



DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL
DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
Sección Investigación y Soporte Tecnológico
Oficina Estudios Meteorológicos



Comparación estadística de la altura de la capa de mezcla estimada por el nefobasímetro de Quinta Normal y por datos AMDAR en la Región Metropolitana

Ricardo Abarca
Jacqueline Hidalgo

Mayo-2021

Índice de contenidos

Índice de contenidos	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Metodología	4
3.1. Delimitación geográfica y climatológica de la zona de estudio ...	4
3.2. Delimitación temporal del estudio	5
3.3. Fuente y estructuración de datos	6
3.3.1. Datos del nefobasímetro de Quinta Normal	6
3.3.2. Datos AMDAR	7
3.3.3. Datos del nefobasímetro de la U. de Chile.....	7
3.3.4. Datos SYNOP de Quinta Normal.....	7
3.4. Índices estadísticos y coeficiente de correlación	8
4. Resultados.....	9
5. Conclusiones.....	14
6. Bibliografía.....	15
7. Anexos	16
7.1. Algoritmo de estimación de la altura de la capa de mezcla para Santiago.....	16
7.2. Comprobación de la diferencia horaria del nefobasímetro de Quinta Normal	17

7.3. Significancia de estadísticos para el coeficiente de correlación.....	19
--	----

Índice de figuras

Figura 1: Perfil vertical de temperatura en el que se aprecia una inversión térmica, la altura de la capa de mezcla y los efectos en la contaminación atmosférica. Fuente: Lazaridis, 2011.....	1
Figura 2: (a) Mapa geopolítico de la ubicación de la ciudad de Santiago en la Región Metropolitana, georreferenciada a Chile continental. (b) Mapa de relieve – Google Maps – de la ciudad de Santiago. Los puntos azules, corresponden a las ubicaciones de las estaciones de nefobasímetros de Quinta Normal de la DMC y DGF (Departamento de Geofísica) de la Universidad de Chile; y el punto rojo corresponde a la ubicación del aeropuerto Arturo Merino Benítez en donde se obtienen las observaciones AMDAR.....	4
Figura 3: Serie de valores horarios entre las 12 y 19 UTC para días donde existen simultáneamente observaciones en el nefobasímetro de Quinta Normal (a), de la U. de Chile (b) y de AMDAR (c). Las series coinciden en el periodo desde el 21 de junio al 26 de septiembre del año 2019.	9
Figura 4: Gráfico de dispersión entre la capa de mezcla estimada por el nefobasímetro de Quinta Normal [m] v/s la estimada por los datos AMDAR [m]. La recta azul corresponde al ajuste lineal.....	10
Figura 5: Gráfico de dispersión entre la capa de mezcla estimada por el nefobasímetro de Quinta Normal [m] v/s la estimada por el nefobasímetro de la U. de Chile [m]. La recta azul corresponde al ajuste lineal.....	11
Figura 6: Gráfico de dispersión entre la capa de mezcla estimada por el nefobasímetro de la U. de Chile [m] v/s la estimada por los datos AMDAR [m]. La recta azul corresponde al ajuste lineal.....	12
Figura 7: Perfil de reflectividad para las 14 HL (hora local) o 20 UTC (azul) con ajuste de curva (rojo) y estimación de la altura de la capa de mezcla (círculo rojo), para el día 13 de marzo del año 2007.	16
Figura 8: Tabla de datos (izquierda) de nubosidad observada por el nefobasímetro de Quinta Normal, cuyos registros están en hora UTC, luego de haber restado 4 horas a cada fila. El valor “-999” en la tabla, indica sin presencia de nubosidad o cielos despejados y los valores numéricos distinto a este valor corresponde a la altura de la nubosidad detectada en metros. La imagen satelital (derecha) corresponde al día 16 de febrero de 2021 a las 7:40 UTC, y representa	

el compuesto "día/noche" (resta de canal 14 con canal 7) que logra distinguir las nubes bajas en la noche (nubes en color azul). 18

Índice de tablas

Tabla 1: Estadísticos calculados para medir la confiabilidad de las estimaciones de la capa de mezcla del nefobasímetro de Quinta Normal v/s las estimadas por datos AMDAR y por el nefobasímetro de la U. de Chile. El sesgo, corresponde al BIAS en metros; el RMSE, al error cuadrático medio en metros; el STD, a la desviación estándar en metros; y la correlación, al coeficiente de correlación de Pearson. 13

1. Introducción

En la literatura referente a micrometeorología y contaminación atmosférica es frecuente llamar a la capa de mezcla (*mixing layer* o *mixed layer*), como a la porción de la capa de aire más próxima al suelo en el que la estratificación es indiferente o inestable, y la mezcla vertical tiene lugar fácilmente. Intuitivamente, su altura (*mixing depth*) se podría comparar con el espesor hasta la cual se dispersan los contaminantes (Puigcerver & Carrascal, 2008). Esta capa de mezcla es limitada verticalmente por una inversión térmica que se genera debido a una capa de aire descendente que sufre una compresión adiabática (Rutllant, 1979). La Figura 1 muestra un perfil vertical de temperatura, la cual presenta una inversión térmica con una base y tope a cierta altura; y el espesor de la capa de mezcla, que abarca desde la superficie hasta la base de la inversión. También, se muestra el efecto que este fenómeno ejerce sobre la contaminación atmosférica.

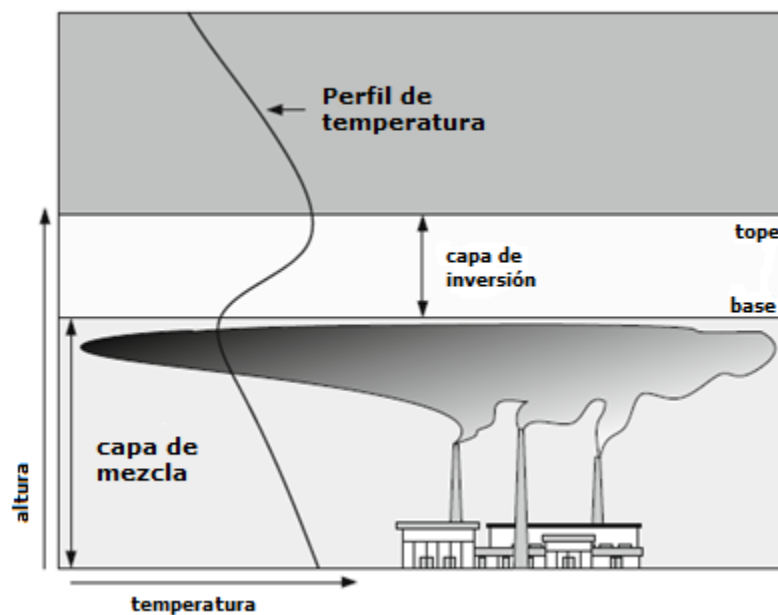


Figura 1: Perfil vertical de temperatura en el que se aprecia una inversión térmica, la altura de la capa de mezcla y los efectos en la contaminación atmosférica. Fuente: Lazaridis, 2011.

Debido a que las emisiones y otros contaminantes cercanos a la superficie se dispersan verticalmente dentro de la capa límite planetaria, o capa de mezcla, el monitoreo de esta es crítico para estimar la naturaleza, transformación y remoción de los contaminantes. También es un parámetro necesario para la

verificación de simulaciones numéricas de contaminación atmosférica (Schäfer, et al., 2006).

Las observaciones meteorológicas de la capa de mezcla, o capa límite planetaria, son realizadas a través de las denominadas estaciones especiales, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2017), y se enmarcan dentro de lo que se conoce como percepción remota o tecnología de teledetección.

El nefobasímetro de Vaisala CL31 mide el perfil de retrodispersión de la atmósfera y proporciona un cálculo de la capa de mezcla a través de métodos combinados de gradiente y retrodispersión idealizada, lo que permite un informe y el almacenamiento de datos en forma automática de la altura de la capa de mezcla convectiva. El algoritmo también toma en cuenta la hora del día y la ubicación para mejorar la generación automática de informes y datos en todas las condiciones. Este algoritmo permite almacenar tres candidatos de la altura de la capa de mezcla con sus respectivos índices de calidad, sumado a esto, presenta la altura de tres capas de nubes, que pueden estar ubicadas a diferentes alturas (VAISALA, 2017).

El presente informe proporciona una comparación estadística de la altura de la capa de mezcla estimada por datos del nefobasímetro CL31 ubicado en Quinta Normal¹ y por datos AMDAR² en la Región Metropolitana. De este modo se determinará la confiabilidad del algoritmo que infiere la capa de mezcla en el nefobasímetro CL31. En general, las estimaciones de la capa de mezcla dadas por un nefobasímetro son contrastadas con las alturas de la capa de mezcla estimadas de los perfiles verticales de temperaturas de radiosondas (en este estudio por perfiles de datos AMDAR) (Emeis, et al., 2012). Además, se compararán los datos con la altura de la capa de mezcla estimada por el nefobasímetro instalado en la azotea del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, el cual emplea un algoritmo específico para calcularla (Muñoz & Undurraga, 2010).

¹ Nefobasímetro que está en convenio entre la Dirección Meteorológica de Chile y el Ministerio Medio Ambiente de Chile.

² Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) son informes meteorológicos automatizados provenientes desde aeronaves comerciales, y constituye un programa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Determinar la confiabilidad de las estimaciones de la altura de la capa de mezcla obtenida por el nefobasímetro CL31 ubicado en Quinta Normal, a través de una comparación estadística con las estimaciones de los datos AMDAR y los datos del nefobasímetro ubicado en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos para obtener la confiabilidad de las estimaciones de la capa de mezcla del nefobasímetro ubicado en Quinta Normal son:

- Describir las estimaciones de la capa de mezcla de los datos del nefobasímetro de Quinta Normal v/s AMDAR a través de gráficos de series temporales. Además, se incluye en este análisis los datos del nefobasímetro ubicado en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.
- Generar gráficas de dispersión entre las estimaciones de la capa de mezcla por el nefobasímetro ubicado en Quinta Normal y de los datos AMDAR. Se incluyen en este análisis los datos del nefobasímetro ubicado en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.
- Obtener los estadísticos apropiados para comparar el grado de correspondencia entre las estimaciones de la capa de mezcla por el nefobasímetro ubicado en Quinta Normal y las de los datos AMDAR y/o de los datos del nefobasímetro de la Universidad de Chile.

3. Metodología

3.1. Delimitación geográfica y climatológica de la zona de estudio

El área de interés se centra en la ciudad de Santiago, la cual se ubica en la zona central de Chile (Figura 2a), específicamente en la Región Metropolitana. Las coordenadas geográficas de la ciudad de Santiago corresponden a los 33°26'16" latitud Sur y los 70°39'01" longitud Oeste, con una altitud promedio de 567 m.s.n.m. Posee una superficie aproximada de 837.9 Km². La ciudad de Santiago está emplazada en un llano conocido como "cuenca de Santiago".

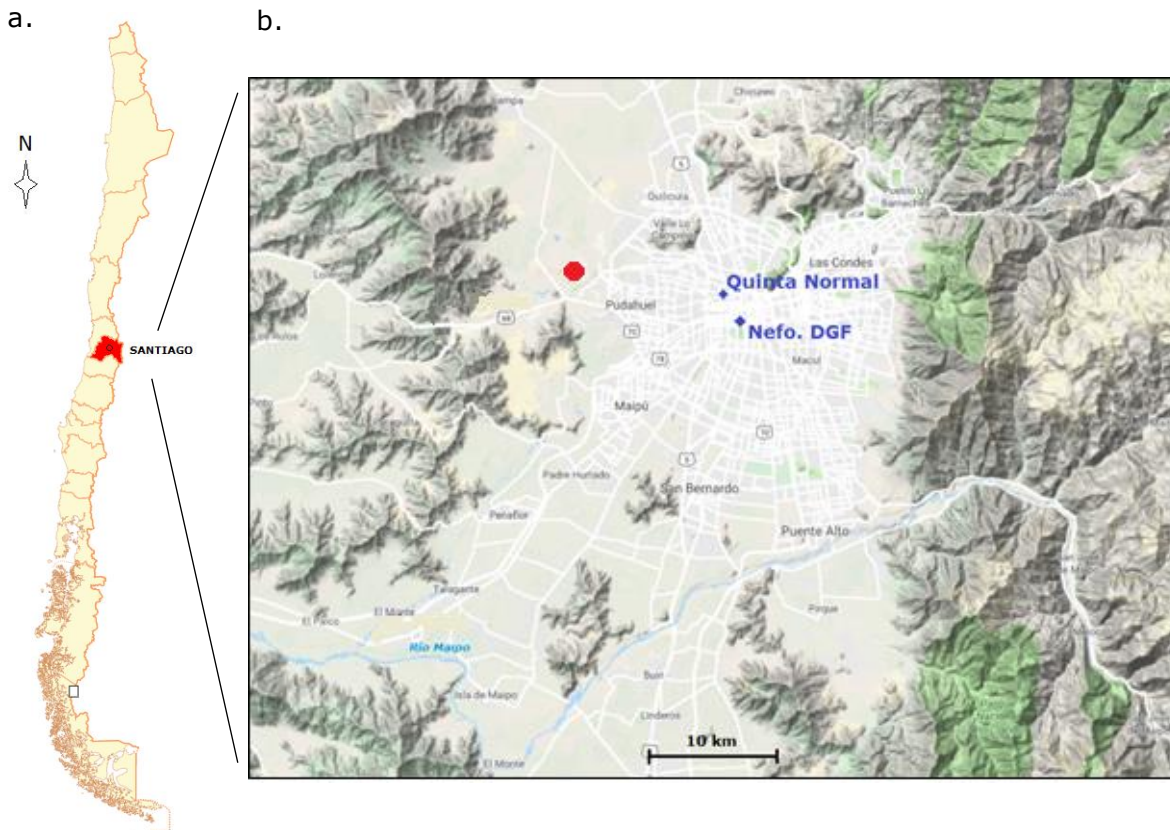


Figura 2: (a) Mapa geopolítico de la ubicación de la ciudad de Santiago en la Región Metropolitana, georreferenciada a Chile continental. (b) Mapa de relieve - Google Maps - de la ciudad de Santiago. Los puntos azules, corresponden a las ubicaciones de las estaciones de nefobasímetros de Quinta Normal de la DMC y DGF (Departamento de Geofísica) de la Universidad de Chile; y el punto rojo corresponde a la ubicación del aeropuerto Arturo Merino Benítez en donde se obtienen las observaciones AMDAR.

Las observaciones meteorológicas más relevantes que son usadas en este estudio, se destacan en color azul en el mapa de la Figura 2b, incluyendo los nombres de las estaciones, y la ubicación del aeropuerto en donde se obtienen las observaciones tipo AMDAR (punto rojo en el mapa).

Según la clasificación climática de Köppen, el clima de Santiago se define como mediterráneo continentalizado, o como un clima templado con lluvias invernales y estación seca prolongada. Las lluvias se distribuyen principalmente durante el invierno austral (junio a agosto). Según el informe climatológico de precipitaciones de la DMC, en Santiago (Quinta Normal) llueve 341.8 mm al año¹. Por otra parte, la humedad relativa es baja, con un promedio anual cercano al 70%, con registros de valores altos de amplitud térmica y el viento es de mayor intensidad durante el verano, con un promedio de 4 m/s, de dirección suroeste, mientras en invierno predominan los vientos calma. Estas características climáticas se encuentran controladas por la acción del anticiclón del Pacífico Sur, que permanece a lo largo del año en la región subtropical del Pacífico Suroriental, generando una inversión de subsidencia sobre la región. Durante invierno algunos sistemas frontales pueden alcanzar la región, sin embargo, la variabilidad sinóptica de esta zona es limitada, con prevalencia de días despejados, mientras que la incursión de vaguadas costeras puede incrementar la subsidencia generada por la alta presión permanente, episodios durante los que se han registrado elevadas concentraciones de MP10 (Garreaud, et al., 2002). Por otro lado, influye en su clima la topografía: Santiago se encuentra entre dos cordones montañosos, la cordillera de los Andes al este, con alturas promedio de 4500 m y la cordillera de la costa hacia el oeste, con un promedio de altura de 1500 m. La cuenca también se limita al norte y al sur con montañas transversales de menor tamaño que las anteriores.

3.2. Delimitación temporal del estudio

El estudio comprende el periodo de junio a septiembre del año 2019. Esto se debe a que la estación de nefobasímetro ubicada en Quinta Normal presenta disponibilidad de datos desde el mes de junio del mismo año. No se consideró el año 2020, debido a la emergencia sanitaria (COVID-19²), la cual afectó la

¹ <http://www.meteochile.gob.cl/>

² <https://www.who.int/es/emergencias/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19>

disponibilidad, trayendo consigo una baja densidad de registros de observaciones tipo AMDAR.

3.3. Fuente y estructuración de datos

3.3.1. Datos del nefobasímetro de Quinta Normal

Se utilizaron las mediciones del nefobasímetro ubicado en la comuna de Quinta Normal, específicamente en la Dirección Meteorológica de Chile, que tiene coordenadas de 33°26'42" latitud Sur y los 70°40'57" longitud Oeste. El equipo corresponde a un modelo CL31 de Vaisala, con una versión mejorada que incluye un estimador de la capa límite o capa de mezcla.

El nefobasímetro de Quinta Normal entrega tres candidatos de la altura de la capa de mezcla, incluyendo índices de calidad para cada candidato. Los índices de calidad entrega valores enteros desde 1 hasta 3, donde el valor 3 corresponde a la mejor calidad en la medición según la estimación del algoritmo. Si bien, en primera instancia, este índice pareciera ser un buen indicativo para discriminar cual es la mejor estimación, presenta algunos problemas para escoger el candidato óptimo. Por ejemplo, al revisar las bases de datos, se tiene que en muchos casos existen dos candidatos de alturas de la capa de mezcla que tienen índice de calidad 3, por lo cual no se puede discriminar cual es la mejor altura.

Las tres opciones razonables de metodologías para escoger un candidato de altura de la capa de mezcla son:

- Tomar el candidato que tenga el mejor índice de calidad, y si hay un empate tomar la altura más baja.
- Revisar manualmente los datos, y ver si el crecimiento es físicamente adecuado.
- Tomar el candidato que tenga menor diferencia con la altura de la capa de mezcla estimada con el nefobasímetro de la Universidad de Chile.

Se opta por la opción 3, dado que los datos de Universidad de Chile son confiables y aceptados (Muñoz & Undurraga, 2010), y las dos opciones anteriores tienen subjetividad.

Por otra parte, se obtiene un valor promedio horario de la capa de mezcla de los datos del nefobasímetro de Quinta Normal, el cual tiene una resolución temporal de un registro cada 16 segundos. La forma de obtener el valor horario es calculando el promedio entre los registros obtenidos 30 minutos antes y 30

minutos después de una hora específica a obtener. Esta metodología es coincidente con la usada para los cálculos horarios de los datos del nefobasímetro de la Universidad de Chile y los datos tipo AMDAR usados en este estudio.

Finalmente, se hizo una corrección horaria a los datos, debido a que tenía una diferencia de 4 horas con la hora UTC (Tiempo Universal Coordinado, por sus siglas en inglés). De este modo se resto 4 a cada hora de registro. Una prueba de esta diferencia se muestra en el anexo 7.2.

3.3.2. Datos AMDAR

La altura de la capa de mezcla estimada de los perfiles verticales de temperaturas de datos tipo AMDAR, son facilitados por la Universidad de Chile y presentan una resolución temporal de 1 hora. Estos datos son registrados a través de vuelos de aeronaves que arriban o despegan del aeropuerto Arturo Merino Benítez ($33^{\circ} 23' 42''$ latitud Sur y $70^{\circ} 47' 41''$ longitud Oeste).

3.3.3. Datos del nefobasímetro de la U. de Chile

Se utilizaron las mediciones del nefobasímetro ubicado en la ciudad de Santiago, específicamente en la azotea del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, que tiene coordenadas de $33^{\circ}27'26''$ latitud Sur y los $70^{\circ}39'41''$ longitud Oeste. Estos datos fueron facilitados por la Universidad de Chile, y se encuentran disponibles con una resolución temporal de 1 hora, para periodos diarios que contemplan parte de la mañana y las primeras horas de la tarde (aproximadamente entre las 13 y las 20 UTC). Por otra parte, estos registros horarios se encuentran validados a través de la aplicación del algoritmo de estimación y una corrección final a través de una inspección visual de gráficos (anexo 7.1).

Publicaciones anteriores (Muñoz & Undurraga, 2010) han demostrado la utilidad de este instrumento en el estudio de la capa límite urbana de Santiago durante las horas centrales del día (capa de mezcla) para días despejados (más detalles en anexo 7.1).

3.3.4. Datos SYNOP de Quinta Normal

Los datos SYNOP se obtienen de la estación de Quinta Normal ubicada en la misma coordenada geográfica del nefobasímetro de Quinta Normal (sección 3.3.1), y corresponde a una observación meteorológica de superficie proveniente de una estación terrestre fija (OMM, 2019). La resolución temporal es de 1 hora.

Con estos datos se obtienen los días con las condiciones meteorológicas ideales en donde habría una correcta estimación de la capa de mezcla. Estas condiciones meteorológicas ideales para cada hora de observación son:

- sin presencia de niebla y/o neblina,
- sin presencia de nubosidad baja, y
- sin precipitación.

Estas condiciones ideales también son consideradas por diferentes investigadores (Emeis, et al., 2012) y fabricantes (VAISALA, 2017), debido a que el algoritmo se confunde en condiciones meteorológicas inestables.

3.4. Índices estadísticos y coeficiente de correlación

Antes de presentar los cálculos estadísticos se realizará una exploración visual comparativa de los datos usando gráficas de series de tiempo y gráficos de dispersión. Esto nos dará una visión genérica del comportamiento de los datos en cuanto a su variabilidad y su correspondencia.

La evaluación de la consistencia de la altura de la capa de mezcla del nefobasímetro de Quinta Normal, consta de una comparación con la altura de la capa de mezcla estimada por datos tipo AMDAR y con los datos de altura de la capa límite registrados por el nefobasímetro de la Universidad de Chile. Para llevar a cabo tal evaluación, se obtuvieron los estadísticos respectivos tales como: el error cuadrático medio (RMSE), sesgo (BIAS), la desviación estándar (STD) y el coeficiente de correlación de Pearson (r – detalles en anexo 7.3), para así probar la calidad del algoritmo de VAISALA en estimar la altura de la capa límite en la cuenca de Santiago.

4. Resultados

La Figura 3, correspondiente al período que abarca desde el mes de junio hasta el mes de septiembre del año 2019, muestra las series de valores horarios entre las 12 y 19 UTC para días donde se cumplen las condiciones descritas en la sección 3.3.4 y existen simultáneamente observaciones estimadas de la capa de mezcla con el nefobasímetro de Quinta Normal, de la U. de Chile y datos AMDAR.

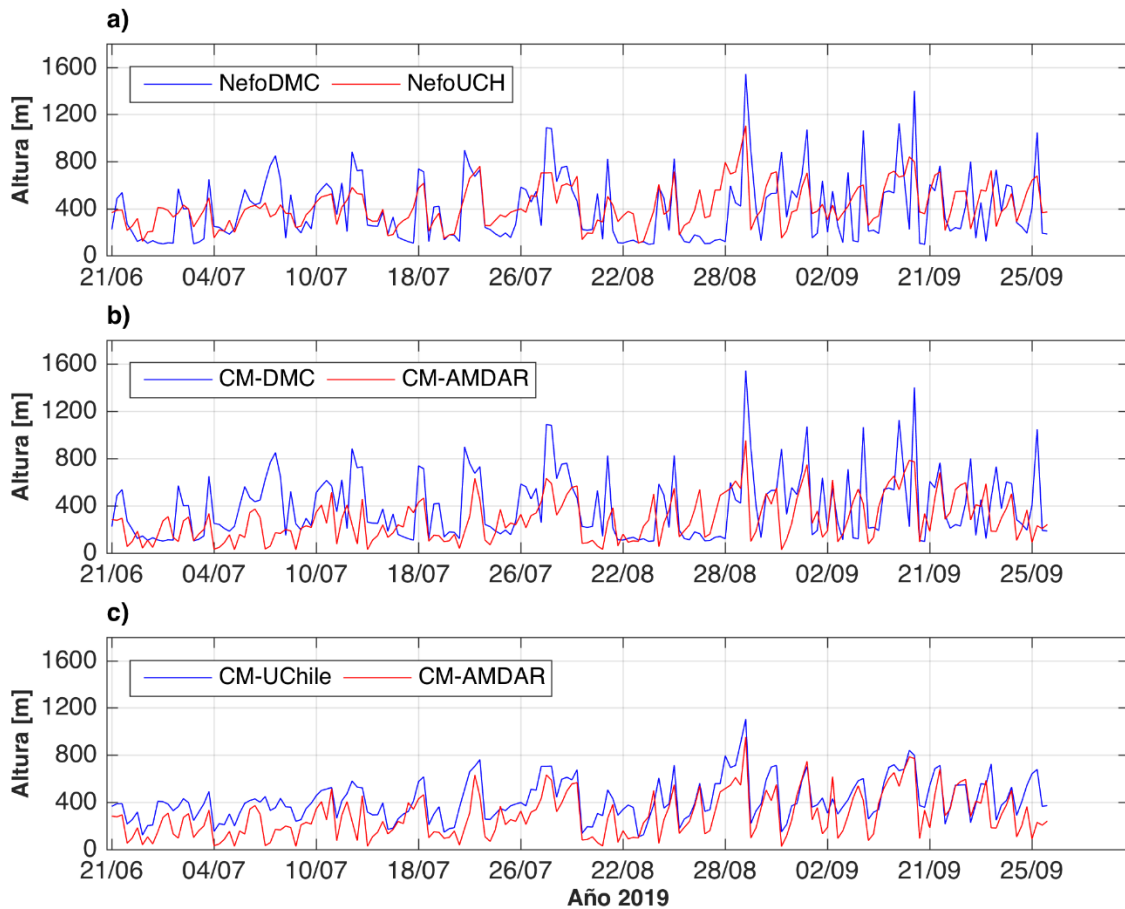


Figura 3: Serie de valores horarios entre las 12 y 19 UTC para días donde existen simultáneamente observaciones en el nefobasímetro de Quinta Normal (a), de la U. de Chile (b) y de AMDAR (c). Las series coinciden en el periodo desde el 21 de junio al 26 de septiembre del año 2019.

En general, es posible observar cierta homogeneidad en las alturas al comparar un periodo frío (junio hasta parte de agosto) con el periodo ligeramente cálido (parte de agosto hasta septiembre), en donde las tres estimaciones de la altura de la capa de mezcla son menores (mayores) para el periodo frío (ligeramente cálido). En general, las variaciones diarias de las series comparadas

tienen una similitud, pero es baja al considerar la serie de datos del nefobasímetro de Quinta Normal (Figura 3 a y b), sobre todo al compararla con los datos AMDAR. Se puede observar, además, más variabilidad en los datos del nefobasímetro de Quinta Normal respecto a los otros dos instrumentos. Claramente la mejor similitud de series se da entre los datos del nefobasímetro de la Universidad de Chile y los datos AMDAR.

La Figura 4 permite visualizar la relación anterior, entre datos de Quinta Normal y datos AMDAR, a través de un gráfico de dispersión. Se observa dispersión en los valores, tanto en bajos como en altos. Otro aspecto a considerar, es que el valor máximo alcanzado en los datos AMDAR no supera los 800 m, sin embargo, en los datos del nefobasímetro de Quinta Normal existen 7 observaciones que superan los 1000 m. Esto nos indicaría que las estimaciones de la altura de la capa de mezcla del nefobasímetro de Quinta Normal son mayores respecto a los datos AMDAR. Esta última afirmación se puede comprobar al considerar la inclinación del ajuste lineal de los datos (línea azul en Figura 4).

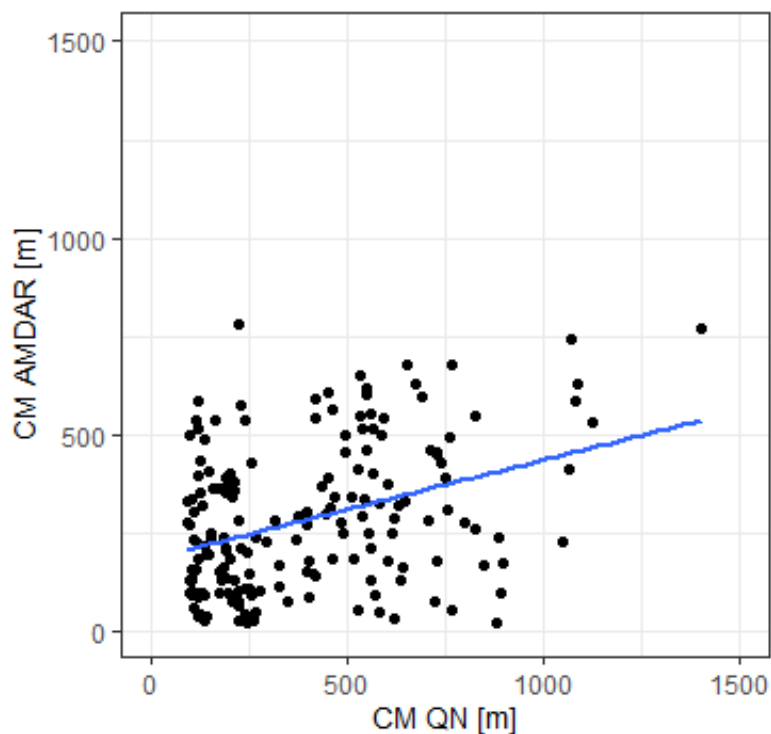


Figura 4: Gráfico de dispersión entre la capa de mezcla estimada por el nefobasímetro de Quinta Normal [m] v/s la estimada por los datos AMDAR [m]. La recta azul corresponde al ajuste lineal.

En la Figura 5 se observa una mejoría en la relación, al considerar los datos del nefobasímetro de Quinta Normal y del nefobasímetro de la Universidad

de Chile. En general, la mayor dispersión se observa cuando las estimaciones de la capa de mezcla en Quinta Normal son bajas.

Por otra parte, y al igual que en el gráfico anterior (Figura 4), los valores estimados tienden a ser más altos en el nefobasímetro de Quinta Normal respecto al nefobasímetro de la Universidad de Chile.

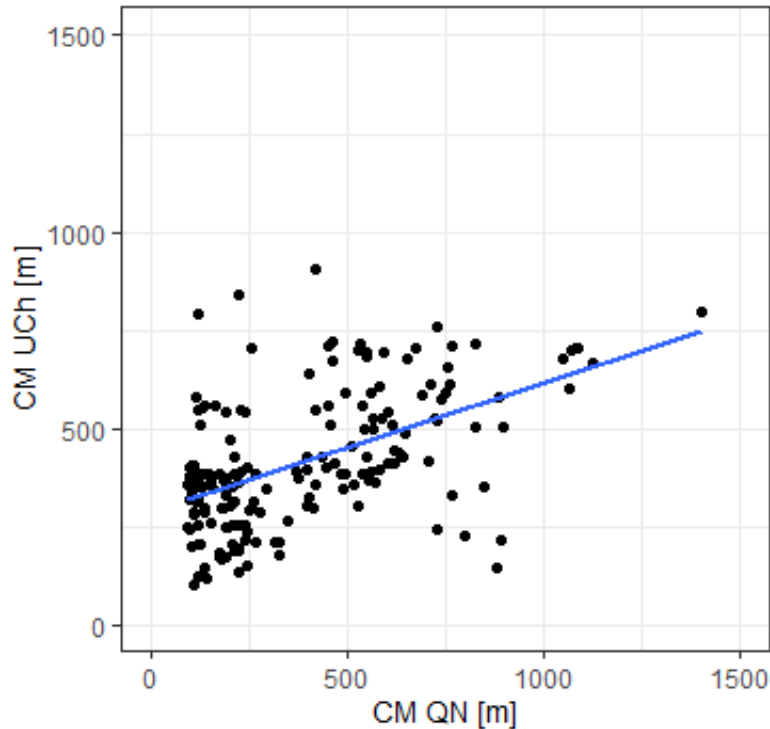


Figura 5: Gráfico de dispersión entre la capa de mezcla estimada por el nefobasímetro de Quinta Normal [m] v/s la estimada por el nefobasímetro de la U. de Chile [m]. La recta azul corresponde al ajuste lineal.

Los gráficos anteriores nos indicarían una baja relación entre los datos, lo que nos podría sugerir que las estimaciones de los tres instrumentos quizás no sean correctas. Pero esto se debe comprobar si observamos una baja relación entre los datos AMDAR y los de la Universidad de Chile. La Figura 6 muestra la relación entre ambas variables, lo cual nos indica, al menos visualmente, que hay una mejor relación entre ambas estimaciones, respecto a los gráficos de dispersión anterior. De este modo, se podría inferir que las únicas estimaciones de la capa de mezcla que podrían no ser las adecuadas son las del nefobasímetro de Quinta Normal.

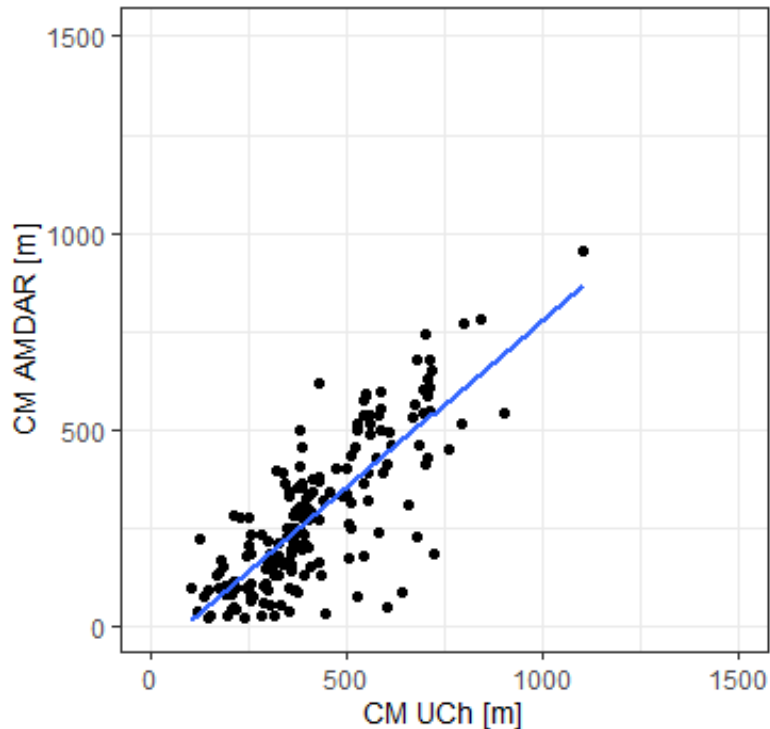


Figura 6: Gráfico de dispersión entre la capa de mezcla estimada por el nefobasímetro de la U. de Chile [m] v/s la estimada por los datos AMDAR [m]. La recta azul corresponde al ajuste lineal.

La Tabla 1 muestra los estadísticos que permiten sacar conclusiones más objetivas respecto a la inspección visual de los gráficos anteriores. De hecho, el primer estadístico, sesgo o BIAS, indica algo contrario a lo que se infirió con el gráfico de dispersión de la Figura 5. Se determinó que los valores estimados de la capa de mezcla tienden a ser más altos en el nefobasímetro de Quinta Normal respecto al nefobasímetro de la Universidad de Chile. Sin embargo, el sesgo nos indica que las alturas del nefobasímetro de Quinta Normal subestiman las alturas del nefobasímetro de la Universidad de Chile. En el otro caso, hay sobreestimación de las alturas del nefobasímetro de Quinta Normal respecto a las alturas de los datos AMDAR, tal cual como se infirió en la explicación de la Figura 4. Como dato anexo, el nefobasímetro de la Universidad de Chile también sobrestima respecto a las alturas de los datos AMDAR.

El RMSE es mucho mayor al comparar las estimaciones de la capa de mezcla del nefobasímetro de Quinta Normal con las de cualquier otro instrumento, respecto las estimaciones del nefobasímetro de la Universidad de Chile con los datos AMDAR. Esto también es concomitante con las desviaciones estándar presentadas, con valores más altos en comparaciones con el nefobasímetro de Quinta Normal.

Tabla 1: Estadísticos calculados para medir la confiabilidad de las estimaciones de la capa de mezcla del nefobasímetro de Quinta Normal v/s las estimadas por datos AMDAR y por el nefobasímetro de la U. de Chile. El sesgo, corresponde al BIAS en metros; el RMSE, al error cuadrático medio en metros; el STD, a la desviación estándar en metros; y la correlación, al coeficiente de correlación de Pearson.

Estadísticos	CM Nefo DMC – UCH	CM Nefo DMC – AMDAR	CM Nefo UCH – AMDAR
Sesgo	-24.83	109.46	134.28
RMSE	234.75	287.18	178.88
STD	314.84	328.86	187.15
Correlación	0.56	0.42	0.79

Finalmente, el coeficiente de correlación de Pearson, calculado con significancia estadística para las tres comparaciones, indica que el valor de r más alto ocurre con la comparación entre los valores del nefobasímetro de la Universidad de Chile con los datos AMDAR, comprobándose la idea planteada anteriormente de que las estimaciones del nefobasímetro de Quinta Normal tendrían algún grado de error. Adicionalmente a esto, también se comparó el coeficiente de correlación de Pearson tomando un candidato individual del nefobasímetro de Quinta Normal, y los valores de r no superaron de 0.2, lo que indica que claramente hay que realizar mejoras al algoritmo que integra este instrumento.

5. Conclusiones

Del preprocesamiento de datos relacionados con la estimación de la capa de mezcla por el nefobasímetro de Quinta Normal y los resultados comparativos obtenidos anteriormente, se puede concluir que:

- Los datos del nefobasímetro CL31 (marca VAISALA) ubicado en Quinta Normal (Dirección Meteorológica de Chile), que infiere la capa de mezcla a través de un algoritmo integrado en el propio equipo, tienen un grado de complejidad importante en la discriminación del candidato ideal para representar la altura de la capa de mezcla (tal como se menciona en la sección 3.3.1).
- Si bien es cierto que las series temporales reflejan una cierta homogeneidad en las series comparativas de alturas estimadas de la capa de mezcla entre el nefobasímetro de Quinta Normal y las del nefobasímetro de la Universidad de Chile o de los datos AMDAR, los gráficos de dispersión y los estadísticos sugieren algunos errores de estimación en los datos del nefobasímetro de Quinta Normal. Específicamente, el sesgo nos indica que las alturas del nefobasímetro de Quinta Normal subestiman las alturas del nefobasímetro de la Universidad de Chile; y sobreestiman las alturas de los datos AMDAR
- Se sugiere usar la metodología de estimación de la capa de mezcla planteada por la Universidad de Chile (Muñoz & Undurraga, 2010), dado su mayor correlación con los datos AMDAR. Para esto se debe comenzar a graficar datos con los valores de retrodispersión vertical y usar las técnicas matemáticas y manuales planteadas en el anexo 7.1.

6. Bibliografía

Emeis, S. y otros, 2012. Evaluation of the interpretation of ceilometer data with RASS and radiosonde data. *Boundary-layer meteorology*, 143(1), pp. 25-35.

Garreaud, R., Rutllant, J. & Fuenzalida, H., 2002. Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution. *Monthly Weather Review*, 130(1), pp. 75-88.

Lazaridis, M., 2011. *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. Chania: Springer Netherlands.

Münkel, C., Eresmaa, N., Räsänen, J. & Karppinen, A., 2007. Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer. *Boundary-layer meteorology*, 124(1), pp. 117-128.

Muñoz, R. & Undurraga, A., 2010. Daytime mixed layer over the Santiago Basin: Description of two years of observations with a lidar ceilometer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(8), pp. 1728-1741.

OMM, 2017. *Guía del Sistema Mundial de Observación*, Ginebra (Suiza): Organización Meteorológica Mundial.

OMM, 2019. *Manual de claves*, Ginebra (Suiza): Organización Meteorológica Mundial.

Puigcerver, M. & Carrascal, M., 2008. *El medio atmosférico: meteorología y contaminación*. Barcelona: Universitat de Barcelona.

Rutllant, J., 1979. Meteorología de mesoescala en problemas de contaminación atmosférica urbana. Comparación entre condiciones potenciales en Santiago y Concepción. *Tralka*, 1(1), pp. 10-22.

Schäfer, K., Emeis, S., Hoffmann, H. & Jahn, C., 2006. Influence of mixing layer height upon air pollution in urban and sub-urban areas. *Meteorologische Zeitschrift*, pp. 647-658.

VAISALA, 2017. *User Guide: Vaisala Boundary Layer View Software*, Helsinki (Finlandia): Vaisala Oyj.

7. Anexos

7.1. Algoritmo de estimación de la altura de la capa de mezcla para Santiago

El nefobasímetro de la Universidad de Chile (Figura 2b) entrega perfiles verticales de reflectividad, en unidades de $(100000 \text{ srad km})^{-1}$, en adelante unidades de reflectividad (ur), con resolución espacial de 20 metros en la vertical y resolución temporal de 4 s. Para nuestro análisis, se recibió una base de datos de promedios horarios de la variable. Según una revisión de los casos expuestos en Muñoz y Undurraga (2010), se observó que la hora más óptima para derivar la altura de la capa de mezcla es a las 18 UTC. Esto se debe a que en horas más tempranas los perfiles de reflectividad presentaban más ruido en la señal, dada la presencia de una capa residual nocturna. Por otro lado, en horas más tardías la dilución vertical de los aerosoles produce perfiles verticales de reflectividad menos definidos.

El algoritmo utilizado por Muñoz y Undurraga (2010) para diagnosticar la altura de la capa de mezcla a partir de estos datos de reflectividad, es una adaptación del algoritmo descrito en Münkel et al. (2007) y en general, ajusta una curva tipo bilineal a este perfil de reflectividad, y ubica la altura de la capa de mezcla en el punto medio de la curva que une las dos rectas asociadas a los perfiles de la capa límite y de la atmósfera libre (Figura 7).

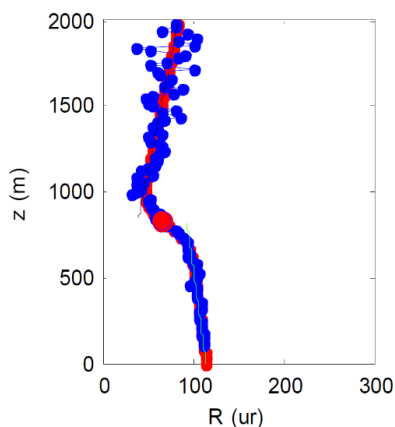


Figura 7: Perfil de reflectividad para las 14 HL (hora local) o 20 UTC (azul) con ajuste de curva (rojo) y estimación de la altura de la capa de mezcla (círculo rojo), para el día 13 de marzo del año 2007.

Las modificaciones al algoritmo original, se refieren a permitir valores de inclinación a las rectas ajustadas al perfil más cercano a la superficie y al perfil de la atmósfera libre, pues se observa esta característica en los perfiles de reflectividad analizados para Santiago. Las observaciones mostraron que la pendiente es usualmente positiva (negativa), sobre (bajo) el tope de la capa límite.

Luego de ajustar los perfiles de reflectividad a todos los datos entre marzo de 2007 y abril de 2009, a las 18 UTC, Muñoz y Undurraga (2010) observaron que en general, el algoritmo funciona satisfactoriamente durante días despejados con perfiles bien definidos, donde la reflectividad cerca de superficie, se diferencia notoriamente de la reflectividad en la capa superior. Sin embargo, durante días con niebla, estratos bajos, nubosidad asociada a sistemas frontales o precipitación, el perfil de reflectividad cercano a la superficie se aleja de la forma idealizada y el algoritmo se confunde con la presencia de reflectividad asociada a la nubosidad. Finalmente, se encontró que, durante días despejados, pero con baja concentración de aerosoles cerca de la superficie, el algoritmo tampoco entrega una buena estimación de la altura de la capa de mezcla, pues el perfil de reflectividad no tiene el contraste suficiente entre la capa límite y la atmósfera libre. Esta situación se observó especialmente, durante días de verano, donde la energía disponible es mayor, por lo que la altura de la capa de mezcla también es mayor y los aerosoles se diluyen en un volumen más grande.

7.2. Comprobación de la diferencia horaria del nefobasímetro de Quinta Normal

En comunicación personal con Emanuel Valdés, funcionario del Ministerio del Medio Ambiente, se comenta una diferencia horaria en los registros del nefobasímetro de Quinta Normal, la cual corresponde a 4 horas de adelantamiento respecto a la hora UTC.

Para verificar este diagnóstico, se usaron los registros de nubosidad que posee el nefobasímetro de Quinta Normal y se comparó con los registros de percepción remota satelital de nubosidad baja nocturna del satélite geostacionario GOES-16. Con esta metodología se pudo determinar si la diferencia de horario en el registro es de 4 horas respecto a la hora UTC. En la Figura 8 se muestra una imagen satelital de las 7:40 UTC (16 de febrero de 2021) que indica el ingreso de nubosidad baja por el suroeste a la cuenca de Santiago y comenzando a ingresar al "patio DMC" que es donde se ubica la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y

el equipo de nefobasímetro. También se muestra que el horario en que el nefobasímetro registra nubosidad baja (techo de nube a ~200 metros), luego de haber restado 4 horas a sus registros, es a las 7:30 UTC. Esta comparación nos indicaría que efectivamente se debe restar 4 horas a cada registro del nefobasímetro para que se pueda usar esta base de datos.

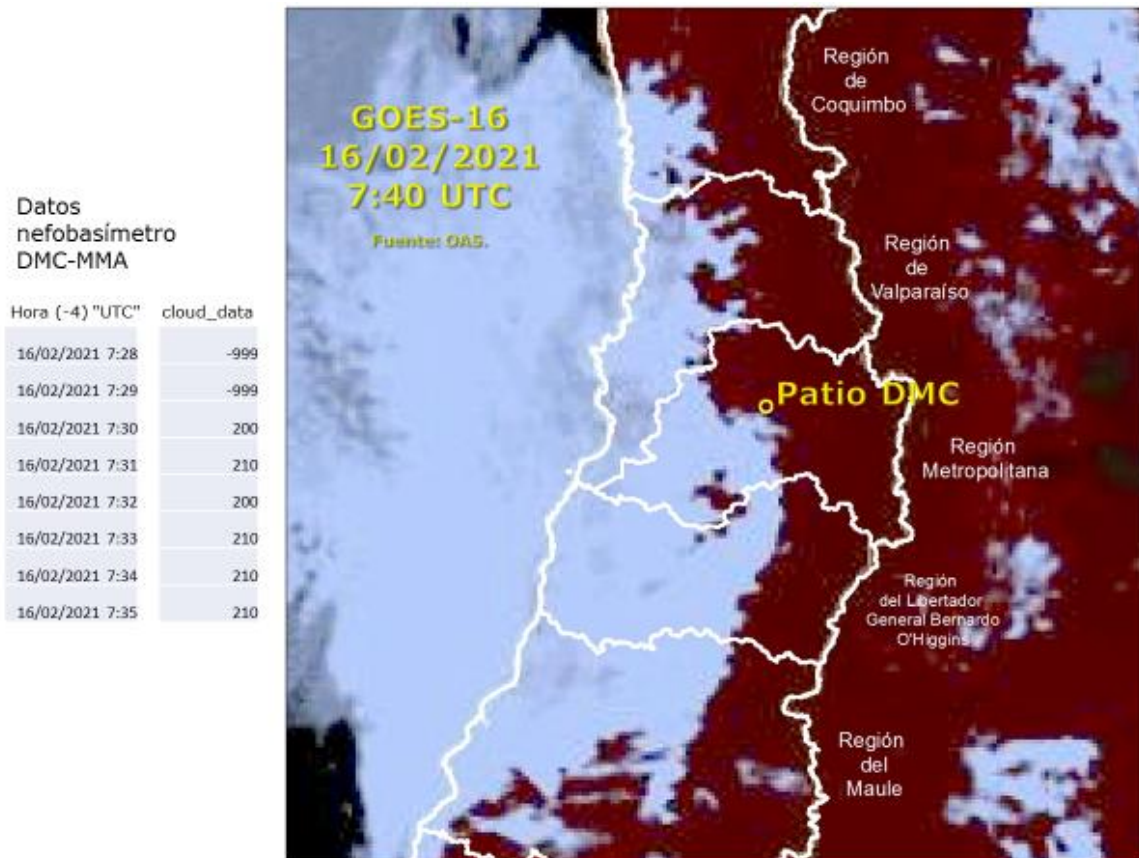


Figura 8: Tabla de datos (izquierda) de nubosidad observada por el nefobasímetro de Quinta Normal, cuyos registros están en hora UTC, luego de haber restado 4 horas a cada fila. El valor "-999" en la tabla, indica sin presencia de nubosidad o cielos despejados y los valores numéricos distinto a este valor corresponde a la altura de la nubosidad detectada en metros. La imagen satelital (derecha) corresponde al día 16 de febrero de 2021 a las 7:40 UTC, y representa el compuesto "día/noche" (resta de canal 14 con canal 7) que logra distinguir las nubes bajas en la noche (nubes en color azul).

Un comentario adicional, e importante, es que el día 24 de marzo del 2021 se procedió a cambiar el nombre de los archivos que genera el nefobasímetro a través del software de visualización operativa de la capa de mezcla llamado BL-View (VAISALA, 2017), y en el intertanto la hora desfazada se sincronizó a la hora UTC correcta. Este hecho pasó desapercibido hasta que al otro día se revisaron los datos, y se comprobó que el ajuste quedó en la hora del Tiempo Universal Coordinado (UTC).

7.3. Significancia de estadísticos para el coeficiente de correlación

Para determinar si la correlación entre las variables es significativa (test de Pearson), se compara el valor p-value¹ con su nivel de significancia. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como α o alfa) de 0.05 funciona adecuadamente, y es sugerido en cualquier libro de estadística. Un α de 0.05 indica que el riesgo de concluir que existe una correlación, cuando en realidad no es así, es 5%. El valor p-value indica si el coeficiente de correlación es significativamente diferente de 0. (Un coeficiente igual a 0 indica que no existe una relación lineal).

En nuestro estudio, si $p\text{-value} \leq \alpha$, entonces se concluye que la correlación es diferente de 0. Si $p\text{-value} > \alpha$, entonces no se concluye que la correlación es diferente de 0.

Una descripción detallada del cálculo de estos parámetros estadísticos se encuentra en cualquier libro de estadística para ingeniería.

¹ También es llamado como "p" o "valor de probabilidad".