



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO  
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

**T E S I S**

**CARACTERIZACIÓN ESTACIONAL DE LAS VARIACIONES  
DIURNAS DEL CAMPO DE VIENTO EN EL  
ISTMO DE TEHUANTEPEC**

que para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta  
**Oswaldo René Ortega Vega**

**Tutor: Dr. Martín José Montero Martínez**  
**Cotutora: Dra. Rosario de Lourdes Romero Centeno**

**Jiutepec, Morelos, México**

**Enero de 2022**





Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimonial de la obra titulada “CARACTERIZACIÓN ESTACIONAL DE LAS VARIACIONES DIURNAS DEL CAMPO DE VIENTO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

**Oswaldo René Ortega Vega**

Jiutepec, Morelos, México. Enero de 2022.





## MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

Ante el Jurado integrado por:

Presidente: Dr. José Antonio Salinas Prieto  
Secretario: Dr. Julio Sergio Santana Sepúlveda  
Vocal 1: Dr. Martín José Montero Martínez  
Vocal 2: Dra. Rosario de Lourdes Romero Centeno  
Vocal 3: M.C. Roberto Ramírez Villa

Tutores de tesis

Dr. Martín José Montero Martínez  
Dra. Rosario de Lourdes Romero Centeno

Jiutepec, Morelos, México. Enero de 2022  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua



*“Ningún pensamiento es privado, todo lo que se piensa afecta al universo y determina su marcha. Por ello, la máxima responsabilidad humana es la felicidad. La felicidad de un ser humano determina la felicidad del mundo. La depresión de un ser humano es nefasta para el mundo. El amor entre dos seres determina la unidad del mundo. En cada ser humano existe la sabiduría de todos los universos. Oír la voz que en cada uno habita es ponerse en contacto con esa sabiduría. Ninguna experiencia debe someterse a duda. Todo es real y no existe parámetro de medida para la experiencia. El sueño es tan real como la vigilia. Lo imaginado no es tal, existe con la misma realidad que un percepto”*

*Jacobo Grinberg-Zylberbaum*

*A los seres de amor que me acompañan en esta vida y a los que contribuyen al progreso de la humanidad...*

# Agradecimientos

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México, por proporcionarme los medios y conocimientos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada que me permitió llevar a cabo el estudio de mi maestría.

A la Dra. Rosario de Lourdes Romero Centeno y al Dr. Martin José Montero Martínez, por la invaluable guía y apoyo que me brindaron durante la realización de esta tesis.

A mis sinodales Dr. José Salinas Prieto, Dr. Julio Santana Sepúlveda y M. en C. Roberto Ramírez Villa por las valiosas observaciones que permitieron mejorar mi trabajo de investigación.

A los docentes Dr. Indalecio Mendoza Uribe, Dr. David Ortega Gaucín y Dr. René Lobato Sánchez, por contribuir con mi formación profesional y alimentar mi curiosidad científica.

A mis colegas y amigos del IMTA, pero especialmente a Ángel Aldair Felipe Hernández por la amistad, la retroalimentación académica y los buenos momentos que pasamos en el instituto.

Al personal de la Subcoordinación del Posgrado IMTA por la orientación y facilidades prestadas durante mi estancia como alumno del programa MCTA.

# Índice general

Índice de figuras	I
Índice de tablas	IV
Resumen	V
<b>1. Fundamentos de la investigación</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivo general	5
1.4.1 Objetivos específicos	6
1.5 Marco Teórico	6
1.5.1 Regímenes de viento y variabilidad diurna	6
1.5.2 Vientos canalizados	7
1.5.3 Análisis de conglomerados	9
<b>2. Metodología</b>	<b>13</b>
2.1 Datos de reanálisis ERA-5	13
2.2 Promedios estacionales	15
2.3 Análisis de conglomerados	17
<b>3. Análisis de resultados</b>	<b>19</b>
3.1 Promedios estacionales del campo de viento	19
3.2 Análisis de la rapidez y dirección del viento a lo largo del IT	20
3.2.1 Sitios 1, 2, 3 y 4	20
3.2.2 Sitios 5, 6, 7, 8 y 9	24
3.3 Resultados del análisis de conglomerados	30
3.3.1 Sitio 1 (19.5°N 95°W)	30
3.3.2 Sitio 4 (17.5°N 95°W)	34
3.3.3 Sitio 6 (16.75°N 95°W)	37
3.3.4 Sitio 9 (15.5°N 95°W)	40
3.4 Caracterización estacional de la variabilidad diurna	44
3.4.1 Año típico (AT)	44
3.4.2 Invierno del año típico (AT-DEF)	46
3.4.3 Verano del año típico (AT-JJA)	48
<b>4. Conclusiones</b>	<b>51</b>
Referencias	55

# Índice de figuras

1.1.1	Mapa que muestra la ubicación del paso de Chivela (recuadro rojo) en el Istmo de Tehuantepec. Fuente del modelo digital de elevación: <i>Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec SRTM15+</i> . <a href="#">Tozer et al., 2019</a> .....	2
1.2.1	Capacidad instalada de energía eólica en México hasta el año 2018. Se esperaba que para el final de 2019 la capacidad instalada en el país creciera un 29%. <a href="#">AMDEE, 2018</a> .....	4
1.5.1	Representación esquemática de la canalización del viento a través de una brecha montañosa. Vista oblicua que muestra la evolución del aire frío en el espacio (a-c). Vista en planta que muestra las fuerzas correspondientes que actúan sobre una parcela de aire frío a medida que se forma la canalización del viento (a'-c'). Tomada de <a href="#">Stull (2017)</a> .....	8
1.5.2	Diferencias en la distancias Euclidiana (izquierda) y Manhattan (derecha).....	11
2.1.1	Extensión espacial del dominio de los datos del reanálisis ERA-5.....	14
2.2.1	Sitios seleccionados para el análisis del campo de viento en el IT. Los sitios en color rojo corresponden a los sitios que se encuentran en la entrada del IT y los sitios en azul a la parte central y salida del istmo. Fuente del modelo digital de elevación: <i>Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec SRTM15+</i> . <a href="#">Tozer et al., 2019</a> .....	16
2.3.1	Gráficas del método del Codo (izquierda) y de la Silueta (derecha) para encontrar el número óptimo de clústers a utilizar en cualquier algoritmo de AC particional. En el método del codo la línea punteada en color azul indica el número óptimo de conglomerados debido a que a partir de este punto (punto de inflexión) el WSS se estabiliza y su valor no disminuye de manera abrupta. Mientras que, en el método de la Silueta, la línea punteada en color azul indica el número óptimo de conglomerados debido a que ese punto corresponde al de mayor valor promedio del ancho de la silueta.....	17
3.1.1	Promedio del campo de viento (vectores) y de la MSLP (contornos en blanco) en el dominio (84°W-102°W, 8°N-28°N) para el invierno (DEF, izquierda) y verano (JJA, derecha). Las isobaras de la MSLP están a intervalos de 1 hPa, y en color se muestran los valores de rapidez del viento según la escala inferior.....	19
3.2.1	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para los sitios 1, 2, 3 y 4 considerando el AT. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.....	21

<b>3.2.2</b>	Rosas de viento para los sitios 1, 2, 3 y 4 considerando el AT. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).	<b>21</b>
<b>3.2.3</b>	Ciclos anuales promedio de la rapidez del viento para los sitios 1, 2, 3 y 4 considerando el AT. Las líneas punteadas horizontales hacen referencia al promedio anual en cada sitio.	<b>22</b>
<b>3.2.4</b>	Ciclos diurnos mensuales promedio de la rapidez del viento para los sitios: 1 (superior izquierda), 2 (superior derecha), 3 (inferior izquierda) y 4 (inferior derecha) considerando el AT. En el eje vertical se muestra la hora UTC (Tiempo Universal Coordinado) y la hora local (UTC-6) entre paréntesis.	<b>23</b>
<b>3.2.5</b>	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para los sitios 5, 6, 7, 8 y 9 considerando el AT. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.	<b>25</b>
<b>3.2.6</b>	Rosas de viento para los sitios 5, 6, 7, 8 y 9 considerando el AT. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).	<b>26</b>
<b>3.2.7</b>	Ciclos anuales promedio de la rapidez del viento para los sitios 5, 6, 7, 8 y 9 considerando los años neutros del periodo 1979-2019. Las líneas punteadas horizontales hacen referencia al promedio anual en cada sitio.	<b>27</b>
<b>3.2.8</b>	Ciclos diurnos mensuales promedio de la rapidez del viento para los sitios 5 (fila 1, izquierda), 6 (fila 1, derecha), 7 (fila 2, izquierda), 8 (fila 2, derecha) y 9 (fila 3) considerando el AT. En el eje vertical se muestra la hora UTC (Tiempo Universal Coordinado) y la hora local (UTC-6) entre paréntesis.	<b>28</b>
<b>3.3.1</b>	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para el AT (arriba), el AT-DEF (centro) y el AT-JJA (abajo) del sitio 1. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.	<b>31</b>
<b>3.3.2</b>	Diagramas de dispersión de las componentes del viento para el AT (izquierda), AT-DEF (centro) y AT-JJA (derecha) y conglomerados obtenidos a partir del AC para el sitio 1.	<b>31</b>
<b>3.3.3</b>	Rosas de viento de los conglomerados obtenidos a partir del AC: AT (columna 1), AT-DEF (columna 2) y AT-JJA (columna 3), para el sitio 1. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).	<b>33</b>
<b>3.3.4</b>	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para el AT (arriba), el AT-DEF (centro) y el AT-JJA (abajo) del sitio 4. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.	<b>34</b>



3.3.5	Diagramas de dispersión de las componentes del viento para el AT (izquierda), AT-DEF (centro) y AT-JJA (derecha) y conglomerados obtenidos a partir del AC para el sitio 4.....	35
3.3.6	Rosas de viento de los conglomerados obtenidos a partir del AC: AT (columna 1), AT-DEF (columna 2) y AT-JJA (columna 3), para el sitio 4. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).....	36
3.3.7	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para el AT (arriba), el AT-DEF (centro) y el AT-JJA (abajo) del sitio 6. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.....	37
3.3.8	Diagramas de dispersión de las componentes del viento para el AT (izquierda), AT-DEF (centro) y AT-JJA (derecha) y conglomerados obtenidos a partir del AC para el sitio 6.....	38
3.3.9	Rosas de viento de los conglomerados obtenidos a partir del AC: AT (columna 1), AT-DEF (columna 2) y AT-JJA (columna 3), para el sitio 6. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).....	39
3.3.10	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para el AT (arriba), el AT-DEF (centro) y el AT-JJA (abajo) del sitio 9. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.....	41
3.3.11	Diagramas de dispersión de las componentes del viento para el AT (izquierda), AT-DEF (centro) y AT-JJA (derecha) y conglomerados obtenidos a partir del AC para el sitio 9.....	41
3.3.12	Rosas de viento de los conglomerados del AC: AT (columna 1), AT-DEF (columna 2) y AT-JJA (columna 3), para el sitio 9. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).....	43

# Índice de tablas

- 3.3.1** Estadística básica (número de datos, media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo) de los 3 conglomerados del AC para el AT (arriba), AT-DEF (centro) Y AT-JJA (abajo) del sitio 1. Las unidades de los estadísticos de la rapidez del viento son m/s.....**32**
- 3.3.2** Estadística básica (número de datos, media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo) de los 3 conglomerados del AC para el AT (arriba), AT-DEF (centro) Y AT-JJA (abajo) del sitio 4. Las unidades de los estadísticos de la rapidez del viento son m/s.....**35**
- 3.3.3** Estadística básica (número de datos, media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo) de los 3 conglomerados del AC para el AT (arriba), AT-DEF (centro) Y AT-JJA (abajo) del sitio 6. Las unidades de los estadísticos de la rapidez del viento son m/s.....**38**
- 3.3.4** Estadística básica (número de datos, media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo) de los 3 conglomerados del AC para el AT (arriba), AT-DEF (centro) Y AT-JJA (abajo) del sitio 9. Las unidades de los estadísticos de la rapidez del viento son m/s.....**42**
- 3.4.1** Mapas de calor de las distribuciones horarias (expresadas en % de cero a cien) de los conglomerados 1, 2 y 3 para el año típico (AT). En la parte superior se muestra la hora UTC y la hora local (HL) UTC-6.....**45**
- 3.4.2** Mapas de calor de las distribuciones horarias (expresadas en % de cero a cien) de los conglomerados 1, 2 y 3 para el invierno del año típico (AT-DEF). En la parte superior se muestra la hora UTC y la hora local (HL) UTC-6.....**47**
- 3.4.3** Mapas de calor de las distribuciones horarias (expresadas en % de cero a cien) de los conglomerados 1, 2 y 3 para el verano del año típico (AT-JJA). En la parte superior se muestra la hora UTC y la hora local (HL) UTC-6.....**49**

# Resumen

La presente investigación se centra en realizar una caracterización estacional de las variaciones diurnas del campo de viento en la región del Istmo de Tehuantepec. Se utilizaron los datos de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento a 10 m sobre la superficie, y de la presión reducida al nivel medio del mar, del reanálisis atmosférico ERA-5, del Centro Europeo de Predicción a Mediano Plazo (ECMWF, en inglés), en el periodo 1979-2019, para un dominio extendido cuyas coordenadas van de 8°N a 28°N y de 84°W a 102°W, el cual incluye la región de estudio. Para llevar a cabo el objetivo principal de esta tesis, se analizó el comportamiento climatológico del campo de viento en 9 sitios a lo largo del Istmo de Tehuantepec mediante rosas de viento, distribuciones de frecuencias, ciclos anuales y ciclos diurnos mensuales promedio. Los resultados muestran las diferencias que existen en las regiones al norte, centro y sur del llamado paso de Chivela, así como en las regiones oceánicas en ambos extremos del istmo.

Adicionalmente, se caracterizó la variabilidad diurna del campo de viento a lo largo del Istmo de Tehuantepec, para el invierno y el verano, mediante un análisis de conglomerados de la rapidez del viento promedio horaria. El análisis de conglomerados permitió establecer una división de los datos del viento en tres grupos, tanto para el año típico como para las temporadas de invierno y verano, en los sitios elegidos para el análisis. Los conglomerados se relacionaron con la magnitud de los vientos y se determinaron las direcciones predominantes para cada uno de ellos. Finalmente, se establecieron los horarios preferentes de ocurrencia de los vientos de cada uno de los conglomerados de todos los sitios analizados, para el año típico, invierno y verano.

**Palabras clave:** caracterización estacional, campo de viento, variabilidad diurna, Istmo de Tehuantepec, análisis de conglomerados.

# Capítulo 1

## Fundamentos de la investigación

*Niebla matinal sobre  
una montaña sin nombre.*  
BASHŌ

### 1.1 Antecedentes

El Istmo de Tehuantepec (IT) es una región estrecha de México, comprendida entre los 94° y 96° W, con una longitud de 200 km (distancia entre el Golfo de México y el Océano Pacífico); limita al norte con la costa veracruzana y la Sierra de los Tuxtlas, al este con la Sierra de Chiapas, al sur con el litoral de Oaxaca, y al oeste con la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Oaxaca. Un rasgo topográfico sobresaliente de la región es el paso de Chivela que se ubica en la parte central del istmo, con una elevación promedio de 250 m.s.n.m. (fig. 1.1.1).

En esta región se generan vientos locales intensos, que ocurren con mayor frecuencia durante el invierno, conocidos en la literatura como Tehuantepequeros (Parmenter, 1970), Tehuanos (Trasviña et al., 1995), Nortes (Magaña et al., 1999), o jet de Tehuantepec (Romero-Centeno et al., 2007; Karnauskas et al., 2008). Tales vientos se generan como resultado de un gradiente de presión notable entre los golfos de México (GM) y Tehuantepec (GT), debido a la intrusión hacia el GM de sistemas anticiclónicos formados sobre las grandes llanuras de Norteamérica y que se desplazan en dirección sureste (cruzando los Estados Unidos y algunos llegando hasta la bahía de Campeche) (Schultz et al., 1998; Chelton et al., 2000; Romero-Centeno et al., 2003). Este gradiente de presión produce fuertes vientos a través del paso de Chivela, con dirección de norte a sur y magnitudes que a menudo superan los 20 m/s (72 km/h) con rachas de hasta 30 m/s

(108 km/h), cuya duración puede oscilar entre algunas horas a pocos días, generalmente seguidos de periodos de vientos ligeros.

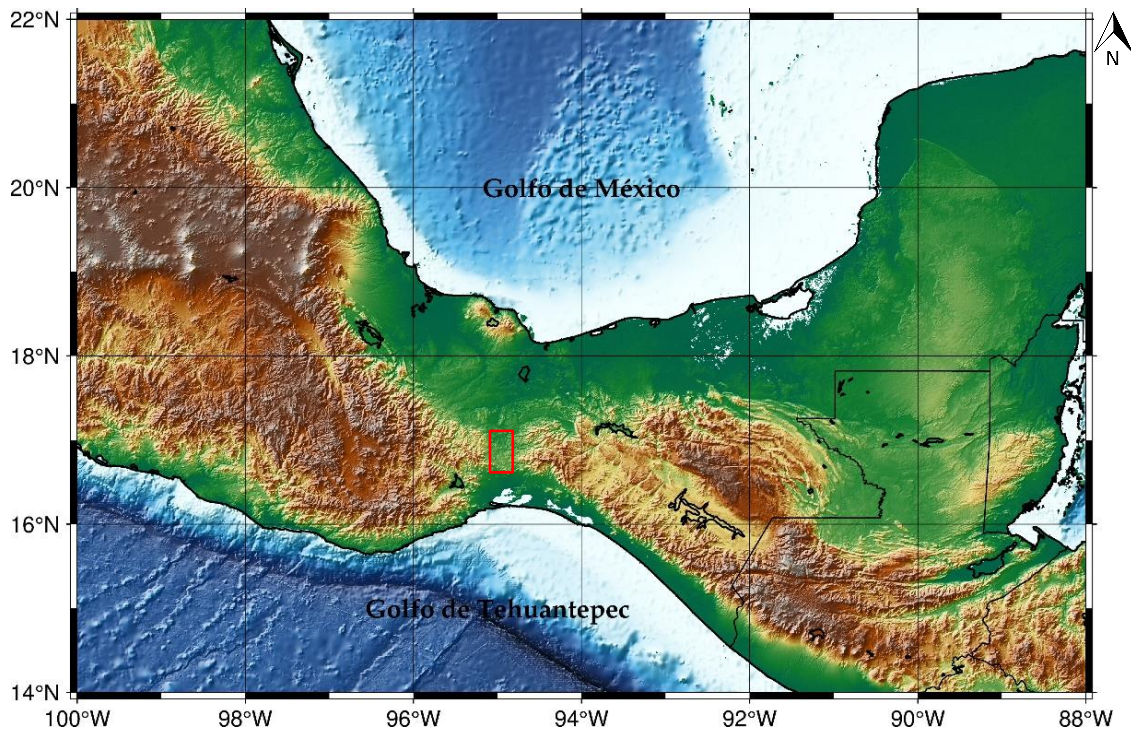


Fig. 1.1.1: Mapa que muestra la ubicación del paso de Chivela (recuadro rojo) en el Istmo de Tehuantepec. Fuente del modelo digital de elevación: *Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec SRTM15+*. [Tozer et al., 2019](#).

Aunque los vientos tehuanos son producidos por un gradiente de presión, no son vientos geostroficados debido a que su dirección se encuentra limitada por la topografía local. Una vez que los vientos fluyen hacia afuera del paso de Chivela (en dirección al GT), ya no se encuentran influenciados por la topografía y su trayectoria es predominantemente inercial, adoptando un giro anticiclónico hacia el oeste después de abandonar la costa ([Schultz et al., 1998](#); [Bourassa et al., 1999](#)). A medida que la corriente de vientos se aleja del litoral del GT se observa un patrón simétrico en forma de abanico ([Trasviña et al., 1995](#); [Steenburgh et al., 1998](#)), que conforme se aleja de la costa, de forma gradual, se equilibra geostroficamente ([Chelton et al., 2000](#)).

Adicionalmente al paso de Chivela, existen otros dos pasos en Centroamérica a través de los cuales se generan vientos intensos en superficie, conocidos como los jets de Papagayo y Panamá ([Chelton et al., 2000](#); [Xu et al., 2005](#)). Estos se forman gracias a los vientos alisios provenientes del mar Caribe que se canalizan a través de las brechas de

Papagayo y Panamá. Dichos jets, incluido el de Tehuantepec, influyen en la región noreste del Océano Pacífico tropical de diversas formas: modulando el ciclo anual de la temperatura superficial del mar (TSM) (Sun & Yu, 2006), contribuyendo a una mayor cantidad de mezcla turbulenta (Liang et al., 2009), controlando la circulación oceánica regional (Kessler, 2006), influenciando la posición de la zona de convergencia intertropical (Xu et al., 2005) y desarrollando perturbaciones atmosféricas (Holbach & Bourassa, 2014).

Para el caso particular de los vientos tehuanos existen diversos estudios, entre ellos la investigación realizada por Romero-Centeno et al. (2003) quienes utilizaron un modelo estadístico para reconstruir el jet de Tehuantepec durante el periodo 1964-1995, encontrando cierta influencia del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) sobre el promedio mensual de la rapidez del viento, siendo mayor en general durante los años Niño (fase cálida) en comparación con los años Niña (fase fría). Además, encontraron que durante los años Niña la rapidez del viento es significativamente más débil que en años neutros en febrero, marzo, de junio a septiembre y en noviembre, e identificaron que el porcentaje de ocurrencia de vientos del norte es significativamente menor, en comparación con los años neutros, desde junio hasta noviembre. Por su parte, Karnauskas et al. (2008) realizaron un análisis de regresión lineal de la TSM para las regiones de los jets de Tehuantepec y Papagayo, y concluyeron que la variabilidad interanual del jet de Papagayo se encuentra claramente influenciada por ENOS, mientras que el jet de Tehuantepec parece estar dominado por una señal decadal posiblemente asociada con el tripolo del Atlántico. El tripolo del Atlántico es el modo dominante de la variabilidad de la TSM en el Atlántico tropical y su periodo oscila entre los 12 y 16 años. De manera complementaria, Alexander et al. (2012) examinaron la influencia de ENOS en el noreste del Océano Pacífico tropical durante el periodo 1979-2009 concluyendo que, durante el invierno boreal cuando ENOS alcanza su punto máximo, el jet de Tehuantepec (así como el de Panamá y el de Papagayo) exhibe solamente diferencias muy pequeñas entre eventos de El Niño y la Niña. Desde otra perspectiva, Yang et al. (2017) realizaron un análisis de funciones empíricas ortogonales para explicar la variabilidad interanual de los jets de Papagayo, Panamá y Tehuantepec, concluyendo que la componente principal de los jets constituye una anomalía en la circulación de Walker entre el Océano Pacífico y el

Atlántico, lo que implica que el efecto orográfico podría afectar sustancialmente al viento superficial bajo la anomalía de circulación mencionada.

## 1.2 Planteamiento del problema

Desde la perspectiva de las ciencias atmosféricas, la región del istmo y GT es de gran interés y peculiaridad por los diversos fenómenos meteorológicos que ocurren en esta zona (nortes, ciclogénesis, vientos canalizados, etc.). La presente investigación se centra en analizar la variabilidad diurna del campo de viento en el IT, que influye de manera positiva y negativa a la sociedad y economía de la zona; por una parte, constituye una extraordinaria fuente de energía alternativa, ya que de acuerdo con la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE, 2018), en la actualidad la región del IT tiene la mayor capacidad instalada de generación eólica en México, con 2,756 MW distribuidos en los 24 parques eólicos de la región (fig. 1.2.1).

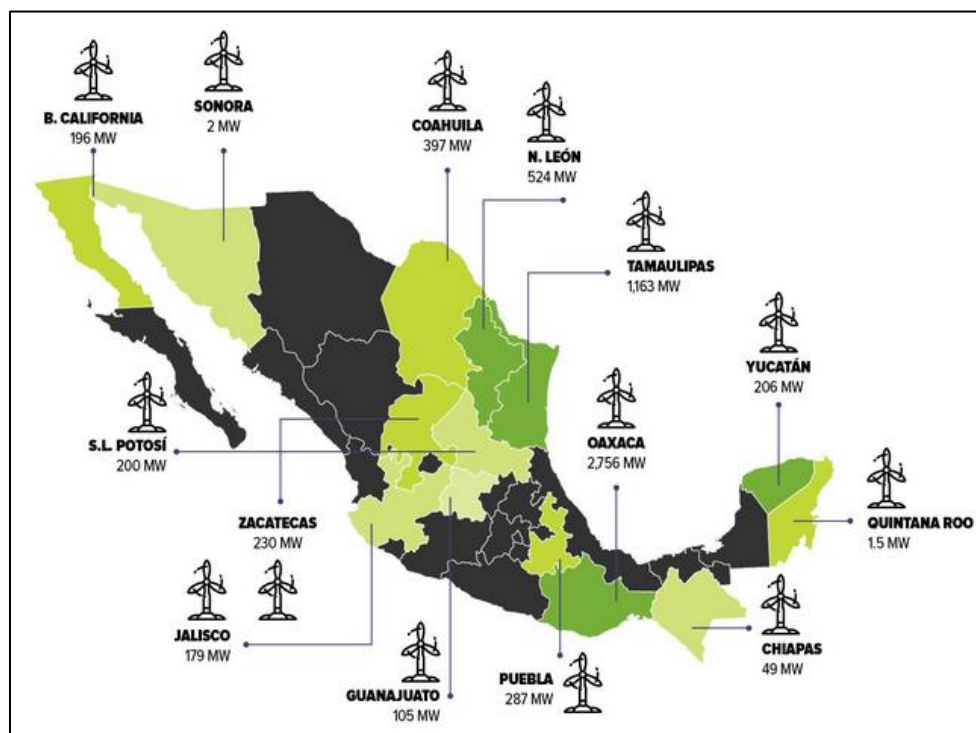


Fig. 1.2.1: Capacidad instalada de energía eólica en México hasta el año 2018. Se esperaba que para el final de 2019 la capacidad instalada en el país creciera un 29%. AMDEE, 2018.

Por otra parte, los eventos de vientos tehuanos extremos influyen negativamente en la región de varias formas: daños en infraestructura estratégica (puertos, ferrocarriles,

viviendas, torres de alta tensión), volcando tráileres y coches en las carreteras (p.ej. en la Ventosa), afectando las operaciones de los parques eólicos y de la navegación marítima, etc.

### 1.3 Justificación

Una de las principales conclusiones a las que han llegado los diversos autores que han investigado la variabilidad del campo de viento en el IT en distintas escalas de tiempo (interanual, estacional, etc.) (Schultz et al., 1998; Steenburgh et al., 1998; Romero-Centeno et al., 2003, 2007; Karneckas et al., 2008; Brennan et al., 2010; Yang et al., 2017) es que el ciclo anual de la rapidez del viento en la salida del IT posee una distribución bimodal, es decir, presenta un máximo en invierno, principalmente debido al mecanismo explicado al inicio de este capítulo, y un máximo relativo en el verano (de menor intensidad que su versión invernal), que sigue siendo un tema de investigación. La variabilidad diurna del campo de viento en el IT ha sido poco explorada a pesar de su gran importancia, ya que el cambio de la temperatura entre la tierra y el mar a lo largo del día influye en la circulación local del viento (brisas), dando lugar a cambios drásticos de rapidez y dirección del viento (Pérez-Foguet, 2014). Además del punto anterior, el estudio de la variabilidad diurna del campo de viento en el IT es importante porque aportaría conocimiento para:

- Entender el rol de la orografía compleja en la circulación local del campo de viento.
- Caracterizar el comportamiento estacional de la variabilidad diurna del campo de viento.
- Entender mejor los procesos dinámicos en las circulaciones locales a lo largo del día para el verano e invierno.

### 1.4 Objetivo general

Obtener una caracterización estacional de las variaciones diurnas del campo de viento en la región del Istmo de Tehuantepec.



### 1.4.1 Objetivos específicos

- Obtener y analizar los campos promedio estacionales del viento y de la presión reducida al nivel medio del mar en un dominio extendido que incluya a la región del IT.
- Analizar el comportamiento del campo de viento a lo largo del IT mediante rosas de viento, distribuciones de frecuencias, ciclos anuales y ciclos diurnos mensuales promedio.
- Identificar los regímenes del campo de viento en la región de estudio para el invierno y verano mediante un análisis de conglomerados de la rapidez del viento promedio horaria.
- Caracterizar las variaciones diurnas del campo de viento a lo largo del IT durante el invierno y verano.

## 1.5 Marco Teórico

### 1.5.1 Regímenes de viento y variabilidad diurna

Los regímenes de viento caracterizan el comportamiento del campo de viento en una región determinada por lo que identificar y analizar dichos regímenes es de vital interés para los estudios de calidad del aire (Darby, 2005; Ratto et al., 2010) y el ámbito de la energía renovable (Gómez-Muñoz & Porta-Gandara, 2002; Jiménez et al., 2008; Thomas et al., 2020). El estudio específico de regímenes del campo de viento en regiones de orografía compleja se ha abordado en diversos estudios previos (Kastenduch & Kaufmann, 1997; Kaufmann & Whiteman, 1999; Drobinski et al., 2003; Ludwig et al., 2004; Beaver & Palazoglu, 2006; Burlando et al., 2008; Jiménez et al., 2008, 2009). En regiones de orografía compleja (como en el IT) el flujo del viento se modifica en un amplio rango de escalas dependiendo de la naturaleza del forzamiento que puede ser de origen mecánico o térmico (Drobinski et al., 2003). Whiteman & Doran, (1993) quienes investigaron la relación entre la escala sinóptica y el flujo al interior de un valle, sugieren que el forzamiento térmico se produce cuando el forzante dinámico de gran escala es débil. En una escala más pequeña, las circulaciones puramente influenciadas por

contrastes térmicos se generan en ausencia de algún forzante de gran escala (Kaufmann & Weber, 1998). Durante la noche cuando el cielo se encuentra despejado, las superficies de los valles y el aire en contacto con las mismas se enfrían; este aire frío y denso, por el efecto de la gravedad fluye en dirección hacia el fondo del valle generando así un fenómeno llamado brisa de montaña. Por otra parte, durante el día, el aire que está en contacto con las laderas de las montañas que son calentadas por el sol, se calienta, lo que se traduce en la disminución de su densidad y su ascenso por las pendientes de las laderas (brisa de valle) debido a la flotabilidad (Doran et al., 1990; Guardans & Palomino, 1995).

### 1.5.2 Vientos canalizados

La canalización del viento es un aspecto muy importante presente en la región del IT. El viento superficial sobre regiones de orografía compleja a menudo se convierte en viento canalizado por alguna brecha topográfica (valles, fiordos, estrechos, pasos, etc.) (Kaufmann & Weber, 1998); esto se debe a que la topografía influye de manera mecánica y produce un fuerte efecto de encañonamiento o canalización de los vientos de gran escala, generados por gradientes de presión de escala sinóptica (Drobinski et al., 2003). En la región del IT, la longitud de la brecha (paso de Chivela) por donde se canaliza el viento es lo suficientemente grande como para que la fuerza de Coriolis influya en la dinámica del flujo del viento a lo largo de la brecha. La figura 1.5.1 es una representación esquemática de la canalización del viento en el hemisferio norte. El aire frío (fig. 1.5.1a) inicialmente en reposo sobre la brecha topográfica se ve influenciado por el gradiente de presión sinóptico  $F_{PG_s}$ , impuesto a lo largo del eje del valle, y comienza a moverse lentamente (con una rapidez  $M$ ) en dirección de la baja presión ubicada en el lado opuesto de la brecha (fig. 1.5.1b). A esta rapidez baja, tanto la fuerza de Coriolis  $F_{CF}$  como la fuerza de arrastre turbulenta  $F_{TD}$  son correspondientemente pequeñas (fig. 1.5.1a'). La suma de todos los vectores de las fuerzas causa que el viento gire ligeramente hacia la derecha (en el hemisferio norte) y se acelere a lo largo de la brecha. Este giro hace que el aire frío ascienda por el lado derecho del valle (en relación con la dirección del flujo) acumulándose a medida que aumenta la rapidez del viento (fig. 1.5.1b). De lo anterior resulta la generación

de un gradiente de presión  $F_{PGm}$  de mesoescala (por unidad de masa, ec.1), perpendicular al eje del valle (fig. 1.5.1b'):

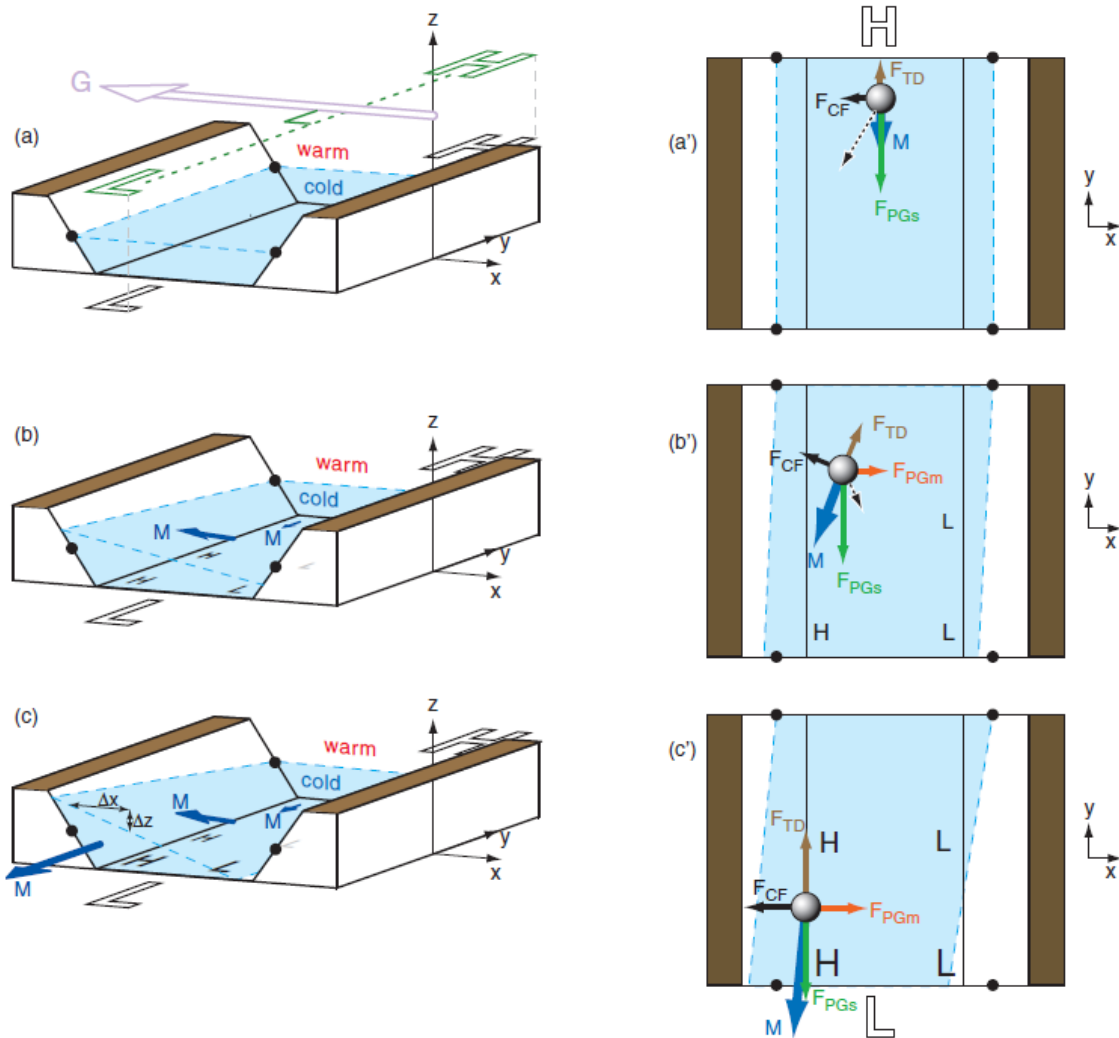


Fig. 1.5.1: Representación esquemática de la canalización del viento a través de una brecha montañosa. Vista oblicua que muestra la evolución del aire frío en el espacio (a-c). Vista en planta que muestra las fuerzas correspondientes que actúan sobre una parcela de aire frío a medida que se forma la canalización del viento (a'-c'). Tomada de Stull (2017).

$$\frac{F_{PGm}}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P_m}{\Delta x} = -|g| \frac{\Delta \theta_v}{T_v} \frac{\Delta z}{\Delta x} \quad (\text{ec. 1})$$

donde  $\Delta z/\Delta x$  es la pendiente (perpendicular al eje del valle) de la parte superior de la capa de aire frío,  $\Delta P_m/\Delta x$  es el gradiente de presión de mesoescala a través del valle,  $\Delta \theta_v$  es el gradiente de temperatura potencial entre el aire frío y cálido,  $T_v$  es la temperatura virtual promedio,  $|g|$  es el valor absoluto de la magnitud de la aceleración de la gravedad y  $\rho$  es la densidad promedio del aire. Cuando esta nueva fuerza del gradiente de presión se suma

a las mayores fuerzas de arrastre y de Coriolis asociadas con la rapidez moderada del viento, la suma vectorial de fuerzas resultante (vector punteado en blanco y negro de la fig. 1.5.1b') hace que el viento comience a girar en sentido levógiro hasta volverse casi paralelo al eje del valle. La rapidez del viento en la brecha aumenta a medida que el viento se adentra en el valle, apilandose el aire frío en el lado derecho del valle (fig. 1.5.1c y c'). En dirección a lo largo del valle, el gradiente de presión sinóptico  $F_{PG_s}$  es a menudo mayor en comparación con la fuerza de arrastre turbulenta  $F_{TD}$ , permitiendo que el aire continúe acelerandose a lo largo del valle, alcanzando su máxima rapidez cerca de la salida del valle. Los vientos canalizados ocurren con más frecuencia en invierno, cuando el aire frío en contacto con el valle causa un mayor gradiente de temperatura potencial  $\Delta\theta_v$ .

### 1.5.3 Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados (AC) es un método estándar en el análisis multivariado que reduce una gran cantidad de información en pequeños grupos o conglomerados, donde los miembros de cada uno de ellos comparten características similares (Lin & Chen, 2006). El AC se considera una técnica exploratoria que no utiliza ningún tipo de modelo estadístico para llevar a cabo el proceso de clasificación (Hair et al., 1999; Peterson, 2002) y, por ello, se le clasifica como una técnica de aprendizaje no supervisado, es decir, una técnica muy adecuada para extraer información de un conjunto de datos sin imponer restricciones previas en forma de modelos estadísticos (Barrios & Carvajal, 2006).

El AC tiene por objeto formar grupos o conglomerados homogéneos en función de las similitudes entre ellos respecto a algún criterio de selección predeterminado (Hair et al., 1999; Peña, 2002; Rao & Srinivas, 2006). Las técnicas de agrupamiento en el AC se pueden clasificar en dos categorías: el conglomerado jerárquico y el no jerárquico. Los conglomerados jerárquicos consisten en la construcción de una estructura en forma de árbol; para obtenerlos existen dos tipos de procedimientos: los de aglomeración y los divisivos. Dentro de los métodos jerárquicos aglomerativos se tienen: método de encadenamiento simple, métodos de encadenamiento completo, método de

encadenamiento medio, método de Ward y método del centroide (Hair et al., 1999). Estos procedimientos difieren en cómo se calcula la distancia entre los conglomerados, incluyendo los métodos de: distancia euclidiana al cuadrado, Manhattan, coeficiente de correlación de Pearson, Chebyshev y Cosine. La distancia euclidiana es la más utilizada en los algoritmos de aprendizaje no supervisado debido a su manera sencilla de calcularse y a su fácil interpretación: longitud de un segmento que conecta dos puntos (fig. 1.5.2). La fórmula de la distancia euclidiana (ec.2) es:

$$D_E(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (\text{ec. 2})$$

La principal desventaja de la distancia euclidiana se debe a que no es una variante de escala, lo que significa que las distancias calculadas pueden estar sesgadas según las unidades de los datos. Por lo general, es necesario normalizar los datos antes de usar esta medida de distancia. Por su parte, la distancia Manhattan (fig. 1.5.2) calcula la distancia entre vectores de valor real imaginando vectores que describen objetos en una cuadrícula uniforme como un tablero de ajedrez (distancia entre dos vectores si solo pudieran moverse en ángulos rectos). La fórmula de la distancia Manhattan (ec.3) es:

$$D_M(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (\text{ec. 3})$$

La desventaja de la distancia Manhattan es que es una medida menos intuitiva que la distancia Euclidiana; sin embargo, esta distancia no es sensible a valores anómalos en los datos ya que los valores absolutos de los datos del conglomerado no se elevan al cuadrado como en el caso de la distancia euclidiana.

Por otra parte, el AC por medio de técnicas no jerárquicas no requiere de procesos de construcción de árboles; en su lugar, asigna los objetos a conglomerados una vez que el número de grupos a formar esté especificado. Los procedimientos de aglomeración no jerárquicos se agrupan en: k medias, k medianas o k modas. Una desventaja con respecto a la técnica jerárquica es que debe conocerse a priori el número de conglomerados a obtener, lo que puede implicar un grado de subjetividad en el proceso (Peterson, 2002).

Sin embargo, se considera un método dinámico considerando que los objetos dentro de los conglomerados se pueden mover de uno a otro, minimizando la distancia entre objetos dentro de un mismo conglomerado (Rao & Srinivas, 2006).

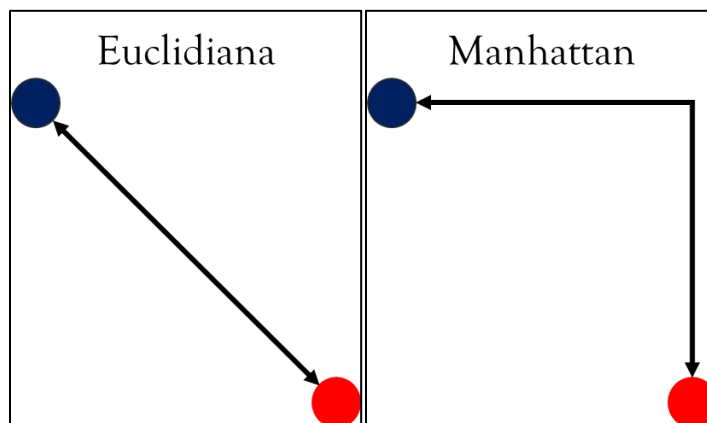


Fig. 1.5.2: Diferencias en las distancias Euclidiana (izquierda) y Manhattan (derecha).

Un ejemplo de la aplicación del AC en el ámbito de las ciencias atmosféricas es la investigación realizada por [Castro-Heredia et al. \(2012\)](#) quienes realizaron un AC para comprobar que las estaciones atípicas, es decir, aquellas que el AC agrupa individualmente, son de tipo homogéneo. Para comprobar su hipótesis, tomaron en consideración 150 estaciones pluviométricas, localizadas en la región del Valle del Cauca, Colombia, utilizando las técnicas de encadenamiento simple, Ward, y centroide como métodos jerárquicos de aglomeración, y la distancia euclidiana al cuadrado como medida de similitud.

Por su parte, [Pérez-Foguet \(2014\)](#) desarrolló una caracterización local de regímenes de viento en la región de topografía compleja La Oroya, Perú. Dicha caracterización fue llevada a cabo a través de un AC utilizando datos horarios del periodo junio 2007-octubre 2008 (periodo representativo de una fase fría de ENOS) de 9 estaciones meteorológicas ubicadas a distintas elevaciones entre los dos valles principales de la región. El enfoque novedoso de su metodología radica en que la rapidez y dirección del viento son tratadas por separado, es decir, se realiza un AC tanto para la rapidez del viento como para la dirección. Los conglomerados obtenidos son analizados y descritos de acuerdo con los datos horarios de las estaciones meteorológicas. Entonces, ambas clasificaciones de conglomerados fueron comparadas utilizando tablas de contingencia.

De esta forma se identificaron los principales regímenes de viento. Las incertidumbres asociadas con los valores promedio de cada régimen de viento se cuantificaron por medio de un análisis de componentes principales de los vectores de viento de cada estación. Finalmente, los patrones de viento se compararon con respecto a las estaciones y se analizaron a detalle los regímenes diurnos durante el invierno.

# Capítulo 2

## Metodología

*Otra vez todo helado:  
susurra una plegaria  
el viento entre los pinos.*  
RIEI

### 2.1 Datos de reanálisis ERA-5

Con el objetivo de caracterizar estacionalmente las variaciones diurnas del campo de viento en la región del IT, en la presente investigación se utilizan datos de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento a 10 m sobre la superficie, y de la presión reducida al nivel medio del mar (MSLP, en inglés) del reanálisis ERA-5 del Centro Europeo de Predicción a Mediano Plazo (ECMWF, en inglés). Un reanálisis atmosférico es un conjunto de datos en malla que combinan la predicción de un modelo de pronóstico numérico del tiempo y un esquema de asimilación de datos históricos observacionales que abarcan un periodo de tiempo prolongado. Existen diversos reanálisis atmosféricos globales generados por diferentes instituciones y se han llevado a cabo estudios para determinar cuál de ellos reproduce mejor las observaciones del campo de viento en diferentes regiones del mundo (Olauson, 2018; Ramon et al., 2019) y a lo largo y ancho de México (Thomas et al., 2020). En este tenor, Thomas et al., 2020 demostraron, mediante una interpolación horizontal entre cada nodo de la malla y la ubicación de diversas estaciones meteorológicas a lo largo y ancho de México, además de una interpolación vertical a la altura de las observaciones, que el reanálisis ERA-5 reproduce mejor las observaciones del campo de viento en comparación con los reanálisis ERA-Interim (ECWMF) y MERRA-2 (NASA). Además, el reanálisis ERA-5 posee algunas otras ventajas



respecto a los mencionados previamente, por ejemplo: una resolución espacial de  $\approx 30$  km ( $1/4^\circ$ ) y una resolución temporal horaria. Debido a lo anterior, para el presente estudio se utilizaron los datos del reanálisis atmosférico ERA-5 en el periodo 1979-2019 para un dominio extendido cuyas coordenadas van de  $8^\circ\text{N}$  a  $28^\circ\text{N}$  y de  $84^\circ\text{W}$  a  $102^\circ\text{W}$  (fig. 2.1.1), por considerar que representan adecuadamente las características del campo de viento en la región de estudio. La dimensión espacial de la matriz de datos descargados es de 1440 nodos (40 nodos en latitud por 36 en longitud), mientras que la dimensión temporal es de 359,160 datos (correspondientes a los valores horarios de 41 años en el periodo mencionado) por cada nodo de la matriz.

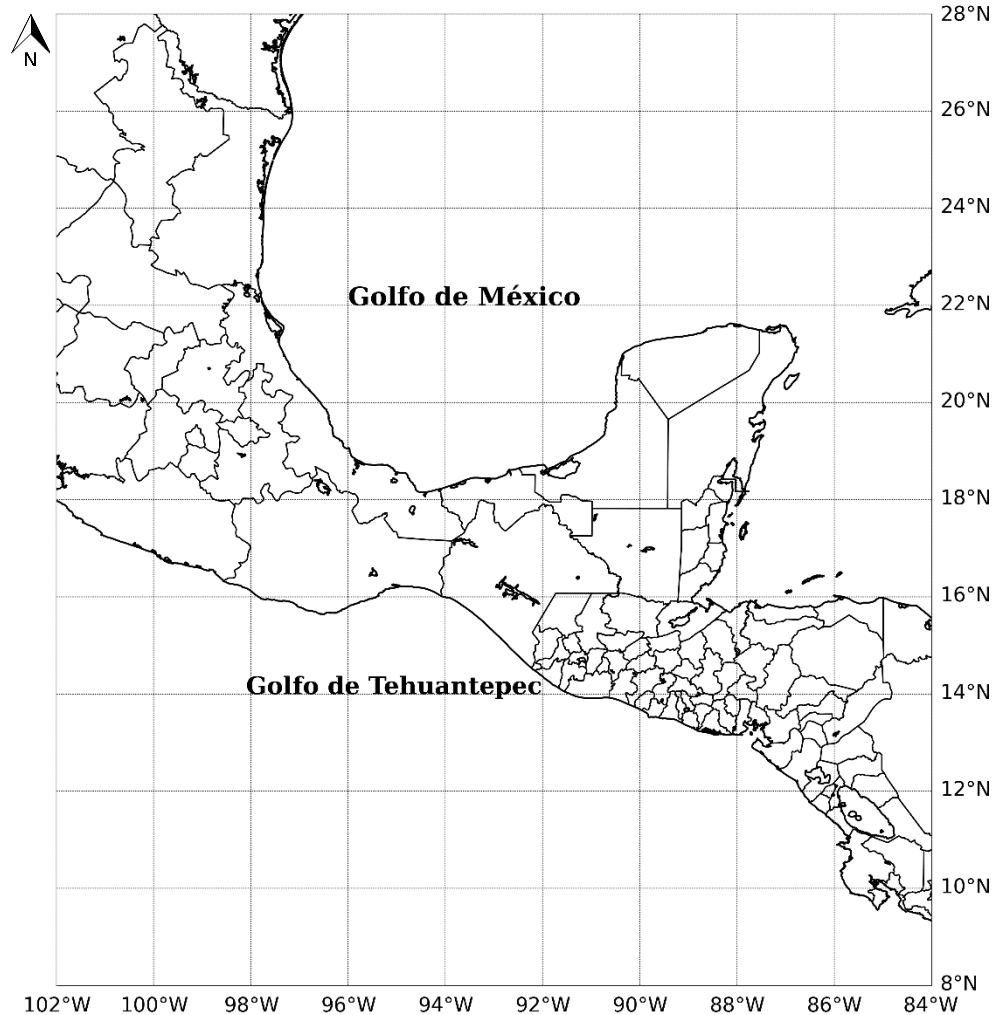


Fig. 2.1.1: Extensión espacial del dominio de los datos descargados del reanálisis ERA-5.

## 2.2 Promedios estacionales

Para entender el comportamiento del flujo medio del viento y del campo de MSLP en el dominio seleccionado, durante el invierno (enero, febrero y diciembre del año inmediato anterior) y verano (junio, julio y agosto), se calcularon y analizaron los promedios estacionales de la rapidez del viento y de MSLP, considerando los años neutros del periodo 1979-2019: 1979, 1980, 1981, 1990, 1993, 1996, 2001, 2003, 2013 y 2014, a lo que se denominó el año típico (AT). El filtrado de los años neutros se realizó para eliminar la posible influencia del fenómeno ENOS en los datos. El índice utilizado para el filtrado fue el *Oceanic Niño Index* (ONI), emitido por el Centro de Predicción Climática (NOAA, 2021). El índice ONI es una medida de la condición de ENOS y sus fases cálida (El Niño) y fría (La Niña) en el Pacífico ecuatorial central. Es el promedio móvil trimestral de las anomalías de la TSM estimadas a partir del producto ERSST.v5 SST en la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W), basado en periodos base de 30 años que se actualizan cada 5 años. El criterio utilizado para clasificar un año como neutro fue el siguiente: un año en el que el valor del promedio móvil trimestral no rebase el umbral de  $\pm 0.9$  °C durante más de tres periodos consecutivos.

El cálculo de los promedios estacionales se realizó con el conjunto de operadores para el procesamiento de datos climáticos y de pronóstico meteorológico *Climate Data Operators* (CDO) del Instituto Max Planck de Meteorología (Schulzweida, 2019). CDO es una herramienta muy útil para el procesamiento de datos atmosféricos en formato NetCDF (formato estándar comunitario para compartir datos científicos) o GRIB (creado por la Organización Meteorológica Mundial) ya que incluye más de 600 operadores útiles para el análisis estadístico, funciones aritméticas, selección de variables, herramientas de remuestreo espaciotemporal e interpolación espacial (Schulzweida, 2019).

Con el objeto de analizar el comportamiento de los vientos en el IT, se eligieron 9 sitios a lo largo de esta región (fig. 2.2.1); para ello, y considerando los 10 años neutros resultantes del proceso de filtrado mediante el índice ONI, se obtuvieron los ciclos anuales, ciclos diurnos mensuales promedio, rosas de viento, distribuciones de frecuencias, magnitud promedio y desviación estándar para cada sitio.

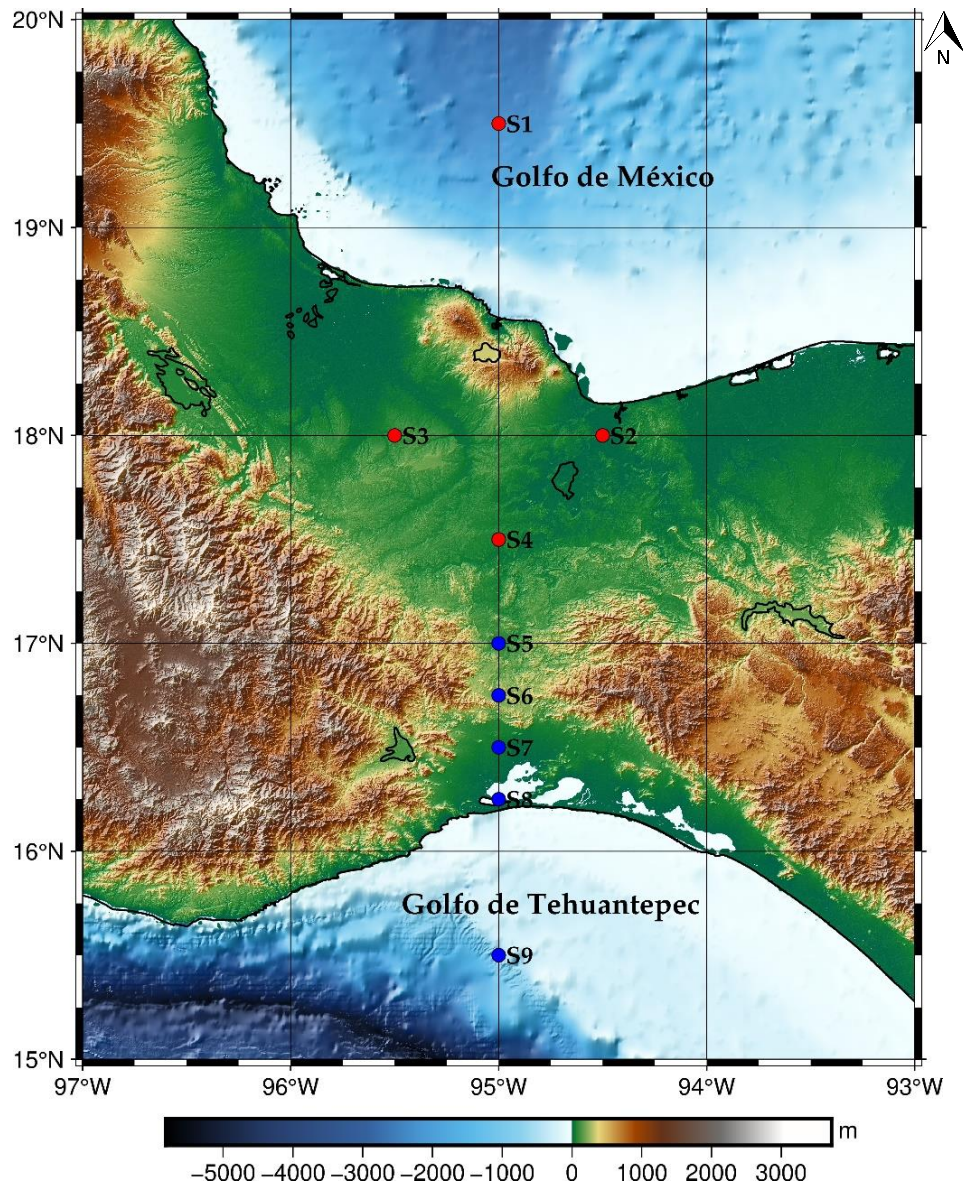


Fig. 2.2.1: Sitios seleccionados para el análisis del campo de viento en el IT. Los sitios en color rojo corresponden a los sitios que se encuentran en la entrada del IT y los sitios en azul a la parte central y salida del istmo. Fuente del modelo digital de elevación: *Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec SRTM15+*. [Tozer et al., 2019](#).

Para facilitar el análisis estadístico de la magnitud y dirección del viento en los 9 sitios, se clasificaron de acuerdo con su disposición geográfica. El sitio 1 (marítimo) se localiza en el GM y los sitios 2, 3 y 4 (continentales) se encuentran en la entrada del IT, mientras que los sitios 5 y 6 se ubican en la parte central, los sitios 7 y 8 a la salida del istmo y el 9 en el GT.

## 2.3 Análisis de conglomerados

El siguiente paso de la metodología se centra en la caracterización de la variabilidad diurna de los regímenes del campo de viento para el invierno y verano mediante un AC de la rapidez del viento para cada uno de los 9 sitios representativos del IT. Para ello, y considerando los 10 años neutros filtrados, se calcularon los promedios horarios anuales: del año típico (AT, 8760 datos), invierno (DEF-AT, 2160 datos) y verano (JJA-AT, 2208 datos).

El AC se llevó a cabo en el lenguaje de programación y entorno estadístico R (R Core Team, 2021) mediante las librerías *cluster* (Maechler et al., 2021), *factoextra* (Kassambara & Mundt, 2020) y *NbClust* (Charrad et al., 2014). El AC se realizó utilizando el algoritmo PAM (*Partitioning Around Medoids*, Kaufman & Rousseeuw, 1990). El algoritmo PAM pertenece al AC particional en el cual, a priori, se le tiene que indicar el número de conglomerados a considerar en el análisis. Para encontrar el número óptimo de conglomerados se utilizó la librería *NbClust* del lenguaje R. *NbClust* calcula 30 índices estadísticos distintos para determinar el número óptimo de conglomerados a utilizar en cualquier algoritmo de AC particional. El cálculo de los índices se lleva a cabo utilizando diversas combinaciones de números de conglomerados (1 a 10) y medidas de distancia (euclidiana, Manhattan, etc.) Entre los principales índices estadísticos se encuentran los Métodos del Codo y de la Silueta (fig. 2.3.1).

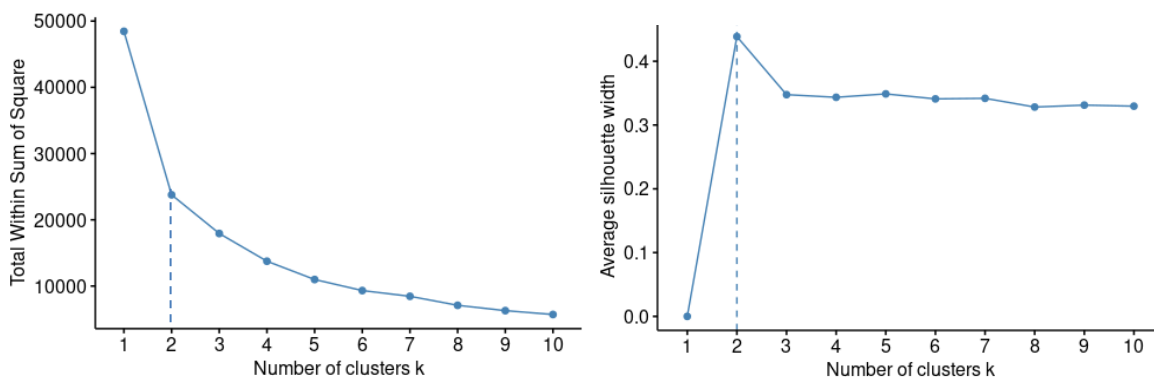


Fig. 2.3.1: Gráficas del método del Codo (izquierda) y de la Silueta (derecha) para encontrar el número óptimo de conglomerados a utilizar en cualquier algoritmo de AC particional. En el método del codo la línea punteada en color azul indica el número óptimo de conglomerados debido a que a partir de este punto (punto de inflexión) el WSS se estabiliza y su valor no disminuye de manera abrupta. Mientras que, en el método de la Silueta, la línea punteada en color azul indica el número óptimo de conglomerados debido a que ese punto corresponde al de mayor valor promedio del ancho de la silueta.

La idea básica detrás del método del Codo es realizar el AC para  $k$  conglomerados (1 a 10) y estimar la variación total intra-conglomerado (WSS, en inglés). El WSS mide el grado de compactación de los  $k$  conglomerados; para estimar el número óptimo de conglomerados con este método, se debe elegir aquel a partir del cual el valor del WSS no disminuye de manera abrupta. Por su parte, el Método de la Silueta cuantifica la calidad de cada esquema con  $k$  números de conglomerados, es decir, determina que tan bien cada dato de la rapidez del campo viento es agrupada dentro de cada conglomerado. Un promedio alto del valor del ancho de la silueta es indicativo del número óptimo de conglomerados a utilizar en el AC. Para ahondar en los detalles matemáticos de los métodos se puede consultar el libro de [Kassambara \(2017\)](#).

De acuerdo con el consenso de los 30 índices calculados, el número de conglomerados utilizado en el AC de esta investigación es  $k=3$  y la distancia utilizada es la Manhattan. Finalmente, el algoritmo PAM fue alimentado con los promedios horarios calculados (AT, DEF-AT, JJA-AT) y el AC fue calculado para cada uno de los 9 sitios representativos del IT.

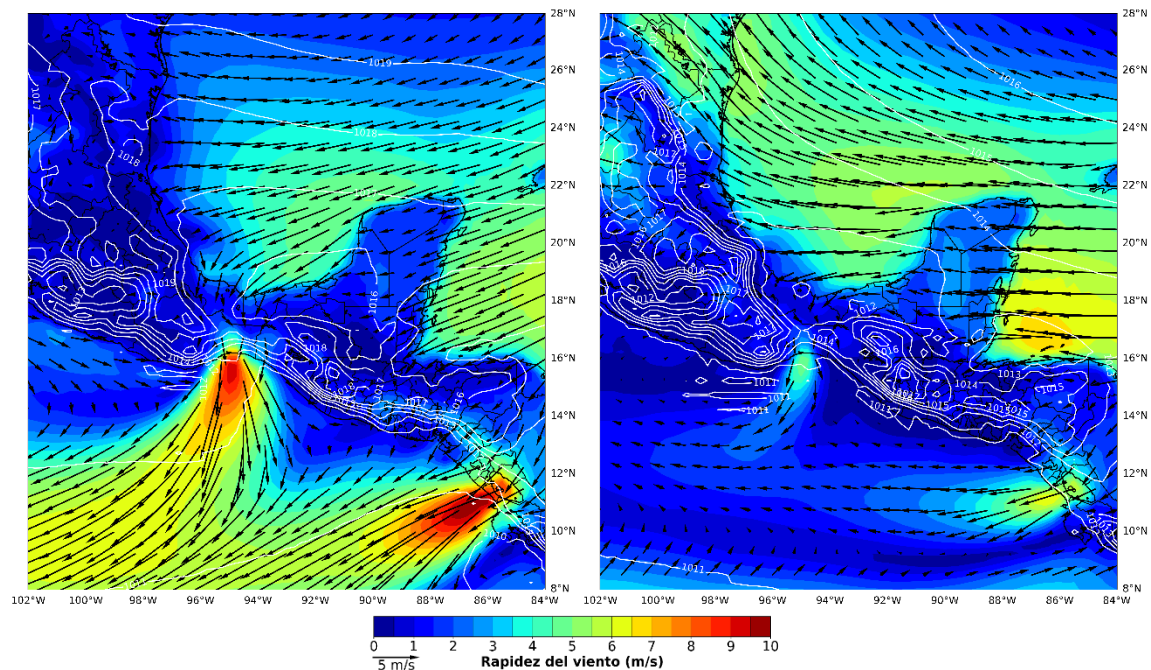
# Capítulo 3

## Análisis de resultados

*En el viento de otoño  
la costa rugosa sirve de almohada:  
una noche agitada.  
SHŌHAKU*

### 3.1 Promedios estacionales del campo de viento

Los promedios estacionales para invierno (diciembre, enero y febrero) y verano (junio, julio y agosto) del campo de viento y la MSLP, considerando el AT en el dominio extendido que incluye al IT, se muestran en la figura 3.1.1.



**Fig. 3.1.1:** Promedio del campo de viento (vectores) y de la MSLP (contornos en blanco) en el dominio (84°W-102°W, 8°N-28°N) para el invierno (DEF, izquierda) y verano (JJA, derecha). Las isobaras de la MSLP están a intervalos de 1 hPa, y en color se muestran los valores de rapidez del viento según la escala inferior.

Los mapas de la figura 3.1.1 muestran las características del patrón promedio del campo de viento en ambas temporadas, en donde sobresalen los jets de Tehuantepec y Papagayo. Durante el invierno los vientos que atraviesan el IT son más intensos que en verano, alcanzando un valor promedio de entre 8 y 9 m/s a la salida de este, sobre el GT, en comparación con valores de  $\sim 4-5$  m/s en el verano. Los vientos más intensos están asociados con un mayor gradiente de presión entre el GM y el GT durante el invierno, como se puede apreciar en la figura y como se mencionó en el Capítulo 1.

## 3.2 Análisis de la rapidez y dirección del viento a lo largo del IT

En esta sección se presenta el análisis de la rapidez y dirección del viento considerando los nueve puntos elegidos a lo largo del IT y cuya ubicación se muestra en la figura 2.2.1.

### 3.2.1 Sitios 1, 2, 3 y 4

Los histogramas de la rapidez del viento para los sitios 1 al 4 (fig. 3.2.1) considerando el AT, señalan que el sitio 1 (ubicado en el GM) es donde se presenta la mayor rapidez promedio (5.24 m/s) y los vientos más intensos (con un valor máximo de 21.80 m/s). Estadísticamente, los sitios 2, 3 y 4 tienen un comportamiento parecido (sitios ubicados en continente) ya que sus valores de desviación estándar, media aritmética y rapidez máxima son similares, con un rango de rapidez promedio entre 2.37 (sitio 3) y 3.02 m/s (sitio 4).

Por otra parte, en las rosas de viento para los sitios 1 al 4 (fig. 3.2.2), se observa que en el sitio 1 se presenta una mayor dispersión en cuanto a la dirección del viento, en comparación con los otros sitios; los vientos más intensos provienen del NW, NNW y N, mientras que las direcciones predominantes son del E y ESE. El sitio 2, ubicado en la parte oriental de la entrada al IT, muestra un comportamiento muy distinto al del GM, con vientos predominantes del N y NNE y magnitudes inferiores a los 8 m/s. Por su parte, el sitio 3, ubicado más hacia el oeste, muestra vientos predominantes del NW y NNW, así como cierta proporción de vientos del SE. En el sitio 4, ubicado justo al norte del paso de

Chivela, se observa predominancia clara de vientos del NW, y una diferencia notable con respecto a los otros sitios es la mayor proporción de vientos del sur, que además presentan las magnitudes más altas (comprendidas en el rango 10-12 m/s).

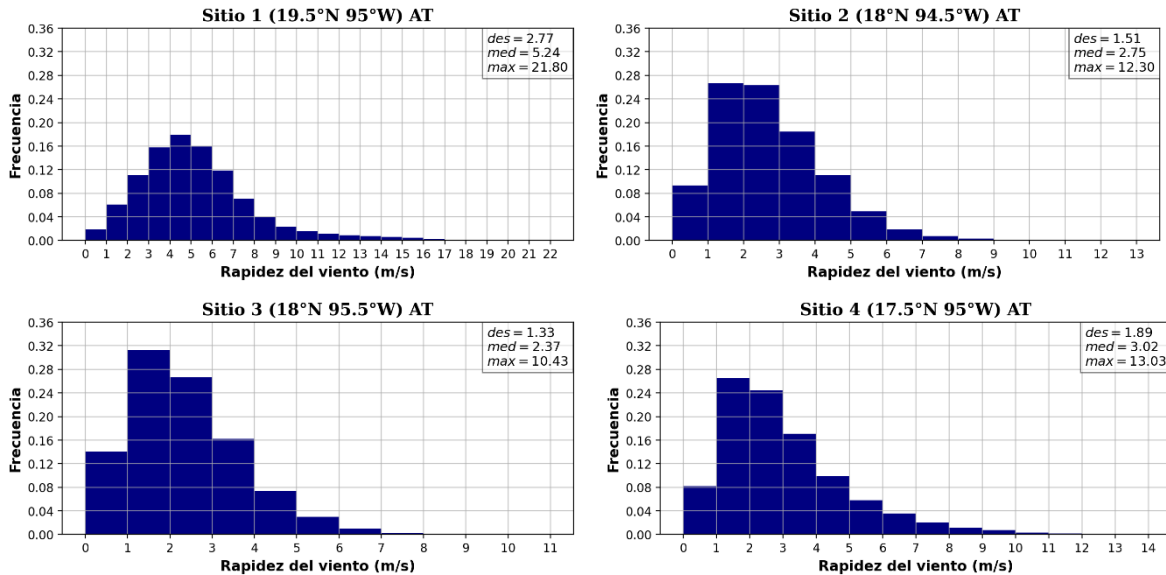
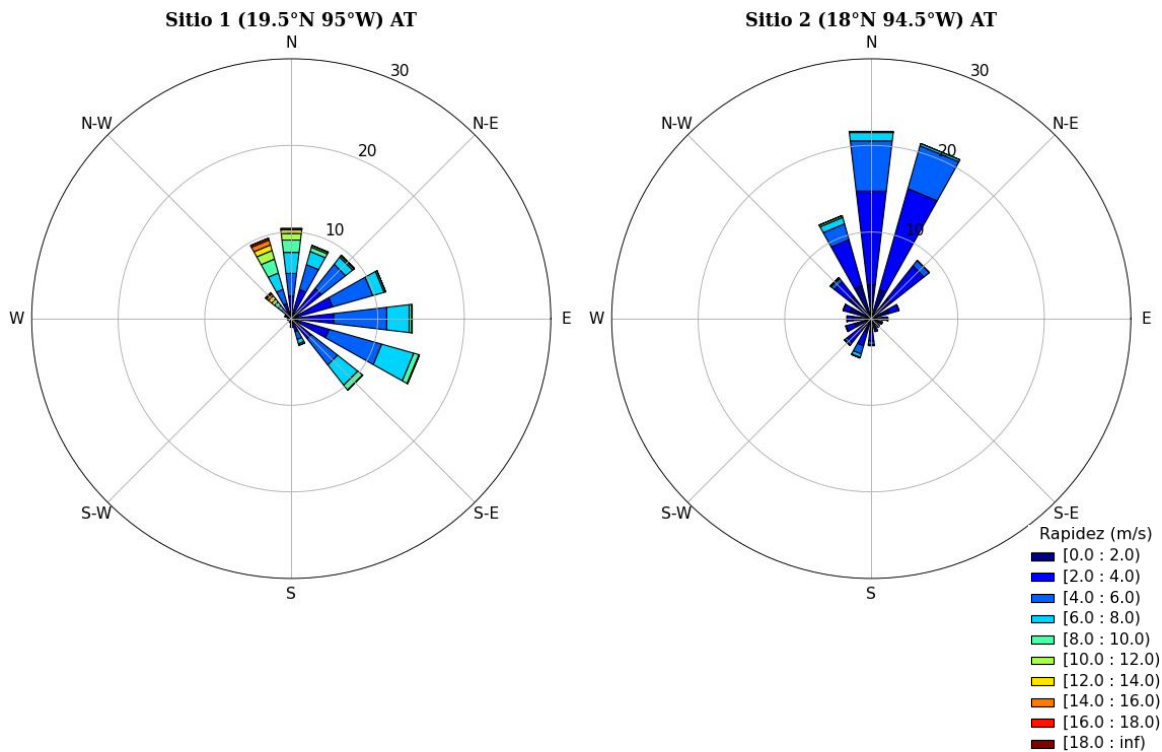


Fig. 3.2.1: Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para los sitios 1, 2, 3 y 4 considerando el AT. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.





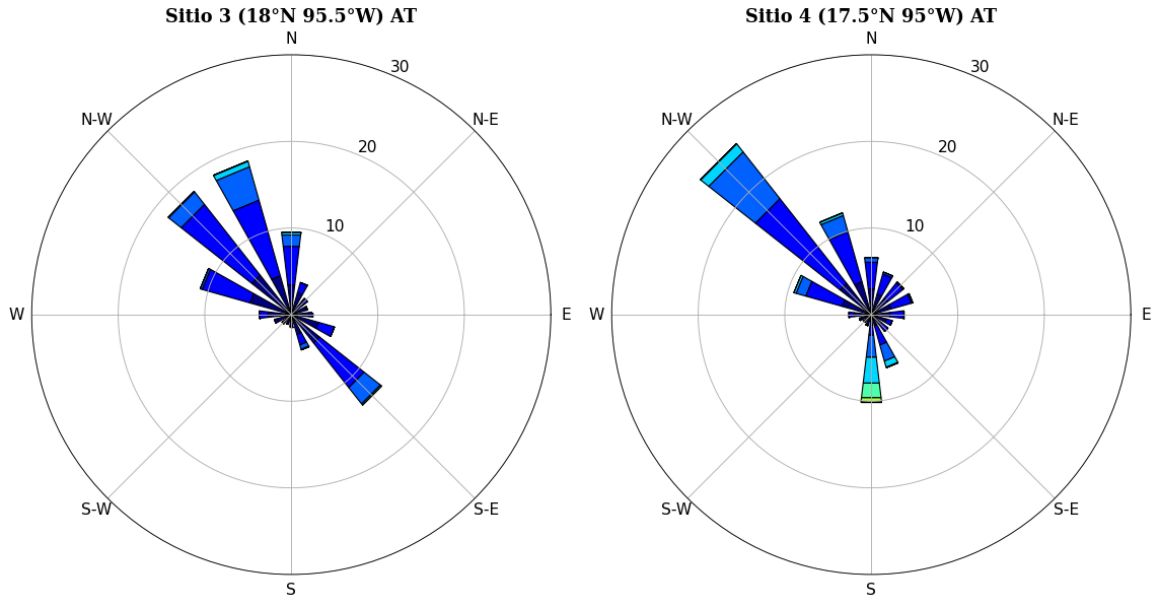


Fig. 3.2.2: Rosas de viento para los sitios 1, 2, 3 y 4 considerando el AT. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).

Comparando los ciclos anuales promedio de la rapidez del viento de los sitios 1, 2, 3 y 4 (fig. 3.2.3), se aprecia la diferencia notable en el comportamiento del sitio 1 respecto a los otros sitios. En el ciclo anual del sitio 1, se observa que los promedios máximos de rapidez ocurren durante noviembre, diciembre y enero, mientras que los mínimos ocurren en julio y agosto.

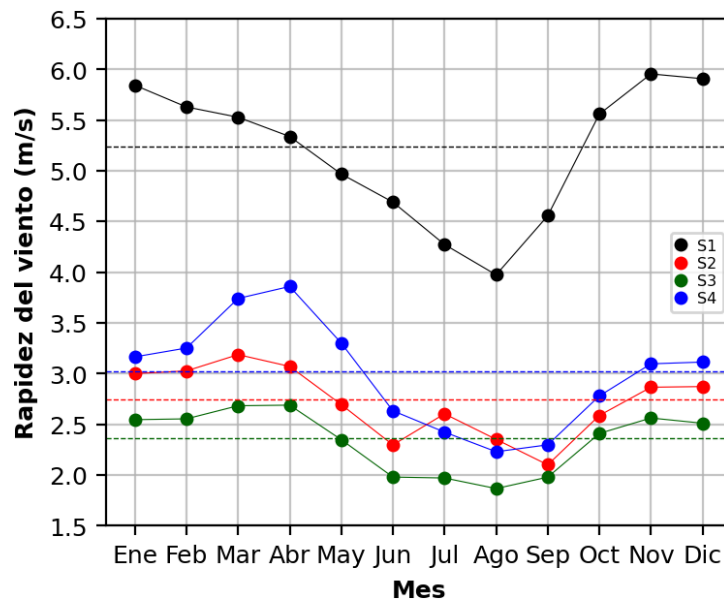
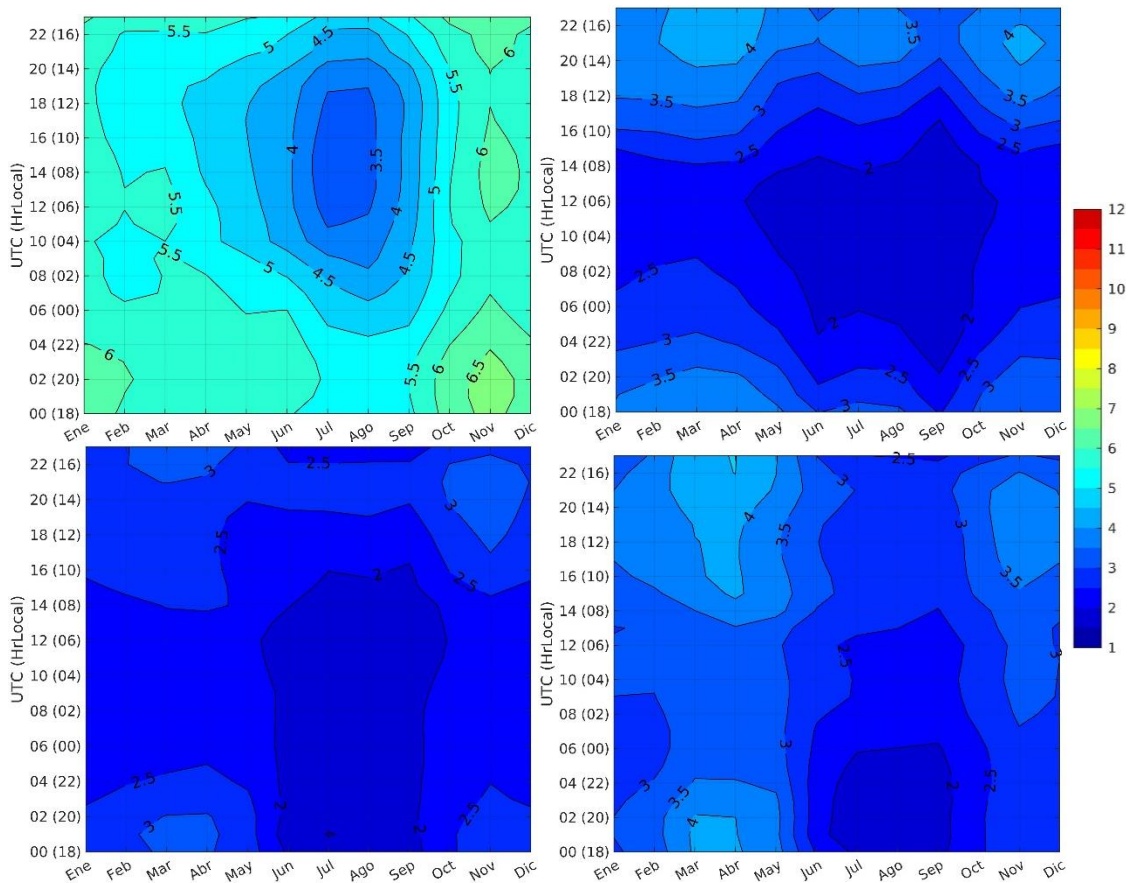


Fig. 3.2.3: Ciclos anuales promedio de la rapidez del viento para los sitios 1, 2, 3 y 4 considerando el AT. Las líneas punteadas horizontales hacen referencia al promedio anual en cada sitio.

Por otro lado, los ciclos anuales de los sitios 2, 3 y 4 muestran los máximos en marzo y abril, mientras que los mínimos se presentan de julio a septiembre, con excepción del sitio 2 que muestra un máximo relativo de la rapidez del viento en julio-agosto, característica que es más clara para los sitios que se ubican más próximos a la salida del IT.

Los ciclos diurnos mensuales promedio de la rapidez del viento de los sitios 1 al 4 (fig. 3.2.4), aportan información sobre la evolución de las variaciones diurnas a lo largo del año.



**Fig. 3.2.4:** Ciclos diurnos mensuales promedio de la rapidez del viento para los sitios: 1 (superior izquierda), 2 (superior derecha), 3 (inferior izquierda) y 4 (inferior derecha) considerando el AT. En el eje vertical se muestra la hora UTC (Tiempo Universal Coordinado) y la hora local (UTC-6) entre paréntesis.

En el sitio 1 los vientos más intensos ocurren durante diciembre y enero, con promedios horarios que difieren poco de los 6 m/s a lo largo de todo el día. Durante febrero y marzo el comportamiento es similar, aunque los promedios son ligeramente

menores, alrededor de los 5.5 m/s, siendo un poco más débiles entre las 10 y 16 hrs (hora local). Los vientos son menos intensos hacia el verano y se observa mayor variabilidad a lo largo del día. En particular, durante julio y agosto se observan vientos promedio relativamente más intensos entre las 17 y 23 hrs ( $\approx 5$  m/s) y más débiles entre las 6 y las 12 hrs (ligeramente menores a los 3.5 m/s). A pesar de que los sitios 2 y 3 se encuentran relativamente cercanos entre sí (ubicados en la misma latitud y separados por una distancia horizontal de un grado de longitud), existen diferencias en sus patrones horarios. En particular, en el sitio 2, los promedios horarios muestran un patrón similar a lo largo de todo el año, con vientos más intensos durante la tarde (aproximadamente entre las 12 y 18 hrs) y menos intensos durante la noche y primeras horas del día (aproximadamente entre las 00 y 08 hrs), aunque durante el invierno las magnitudes son ligeramente mayores que en el verano. El rango diurno es menor a 2 m/s a lo largo de todo el año. En el sitio 3 los vientos son ligeramente más débiles a lo largo del año en comparación con los del sitio 2 y se observa poca variabilidad diurna. El patrón horario muestra cierta intensificación en los meses de invierno, cuando la rapidez del viento alcanza a superar ligeramente los 3 m/s a lo largo de la tarde (entre las 12 y 16 hrs). De junio a septiembre los vientos son débiles prácticamente durante todo el día, con magnitudes promedio de  $\approx 2$  m/s entre las 18 y 10 hrs del día, y alcanzando los 2.5 m/s por la tarde (de 10 a 16 hrs).

Por otra parte, el sitio 4 muestra vientos de intensidad promedio similar a los del sitio 2 a lo largo del año, pero presenta algunas diferencias en cuanto al patrón estacional. Los vientos más intensos, de alrededor de 4 m/s, se presentan en los meses de marzo y abril, principalmente entre las 13 y las 20 hrs. En los meses de verano, de julio a septiembre, la magnitud de los vientos varía muy poco a lo largo del día, con un rango diurno menor a 1 m/s. En general, se observa una ligera intensificación de los vientos entre las 10 y las 16 hrs en todos los meses del año.

### 3.2.2 Sitios 5, 6, 7, 8 y 9

En un sentido complementario, ahora se presenta el análisis estadístico para los sitios 5 al 9. En la figura 3.2.5, se observa un claro aumento en la rapidez promedio del viento a medida que la latitud desciende en dirección al GT (sitio 9). El sitio 5 es

representativo de la entrada al paso de Chivela, mientras que el 6 es representativo de su parte central; ambos sitios poseen un comportamiento estadístico similar que se ve reflejado en sus valores de desviación estándar, media aritmética y rapidez máxima (fig. 3.2.5). Por otra parte, en los histogramas de los sitios 7, 8 (salida del paso de Chivela) y 9 (GT) se percibe claramente la intensificación de la rapidez del viento, atribuida a la canalización de los vientos a través del paso de Chivela. El rango de la rapidez promedio del viento de los sitios 5 al 9 se encuentra entre 4.17 y 8.09 m/s.

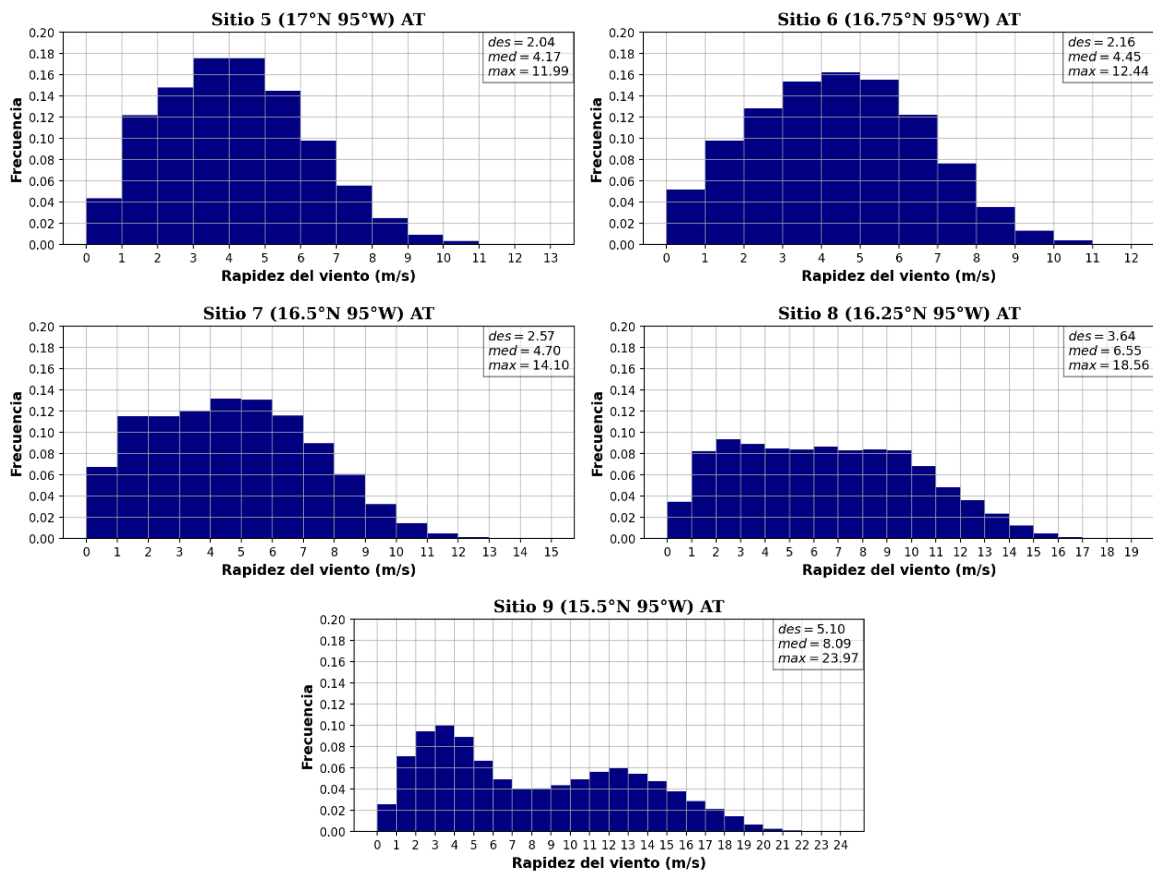


Fig. 3.2.5: Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para los sitios 5, 6, 7, 8 y 9 considerando el AT. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.

Respecto al análisis de las direcciones del viento, en la figura 3.2.6 se muestra que para el sitio 5 el viento predominante proviene del NNW, mientras que para el sitio 6 proviene del N. Las direcciones anteriores también están asociadas a las mayores magnitudes de rapidez.

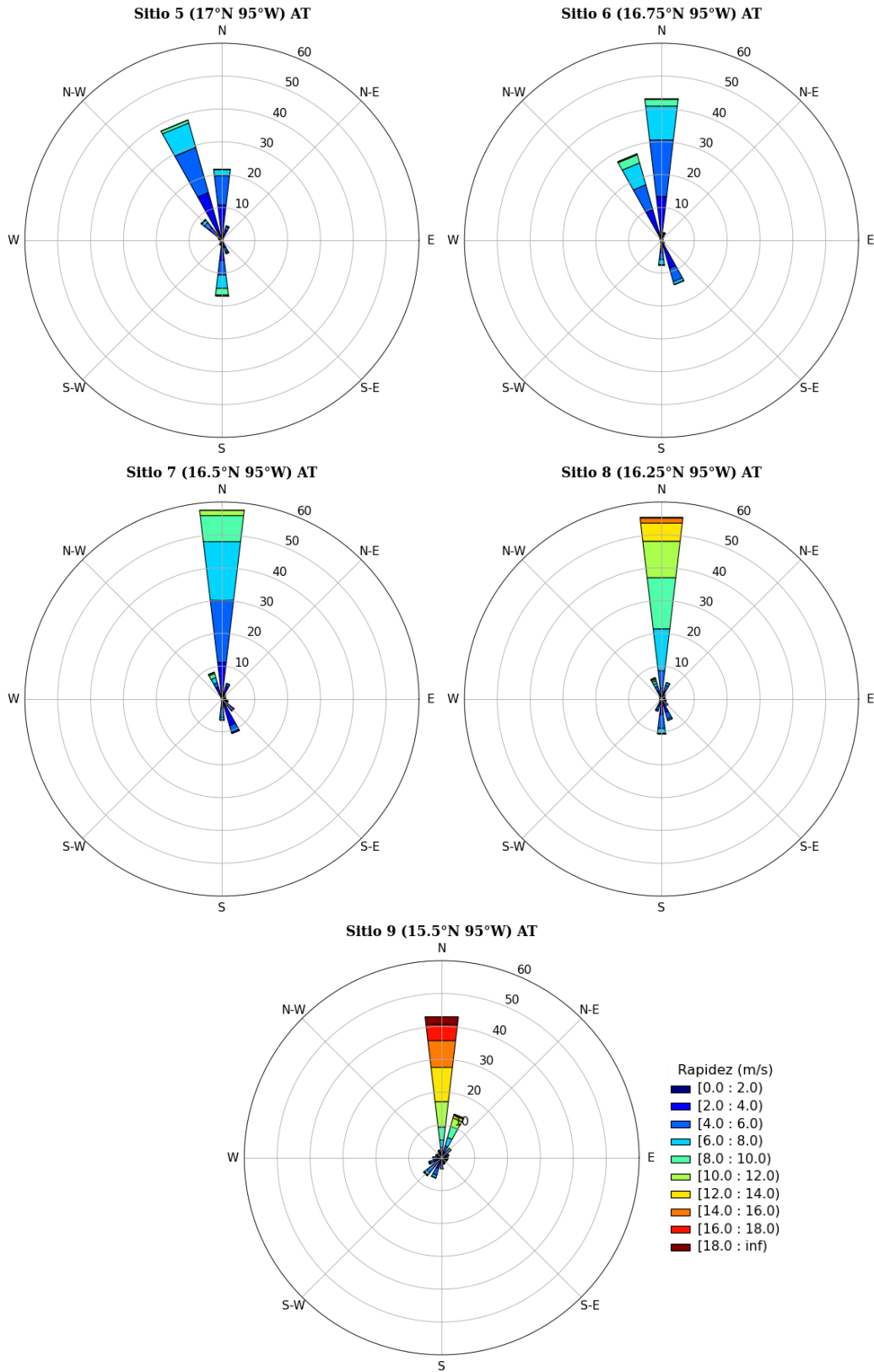


Fig. 3.2.6: Rosas de viento para los sitios 5, 6, 7, 8 y 9 considerando el AT. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).

Del sitio 6 al 9, la dirección predominante del viento es (notablemente) del N; este comportamiento coincide con el posible efecto mecánico de la orografía compleja del IT sobre el campo de viento, que se manifiesta como la canalización de los vientos a partir del sitio 6 (paso de Chivela) en dirección al GT.

Por otra parte, los ciclos anuales de los sitios 5 al 9 (fig. 3.2.7) aportan información sobre el comportamiento del viento para cada mes a lo largo del año promedio típico. Los ciclos anuales muestran una clara correspondencia en los meses en que ocurren los máximos y mínimos de rapidez: los máximos ocurren en noviembre, diciembre y enero, y los mínimos ocurren en los meses de junio y septiembre. Durante el mes de julio se observa un aumento (relativo) en la rapidez del viento, cuyo mecanismo físico asociado sigue siendo un tema de investigación. Otro aspecto que se desprende del análisis de los ciclos anuales, y que se mencionó anteriormente, es el aumento de la rapidez del viento a medida que se desciende latitudinalmente en dirección al GT. Sin embargo, es particularmente interesante notar que este comportamiento se invierte durante los meses de abril a junio, cuando en el sitio 5 se tienen los promedios de rapidez del viento más altos, en comparación con los sitios 6 y 7, y en el sitio 7 se presentan los promedios más bajos.

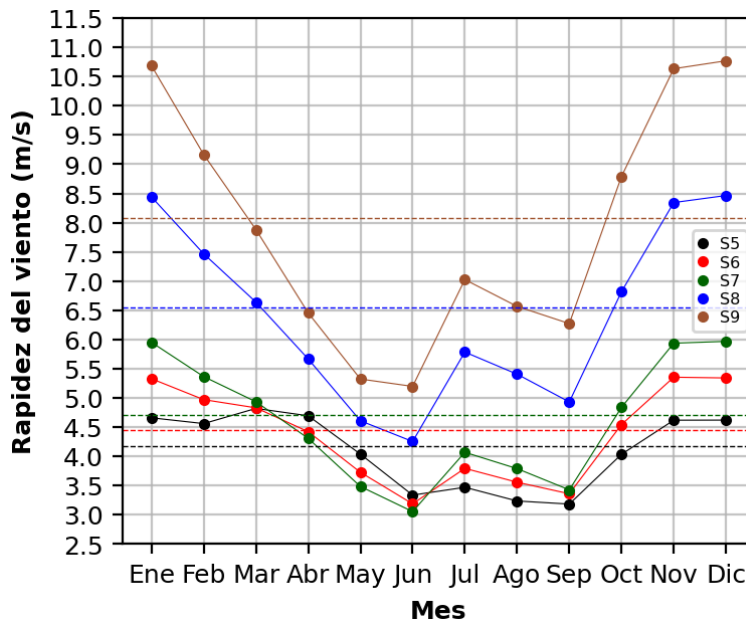
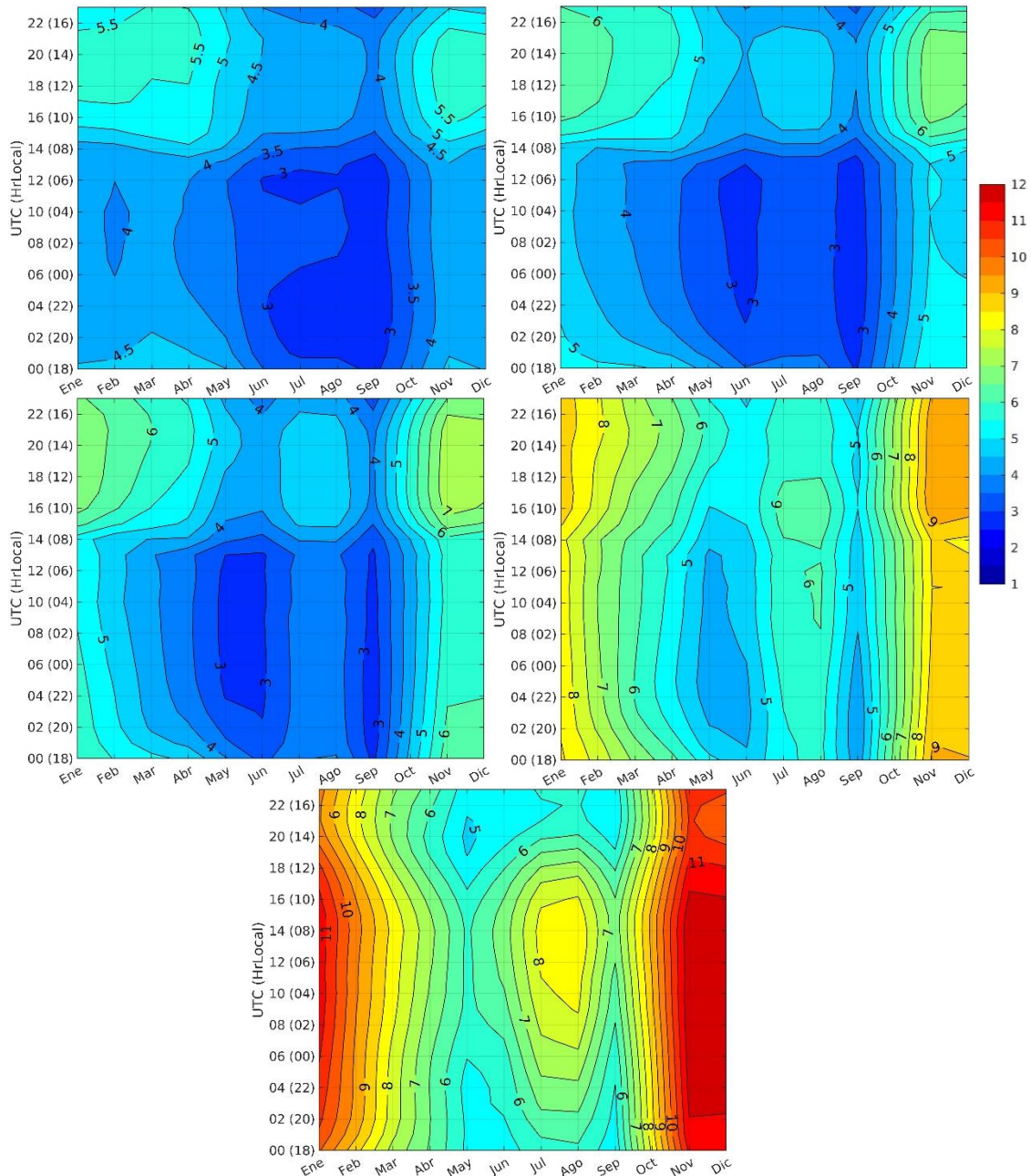


Fig. 3.2.7: Ciclos anuales promedio de la rapidez del viento para los sitios 5, 6, 7, 8 y 9 considerando el AT. Las líneas punteadas horizontales hacen referencia al promedio anual en cada sitio.

Los ciclos diarios mensuales promedio se presentan en la figura 3.2.8. El sitio 5, que se encuentra a la entrada del paso de Chivela, muestra vientos más intensos respecto a los sitios 2, 3 y 4, aunque las variaciones diurnas siguen siendo pequeñas. Los vientos más intensos se presentan de noviembre a abril, con magnitudes que superan ligeramente los 5.5 m/s principalmente entre las 11 y las 16 hrs; los vientos más débiles ( $\approx 4$  y 4.5 m/s) ocurren durante la noche y primeras horas del día. Por otra parte, los vientos más débiles



**Fig. 3.2.8:** Ciclos diarios mensuales promedio de la rapidez del viento para los sitios 5 (fila 1, izquierda), 6 (fila 1, derecha), 7 (fila 2, izquierda), 8 (fila 2, derecha) y 9 (fila 3) considerando el AT. En el eje vertical se muestra la hora UTC (Tiempo Universal Coordinado) y la hora local (UTC-6) entre paréntesis.

se presentan en el mes de septiembre, mostrando una variación diurna muy pequeña, con valores alrededor de los 3 y 3.5 m/s.

El comportamiento anual de los patrones diurnos de la rapidez del viento en los sitios 6 y 7, ubicados hacia el centro del paso de Chivela, es similar, con magnitudes algo superiores en el sitio 7. Los vientos más intensos se presentan durante el invierno, con promedios horarios que superan ligeramente los 7 m/s en noviembre y diciembre. En general, se observa una intensificación de los vientos entre las 10 y las 17 hrs (semejante a lo observado en el sitio 5) y los vientos menos intensos ocurren aproximadamente entre las 22 y las 7 hrs. Es interesante notar que en los meses de julio y agosto ocurren vientos ligeramente más intensos comparados con los de mayo-junio y septiembre, que son los meses cuando se presentan los vientos más débiles ( $\approx 3$  m/s).

En el sitio 8, ubicado a la salida del paso de Chivela, los vientos son marcadamente más intensos que en los sitios 6 y 7. Los vientos promedio más intensos superan ligeramente los 9 m/s en noviembre y diciembre, prácticamente sin variaciones a lo largo del día. En general, las variaciones diurnas son pequeñas en todos los meses, aunque se observa un comportamiento parecido al de los sitios 6 y 7, con una ligera intensificación entre las 10 y las 17 hrs y vientos algo más débiles entre las 20 y las 8 hrs. También en este sitio ocurre una intensificación de los vientos en julio-agosto comparado con los vientos más débiles de los meses de mayo-junio y septiembre. Entre octubre y diciembre las variaciones diurnas son muy pequeñas, con rangos de  $\approx 0.5$  m/s. El ciclo anual de las variaciones diurnas de la rapidez del viento en el sitio 9, ubicado en el GT, es particularmente interesante; en este sitio se presentan los vientos más intensos en comparación con el resto de los sitios analizados.

Entre octubre y febrero ocurren los vientos más intensos, con vientos que alcanzan magnitudes de 11.5 m/s, con muy poca variabilidad a lo largo del día. A diferencia de los sitios anteriores, se percibe una ligera intensificación de los vientos durante la noche y primeras horas del día (aproximadamente entre las 22 y las 10 hrs) para disminuir después por la tarde (12-18 hrs). Este patrón es similar durante la primavera y principios del



verano, aunque con vientos promedio menos intensos que en invierno. De manera semejante a lo que ocurre en los sitios 6, 7 y 8, pero de manera más clara, se presenta una intensificación relativa de los vientos durante los meses de julio y agosto en comparación con los vientos más débiles que ocurren en mayo-junio y septiembre. En julio-agosto los vientos más intensos se presentan entre las 4 y 10 hrs ( $\approx 8$  m/s), mientras que los más débiles ocurren entre las 14 y 20 hrs ( $\approx 5.5$  a 6 m/s).

### 3.3 Resultados del análisis de conglomerados

A continuación, se presentan los resultados del análisis de conglomerados únicamente para los cuatro sitios que presentan mayor contraste en su comportamiento: 1, 4, 6 y 9.

#### 3.3.1 Sitio 1 (19.5°N 95°W)

El sitio 1, ubicado en el GM, se considera como el sitio de origen del viento que se canaliza a través del IT. Los histogramas de la figura 3.3.1, proporcionan información sobre el comportamiento estadístico del campo de viento para el año típico (AT), el invierno del año típico (AT-DEF) y el verano del año típico (AT-JJA); en ellos se observan valores estadísticos semejantes al considerar los datos para el AT y para el invierno, diferenciándose claramente del comportamiento para el verano.

Los diagramas de dispersión de las componentes del viento ( $V_y$  y  $V_x$ ) para el AT, AT-DEF y AT-JJA, y los resultados del AC para cada uno de ellos se muestran en la figura 3.3.2, mientras que sus valores estadísticos se presentan en la tabla 3.3.1. Al respecto, es importante indicar que los conglomerados que se presentan en esta sección y subsecuentes, fueron ordenados de acuerdo con los valores promedio de rapidez del viento de los medioides (cruz negra) representativos de cada conglomerado. El conglomerado 1 (CL1, verde) es representativo de una rapidez del viento alta, el 2 (CL2, naranja) de una rapidez intermedia y el 3 (CL3, rojo) es representativo de una rapidez baja.

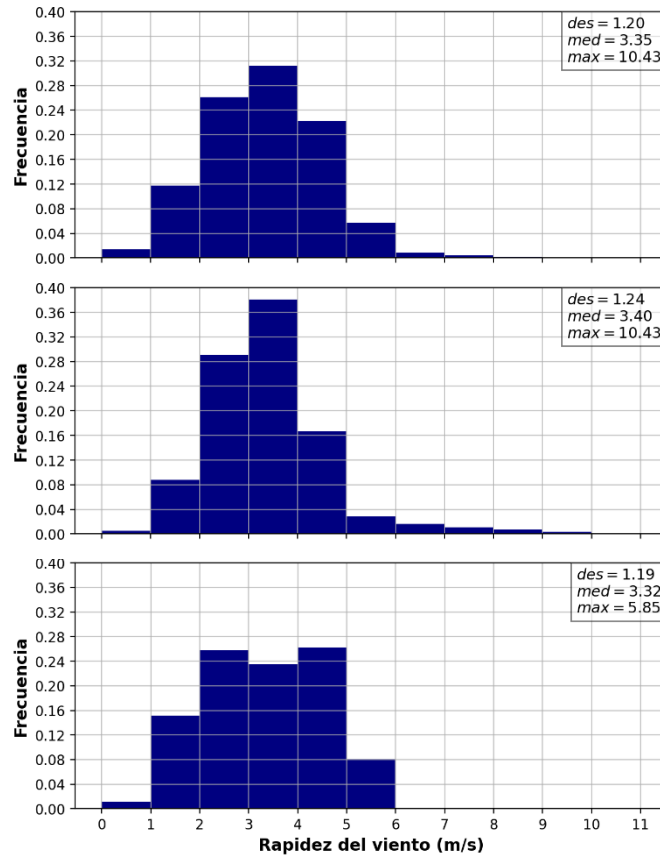


Fig. 3.3.1: Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para el AT (arriba), el AT-DEF (centro) y el AT-JJA (abajo) del sitio 1. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.

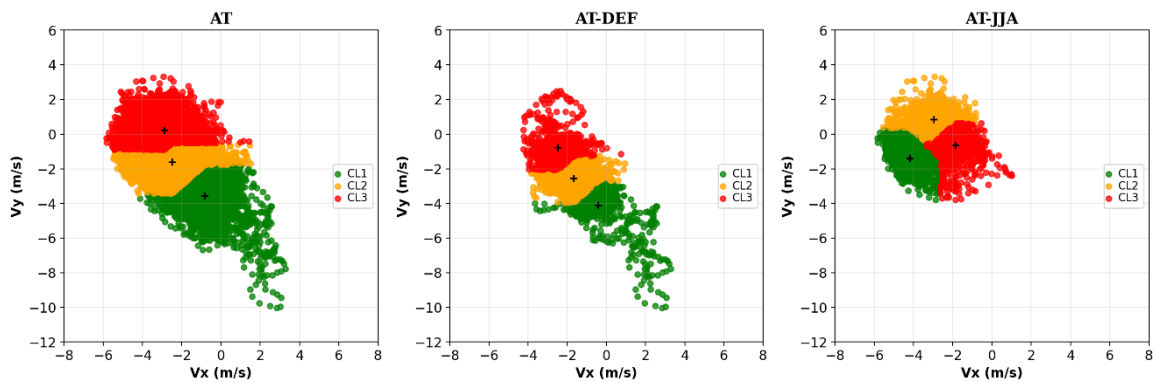
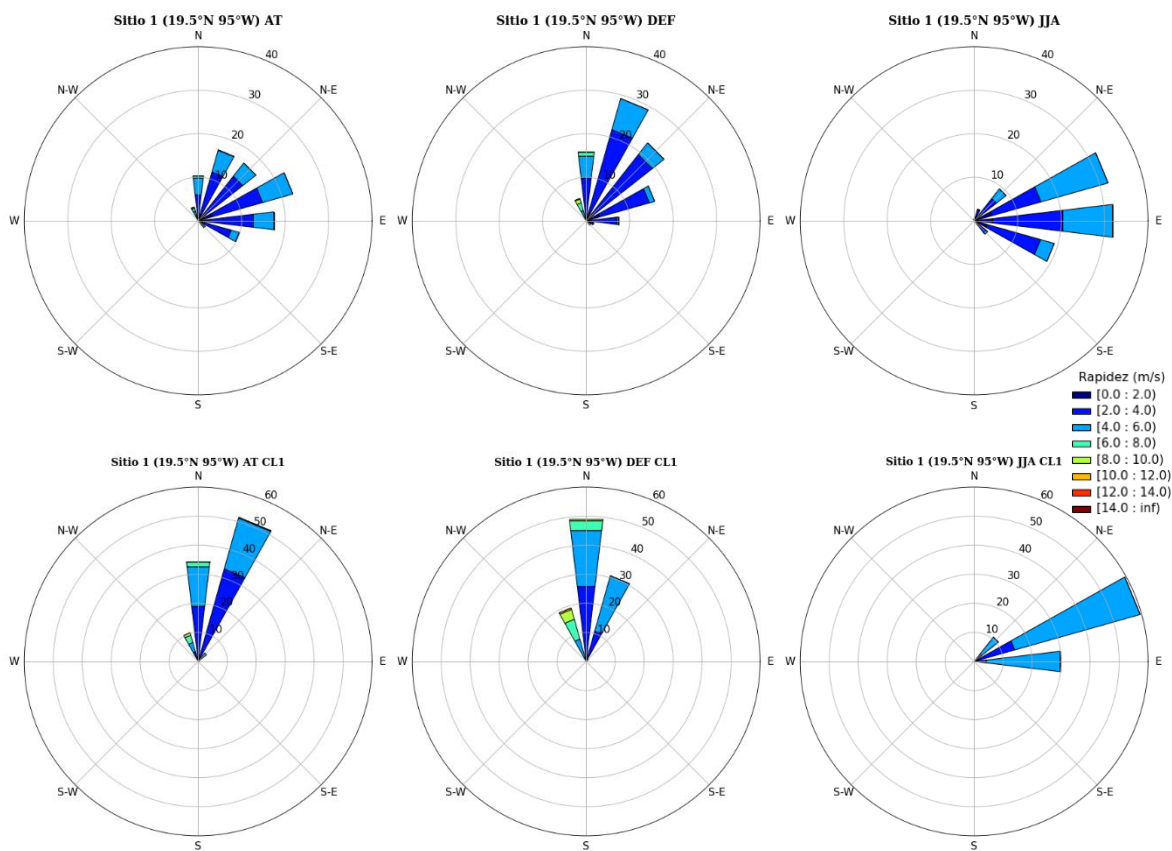


Fig. 3.3.2: Diagramas de dispersión de las componentes del viento para el AT (izquierda), AT-DEF (centro) y AT-JJA (derecha) y conglomerados obtenidos a partir del AC para el sitio 1.

**Tab. 3.3.1:** Estadística básica (número de datos, media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo) de los 3 conglomerados del AC para el AT (arriba), AT-DEF (centro) Y AT-JJA (abajo) del sitio 1. Las unidades de los estadísticos de la rapidez del viento son m/s.

AT	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
CL1	2501	3.97	1.21	1.81	10.43
CL2	3376	3.18	1.08	0.56	5.66
CL3	2883	3.02	1.12	0.09	5.85
<b>AT-DEF</b>					
CL1	565	4.66	1.43	2.73	10.43
CL2	931	3.13	0.74	1.31	5.15
CL3	664	2.71	0.79	0.58	4.46
<b>AT-JJA</b>					
CL1	787	4.45	0.57	3.06	5.84
CL2	738	3.20	0.88	1.11	5.57
CL3	683	2.15	0.72	0.44	4.50

Las rosas de viento para cada temporada y cada conglomerado (fig. 3.3.3) muestran que las direcciones predominantes para el AT y para el AT-JJA (fila 1), tienen componente del ENE y E; mientras que para el AT-DEF los vientos predominantes provienen del NNE y NE. Durante el AT y AT-DEF los vientos más intensos provienen del N y NNW, y en el AT-JJA del ENE y E, principalmente.



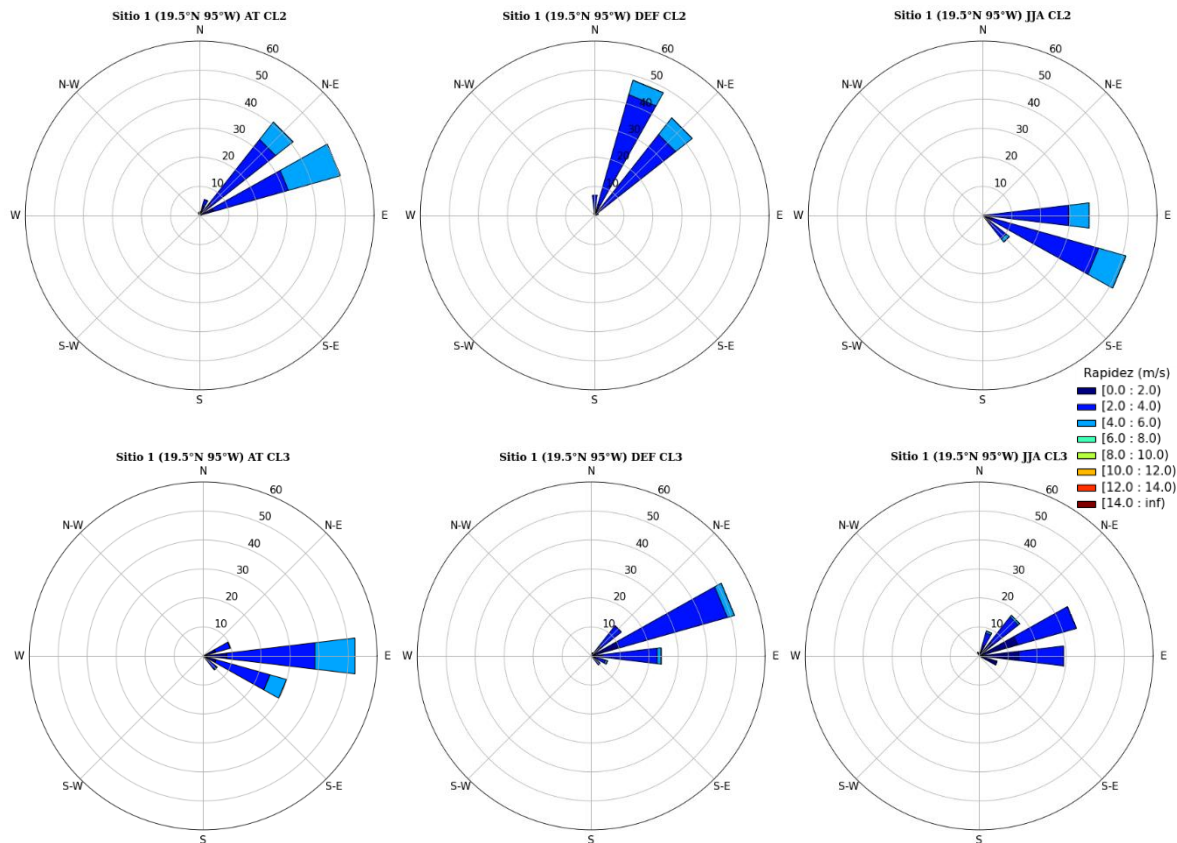


Fig. 3.3.3: Rosas de viento de los conglomerados obtenidos a partir del AC: AT (columna 1), AT-DEF (columna 2) y AT-JJA (columna 3), para el sitio 1. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).

Por su parte en las rosas de viento del conglomerado 1 (rapidez alta, fila 2), se observa que, durante el AT y AT-DEF, los vientos predominantes provienen del NNE y N, y los vientos máximos (8-12 m/s) provienen del NNW y N. En el AT-JJA los vientos máximos provienen principalmente del ENE.

En el conglomerado 2 (rapidez intermedia, fila 3), existe una diferencia significativa entre el AT y AT-DEF en cuanto a las direcciones predominantes, en el AT el viento proviene en su mayoría del ENE y en el AT-DEF del NNE. Durante el AT-JJA el viento proviene predominantemente del ESE. Los vientos más intensos en cada periodo tienen una magnitud de 4-6 m/s. Finalmente, en el conglomerado 3 (rapidez baja, fila 4), se aprecia que la dirección principal de donde proviene predominantemente el viento para el AT es E y para el AT-DEF y AT-JJA es ENE.

### 3.3.2 Sitio 4 (17.5°N, 95°W)

El sitio 4 está ubicado a la entrada del paso de Chivela y los histogramas (y valores estadísticos) de la rapidez del viento para el AT, AT-DEF y AT-JJA se presentan en la figura 3.3.4; en ellos se observan valores estadísticos semejantes al considerar los datos para el AT y para el invierno, diferenciándose del comportamiento para el verano.

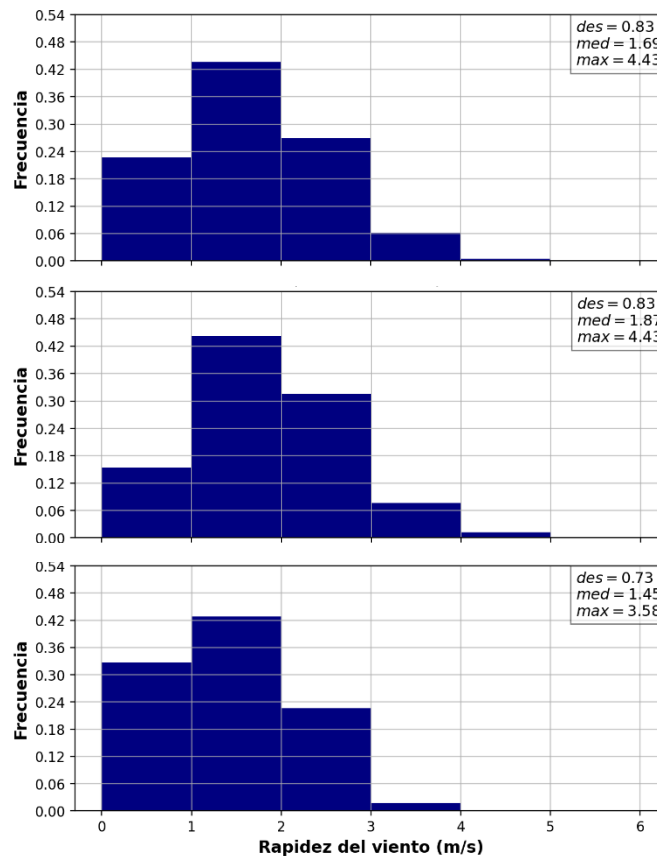


Fig. 3.3.4: Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para el AT (arriba), el AT-DEF (centro) y el AT-JJA (abajo) del sitio 4. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.

En cuanto a las gráficas de dispersión de las componentes del viento, es claramente apreciable que existe una relativa mayor dispersión para el AT-DEF en contraste con el AT-JJA; por tanto, en la tabla 3.3.2. se observan valores ligeramente más altos de rapidez del viento en cada uno de los clústers del AT-DEF comparados con los del AT-JJA. Es importante señalar que la disminución de la rapidez del viento en el sitio 4, respecto al sitio 1 (GM) ubicado en la superficie oceánica, se debe a que se encuentra influido por la rugosidad del terreno y por la fricción asociada (mayor en sitios continentales que en oceánicos).

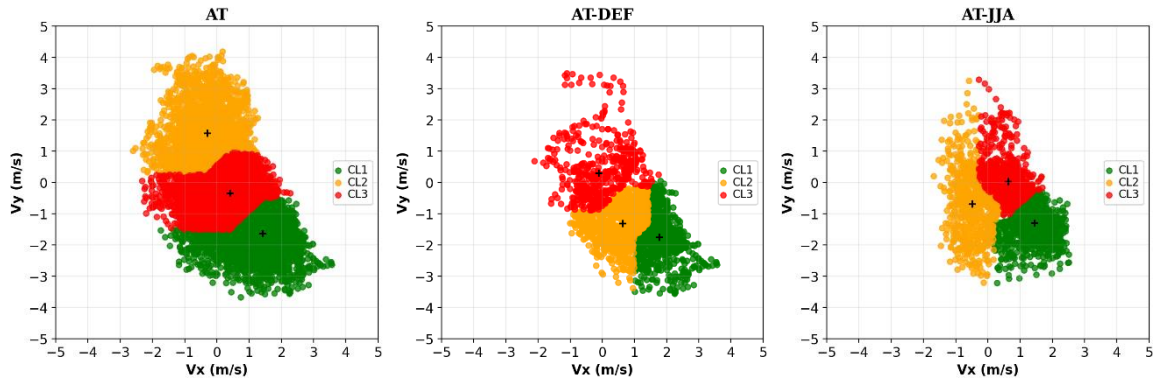


Fig. 3.3.5: Diagramas de dispersión de las componentes del viento para el AT (izquierda), AT-DEF (centro) y AT-JJA (derecha) y conglomerados obtenidos a partir del AC para el sitio 4.

Tab. 3.3.2: Estadística básica (número de datos, media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo) de los 3 conglomerados del AC para el AT (arriba), AT-DEF (centro) Y AT-JJA (abajo) del sitio 4. Las unidades de los estadísticos de la rapidez del viento son m/s.

AT	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
CL1	3612	2.26	0.58	1.35	4.43
CL2	1820	1.90	0.79	0.41	4.19
CL3	3328	0.95	0.40	0.01	2.41
<b>AT-DEF</b>					
CL1	835	2.58	0.62	1.45	4.43
CL2	874	1.60	0.48	0.57	3.50
CL3	451	1.08	0.69	0.01	3.67
<b>AT-JJA</b>					
CL1	860	2.05	0.50	1.19	3.58
CL2	609	1.28	0.65	0.22	3.31
CL3	739	0.89	0.45	0.08	3.31

Las rosas de viento (fig. 3.3.6) indican que los vientos predominantes y más intensos en los tres periodos (fila 1) provienen del NW. Esta misma característica se observa en los vientos del conglomerado 1 (rapidez alta, fila 2). El conglomerado 2 (rapidez intermedia, fila 3) es el que presenta el mayor contraste en cuanto a las direcciones predominantes del viento. Para el caso del AT se aprecia que las direcciones predominantes tienen componente del S y SSE, para el AT-DEF del NW, NNW y N, y para el AT-JJA del N y NNE. En general, esas direcciones presentan los vientos más intensos (2-4 m/s). En el conglomerado 3 (rapidez baja, fila 4) se observa la mayor dispersión en cuanto a direcciones predominantes se refiere. En el AT, el viento proviene principalmente del WNW, pero se presentan vientos casi de todas las direcciones, con excepción de los que provienen del SSE y SE; en este caso la magnitud de los vientos no

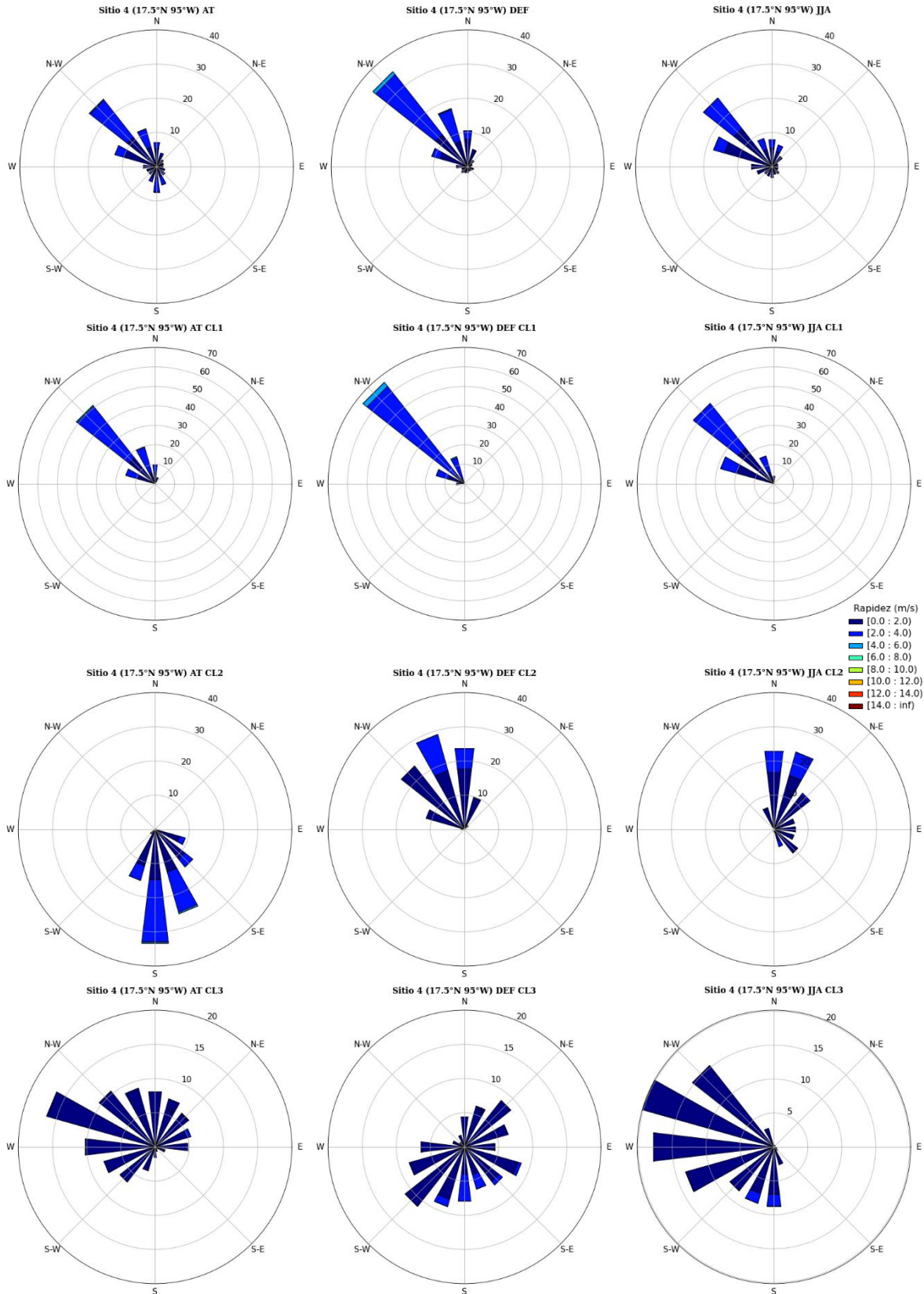


Fig. 3.3.6: Rosas de viento de los conglomerados obtenidos a partir del AC: AT (columna 1), AT-DEF (columna 2) y AT-JJA (columna 3), para el sitio 4. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).

alcanza los 2 m/s. Para el AT-DEF, el viento predominante es del SW, SSW y ESE, mientras que los vientos máximos provienen, en su mayoría, del SSW, S y SSE con magnitudes comprendidas entre los 2 y 4 m/s. Finalmente, en la rosa de vientos del AT-JJA, se observa que el viento proviene principalmente del W, WNW y NW, mientras que los vientos máximos (2-4 m/s) provienen del S y SSW.

### 3.3.3 Sitio 6 (16.75°N, 95°W)

El sitio 6 es representativo de la región central del paso de Chivela. Las distribuciones de frecuencias y estadísticos de la rapidez del viento (fig. 3.3.7) muestran las diferencias entre el AT, el AT-DEF y el AT-JJA. Para el caso del AT la rapidez media, rapidez máxima y desviación estándar son, respectivamente, 2.96 m/s, 8.02 m/s y 1.71 m/s, para el AT-DEF son 4.13 m/s, 8.02 m/s y 1.57 m/s, y para el AT-JJA 2.65 m/s, 6.17 m/s y 1.31 m/s.

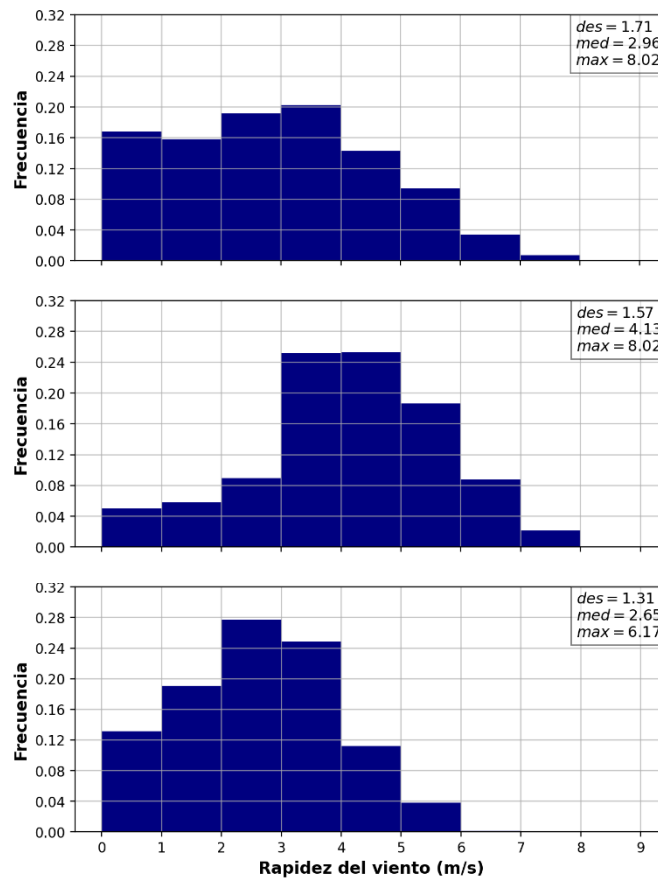


Fig. 3.3.7 Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para el AT (arriba), el AT-DEF (centro) y el AT-JJA (abajo) del sitio 6. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.



En cuanto a las componentes del viento (fig. 3.3.8), es apreciable que existe una mayor dispersión durante el invierno en contraste con el verano (similar al comportamiento de los sitios anteriores); por tanto, en la tabla 3.3.3, se observan valores más altos de rapidez del viento en cada uno de los conglomerados del invierno, respecto a los del AT y AT-JJA. Es importante señalar que el paso de Chivela es el sitio a partir del cual se observa la canalización de los vientos a través del estrecho; por tanto, los sitios 7 y 8 tienen un comportamiento físico similar.

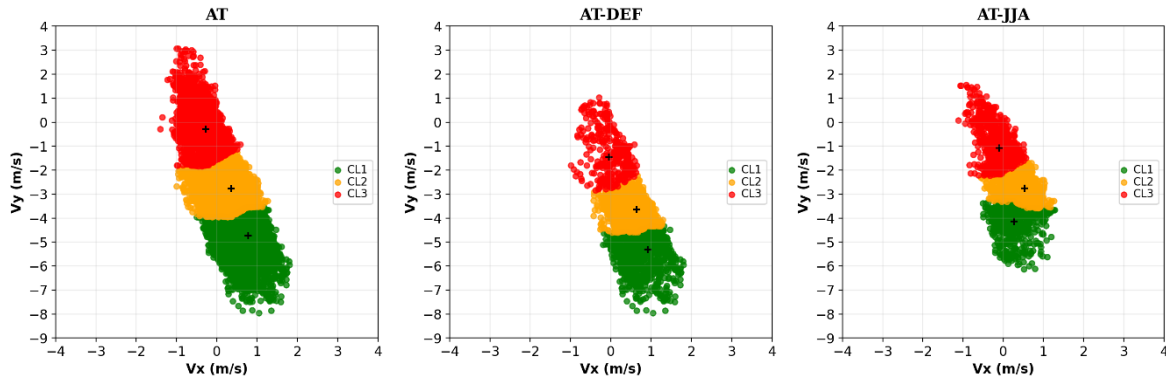


Fig. 3.3.8: Diagramas de dispersión de las componentes del viento para el AT (izquierda), AT-DEF (centro) y AT-JJA (derecha) y conglomerados obtenidos a partir del AC para el sitio 6.

Tab. 3.3.3: Estadística básica (número de datos, media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo) de los 3 conglomerados del AC para el AT (arriba), AT-DEF (centro) Y AT-JJA (abajo) del sitio 6. Las unidades de los estadísticos de la rapidez del viento son m/s.

AT	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
CL1	2832	4.94	0.88	3.64	8.02
CL2	3500	2.77	0.63	1.29	3.97
CL3	2428	0.91	0.51	0.01	3.23
<b>AT-DEF</b>					
CL1	899	5.55	0.76	4.46	8.02
CL2	935	3.70	0.52	2.33	4.63
CL3	326	1.43	0.74	0.04	2.86
<b>AT-JJA</b>					
CL1	583	4.26	0.62	3.33	6.17
CL2	921	2.79	0.44	1.77	3.74
CL3	704	1.12	0.51	0.04	2.30

Las rosas de viento (fig. 3.3.9) indican claramente que los vientos predominantes y más intensos en el AT, AT-DEF y AT-JJA (fila 1) provienen del N y NW. El comportamiento de la dirección del viento de los conglomerados 1 (fila 2) y 2 (fila 3) en los tres periodos de tiempo es bastante similar, ya que se observa que las direcciones del

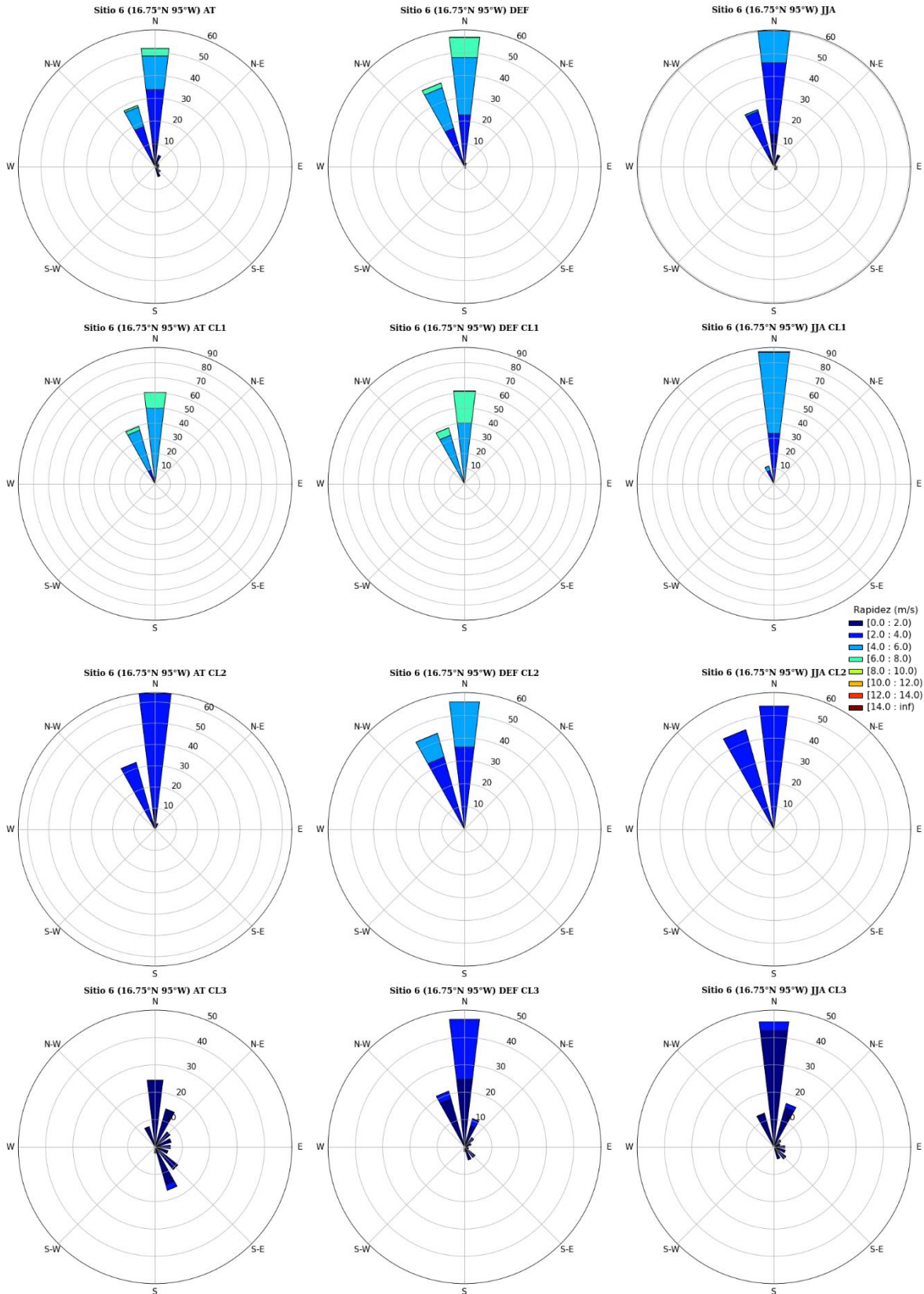


Fig. 3.3.9: Rosas de viento de los conglomerados obtenidos a partir del AC: AT (columna 1), AT-DEF (columna 2) y AT-JJA (columna 3), para el sitio 6. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).

viento predominante y de los vientos máximos (6-8 m/s) tienen componente del N y NW. Un aspecto interesante de mencionar es que para el conglomerado 1 (rapidez alta) en el AT-JJA, cerca del 90% de los vientos provienen del N. Por otra parte, el conglomerado 3 (rapidez baja) es el que presenta mayor dispersión en cuanto a la dirección de los vientos, ya que para el caso del AT los vientos predominantes provienen del N y SSE, para el AT-DEF del N y NNW y para el AT-JJA del N y NNE.

El comportamiento del campo de viento del sitio 6, en comparación con los sitios 1 al 5, es muy distinto ya que a partir del sitio 6 las direcciones principales de donde proviene el viento son N y NNW; dicho comportamiento se puede atribuir al efecto mecánico que genera la orografía compleja del paso de Chivela sobre el campo de viento, produciendo la canalización del viento a través de la brecha topográfica y haciendo que su magnitud aumente de manera gradual a medida que avanza en dirección al GT (donde se alcanza la rapidez máxima).

#### 3.3.4 Sitio 9 (15.5°N 95°W)

El Sitio 9 es representativo del GT (sitio marítimo en el extremo sur del dominio de estudio). En los histogramas de la figura 3.3.10 se observan las diferencias en el comportamiento estadístico del campo de viento para el AT, AT-DEF y AT-JJA. Para el caso del AT se observa que la rapidez media, rapidez máxima y desviación estándar son, respectivamente 6.26 m/s, 15.71 m/s y 3.54 m/s, para el AT-DEF son 9.34 m/s, 15.71 m/s y 2.85 m/s, y para el AT-JJA 4.93 m/s, 10.87 m/s y 2.42 m/s. De los resultados anteriores se corrobora que el GT es el sitio donde se presentan los valores más altos de rapidez de todo el dominio (15.71 m/s). Los vientos canalizados que descienden latitudinalmente en dirección al Golfo de Tehuantepec aumentan significativamente de rapidez debido a la disminución de la fricción en ausencia de orografía de la parte continental.

En cuanto a las componentes del viento es apreciable en la figura 3.3.11 que existe una relativa mayor dispersión para el AT-DEF, en contraste con el AT-JJA (similar a las gráficas de dispersión de los demás sitios); por tanto, en la tabla 3.3.4. se observan valores

más altos de rapidez del viento en cada uno de los conglomerados del AT-DEF, en comparación con los demás periodos.

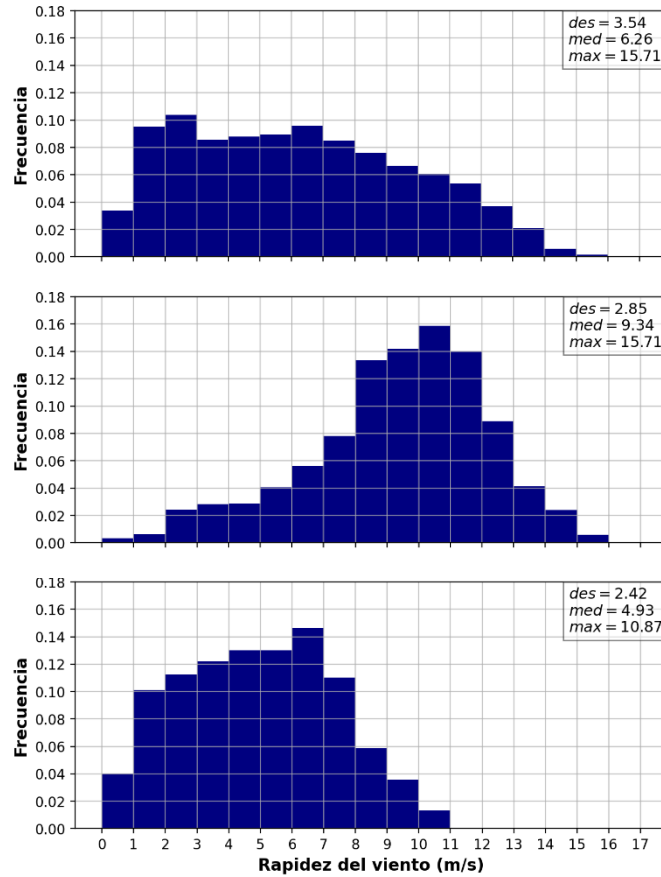


Fig. 3.3.10: Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento para el AT (arriba), el AT-DEF (centro) y el AT-JJA (abajo) del sitio 9. En los recuadros se muestran, para cada sitio, los valores de la desviación estándar, rapidez media y máxima, en m/s.

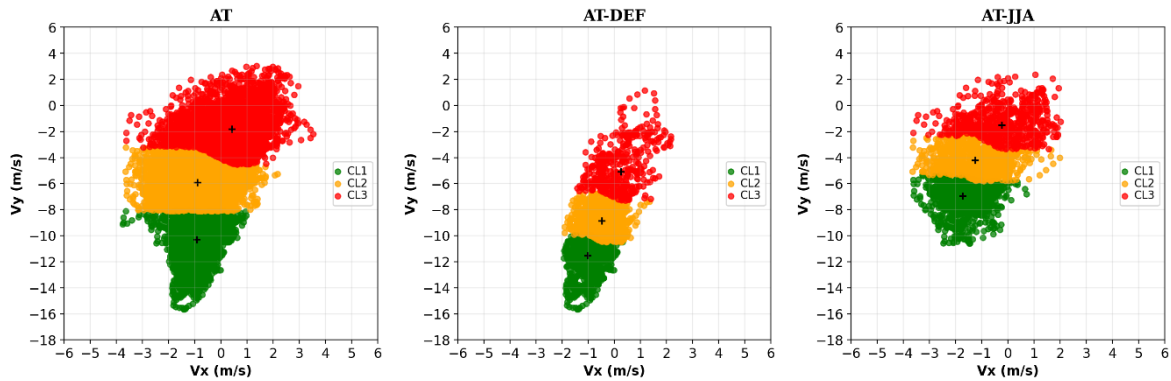
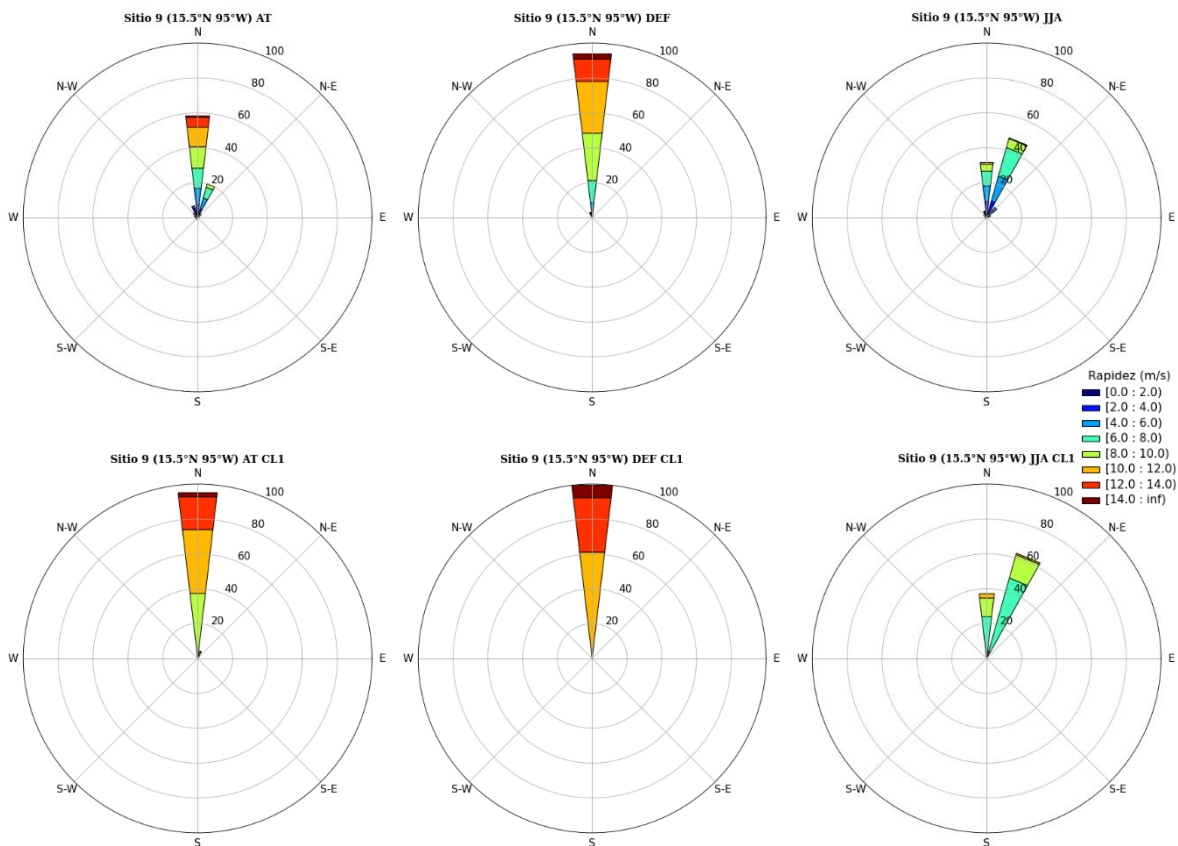


Fig. 3.3.11: Diagramas de dispersión de las componentes del viento para el AT (izquierda), AT-DEF (centro) y AT-JJA (derecha) y conglomerados obtenidos a partir del AC para el sitio 9.

**Tab. 3.3.4:** Estadística básica (número de datos, media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo) de los 3 conglomerados del AC para el AT (arriba), AT-DEF (centro) Y AT-JJA (abajo) del sitio 9. Las unidades de los estadísticos de la rapidez del viento son m/s.

AT	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
CL1	2693	10.61	1.62	8.13	15.71
CL2	3259	6.07	1.23	3.37	8.63
CL3	2808	2.31	1.02	0.09	4.78
<b>AT-DEF</b>					
CL1	895	11.86	1.21	10.00	15.71
CL2	859	8.88	0.90	6.69	10.48
CL3	406	4.76	1.64	0.29	7.30
<b>AT-JJA</b>					
CL1	852	7.43	1.17	5.71	10.87
CL2	757	4.48	0.80	2.68	6.26
CL3	599	1.93	0.81	0.15	4.19

En la figura 3.3.12 se muestra que para el AT (fila 1), los vientos predominantes y más intensos (12-14 m/s) provienen del N, asimismo para el AT-DEF (fila 1), pero con una mayor frecuencia de ocurrencia (~92%) y magnitud (>14 m/s). Por su parte, para el AT-JJA (fila 1), los vientos predominantes provienen del NNE y los más intensos (10-12 m/s) del N.



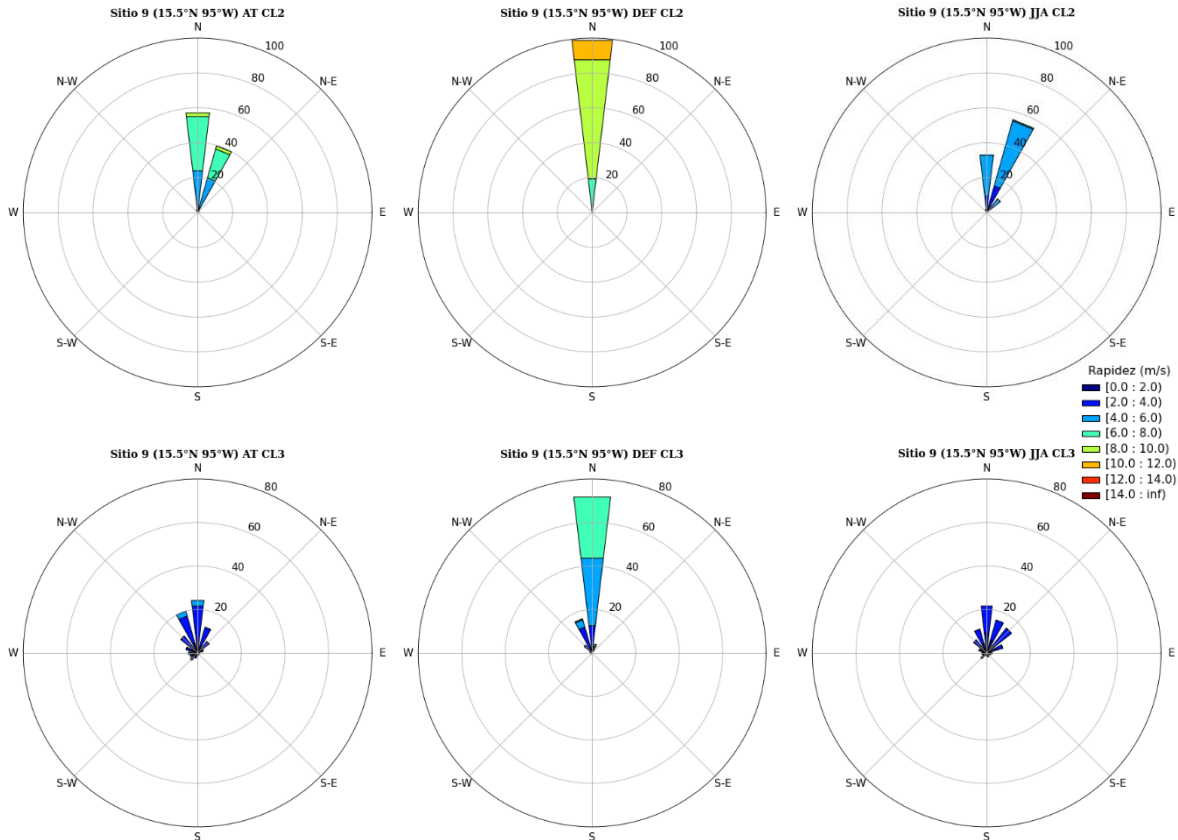


Fig. 3.3.12: Rosas de viento de los conglomerados del AC: AT (columna 1), AT-DEF (columna 2) y AT-JJA (columna 3), para el sitio 9. Los valores de los círculos concéntricos son indicativos de la frecuencia relativa (%).

En las rosas de viento del conglomerado 1 (rapidez alta, fila 2) se observa que, para el AT y AT-DEF, los vientos predominantes y más intensos (>14 m/s) provienen casi en su totalidad del N, mientras que para el AT-JJA, los vientos predominantes provienen del NNE y los más intensos (10-12 m/s) provienen con mayor frecuencia del N. En el conglomerado 2 (rapidez intermedia, fila 3), para el AT, los vientos predominantes y más intensos (8-10 m/s) provienen del N, para el AT-DEF, los vientos provienen en su totalidad del N y los más intensos tienen una magnitud entre los 10 y 12 m/s, y para el AT-JJA, los vientos provienen en su mayoría del NNE con una rapidez promedio entre los 4 y 6 m/s. Finalmente, el conglomerado 3 (rapidez baja, fila 4) es el que muestra la mayor dispersión en cuanto a las direcciones del viento, durante el AT y AT-JJA, los vientos predominantes provienen principalmente del N, NNW y NNE, con una rapidez promedio de 2 a 4 m/s, y para el AT-DEF, provienen mayormente del N ( $\approx 72\%$ ) con magnitudes máximas que no superan los 8 m/s.

### 3.4 Caracterización estacional de la variabilidad diurna

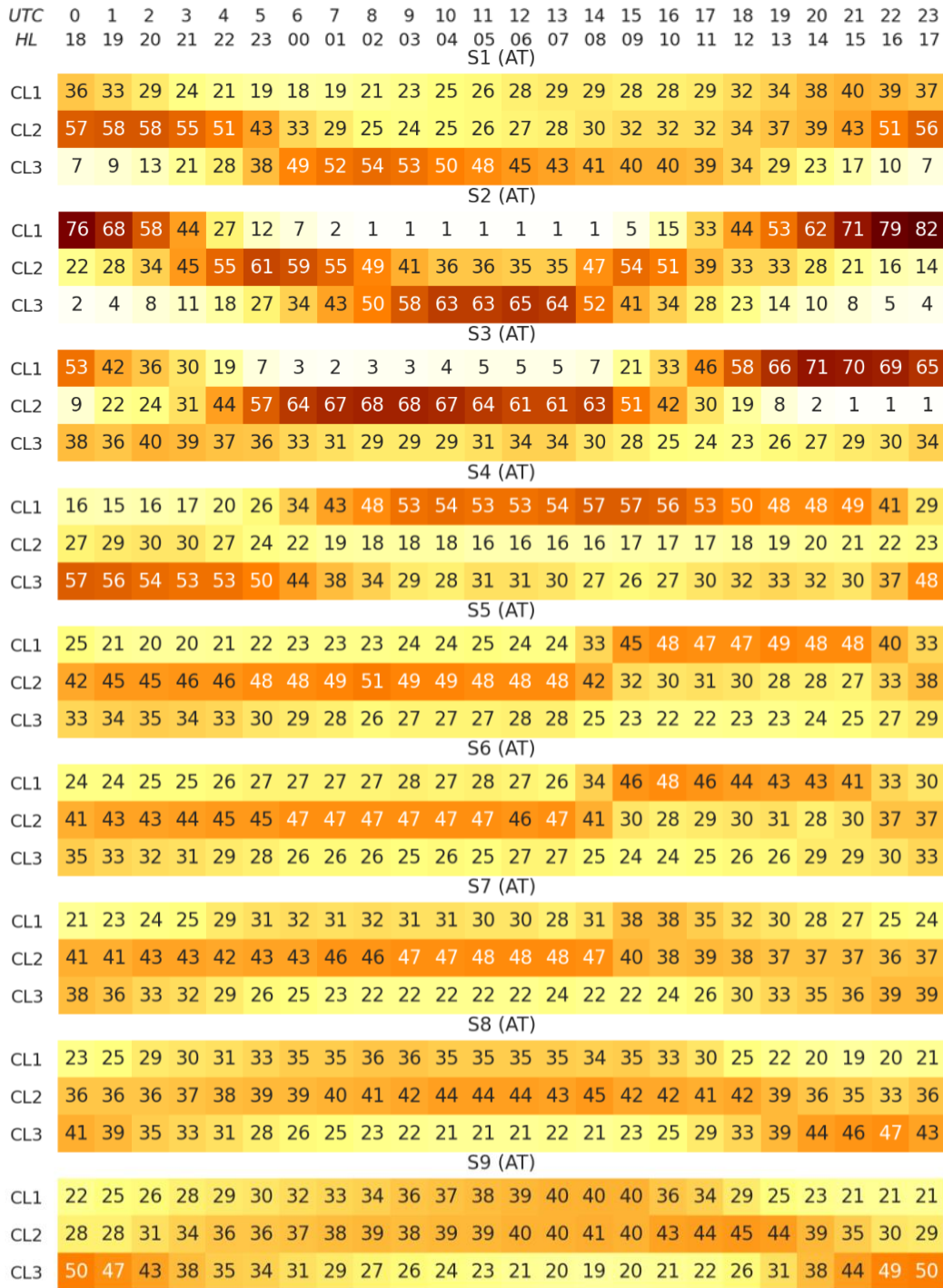
Una vez descritos los contrastes del AC, a continuación, se muestran y analizan los mapas de calor de las distribuciones horarias de los conglomerados 1, 2 y 3 para el AT, AT-DEF y AT-JJA.

#### 3.4.1 Año típico (AT)

Para facilitar la interpretación de los mapas de calor conviene recordar que en los análisis previos se detectó que los sitios 1, 2, 3 y 4 (GM y entrada al paso de Chivela), tienen un comportamiento claramente diferenciado de los sitios 5, 6, 7, 8 y 9 (parte central del paso de Chivela, salida y GT). Además, es necesario recordar que los conglomerados del AC fueron ordenados de acuerdo con los valores promedio de rapidez del viento de sus medioides; el CL1 es representativo de una rapidez del viento alta, el CL2 de una rapidez intermedia y el CL3 de una rapidez baja.

Los mapas de calor del AT (tab. 3.4.1) proporcionan información sobre el porcentaje de ocurrencia de los vientos de magnitud: alta, intermedia y baja a lo largo del día en los 9 sitios. Para el sitio 1 (GM) se observa que los vientos de mayor magnitud son menos predominantes a lo largo del día que los de magnitud intermedia y baja, ocurriendo mayormente durante la tarde (13-19 HL). Los vientos de magnitud intermedia predominan entre las 15 y 23 horas, y los más débiles entre la medianoche y la mañana (00-11 hrs). Por su parte, el sitio 2 tiene un comportamiento distinto respecto a los sitios 1 y 3; en éste los vientos de mayor magnitud predominan entre el mediodía y la tarde-noche (12-20 hrs), los de magnitud intermedia entre las 21 y 01 horas y de 09 a 11 horas, y los más débiles predominan entre la madrugada y la mañana (02-08 hrs). En el sitio 3, los vientos más intensos predominan entre las 11 y 19 horas, los de magnitud intermedia entre las 22 y 10 horas, y los más débiles son menos frecuentes a lo largo del día, ocurriendo mayormente durante la tarde-noche (18-23 hrs). En el sitio 4 se observa un patrón de ocurrencia horario de los vientos diferente a los sitios anteriores, con los vientos más intensos predominando entre la madrugada y la tarde (01-16 hrs), y los más débiles entre la tarde y la medianoche (17-00 hrs); en este sitio los vientos de magnitud intermedia

Tab. 3.4.1: Mapas de calor de las distribuciones horarias (expresadas en % de cero a cien) de los conglomerados 1, 2 y 3 para el año típico (AT). En la parte superior se muestra la hora UTC y la hora local (HL) UTC-6.





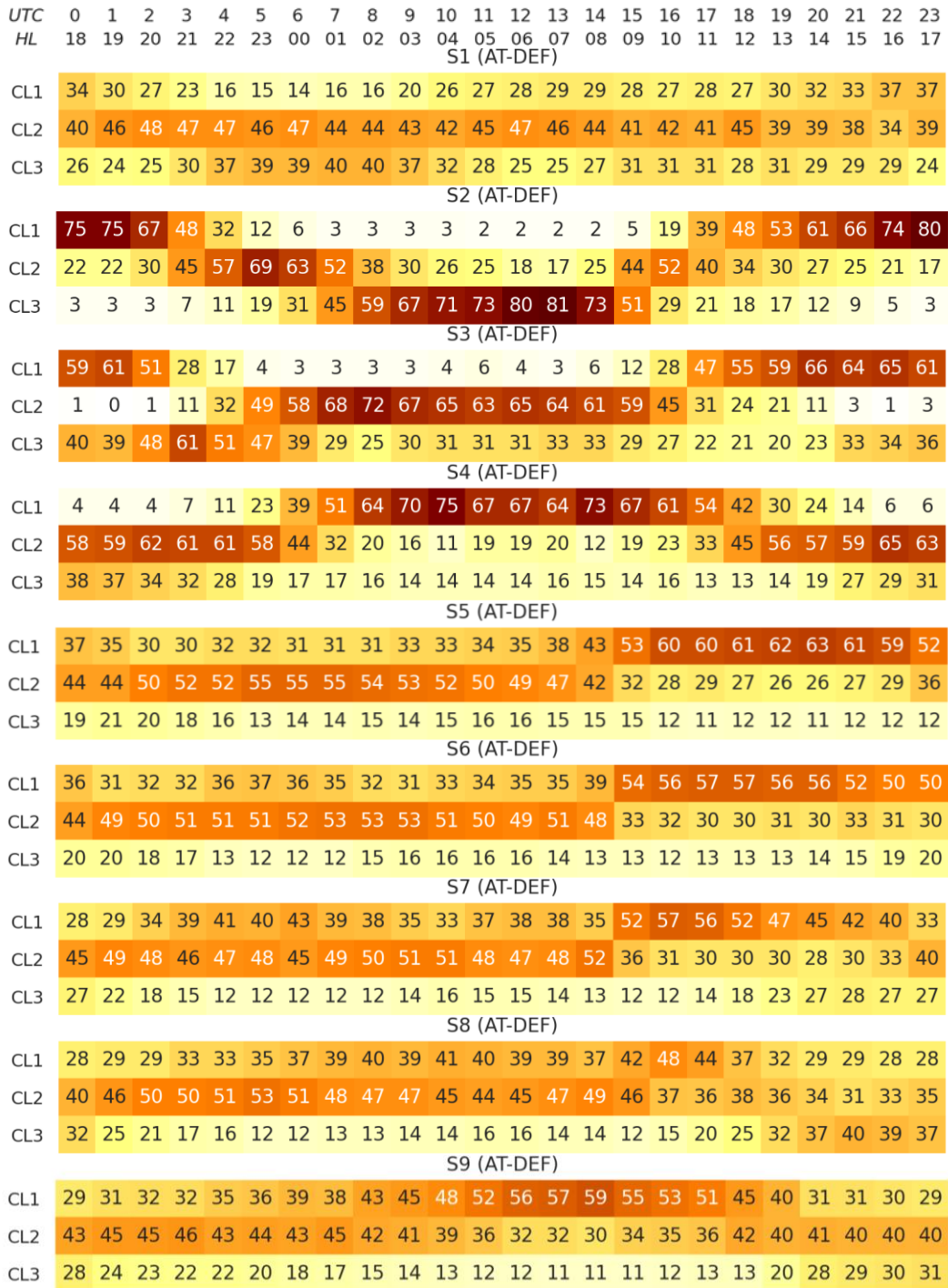
no muestran un horario preferente, sin embargo, ocurren mayormente en la tarde-noche (18-22 hrs). Es interesante resaltar que, en los primeros cuatro sitios, es donde se presentan los mayores contrastes en el comportamiento de la variabilidad diurna del viento. El aspecto anterior es de esperarse y concuerda con que, en las secciones anteriores, se ha identificado que a partir del sitio 6 (paso de Chivela) se produce la canalización del viento debido al efecto mecánico que induce la topografía compleja sobre el campo de viento.

Continuando con el análisis, las distribuciones horarias de los sitios 5 y 6 para el AT son muy similares y en ellas se aprecia que los vientos de mayor magnitud predominan entre las 09 y 15 horas, los de magnitud intermedia entre la tarde y la mañana (17-08 hrs), y los más débiles no predominan a ninguna hora del día, pero ocurren mayormente en la tarde-noche (18-21 hrs). A partir del sitio 6 se observa claramente que el porcentaje de ocurrencia de los vientos de los tres conglomerados es más homogéneo. En el sitio 7 (salida del paso de Chivela) se observa que los vientos predominantes a lo largo del día son de magnitud intermedia, y tanto los vientos de mayor magnitud como las más débiles, no predominan a lo largo del día y su variabilidad diurna es relativamente homogénea; sin embargo, dichos vientos se presentan mayormente entre las 09 y 11 horas, y en la tarde (13-19 hrs), respectivamente. En el sitio 8 los vientos de magnitud intermedia predominan entre las 19 y 12 horas, y los más débiles en la tarde (14-19 hrs). A pesar de no predominar en ningún horario en específico, los vientos más intensos mayormente ocurren entre la medianoche y la mañana (00-09 hrs). Similarmente, en el sitio 9 (GT) los vientos de magnitud intermedia predominan entre las 22 y 13 horas, y los más débiles en la tarde (15-19 hrs). Los vientos más intensos no predominan a lo largo del día, no obstante, ocurren en su mayoría entre las 03 y 09 horas.

### **3.4.2 Invierno del año típico (AT-DEF)**

A continuación, se presenta el análisis de las distribuciones horarias de los vientos, de los conglomerados 1, 2 y 3, para el AT-DEF (tab. 3.4.2). Para el sitio 1 se observa que los vientos de mayor magnitud y los más débiles, son menos predominantes a lo largo del

Tab. 3.4.2: Mapas de calor de las distribuciones horarias (expresadas en % de cero a cien) de los conglomerados 1, 2 y 3 para el invierno del año típico (AT-DEF). En la parte superior se muestra la hora UTC y la hora local (HL) UTC-6.



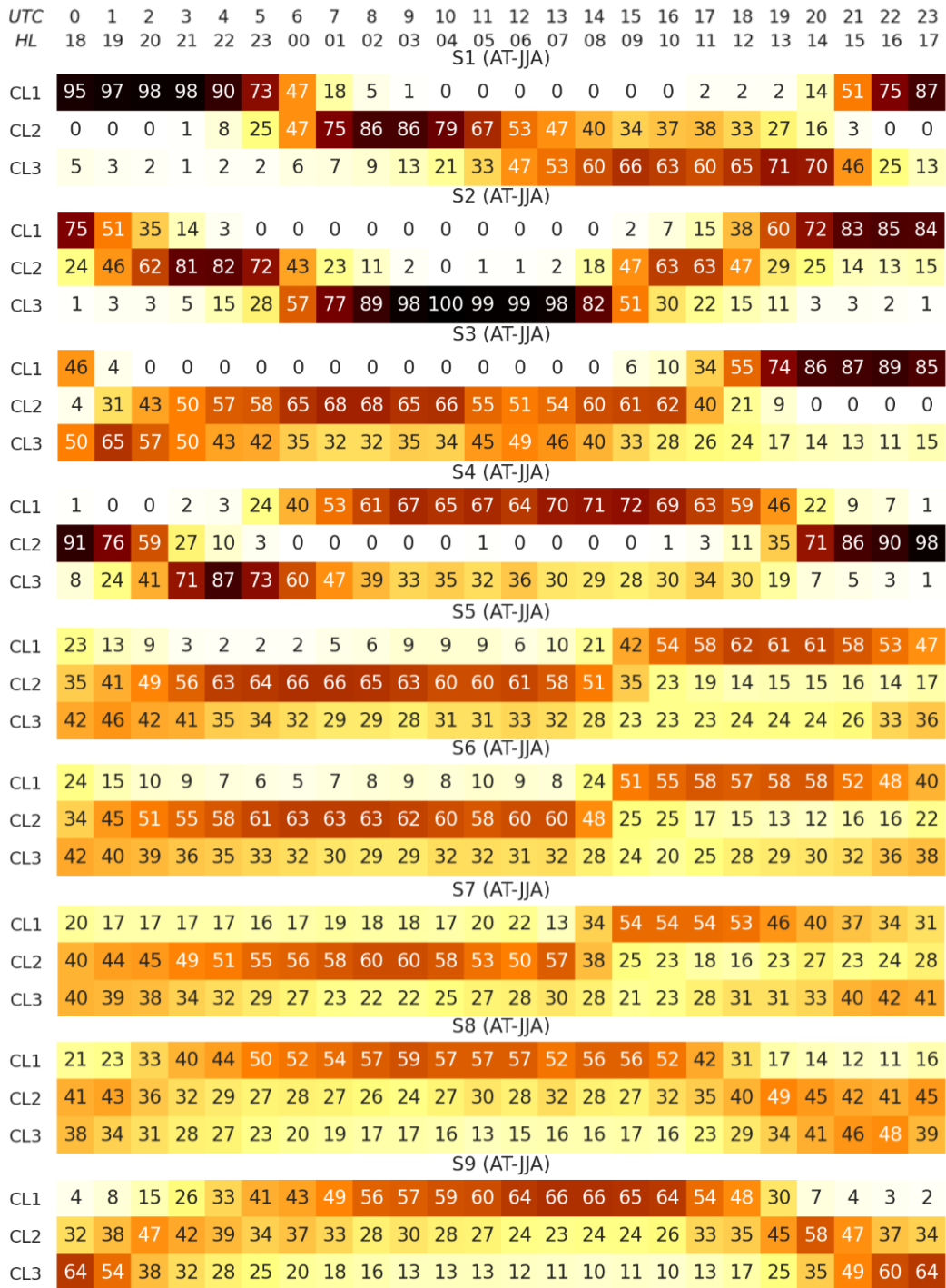
día que los de magnitud intermedia, ocurriendo mayormente durante la tarde (14-18 HL) y la noche (22-03 hrs), respectivamente. Los vientos de magnitud intermedia predominan prácticamente, a lo largo de todo el día, pero ocurren mayormente entre las 19 y 12 horas. Por otro lado, en el sitio 2 se observa un comportamiento distinto respecto al sitio 1 y 3; en este los vientos de mayor magnitud predominan entre el mediodía y la tarde-noche (12-20 hrs), los de magnitud intermedia entre las 10 y 11 horas y de 22 a 01 horas, y los de magnitud más baja entre las 02 y 09 horas. En el sitio 3 los vientos de mayor magnitud ocurren mayormente entre las 11 y 20 horas (similar al sitio 2), los de magnitud intermedia entre la medianoche y la mañana (00-10 hrs), y los más débiles entre las 21 y 22 horas. En el sitio 4 también se aprecia un comportamiento distinto respecto a los primeros sitios; en éste los vientos de mayor magnitud predominan entre la madrugada y la mañana (01-11 hrs) y los de magnitud intermedia entre las 13 y 23 horas. A pesar de que los vientos más débiles no predominan en ningún horario, ocurren mayormente entre las 17 y 21 horas.

Por su parte, las distribuciones horarias de los sitios 5, 6 y 7 para el AT-DEF son muy similares y se asemejan notablemente a las del AT (distribuciones horarias homogéneas). En los sitios 5, 6 y 7, los vientos de mayor magnitud predominan entre la mañana y la tarde (09-17 hrs) y los de magnitud intermedia entre las 18 y 08 horas. En lo que difieren estos sitios, es en los horarios en los que mayormente ocurren los vientos más débiles: en el sitio 5 tienen lugar en la tarde-noche (18-22 hrs), en el sitio 6 entre las 16 y 21 horas, y en el sitio 7 entre las 13 y 19 horas. En el sitio 8 los vientos de mayor magnitud ocurren predominantemente entre las 10 y 11 horas, los de magnitud intermedia entre las 18 y 09 horas, y los más débiles en la tarde (14-17 hrs). Finalmente, en el sitio 9 se aprecia que los vientos de mayor magnitud predominan entre las 04 y 11 horas, y los de magnitud intermedia entre la tarde y la madrugada (14-01 hrs). Aunque los vientos más débiles no predominan en ningún horario en específico, ocurren mayormente entre las 14 y 22 horas.

### 3.4.3 Verano del año típico (AT-JJA)

Continuando con el análisis, se presentan los mapas de calor de la distribución horaria de los vientos de los conglomerados 1, 2 y 3, para el AT-JJA (tab. 3.4.3).

Tab. 3.4.3: Mapas de calor de las distribuciones horarias (expresadas en % de cero a cien) de los conglomerados 1, 2 y 3 para el verano del año típico (AT-JJA). En la parte superior se muestra la hora UTC y la hora local (HL) UTC-6.



En el sitio 1 se observa un cambio significativo en el comportamiento del campo de viento, respecto al del AT-DEF. Durante el AT-JJA los vientos de mayor magnitud predominan, casi en totalidad, entre las 16 y 23 horas, los de magnitud intermedia en la madrugada (01-05 hrs), y los más débiles entre las 08 y 14 horas. En el sitio 2 los vientos de mayor magnitud predominan en la tarde (13-18 hrs), los de magnitud intermedia entre las 10 y 12 horas y de 20 a 23 horas, y los más débiles entre la medianoche y la mañana (00-08 hrs). En el sitio 3 los vientos de mayor magnitud predominan entre el mediodía y la tarde (12-17 hrs), los de magnitud intermedia entre las 22 y 10 horas, y los más débiles entre las 18 y 20 horas. Por su parte, en el sitio 4 los vientos de mayor magnitud predominan entre la madrugada y la tarde (01-13 hrs), los de magnitud intermedia entre las 14 y 20 horas, y los más débiles entre las 21 y 00 horas. Un aspecto muy interesante que se presenta en estos primeros cuatro sitios es que, para algunos de ellos, los conglomerados presentan porcentajes de ocurrencia de hasta 100%, es decir, los vientos de algunos conglomerados tienen una predominancia total (recuadros con tonalidades cercanas al negro) durante un horario en específico, a diferencia de los menores porcentajes de ocurrencia de los conglomerados del AT-DEF.

Por otro lado, en los sitios 5 y 6 los vientos de mayor magnitud predominan entre la mañana y la tarde (09-17 hrs), los de magnitud intermedia entre las 20 y 07 horas, y los más débiles entre las 18 y 19 horas. En el sitio 7 los vientos de mayor magnitud ocurren predominantemente entre la mañana y la tarde (09-14 hrs), los de magnitud intermedia entre las 19 y 07 horas, y los más débiles entre las 15 y 17 horas. En el sitio 8 los vientos de mayor magnitud predominan entre la noche y la mañana (21-11 hrs), los de magnitud intermedia entre las 12 y 14 horas y de 17 a 19 horas, mientras que los más débiles predominan entre las 15 y 16 horas. Finalmente, en el sitio 9 se observa que los vientos de mayor magnitud predominan entre la noche y el mediodía (23-12 hrs), los de magnitud intermedia entre las 13 y 14 horas y de 20 a 22 horas, y los más débiles en la tarde (16-19 hrs).

# Capítulo 4

## Conclusiones

*Las nubes hoy  
resultaron ser flores caídas  
cuando crucé la cima.  
SÓCHÓ*

El análisis del comportamiento climatológico del campo de viento en 9 sitios a lo largo del IT mediante rosas de viento, distribuciones de frecuencias, ciclos anuales y ciclos diarios mensuales promedio (figs. 3.2.1 a 3.2.8), permitió identificar las diferencias en el comportamiento de las regiones al norte, centro y sur del paso de Chivela, así como en las regiones oceánicas en ambos extremos del istmo. Los histogramas de la rapidez del viento para los sitios 1 al 4 (fig. 3.2.1) considerando el AT, muestran que el sitio 1 (GM) es donde se presenta la mayor rapidez promedio (5.24 m/s). Estadísticamente, los sitios 2, 3 y 4 tienen un comportamiento parecido (sitios ubicados en continente) ya que sus valores de desviación estándar, media aritmética y rapidez máxima son similares, con un rango de rapidez promedio entre 2.37 (sitio 3) y 3.02 m/s (sitio 4). Por otra parte, en las rosas de viento para los sitios 1 al 4 (fig. 3.2.2), se observa que en el sitio 1 se presenta una mayor dispersión en cuanto a la dirección del viento, en comparación con los otros sitios; los vientos más intensos provienen del NW, NNW y N, mientras que las direcciones predominantes son del E y ESE. El sitio 2, ubicado en la parte oriental de la entrada al IT, muestra un comportamiento muy distinto al del GM, con vientos predominantes del N y NNE. Por su parte, el sitio 3, ubicado más hacia el oeste, muestra vientos predominantes del NW y NNW, así como cierta proporción de vientos del SE. En el sitio 4, ubicado justo al norte del paso de Chivela, se observa predominancia clara de vientos del NW, y una

diferencia notable con respecto a los otros sitios es la mayor proporción de vientos del sur.

En los ciclos anuales promedio de la rapidez del viento de los sitios 1, 2, 3 y 4 (fig. 3.2.3), se aprecia la diferencia notable en el comportamiento del sitio 1 respecto a los otros sitios. En el ciclo anual del sitio 1, se observa que los promedios máximos de rapidez ocurren durante noviembre, diciembre y enero, mientras que los mínimos ocurren en julio y agosto. Por otro lado, los ciclos anuales de los sitios 2, 3 y 4 muestran los máximos en marzo y abril, mientras que los mínimos se presentan de julio a septiembre, con excepción del sitio 2 que muestra un máximo relativo de la rapidez del viento en julio-agosto, característica que es más clara para los sitios que se ubican más próximos a la salida del IT.

Por otra parte, en los histogramas de los sitios 5 al 9 (fig. 3.2.5) se observa que el rango de la rapidez promedio del viento se encuentra entre 4.17 y 8.09 m/s. El sitio 5 es representativo de la entrada al paso de Chivela, mientras que el 6 es representativo de su parte central; ambos sitios poseen un comportamiento estadístico similar que se ve reflejado en sus valores de desviación estándar, media aritmética y rapidez máxima. Por otra parte, en los histogramas de los sitios 7, 8 (salida del paso de Chivela) y 9 (GT) se percibe claramente la intensificación de la rapidez del viento, atribuida a la canalización de los vientos a través del paso de Chivela. Respecto al análisis de las direcciones del viento, en la figura 3.2.6 se muestra que para el sitio 5 el viento predominante proviene del NNW, mientras que para el sitio 6 proviene del N. Las direcciones anteriores también están asociadas a las mayores magnitudes de rapidez. Del sitio 6 al 9, la dirección predominante del viento es (notablemente) del N; este comportamiento coincide con el posible efecto mecánico de la orografía compleja del IT sobre el campo de viento, que se manifiesta como la canalización de los vientos a partir del sitio 6 (paso de Chivela) en dirección al GT.

Los ciclos anuales de los sitios 5 al 9 (fig. 3.2.7) muestran una clara correspondencia en los meses en que ocurren los máximos y mínimos de rapidez: los máximos ocurren en noviembre, diciembre y enero, y los mínimos ocurren en los meses de junio y septiembre. Durante el mes de julio se observa un aumento relativo en la rapidez del viento. Otro

aspecto que se desprende del análisis de los ciclos anuales es el aumento de la rapidez del viento a medida que se desciende latitudinalmente en dirección al GT. Sin embargo, es particularmente interesante notar que este comportamiento se invierte durante los meses de abril a junio, cuando en el sitio 5 se tienen los promedios de rapidez del viento más altos, en comparación con los sitios 6 y 7, y en el sitio 7 se presentan los promedios más bajos.

Asimismo, se caracterizaron las variaciones diurnas del campo de viento a lo largo del IT para el invierno y el verano mediante un análisis de conglomerados de la rapidez del viento promedio horaria. El análisis de conglomerados permitió establecer una división de los datos del viento en tres grupos, tanto para el año típico como para las temporadas de invierno y verano, en los sitios elegidos para el análisis. Los conglomerados se relacionaron con la magnitud de los vientos y se determinaron las direcciones predominantes para cada uno de ellos. Finalmente, se establecieron los horarios preferentes de ocurrencia de los vientos de cada uno de los conglomerados de todos los sitios analizados, para el año típico, invierno y verano.

Los mapas de calor de las distribuciones horarias de los conglomerados 1, 2 y 3 del año típico, del verano y el invierno (tabs. 3.4.1 a 3.4.3), muestran que, para los tres periodos, tanto en el sitio ubicado en el GM como en los ubicados al norte del paso de Chivela, existen contrastes notables en los horarios y porcentajes de ocurrencia de los vientos predominantes de los tres conglomerados a lo largo del día. Mientras que en el paso de Chivela y en los sitios ubicados al sur, el porcentaje de ocurrencia es más homogéneo, por tanto, la variabilidad diurna es menor. El comportamiento anterior concuerda con el de los ciclos diurnos mensuales promedio de los mismo sitios (3.2.4 y 3.2.8), en los que se aprecia una variación diurna muy pequeña de no más de un 1 m/s. Los sitios 1, 4, 6 y 9 presentan un comportamiento interesante en cuanto al horario de ocurrencia de los vientos más intensos y su dirección predominante asociada, para el invierno y el verano. En el sitio 1, durante el invierno, los vientos más intensos provienen principalmente del N y ocurren mayormente entre las 14 y 18 horas (HL); mientras que, para el verano, provienen predominantemente del ENE y ocurren casi en totalidad entre las 16 y 23 horas. Por su parte, en el sitio 4 los vientos más intensos tienen un



comportamiento muy parecido para el invierno y el verano: en ambas temporadas los vientos del CL1 provienen en su mayoría del NW y ocurren predominantemente entre las 01 y 11 horas. De manera similar, en el sitio 6 los vientos más intensos se comportan de forma parecida para el invierno y el verano: en ambas temporadas los vientos del CL1 provienen principalmente del N y ocurren mayormente entre las 09 y 17 horas. Por otra parte, en el sitio 9, durante el invierno, los vientos más intensos provienen en su totalidad del N y ocurren predominantemente entre las 04 y 11 horas; mientras que, para el verano, provienen principalmente del NNE y ocurren en su mayoría entre las 23 y 12 horas.

De acuerdo con la caracterización estacional de las variaciones diurnas del campo de viento en el IT llevada a cabo en esta investigación, se recomienda extender la caracterización para los promedios de años Niño y Niña. Además, se sugiere enfocar los futuros esfuerzos en realizar análisis dinámicos o termodinámicos que permitan identificar y explicar los mecanismos físicos que influyen en los regímenes de viento presentes a lo largo del día en la región.

# Referencias

- AMDEE, (2018). México. Recuperado de <https://www.evwind.com/2019/10/14/la-energia-eolica-en-mexico-llegara-a-15-000-mw-en-2024/>
- Alexander, M. A., Seo, H., Xie, S. P., & Scott, J. D. (2012). ENSO's impact on the gap wind regions of the Eastern tropical Pacific Ocean. *Journal of Climate*, 10, 3549–3565. doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00320.1
- Barrios, A. F. y Carvajal, Y. (2006). Regionalización de índices de aridez y agresividad climática en Colombia utilizando análisis multivariado. Conformación estadística de una base de datos nacional homogénea. Tesis de grado. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Santiago de Cali
- Beaver, S., Palazoglu, A. (2006). Cluster analysis of hourly wind measurements to reveal synoptic regimes affecting air quality. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* .45: 1710–1726. DOI:10.1175/JAM2437.1
- Bourassa, M. A., Zamudio, L., & Brien, J. J. O. (1999). Noninertial flow in NSCAT observations of Tehuantepec winds. *Journal of Geophysical Research*, 104, 11311–11319.
- Brennan, M. J., Cobb III, H. D., & Knabb, R. D. (2010). Observations of Gulf of Tehuantepec gap wind events from QuikSCAT: An updated event climatology and operational model evaluation. *Weather and Forecasting*. Vol. 25: 646-658. DOI: 10.1175/2009WAF2222324.1
- Burlando, M., Antonelli, M., Ratto, C. F. (2008). Mesoscale wind climate analysis: identification of anemological regions and wind regimes. *International Journal of Climatology*. 28: 629–641. DOI:10.1002/joc.1561
- Castro-Heredia, L., Carvajal, E. Y., & Ávila, D. A. (2012). Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, núm 11, pp. 11-20, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., Niknafs, A. (2014). NbClust: An R package for determining the relevant number of clusters in a data set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1-36. <http://www.jstatsoft.org/v61/i06/>.
- Chelton, D. B., Freilich, M. H., & Esbensen, S. K. (2000). Satellite observations of the wind jets off the pacific coast of Central America. Part I: Case studies and statistical characteristics. *Monthly Weather Review*, 128, 1993–2018. doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<1993:SOOTWJ>2.0.CO;2
- Darby, L. S. (2005). Cluster analysis of surface winds in Houston, Texas, and the impact of wind patterns on ozone. *Journal of Applied Meteorology* 44: 1788–1806. DOI: 10.1175/JAM2320.1
- Doran, J. C., Horst, T. W., & Whiteman C. D. (1990). The development and structure of nocturnal slope winds in a simple valley. *Boundary-Layer Meteorology* .52(1–2): 41–68. DOI: 10.1007/BF00123177
- Drobinski, P., Dabas, A. M., Haeberli, C., Flamant, P. H., (2003). Statistical characterization of the flow structure in the Rhine valley. *Boundary-Layer Meteorology*. 106: 483–505. DOI: 10.1023/A:1021262321679
- EM-DAT, (2017). Database. Bruselas Bélgica. Recuperado de <https://www.emdat.be/>
- Gómez-Muñoz, V. M., Porta-Gándara, M. A. (2002). Local wind patterns for modeling renewable energy systems by means of cluster analysis techniques. *Renewable Energy* 25: 171–182. DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00013-1
- Guardans, R., Palomino I. (1995). Description of wind field dynamic patterns in a valley and their relation to mesoscale and synoptic scale meteorological situations. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 34: 49–67. DOI: 10.1175/1520-0450-34.1.49
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. I. y Black, W. (1999). Análisis Multivariante. 5 edición. Editorial Prentice Hall. Madrid.
- Holbach, H. M., & Bourassa, M. A. (2014). The effects of gap-wind-induced vorticity, the monsoon trough, and the ITCZ on east pacific tropical cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 142, 1312–1325. doi.org/10.1175/MWR-D-13-00218.1
- IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo

intergubernamental de expertos sobre el cambio climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Jiménez, P. A., González-Rouco, J. F., Montávez, J. P., Navarro, J., García-Bustamante, E., Valero, F. (2008). Surface wind regionalization in complex terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47: 308–325. DOI: 10.1175/2007JAMC1483.1

Jiménez, P. A., González-Rouco, J.F., Montávez, J.P., García-Bustamante, E., Navarro, J., (2009). Climatology of wind patterns in the northeast of the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*. 29:501–525. DOI: 10.1002/joc.1705

Karnauskas, K. B., Busalacchi, A. J., & Murtugudde, R. (2008). Low-frequency variability and remote forcing of gap winds over the East Pacific warm pool. *Journal of Climate*, 21, 4901–4918. doi.org/10.1175/2008JCLI1771.1

Kassambara, A. (2017). Practical guide to cluster analysis in R. Unsupervised machine learning. Edition 1, Statistical Tools For High-Throughput Data Analysis (STHDA). France.

Kassambara, A. & Mundt, F. (2020). factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.

Kastendeuch, P. P., Kaufmann, P. (1997). Classification of summer wind fields over complex terrain. *International Journal of Climatology*. 17:521–534. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(199704)17:5<521::AIDJOC143>3.0.CO;2-Q

Kaufman, L. & Rousseeuw, P. J. (1990). Finding groups in data: An introduction to cluster analysis. Wiley, New York.

Kaufmann, P., Weber, R. O. (1998). Directional correlation coefficient for channeled flow and application to wind data over complex terrain. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. DOI:10.1175/1520-0426(1998)015<0089:DCCFCF>2.0.CO;2

Kaufmann, P., Whiteman, C. D. (1999). Cluster-analysis classification of wintertime wind patterns in the Grand Canyon region. *Journal of Applied Meteorology* 38: 1131–1147. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<1131:CACOWW>2.0.CO;2

- Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, 181–217. doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009
- Liang, J. H., McWilliams, J. C., & Gruber, N. (2009). High-frequency response of the ocean to mountain gap winds in the northeastern tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114, 1–12. doi.org/10.1029/2009JC005370
- Lin, G. y L. Chen. (2006). Identification of homogeneous regions for regional frequency analysis using the self-organizing map. *Journal of Hydrology*, 324, pp 1–9.
- Ludwig, F. L., Horel, J., Whiteman, C. D. (2004). Using EOF analysis to identify important surface wind patterns in mountain valleys. *Journal of Applied Meteorology* .43: 969–983. DOI: 10.1175/1520-0450(2004)043<0969:UEATII>2.0.CO;2
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K. (2019). cluster: Cluster analysis basics and extensions. R package version 2.1.0.
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12, 1577–1588. doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2
- NOAA, (2021). Estados Unidos de América. Recuperado de [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).
- Olauson, J. (2018). ERA5: the new champion of wind power modelling? *Renewable Energy*, 126, 322–331.
- Parmenter, F. C., (1970). Picture of the month, a “Tehuantepecer.” *Monthly Weather Review*, 98, 479.
- Pérez-Foguet, A. (2014). Characterization of local wind patterns in complex mountain valleys. *Int. J. Climatol.* 34: 1741–1759 (2014), DOI: 10.1002/joc.3798.
- Peña, D. (2002). Análisis de Datos Multivariantes. McGraw - Hill. España. ISBN: 84-481-3610-1.
- Peterson, L. (2002). CLUSFAVOR 5.0: hierarchical cluster and principal-component analysis of microarray based transcriptional profiles. Departments of Medicine, Molecular and Human Genetics, and Scott Department of Urology, Baylor College of Medicine, One Baylor Plaza, ST-924, Texas, USA. *Genome Biology*. software0002.1-0002.8.

- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ramon, J., Lledó, L., Torralba, V., Soret, A. & Doblas-Reyes, F.J. (2019). What global reanalysis best represents near-surface winds? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145, 3236–3251.
- Rao, A. R. y Srinivas, V. (2006). Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 318, pp 37–56.
- Ratto, G. E., Maronna, R., Berri, G. (2010). Analysis of wind roses using hierarchical cluster and multidimensional scaling analysis at La Plata, Argentina. *Boundary-Layer Meteorology* 137: 477–492.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., Gallegos, A., & O'Brien, J. J. (2003). Isthmus of Tehuantepec wind climatology and ENSO signal. *Journal of Climate*, 16, 2628–2639. doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2628:IOTWCA>2.0.CO;2
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., & Raga, G. B. (2007). Midsummer gap winds and low-level circulation over the eastern tropical Pacific. *Journal of Climate*, 20, 3768–3784. doi.org/10.1175/JCLI4220.1
- Schultz, D. M., Bracken, W. E., & Bosart, L. F. (1998). Planetary and synoptic scale signatures associated with Central American cold surges. *Monthly Weather Review*, 126, 5–27. doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0005:PASSSA>2.0.CO;2
- Schulzweida, Uwe. (2019, October 31). CDO User Guide (Version 1.9.8). <http://doi.org/10.5281/zenodo.3539275>
- Steenburgh, W. J., Schultz, D. M., & Colle, B. A. (1998). The structure and evolution of gap outflow over the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Monthly Weather Review*, 126, 2673–2691. doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2673:TSAEOG>2.0.CO;2
- Stull, R. (2017). Practical Meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science. University of British Columbia, Vancouver, Canada. ISBN-13: 978-0-88865-283.
- Sun, F., & Yu, J. Y. (2006). Impacts of Central America gap winds on the SST annual cycle in the eastern Pacific warm pool. *Geophysical Research Letters*, 33, 1–4. doi.org/10.1029/2005GL024700

- Thomas, S.R., Martínez-Alvarado, O., Drew, D., Bloomfield, H. (2020). Drivers of extreme wind events in Mexico for windpower applications. *Int. J. Climatol.* 2020;1–20. <https://doi.org/10.1002/joc.6848>
- Thomas, S., Nicolau, S., Martinez-Alvarado, O. and Drew, D. (2020). How well do atmospheric reanalyses reproduce observed winds in Mexico? *Met. Apps*, In Press.
- Tozer, B., Sandwell, D. T., Smith, W. H., Olson, C., Beale, J. R., & Wessel, P. (2019). Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, 6, 1847-1864. <https://doi.org/10.1029/2019EA000658>
- Trasviña, A., Barton, E. D., Brown, J., Velez, H. S., Kosro, P. M., & Smith, R. L. (1995). Offshore wind forcing in the gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100, 649–663. [doi.org/10.1029/95JC01283](https://doi.org/10.1029/95JC01283)
- Whiteman, C.D., Doran, J. C. (1993). The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley. *Journal of Applied Meteorology*, 32: 1669–1682. DOI: 10.1175/1520-0450(1993)032<1669:TRBOSS>2.0.CO;2
- Xu, H., Xie, S. P., Wang, Y., & Small, R. J. (2005). Effects of Central American mountains on the eastern Pacific winter ITCZ and moisture transport. *Journal of Climate*, 18, 3856–3873. [doi.org/10.1175/JCLI3497.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3497.1)
- Xie, S. P., H. Xu, W. S. Kessler, & M. Nonaka. (2005). Air–sea interaction over the eastern Pacific warm pool: Gap winds, thermocline dome, and atmospheric convection. *Journal of Climate*, 18, 5–20, [doi:10.1175/JCLI-3249.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-3249.1).
- Yang, J. C., Lin, X., & Xie, S. P. (2017). A transbasin mode of interannual variability of the Central American gap winds: Seasonality and large-scale forcing. *Journal of Climate*, 30, 8223–8235. [doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0021.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0021.1)