

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de lo Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
en Oceanografía Física**

---

**Dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por una  
planta termoeléctrica en La Paz, BCS utilizando un modelo  
lagrangiano**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**José Antonio Guzzi Ferez**

Ensenada, Baja California, México  
2022

Tesis defendida por  
**José Antonio Guzzi Ferez**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson**  
Director de tesis

**Dra. Zayre Ivonne González Acevedo**

**Dr. Luis Zavala Sansón**

**Dr. Luis Manuel Farfán Molina**



---

**Dra. María Tereza Cavazos Pérez**  
Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

---

**Dr. Pedro Negrete Regagnon**  
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **José Antonio Guzzi Ferez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

**Dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por una planta termoeléctrica en La Paz, BCS utilizando un modelo lagrangiano**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson  
**Director de tesis**

La contaminación del aire en la ciudad de La Paz representa una problemática que ha aumentado considerablemente en los últimos años, derivado principalmente de un acelerado crecimiento poblacional. Este crecimiento se ve reflejado en un ascenso continuo de la demanda eléctrica, de donde, la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles contribuye considerablemente a la liberación de dióxido de carbono, azufre y óxidos de nitrógeno. En este contexto se tiene a la central de combustión interna (CCI), ubicada aproximadamente a 10km al noreste de La Paz, la cual aporta el 95% de la energía que requiere el estado de Baja California Sur. Los vientos superficiales medios sobre la ciudad de La Paz se dirigen desde el océano Pacífico hacia el Golfo de California. Lo anterior significa que el material emitido por la CCI se dirige al Golfo de California y por ende la afectación de los contaminantes emitidos es pequeña sobre la ciudad. Para corroborar lo anterior, en este trabajo se realizó un análisis de los destinos posibles del material particulado emitido por la CCI haciendo uso del modelo FLEXPART-WRF. El objetivo fue observar la dispersión de las partículas emitidas y determinar, a partir de su trayectoria, las zonas más afectadas por las mismas. Además, se hizo uso de radiosondeos para observar los cambios estacionales de las condiciones meteorológicas en la región y determinar cómo estos cambios afectan a los patrones de dispersión de los contaminantes. Los resultados indican que las condiciones de estabilidad atmosférica presentes en invierno permiten que una mayor cantidad de partículas se queden atrapadas dentro de la capa límite, contrario al otoño, en donde las condiciones de inestabilidad permiten un mayor ascenso de las partículas. De la dispersión se encontró un régimen dominante en todas las estaciones del año mayor a uno balístico, pero sin llegar a ser dispersión por corte. Esto ocurre dentro de las primeras 15 horas de simulación, posteriormente la dispersión pasa a ser lineal como se espera dentro del comportamiento de caminata aleatoria. En cuanto a la dirección de las partículas, el invierno resulta ser la estación en donde existe mayor probabilidad de que en la ciudad de La Paz se reciba la mayor cantidad de material particulado, debido a las brisas predominantemente con dirección al sur. Durante el resto de las estaciones la probabilidad de recepción de partículas en la ciudad de La Paz es muy baja, en especial en las estaciones de primavera y verano.

**Palabras clave:** Dispersión, Contaminantes, Modelo Lagrangiano, La Paz.

Abstract of the thesis presented by **José Antonio Guzzi Ferez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography

**Dispersion of atmospheric pollutants emitted by a thermoelectric plant in La Paz, BCS using a Lagrangian model**

Abstract approved by:

---

Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson  
**Thesis Director**

The air pollution in La Paz city represents a problem increasing over the years, mainly due to a big population growth. This growth is manifested in a continuous rise in electricity demand; the generation of electricity by fossil fuels, contributes considerably to the release of carbon and sulfur dioxide, as well as nitrogen oxides. It is then that the internal combustion plant (ICP), located approximately 10 km northeast of La Paz provides 95% of the energy required by the state of Baja California Sur. The mean surface winds over the city of La Paz are directed from the Pacific Ocean towards to the Gulf of California. This means that the material emitted by the ICP goes to the Gulf of California and therefore the impact of the pollutants emitted is small on the city. To confirm the above, in this work an analysis of the possible destinations of the material issued by the ICP was carried out using the FLEXPART-WRF model. The main goal of this study was to observe the dispersion of the emitted particles and determine, based on their trajectory, the most affected areas. In addition, soundings were used to observe seasonal changes in weather conditions in the region to determine how these changes affect the dispersion patterns of particulate matter. The results show that the conditions of atmospheric stability present in winter allow a greater number of particles to remain trapped within the boundary layer, contrary to autumn, where the conditions of instability allow a greater ascent of the particles. From the dispersion, it was found a dominant regime in all the seasons of the year greater than a ballistic one, but without becoming, shear dispersion. This occurs within the first 15 hours of simulation, after which the dispersion becomes linear as expected within the random behavior. Regarding the particles direction, winter turns out to be the season where the city of La Paz is most likely to receive particulate matter, due to the predominantly southerly breezes. During the rest of the year, the probability of receiving particles in La Paz city is very low, especially in the spring and summer seasons.

**Keywords: Dispersion, pollution, Lagrangian model, La Paz, Particles.**

## Dedicatoria

A Valeria y Rebeca, por estar siempre a mi lado y ser mi apoyo cuando más lo he necesitado.

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por permitirme avanzar en mi formación académica y profesional. Quiero agradecer al Departamento de Oceanografía Física por las facilidades otorgadas y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría con No. de becario: 986944.

Mi mayor admiración y gratitud a los integrantes del comité de tesis. Especialmente al Dr. Cuauhtémoc Turrent por todo el apoyo, la paciencia y disposición para sacar adelante el trabajo. De igual forma, al Dr. Luis Zavala por su aporte crítico y las fuentes proporcionadas, las cuales ayudaron a cimentar este trabajo. También, al Dr. Luis Farfán por su apoyo con ideas y material para este trabajo. Así mismo, a la Dra. Zayre González por su buena disposición, observaciones y sugerencias.

A los profesores del posgrado, gracias por el conocimiento que me han compartido.

A mi familia por su amor y el apoyo a las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

A mis amigos Darío y Carlos Rubén, por su apoyo en los momentos más difíciles y por animarme a seguir adelante.

A mis compañeros de maestría Giovanni, Keiner, Ashida, Citlali, Fernanda e Iván por su apoyo cuando mi hija venía en camino, siempre los recordaré.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas .....	x
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Fundamento teórico.....	3
1.3 Características generales de la capa límite .....	4
1.3.1 Turbulencia.....	5
1.3.2 Variación diurna .....	5
1.3.3 Capa límite y contaminación atmosférica.....	6
1.4 Modelo Lagrangiano de dispersión de contaminantes.....	7
1.4.1 Parametrización física de la capa límite .....	8
1.4.2 Cálculo de la trayectoria de partículas .....	9
1.5 Hipótesis.....	10
1.6 Objetivos .....	10
1.6.1 Objetivo general.....	10
1.6.2 Objetivos específicos.....	10
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>11</b>
2.1 Variación estacional de la capa de mezcla atmosférica.....	11
2.1.1 Estimación de la altura de la capa de mezcla atmosférica.....	12
2.1.2 Comparación de radiosondeos observados y modelados .....	14
2.1.3 Análisis de la estabilidad atmosférica .....	15
2.2 Diseño experimental de las simulaciones .....	15
2.2.1 Selección de fechas para experimentos.....	16
2.2.2 Ajustes del modelo.....	16
2.3 Estimación de los destinos posibles del material emitido .....	17
2.3.1 Dispersión absoluta.....	18

2.3.2	Probabilidad de destinos.....	18
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>21</b>
3.1	Análisis de capa límite y estabilidad atmosférica.....	21
3.1.1	Comparación de radiosondeos modelados vs observados.....	21
3.1.2	Análisis de la capa límite .....	26
3.1.3	Variación estacional de la capa limite.....	32
3.2	Destinos posibles del material emitido.....	33
3.2.1	Dispersión absoluta.....	34
3.2.2	Probabilidad de destinos.....	36
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>40</b>
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>43</b>
<b>Literatura citada .....</b>		<b>44</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Ubicación de la central la Central de Combustión Interna de Baja California Sur (CCI) y la central termoeléctrica Punta Prieta con respecto a la ciudad de La Paz.....	2
2. Variación diurna de la capa límite. AM es el amanecer y AN el anochecer. La línea solida indica las horas con mayor turbulencia en el ciclo de la capa de mezcla, las líneas cortadas muestran la capa residual, que son las horas en que el flujo de calor es menos y por ende también la turbulencia (tomada de Beljaars, 1992).....	6
3. Efectos del gradiente vertical de temperatura en las plumas de dispersión. La línea punteada es la razón de lapso adiabática y las líneas negras son los perfiles de temperatura del aire. Cabe aclarar que las escalas verticales de los perfiles y las chimeneas no son equivalentes, únicamente son ilustrativas; no se espera que las inversiones térmicas presentes en el caso (e) se encuentren a la altura de la chimenea. Fuente: Geiger et al., 1995.....	7
4. Perfiles de temperatura potencial ( $\theta$ ), humedad relativa (RH), humedad específica (q), refractividad (N), graficados junto con estimaciones de la altura de la capa de mezcla (h). El eje “y” es la altura sobre el nivel de superficie. La h determinada usando únicamente cada perfil individual se muestra con la línea punteada magenta; h_0 (línea negra sólida) es la altura estimada usando las cuatro variables. (Figura tomada de Wang y Wang, (2014)).....	13
5. Regionalización de la zona de estudio. Cada región es un cuadrado con una extensión de 8.8 km por lado. Los puntos negros indican la posición de la estación del SMN en donde se realizaron los radiosondeos y la ubicación de la CCI La Paz (punto central), el contorno negro es la delimitación de la ciudad de la paz. Las imágenes anexas corresponden a las chimeneas de la CCI La Paz, tomadas por Farfán, L. M.....	19
6. Perfiles verticales de radiosondeos observados y modelados para el invierno de 2018, tomados a las 6am de tiempo local. En el panel de arriba se encuentran los perfiles promedio de los radiosondeos observados; en la parte de abajo se tienen los perfiles promedio de los radiosondeos extraídos del modelo WRF. La parte sombreada es la desviación estándar, las líneas punteadas en los perfiles de temperatura representa la razón de lapso adiabático y las líneas horizontales presentes en todos los perfiles representan la altura promedio de la capa limite atmosférica.....	22
7. Como en Figura 6, pero para los perfiles promedio de la primavera 2018.....	23
8. Como en Figura 6, pero para los perfiles promedio del verano 2018.....	24
9. Como en Figura 6, pero para los perfiles promedio del otoño 2018.....	25
10. Perfiles verticales de radiosondeos modelados para un caso de invierno: el día 18 de enero de 2018. En el panel de arriba se encuentra el perfil de las 6am y en la parte de abajo se tiene el perfil de las 6pm. Las líneas punteadas en los perfiles de	28

	temperatura y temperatura potencial representan la razón de lapso adiabático y las líneas horizontales presentes en todos los perfiles representan la altura de la capa límite atmosférica.....	
11.	Concentración de partículas en función de la altura para el conjunto de experimentos de invierno. En el panel de arriba se tiene la concentración al amanecer, en las primeras horas de la simulación. En el panel inferior se tiene la pluma transcurridas 12 horas de simulación. Las horas están dadas en horario local. El conteo de partículas se realizó cada 25 m, los primeros 50 m se encuentran por debajo de la altura de la chimenea.....	29
12.	Como en la Figura 10, pero para condiciones de verano, el día 13 de julio de 2018...	30
13.	Como la figura 11 pero para verano.....	32
14.	Variación estacional de la altura promedio de la capa límite para las 06 y 18 h de tiempo local, calculada con el modelo WRF para el año 2018. En color verde se tiene la altura promedio estimada con el método de Wang y Wang (2014) a las 06 h.....	33
15.	Dispersión absoluta promedio ( $m^2$ ) por componentes para invierno (curvas azules), primavera (verde), verano (rojo), otoño (amarillo). La hora de inicio de todas las simulaciones es 6 am.....	34
16.	Dispersión absoluta promedio ( $m^2$ ) por componentes para cada estación del año, graficada en escala logarítmica. Las líneas en color negro representan la dispersión teórica que puede ser lineal (proporcional al tiempo, $t$ ) la cual encontramos posterior a 15hrs de simulación, balística (proporcional a $t^2$ ) línea negra inferior y por corte (proporcional a $t^3$ ) línea negra superior. La hora de inicio de las simulaciones es las 6 am de tiempo local.....	35
17.	Probabilidad de destino para las simulaciones de invierno. Cada panel corresponde a una región de la zona de estudio. En color rojo se pueden observar las astillas de viento, ligadas al eje ubicado a la izquierda con magnitudes en m/s. Los valores negativos indican direcciones de las brisas hacia el sur. Las curvas negras representan los porcentajes de probabilidad que tiene cada región de recibir partículas. La hora de inicio de todas las simulaciones es las 6am de tiempo local....	37
18.	Igual que la Figura 17, pero para la temporada de primavera.....	37
19.	Igual que la Figura 17, pero para la temporada de verano.....	39
20.	Igual que la Figura 17, pero para la temporada de otoño.....	39
21.	Como en la Figura 10, pero para condiciones de otoño, el día 11 de septiembre de 2018 a las 6pm de tiempo local.....	41
22.	Porcentaje de probabilidad de arribo de material particulado en cada región. Se observa el promedio de las probabilidades de todos los experimentos de cada estación.....	42

## Lista de tablas

Tabla	Página
1 Población en la ciudad de La Paz en décadas recientes. (FUENTE: INEGI, Censos Generales de Población y Vivienda, años 1990, 2000, 2010 y 2020.).....	1
2 Emisiones de la central termoeléctrica. Fuente: SEMARNAT (2015) ( <a href="http://app1.semarnat.gob.mx/retc/retc/consulta.php">http://app1.semarnat.gob.mx/retc/retc/consulta.php</a> ).....	2

## Capítulo 1. Introducción

---

### 1.1 Planteamiento del problema

La ciudad de La Paz es la capital del estado de Baja California Sur. Para esta ciudad y sus alrededores, la costa del Golfo de California es de gran importancia para el desarrollo de actividades que sustentan a la población local.

La población de la ciudad de La Paz ha crecido rápidamente en décadas recientes (Tabla 1). El Consejo Nacional de Población (CONAPO) estimó la población de la ciudad en 244,219 habitantes en 2015 (CONAPO, 2015). Este crecimiento poblacional dificulta la planeación de crecimiento urbano y desarrollo sostenible.

**Tabla 1.** Población en la ciudad de La Paz en décadas recientes. (FUENTE: INEGI, Censos Generales de Población y Vivienda, años 1990, 2000, 2010 y 2020.)

Año	1990	2000	2010	2020
La Paz, BCS.	137,641	162,954	215,178	250,141

Entre las fuentes de emisión de contaminantes del aire en la ciudad de La Paz se pueden encontrar las plantas generadoras de electricidad que pertenecen a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ubicadas en los alrededores de la ciudad: La Central de Combustión Interna (CCI) de Baja California Sur y la central termoeléctrica Punta Prieta de La Paz (Figura 1). Cabe destacar que las plantas pertenecientes a CFE no son las únicas fuentes potenciales de contaminación del aire en La Paz, dado que también se pueden encontrar emisiones por fuentes móviles y partículas de polvo en suspensión debidas al tránsito vehicular.

Este trabajo se enfocará en hablar del transporte de las partículas contaminantes emitidas desde las chimeneas de la central de combustión interna y el efecto que tienen los sistemas locales de viento que afectan a la región de la ciudad de La Paz en este transporte.

La central de combustión interna es la base del suministro de energía eléctrica en Baja California Sur, aportando el 95% de la energía que requiere el Estado. Se encuentra ubicada a 10 kilómetros al norte de

La Paz, en la carretera que conduce a Pichilingue y es una de las fuentes de contaminación del aire en la ciudad. (SEMARNAT, 2004). La central cuenta con tres unidades de 37.5 mega watts (MW) cada una. La unidad No. 1 entró en operación en 1979, la unidad No. 2 en 1980 y la unidad No. 3 en 1985. El combustible utilizado en la central es combustóleo -6 o “Bunker” con alto contenido de azufre.



**Figura 1.** Ubicación de la central la Central de Combustión Interna de Baja California Sur (CCI) y la central termoeléctrica Punta Prieta con respecto a la ciudad de La Paz.

Si bien cumplen con la normatividad vigente, las emisiones (Tabla 2) de la central dan lugar a importantes impactos negativos sobre la salud humana, sobre el medio ambiente y sobre la economía regional.

**Tabla 2.** Emisiones de la central termoeléctrica. Fuente: SEMARNAT (2015) (<http://app1.semarnat.gob.mx/retc/retc/consulta.php>).

Contaminante	NO2	SO2	CO	PM10	PM2.5
Masa total emitida (Ton)	21493	21916	4473	1808	1266

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) realizó en 2014 un monitoreo de la calidad del aire en La Paz, encontrando que la concentración de partículas contaminantes en la ciudad sobrepasa los límites impuestos por las normas correspondientes en México (SEMARNAT, 2019). Otra fuente de información de la calidad del aire en La Paz fue una estación de monitoreo ubicada cerca de la planta termoeléctrica Punta Prieta. Esta estación de monitoreo fue operada por el INECC y estuvo activa durante

algunos años, iniciando su operación en 2009 y reportando progresivamente menos datos. Finalmente, la estación resulto dañada producto de fenómenos meteorológicos y quedó en estado inoperable.

La evidencia generada por múltiples estudios toxicológicos y epidemiológicos en las últimas décadas indica que los contaminantes presentes en la atmósfera se asocian con diversas afectaciones en la salud humana. Algunos ejemplos de estos estudios son las campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 (Molina Center for Energy and the Environment, 2009). Los efectos pueden incluir desde irritación de mucosas, dolor de cabeza, exacerbación de síntomas en asmáticos hasta enfermedades respiratorias, cardiovasculares e incluso muerte prematura; ello depende de factores tales como la magnitud de la exposición de los individuos a los contaminantes, la sinergia entre dos o más contaminantes y la susceptibilidad de los sujetos expuestos, entre otros (López, 2005).

Otros efectos notables vienen del escurrimiento tras el lavado de las chimeneas, ya que se transportan cargas de elementos potencialmente tóxicos que pueden contaminar el agua subterránea, ríos y lagos, así como afectar la flora y la fauna terrestre y acuática (Finkelman, 2007). Los residuos de cenizas y otros contaminantes pueden también afectar la calidad del suelo y son especialmente perjudiciales para las actividades agrícolas.

## **1.2 Fundamento teórico**

La dispersión de contaminantes se refiere al conjunto de procesos físicos y químicos que ocurren en la atmósfera y por los cuales se diluyen, transportan, remueven o transforman hasta alcanzar un sitio receptor. En este contexto, algunos de los factores que influyen en esta dispersión son las variaciones locales, regionales o globales del clima, así como diversos procesos atmosféricos íntimamente ligados a la topografía.

Dentro de lo anteriormente mencionado, el transporte de los contaminantes ocupa un lugar importante dentro de la dispersión de los mismos; este transporte puede ser por advección o por difusión. El transporte por advección es aquel debido al movimiento horizontal del aire en la atmósfera (viento). Desde el punto de vista matemático se expresa como el producto escalar del vector velocidad por el gradiente de concentraciones. La difusión, por otro lado, puede ser de tipo molecular o turbulenta. La primera se refiere al movimiento de las moléculas en el aire por diferencias de concentración entre dos

puntos del espacio (gradiente de concentraciones), y tiene poca importancia para fines del estudio de la contaminación del aire (Arya, 1999).

La difusión turbulenta, como la que se presenta en la capa límite planetaria o en la capa superficial, tiene principalmente dos orígenes, uno de tipo térmico y el otro de tipo mecánico. La turbulencia de origen térmico se genera por el calentamiento de la superficie terrestre, de las capas de aire más próximas a dicha superficie y de la misma atmósfera. Mediante este calentamiento, estas capas de aire se hacen más ligeras y ascienden generando turbulencia y mezcla. En este caso, el calentamiento de la superficie terrestre actúa como un forzamiento externo (Stull, 1994).

La turbulencia de origen mecánico se genera por la fricción de las capas atmosféricas inferiores contra la superficie terrestre, de modo que aparece un gradiente vertical en la velocidad del viento o cizalla que favorece la transferencia turbulenta entre las capas adyacentes que tienen distintas velocidades. En general, siempre que exista cizalla en la velocidad del viento producida por la causa que sea, es posible la generación mecánica de turbulencia (Stull, 1994).

Cuando la fuente de emisión de contaminantes se ubica en superficie, las mayores concentraciones de los mismos en aire a nivel del suelo se presentan cuando las velocidades del viento son bajas y la atmósfera estable. Si las fuentes de emisión son elevadas (por ejemplo, chimeneas), las condiciones atmosféricas que resultan en las mayores concentraciones de los contaminantes en el aire solo pueden ser determinadas mediante la aplicación de modelos de dispersión atmosférica. Cuando los vientos son débiles, la elevación de la pluma es mayor que para vientos fuertes. Por otro lado, vientos débiles generan una mínima dilución, mientras que vientos fuertes resultan en mayor transporte y dispersión. Por otra parte, en condiciones atmosféricas marcadamente inestables, la pluma de contaminantes puede ser transportada hacia la superficie, originando concentraciones relativamente elevadas a nivel del suelo cerca de la fuente (Turner y Schulze, 2007).

### **1.3 Características generales de la capa límite**

En la capa límite, el régimen turbulento domina los movimientos del aire y es un factor determinante que regula el ciclo diario de su evolución. Los cambios de su estabilidad, su capacidad dispersiva y su estructura vertical son algunas de las características que definen y diferencian este estrato de aire de la atmósfera libre.

### 1.3.1 Turbulencia

La mezcla que se desarrolla en las capas bajas de la atmósfera está íntimamente relacionada con el carácter turbulento de la misma. Existen algunos casos muy excepcionales en la naturaleza en los que la mezcla se produce por difusión molecular bajo regímenes laminares, pero mayoritariamente, el mecanismo de mezcla más frecuente y eficaz en la atmósfera es el que tiene lugar cuando el régimen es turbulento. Bajo estas condiciones, la mezcla molecular es totalmente despreciable.

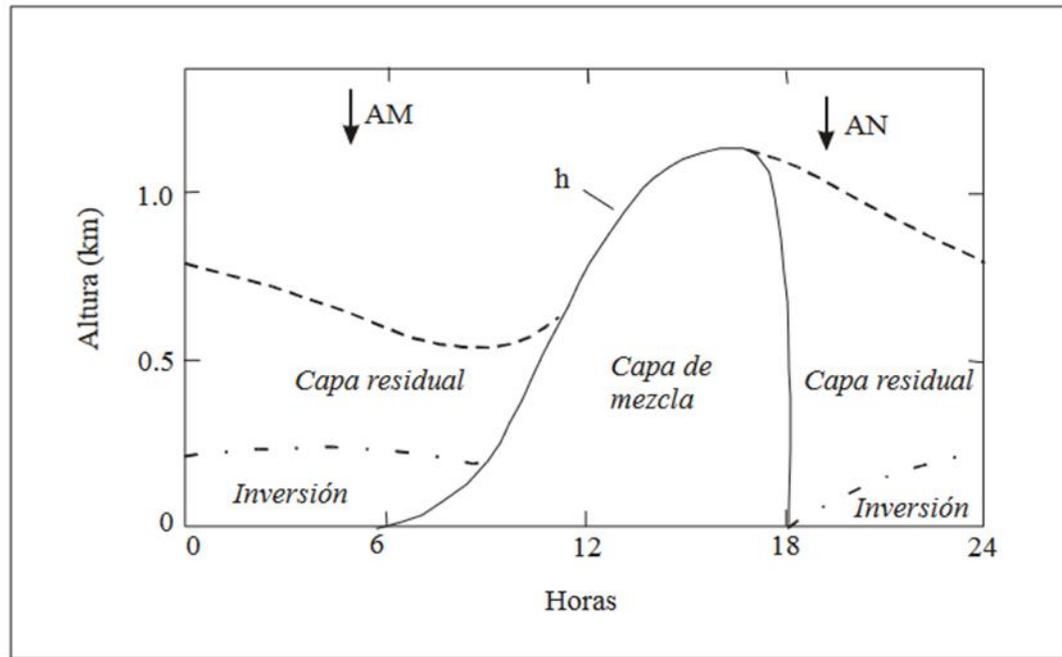
La turbulencia de las capas bajas se caracteriza por su tridimensionalidad y su carácter altamente aleatorio e irregular. En contraste con el flujo laminar, los flujos turbulentos manifiestan una enorme variabilidad en sus escalas espacio-temporales. La escala de tiempo de los movimientos turbulentos varía desde unos pocos segundos para los remolinos pequeños, hasta aproximadamente media hora para los remolinos más grandes. La escala espacial cubre valores desde los milímetros de las fluctuaciones disipativas hasta algunos cientos de metros de los remolinos de la capa límite (Stull, 1994).

Los procesos turbulentos que se manifiestan en la capa límite presentan un carácter difusivo y disipativo. El carácter difusivo de la turbulencia es una de las propiedades más importantes en dicha capa, ya que es precisamente la difusividad lo que facilita la mezcla de las distintas propiedades del aire y de los vertidos que en las capas bajas se producen. Las consecuencias asociadas a las emisiones de contaminantes por la actividad humana están íntimamente relacionadas con esta propiedad de la turbulencia atmosférica en la capa límite.

### 1.3.2 Variación diurna

La capa límite en la atmósfera presenta una escala temporal característica. Dicha escala muestra la dependencia de la altura de la capa de mezcla con la actividad solar, de forma que su crecimiento, desarrollo y decrecimiento están condicionados por la aportación energética del sol, lo que se manifiesta en una clara componente diurna (Beljaars, 1992).

En la Figura 2 se observa el ciclo diurno de la capa de mezcla, se muestra claramente la transición entre las condiciones de estabilidad nocturna y la inestabilidad diurna, por un lado, y por otro, se observa como el cese de la actividad solar determina el establecimiento de las condiciones de estabilidad que conducen a la formación de las inversiones radiactivas nocturnas.



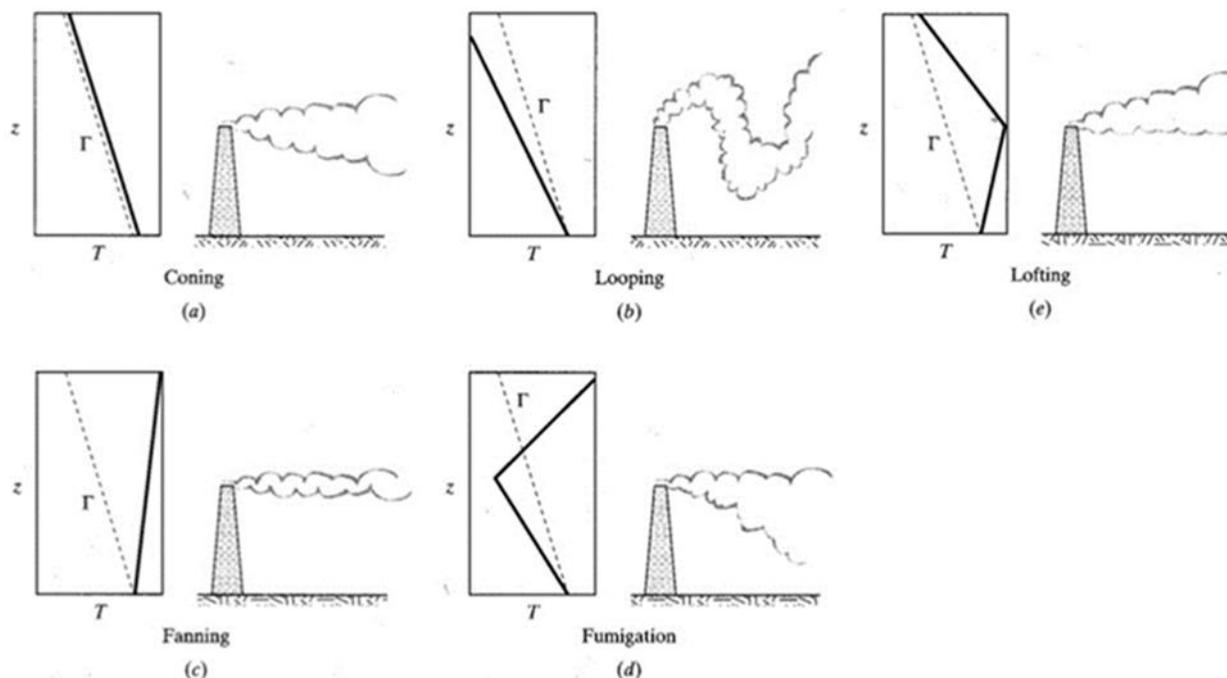
**Figura 2.** Variación diurna de la capa límite. AM es el amanecer y AN el atardecer. La línea sólida indica las horas con mayor turbulencia en el ciclo de la capa de mezcla, las líneas cortadas muestran la capa residual, que son las horas en que el flujo de calor es menos y por ende también la turbulencia (tomada de Beljaars, 1992).

### 1.3.3 Capa límite y contaminación atmosférica

Otro de los aspectos interesantes de la capa de mezcla es la relación que existe entre el espesor de este estrato y el nivel de contaminación que se encuentra retenido en esta capa. La capa de mezcla es considerada como el estrato de aire a través del cual los contaminantes liberados desde la superficie terrestre son transportados y difundidos hacia la atmósfera (Arya, 1999).

De esta forma, las emisiones que tienen lugar en las capas bajas quedan retenidas en un volumen de aire cuya dimensión vertical está delimitada por la altura de la capa de mezcla. Es por ello, que puede decirse que existe una estrecha relación entre los índices de contaminación atmosférica y el espesor de este estrato del aire.

Uno de los objetivos de este trabajo es determinar mediante las características de los radiosondeos, el tipo de pluma de dispersión que se puede esperar en las chimeneas de la CCI (Figura 3), ya que esto aporta información respecto a las alturas a las que esperaríamos encontrar la mayor concentración de partículas.



**Figura 3.** Efectos del gradiente vertical de temperatura en las plumas de dispersión. La línea punteada es la razón de lapso adiabática y las líneas negras son los perfiles de temperatura del aire. Cabe aclarar que las escalas verticales de los perfiles y las chimeneas no son equivalentes, únicamente son ilustrativas; no se espera que las inversiones térmicas presentes en el caso (e) se encuentren a la altura de la chimenea. Fuente: Geiger et al., 1995.

#### 1.4 Modelo Lagrangiano de dispersión de contaminantes

Para modelar el flujo de partículas, se pueden usar dos métodos. El primero, trata la fase del fluido como un continuo y el segundo lo trata como partículas individuales. Este segundo enfoque, que predice las trayectorias de las partículas en el fluido como el resultado de las fuerzas que actúan sobre las partículas, se llama enfoque Lagrangiano. Por otro lado, tratar el fluido como una especie de continuo, resolviendo las ecuaciones de movimiento apropiadas para el fluido, es conocido como enfoque Euleriano.

Entre las ventajas de utilizar un enfoque Lagrangiano, se encuentra que los modelos de este tipo tienden a exhibir una menor difusión numérica que los modelos Eulerianos o semi-Lagrangianos, aunque también surgen algunos errores numéricos en la discretización de sus ecuaciones (Cassiani et al., 2016). Otro de los beneficios de los modelos Lagrangianos es su flexibilidad y los bajos costos computacionales comparados con los modelos Eulerianos.

Para la realización de este trabajo se hará uso del modelo Lagrangiano FLEXPART, un modelo de transporte y dispersión útil para la simulación de procesos atmosféricos a gran escala. Además de transporte y

difusión turbulenta, este modelo es capaz de simular la deposición seca y húmeda y el decaimiento químico lineal. El modelo puede ser usado para escalas espaciales que van desde la local hasta la global. FLEXPART tiene dos modos de simulaciones temporales, hacia adelante en el tiempo y hacia atrás en el tiempo. Las simulaciones hacia adelante en el tiempo sirven para observar la dispersión de trazadores desde sus fuentes, mientras que las simulaciones hacia atrás en el tiempo sirven para determinar las contribuciones potenciales de determinadas fuentes (Stohl et al., 2005).

La versión del modelo a utilizar para este trabajo es FLEXPART-WRF 3.3.2, el cual, a diferencia de otras versiones, utiliza salidas del modelo WRF como datos de entrada para la realización de experimentos con FLEXPART. Entre las ventajas de uso de esta versión del modelo se encuentran las mejores representaciones de la dispersión en escalas espaciales más pequeñas.

#### 1.4.1 Parametrización física de la capa límite

FLEXPART necesita cuatro campos tridimensionales: componentes del viento horizontal y vertical, temperatura y humedad específica. También se requiere de los campos bidimensionales: presión en superficie, cobertura nubosa total, viento horizontal a 10 m, temperatura a 2 m y temperatura de punto de rocío.

Sin embargo, el modelo WRF es un modelo con una malla Euleriana con un límite en las escalas que puede resolver, por lo cual la turbulencia no se encuentra totalmente resuelta y debe ser parametrizada.

Las variaciones espaciales y temporales de la altura de la capa límite atmosférica (CLA) en escalas no resueltas por el modelo WRF juegan un papel importante para determinar el espesor de la capa en la cual el trazador se mezcla efectivamente. La altura de la CLA alcanza su valor máximo (típicamente de 1500 m) por la tarde (alrededor de las 17:00 h). Ahora, si los datos meteorológicos están disponibles únicamente a las 12:00 y 18:00 h y las alturas de la CLA a esas horas fuesen de 1200 m y 200 m respectivamente. Usando una interpolación lineal se encontraría que la altura de la CLA a las 17:00 h es significativamente subestimada (370 m en lugar de 1500 m). Si el trazador fuese liberado en la superficie en una hora cercana a la hora en que la CLA alcanza su valor máximo, lo anteriormente mencionado conduciría a una seria sobreestimación de las concentraciones en superficie (Stohl et al., 2005). Argumentos similares aplican para las variaciones espaciales de la altura de la CLA debido a la topografía compleja y la variabilidad en el uso de suelo.

En el modelo FLEXPART se usa una parametrización para evitar un sesgo significativo en el grosor de la CLA y las concentraciones del trazador en superficie. Para tener en cuenta las variaciones espaciales inducidas por la topografía, se utiliza una altura de la CLA “ambiental”, expresada en la siguiente ecuación (Stohl et al., 2005).

$$H_{env} = h_{mix} + \min \left[ \sigma_z, c \frac{V}{N} \right] \quad (1)$$

Donde,  $\sigma_z$  es la desviación estándar de la topografía de la malla del modelo WRF,  $c$  es una constante,  $V$  es la velocidad del viento a la altura  $h_{mix}$  y  $N$  es la frecuencia de Brunt-Vaisala.

#### 1.4.2 Cálculo de la trayectoria de partículas

FLEXPART usa un esquema simple de “aceleración cero”, lo cual significa que no hay aceleración, expresado en la siguiente ecuación.

$$\mathbf{X}(t + \Delta t) = \mathbf{X}(t) + \mathbf{v}(\mathbf{X}, t)\Delta t \quad (2)$$

Donde  $t$  es el tiempo actual,  $\Delta t$  es el incremento de tiempo,  $\mathbf{X}$  es el vector posición y  $\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}_t + \mathbf{v}_m$  es el vector de viento, el cual está compuesto por el viento medio  $\bar{\mathbf{v}}$  y las fluctuaciones turbulentas del viento  $\mathbf{v}_t$ .

Este esquema es adecuado para integrar la ecuación de trayectoria de primer orden (ecuación 3) (Stohl et al., 2005)

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{v}[\mathbf{X}(t)] \quad (3)$$

Las fluctuaciones turbulentas  $\mathbf{v}_t$  para la componente  $i$  del viento son parametrizadas asumiendo procesos Markovianos basados en la ecuación de Langevin (ecuación 4) (Stohl et al., 2005).

$$d\mathbf{v}_{t_i} = a_i(\mathbf{X}, \mathbf{v}_t, t)dt + b_{ij}(\mathbf{X}, \mathbf{v}_t, t)dW_j \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

Donde el prefijo  $d$  indica diferencial, el termino de deriva  $a$  y el termino de difusión  $b$  son funciones de la posición, la velocidad turbulenta y el tiempo.  $dW_j$  son incrementos en los procesos de Wiener con media cero y varianza  $dt$ .

FLEXPART supone una turbulencia Gaussiana, la cual es estrictamente válida solo para condiciones atmosféricas estables y neutrales. Bajo condiciones convectivas, cuando la turbulencia es sesgada y mayores áreas están ocupadas por descensos que por ascensos, esta suposición no se cumple. Pero para distancias de transporte donde las partículas están bien mezcladas a través de la CLA, el error es menor (Stohl et al., 2005).

## **1.5 Hipótesis**

Los vientos superficiales medios sobre la ciudad de La Paz se dirigen desde el Océano Pacífico hacia el golfo de California. Esto implica un transporte en dirección al Golfo de California del material emitido por la central de combustión interna, lo que significa que se encuentra bien ubicada en el contexto del efecto de contaminación sobre centros de población.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo general**

Estudiar el comportamiento del material particulado emitido por la central de combustión interna (CCI) de La Paz, B.C.S. utilizando simulaciones del modelo Lagrangiano FLEXPART-WRF y determinar si dicho material afecta de manera directa a la ciudad de La Paz.

### **1.6.2 Objetivos específicos**

- Analizar la variación estacional de la capa de mezcla atmosférica en La Paz.
- Comparar resultados de observaciones disponibles con resultados del modelo WRF.
- Estimar la probabilidad de los destinos posibles del material emitido en la CCI.

## Capítulo 2. Metodología

---

Como se mencionó en el capítulo anterior, el objetivo principal de este estudio es determinar si las emisiones de material particulado realizadas por la CCI afectan de manera directa a la ciudad de La Paz. Con este fin se determinó realizar el análisis de los patrones de dispersión de las partículas tomando en cuenta los cambios estacionales de las condiciones meteorológicas de la región. Para caracterizar estos cambios estacionales se escogió como herramienta el análisis de las observaciones hechas por radiosondeo en la ciudad de La Paz durante el periodo (1991-2019).

El modelo atmosférico WRF-ARW v3.9 fue utilizado para calcular un re-escalamiento dinámico de los campos meteorológicos del reanálisis CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) en una malla de 3 km de resolución horizontal. La simulación numérica se hizo para el año 2018 y los campos de viento de alta resolución calculados con el WRF fueron usados con el modelo FLEXPART para estimar las trayectorias de las partículas emitidas en la chimenea de la CCI. Los radiosondeos observados en la ciudad de La Paz durante el 2018 también fueron usados para evaluar la calidad de la simulación numérica del WRF, particularmente en lo referente al cambio estacional de la altura de la capa de mezcla atmosférica en la zona de estudio.

### 2.1 Variación estacional de la capa de mezcla atmosférica

Para el análisis de la capa de mezcla atmosférica se hizo uso de datos de radiosondeos realizados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), disponibles en la página web de la Universidad Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) para el periodo 1991-2019. Estos datos son de acceso libre y fueron medidos en una estación ubicada al noreste de la ciudad de La Paz. Las variables utilizadas para el análisis realizado en este trabajo fueron temperatura, humedad absoluta, presión, temperatura de punto de rocío, temperatura potencial, dirección y velocidad del viento. Estas variables fueron medidas dos veces al día, a las 06:00 y 18:00 UTC.

A partir de los datos de radiosondeos se procedió a realizar la estimación de la altura de la capa de mezcla atmosférica utilizando el método propuesto por Wang y Wang (2014). Una vez calculada la altura de la capa para cada radiosondeo individual de la base de datos, se calcularon los promedios estacionales.

### 2.1.1 Estimación de la altura de la capa de mezcla atmosférica

El método propuesto por Wang y Wang (2014) consiste en determinar la altura de la capa de mezcla atmosférica haciendo uso de datos de temperatura y humedad provenientes de radiosondeos.

El perfil de temperatura potencial, que indica la estabilidad atmosférica e impacta de forma significativa en la dispersión de contaminantes, es uno de los parámetros principales que se utilizan para determinar la altura de la capa de mezcla. Se considera que la zona de máximo gradiente vertical del perfil de temperatura potencial se ubica en el límite superior de la capa de mezcla (Wang y Wang, 2014).

Otros factores por considerar para la estimación de la altura de la capa de mezcla son los gradientes verticales máximos de la humedad específica y de la refractividad atmosférica ( $N$ ), variable que combina la información de la temperatura y la humedad del aire. La refractividad indica la desviación de la luz visible (u ondas electromagnéticas de otras frecuencias en la atmósfera) de una línea recta mientras pasa a través de la atmósfera. Esta desviación se debe a la variación de la densidad del aire en función de la altura. El cálculo de la refractividad está definido por la siguiente ecuación:

$$N = (77.6 \text{ K/hPa}) \frac{P}{T} + (3.73 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}) \frac{e}{T^2} \quad (5)$$

Donde  $N$  es la refractividad,  $P$  es la presión atmosférica en hPa,  $T$  es la temperatura del aire en Kelvin y  $e$  es la presión de vapor de agua en hPa (Wang y Wang, 2014). Este último valor, si bien no es provisto por los datos de radiosondeos, puede ser fácilmente calculado a partir de la temperatura del punto de rocío.

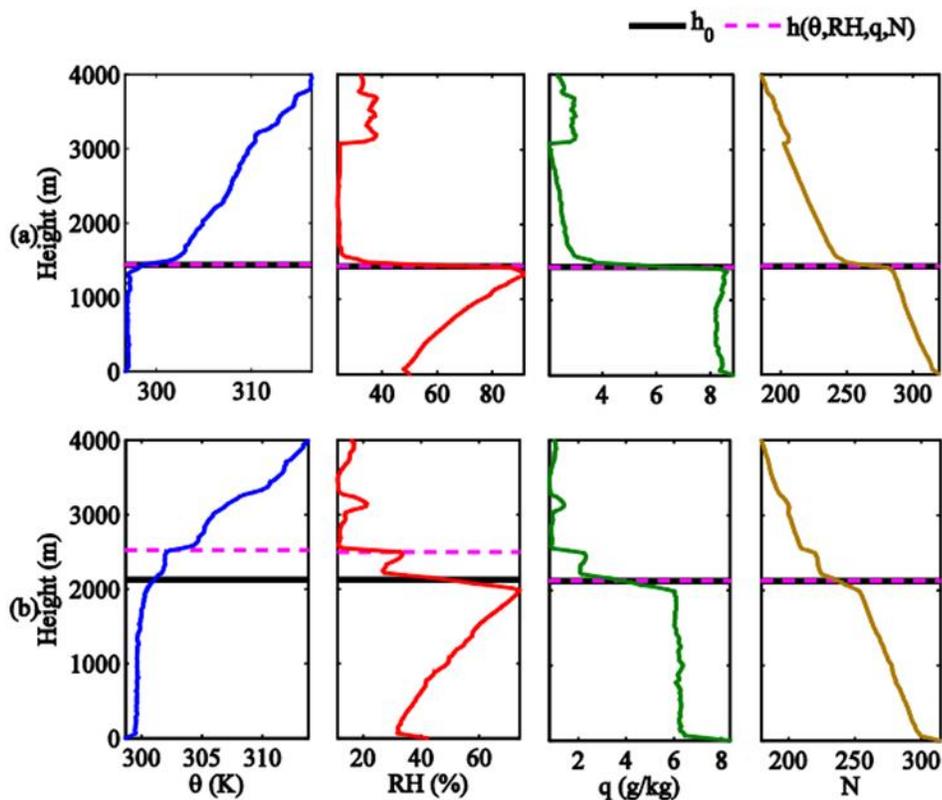
Una vez obtenidos los valores de refractividad, el método consiste en encontrar la región con el mayor gradiente vertical para todas las variables involucradas.

Uno de los problemas detectados en esta metodología es que existen casos en los que la altura a la que ocurre el mayor gradiente vertical difiere entre las variables analizadas. Dado que lo que se busca es identificar la altura a la que el criterio se cumple de mejor manera, en esos casos se seleccionó la altura a la que la mayor cantidad de variables coincidieron en un máximo relativo del gradiente vertical.

Una de las razones de las diferencias en la altura a la que ocurre el mayor gradiente vertical es que la refractividad y la humedad específica son dominadas por las variaciones de la presión de vapor a bajas

alturas, y por ello decrecen rápidamente con la altura. Esto ocasiona que en muchas ocasiones se encuentren gradientes verticales muy grandes cerca de la superficie.

La Figura 4 nos muestra la aplicación del método para la estimación de la altura de la capa de mezcla. En el ejemplo se observan perfiles para dos casos diferentes (a y b). En el caso (a) podemos observar que la altura de la capa de mezcla estimada acorde a los parámetros específicos de cada perfil individual (línea punteada magenta) coincide para todas las variables, por lo cual se concluye que la altura de la capa de mezcla integrada tiene una altura aproximada de 1500 metros.



**Figura 4.** Perfiles de temperatura potencial ( $\theta$ ), humedad relativa (RH), humedad específica (q), refractividad (N), graficados junto con estimaciones de la altura de la capa de mezcla (h). El eje “y” es la altura sobre el nivel de superficie. La h determinada usando únicamente cada perfil individual se muestra con la línea punteada magenta;  $h_0$  (línea negra sólida) es la altura estimada usando las cuatro variables. (Figura tomada de Wang y Wang, (2014))

Pero el caso b nos muestra algo diferente. En este caso se observa que la altura estimada de la capa de mezcla para los perfiles de  $\theta$  y RH difiere de la estimación hecha con los perfiles de q y N. En este caso lo que se busca es estimar una altura de la capa de mezcla en la cual la mayor cantidad de variables coincidan en su zona de máximo gradiente. En el ejemplo anterior, se determinó que la altura de 2100 m es la que

más se ajusta a este criterio debido a que a esa altura los gradientes de  $\theta$  y RH tienen un segundo máximo relativo, que, aunque no es el mayor de todo el perfil, sí coincide con los de  $q$  y  $N$ .

Existen algunas consideraciones importantes sobre la aplicación de este método. La primera de ellas es que para evitar que algunas características de la troposfera libre sean confundidas con el tope de la capa de mezcla ( $h$ ), en el caso de que el resultado del método es una altura mayor a 4000 m entonces se considera un resultado inválido (Seidel et al., 2010).

La segunda consideración por hacer notar es que el método de Wang y Wang (2014) contempla el uso de datos de nubosidad para una mayor fiabilidad de los resultados de la estimación. Sin embargo, al carecer de datos de nubosidad en el presente estudio, únicamente se contempló como criterio para la estimación de la capa de mezcla la altura del máximo gradiente vertical para cada una de las variables disponibles en la base de datos de radiosondeos.

La razón de la importancia de los datos de nubosidad es que, en presencia de nubes, algunos métodos de estimación de la altura de la capa límite basados en la humedad, identifican el tope de la nube como el tope de la capa límite debido a la magnitud del gradiente de humedad que ahí se encuentra.

### 2.1.2 Comparación de radiosondeos observados y modelados

Como se mencionó anteriormente, los radiosondeos observados fueron realizados en una estación meteorológica del SMN ubicada en la zona noreste de la ciudad de La Paz. Las chimeneas emisoras de contaminantes de la CCI se ubican al este de la ciudad, a 8.3 km de distancia del sitio de lanzamiento de los radiosondeos.

Para comparar los radiosondeos observados con las condiciones meteorológicas simuladas por el WRF, se extrajeron perfiles verticales de humedad específica, temperatura potencial, presión, componentes del viento y altura de la capa límite de los campos numéricos calculados con el modelo. Lo anterior se hizo para el punto de malla cercano al observatorio meteorológico del SMN y para el punto de malla cercano a la CCI La Paz, en las mismas horas de los radiosondeos observados durante el año 2018.

Una vez obtenidos los radiosondeos del modelo WRF se procedió a realizar una comparación de resultados entre lo obtenido mediante el método de Wang y Wang (2014) y los radiosondeos obtenidos de salidas del modelo WRF en el punto más cercano a la estación.

En este caso no fue necesario realizar el cálculo de refractividad para obtener la altura de la capa de mezcla en los radiosondeos de WRF, dado que dentro de los datos de salida del modelo se incluye una estimación de la altura de la capa de mezcla.

### 2.1.3 Análisis de la estabilidad atmosférica

Después de hacer la comparación entre los radiosondeos modelados y las observaciones correspondientes para verificar la variación estacional de las características de la capa planetaria simuladas por el WRF, se procedió a realizar un análisis de estabilidad dinámica de la atmósfera en la zona de emisión de contaminantes.

Para esto se realizó el cálculo del perfil vertical de la aproximación 'Bulk' del número de Richardson. Dicha aproximación se calcula a partir de cantidades que se pueden estimar directamente de los radiosondeos y provee información sobre la estabilidad dinámica de la atmósfera a partir de la comparación de los resultados con el valor crítico del número de Richardson ( $Ri_c = 0.25$ ). Para este cálculo se hizo uso de la siguiente fórmula (Stull, 2017):

$$Ri = \frac{g * d\theta_v * dz}{\theta_v(dU^2 + dV^2)} \quad (6)$$

Donde  $g$  es la aceleración debida a la gravedad,  $d\theta_v$  es la variación vertical de la temperatura potencial virtual,  $dz$  es la variación en la altura,  $\theta_v$  es la temperatura potencial virtual media,  $dU$  y  $dV$  son las variaciones verticales de las componentes de velocidad del viento.

De igual manera el número de Richardson Bulk da información sobre la turbulencia en la zona, esto debido a que la razón entre la boyancia y la cortante del viento determinan si el flujo se vuelve turbulento (Stull, 2017). La cortante del viento es el cambio de la rapidez del viento con la altura, y al elevarse al cuadrado indica la energía cinética disponible para la turbulencia.

## 2.2 Diseño experimental de las simulaciones

Uno de los objetivos principales de este trabajo es observar el comportamiento del material particulado dentro de la capa de mezcla y cómo éste podrían afectar a la localidad de La Paz. Con este fin es que se

realizaron múltiples simulaciones de la dispersión de contaminantes emitidos por la central de combustión utilizando el modelo FLEXPART, alimentado con datos de viento de alta resolución calculados con el modelo WRF.

La simulación numérica hecha con el modelo WRF para el año 2018 utilizó como forzamiento a los campos del reanálisis CFSR. El modelo WRF se configuró para calcular el re-escalamiento dinámico de ese reanálisis a una malla de 3 km de resolución horizontal. Una vez obtenidos los datos de vientos del modelo WRF se procedió a realizar el diseño experimental para el modelo FLEXPART-WRF.

### 2.2.1 Selección de fechas para experimentos

La primera consideración realizada fue la selección de fechas. Al buscarse una caracterización del comportamiento de los contaminantes que muestre como se dispersan durante la mayor parte del año, se decidió seleccionar fechas en las que los sistemas locales de brisas marinas evolucionaron sin la interferencia de estructuras transitorias de mesoescala o de escala sinóptica como frentes, ciclones tropicales, ondas del este o vaguadas invertidas. Para la selección de estas fechas se hizo uso de datos de geopotencial del reanálisis ERA5 para el año 2018. Con estos datos se seleccionaron ventanas temporales de 72 h de duración en las que el valor absoluto de las anomalías del geopotencial a 850mb eran pequeñas. De esta manera, se obtuvieron un total de 178 días del año 2018 en los que las brisas fueron el mecanismo dominante de circulación atmosférica en la zona de estudio.

Con el fin de mostrar de mejor manera el comportamiento de los contaminantes en diferentes épocas del año se realizó un análisis estacional. Las fechas seleccionadas se dividieron en las estaciones de invierno (diciembre, enero y febrero), primavera (marzo, abril, mayo), verano (junio, julio y agosto) y otoño (septiembre, octubre, noviembre).

### 2.2.2 Ajustes del modelo

Una vez concluida la lista de fechas para las simulaciones del modelo FLEXPART-WRF, se seleccionaron los parámetros de las simulaciones lagrangianas tales como la duración, la frecuencia de las emisiones y la frecuencia de salidas de resultados. Para la duración de las simulaciones se establecieron 36 h, al determinarse que la mayoría de los compuestos emitidos tienen a degradarse en periodos mayores a ese

tiempo. La frecuencia de emisiones se estableció en 8 partículas inertes cada 3 min al carecer de datos reales de la central termoeléctrica. La posición de las partículas emitidas fue registrada en un archivo de salida cada 15 min de tiempo simulado.

Otras opciones que se ajustaron dentro del modelo fueron (Brioude et al, 2013):

- WIND\_OPTION – Se realizaron las simulaciones utilizando los vientos medios (promedio de vientos cada hora) del modelo WRF (Brioude et al, 2012), al ser los que mostraron mejor caracterización de las brisas en las pruebas preliminares.
- TURB\_OPTION - Esta opción permite seleccionar el esquema de turbulencia a utilizar. Para las simulaciones de este trabajo se optó por la opción que calcula la mezcla turbulenta en la capa límite usando el esquema de Hanna (Stohl et al, 2005), que se basa en los parámetros de altura de la capa límite, la escala de velocidad convectiva, longitud de rugosidad, y la velocidad de fricción.
- SFC\_OPTION – Opción que nos permite seleccionar si se utiliza la altura de la capa límite obtenida de los datos de WRF o si se calcula en el modelo FLEXPART. En este caso se seleccionó la opción que estima la altura de la capa límite en el modelo FLEXPART mediante la utilización del número crítico de Richardson.

Cabe aclarar que los experimentos se realizaron utilizando únicamente partículas inertes. En cada simulación del modelo FLEXPART-WRF se emitieron en total 5000 partículas inertes.

Finalmente, dentro de cada periodo de tiempo en el que la circulación atmosférica estuvo dominada por las brisas, se realizaron simulaciones de FLEXPART-WRF separadas 6 h en su hora de inicio (00h, 06h, 12h, 18h hora local), con el fin de observar el comportamiento de las partículas en función de la fase de las brisas. De esta manera, se realizaron un total de 536 simulaciones del modelo FLEXPART-WRF, repartidas a lo largo del año 2018.

### **2.3 Estimación de los destinos posibles del material emitido**

Para la estimación de los destinos del material emitido se hizo uso de dos herramientas. La primera de ellas fue la dispersión absoluta.

### 2.3.1 Dispersión absoluta

La dispersión absoluta (también llamada dispersión individual de partículas) de un conjunto de partículas nos provee información de la separación cuadrática media de cada partícula respecto a su posición inicial en un tiempo  $t$ . Si se tienen  $N$  partículas, la dispersión absoluta se calcula como el promedio de la dispersión del conjunto de partículas y se calcula mediante la fórmula (Provenzale, 1999):

$$\langle A_i^2 \rangle(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [x_i^k(t) - x_i^k(t_0)]^2 \quad (7)$$

Donde  $\langle A_i^2 \rangle$  indica la dispersión absoluta promedio,  $x_i^k$  es la posición de la partícula  $k$  en la dirección  $i$  (en tres dimensiones  $i = 1, 2, 3$ ) al tiempo  $t$ ,  $t_0$  es el tiempo inicial y  $N$  es el número total de partículas en el conjunto. La dispersión absoluta total es la suma de las  $m$  componentes ( $m = 3$ )

$$\langle A^2 \rangle(t) = \sum_{i=1}^m \langle A_i^2 \rangle \quad (8)$$

Para el caso de este trabajo  $x_i^k(t_0)$  corresponde a la posición de la central de combustión, al ser ésta el punto de emisión de todas las partículas.

Las salidas del modelo FLEXPART-WRF proveen los datos necesarios para realizar el cálculo de la dispersión absoluta. Sin embargo, estos datos están dados en coordenadas de latitud-longitud para cada una de las partículas emitidas. Por lo tanto, para poder utilizar la ecuación que define a la dispersión absoluta fue necesario realizar la conversión de la posición de las partículas del sistema georreferenciado de longitud-latitud a un sistema de referencia cartesiano con distancias en metros, utilizando la norma WGS84.

El análisis de dispersión absoluta es de utilidad para determinar en qué fase del ciclo anual se dispersan más las partículas y el tipo de dispersión que se tiene en función del tiempo, la cual puede ser lineal (proporcional al tiempo  $t$ ), balística ( $t^2$ ) y por corte ( $t^3$ ) (Zavala, 2021).

### 2.3.2 Probabilidad de destinos

Uno de los objetivos principales de este trabajo es determinar las zonas más probables de ser afectadas por el material particulado emitido por la central de combustión interna (CCI) de La Paz, B. C. S. Con este

fin es que a partir de los datos de salida obtenidos del modelo FLEXPART-WRF se realizó una estimación en función del tiempo de la probabilidad de arribo de las partículas emitidas a diferentes regiones de la zona de estudio.

Para realizar este cálculo se regionalizó la zona de estudio tomando como punto central a las chimeneas del CCI. Se definió una cuadrícula con 9 regiones (noroeste, norte, noreste, oeste, centro, este, suroeste, sur, sureste) mostradas en la Figura 5. La finalidad de esto es observar, a partir del punto de emisión del material particulado, en qué dirección se mueven las partículas tras ser emitidas.

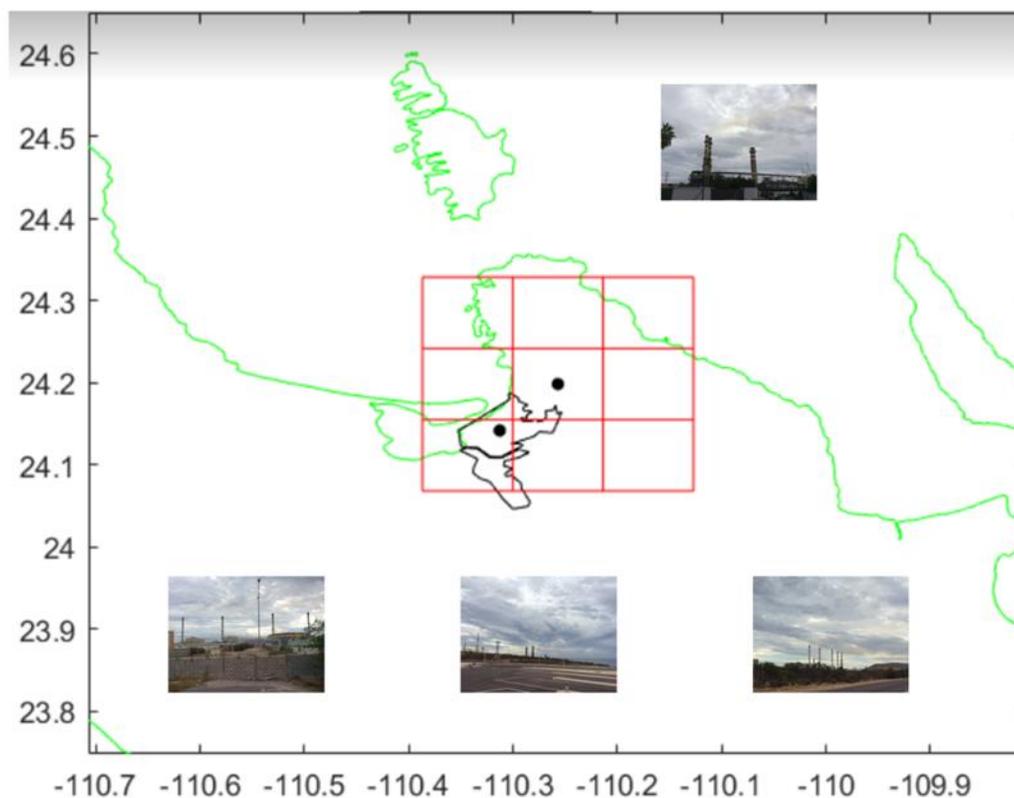


Figura 5. Regionalización de la zona de estudio. Cada región es un cuadrado con una extensión de 8.8 km por lado. Los puntos negros indican la posición de la estación del SMN en donde se realizaron los radiosondeos y la ubicación de la CCI La Paz (punto central), el contorno negro es la delimitación de la ciudad de la paz. Las imágenes anexas corresponden a las chimeneas de la CCI La Paz, tomadas por Farfán, L. M.

Una vez definidas las regiones de la zona de estudio, se procedió a hacer un conteo de las partículas ubicadas en cada región de la cuadrícula, cada 15 min, a lo largo de la duración de cada una de las simulaciones del modelo FLEXPART-WRF. De igual forma, se hizo uso de los datos de salida del modelo

WRF para calcular el vector de viento cercano a la superficie (a 10 m de altura), promediado espacialmente sobre cada una de las nueve regiones de la cuadrícula.

A partir del conteo de partículas realizado, se hizo finalmente el cálculo de la probabilidad de cada región para recibir partículas contaminantes. Este fue un cálculo simple, dividiendo el número de partículas presentes en cada región entre el número total de partículas presentes en la malla en cada tiempo.

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Análisis de capa límite y estabilidad atmosférica

Para el análisis de la capa de mezcla atmosférica se hizo uso de dos fuentes de datos de radiosondeos. Los primeros datos utilizados fueron de radiosondeos realizados por el Servicio Meteorológico Nacional, estos radiosondeos observados fueron comparados con radiosondeos virtuales realizados a partir de datos extraídos de los mismos resultados del modelo WRF que se utilizaron para las simulaciones lagrangianas del modelo FLEXPART-WRF.

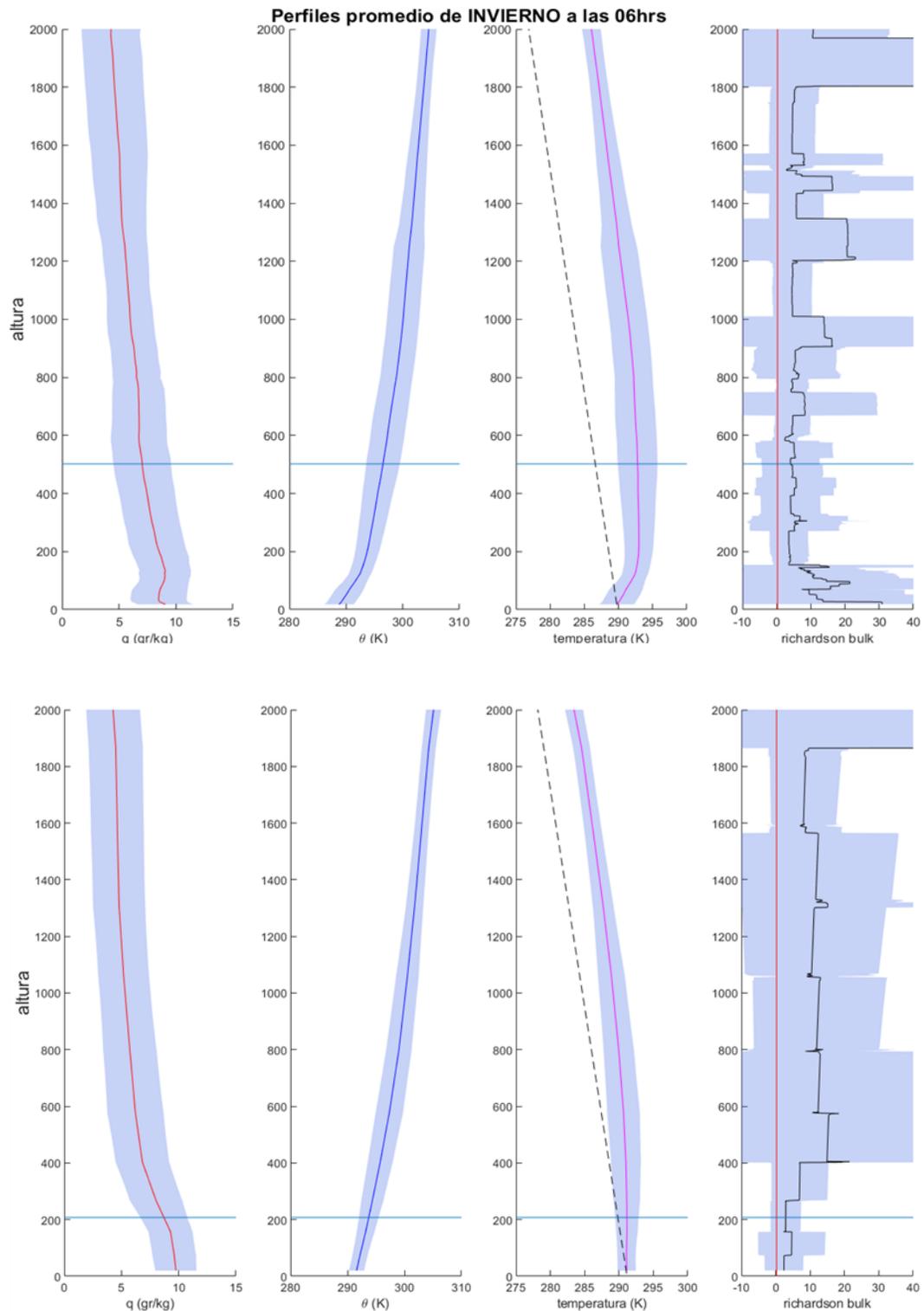
#### 3.1.1 Comparación de radiosondeos modelados vs observados

Esta comparación de radiosondeos se llevó a cabo con dos finalidades principales. La primera es validar qué tan cercanos a la realidad son los resultados obtenidos de las corridas del modelo WRF. Por otro lado, como ya se ha mencionado anteriormente, los radiosondeos observados fueron realizados en una estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional ubicada en la zona noreste de la ciudad de La Paz.

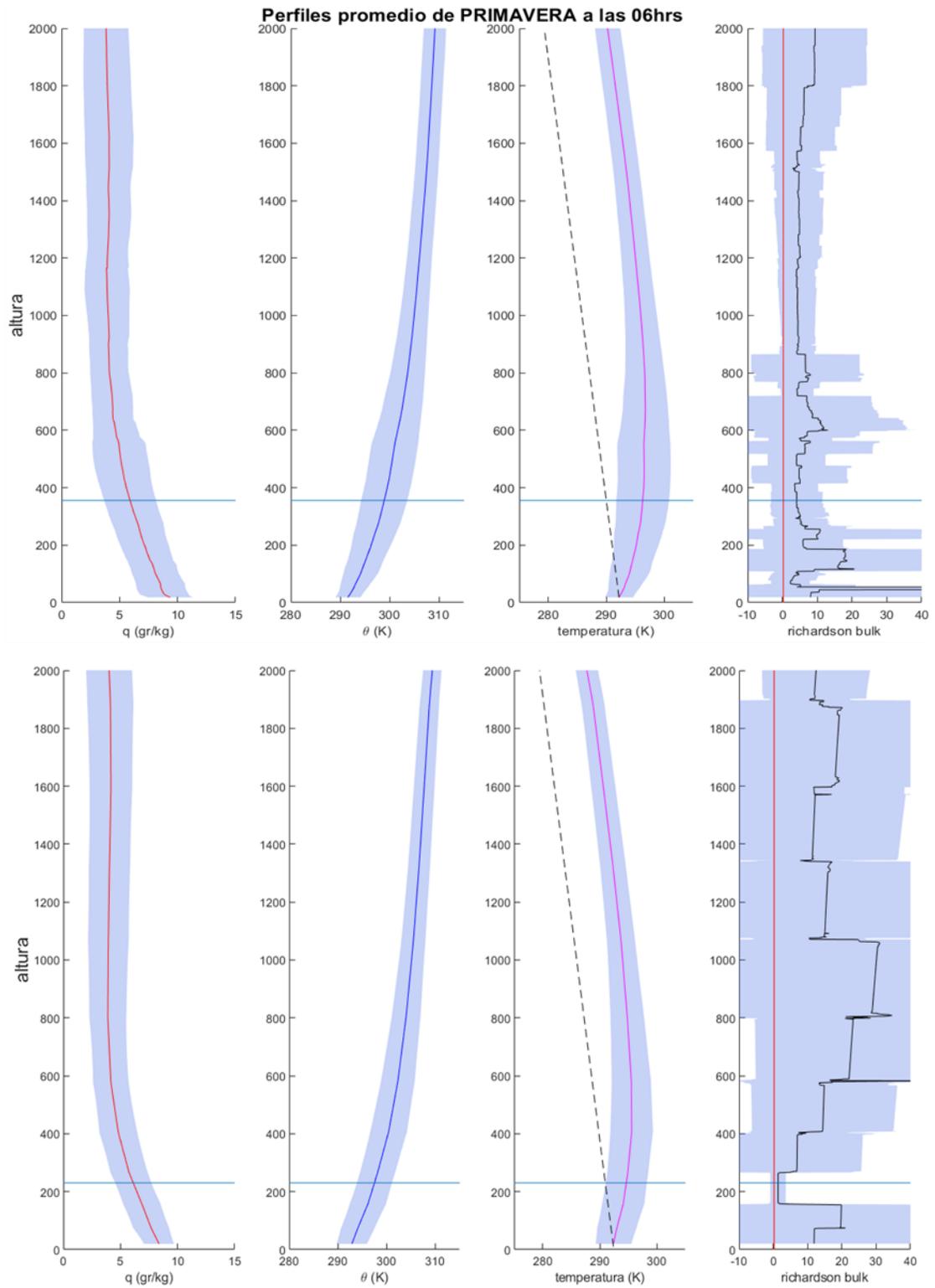
Por lo anterior se determinó realizar la comparación entre los radiosondeos observados y radiosondeos obtenidos de los datos del modelo WRF en el punto de malla más cercano a la ubicación de la estación meteorológica y de esta manera determinar la fiabilidad de los datos del modelo.

Los resultados del modelo WRF analizados en el punto de malla más cercano a las chimeneas de la CCI para realizar el análisis de la capa límite y la estabilidad atmosférica en el punto de emisión, se presentan en este apartado.

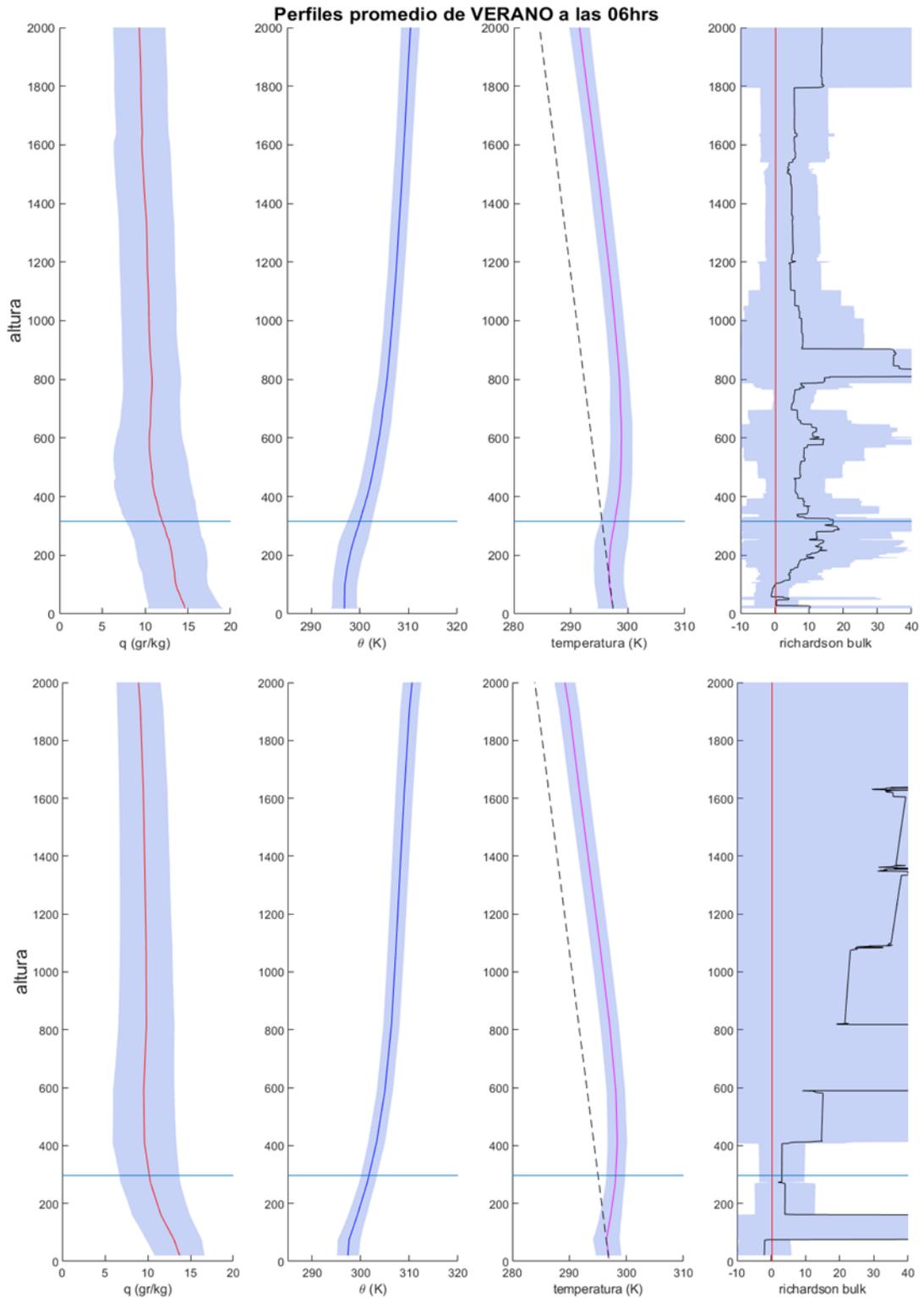
En las figuras 6 a 9, se muestran los perfiles promedio estacionales observados y modelados de la humedad específica, temperatura potencial, temperatura del aire y el número de Richardson Bulk, a partir de los cuales se realizó el análisis de la capa límite y la estabilidad atmosférica en el punto de emisión.



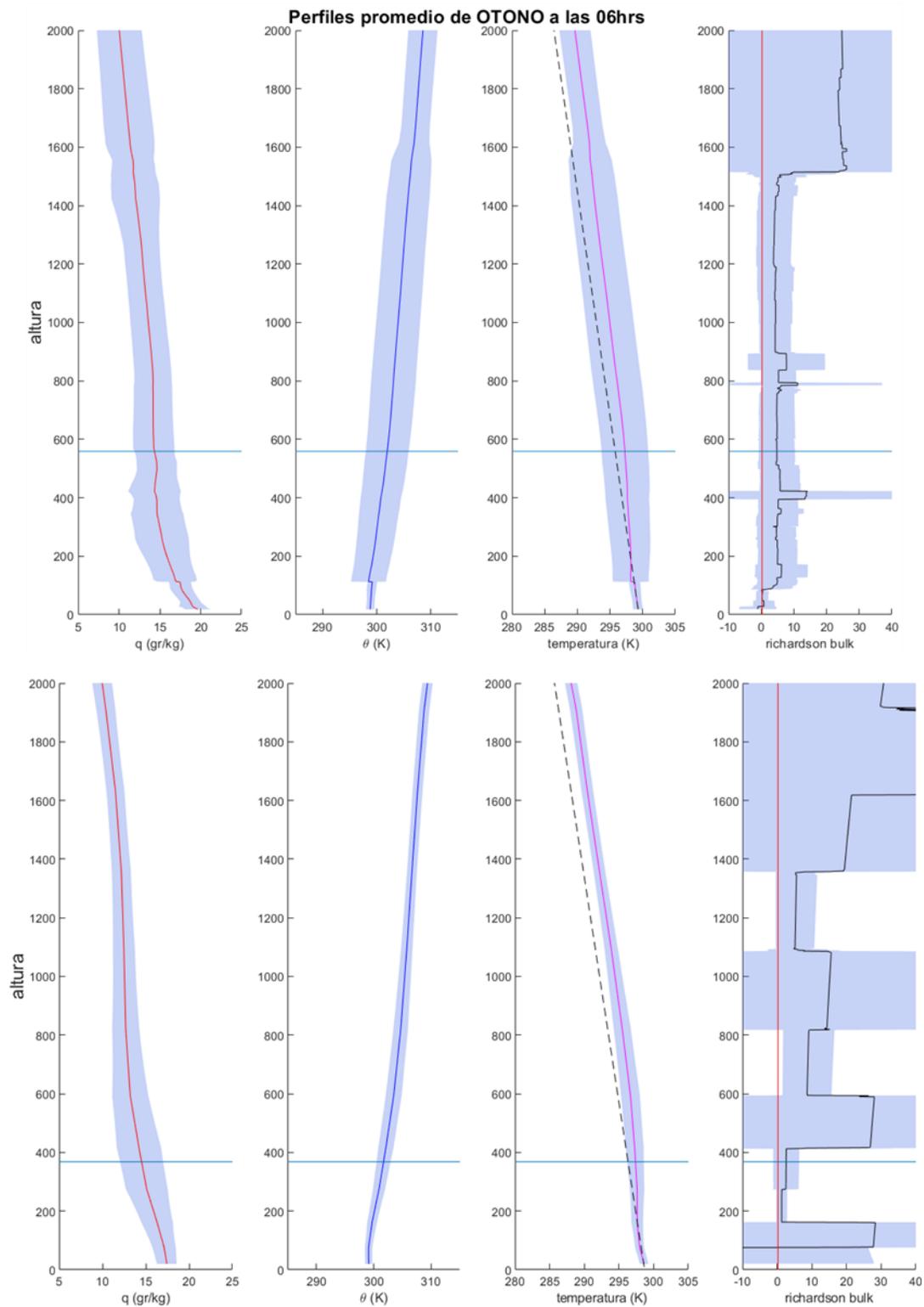
**Figura 6.** Perfiles verticales de radiosondeos observados y modelados para el invierno de 2018, tomados a las 6am de tiempo local. En el panel de arriba se encuentran los perfiles promedio de los radiosondeos observados; en la parte de abajo se tienen los perfiles promedio de los radiosondeos extraídos del modelo WRF. La parte sombreada es la desviación estándar, las líneas punteadas en los perfiles de temperatura representa la razón de lapso adiabático y las líneas horizontales presentes en todos los perfiles representan la altura promedio de la capa limite atmosférica.



**Figura 7.** Como en Figura 6, pero para los perfiles promedio de la primavera 2018.



**Figura 8.** Como en Figura 6, pero para los perfiles promedio del verano 2018.



**Figura 9.** Como en Figura 6, pero para los perfiles promedio del otoño 2018.

De estas comparaciones se observa que el comportamiento de los perfiles verticales es representado de forma realista por el modelo WRF. Se encontraron diferencias mínimas entre los perfiles observados y

modelados, siendo el único perfil con diferencias marcadas el del número de Richardson, del cual se obtuvieron valores mayores al calcularlo mediante los datos extraídos del modelo WRF. Estas diferencias en el perfil del número de Richardson indican dos posibilidades, una mayor turbulencia en los perfiles modelados por el WRF o la supresión de la misma, lo que implica que las partículas se mezclan con la atmósfera superior más rápido o más lento de lo que se ha observado.

Por otro lado, otra diferencia encontrada fue en las alturas de la capa límite, puesto que en el caso de invierno (Figura 6) y otoño (Figura 9) el modelo WRF tiende a estimar alturas menores de la capa límite comparadas con las alturas obtenidas mediante la metodología de Wang y Wang (2014) aplicada a los datos observados.

En el caso de la primavera (Figura 7) se observa que la estimación de la altura de la capa límite sigue siendo subestimada por el modelo WRF. Sin embargo, la diferencia entre la altura calculada y la obtenida por el modelo es menor que en los casos de invierno y otoño. Finalmente, en el verano (Figura 8) se puede observar que la estimación de la altura de la capa límite ya no presenta diferencias entre los resultados observados y los modelados.

Tras realizar la comparación entre los datos observados y modelados, se decidió proceder con el análisis de la capa límite en el punto de malla más cercano a las chimeneas utilizando datos extraídos del modelo WRF. Lo anterior tras observar que los perfiles verticales modelados representan de forma confiable el comportamiento de las variables, teniendo perfiles verticales similares en los casos de temperatura, humedad y temperatura potencial respecto a las observadas, además de contar con una mayor disponibilidad de datos en el caso de los resultados modelados, dado que los radiosondeos observados únicamente se encontraban disponibles a las 6 am. Las diferencias entre las alturas de la capa límite modeladas y observadas se pueden deber en parte al esquema de parametrización de la turbulencia de la capa planetaria que se utilizó para correr el modelo. Sin embargo, se considera bastante confiable la estimación realizada por el modelo WRF, destacando que en las estaciones de primavera y verano la altura estimada por el modelo es bastante cercana a la calculada con la metodología de Wang y Wang (2014).

### 3.1.2 Análisis de la capa límite

Una vez determinada la fiabilidad de los radiosondeos extraídos de las salidas del modelo WRF, se procedió con el análisis de la capa límite y la estabilidad atmosférica en la zona de emisión de material particulado.

Uno de los resultados esperados a partir de los perfiles promedio analizados en la sección anterior son plumas del tipo “*lofting*” (Figura 3) al amanecer en invierno y primavera. Este tipo de plumas favorecen una mayor dispersión vertical de los contaminantes. Por otro lado, en verano y otoño se esperan plumas del tipo “*coning*” las cuales dispersan las partículas de manera equivalente en superficie y altura.

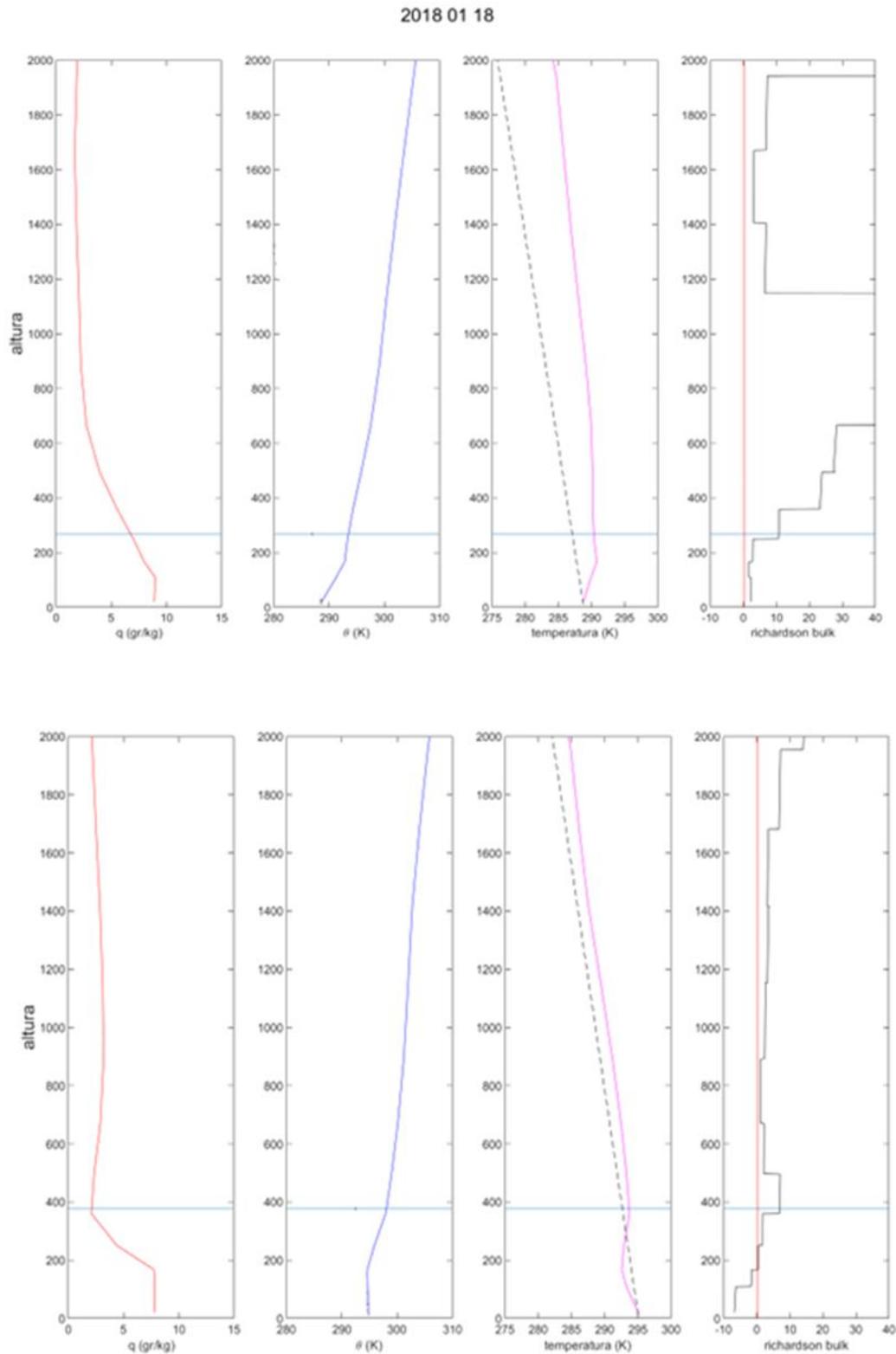
La Figura 10 muestra los perfiles verticales para un caso representativo de invierno, seleccionado al ser el tipo de perfil más común encontrado durante los días de brisas puras de esa estación del año. Se presenta la evolución de dichos perfiles en el transcurso del día, mostrando en el panel superior los perfiles verticales al amanecer (6 am) y en el panel inferior los perfiles a las 6 pm.

Lo primero que se puede observar al amanecer en el perfil de temperatura es la inversión térmica presente en los primeros 150 m desde la superficie. Esto da como resultado una pluma del tipo “*lofting*” (Figura 3e), lo que indica que las partículas se dispersan por encima de la altura de la chimenea (45 m). Esta dispersión por encima de la chimenea se debe a la inversión térmica presente en los primeros metros de altura.

Al mismo tiempo, al observar el perfil de temperatura potencial, se tiene una atmósfera estable, con lo cual las partículas tenderán a quedarse atrapadas dentro de la capa planetaria. Lo anterior es congruente con la inversión térmica observada en el perfil de temperatura. Sobre el número de Richardson Bulk, dentro de la capa límite los valores son pequeños, lo que indica la presencia de turbulencia por corte.

Siguiendo el mismo procedimiento para analizar el radiosondeo vespertino, a partir del perfil vertical de temperatura se puede esperar un comportamiento de la pluma del tipo “*fumigation*” (Figura 3d), que implica que las partículas se dispersan por debajo de la altura de la chimenea y afectan directamente a la superficie. Esto se explica al observar el perfil de temperatura comparado con la razón de lapso adiabática, teniendo en los primeros metros una disminución de la temperatura con la altura y posteriormente una inversión térmica a alrededor de los 180 m de altura, lo cual genera condiciones de estabilidad. Estas condiciones de estabilidad impiden el ascenso de las partículas.

Mientras tanto el perfil de temperatura potencial muestra que tenemos condiciones de neutrales cerca en los primeros 200 m. Sin embargo, la estabilidad encontrada por encima de los 200 m evitaría que las partículas se eleven y salgan de la capa límite. Estas condiciones tienden a encontrarse en la mayoría de los perfiles de invierno bajo condiciones de brisas puras.

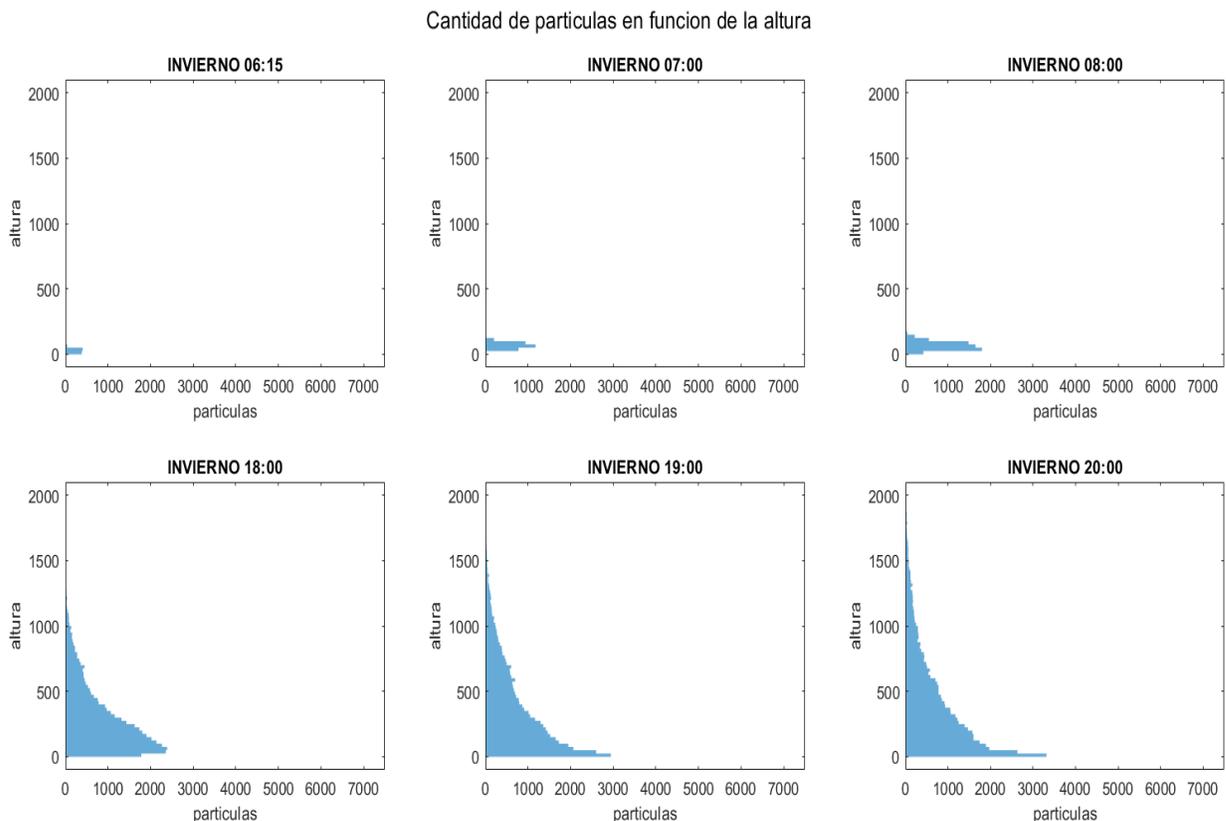


**Figura 10.** Perfiles verticales de radiosondeos modelados para un caso de invierno: el día 18 de enero de 2018. En el panel de arriba se encuentra el perfil de las 6am y en la parte de abajo se tiene el perfil de las 6pm. Las líneas punteadas en los perfiles de temperatura y temperatura potencial representan la razón de lapso adiabático y las líneas horizontales presentes en todos los perfiles representan la altura de la capa límite atmosférica.

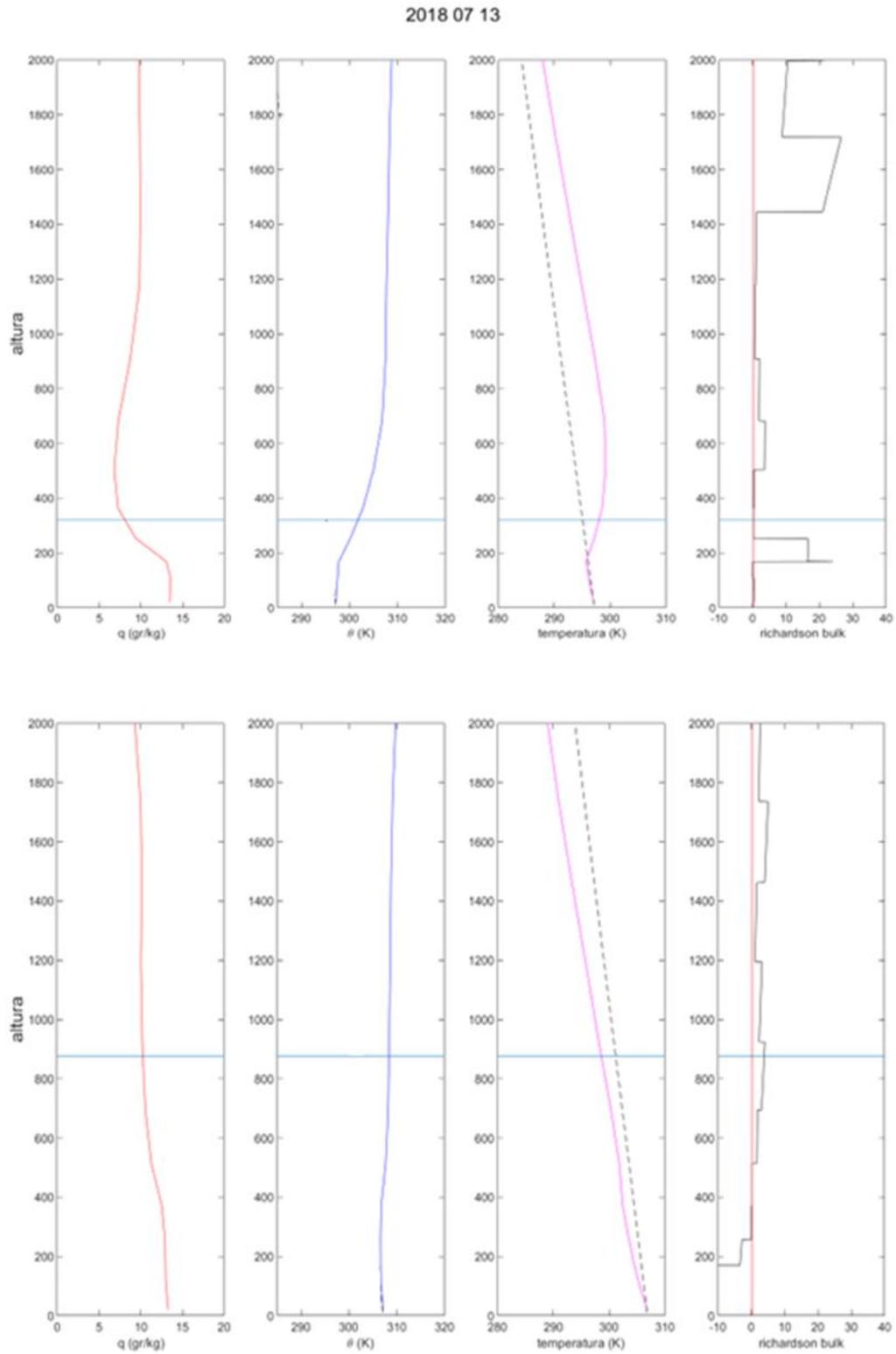
En este caso el comportamiento del número de Richardson Bulk también indica condiciones de inestabilidad cerca de la superficie con turbulencia dominada por el corte de viento.

La Figura 11 permite observar de mejor manera lo mencionado anteriormente. Por la mañana en invierno se tiene una pluma de tipo “*lofting*” que da una mayor concentración de partículas por encima de la altura de la chimenea. Esto coincide con el comportamiento teórico esperado que se observa en la Figura 3e, aunque se puede observar que de igual manera algunas partículas siguen dispersándose por debajo de la altura de la chimenea, en menor cantidad.

Este comportamiento cambia por la tarde, donde se puede observar que con el cambio de estabilidad atmosférica ahora las partículas se concentran en mayor cantidad por debajo de la altura de la chimenea lo cual es congruente con el comportamiento teórico de “*fumigación*” esperado de la Figura 3d.



**Figura 11.** Concentración de partículas en función de la altura para el conjunto de experimentos de invierno. En el panel de arriba se tiene la concentración al amanecer, en las primeras horas de la simulación. En el panel inferior se tiene la pluma transcurridas 12 horas de simulación. Las horas están dadas en horario local. El conteo de partículas se realizó cada 25 m, los primeros 50 m se encuentran por debajo de la altura de la chimenea.



**Figura 12.** Como en la Figura 10, pero para condiciones de verano, el día 13 de julio de 2018.

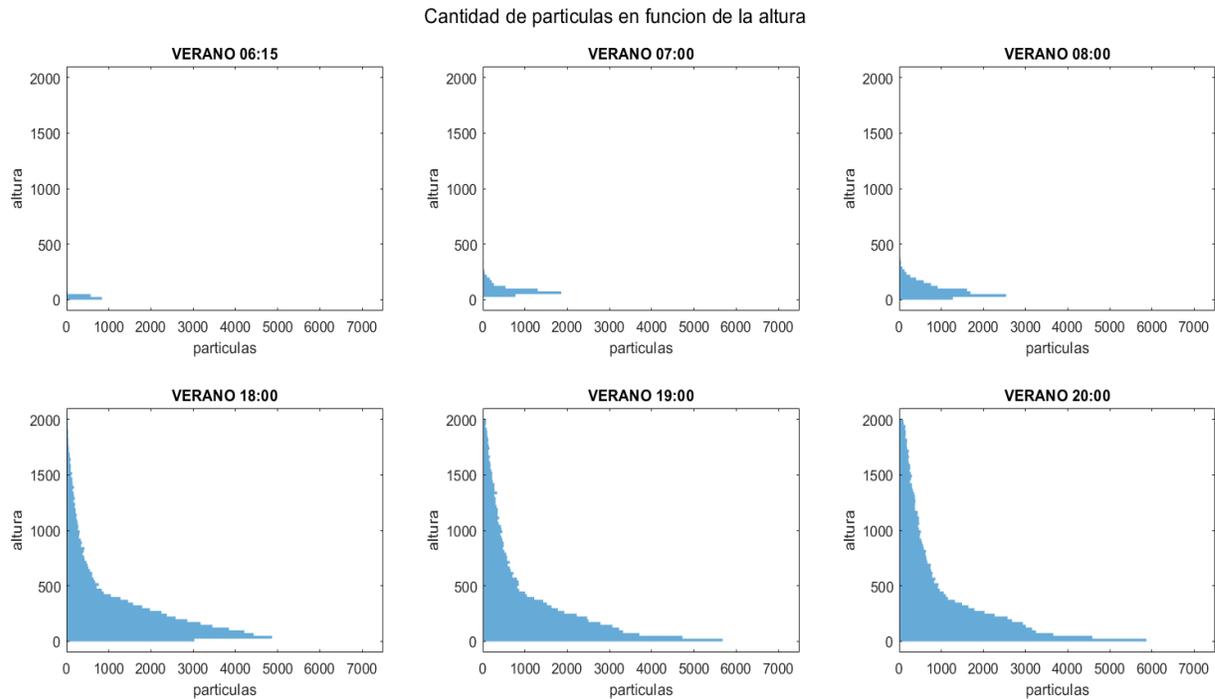
La Figura 12 muestra los perfiles verticales para un caso representativo de verano, que son contrastantes respecto a las de invierno.

Lo primero que se observa en el perfil de temperatura es la ausencia de la inversión térmica cerca de la superficie. Esto da como resultado una pluma del tipo “*coning*” (Figura 3a), con un perfil vertical de temperatura que disminuye con la misma tasa que la razón del lapso adiabático, lo que indica que las partículas se dispersan tanto por encima como por debajo de la altura de la chimenea. Al mismo tiempo, al observar el perfil de temperatura potencial, se observa que tenemos una atmósfera neutral o ligeramente estable. Lo anterior puede corroborarse en la Figura 13, en la cual se encontró que las partículas se dispersan de manera equivalente tanto por encima como por debajo de la altura de la chimenea, algo que es diferente a lo ocurrido en invierno. Sobre el número de Richardson tenemos que dentro de la capa límite los valores son pequeños, lo que indica la presencia de turbulencia por corte en los primeros 180 m.

Siguiendo el mismo procedimiento para analizar el radio sondeo vespertino, tenemos que el perfil vertical de temperatura disminuye con una tasa mayor que la razón de lapso adiabático. En consecuencia, se espera un comportamiento de la pluma del tipo “*looping*” (Figura 3b) que implica partículas que se dispersan de manera ascendente y descendente y algunas afectan directamente a la superficie. El perfil de temperatura potencial nos muestra que tenemos condiciones de inestabilidad hasta una altura de 400 m, lo que podría propiciar que las partículas que logren dispersarse por encima de la altura de la chimenea, elevándose hasta salir de la capa límite. En este caso el comportamiento del número de Richardson Bulk nos indica condiciones de turbulencia en donde domina el corte de viento. Lo anterior es similar a lo encontrado en invierno y primavera.

Es importante resaltar la importancia del ciclo diurno estacional para controlar el destino de las partículas emitidas por la chimenea. Lo anterior no solo por el efecto de las brisas sino también por el efecto de la estabilidad estática de la atmósfera. Los perfiles verticales mostrados en esta sección indican comportamientos diferentes de las plumas de material emitido por la chimenea, dependiendo de la hora del día.

Cabe aclarar que para las figuras 11 y 13 se graficó el conjunto total de experimentos para las estaciones respectivas, con la finalidad de apreciar de mejor manera las plumas.



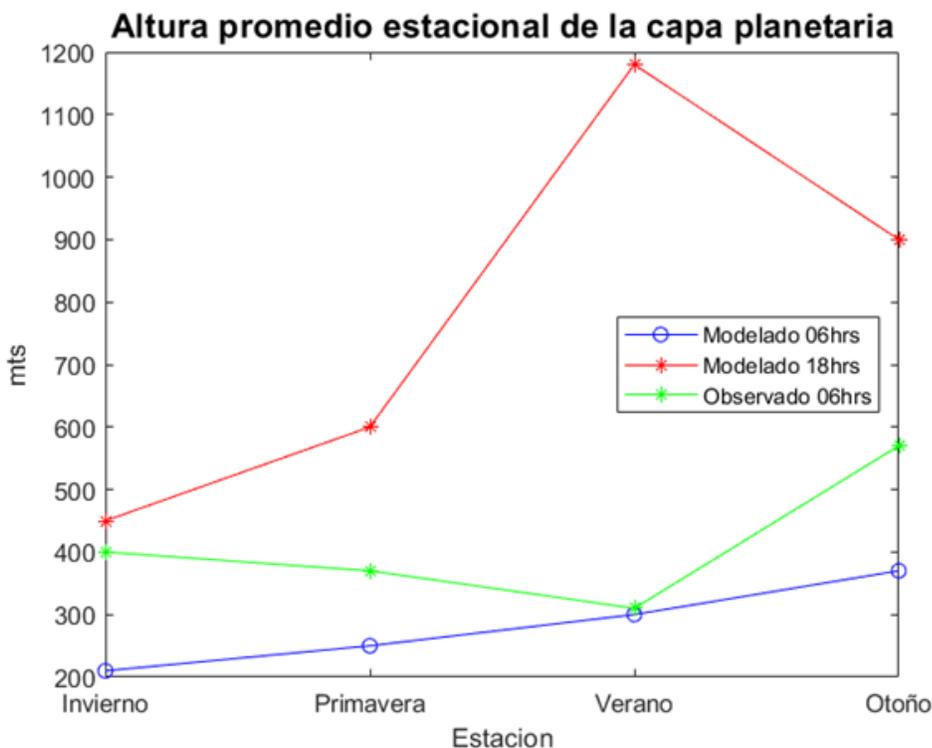
**Figura 13.** Como la figura 11 pero para verano.

### 3.1.3 Variación estacional de la capa límite

A partir de los radiosondeos individuales obtenidos del modelo WRF fue posible determinar la variación estacional en la altura de la capa límite. Para determinar la altura estacional promedio se consideraron por separado las alturas obtenidas por el modelo a las 06 h y a las 18 h de tiempo local.

En la Figura 14 se puede observar esa variación estacional. Se tiene que en el horario de las 06 h la altura promedio de la capa límite en días de brisa pura incrementa a lo largo del año. Al comparar esto con la altura promedio obtenida en los radiosondeos observados, notamos que las estaciones con mayor cercanía en sus valores son primavera y verano. Sin embargo, tiende a existir una subestimación de la altura de la capa límite en los radiosondeos del modelo WRF que es más notoria durante el invierno y otoño.

Por otro lado, la mayor variación de la altura de la capa límite se encontró a las 18 h, teniendo la menor altura promedio en invierno con una altura de 450 m. Esta altura incrementa con el paso de los meses teniendo aproximadamente 600 m de altura en primavera y alcanzando su mayor valor en verano con 1180 m. Para otoño la altura se reduce nuevamente, pero manteniéndose por encima de los 900 m.



**Figura 14.** Variación estacional de la altura promedio de la capa límite para las 06 y 18 h de tiempo local, calculada con el modelo WRF para el año 2018. En color verde se tiene la altura promedio estimada con el método de Wang y Wang (2014) a las 06 h.

Lo anterior es congruente con lo que se espera para cada estación, con condiciones contrastantes entre el invierno y verano. Esto puede explicarse por el ciclo anual de radiación solar, que propicia que en los meses con mayores temperaturas superficiales la altura de la capa límite crezca más en comparación con los meses de invierno.

La variación estacional en la altura de la capa límite permite establecer el límite superior de la altura a la que las partículas emitidas por la central termoeléctrica serán dispersadas, potencialmente afectando la calidad del aire de manera directa.

### 3.2 Destinos posibles del material emitido

A continuación, se presentan los resultados de la estimación de los destinos del material emitido a partir de las dos herramientas descritas en los métodos, la primera de ellas fue la dispersión absoluta.

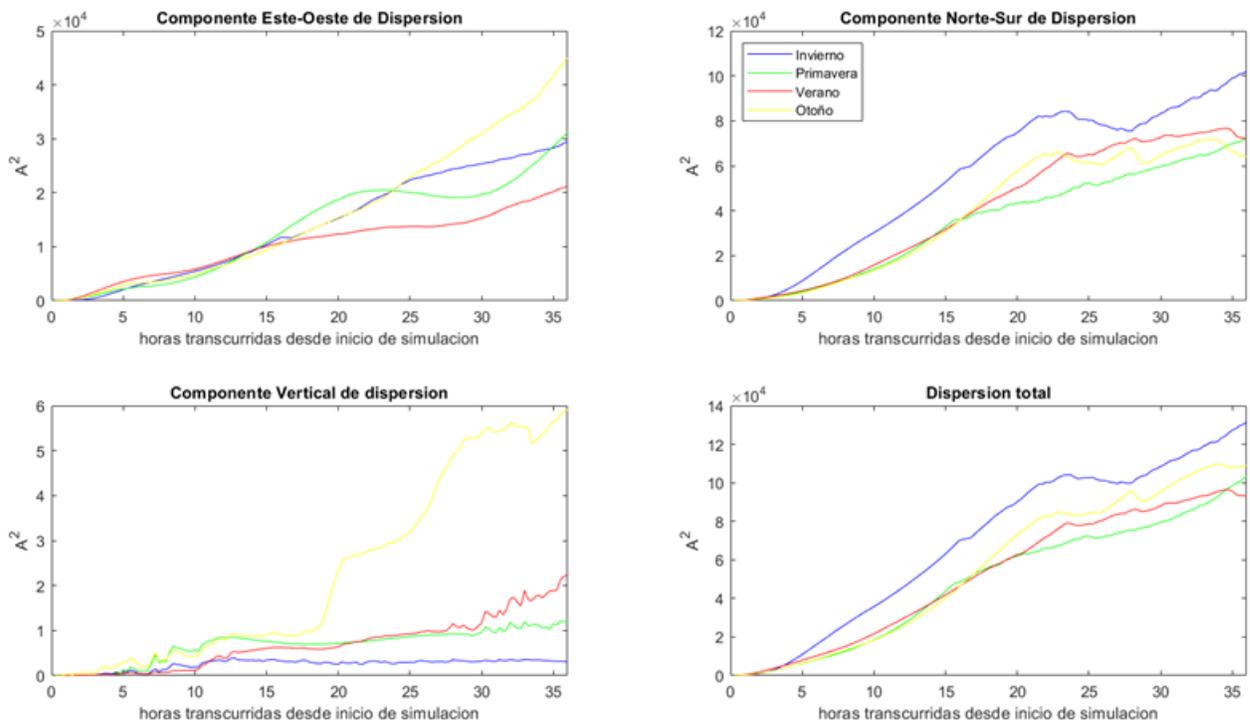
### 3.2.1 Dispersión absoluta

La dispersión absoluta de un conjunto de partículas se define como la separación cuadrática media de cada partícula respecto a su posición a un tiempo de referencia.

En este caso el cálculo de la dispersión se realizó promediando la dispersión de todas las simulaciones en conjunto para cada una de las componentes direccionales del movimiento de las partículas: latitudinal, longitudinal y vertical.

Otro detalle a mencionar es que el cálculo realizado únicamente consideró partículas que llevaran el mismo tiempo en el ambiente desde que fueron emitidas por la chimenea, iniciando con 5000 partículas y reduciendo el número gradualmente.

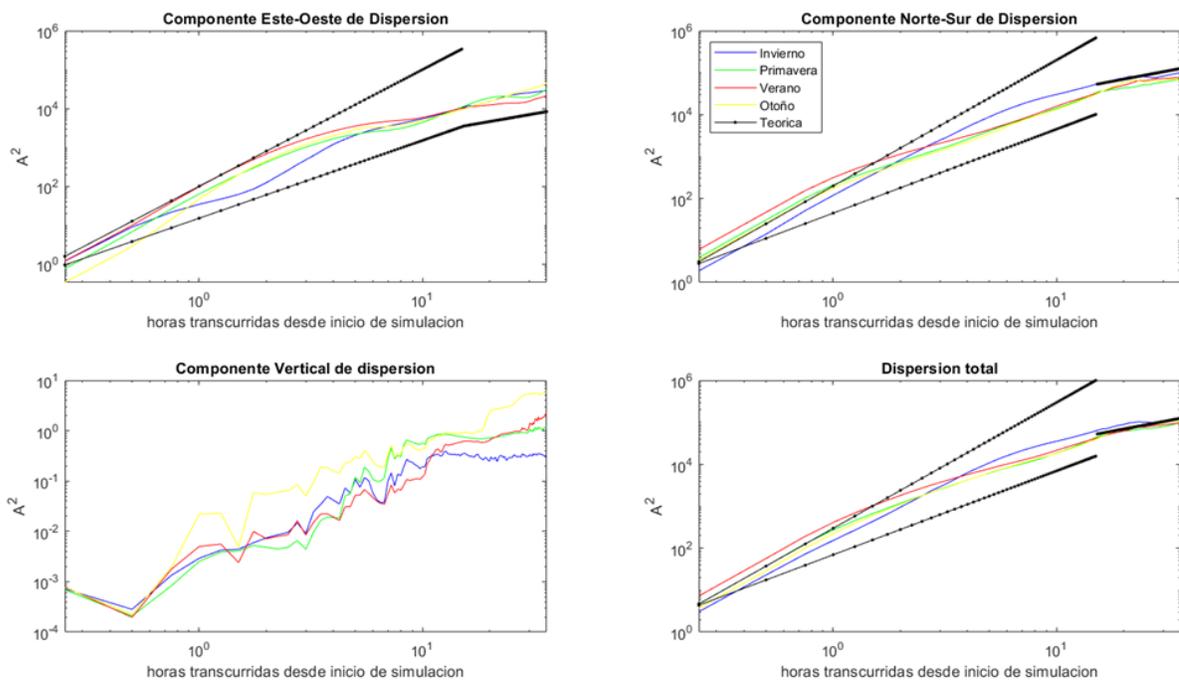
En la Figura 15 se tiene cada una de las componentes de la dispersión absoluta. En el caso de la dispersión longitudinal (este-oeste) se puede observar que el comportamiento en las primeras 15 h desde la emisión de las partículas es bastante similar en las 4 estaciones del año. Las diferencias empiezan a notarse pasadas esas 15 horas, teniendo una menor dispersión longitudinal en verano y mayor en otoño.



**Figura 15.** Dispersión absoluta promedio (m<sup>2</sup>) por componentes para invierno (curvas azules), primavera (verde), verano (rojo), otoño (amarillo). La hora de inicio de todas las simulaciones es 6 am.

Respecto a la componente latitudinal (Norte-Sur) se observa que la dispersión es bastante similar en las estaciones de primavera, verano y otoño a lo largo de toda la duración de las simulaciones. Pero durante el invierno los valores de dispersión latitudinal son notablemente mayores a los del resto de las estaciones. Esto nos dice que en invierno las partículas tienden a moverse principalmente a lo largo de la dirección norte-sur. La componente vertical de la dispersión presenta un comportamiento diferente a las anteriores. Sus valores son tres órdenes de magnitud menores, lo que indica que las partículas tienden a moverse menos verticalmente que horizontalmente. En cuanto a la estacionalidad, al igual que en la dispersión longitudinal se identificó un comportamiento similar en todas las curvas dentro de las primeras 15 horas. Después de ese tiempo es donde están las diferencias, teniendo las partículas una mayor dispersión vertical en otoño y su menor dispersión en invierno, lo cual significa que en invierno tenemos una mayor cantidad de partículas atrapadas cerca de la superficie.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las mismas curvas de dispersión absoluta, pero graficadas usando la escala logarítmica en ambos ejes, con el fin de observar el régimen de dispersión dominante en función del tiempo. Los tipos de dispersión que se espera observar en la capa planetaria atmosférica son (1) dispersión linealmente proporcional al tiempo ( $t$ ); (2) dispersión balística (proporcional a  $t^2$ ) y; (3) dispersión por corte (proporcional a  $t^3$ ) (Zavala, 2021).



**Figura 16.** Dispersión absoluta promedio ( $m^2$ ) por componentes para cada estación del año, graficada en escala logarítmica. Las líneas en color negro representan la dispersión teórica que puede ser lineal (proporcional al tiempo,  $t$ ) la cual encontramos posterior a 15hrs de simulación, balística (proporcional a  $t^2$ ) línea negra inferior y por corte (proporcional a  $t^3$ ) línea negra superior. La hora de inicio de las simulaciones es las 6 am de tiempo local.

De lo observado en esta gráfica para la componente este-oeste, el régimen de dispersión en todas las estaciones del año es mayor a uno balístico, pero sin llegar a ser dispersión por corte. Esto ocurre dentro de las primeras 15 horas de simulación, posteriormente la dispersión pasa a ser lineal como se espera dentro del comportamiento de caminata aleatoria (Zavala, 2021).

El segundo caso (dirección norte-sur) muestra que en invierno ocurre dispersión por corte dentro de las primeras 12 horas de simulación y posterior a ello la dispersión pasa a ser lineal. El resto de las estaciones del año muestran un comportamiento aproximadamente balístico en las primeras 15 horas de simulación, posteriormente pasando a una dispersión lineal como en los casos anteriores.

### 3.2.2 Probabilidad de destinos

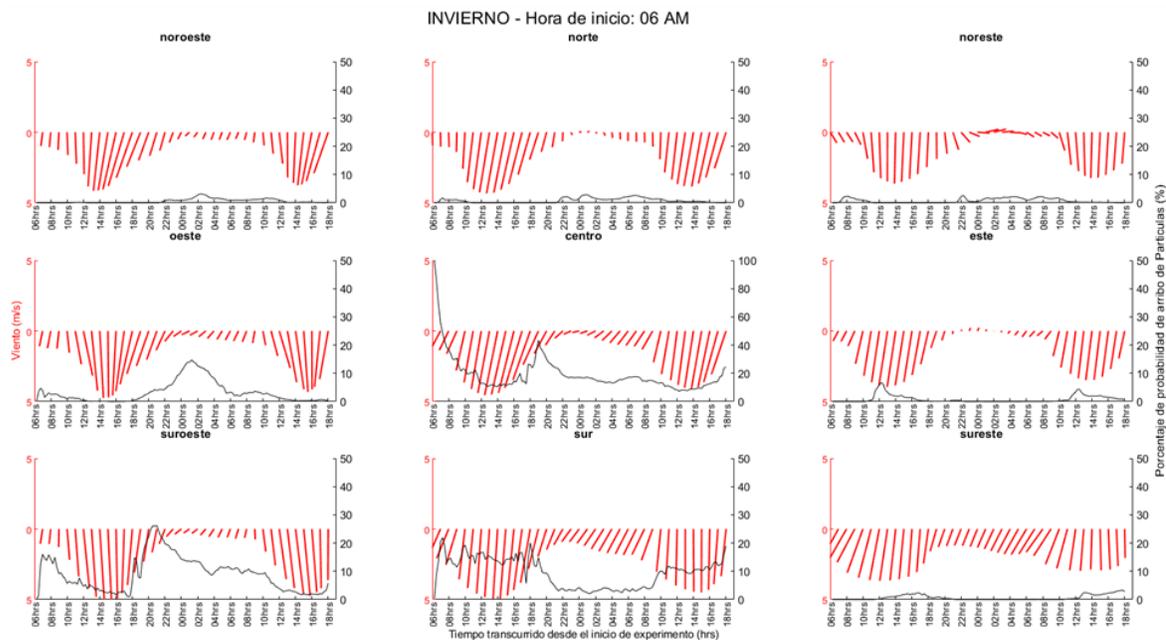
Uno de los objetivos principales de este trabajo es determinar las zonas que tienen la mayor probabilidad de recibir contaminantes emitidos por la central termoeléctrica. Con este fin se estimó la probabilidad de arribo a cada región de las partículas contaminantes (la regionalización se describe en el capítulo anterior y se muestra en la Figura 4) usando la formula:

$$P = \frac{R_i}{N} \quad (9)$$

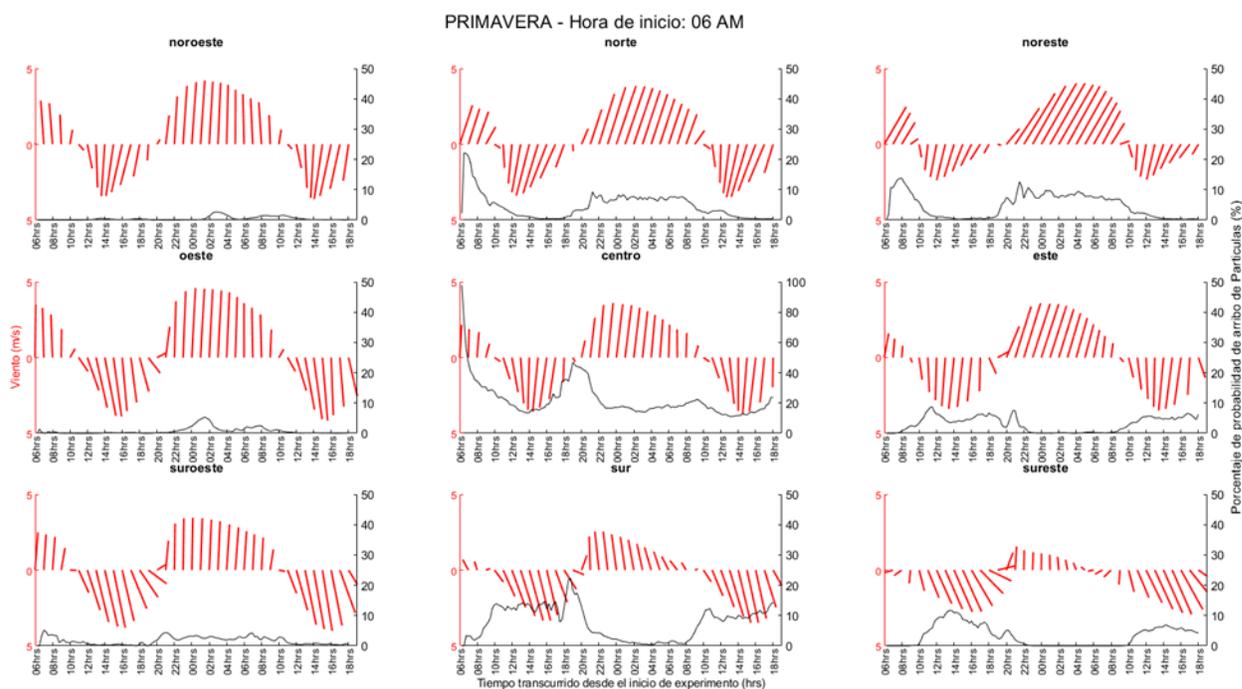
Donde  $P$  es la probabilidad de arribo de partículas,  $R_i$  es el numero de particulas presentes en la región  $i$  y  $N$  es el número total de partículas emitidas al momento del cálculo. Este cálculo se realizó estacionalmente utilizando las simulaciones que iniciaron a las 6am, con el fin de observar como el ciclo diurno de las brisas afecta a la probabilidad de que alguna región reciba partículas contaminantes. De igual manera dentro de este análisis se contempló el viento promedio de cada región para poder comparar el cambio de las brisas entre una estación y otra.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la probabilidad de destinos para la temporada de invierno. Se observan brisas dominantes que provienen del norte, lo cual ocasiona que una mayor cantidad de contaminantes llegue a las regiones que se encuentran en el sur. También podemos ver que, en la región central, después de transcurridas 12 horas de simulación, la brisa tiene una componente con dirección al suroeste, lo que nos da una mayor cantidad de partículas en esa región entre las 12 y 30 horas de simulación, con probabilidades de hasta el 30% de recibir partículas contaminantes,

es en dicha zona en donde se encuentra la mayor parte de la ciudad de La Paz. Por otro lado, en horas de la madrugada hay brisa que se dirige hacia el sur.



**Figura 17.** Probabilidad de destino para las simulaciones de invierno. Cada panel corresponde a una región de la zona de estudio. En color rojo se pueden observar las astillas de viento, ligadas al eje ubicado a la izquierda con magnitudes en m/s. Los valores negativos indican direcciones de las brisas hacia el sur. Las curvas negras representan los porcentajes de probabilidad que tiene cada región de recibir partículas. La hora de inicio de todas las simulaciones es las 6am de tiempo local.



**Figura 18.** Igual que la Figura 17, pero para la temporada de primavera.

En el caso de la primavera (Figura 18), el comportamiento cambia respecto al invierno. El flujo asociado a las brisas no se dirige únicamente hacia el sur, si no que alterna entre dirección norte y sur a lo largo del día. La brisa con dirección norte domina en horas de la noche y la madrugada, mientras que la brisa con componente sur se observa durante los periodos de la mañana y la tarde. Por otro lado, en este caso no hay componente con dirección al oeste en la mayoría de los casos, lo que lleva a que la cantidad de partículas que pueden afectar la zona de La Paz sea menor que en invierno.

La estación de verano (Figura 19) tiene un comportamiento muy similar a la primavera, con viento que varía entre dirección norte y sur a lo largo del día. La diferencia principal se observa en la duración de esos flujos, teniendo las brisas dirigidas al sur con una duración más corta que en primavera. Las brisas dirigidas al norte dominan la mayor parte del día, durando alrededor de 18 horas desde las 5pm hasta las 11am. De igual forma las brisas con dirección sur tienden a tener una componente direccional hacia el este. Todo lo anterior da como resultado una probabilidad de recepción de partículas muy pequeña en la zona de La Paz, siendo siempre menor al 5% y contrastando con el caso del invierno, en donde se tienen probabilidades por encima del 20%. Algo más que se observa en verano es que la región norte recibe más partículas durante las primeras 2-3 horas. También se tienen brisas nocturnas con componente principal hacia el noreste alternándose con viento hacia el sur/suroeste, que es la brisa que viene del Golfo de California, durante el día.

En el caso de otoño (Figura 20) se identifica la misma tendencia mantenida en primavera y verano, con brisas que varían entre norte y sur a lo largo del día. Sin embargo, la diferencia principal con dichas estaciones es la intensidad de las brisas, siendo en otoño menos intensas que en las otras estaciones. Lo anterior puede deberse a una menor magnitud entre los contrastes térmicos entre el Océano Pacífico, la península de Baja California y el Golfo de California que modulan a las brisas. Otra diferencia observada respecto al verano es la duración de las brisas, con brisas en dirección norte que inician a las 5pm y concluyen a las 6am. Un último detalle para mencionar es que otoño es la segunda estación con mayor concentración de material particulado en la región suroeste, donde se encuentra la ciudad de La Paz, con probabilidades de hasta el 10% de recibir partículas contaminantes.

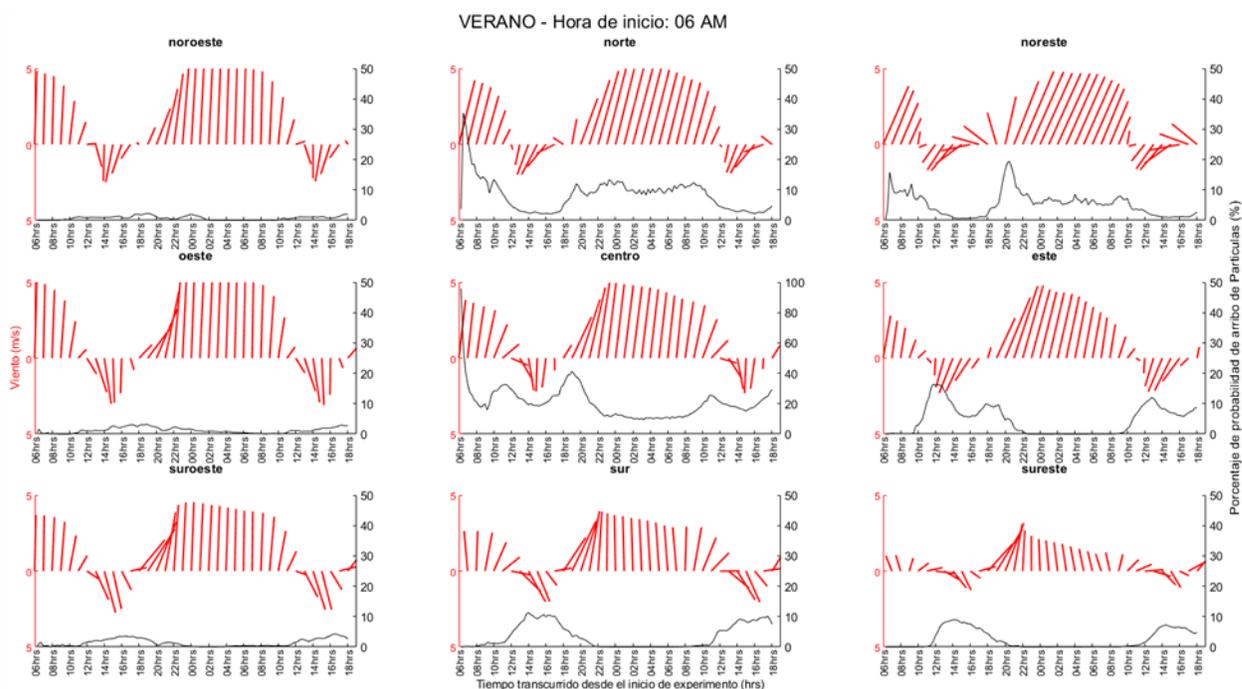


Figura 19. Igual que la Figura 17, pero para la temporada de verano.

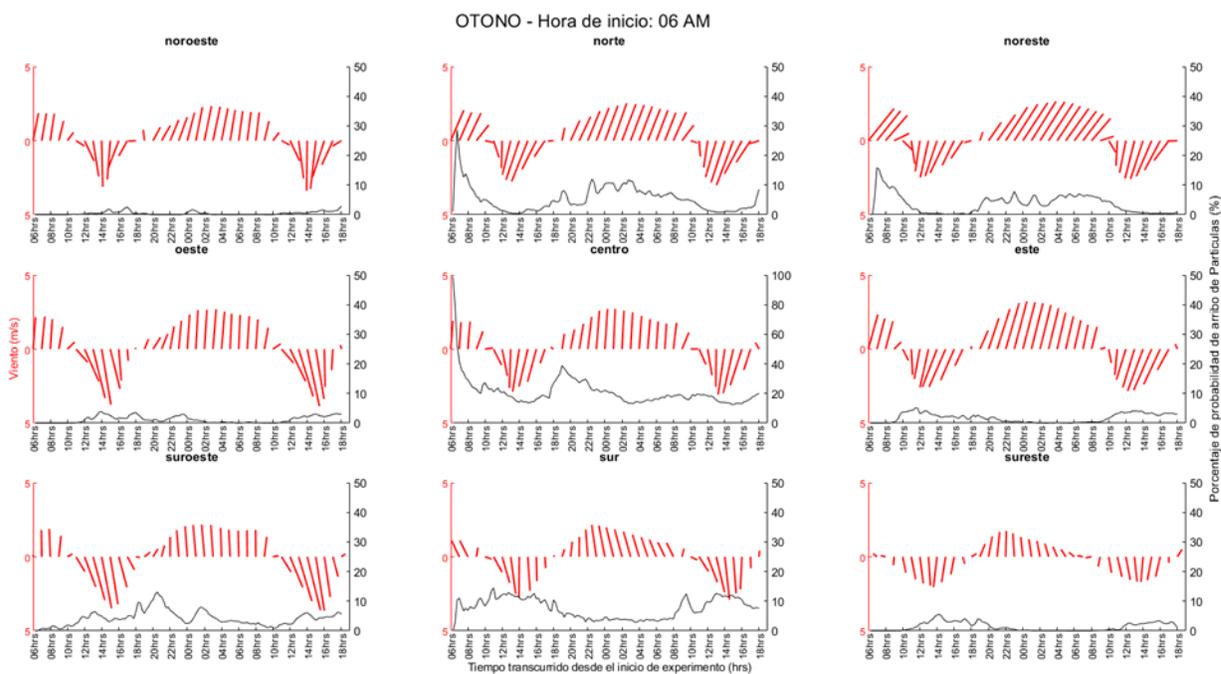


Figura 20. Igual que la Figura 17, pero para la temporada de otoño.

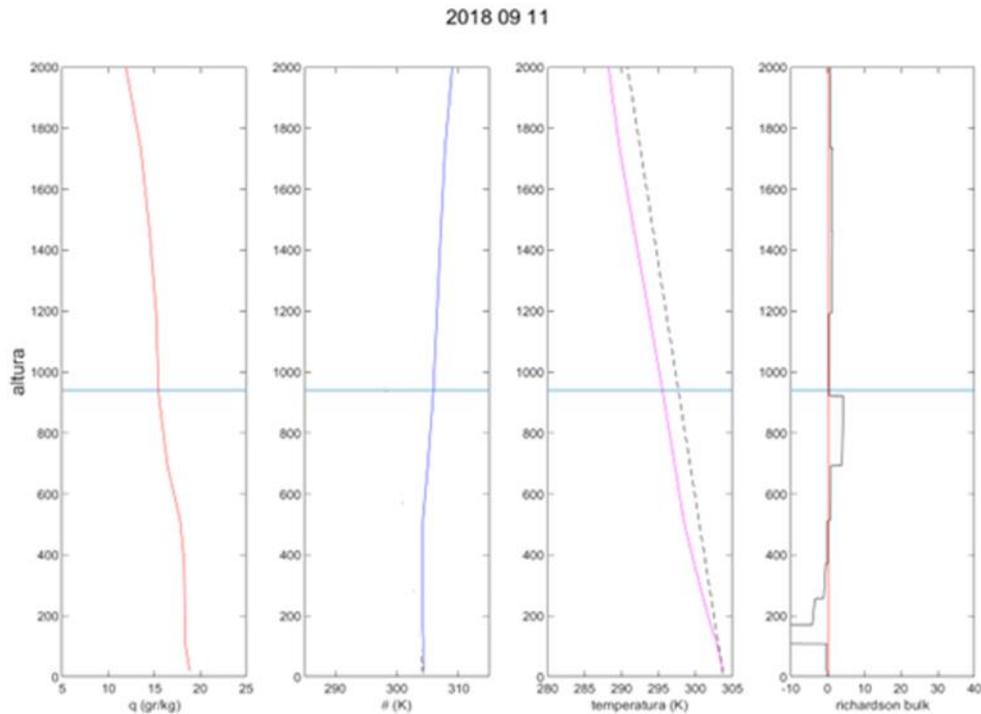
## Capítulo 4. Discusión

---

El número de sondeos que en La Paz se tomaron durante el año 2018 fueron aproximadamente 278 en los 365 días del año; esto implica un 76% del total. Todos los radiosondeos fueron medidos a las 6 h tiempo local. La mayor parte de los faltantes fueron a partir de octubre cuando hubo 10 faltantes, 30 fueron en noviembre y 31 en diciembre. Esta falta de disponibilidad de datos principalmente en otoño hizo de mayor relevancia la necesidad de otras fuentes de datos de radiosondeos, en este caso de datos modelados.

De la Figura 15 se observa que, en lo respectivo a la dispersión, a diferencia de lo esperado, se tienen condiciones más contrastantes entre invierno y otoño que entre invierno y verano. El objetivo de este capítulo es explicar a qué se debe eso y cómo afecta a los destinos posibles del material emitido por las chimeneas. La dispersión este-oeste muestra que la estación del año con mayor dispersión es la primavera, mientras que la estación con menor dispersión en dichas direcciones es el invierno. En el caso de la componente norte-sur se ve que ahora es la estación de invierno la que más dispersa partículas en dicha dirección, mientras que en otoño la dispersión es menor. En la estación de otoño se encontró una mayor dispersión en la vertical, lo que indica que las partículas tienden a elevarse más en dicha estación del año. Esto contrasta con el invierno, donde la dispersión vertical es muy pequeña, lo que nos dice que las partículas tienden a mantenerse más cercanas a la superficie. Esto es congruente con lo observado en la Figura 10: a partir de los perfiles verticales en donde el tipo de pluma emitida por las chimeneas tiende a dispersar las partículas cerca de la superficie en horario vespertino.

Respecto a las condiciones contrastantes que se tienen en la dispersión vertical en otoño después de 12 horas de simulación, esto se puede explicar observando la Figura 21, la cual muestra los perfiles verticales de un caso típico de otoño a las 6 pm. El perfil de temperatura muestra que el tipo de pluma emitida por las chimeneas es del tipo “*coning*” (Figura 3a), que indica una dispersión similar por encima y por debajo de la chimenea. Mientras que el perfil de temperatura potencial y del número de Richardson Bulk indican condiciones de inestabilidad en los primeros 700 m de altura, lo cual, en conjunto con una mayor altura de la capa planetaria que en invierno, propicia la elevación de las partículas. Dentro del cálculo de las probabilidades de destinos del material emitido por las chimeneas se encontraron similitudes con lo observado en la gráfica de dispersión absoluta (Figura 15). En dicha figura se encontró que en invierno se tiene una mayor dispersión latitudinal que en el resto de las estaciones. Esto se explica con lo observado en la Figura 17, dado que se tienen brisas con dirección sur durante todo el día, lo que da lugar a esa dispersión latitudinal tan grande.



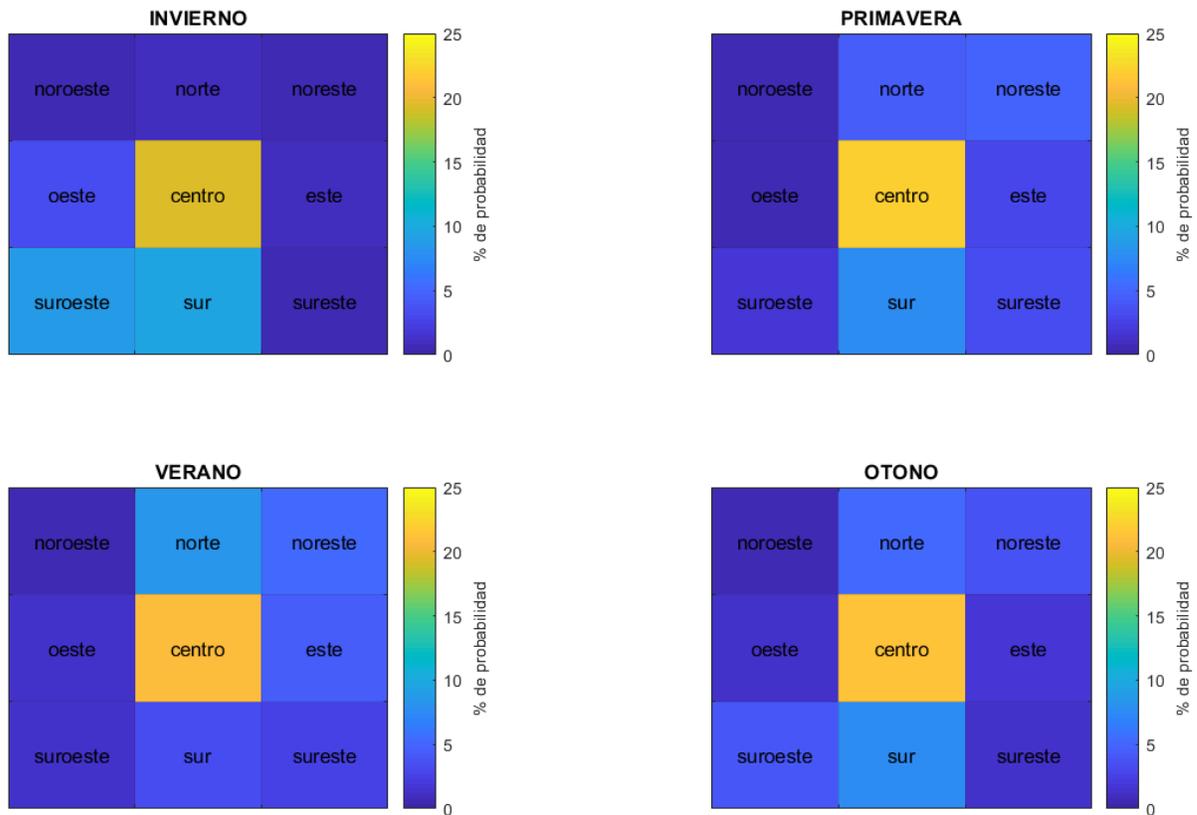
**Figura 21.** Como en la Figura 10, pero para condiciones de otoño, el día 11 de septiembre de 2018 a las 6pm de tiempo local.

La Figura 22 resume de manera más clara las probabilidades que tiene cada región de recibir material particulado. Dicha imagen nos muestra el promedio estacional para todos los experimentos del porcentaje de probabilidad de arribo del material. Se observa que tal y como mostraron las figuras 17 a 20, la estación de invierno es aquella en la cual la región suroeste, en donde se encuentra la mayor parte de la ciudad de la paz, se encuentra más propensa a recibir material particulado.

Por otro lado, en primavera y verano las probabilidades de que la ciudad de la paz reciba material son casi nulas.

Lo anterior no es congruente con algunos resultados obtenido por grupo CERCA, que en su reporte técnico de concentración de contaminantes para el año 2020 encontró que durante la mayor parte del año las concentraciones de contaminantes en la ciudad de la paz superaban las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y los límites permitidos por las normativas mexicanas (CERCA, 2020). Sin embargo, el reporte de grupo CERCA no se enfoca únicamente en material particulado proveniente de la CCI, si no que se realizan las mediciones de calidad del aire de diferentes fuentes. Debido a eso no se puede afirmar que la contaminación presente la mayor parte del año provenga de la CCI La Paz.

## PORCENTAJES DE PROBABILIDAD PROMEDIO ESTACIONALES EN CADA REGION



**Figura 22.** Porcentaje de probabilidad de arribo de material particulado en cada región. Se observa el promedio de las probabilidades de todos los experimentos de cada estación.

Cabe mencionar que el cálculo de las probabilidades de destino del material emitido se realizó contemplando únicamente aquellas partículas que se encontraran dentro de la capa límite. Lo que de acuerdo con lo analizado en los radiosondeos implicaría que se espera una mayor cantidad de partículas atrapadas en las estaciones con condiciones de mayor estabilidad atmosférica. Respecto a la fiabilidad de los resultados obtenidos de las simulaciones del modelo FLEXPART-WRF utilizando vientos de alta resolución, estudios anteriores han demostrado que el modelo FLEXPART-WRF se adapta de manera eficiente a diferentes tipos de datos de entrada, obteniendo resultados similares para campos de viento provenientes de diferentes modelos (Angevine et al, 2014).

Por otro lado, otros estudios han encontrado que el uso de ensambles de diferentes parametrizaciones tiende a obtener mejores resultados reproduciendo los patrones de dispersión que aquellos casos en los que se usa una única parametrización (Srinivas et al, 2016).

## Capítulo 5. Conclusiones

---

La comparación realizada entre los radiosondeos modelados y observados permite observar que el modelo WRF reproduce de manera eficiente los perfiles verticales de las variables atmosféricas, sin embargo, existe una subestimación en la altura de la capa límite en los meses de invierno y otoño. Sin embargo, la falta de datos observados vuelve necesario encontrar fuentes alternas de información.

Las condiciones de estabilidad presentes en capas bajas de la atmósfera durante el invierno permiten que una mayor cantidad de partículas se queden atrapadas dentro de la capa límite en dicha estación, caso que resulta contrastante con el otoño, en donde las condiciones de inestabilidad predominantes permiten un mayor ascenso de las partículas.

El principal motor de movimiento de las partículas son las brisas. Esto explica la mayor dispersión latitudinal en invierno, dadas las brisas predominantes durante todo el ciclo diurno con dirección hacia el sur. Los cambios de dirección durante el ciclo diurno de brisas el resto de las estaciones ocasiona una menor dispersión latitudinal.

El invierno resulta ser la estación en donde mayor probabilidad existe en la ciudad de La Paz de recibir material particulado. Esto tiene sentido al ser la estación en que una mayor cantidad de partículas se quedan atrapadas cerca de la superficie además de que en esta estación encontramos brisas predominantemente con dirección al sur.

De esto mismo se puede decir que las horas con mayor probabilidad de recepción de material particulado se encuentran entre las 8pm y las 10am, horas en que las probabilidades alcanzan sus valores más altos y las brisas tienen una componente sureste, dirección en que se encuentra la ciudad de La Paz. En esta misma estación la menor probabilidad de recepción de partículas está entre las 12 pm y las 6 pm.

Durante el resto de las estaciones la probabilidad de recepción de partículas en la ciudad de La Paz es muy baja, en especial en las estaciones de primavera y verano.

## Literatura citada

---

- Angevine, W. M., Brioude, J., McKeen, S., and Holloway, J. S. 2014. Uncertainty in Lagrangian pollutant transport simulations due to meteorological uncertainty from a mesoscale WRF ensemble, *Geosci. Model Dev.*, 7, 2817–2829, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2817-2014>.
- Arya, P., 1999. *Air Pollution Meteorology and dispersion*. Oxford, Reino Unido.
- Beljaars, A., 1992: The parametrization of the planetary boundary layer. Lecture Series. ECMWF. 73 pp. Consultado el 10 de Junio de 2020, de <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2002/16959-parametrization-planetary-boundary-layer.pdf>
- Brioude, J., Angevine, W. M., McKeen, S. A., and Hsie, E.-Y.: Numerical uncertainty at mesoscale in a Lagrangian model in complex terrain, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1127–1136, doi:10.5194/gmd-5-1127-2012, 2012.
- Brioude, J., Arnold, D., Stohl, A., Cassiani, M., Morton, D., Seibert, P., Angevine, W., Evan, S., Dingwell, A., Fast, J. D., Easter, R. C., Pisco, I., Burkhardt, J., Wotawa, G., 2013. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1. *Geosci. Model Dev.*, 6, 1889–1904, [www.geosci-model-dev.net/6/1889/2013/](http://www.geosci-model-dev.net/6/1889/2013/). doi:10.5194/gmd-6-1889-2013
- Cassiani, M., Stohl, A., Olivie, D., Seland, Ø., Bethke, I., Pisco, I., and Iversen, T., 2016. The offline Lagrangian particle model FLEXPART–NorESM/CAM (v1): model description and comparisons with the online NorESM transport scheme and with the reference FLEXPART model, *Geosci. Model Dev.*, 9, 4029–4048, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4029-2016>.
- CONAPO. 2015. Proyección de la población de los municipios a mitad de año por sexo y grupos de edad, 2010-2030—Baja California Sur, CONAPO. Consultado el 5 de Julio de 2020, de <https://www.coneval.org.mx/sitios/RIEF/Documents/Bajacaliforniasur-informacion-estrategica-2015.pdf>.
- CERCA, 2020. Reporte técnico de concentración de contaminantes en la ciudad de La Paz, B. C. S. México. Obtenido de [https://www.cerca.org.mx/wp-content/uploads/2021/03/Reporte-2020-calidad-del-aire\\_cerca-ACLIMA.docx.pdf](https://www.cerca.org.mx/wp-content/uploads/2021/03/Reporte-2020-calidad-del-aire_cerca-ACLIMA.docx.pdf)
- Finkelman, R., 2007. Health impacts of coal: facts and fallacies. *AMBIO J. Hum. Environ.* 36, 103-106.
- Geiger, R., Aron, R. H., and Todhunter, P., 1995, *The climate near the ground*, 5th edn (Cambridge: Harvard University Press).
- INECC, 2014. Elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Fuentes Móviles para México 2013 y proyección 2030 mediante el uso del modelo Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES). Consultado el 20 de Junio de 2020, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197011/2014\\_CGCSA\\_Inventario\\_de\\_emisiones\\_usando\\_MOVES\\_parte\\_1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197011/2014_CGCSA_Inventario_de_emisiones_usando_MOVES_parte_1.pdf).
- López, M., Zuk, M., Garibay, V., Tzintzun, G., Iniestra, R., Fernández, A., 2005. Health impacts from power plant emissions in Mexico, *Atmospheric Environment*, 39, 1199–1209, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10.035>.

- Molina Center for Energy and the Environment (MCEE), 2009. Análisis y síntesis de los resultados de las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 para su uso en la formulación de estrategias en materia de cambio climático y contaminación local en la ZMVM. Consultado el 25 de Junio de 2020, de [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/documentos/6-docs\\_estudio\\_luisa\\_molina.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/documentos/6-docs_estudio_luisa_molina.pdf).
- Provenzale, Antonello. 1999. Transport by coherent barotropic vortices. *Annual review of fluid mechanics*, 31(1), 55–93.
- Seidel, D. J., Ao, C. O., and Li, K., 2010. Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis, *J. Geophys. Res.*, 115, D16113, doi:10.1029/2009JD013680
- SEMARNAT, 2004. Central termoeléctrica de Punta Prieta y calidad del aire en La Paz, Baja California Sur. Consultado el 10 de Junio de 2020, de <http://www.cerca.org.mx/wp-content/uploads/2017/10/FUNDEA-2004-La-central-electrica-de-Punta-Prieta-precipitadores-electrostaticos.pdf>
- SEMARNAT, 2019. NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. *Diario Oficial de la Federación*. Consultado el 20 de noviembre de 2020, de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019#gsc.tab=0)
- Srinivas, C.V., Hari Prasad, K.B.R.R., Naidu, C.V. et al., 2016. Sensitivity Analysis of Atmospheric Dispersion Simulations by FLEXPART to the WRF-Simulated Meteorological Predictions in a Coastal Environment. *Pure Appl. Geophys.* 173, 675–700 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1104-z>
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., Wotawa, G., 2005. Technical Note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 2461-2474, <https://doi.org/10.5194/acp-5-2461-2005>.
- Stull, R.B., 1994. *An introduction to boundary layer meteorology*. Ed. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Stull, R.B., 2017. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science - version 1.02b*. Univ. of British Columbia. 940 pages. ISBN 978-0-88865-283-6.
- Turner, D., Schulze, R., 2007. *Practical Guide to Atmospheric Dispersion Modeling*. Air and Waste Management Association – Trinity Consultants, Inc. USA.
- Zavala Sansón, L. (2021). *Apuntes de oceanografía física: Turbulencia*. CICESE. Consultado el 29 de noviembre del 2021, de: [https://usuario.cicese.mx/lzavala/lectures/Apuntes\\_Turbulencia.pdf](https://usuario.cicese.mx/lzavala/lectures/Apuntes_Turbulencia.pdf).
- Wang, X. Y., Wang, K. C. (2014). Estimation of atmospheric mixing layer height from radiosonde data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(6), 1701–1709. <https://doi.org/10.5194/amt-7-1701-2014>.