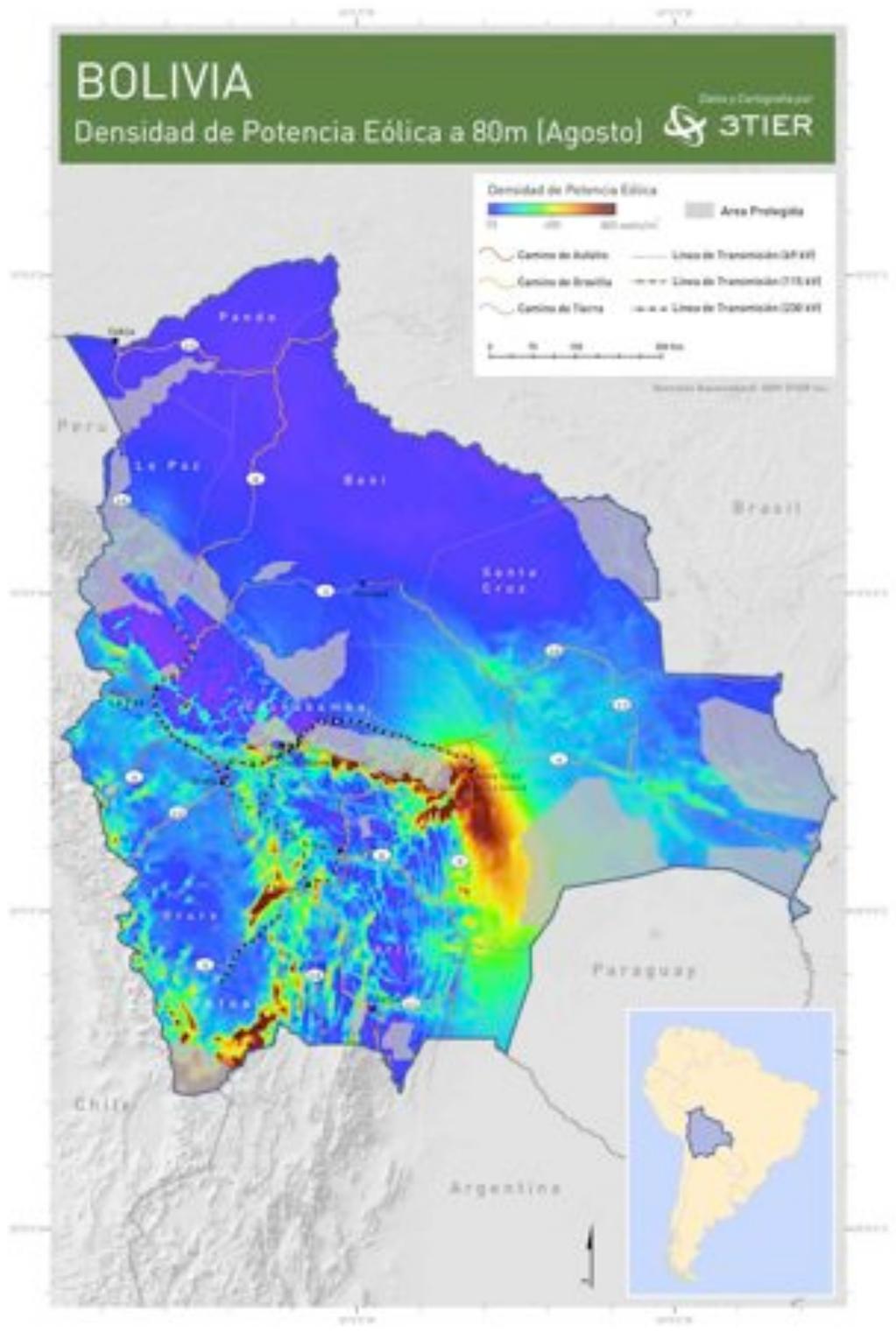


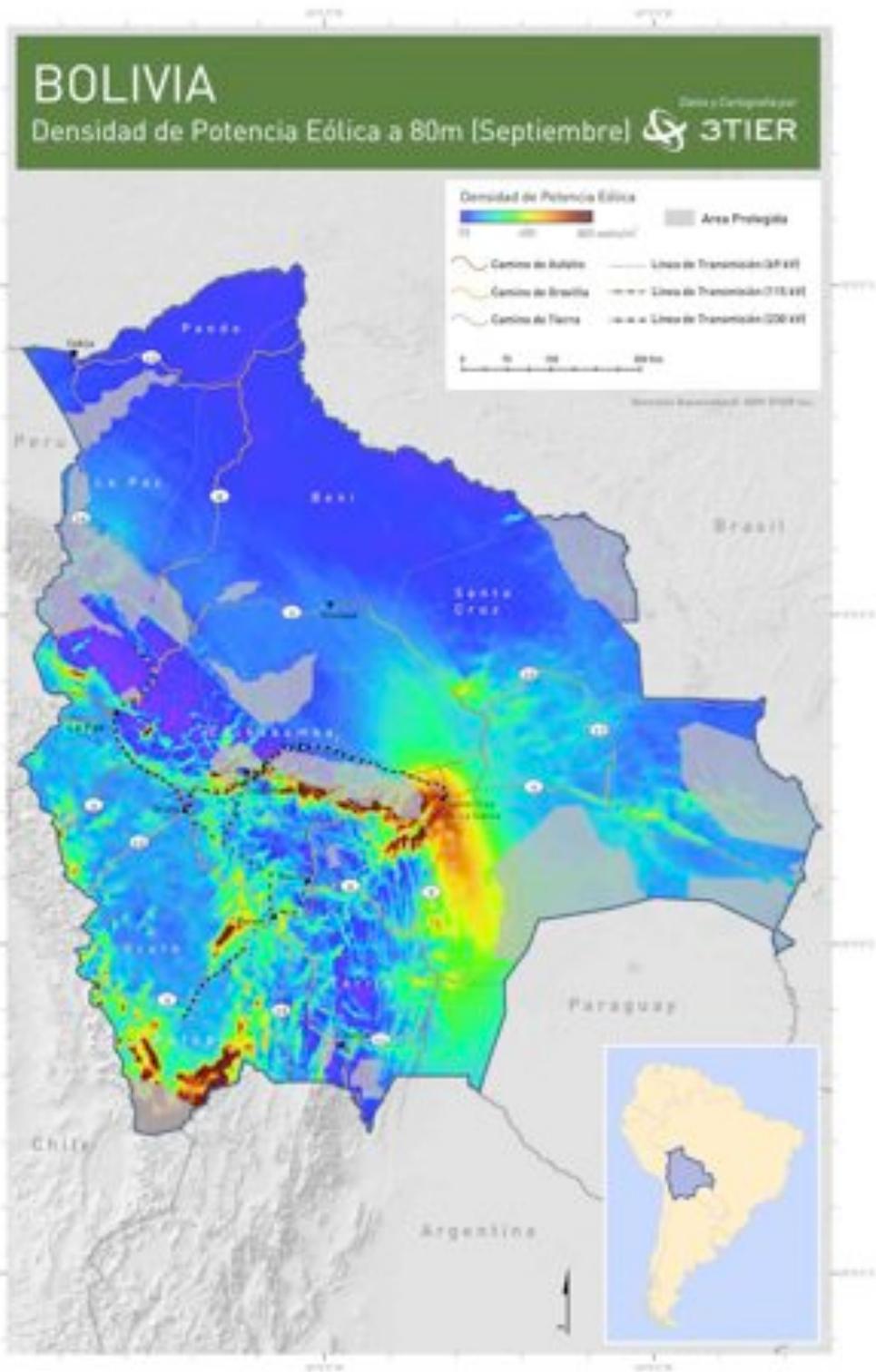


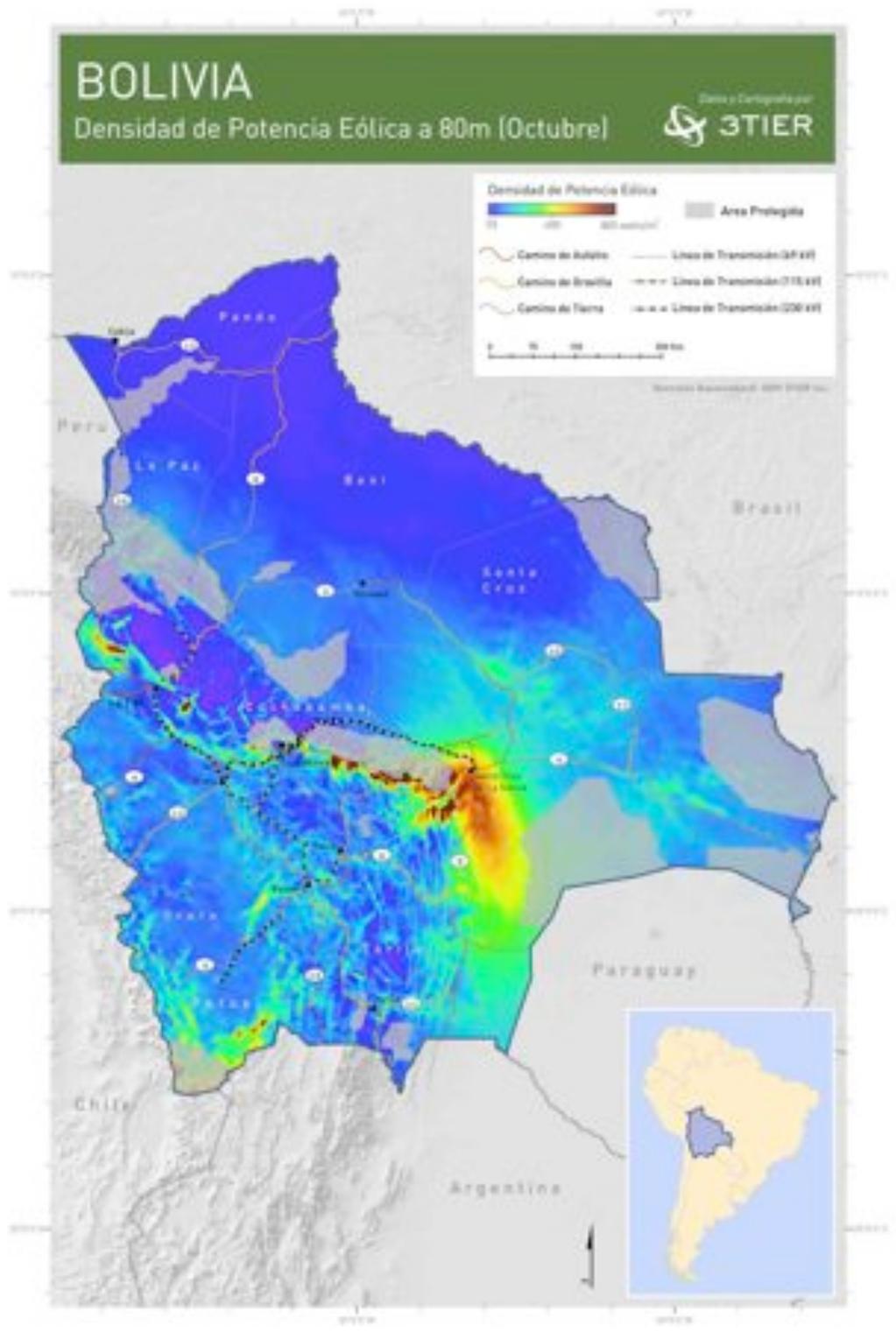


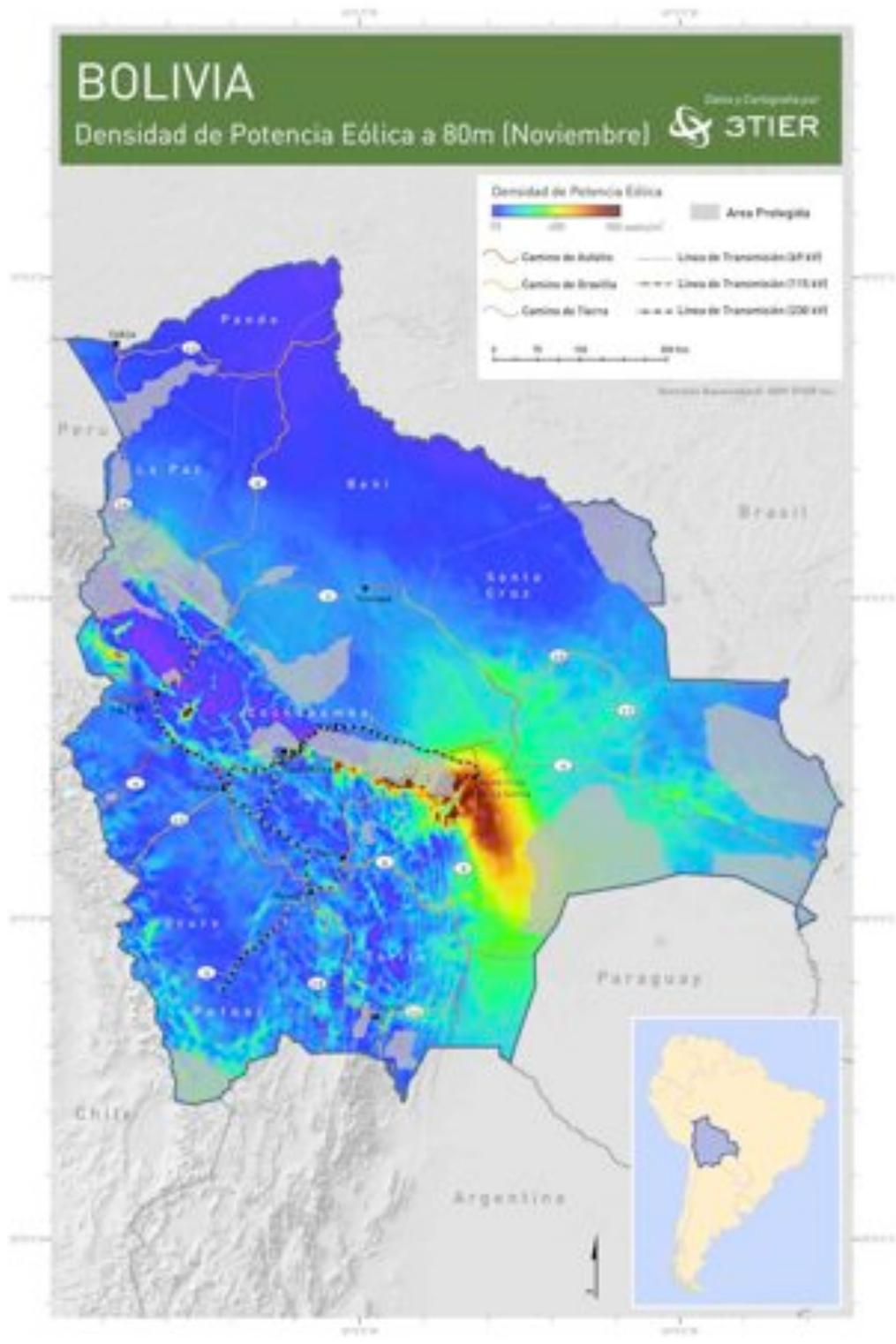


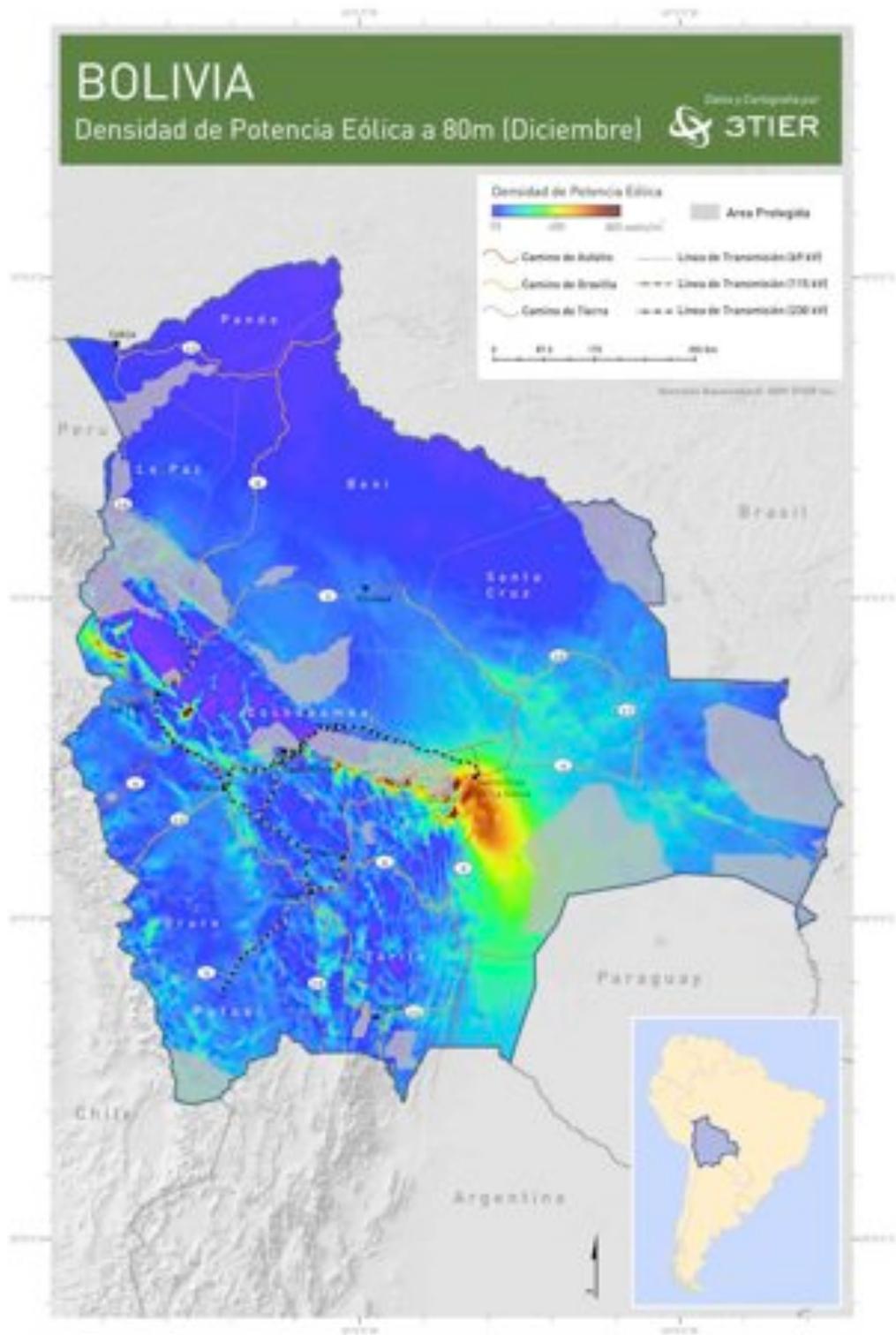












B. Acerca de los Mapas

Todas las coordenadas en este informe y los mapas digitales están basados en el Batum WGS 84 y expresados en grados decimales. Los pixeles de data en estos mapas tienen una resolución de 0.016666 grados; no obstante, dado que los mapas representan la curvatura de la tierra en una superficie plana, la medida lineal de cada píxel varía según el latitud. En el rango de latitudes cubierto por el Atlas Eólico de Bolivia (entre 9.7 grados sur y 22.9 grados sur), 0.016666 grados equivale a distancias este-oeste entre aproximadamente 1.8270 km y 1.7088 km y distancias norte-sur entre aproximadamente 1.8415 km y 2.2135 km.²¹

Por solicitud del IFC, 3TIER utilizó un método de interpolación denominado “punto más cercano” (nearest-neighbor interpolation en inglés) para asignar los colores a los mapas impresos y sus correspondientes archivos digitales, estos últimos disponibles de TDE. A través de dicho método, 3TIER no alisó las transiciones entre colores entre puntos de la grilla de análisis. Cambios abruptos visibles al acercarse sobre un lugar específico en los mencionados archivos digitales deben alertar a los usuarios del Atlas Eólico de Bolivia que alguna condición (posiblemente un elemento topográfico pronunciado) que podría causar tales cambios.

Como figura en sus respectivas leyendas, los mapas incluyen la red de transmisión de Bolivia, las áreas protegidas, vías terrestres, fronteras internacionales, nombres de ciudades, los nombres de los 9 Departamentos de Bolivia, y las divisiones entre ellos. TDE coadyuvó en la provisión de esta información importante a 3TIER para el Atlas Eólico de Bolivia.

La versión digital de este informe ha sido configurada con un formato que facilita bajarlo vía Internet. No obstante, las versiones impresas de este informe incluyen cada mapa en formato de 11” x 17”. Mapas digitales en formato PNG y formato GeoPDF también están disponibles a través de TDE. Cada mapa en formato PNG incluye el imagen de mapa para una capa individual (identificadas por los números asociados con las descripciones al principio de este Apéndice) y marcas correspondientes a las coordenadas en los bordes del mapa para facilitar la alineación de múltiples capas.

²¹ Una herramienta básica para calcular la distancia lineal entre dos puntos para los cuales se conoce el latitud y el longitud está disponible en línea en el sitio web del Centro de Datos sobre Terremotos del Norte de California (Northern California Earthquake Data Center en inglés) con el URL: <http://www.ncedc.org/convert/distance.html>.

C. Como utilizar los mapas digitales en formato GeoPDF

Los mapas en formato GeoPDF permiten interactuar con las capas variables de datos (velocidad de viento, densidad de potencia eólica, factor de capacidad, etc.) y capas base (vías terrestres, líneas de transmisión, nombres de ciudades, etc.) a través de las siguientes funciones del software gratuito Adobe Reader (Versión 9.1 o la más reciente disponible para Windows o Mac a través del enlace <http://get.adobe.com/reader/>):

- 1) **Activar y desactivar capas** – La herramienta de capas está ubicada en el panel de navegación en la parte izquierda de la ventana de Adobe Reader. Si no aparece en la vista predeterminada de su software, usuarios pueden acceder a la herramienta a través del menú denominado Ver tal como se muestra en la Figura II-1 a continuación:

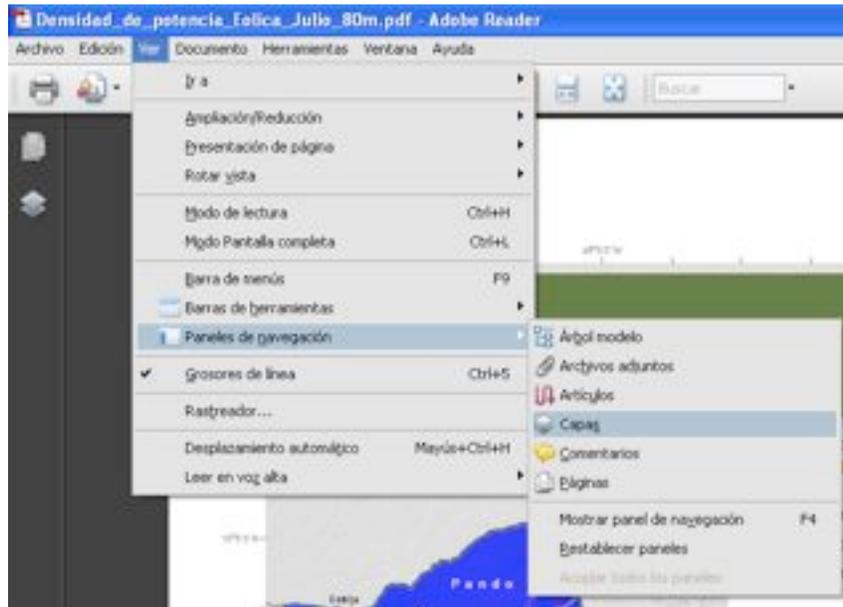


Figura II-1: Como acceder a la herramienta de capas desde el menú Ver en Adobe Reader

Cuando la herramienta de capas está abierta, pulsando en los íconos en forma de ojo al lado izquierdo del nombre de cada capa permite a los usuarios activar y desactivar capas. Si el ícono en forma de ojo está visible, la capa con la cual está asociada estará activada (visible). Si el ícono en forma de ojo no está visible, la capa estará desactivada (invisible). La Figura II-2 a continuación es una vista de pantalla de la herramienta de capas con su menú de capas completamente expandido.



Figura II-2: Vista de la pantalla para la herramienta de capas cuando está completamente expandida

- 1) **Identificar coordenadas (latitud, longitud) de lugares en un mapa** – Con la herramienta de ubicación geoespacial, usuarios del Atlas Eólico de Bolivia pueden visualizar las coordenadas de cualquier lugar dentro de Bolivia sobre el cual colocan la flecha.

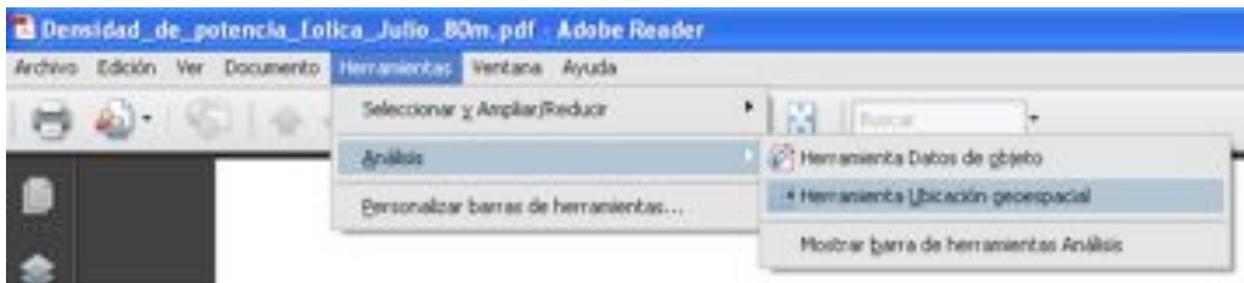


Figura II-3: Como acceder a la Herramienta de Ubicación Geoespacial desde el menu de herramientas en Adobe Reader

Cuando se activa la herramienta de ubicación geoespacial, un rectángulo en la esquina inferior derecha de la pantalla mostrará el latitud y longitud de la ubicación actual de la flecha del ratón. En la Figura II-4 a continuación, la flecha está al sudeste de la ciudad de Santa Cruz.

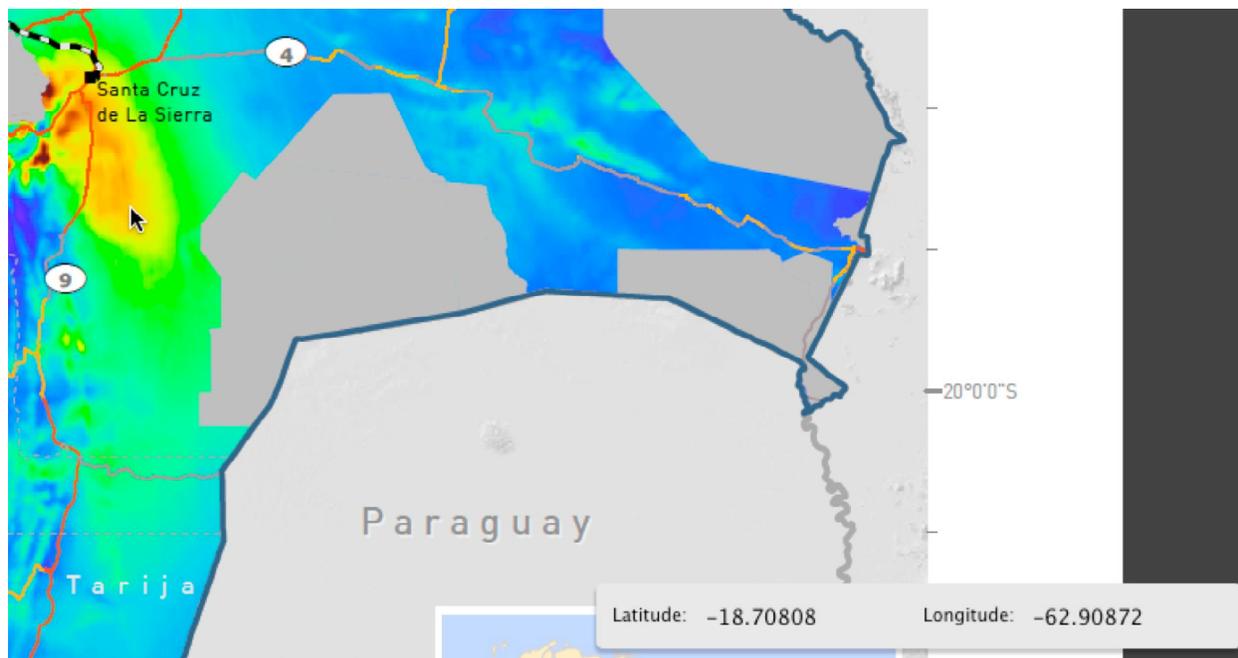


Figura II-4: Vista de pantalla del funcionamiento de la Herramienta de Ubicación Geoespacial

Apéndice III: Validación Adicional (Rosas de Viento)

El Informe de Validación elaborada por 3TIER incluyó una comparación datos simulados y observados con rosas de viento anual y mensual para las estaciones meteorológicas del juego de datos NCEP ADP. Por solicitud del IFC, se incluye dicha comparación a continuación.

SBCR (Corumbá, Brasil)

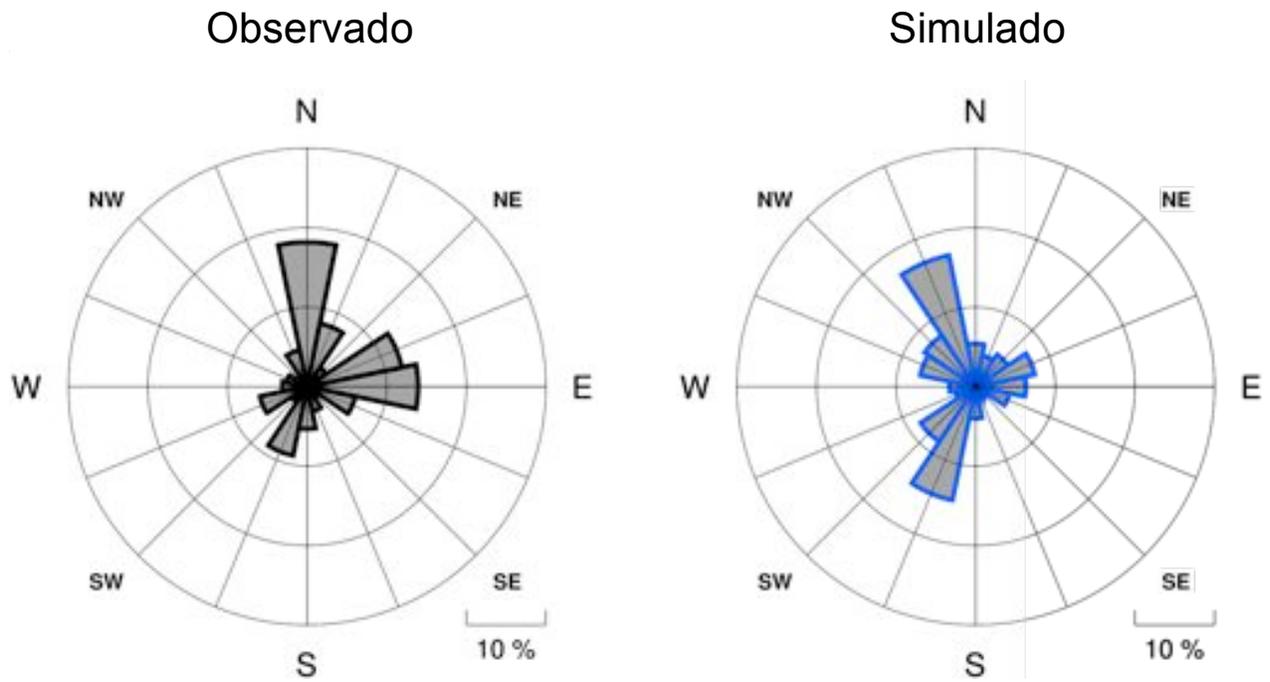


Figura III-1: Comparación Anual de Rosas de Viento: SBCR

SBRB (Río Branco, Brasil)

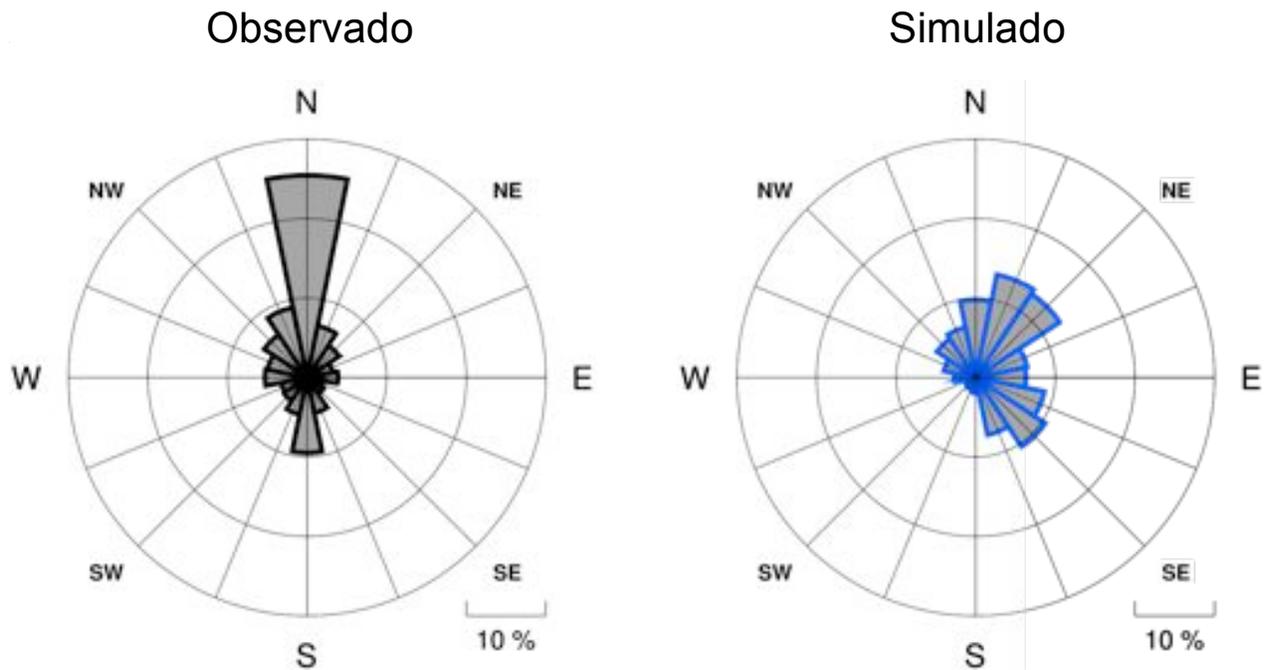


Figura III-2: Comparación Anual de Rosas de Viento: SBRB

SBVH (Vilhena Aeroporto, Brasil)

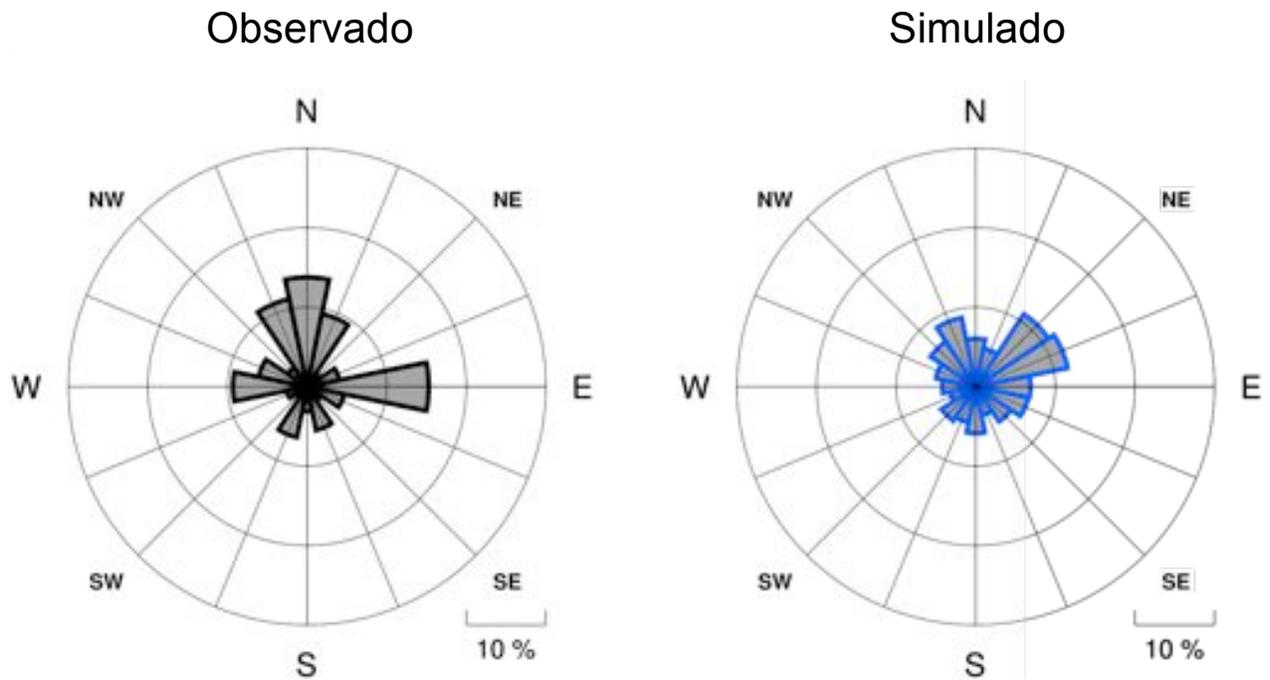


Figura III-3: Comparación Anual de Rosas de Viento: SBVH

SLCB (Cochabamba, Bolivia)

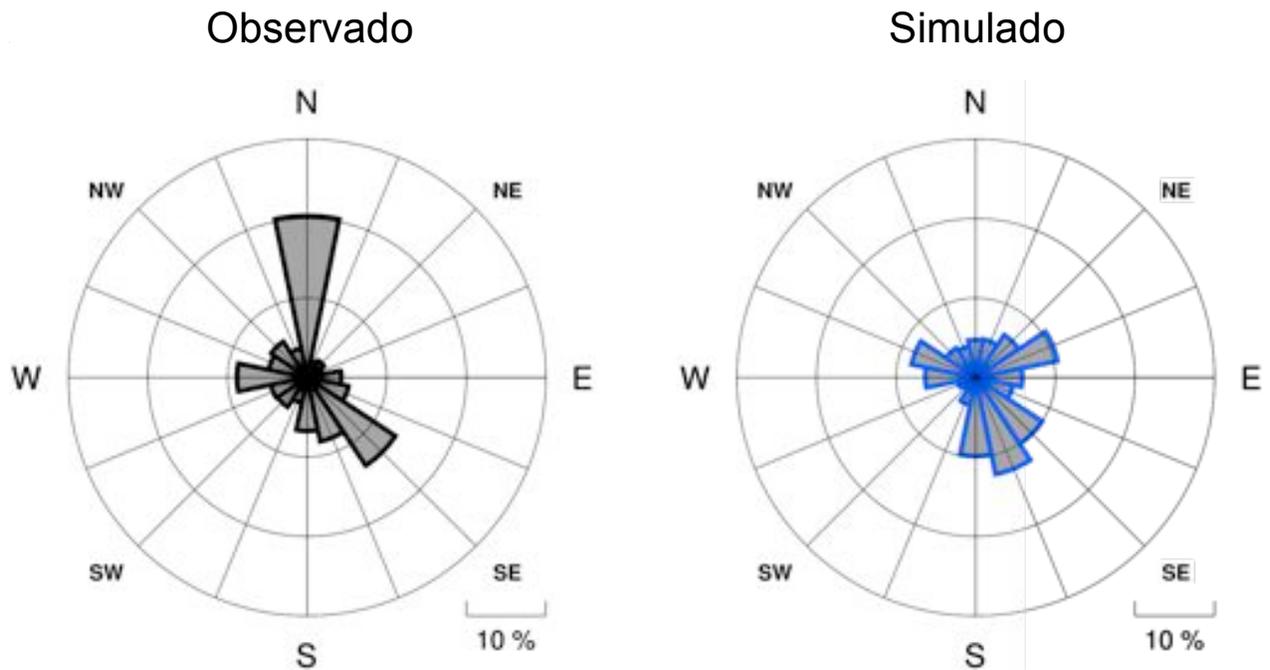


Figura III-4: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLCB

SLCO (Cobija, Bolivia)

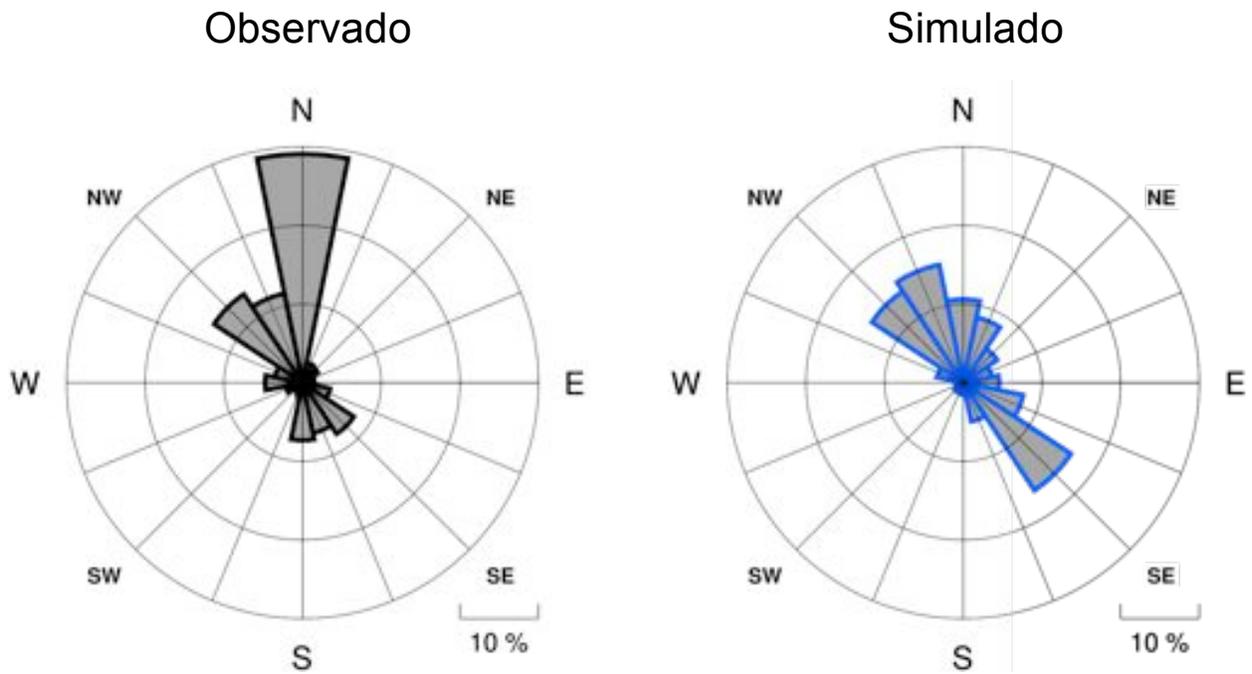


Figura III-5: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLCO

SLCP (Concepción, Bolivia)

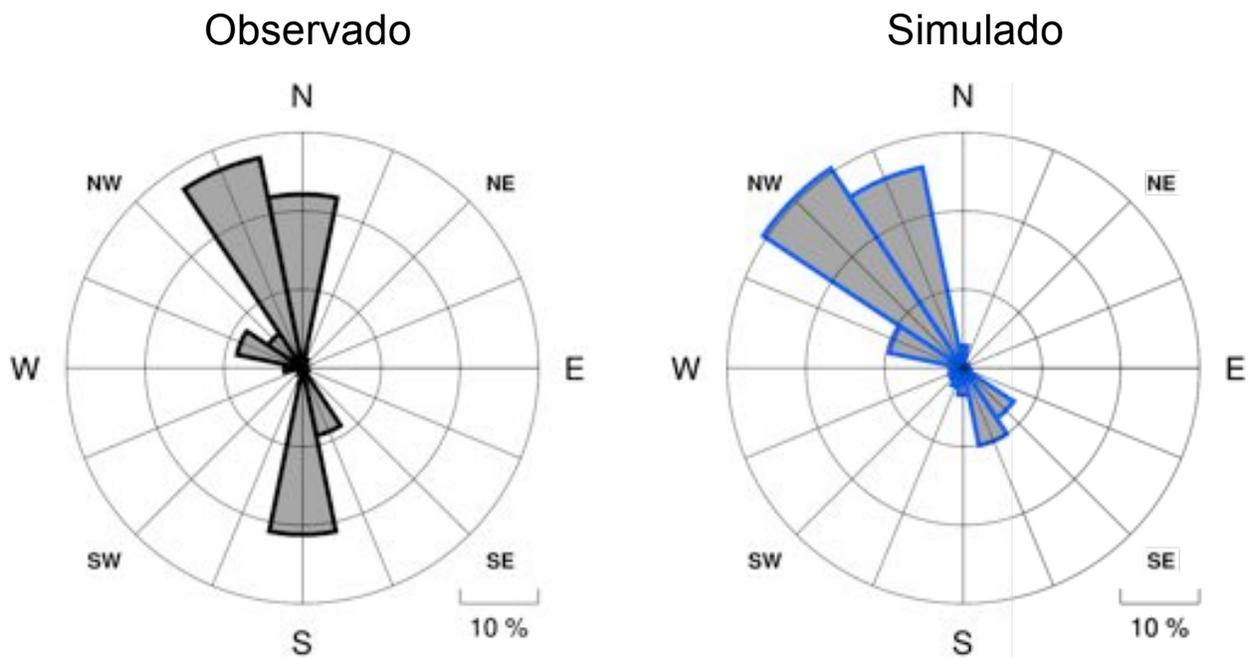


Figura III-6: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLCP

SLET (Santa Cruz / El Trompillo, Bolivia)

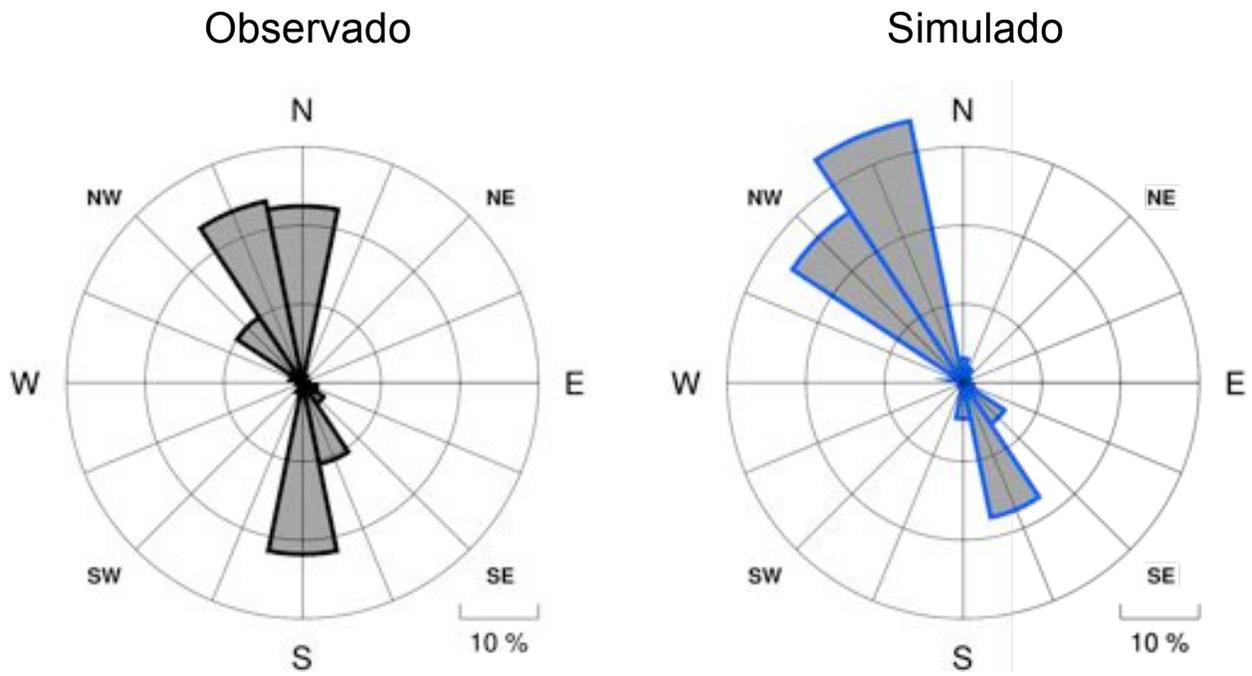


Figura III-7: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLET

SLJE (San Jose de Chiquitos, Bolivia)

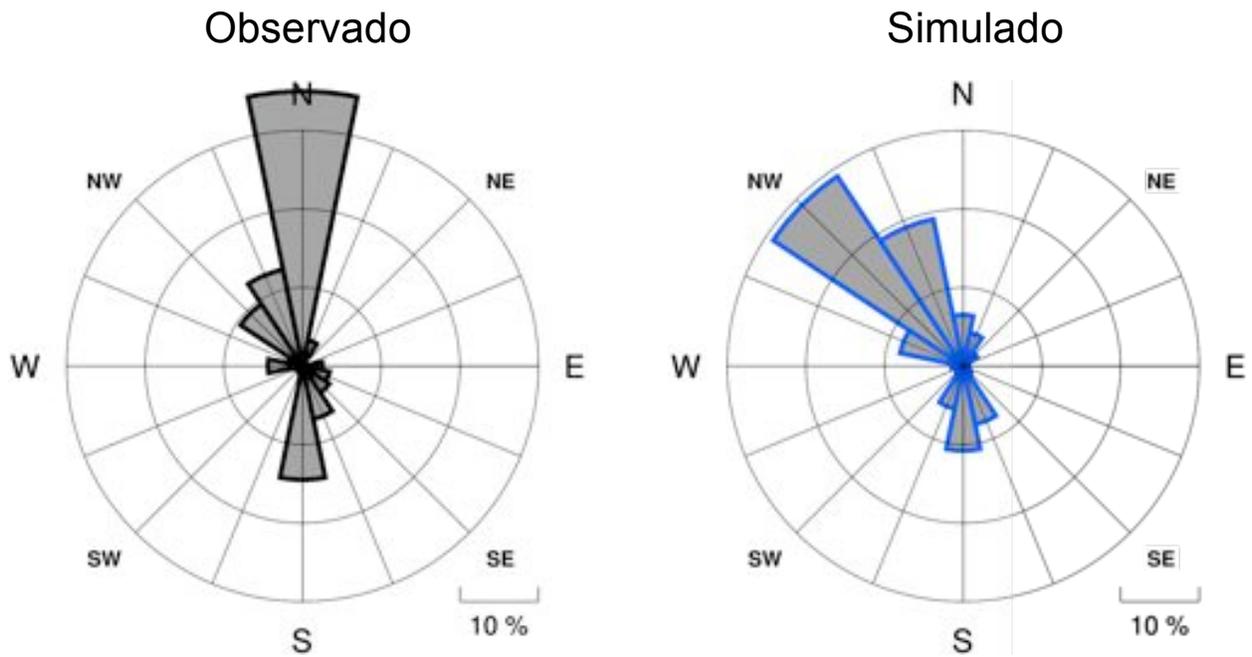
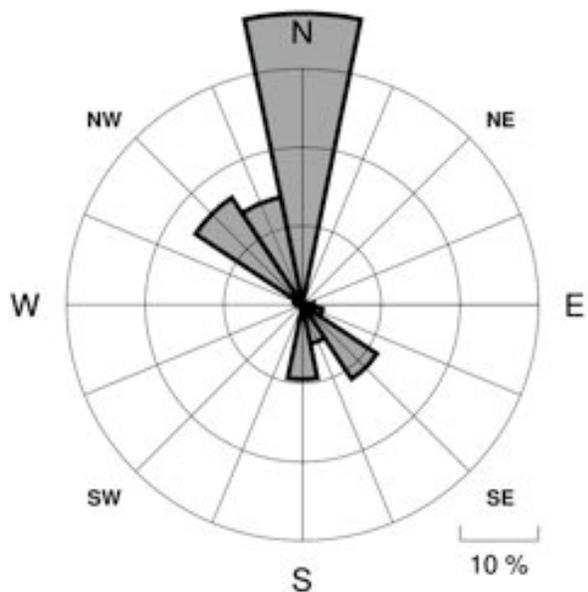


Figura III-8: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLJE

SLJO (San Joaquín, Bolivia)

Observado



Simulado

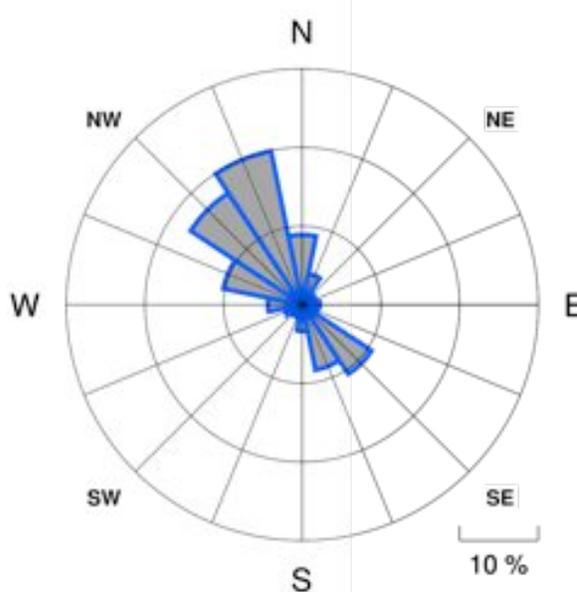
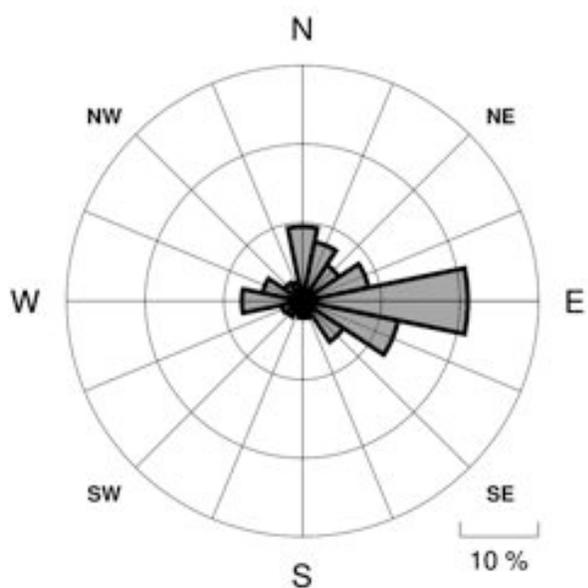


Figura III-9: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLJO

SLLP (La Paz / Alto, Bolivia)

Observado



Simulado

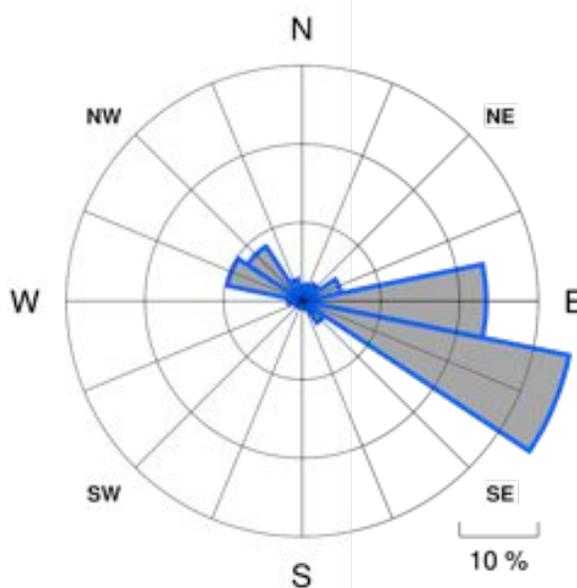


Figura III-10: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLLP

SLOR (Oruro, Bolivia)

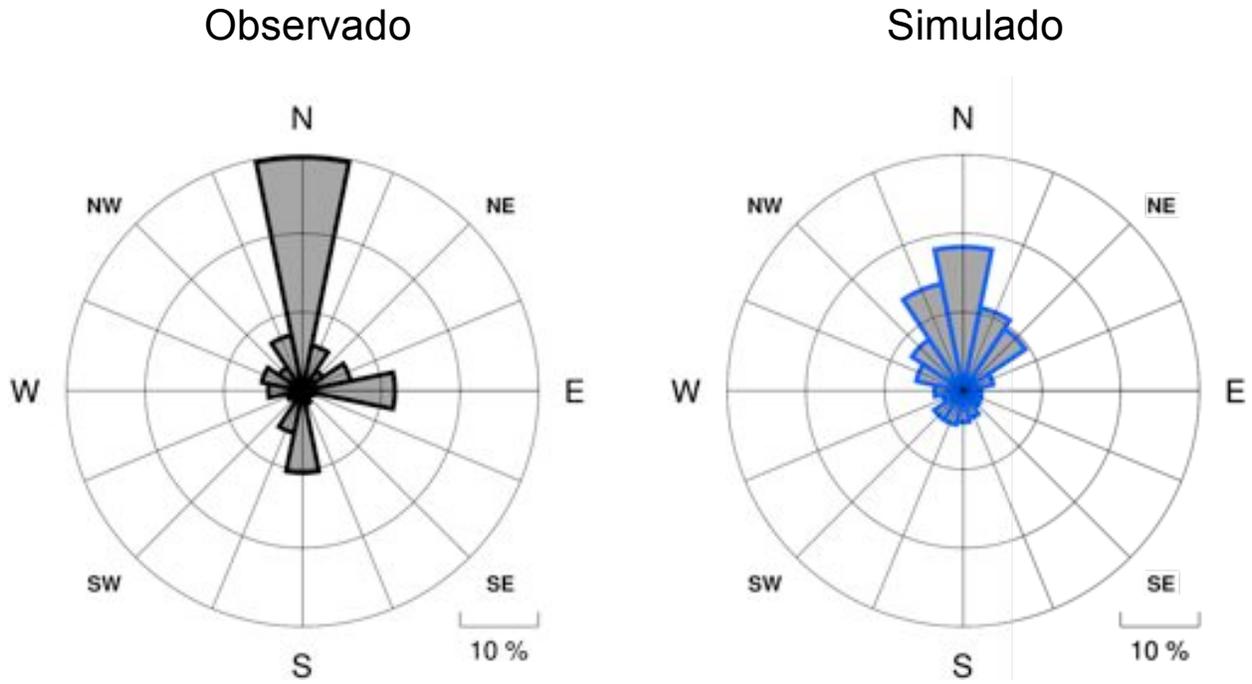


Figura III-11: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLOR

SLPO (Potosí, Bolivia)

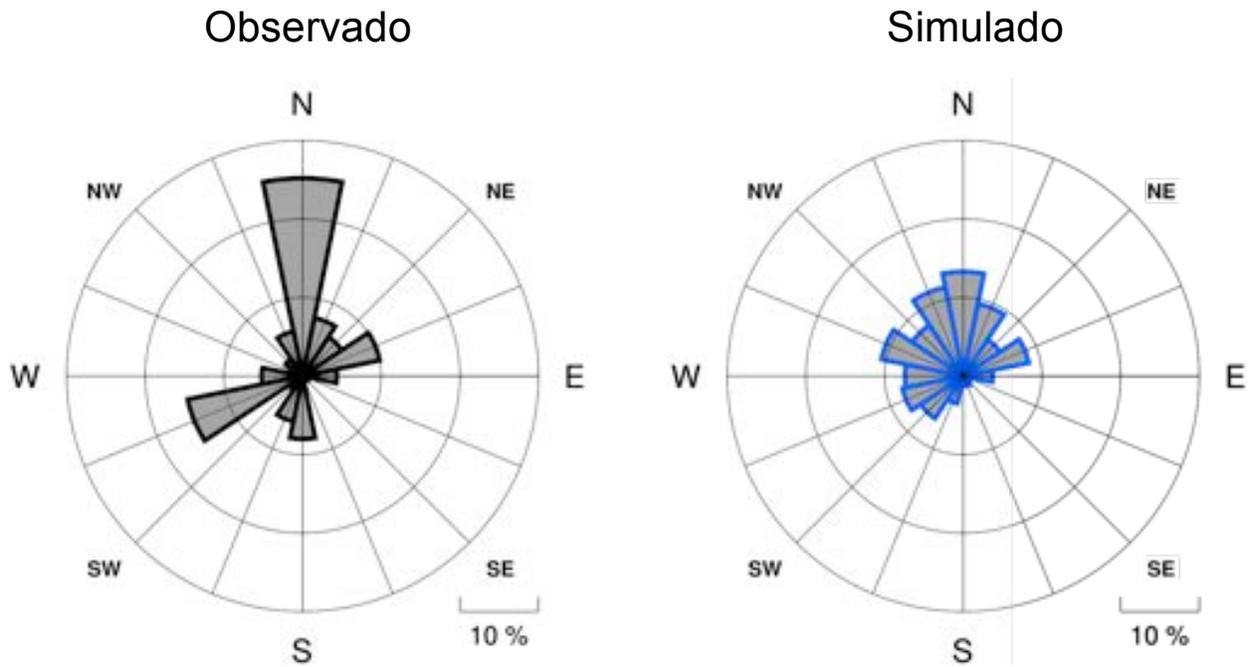


Figura III-12: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLPO

SLPS (Puerto Suárez, Bolivia)

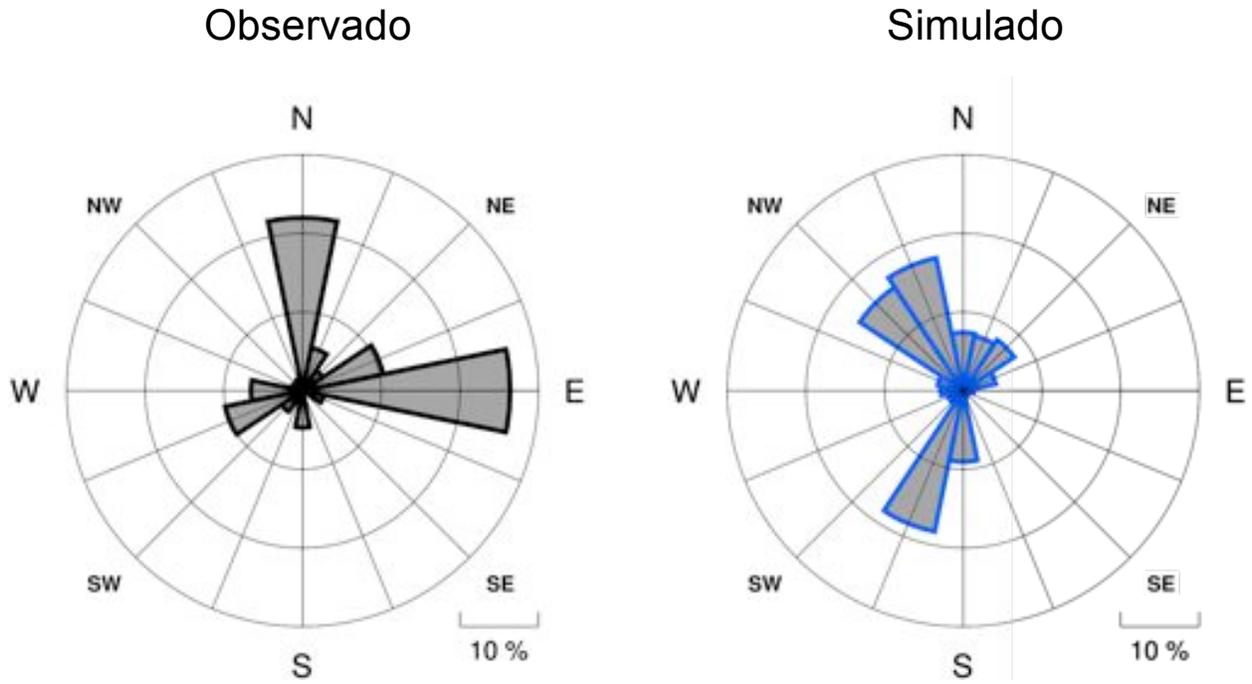


Figura III-13: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLPS

SLRB (Robore, Bolivia)

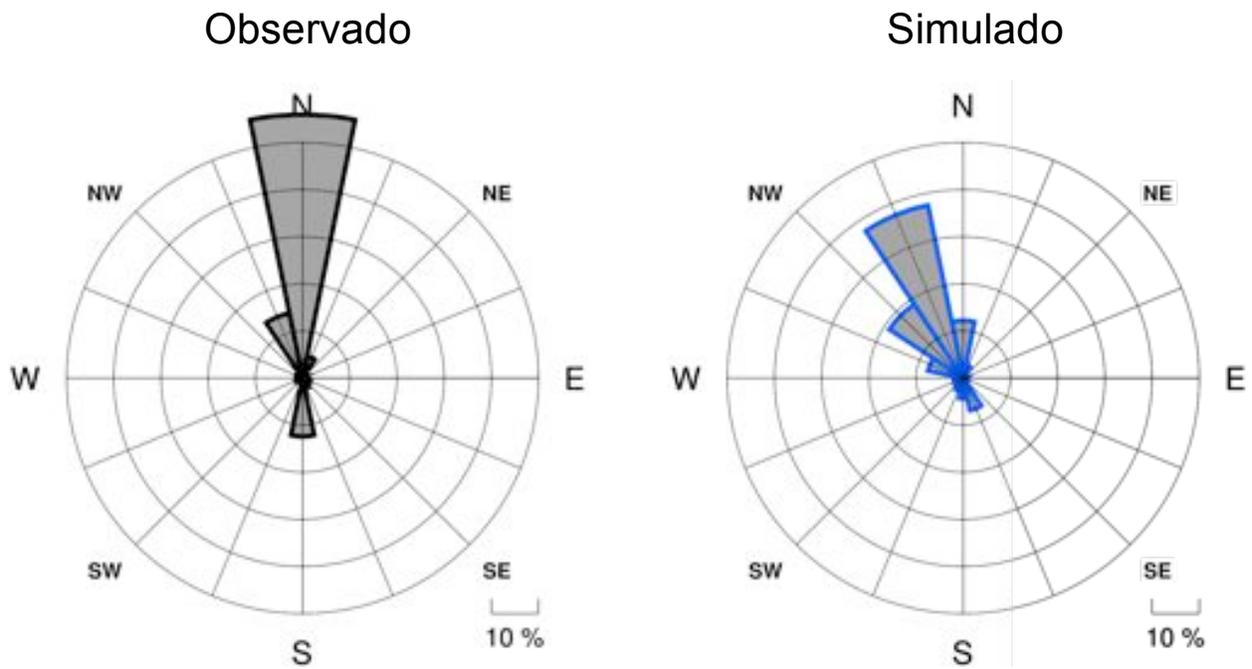


Figura III-14: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLRB

SLRI (Riberalta, Bolivia)

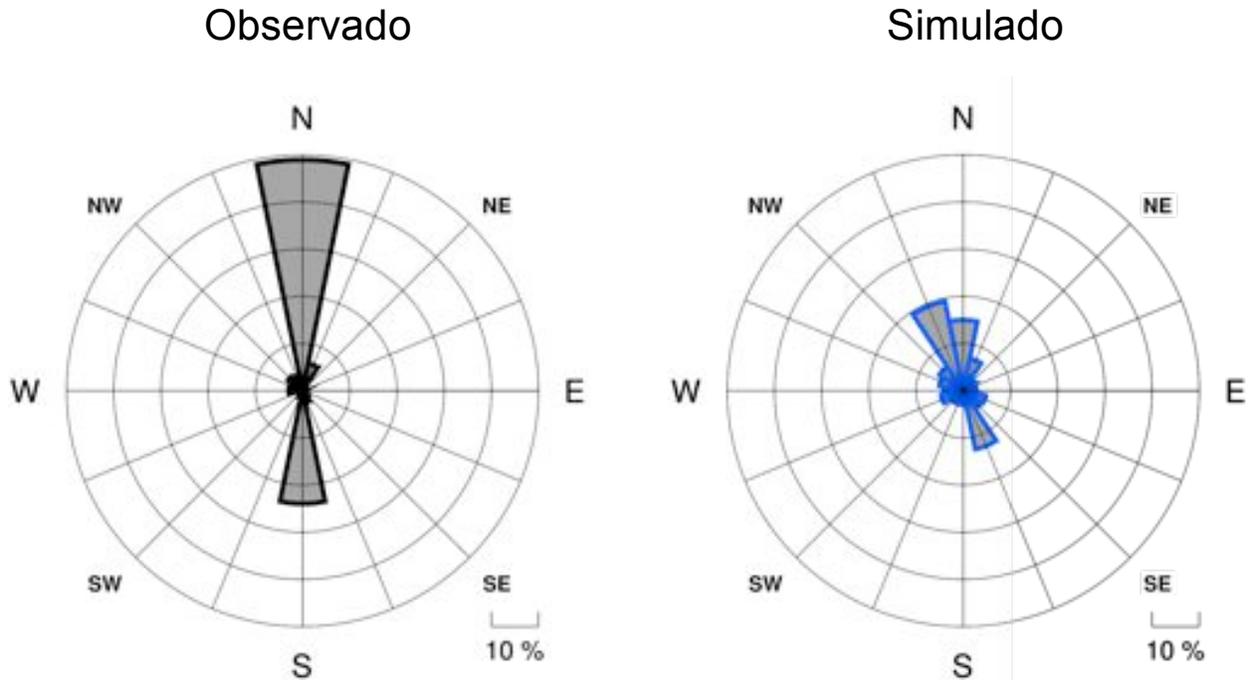


Figura III-15: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLRI

SLRY (Reyes, Bolivia)

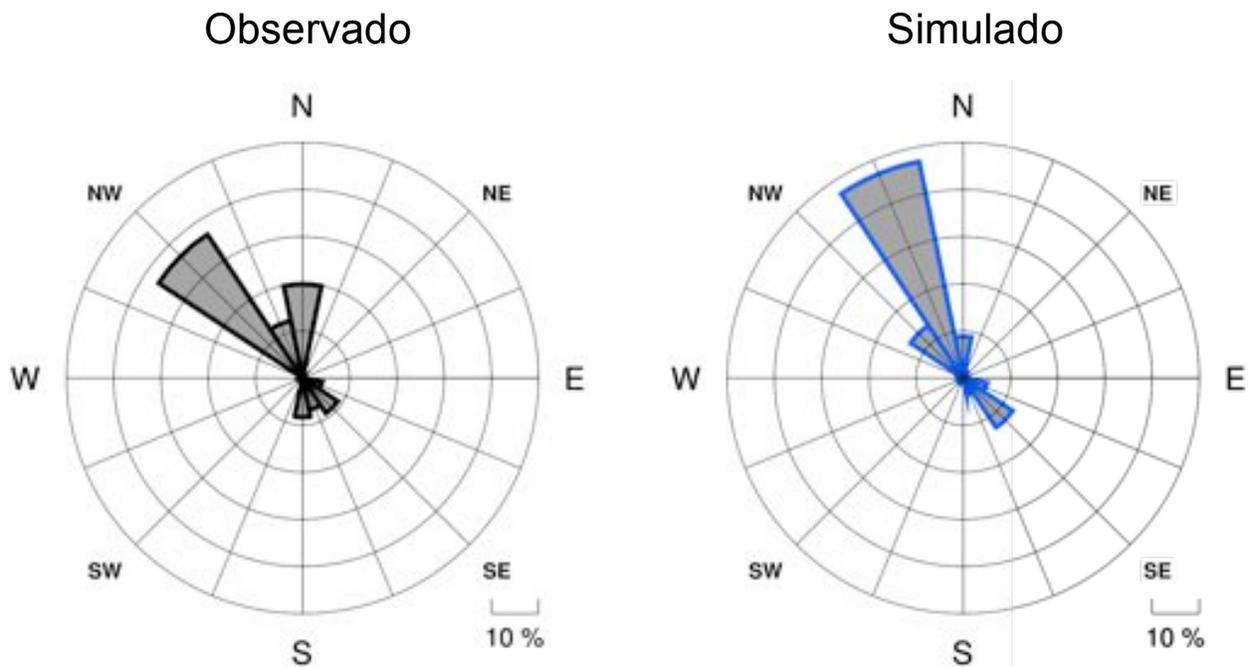


Figura III-16: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLRY

SLSA (Santa Ana, Bolivia)

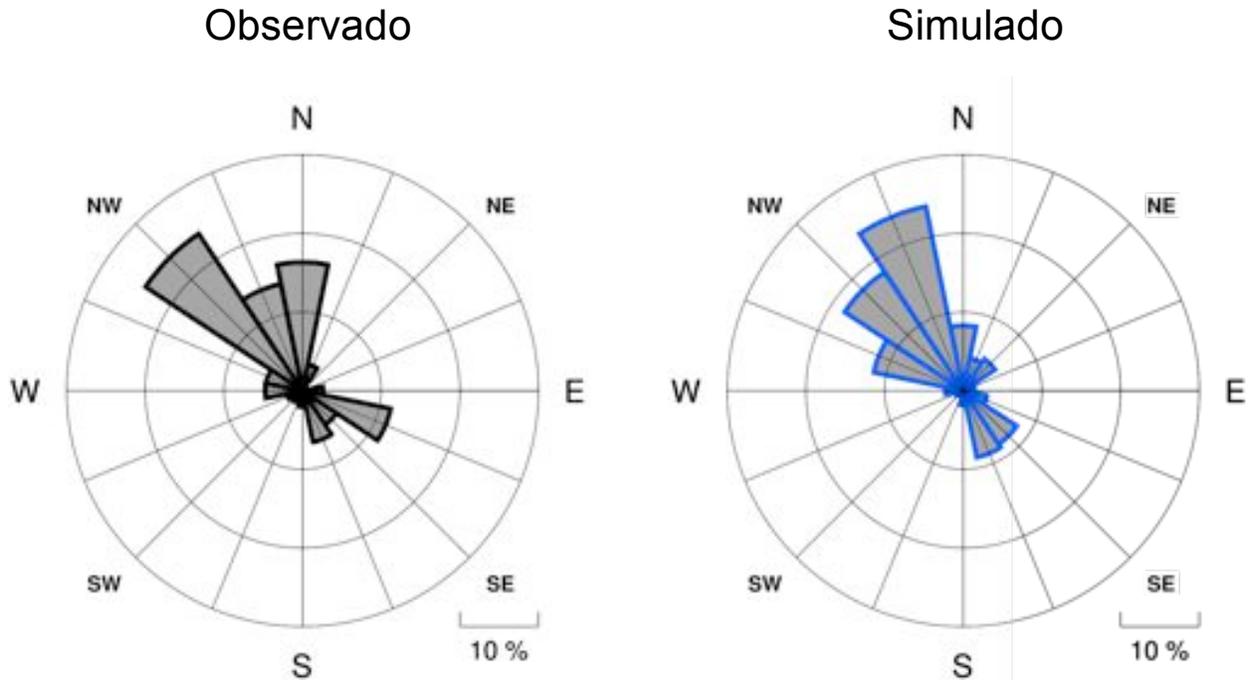


Figura III-17: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLSA

SLSI (San Ignacio de Velasco, Bolivia)

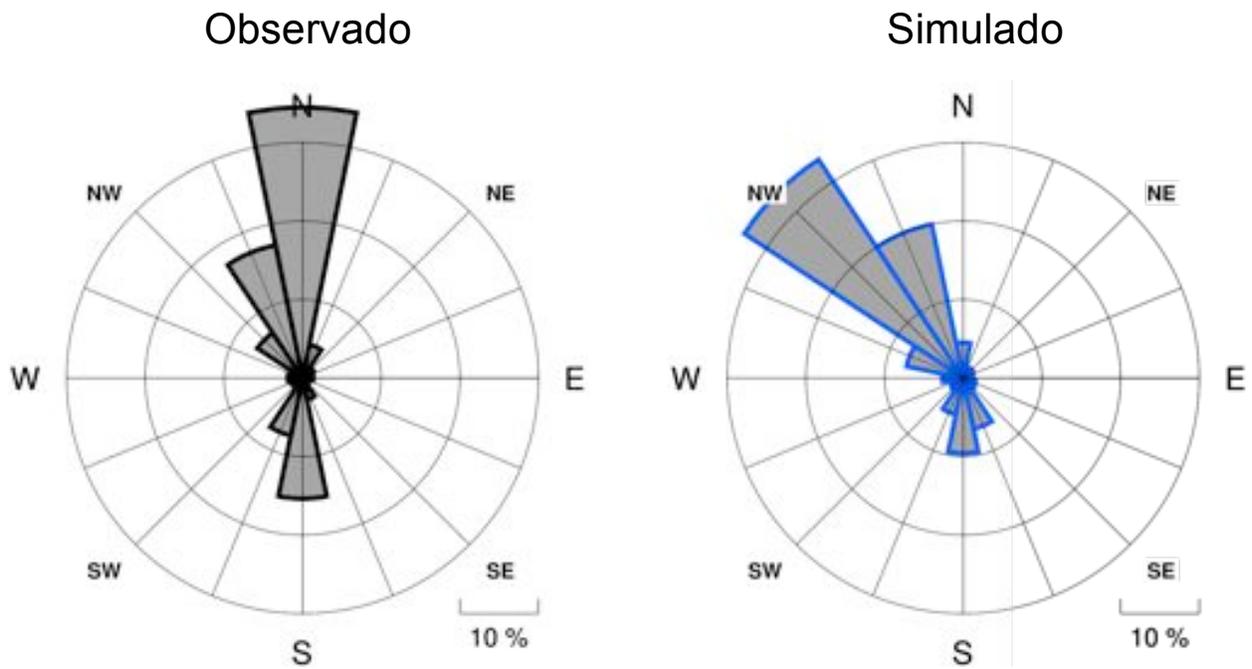


Figura III-18: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLSI

SLSU (Sucre, Bolivia)

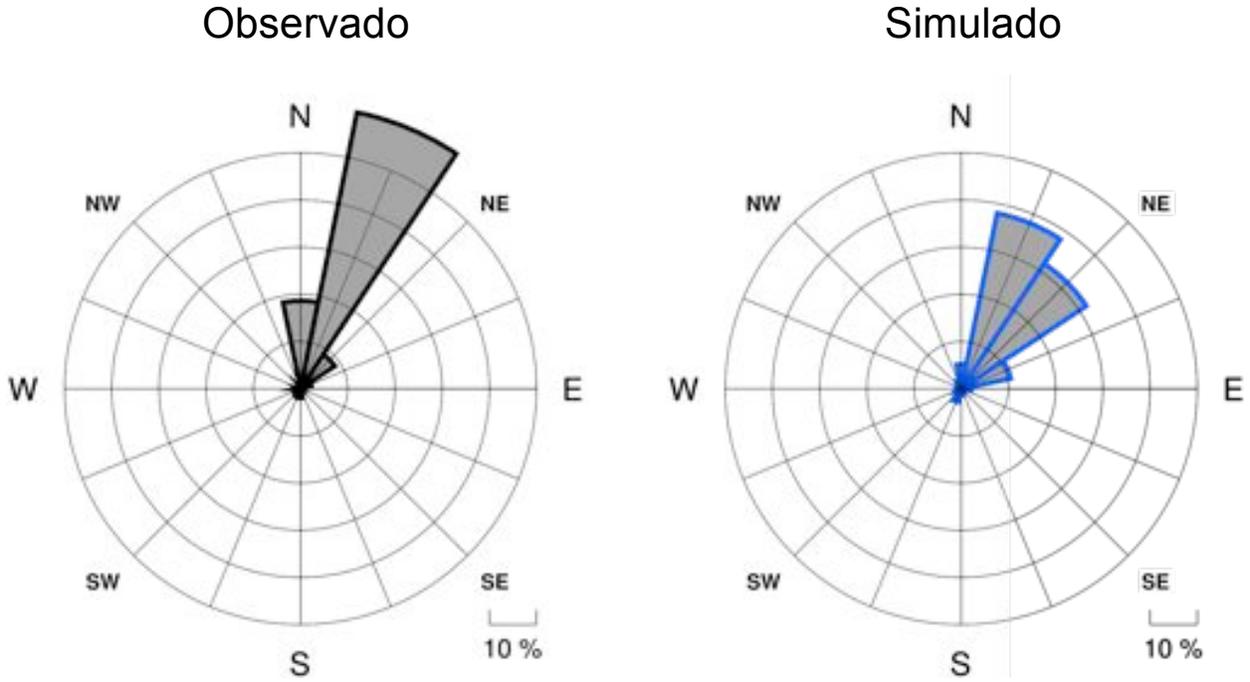


Figura III-19: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLSU

SLTJ (Tarija, Bolivia)

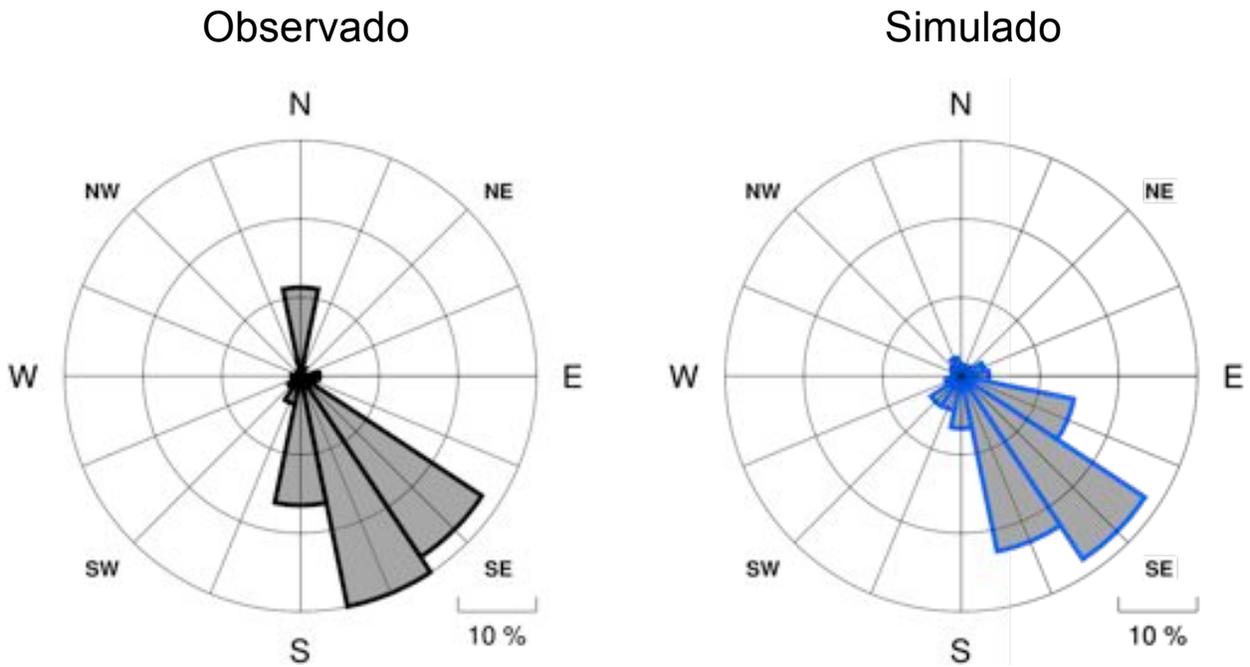


Figura III-20: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLTJ

SLVR (Viru Viru, Bolivia)

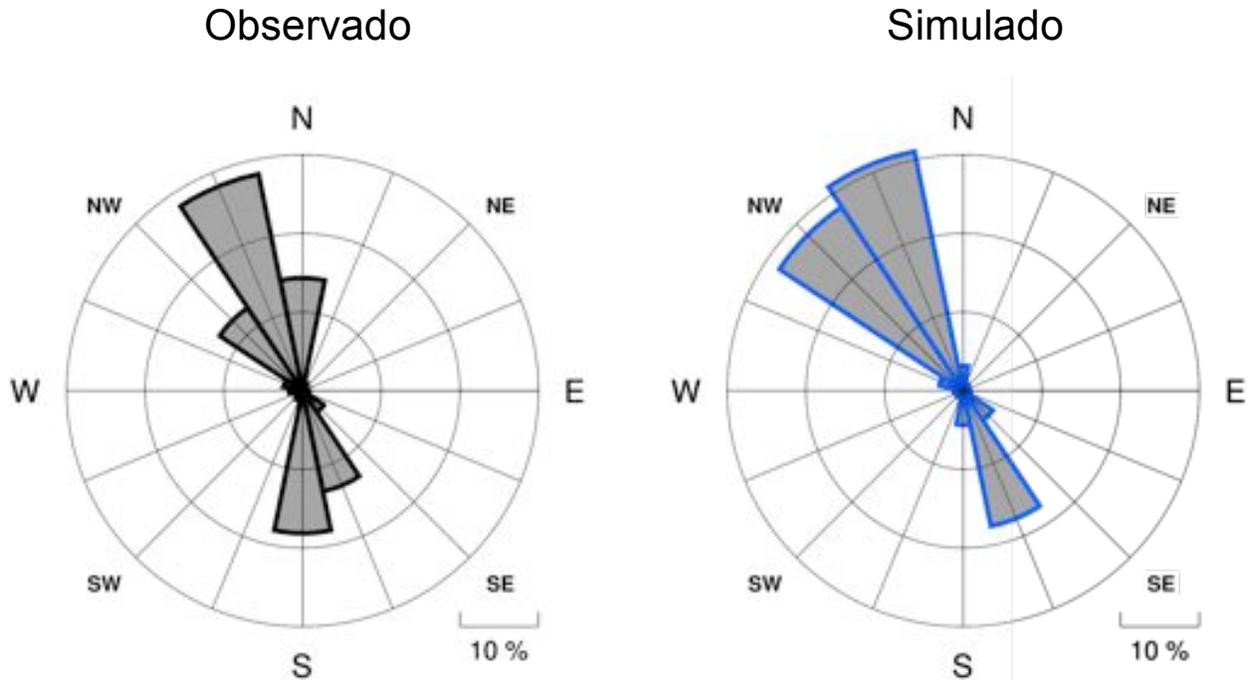


Figura III-21: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLVR

SLYA (Yacuiba, Bolivia)

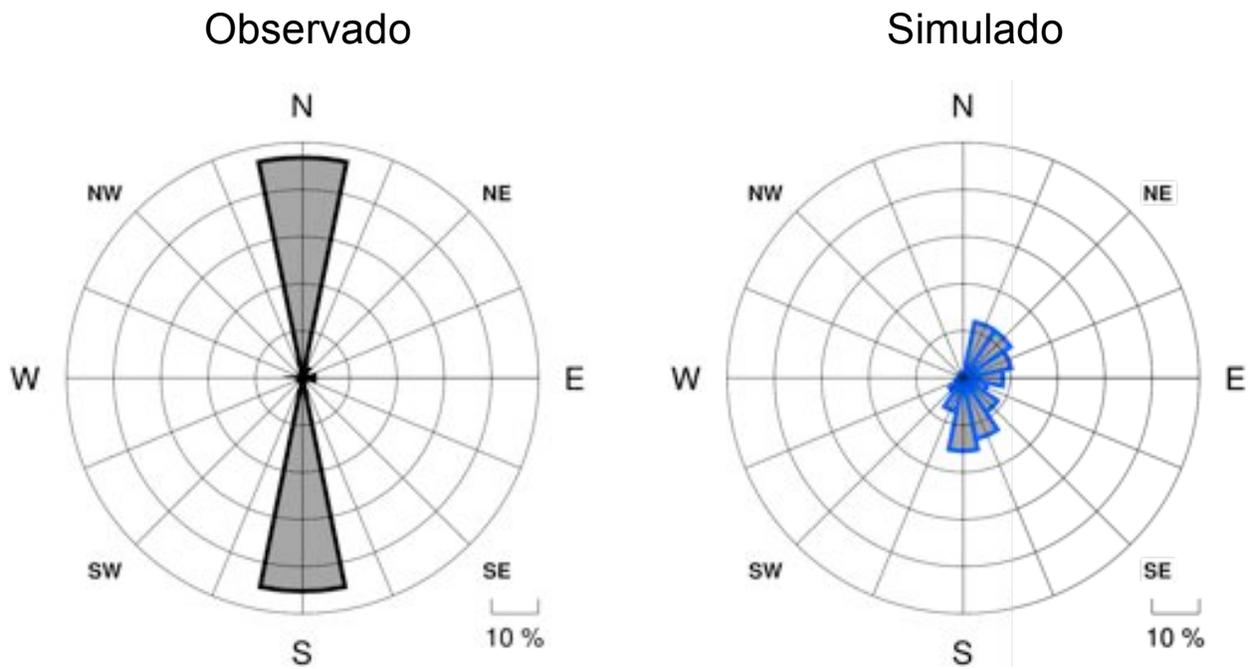


Figura III-22: Comparación Anual de Rosas de Viento: SLYA

Figura III-23: Observado en SBCR (Corumbá, Brasil)

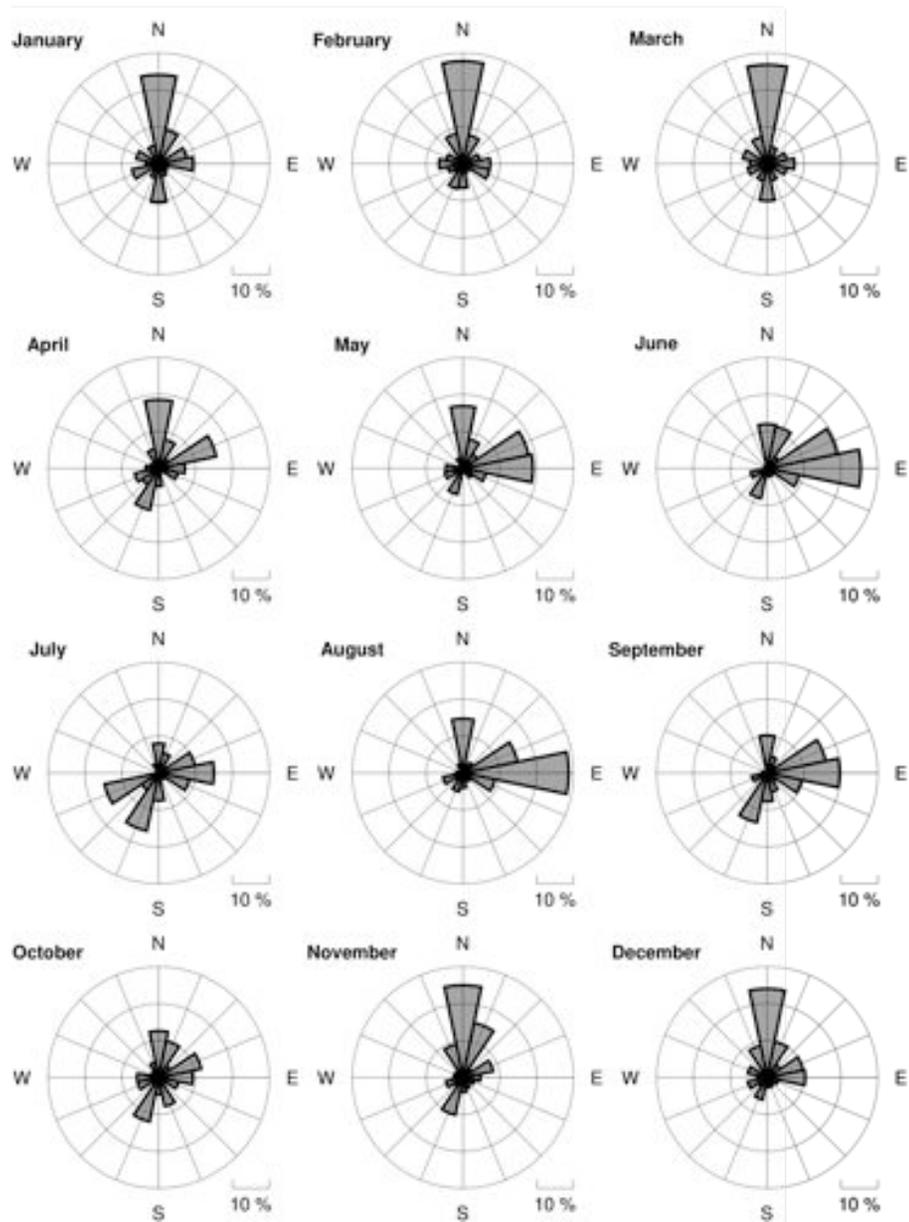


Figura III-24: Simulado en SBCR (Corumbá, Brasil)

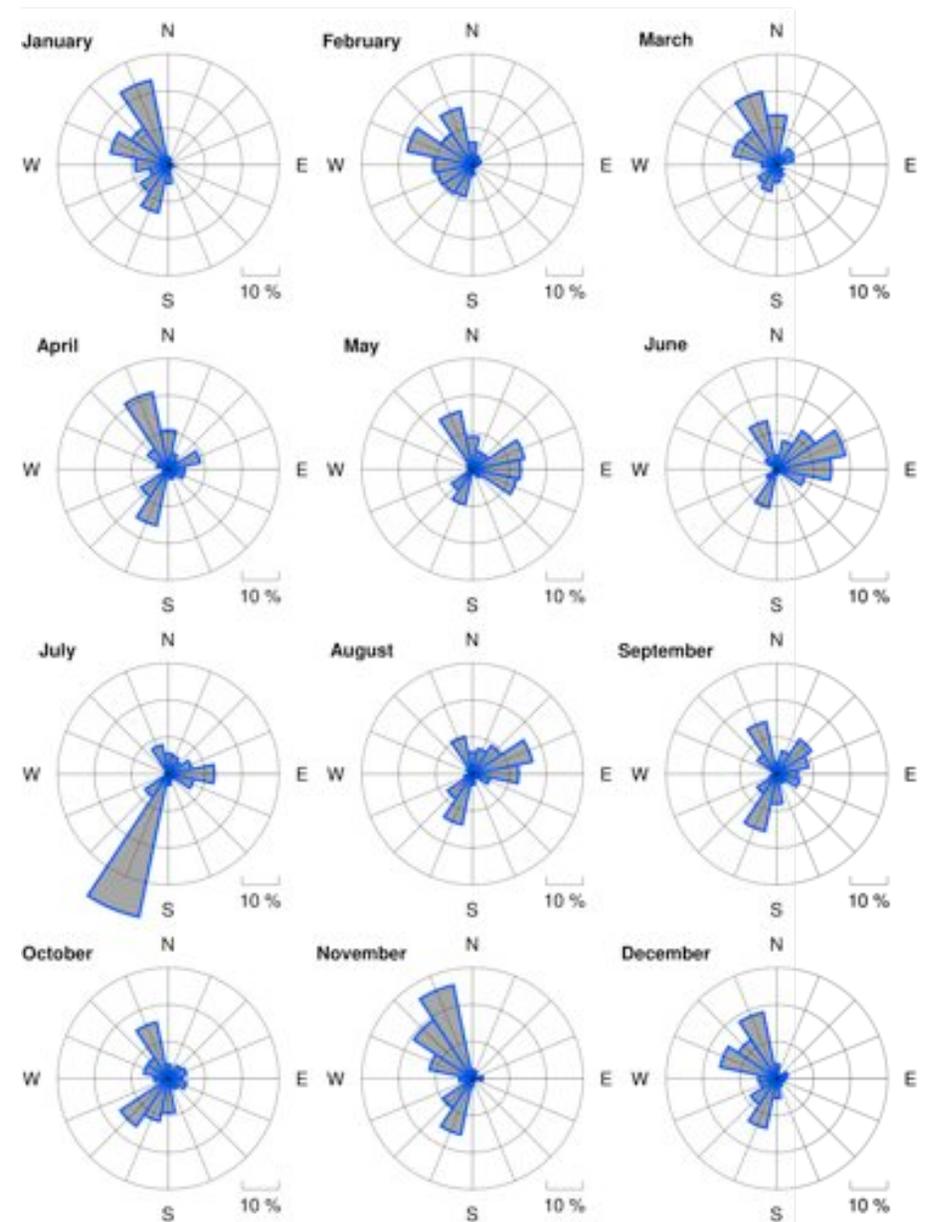


Figura III-25: Observado en SBRB (Río Branco, Brasil)

Figura III-26: Simulado en SBRB (Río Branco, Brasil)

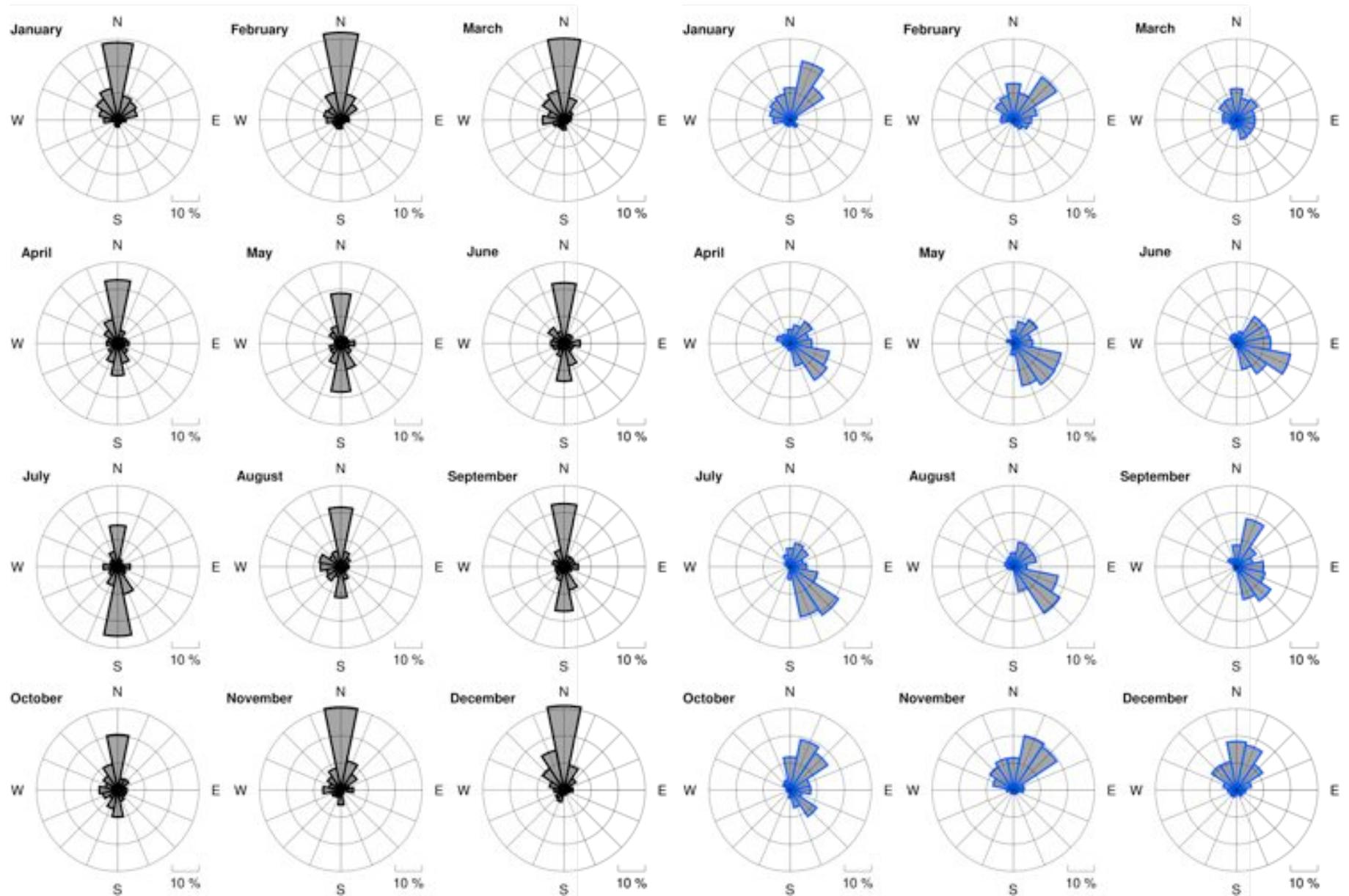


Figura III-27: Observado em SBVH (Vilhena Aeroporto, Brasil)

Figura III-28: Simulado em SBVH (Vilhena Aeroporto, Brasil)

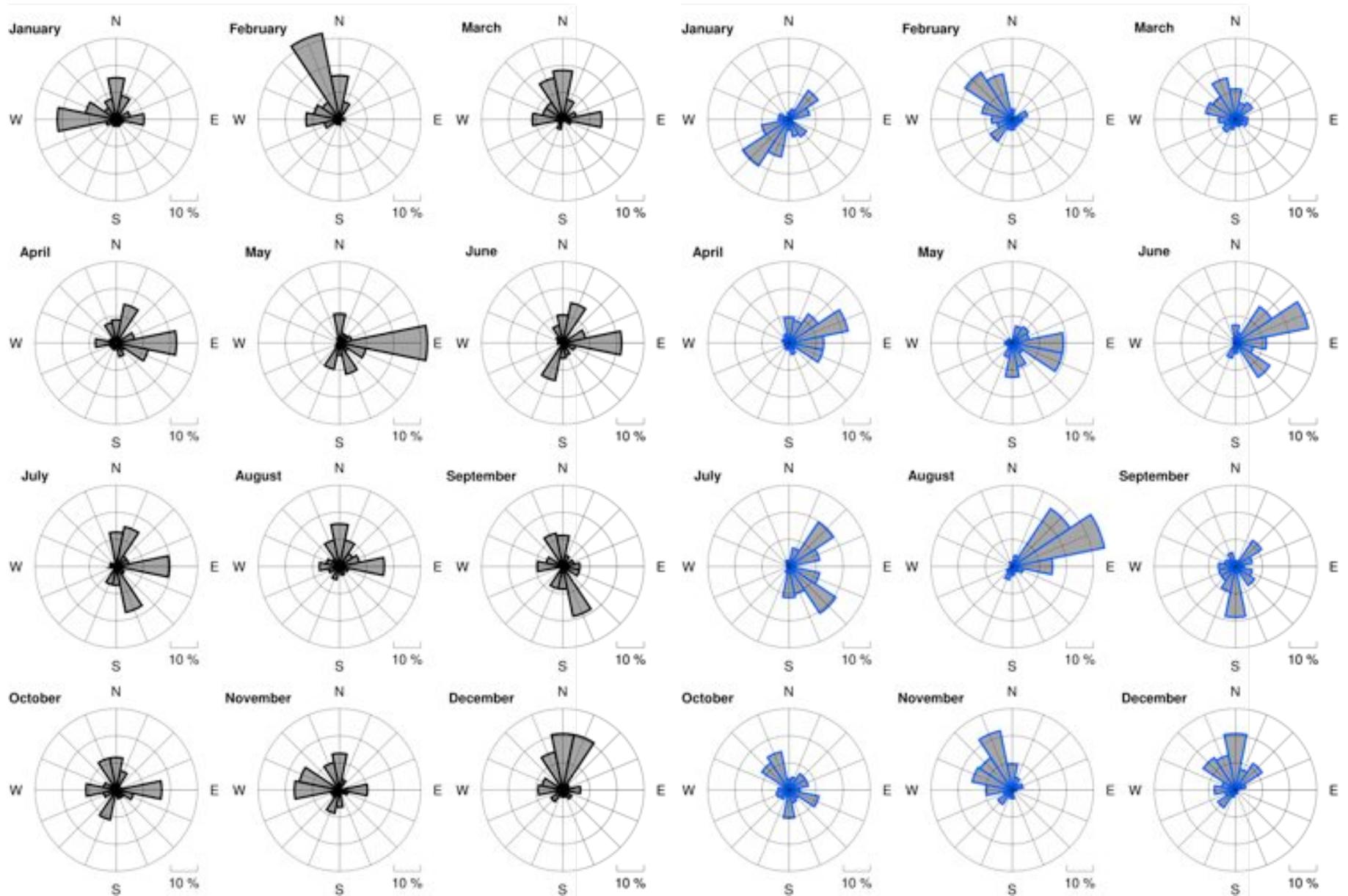


Figura III-29: Observado en SLCB (Cochabamba, Bolivia)

Figura III-30: Simulado en SLCB (Cochabamba, Bolivia)

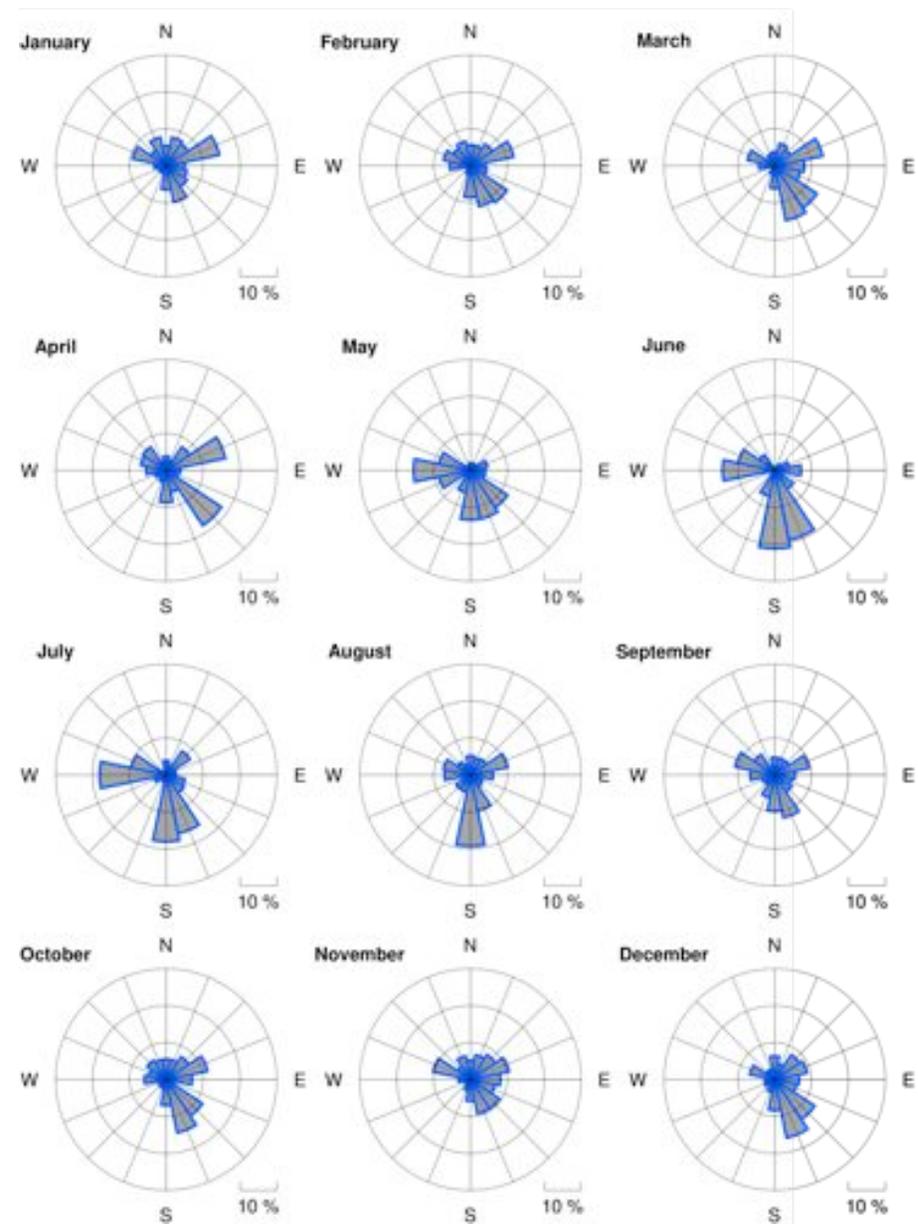
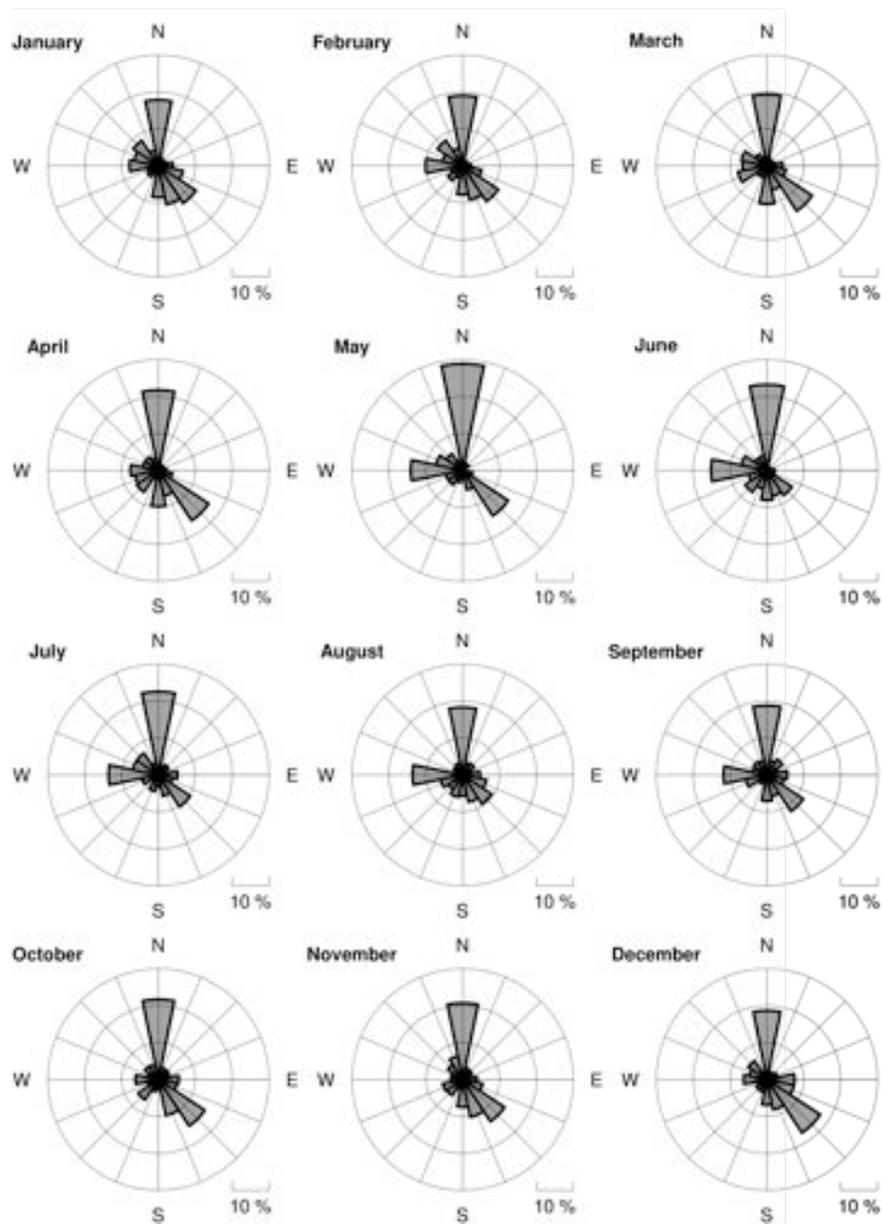


Figura III-31: Observado en SLCO (Cobija, Bolivia)

Figura III-32: Simulado en SLCO (Cobija, Bolivia)

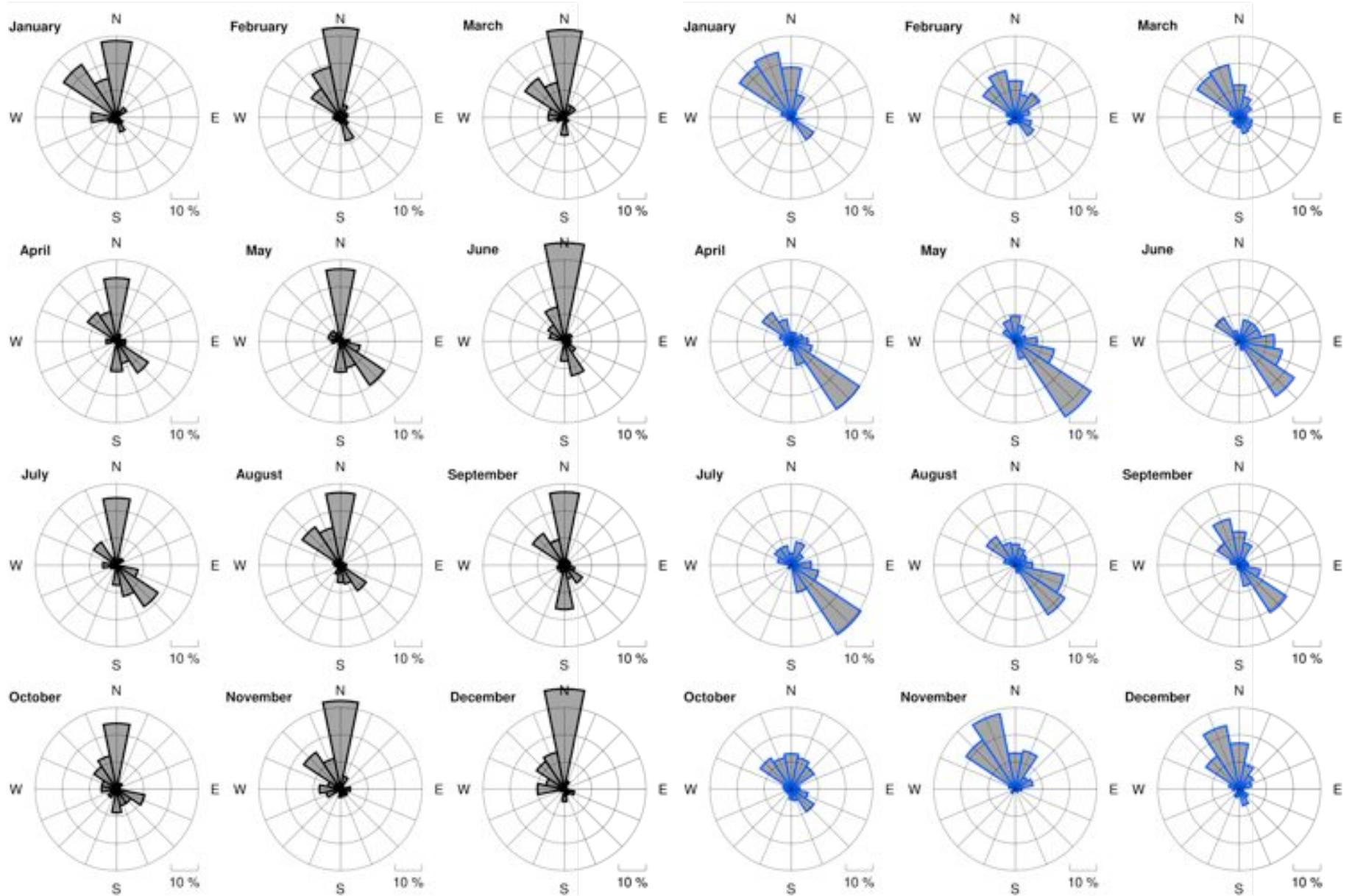


Figura III-33: Observado en SLCP (Concepción, Bolivia)

Figura III-34: Simulado en SLCP (Concepción, Bolivia)

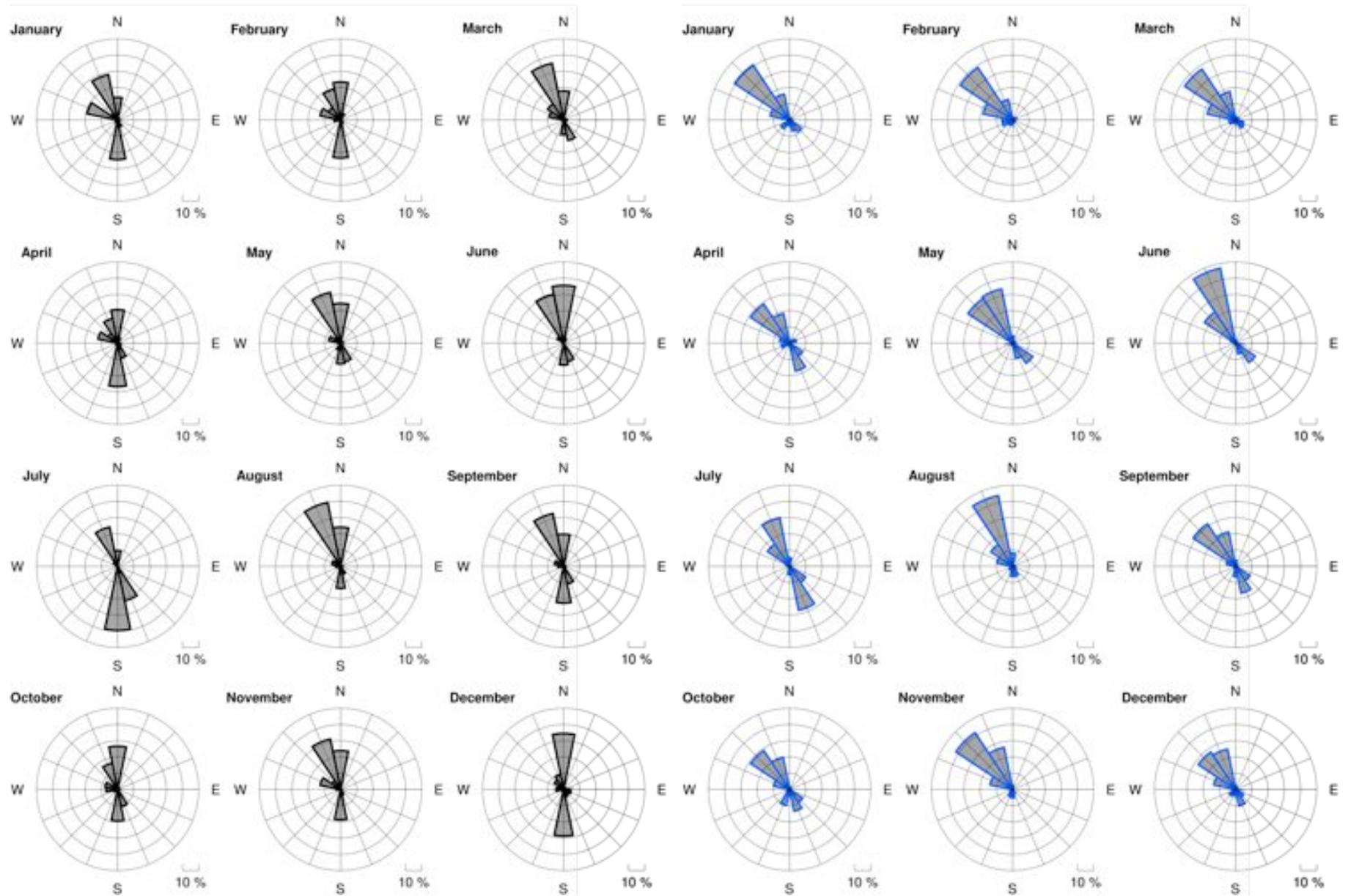


Figura III-35: Observado en SLET (Santa Cruz / El Trompillo, Bolivia)

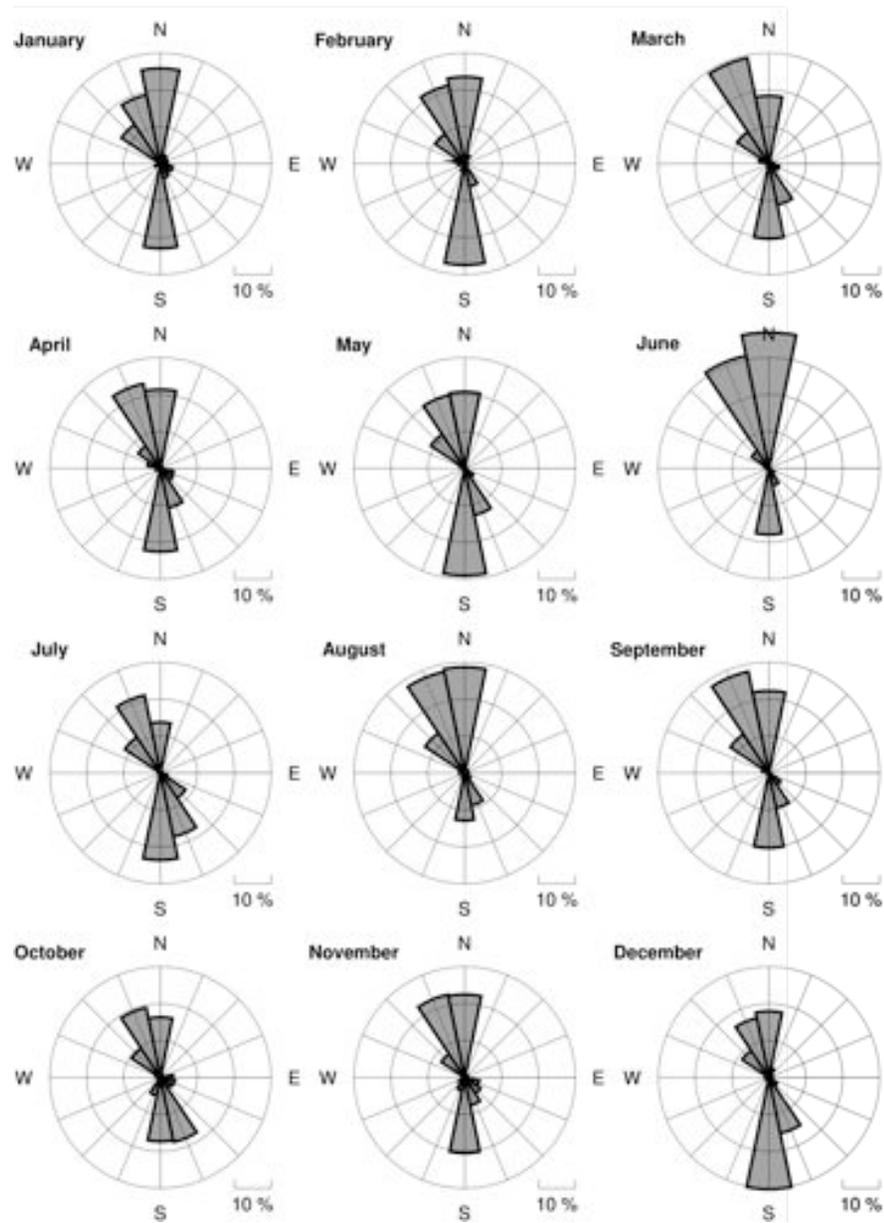


Figura III-36: Simulado en SLET (Santa Cruz / El Trompillo, Bolivia)

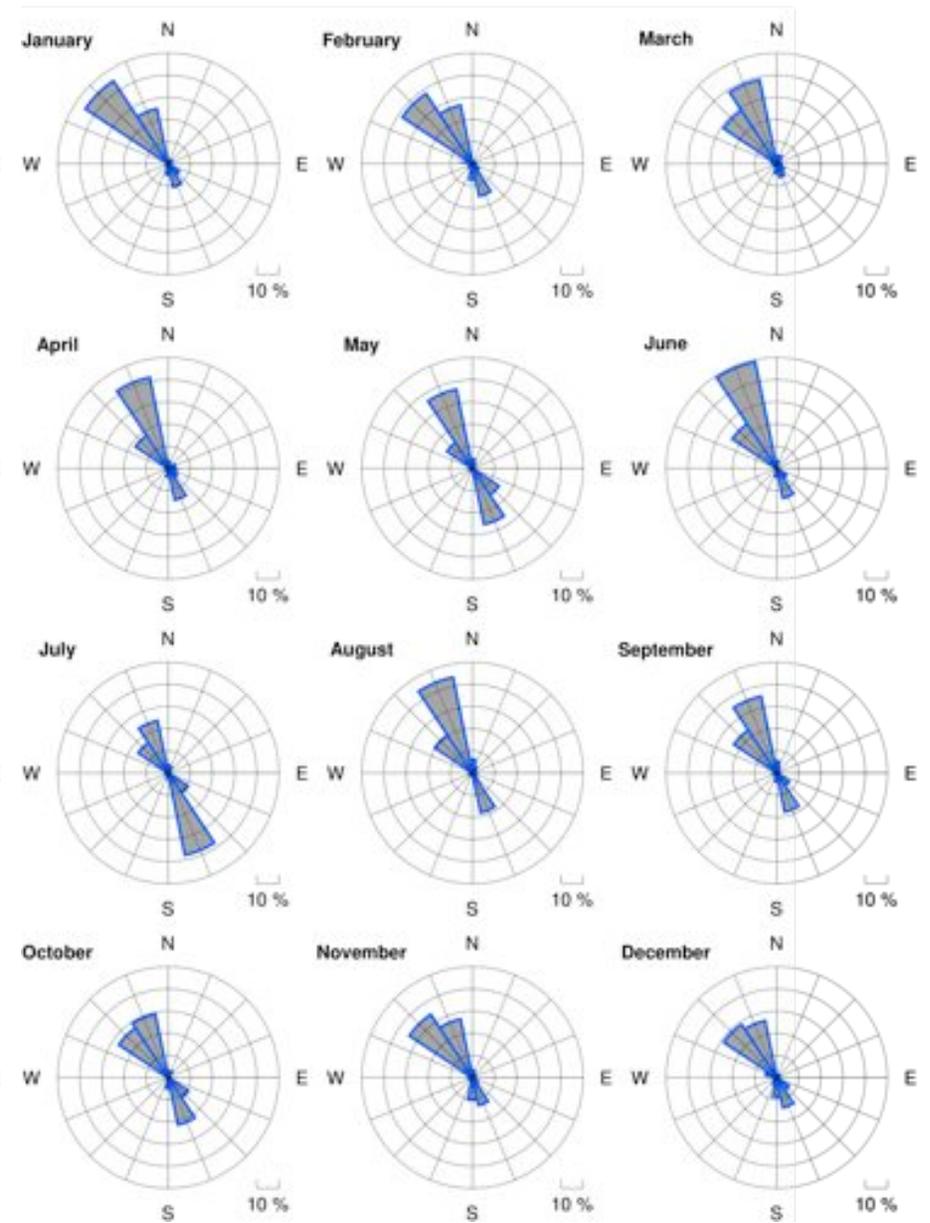


Figura III-37: Observado en SLJE (San José de Chiquitos, Bolivia)

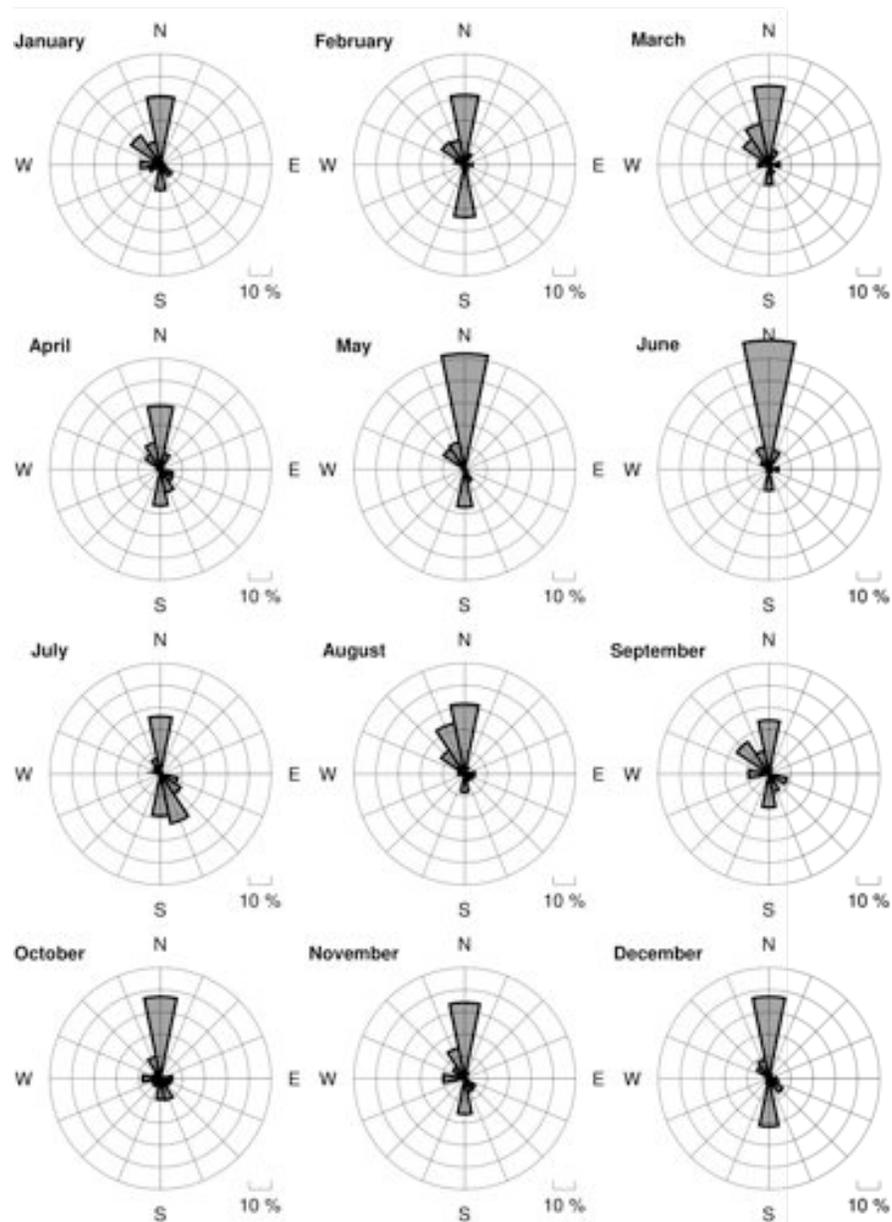


Figura III-38: Simulado en SLJE (San José de Chiquitos, Bolivia)

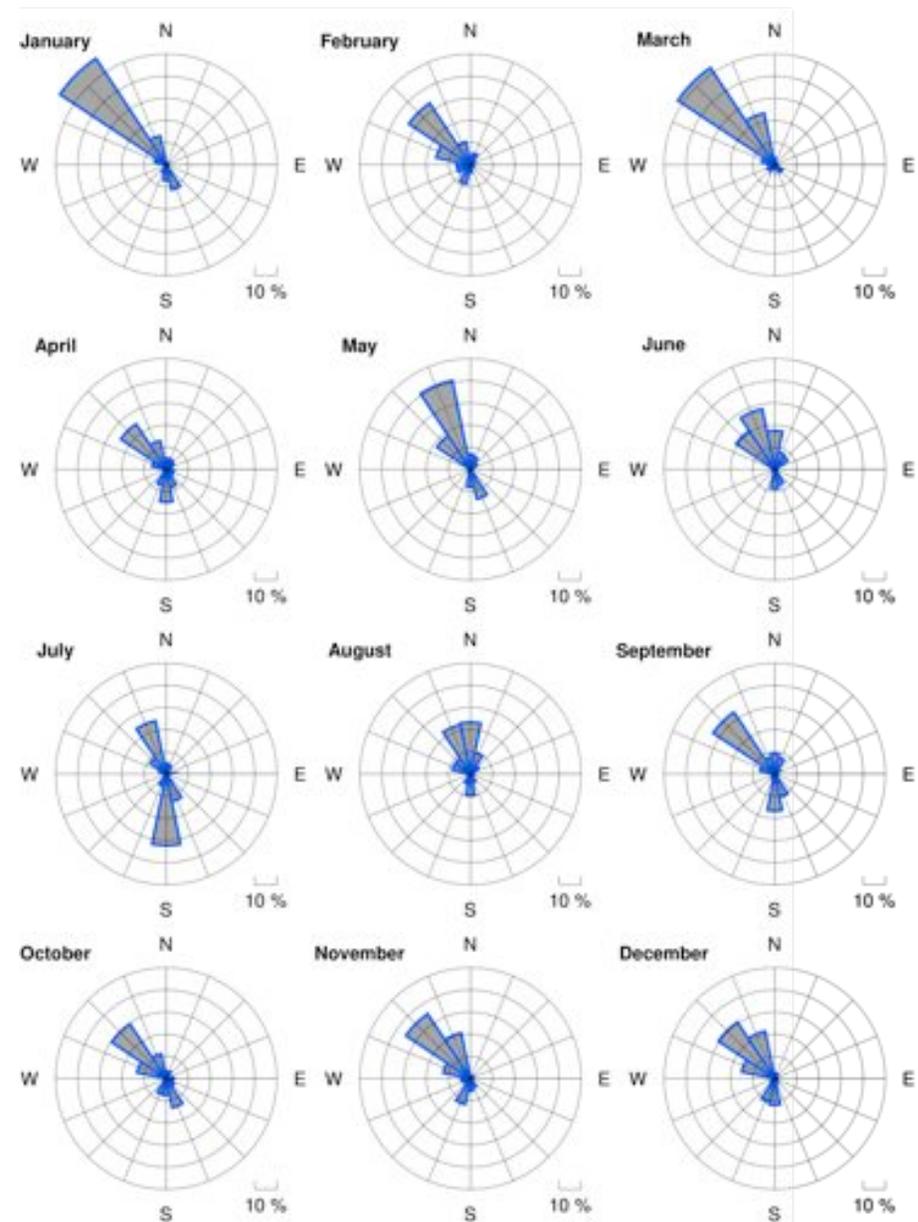


Figura III-39: Observado en SLJO (San Joaquín, Bolivia)

Figura III-40: Simulado en SLJO (San Joaquín, Bolivia)

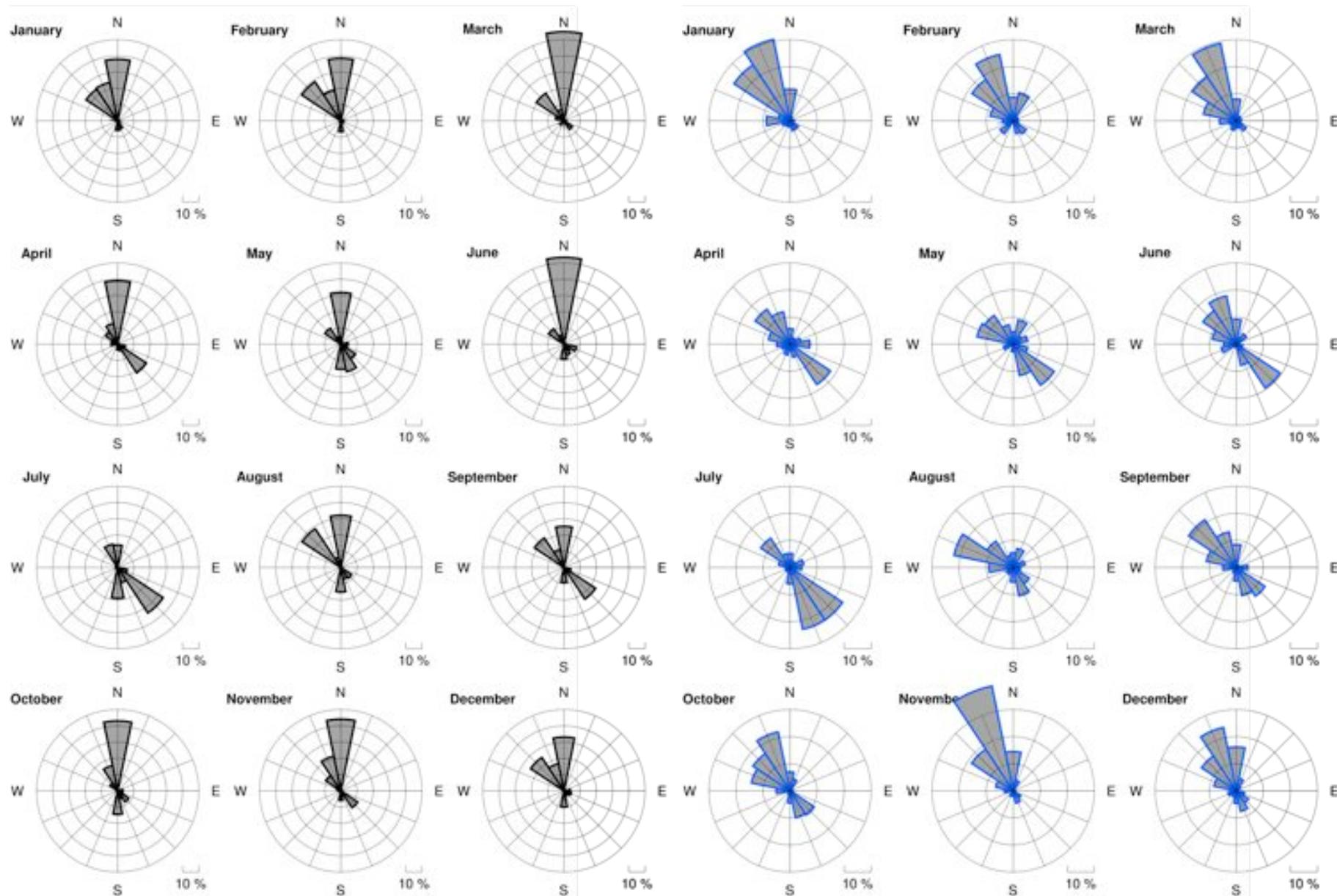


Figura III-41: Observado en SLLP (La Paz / Alto, Bolivia)

Figura III-42: Simulado en SLLP (La Paz / Alto, Bolivia)

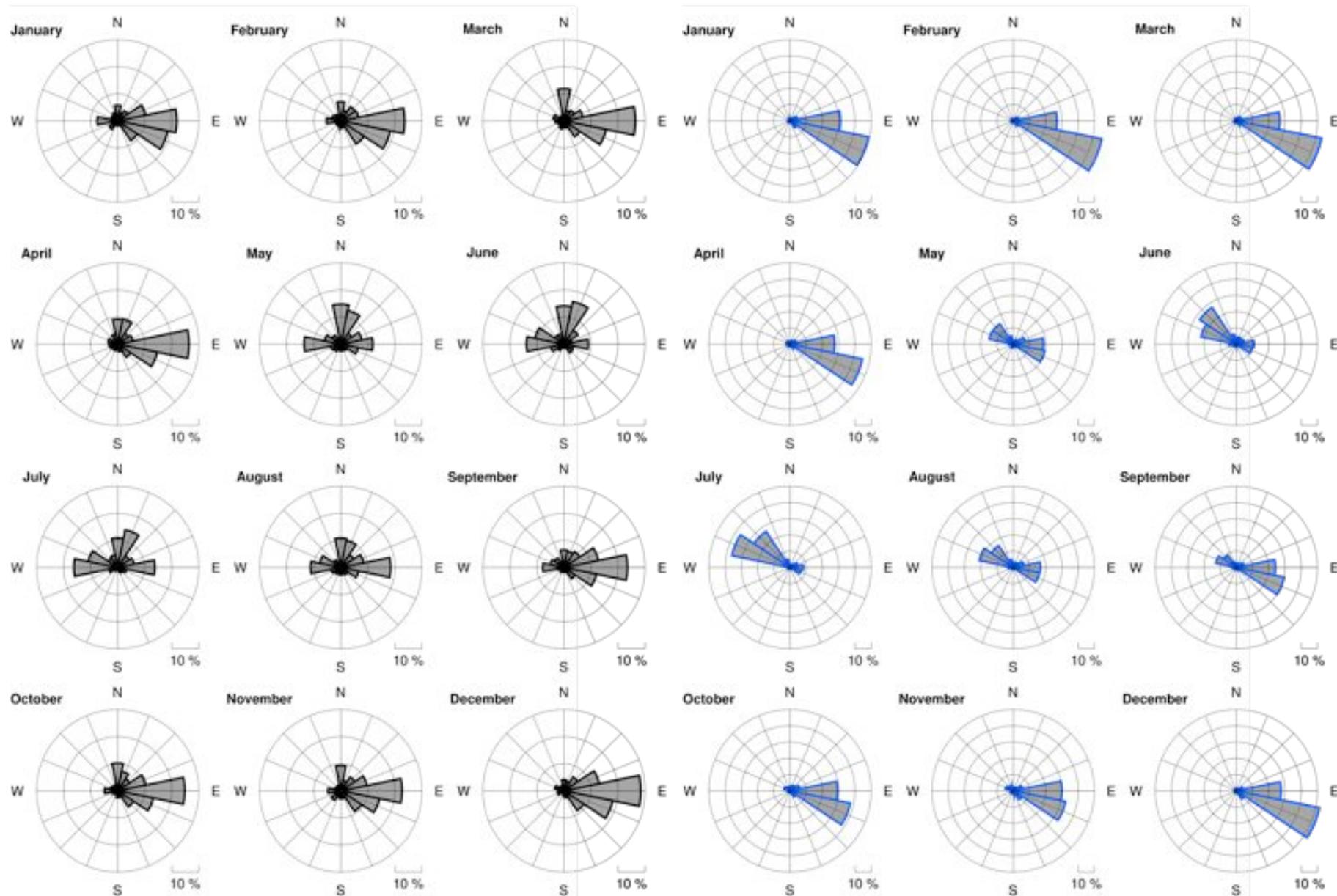


Figura III-43: Observado en SLOR (Oruro, Bolivia)

Figura III-44: Simulado en SLOR (Oruro, Bolivia)

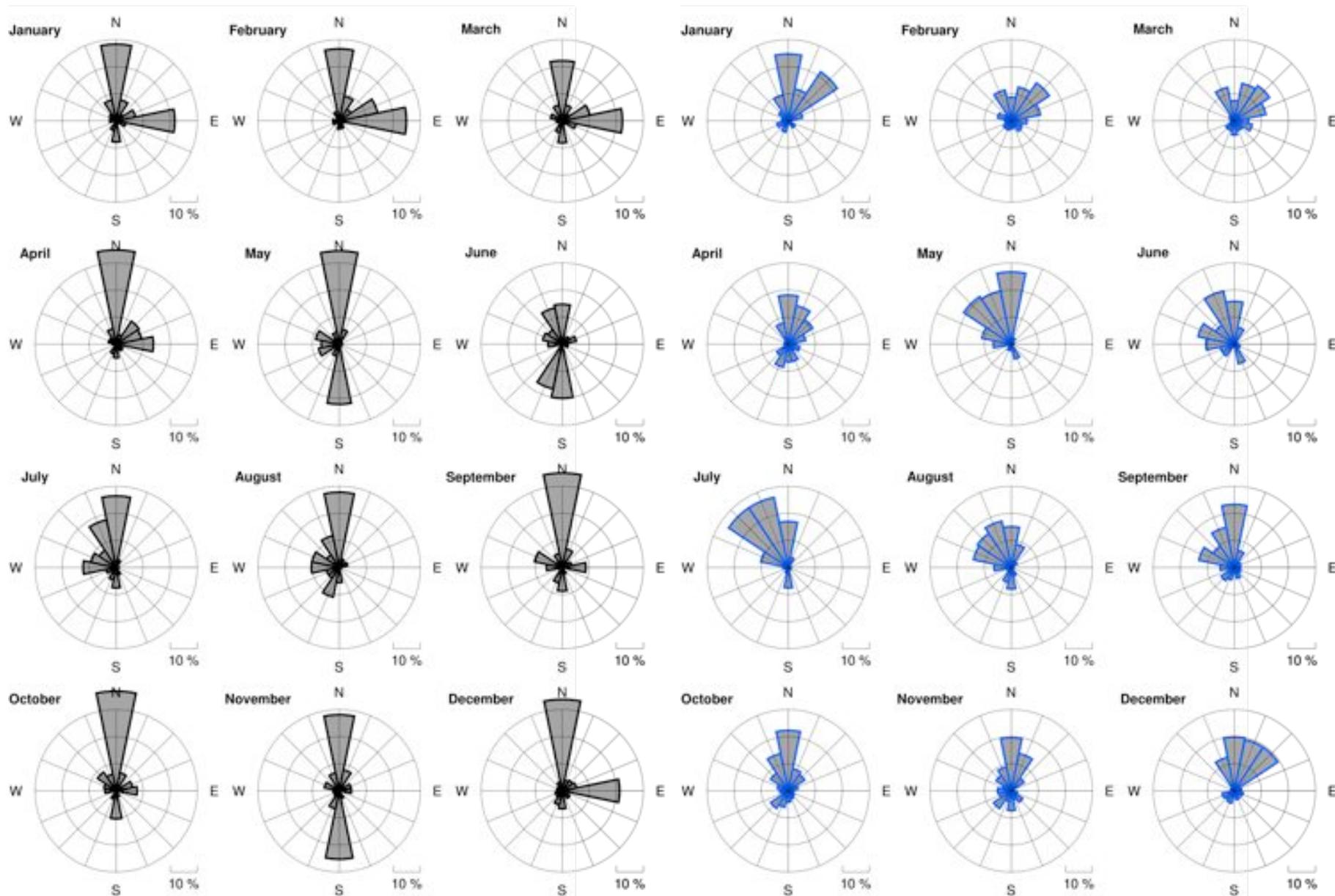


Figura III-45: Observado en SLPO (Potosí, Bolivia)

Figura III-46: Simulado en SLPO (Potosí, Bolivia)

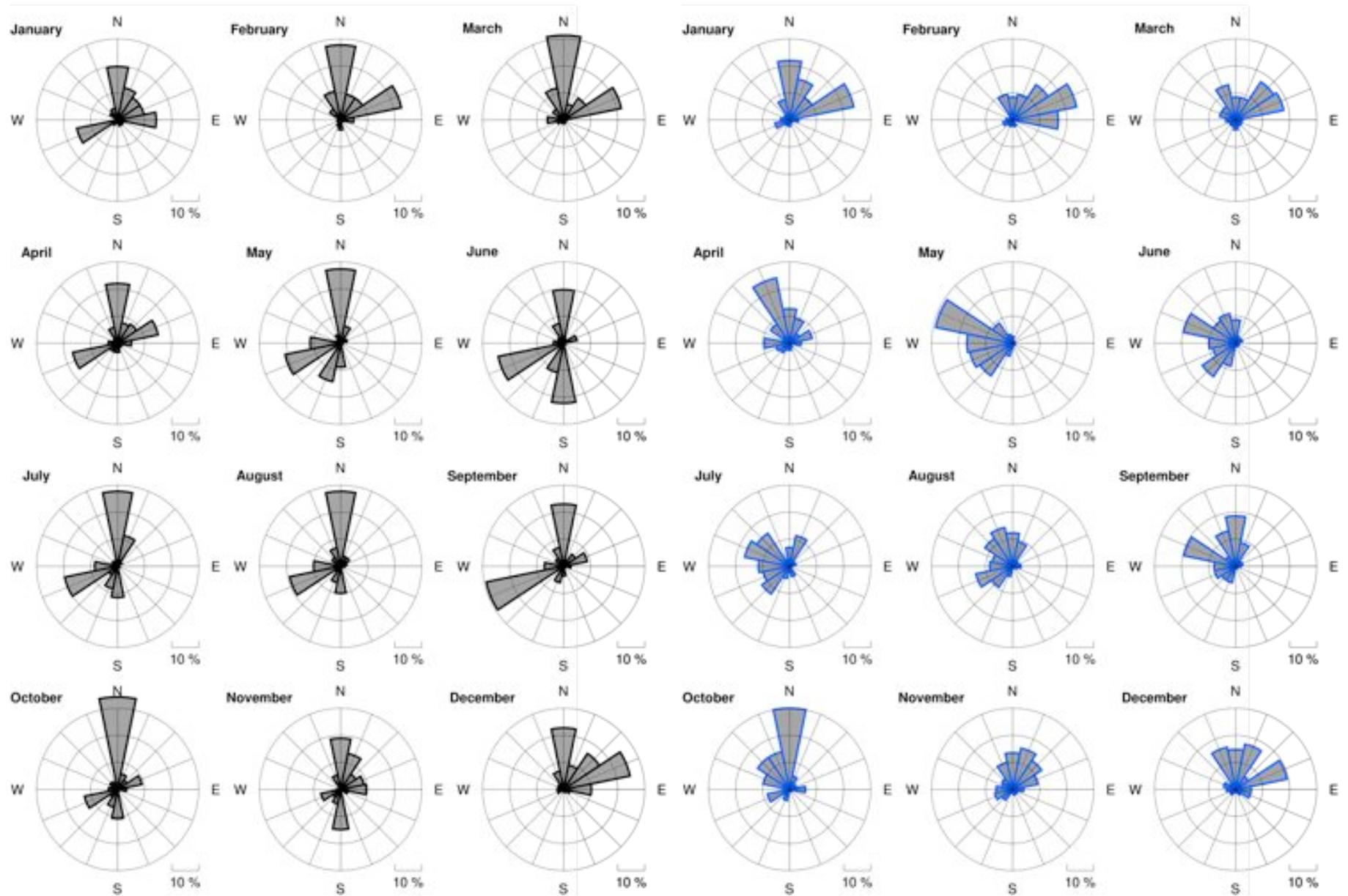


Figura III-47: Observado en SLPS (Puerto Suárez, Bolivia)

Figura III-48: Simulado en SLPS (Puerto Suárez, Bolivia)

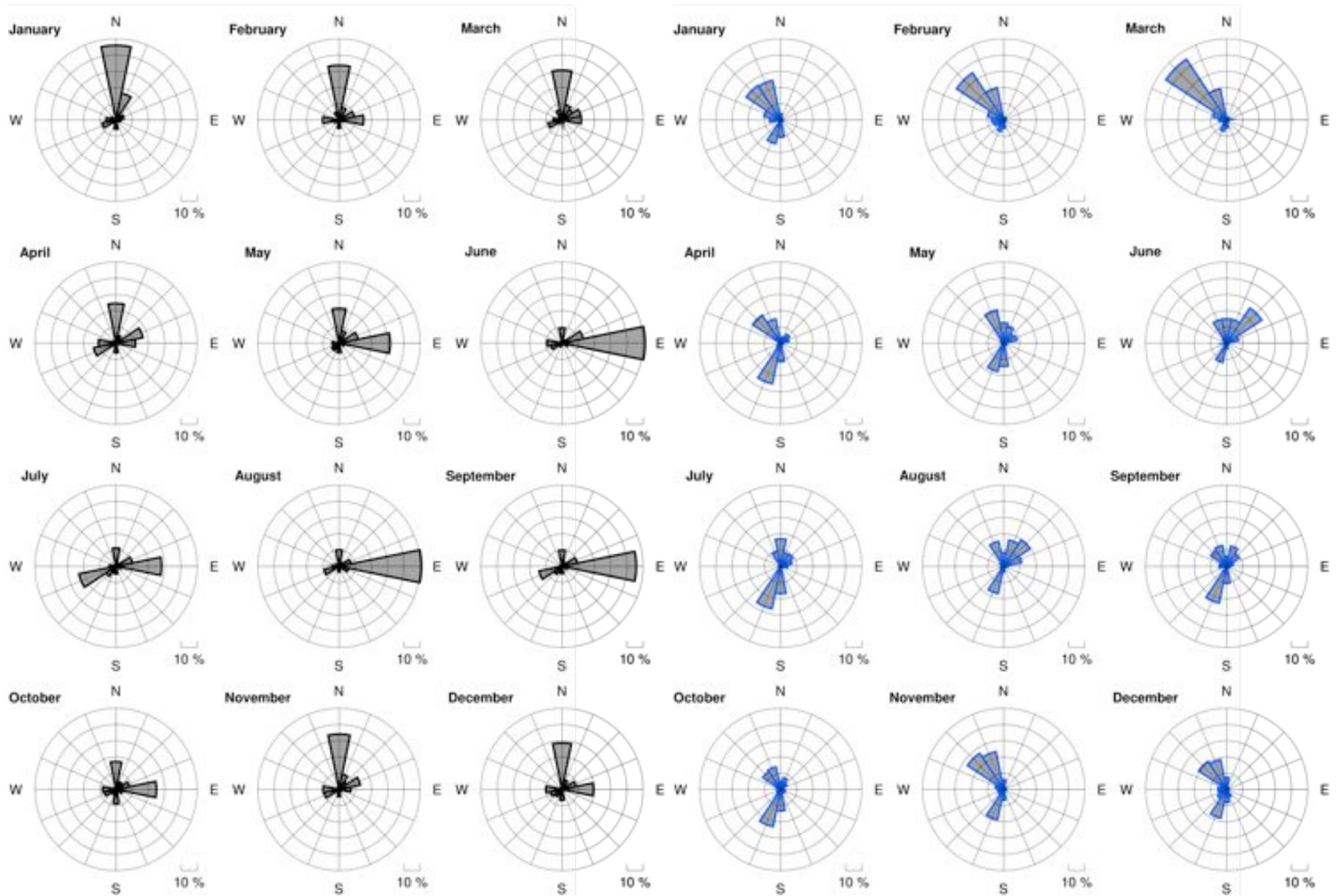


Figura III-49: Observado en SLRB (Robore, Bolivia)

Figura III-50: Simulado en SLRB (Robore, Bolivia)

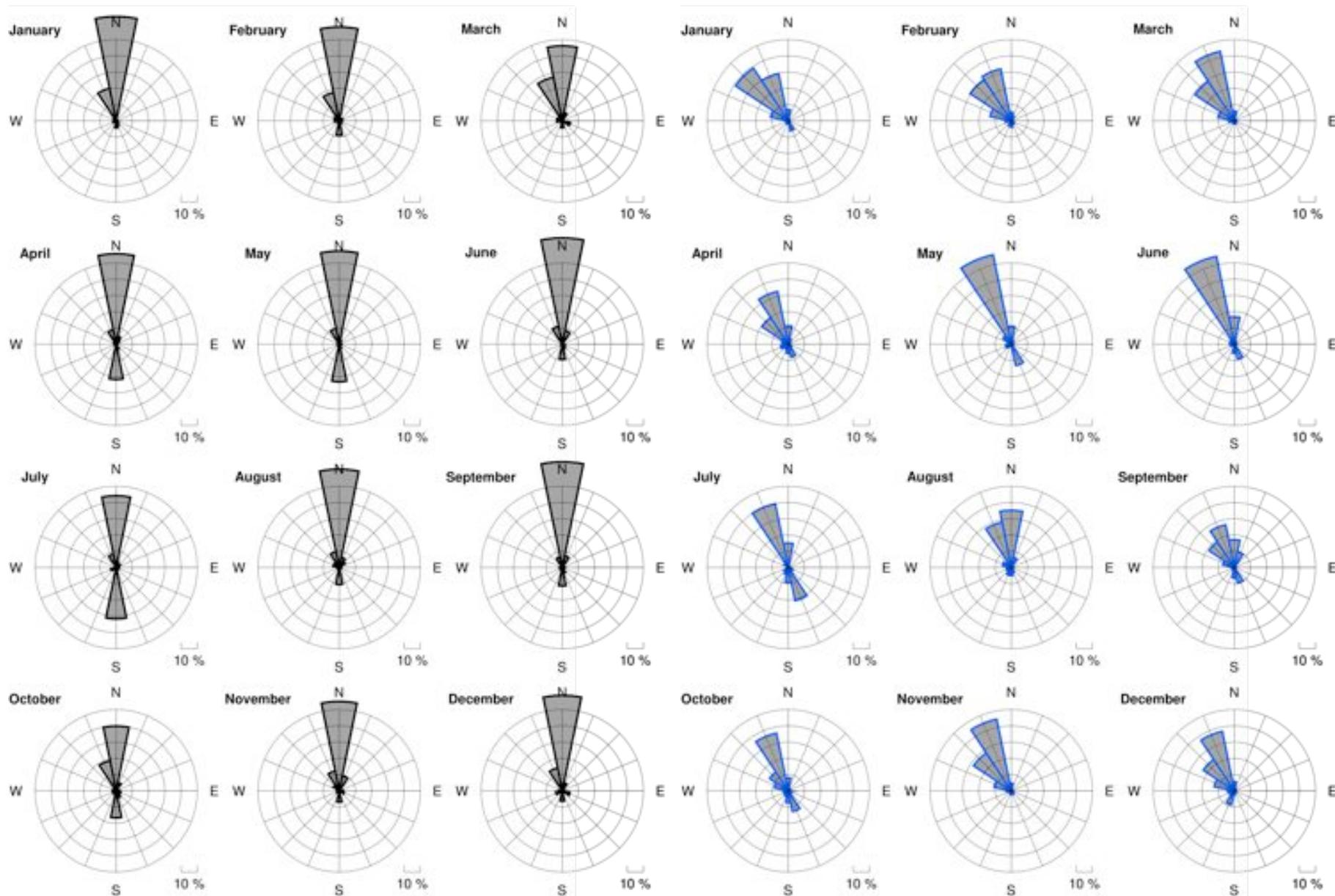


Figura III-51: Observado en SLRI (Riberalta, Bolivia)

Figura III-52: Simulado en SLRI (Riberalta, Bolivia)

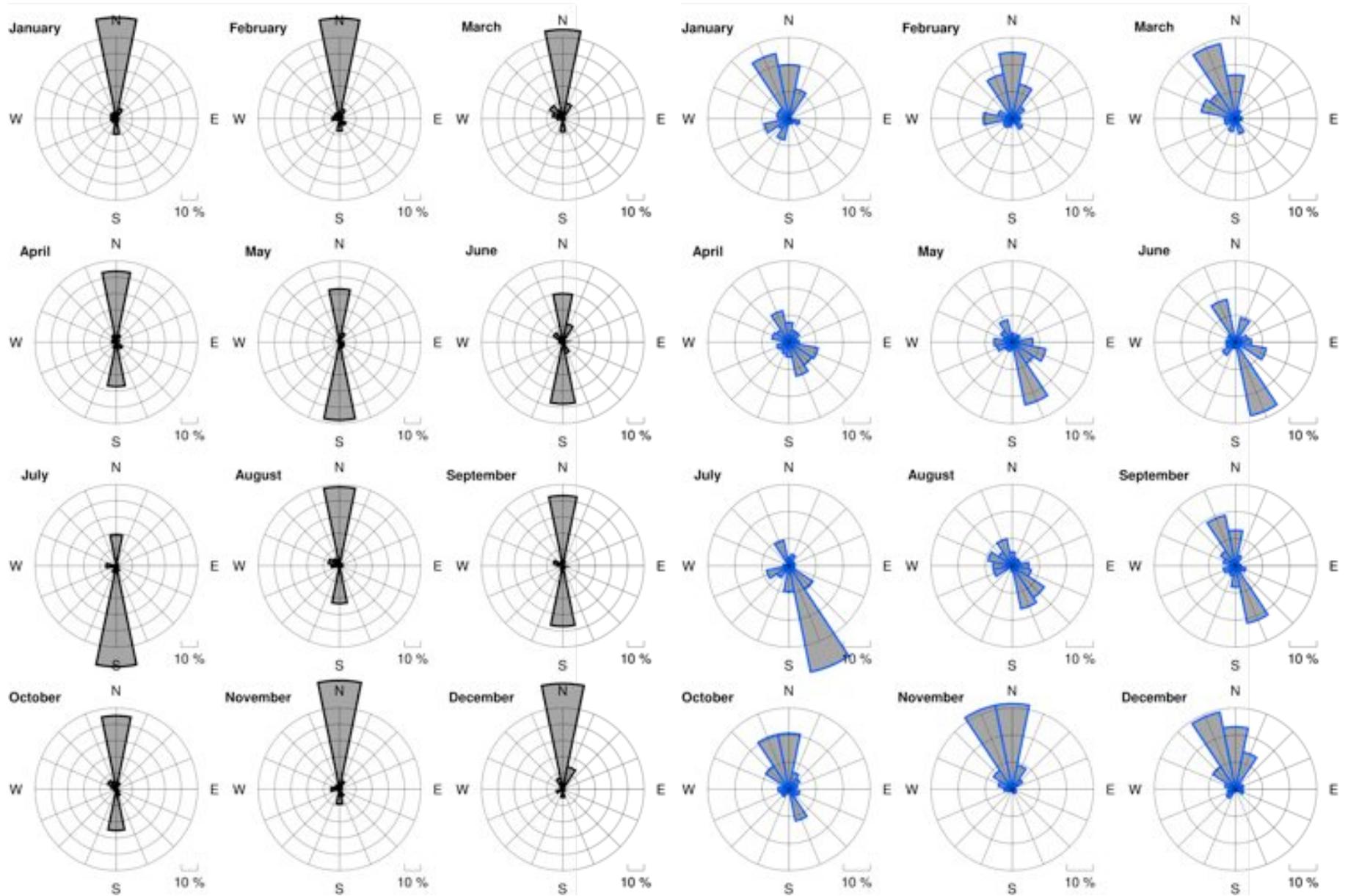


Figura III-53: Observado en SLRY (Reyes, Bolivia)

Figura III-54: Simulado en SLRY (Reyes, Bolivia)

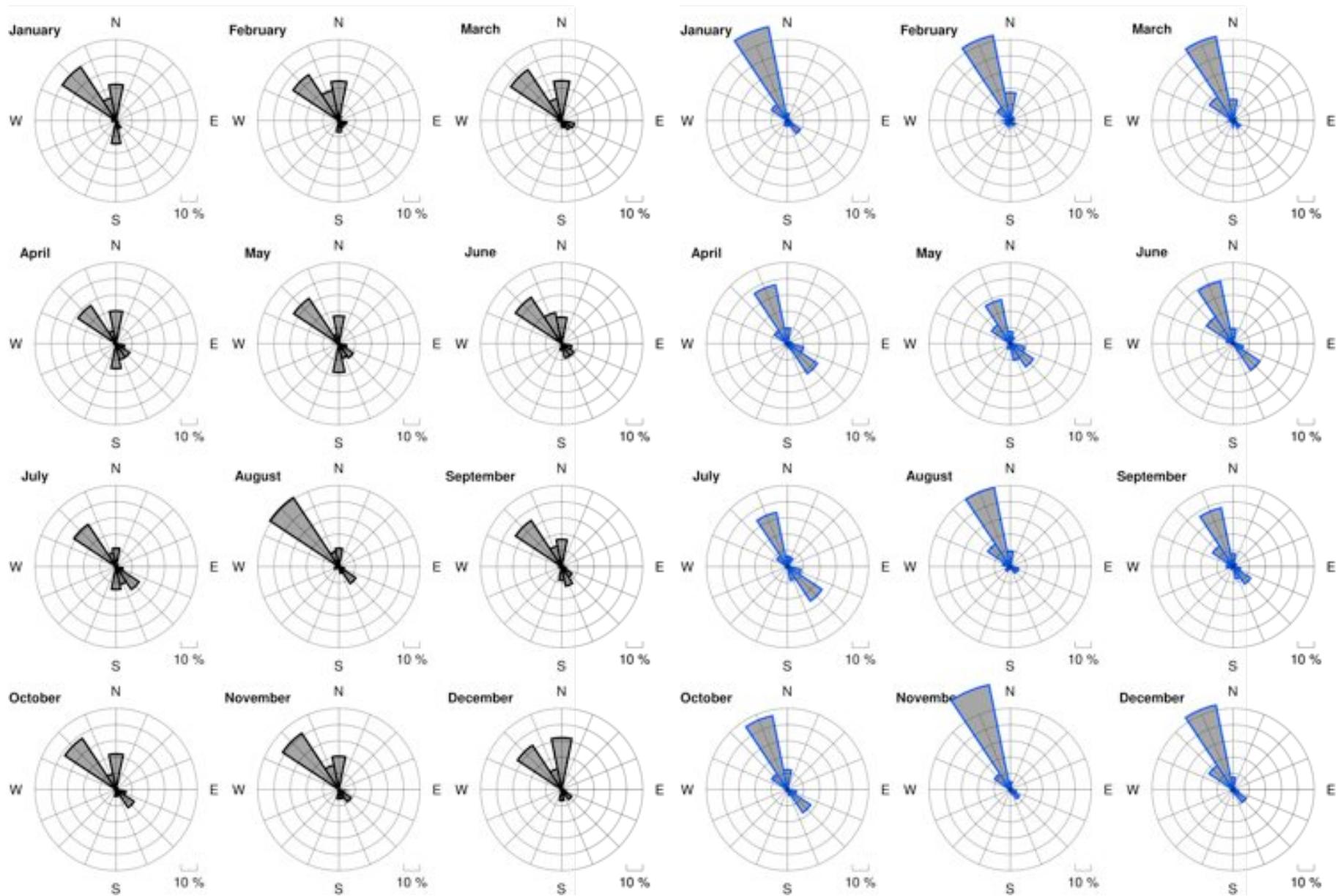


Figura III-55: Observado en SLSA (Santa Ana, Bolivia)

Figura III-56: Simulado en SLSA (Santa Ana, Bolivia)

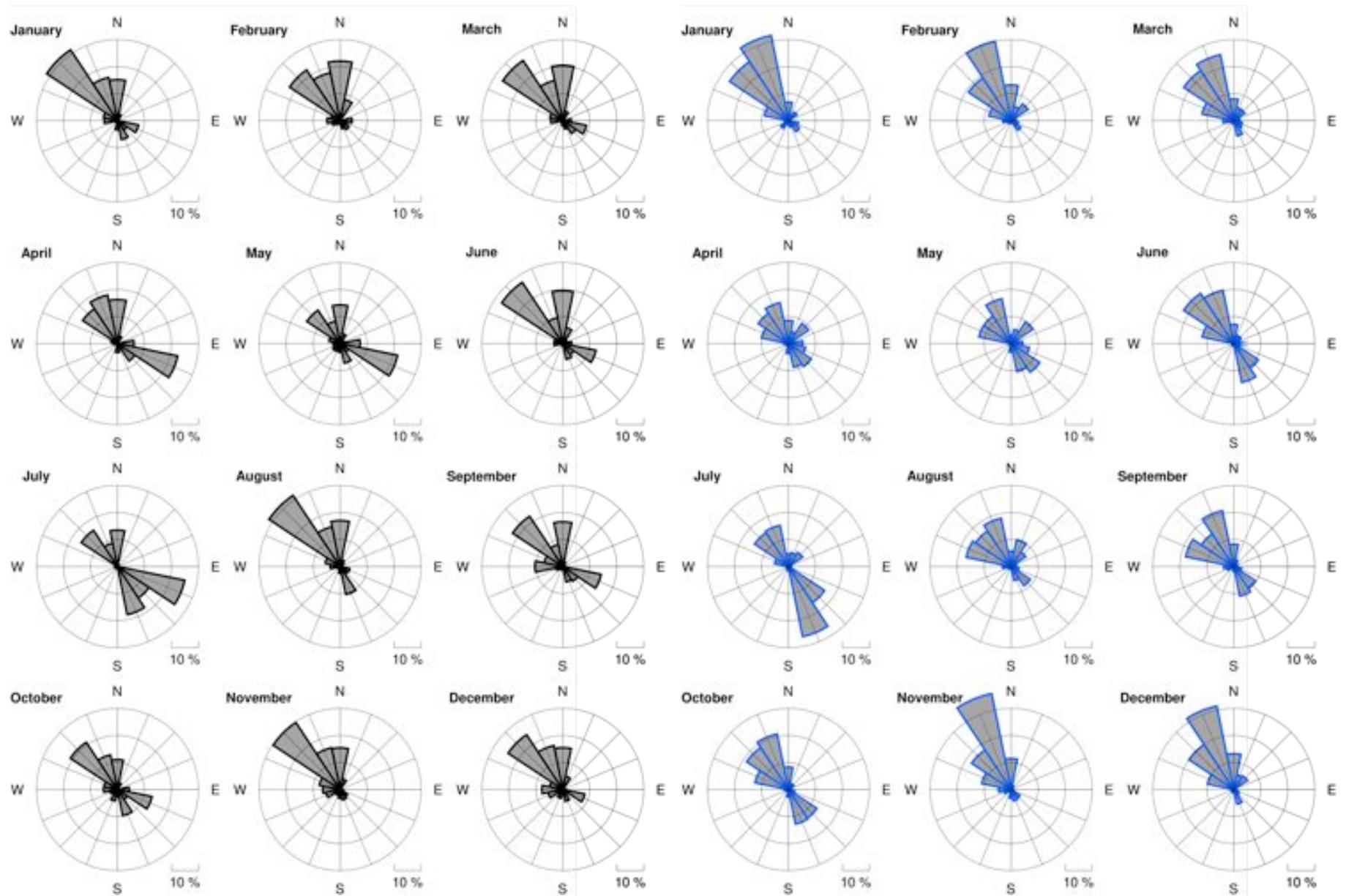


Figura III-57: Observado en SLSI (San Ignacio de Velasco, Bolivia)

Figura III-58: Simulado en SLSI (San Ignacio de Velasco, Bolivia)

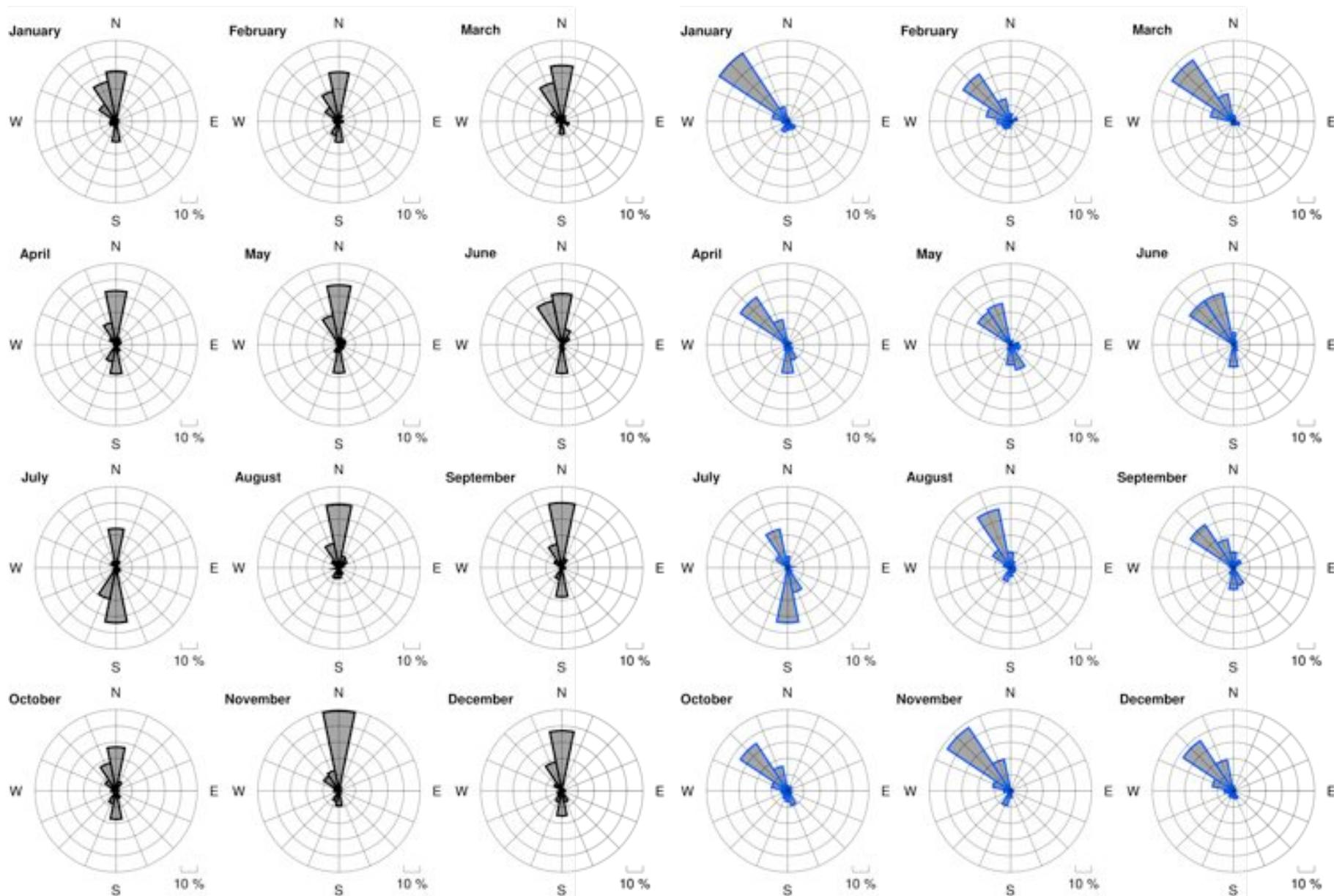


Figura III-59: Observado en SLSU (Sucre, Bolivia)

Figura III-60: Simulado en SLSU (Sucre, Bolivia)

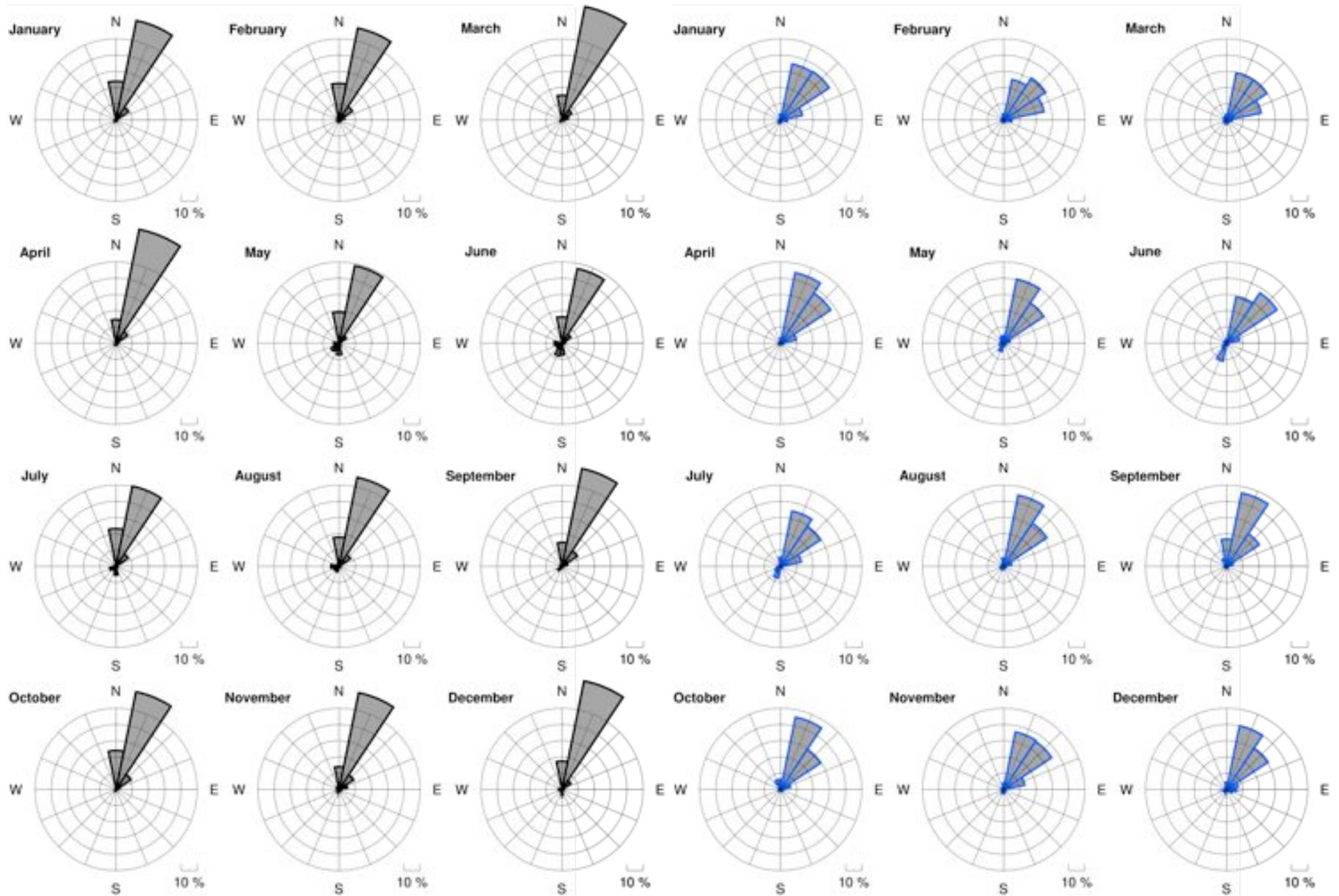


Figura III-61: Observado en SLTJ (Tarija, Bolivia)

Figura III-62: Simulado en SLTJ (Tarija, Bolivia)

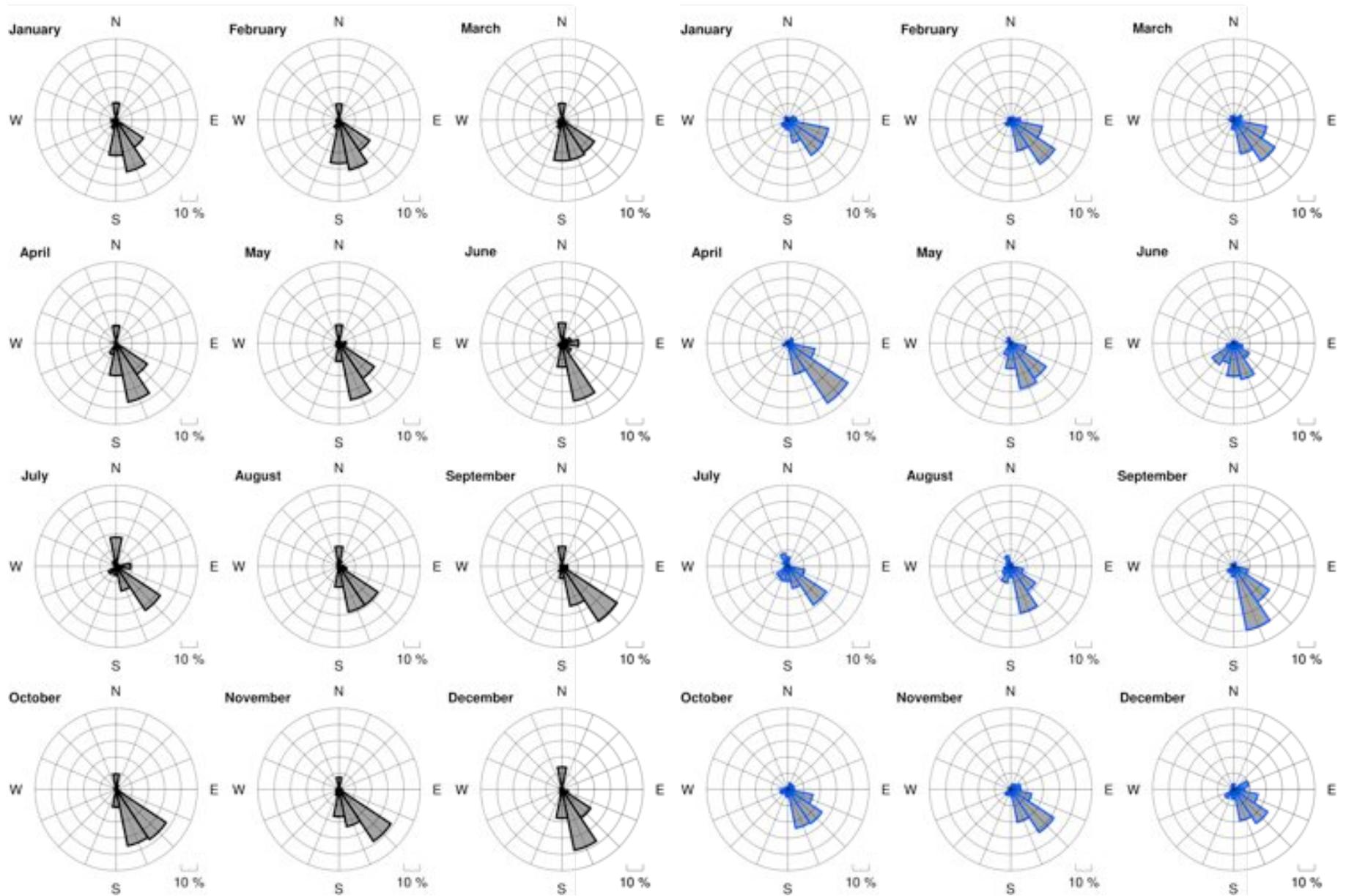


Figura III-63: Observado en SLVR (Viru Viru, Bolivia)

Figura III-64: Simulado en SLVR (Viru Viru, Bolivia)

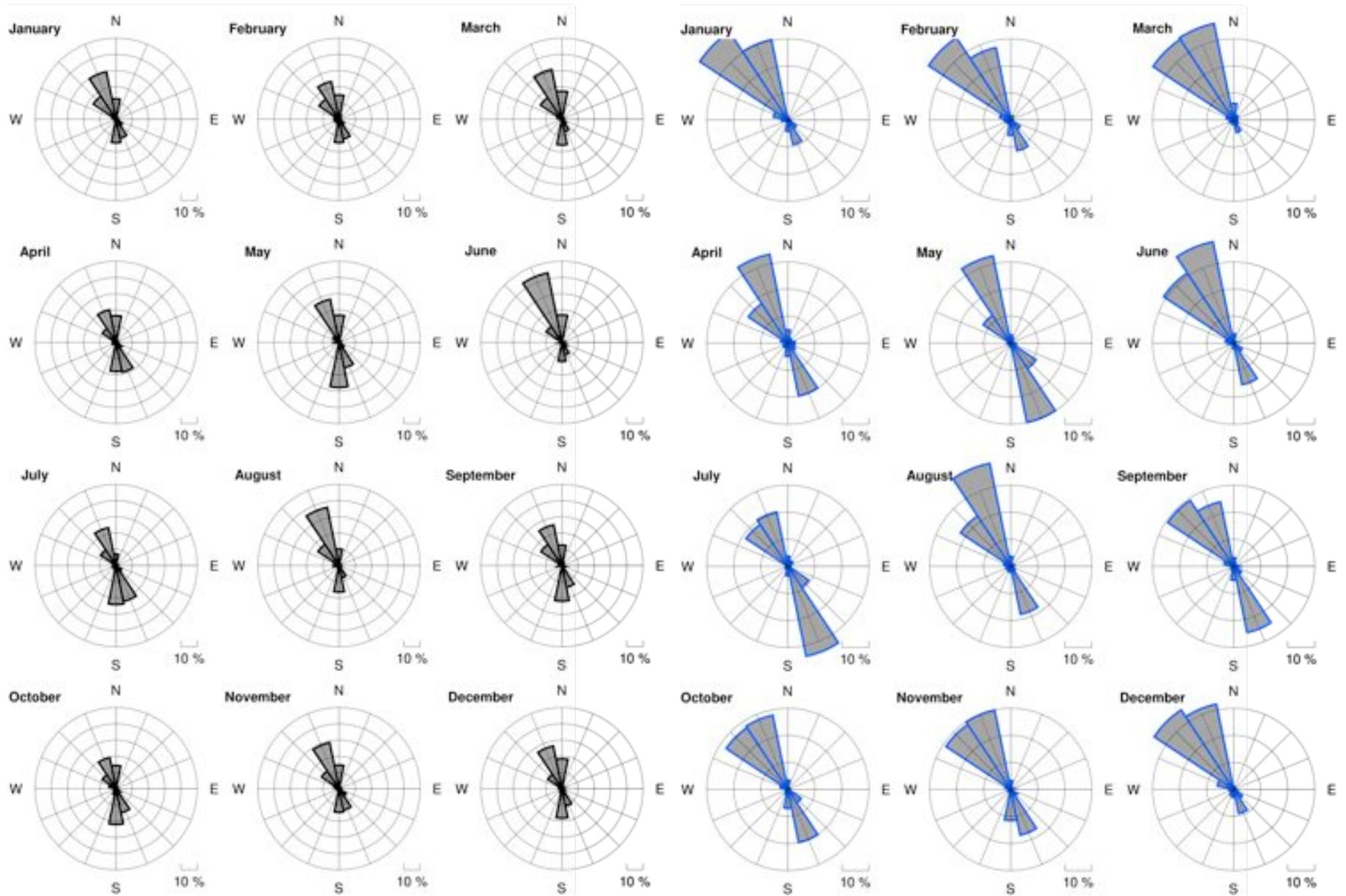


Figura III-65: Observado en SLYA (Yacuiba, Bolivia)

Figura III-66: Simulado en SLYA (Yacuiba, Bolivia)

