



ISSN: 0719-4544

Evaluación de la climatología y tendencia de la nubosidad en Chile

Carolina Aravena Urzúa¹ and Tamara Venegas Yurazek²

¹Oficina Cambio Climático, Dirección Meteorológica de Chile

²Oficina Estudios Meteorológicos, Dirección Meteorológica de Chile

Resumen

Se calculó la climatología y tendencia de nubes en 17 estaciones a lo largo de todo el país (tanto de costa como interior), con datos horarios desde el año 1992 al 2021. Los resultados de dicha climatología muestran que la nubosidad del tipo estratiforme es predominante en la zona norte y central del país, mientras que en el sur comienzan a ser más frecuentes las nubes de tipo cúmulos. Por otro lado, la nubosidad baja, entre los 500-1000 metros, es la más frecuente, sin embargo, en latitudes altas predomina la nubosidad con una base sobre los 2000 metros. El análisis de la tendencia resulta en una disminución en la altura de la base nubosa en gran parte del país, a excepción de algunas estaciones del interior en las zonas central y austral. Con respecto a la fracción nubosa, lo más frecuente es encontrar una cobertura de ocho octas en la zona norte, centro y sur, a diferencia de la estación de Calama y Balmaceda, las que exhiben una cobertura menor (más frecuente entre 1 y 3 octas), al igual que la zona austral. En general, dominan las tendencias negativas de cobertura nubosa en el país.

1 Introducción

Las nubes son un importante componente del sistema climático de la Tierra. Ellas reflejan la radiación solar devuelta al espacio, absorben la radiación infrarroja emitida desde el suelo, además de producir nieve y lluvia (Warren and Hahn, 2002). En las últimas décadas se ha observado un descenso de la base de la cubierta nubosa (Zamora, 2010) lo que deriva en implicancias diversas en distintos aspectos, como lo son la modelación numérica del clima, la biodiversidad de especies, en el turismo e incluso se ha observado en problemas respecto a las condiciones de aterrizaje y despegue en los aeropuertos y aeródromos de la costa norte de Chile (Vilches, 2023), por estas razones, resulta fundamental conocer cómo ha evolucionado el comportamiento de la nubosidad en Chile.

Dentro de Chile, es posible apreciar diferentes patrones nubosos. Así, mientras en la costa del Pacífico predomina uno de los regímenes de stratocumulus (SC) más grandes y persistentes del mundo (Bretherton et al., 2010), en el interior es posible apreciar nubosidad alta y de poco espesor. En los Andes subtropicales, por otro lado, la nubosidad de tipo estratiforme es responsable de precipitaciones débiles durante los meses fríos, mientras que en los extratropicales este tipo de nubosidad produce precipitaciones en ambas laderas de la cordillera, durante todo el año (Viale et al., 2019).

En el norte es frecuente la existencia de una capa de SC, sensible a un balance de procesos que definen su fracción nubosa, y por ende, su influencia radiativa (Zuidema et al., 2009; del Río et al., 2021; Garreaud et al., 2008; Garreaud and Muñoz, 2004); ya más hacia el sur, la nubosidad estratiforme parece estar uniformemente distribuida sobre los océanos (Sassen and Wang, 2008). Por otro lado, en latitudes extra-tropicales el paso de sistemas frontales se asocia a nubosidad de tipo nimbo, alto-estratos o cirro-estratos. Mientras que otras formaciones nubosas, como los cúmulos, también se hacen presentes, estas no son específicos a ciclones, ya que también se relacionan a otros patrones meteorológicos (Bjerknes, 1919).

El objetivo de este estudio es realizar una climatología y analizar las tendencias, tanto de la base de la altura de la nube como de la fracción nubosa, en estaciones costeras y de interior a lo largo del país.

2 Metodología

2.1 Estaciones y variables

Para el análisis, se trabajó con los datos observados de 17 estaciones ubicadas a lo largo de Chile (Figura 1). De ellas, tal como se ve en el mapa, 5 son consideradas de interior (Calama, Pudahuel, Curicó, Coyhaique y Balmaceda) mientras que las 10 restantes se ubican en la costa.

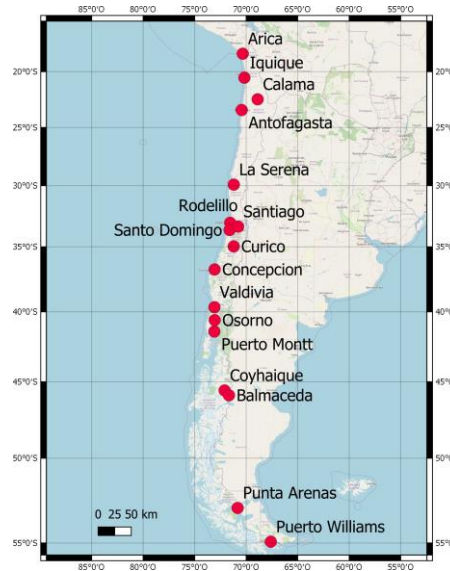


Figura 1. Mapa de las 17 estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de la nubosidad a lo largo de Chile

Tabla 1. Ubicación geográfica y altitud de las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Arica	-18.35	-70.34	51
Iquique	-20.54	-70.18	48
Calama	-22.49	-68.89	2326
Antofagasta	-23.45	-70.44	139
La Serena	-29.91	-71.20	146
Rodelillo	-33.07	-71.56	330
Santo Domingo	-33.65	-71.61	75
Pudahuel	-33.37	-70.78	474
Curicó	-34.96	-71.21	220
Concepción	-36.78	-73.06	8
Valdivia	-39.65	-73.08	18
Osorno	-40.61	-73.05	57
Puerto Montt	-41.44	-73.09	90
Coyhaique	-45.59	-72.10	311
Balmaceda	-45.91	-71.67	525
Punta Arenas	-53.00	-70.83	43
Puerto Williams	-54.93	-67.61	27

Desde estas estaciones, se utilizaron datos de nubosidad obtenidos de los reportes Meteorológicos de Aeródromo (METAR) de la Dirección Meteorológica de Chile¹. Las variables utilizadas fueron:

- Cantidad total en octas de nubosidad que cubre el cielo. Esta cobertura se mide en fracciones, variando de 1 a 8.
- Capas o masas de nubes. Indica octas, tipo y altura de la base de la nube.

A partir de la información obtenida, se han analizado treinta años de datos desde el 1 de enero de 1992 a las 00:01 (hora UTC) hasta el 31 de diciembre de 2021 a las 23:59. Sin embargo, las estaciones suelen presentar huecos de datos en diferentes momentos, lo que llevó a evaluar inicialmente el recuento total de valores por hora en las 17 localidades. Un ejemplo de estos resultados, que se adjuntan en el Anexo A, indica la ausencia de mediciones en diversos períodos de tiempo para las tres variables consideradas. Tras un análisis exhaustivo, se descubrió que la resolución temporal de las mediciones ha fluctuado a lo largo de estos treinta años. Algunas estaciones, como Curicó y Rodelillo, registraron datos cada seis horas durante los primeros años del período analizado, cambiando a mediciones horarias solo en los últimos dos años. A pesar de estas inconsistencias, se decidió continuar con el análisis en las 17 localidades, teniendo en cuenta la desigualdad en la cantidad total de valores horarios.

Si bien estudios anteriores indican que es factible tomar en consideración las mediciones nocturnas (Muñoz, et al), estos se centran en el norte del país, donde la nubosidad en niveles bajos puede ser contrastada con el cielo, debido a la tropósfera seca y clara presente en la zona. Sin embargo, este trabajo considera todo el territorio nacional, por lo que deben tenerse en consideración las dificultades en la observación de nubes durante la noche (Eastman and Warren, 2013), sobre todo porque en ciertas condiciones, los métodos convencionales infrarrojos utilizados para la detección nocturna de nubes pueden estimar menor nubosidad (Miller et al, 2022).

2.2 Tratamiento de la base de datos

Descargados los 30 años de datos, se decidió trabajar con los 3 primeros niveles de capas nubosas, ya que existían escasos registros en capas superiores. En estos, se documentaron las variables mencionadas previamente, que corresponden a los descriptores de nubosidad que pueden encontrarse en el grupo 8, sección 3 de los mensajes sinópticos (SYNOP). Al ser un análisis de la nubosidad baja, se filtraron las bases de datos, considerando solo aquellas nubes ubicadas bajo los 2000 metros (Abarca y Olivares, 2021). Finalmente, en aquellos casos en que en una misma hora se reporta más de una capa nubosa, se decidió trabajar con la capa que presente la mayor fracción nubosa, considerándose esta como aquella representativa de nubosidad baja para ese período de tiempo en particular. En general esta corresponde a la capa más alta.

2.3 Caracterización estadística de la base de datos

Una vez filtrados los valores de las distintas capas, se procedió a realizar un primer análisis de los datos seleccionados. Así, la distribución del tipo de nubosidad reportada cada hora por el FIR (Flight Information Region) correspondiente (Figura 2) indica que, para la zona norte (Figura 2a) en Arica, Iquique y Antofagasta, predomina la nubosidad de tipo Estratocúmulos (SC), mientras que para Calama esta concierne a los Cúmulos (Cu). Algo similar ocurre para la zona centro (Figura 2b), en donde La Serena presenta la mayor frecuencia de SC, con un incremento en la frecuencia de Estratos (St), sobretodo en Santo Domingo. En la zona Sur, en tanto, predominan tanto Cu como SC. Para la región Austral, las dos estaciones utilizadas muestran predominancia en la frecuencia de nubosidad de tipo cumuliforme, como los son Cu, SC y Altos cúmulos (AC). En cuanto a la frecuencia de la altura de la nube (Figura 3) se aprecia que, para el norte, y con excepción de Calama, las 3 estaciones restantes presentan bases nubosas entre los 500 y 1000 metros de altura con una frecuencia de aproximadamente un 60%, clasificándose estas como nubes bajas, además, Antofagasta muestra una frecuencia de un 2% en nubosidad con una base bajo los 500 metros de altura. Calama, por otro lado, muestra un 90% de los casos con nubosidad con

bases por sobre los 2000 metros. En la zona centro, Santo Domingo, Rodelillo, Pudahuel y Curicó siguen el mismo patrón que Calama, es decir, presentan nubosidad con base sobre los 2000 metros, con un 70% del total en el caso de Pudahuel. Por el contrario, La Serena y Concepción tienen nubes con una base bajo los 500 metros, aunque esta última también tiene una frecuencia similar asociada a nubosidad sobre los 2000 metros. Las zonas sur y austral se comportan de manera similar, con el total de casos agrupados en las distintas categorías elegidas.

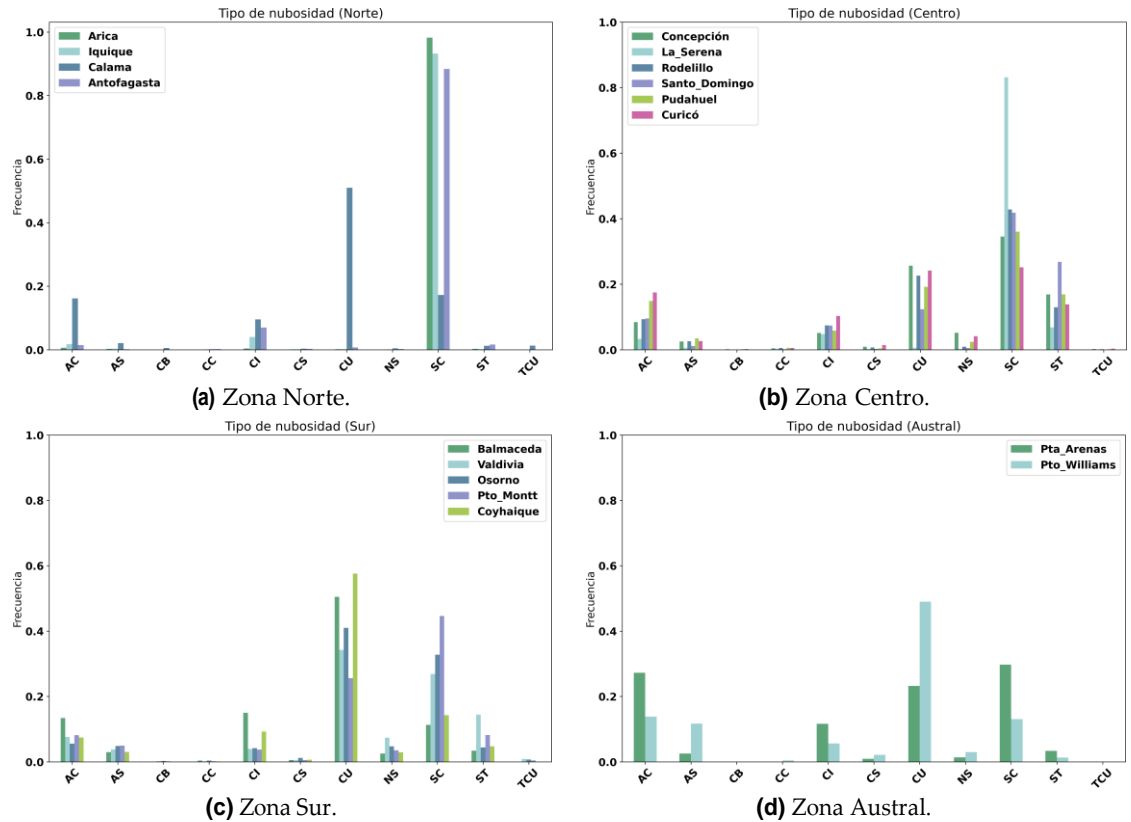


Figura 2. Caracterización estadística del tipo de nubes. Se agruparon las estaciones en cuatro zonas: norte, centro, sur y austral.

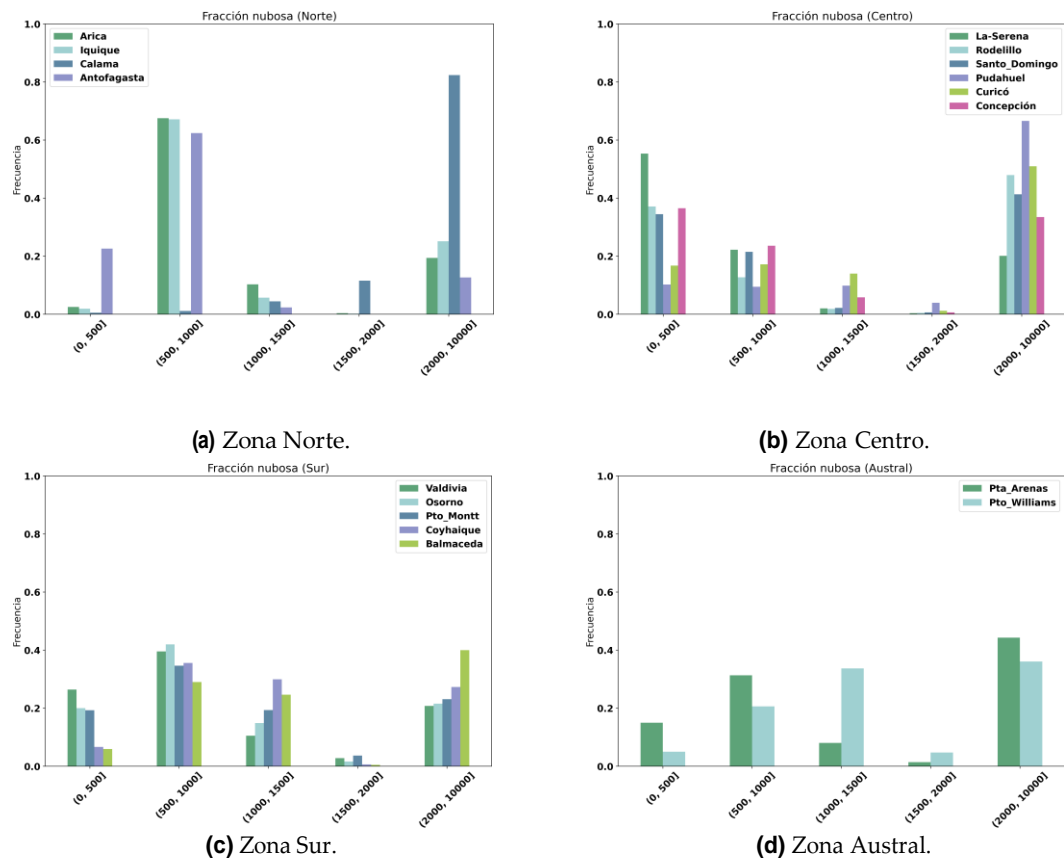


Figura 3. Caracterización estadística de la altura de la base de la nube. Se agruparon las estaciones en cuatro zonas: norte, centro, sur y austral.

La distribución de octas (Figura 4), evidencia, para Arica e Iquique, cielos cubiertos (8 octas) en un 80% y 50% del total de casos, respectivamente. Nuevamente, Calama se diferencia de las otras localidades, con una mayor frecuencia asociada a una cobertura nubosa de 2 y 3 octas (0.3 y 0.25). La mayoría de las estaciones del centro presentan frecuencias cercanas a 0.5, asociadas a cielos cubiertos, siendo Pudahuel y Curicó las que indican la menor frecuencia del grupo en esta categoría (0.3 aproximadamente). Las zonas sur y austral muestran, a primera vista, una distribución de sus frecuencias equitativa entre las distintas categorías, presentando valores ligeramente mayores relacionadas con cielos cubiertos, para el sur, y 3 octas para la región austral.

3 Resultados

3.1 Ciclos diurnos y anuales

Ahora, considerando el ciclo anual y diurno de la altura de la base de la nubosidad (Figura 5, Anexo B), dentro de las 4 estaciones de la zona norte, Arica, Iquique y Antofagasta presentan una media de la altura con bases más bajas durante horas de la noche, sobre todo en los meses de invierno (julio, agosto y septiembre). Tanto Iquique como Antofagasta extienden este periodo entre mayo y octubre. Esta última presenta bases nubosas más bajas (entre 500 y 600 metros) que el resto de las zonas. Calama, por su parte, no muestra un patrón tan claro, aunque sí se aprecian mínimos asociados a bases que oscilan entre superficie y 400 metros entre agosto y diciembre, durante horas de la madrugada.

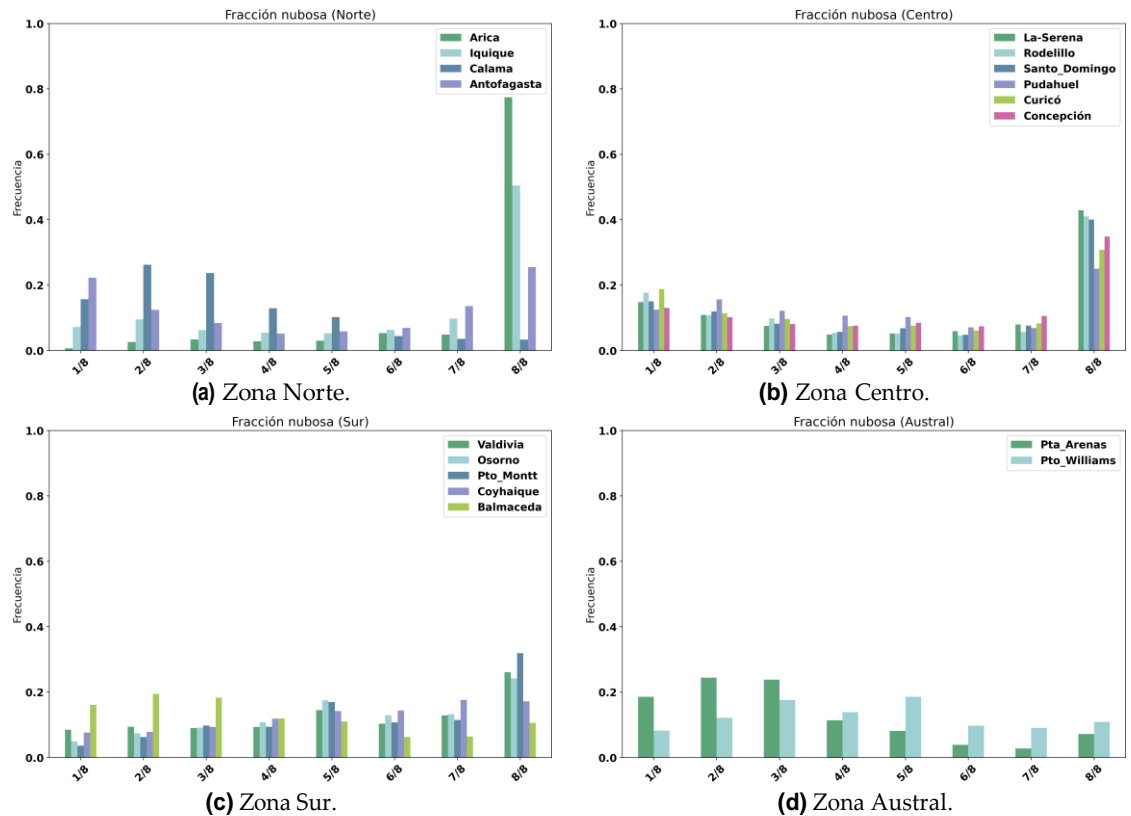


Figura 4. Caracterización estadística de la fracción nubosa. Se agruparon las estaciones en cuatro zonas: norte, centro, sur y austral.

En cuanto al centro, La Serena presenta nubosidad baja hasta las 15 UTC, con dos mínimos durante febrero y noviembre, mientras que el resto del día predominan las nubes con bases entre los 500 y 600 metros. Rodelillo (datos disponibles hasta las 14 UTC) y Santo Domingo muestran un patrón similar, con entre 0 y 2 UTC presentes todo el año; en Santo Domingo, además, se aprecian nubes con bases en torno a los 500 metros durante el resto del día, las que alcanzan su máxima altura en invierno y primavera. En Pudahuel, la altura mínima de la base nubosa se da en la madrugada durante todo el año, alcanzando sus valores más bajos entre noviembre y marzo.

Dentro de las 5 estaciones del sur, Puerto Montt exhibe nubosidad bajo los 1200 metros todo el año, con las bases más bajas (500 metros) entre noviembre y mayo, en un rango de tiempo comprendido entre las 7 y 16 UTC. Por su parte, Osorno y Puerto Montt tienen un patrón similar, con las bases más bajas durante el otoño, y en la madrugada (7 y 10 UTC). Coyhaique presenta bases cercanas a superficie durante todo el año, alcanzándose estas más temprano durante el verano en comparación al invierno. Balmaceda exhibe sus mínimos durante junio (bases a 600 metros de altura), en horas de la madrugada.

Las dos estaciones de la zona austral se comportan de manera distinta. Por un lado, Punta Arenas tiene la menor altura de la base de la nube durante los meses de invierno, la que varía entre los 630 y 690 metros. Estos valores están presentes a toda hora, pero tienen los valores más bajos entre las 08 y las 15 UTC, mientras que Puerto Williams tiene bases nubosas que varían entre superficie y 400 metros de altura en los meses comprendidos entre enero y junio, lográndose estos valores entre las 05 y las 08 UTC.

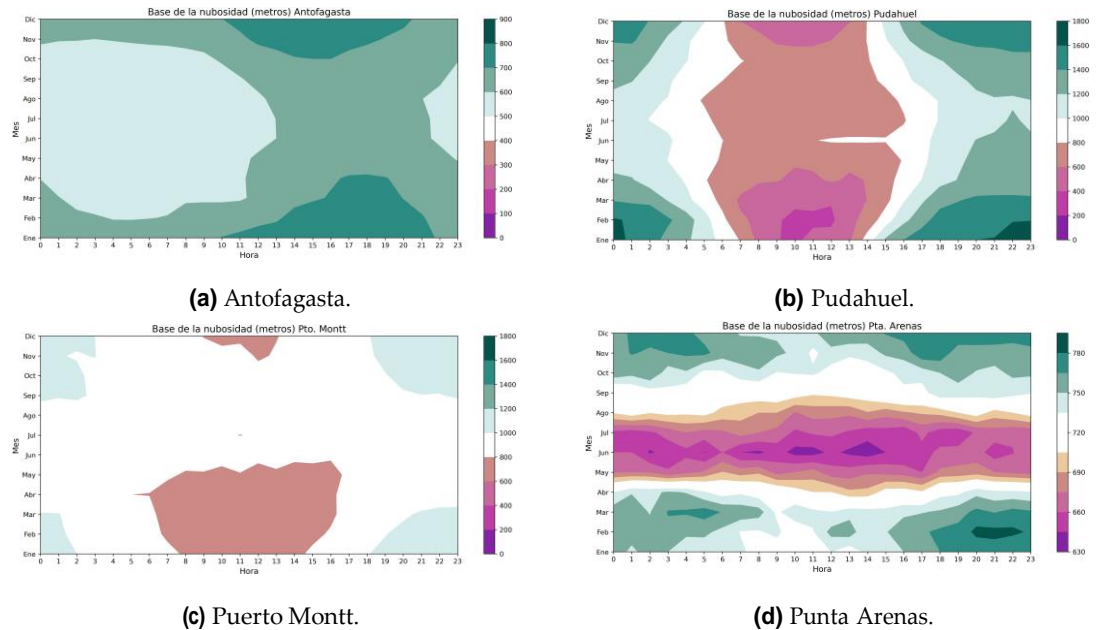


Figura 5. Promedio de los ciclos diurnos y anuales de la altura de la base de la nubosidad para las cuatro estaciones representativas de cada una de las zonas en las que se dividió el país; Antofagasta, Pudahuel, Puerto Montt y Punta Arenas. Considerando la climatología entre 1992-2021.

El ciclo anual y diurno de la fracción nubosa, considerando nubes bajas (Figura 6) muestra que, para el norte, tanto Arica, Iquique y Antofagasta presentan cielos cubiertos durante la mañana, y en los meses de invierno. En Arica, estos cielos cubiertos se extienden entre febrero y diciembre, a diferencia de las otras dos localidades, que muestran sus máximos entre junio y septiembre. De igual manera, es esta la ciudad que presenta cielos cubiertos por más tiempo durante el día, seguida de Iquique y Antofagasta. Calama, contrario a las tres anteriores, solo tiene cielos cubiertos entre junio y julio, los que se extienden por un periodo menor de tiempo (entre las 10 y 11 UTC)

En el centro, La Serena exhibe cielos nublados entre las 10 y las 13 horas durante todo el año. Santo Domingo y Rodelillo pareciesen tener un patrón similar, sin embargo, debido a la falta de datos esto no puede señalarse con certeza. Pudahuel se comporta como La Serena, pero en este caso la cobertura nubosa llega hasta 6/8, además de encontrarse estos valores más tarde durante el día. Además, existen cielos despejados durante la tarde y noche, especialmente en los meses de verano. Curicó, al igual que Calama en el norte, es la que posee el comportamiento más distinto, con cielos despejados entre las 00 y las 06 UTC durante todo el año, con excepción de mayo, alcanzando máximos de 7/8 en los meses de invierno, entre las 8 y las 10 horas. Concepción es similar a La Serena, pero la cobertura nubosa no supera las 6/8.

Dentro de las estaciones del sur, Valdivia, Osorno y Coyhaique tienen ciclos que se asemejan entre sí, presentando estos la mayor variación, con cielos cubiertos durante la mañana, y en los meses de invierno (Coyhaique posee otro máximo en los meses de diciembre y enero). Puerto Montt se asemeja bastante a Concepción, resaltándose nubosidad de 6/8 durante casi todo el año. Balmaceda, por su parte, logra valores de 7/8 en un núcleo que se aprecia en horas de la mañana durante los meses de invierno.

Punta Arenas presenta nubosidad baja que no supera las 4/8 en la madrugada durante los meses invierno, y en la noche al acercarse a los meses de verano. Finalmente, Puerto Williams exhibe cielos cubiertos durante los 3 meses de invierno, entre las 8 y 11 UTC. Por otro lado, entre enero y junio predominan los cielos despejados o con escasa nubosidad baja, ya que la cobertura no supera las 3 octas.

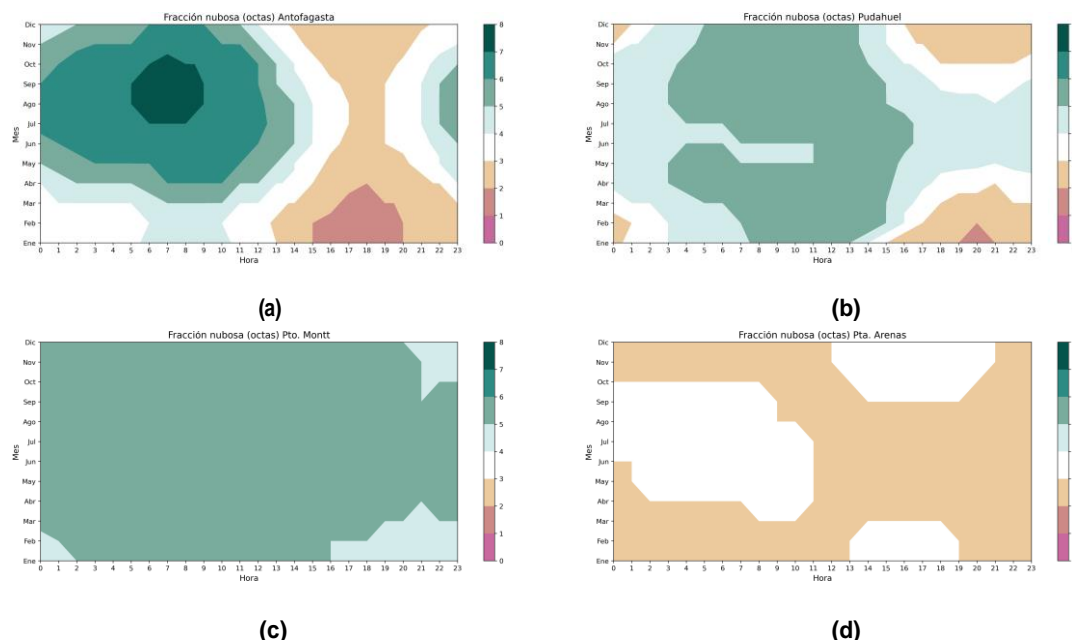


Figura 6. Promedio de los ciclos diurnos y anuales de la fracción nubosa para las cuatro estaciones representativas de cada una de las zonas en las que se dividió el país; Antofagasta, Pudahuel, Puerto Montt y Punta Arenas. Considerando la climatología entre 1992-2021.

3.2 Tendencia de nubes

Ahora, los promedios de las series anuales y estacionales de la base de la nube (Figura 7), evidencian que, en las estaciones de la zona norte, Arica presenta una tendencia positiva de 13.4 m/década mientras que Antofagasta e Iquique presentan una disminución de 16.3 y 16.6 m /década, respectivamente. La estación de Calama al poseer muy pocos datos, no fue considerada para este análisis. Para las estaciones de la zona centro, se observan tendencias positivas en Rodelillo (17.2) y Pudahuel (72.4), mientras que las demás estaciones muestran una tendencia negativa de -48.9 en La Serena, -3.1 en Santo Domingo y -1.9 m/década en Concepción. Las estaciones de Curicó y Calama no se analizaron debido a la falta de datos.

En la zona sur, destaca la estación de Puerto Montt con una tendencia negativa de -27.5 m/década, seguidos por Osorno (-12.7) y Valdivia (-0.6), mientras que la base de la altura de la nube aumenta en Coyhaique a razón de 13.8 y en Balmaceda de 7.3 m/década. Las localidades de la región austral muestran tendencias positivas en Punta Arenas y en Puerto Williams (4.8), siendo esta última la que presenta la mayor tendencia con 39.1 m/década.

En cuanto a la fracción nubosa, se aprecian tendencias levemente positivas en las estaciones de: Arica, Iquique, Rodelillo, Coyhaique y Puerto Williams. Mientras que el resto de las estaciones presentan tendencias cercanas a cero o ligeramente negativas. Las estaciones de Calama y Curicó no fueron consideradas en el análisis debido a la escasez de datos en ambas localidades. El resto de las figuras se encuentran en los anexos. Los valores de tendencia y significancia que se observan en los gráficos se encuentran disponibles en la Tabla 2 y en la Tabla 3.

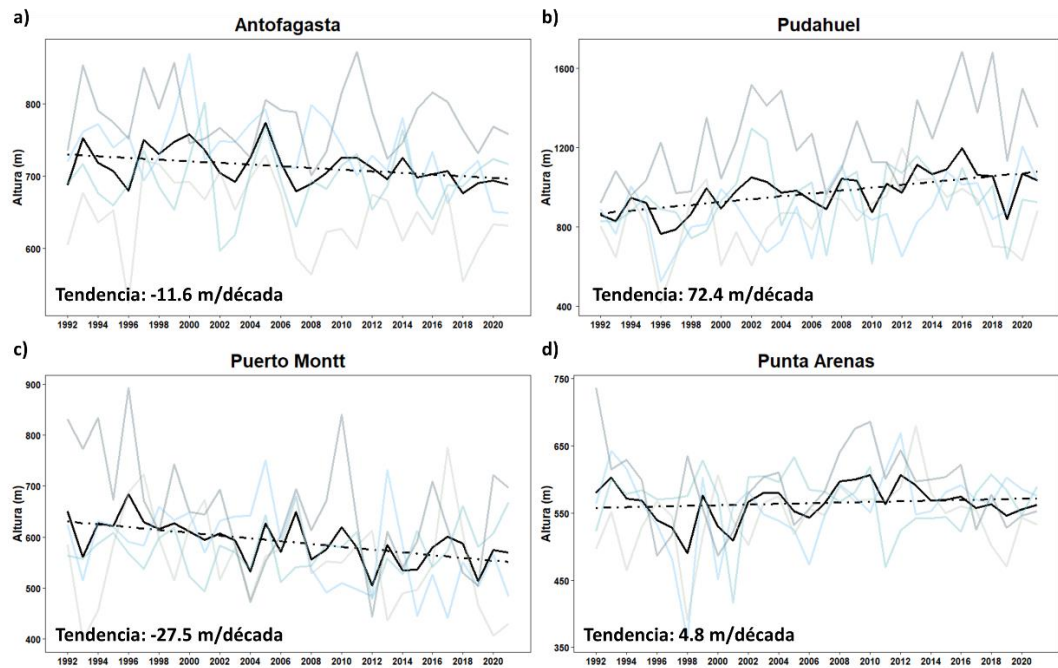


Figura 7. Serie de los promedios anuales de la altura de la base de la base de la nubosidad. Promedio anual (negro), tendencia anual (línea segmentada negra) y promedio estacional; otoño (celeste), invierno (gris claro), primavera (calipso) y verano (gris oscuro), para las cuatro estaciones representativas de cada una de las zonas en las que se dividió el país; Antofagasta, Pudahuel, Puerto Montt y Punta Arenas. Considerando la climatología entre 1992-2021.

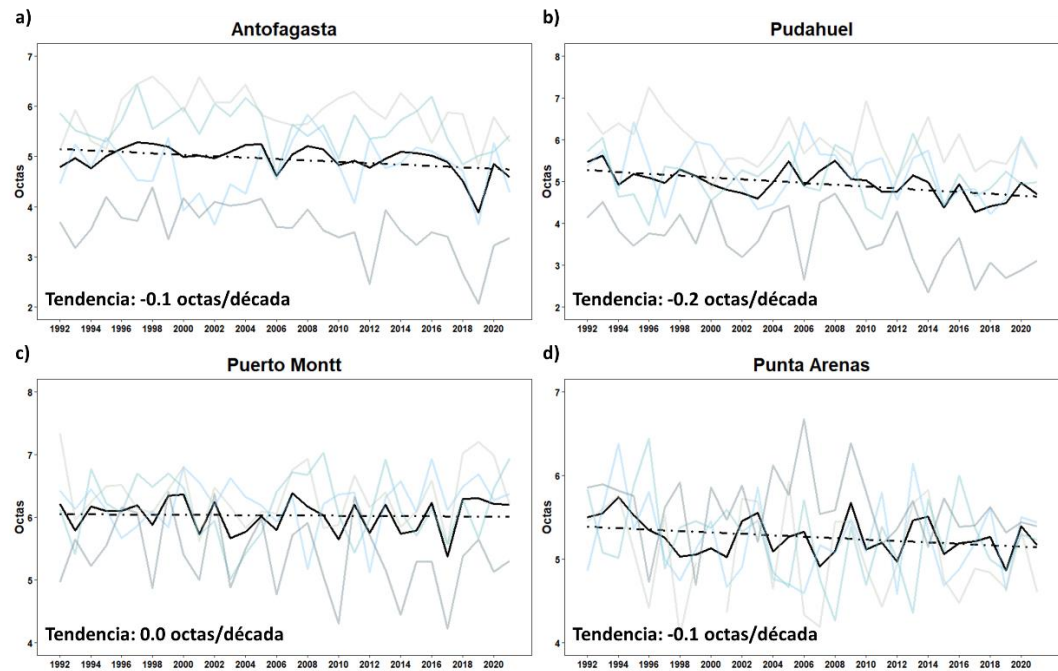


Figura 8. Serie de los promedios anuales de la fracción nubosa. Promedio anual (negro), tendencia anual (línea segmentada negra) y promedio estacional; otoño (celeste), invierno (gris claro), primavera (calipso) y verano (gris oscuro), para las cuatro estaciones representativas de cada una de las zonas en las que se dividió el país; Antofagasta, Pudahuel, Puerto Montt y Punta Arenas. Considerando la climatología entre 1992-2021.

Tabla 2. Tendencia de la altura de la base de la nube y significancia estadística.

Localidad (estaciones)	Altura									
	anual	pvalue	otoño	pvalue	invierno	pvalue	primavera	pvalue	verano	pvalue
Arica	13.4	0.01	15.0	0.10	9.8	0.26	-5.3	0.47	33.9	0.00
Iquique	-16.3	0.00	-22.0	0.01	-24.5	0.03	-10.0	0.12	-8.7	0.14
Antofagasta	-11.6	0.03	-26.2	0.01	-15.8	0.07	3.1	0.67	-7.4	0.54
La Serena	-48.9	0.00	-100.0	0.00	-38.7	0.06	-12.7	0.69	-44.1	0.01
Rodelillo	17.2	0.19	2.1	0.94	18.8	0.23	20.7	0.32	27.1	0.07
Santo Domingo	-3.1	0.43	-52.3	0.01	10.9	0.83	28.1	0.27	0.9	0.97
Pudahuel	72.4	0.00	75.0	0.03	55.8	0.12	25.2	0.24	133.7	0.00
Concepción	-1.9	0.83	1.5	0.72	-25.4	0.27	18.9	0.34	-2.4	0.86
Valdivia	-0.6	0.48	1.0	0.94	9.6	0.86	16.0	0.59	-29.0	0.02
Osorno	-12.7	0.03	-7.0	0.27	-32.7	0.00	-10.3	0.37	-0.6	0.94
Puerto Montt	-27.5	0.00	-43.4	0.01	-21.0	0.15	11.2	0.27	-56.9	0.02
Coyhaique	13.8	0.15	41.3	0.01	2.0	0.86	28.1	0.23	-16.3	0.28
Balmaceda	7.3	0.80	12.5	0.54	6.9	0.50	36.8	0.01	-26.8	0.04
Punta Arenas	4.8	0.97	16.8	0.20	14.0	0.30	-4.5	0.67	-6.9	0.75
Puerto Williams	39.1	0.01	82.3	0.01	-12.6	0.72	25.6	0.18	60.9	0.10

Tabla 3. Tendencia de la fracción nubosa y significancia estadística.

Localidad (estaciones)	Octas									
	anual	pvalue	otoño	pvalue	invierno	pvalue	primavera	pvalue	verano	pvalue
Arica	0.1	0.01	-0.1	0.07	0.0	0.43	0.2	0.02	0.4	0.00
Iquique	0.0	0.72	0.0	0.71	0.0	0.94	0.1	0.35	0.0	0.97
Antofagasta	-0.1	0.04	0.0	0.97	-0.1	0.14	-0.2	0.12	-0.3	0.00
La Serena	-0.1	0.05	0.1	0.44	-0.1	0.12	-0.2	0.18	-0.2	0.28
Rodelillo	0.1	0.04	0.2	0.04	0.0	1.00	0.1	0.32	0.2	0.57
Santo Domingo	-0.1	0.13	-0.1	0.45	-0.2	0.07	-0.1	0.69	0.0	0.89
Pudahuel	-0.2	0.00	-0.1	0.37	-0.3	0.02	-0.1	0.62	-0.4	0.00
Concepción	-0.1	0.07	-0.1	0.18	0.0	0.83	-0.2	0.21	-0.2	0.21
Valdivia	-0.2	0.00	-0.4	0.02	0.0	0.89	-0.1	0.80	-0.2	0.16
Osorno	-0.1	0.04	-0.2	0.09	0.1	0.46	-0.2	0.06	-0.1	0.27
Puerto Montt	0.0	0.83	0.1	0.24	0.0	0.75	0.0	0.97	-0.2	0.28
Coyhaique	0.1	0.37	0.1	0.54	0.2	0.09	0.0	0.59	0.0	0.80
Balmaceda	-0.1	0.23	0.2	0.28	0.1	0.25	-0.1	0.59	-0.1	0.05
Punta Arenas	-0.1	0.16	0.0	0.78	-0.1	0.50	-0.1	0.18	-0.1	0.07
Puerto Williams	0.0	0.97	0.0	0.86	0.1	0.35	0.0	0.78	0.0	0.50

Conclusiones

Una vez analizados todos los resultados puede concluirse que, con respecto al tipo de nubes, es la nubosidad estratiforme, especialmente los SC, la que presenta una mayor predominancia a lo largo del país, especialmente en la zona norte. A estos le siguen los cúmulos, los que predominan en la zona sur. Los resultados obtenidos se asemejan a los de Muñoz (Muñoz et al., 2016), sin embargo, dicho estudio solo considera 3 estaciones costeras ubicadas en la zona norte.

Con respecto a la altura de la base de la nube, es más frecuente la nubosidad baja en todo el país, pero a medida que se va más hacia el sur, se observan mayores frecuencias en intervalos asociados a una base más alta. Así, tanto en la zona centro como en la austral hay un mayor porcentaje de casos con bases sobre los 2000 metros, mientras que en sur estos disminuyen.

En el ciclo diurno de la base de la altura de la nube se aprecia un patrón más claro en la zona norte, con nubosidad más baja en invierno y en horas de la madrugada. Para la zona centro, las estaciones muestran dos núcleos de nubosidad baja en noviembre y febrero, en horas de la mañana. En el sur, las distintas localidades indican presencia de nubosidad baja durante todo el día, pero en general esta presenta una mayor altura que en las zonas norte y centro. Por otro lado, en la región austral, Punta Arenas presenta nubosidad con bases alrededor de los 600 metros durante todo el día, en los meses de invierno, mientras que Puerto Williams exhibe mínimos en invierno y durante la madrugada.

Todas las estaciones de la zona norte, exceptuando Arica, muestran una tendencia a la disminución de la altura de la base de la nube, al igual que La Serena con una tendencia de -48.9 m/década, mientras que Pudahuel muestra la tendencia positiva más alta de todas las estaciones con un aumento de 72.4 m/década. Las estaciones de la zona sur tienden a disminuir sus bases, mientras que estaciones australes como Coyhaique, Balmaceda y Puerto Williams la tendencia va al aumento.

En cuanto a la fracción nubosa, se exhibe una mayor frecuencia de cielos cubiertos (8/8 octas) en la mayoría de las estaciones, sin embargo, en estaciones en la parte sur y austral del país toma relevancia una menor cobertura nubosa con una mayor frecuencia de 2 y 5 octas en las estaciones de Punta Arenas y Puerto Williams, respectivamente. El comportamiento del ciclo diurno de la fracción nubosa, muestran que, en el norte durante la madrugada hay una mayor presencia de cielos cubiertos en los meses de invierno. En el centro, igualmente, estos máximos son apreciables durante la mañana, pero no superan las 6/8 durante todo el año. En el sur y la zona austral, la fracción sigue disminuyendo. En general las tendencias se asocian a valores cercanos a 0, pero la mayoría de las estaciones presentan una tendencia a la disminución de su fracción nubosa.

3 Referencias

- Bjerknes, J. (1919), 'ON THE STRUCTURE OF MOVING CYCLONES', *Monthly Weather Review* **47**(2), 95-99.
URL: [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493\(1919\)47<95:OTSOMC>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493(1919)47<95:OTSOMC>2.0.CO;2)
- Bretherton, C. S., Wood, R., George, R. C., Leon, D., Allen, G. and Zheng, X. (2010), 'Southeast Pacific stratocumulus clouds, precipitation and boundary layer structure sampled along 20° S during VOCALS-REx', *Atmospheric Chemistry and Physics* **10**(21), 10639-10654.
URL: <https://acp.copernicus.org/articles/10/10639/2010/>
- del Río, C., Lobos, F., Siegmund, A., Tejos, C., Osses, P., Huaman, Z., Meneses, J. P. and García, J.-L. (2021), 'GOFOS, ground optical fog observation system for monitoring the vertical stratocumulus-fog cloud distribution in the coast of the Atacama Desert, Chile', *Journal of Hydrology* **597**, 126190.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421002377>
- Garreaud, R., Barichivich, J., Christie, D. A. and Maldonado, A. (2008), 'Interannual variability of the coastal fog at Fray Jorge relict forests in semiarid Chile: FOG VARIABILITY IN SEMIARID CHILE', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **113**(G4).
URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008JG000709>
- Garreaud, R. and Muñoz, R. (2004), 'The Diurnal Cycle in Circulation and Cloudiness over the Subtropical Southeast Pacific: A Modeling Study', *Journal of Climate* **17**(8), 1699-1710.
URL: [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1699:TDCICA>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0442(2004)017<1699:TDCICA>2.0.CO;2)
- Miller, S. D., Noh, Y. J., Grasso, L. D., Seaman, C. J., Ignatov, A., Heidinger, A. K., ... & Petrenko, B. (2022). A Physical Basis for the Overstatement of Low Clouds at Night by Conventional Satellite Infrared-Based Imaging Radiometer Bi-Spectral Techniques. *Earth and Space Science*, **9**(2), e2021EA002137.
URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2021EA002137>
- Muñoz, R. C., Quintana, J., Falvey, M. J., Rutllant, J. A. and Garreaud, R. (2016), 'Coastal Clouds at the Eastern Margin of the Southeast Pacific: Climatology and Trends', *Journal of Climate* **29**(12), 4525-4542.
URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/29/12/jcli-d-15-0757.1.xml>
- Sassen, K. and Wang, Z. (2008), 'Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of results', *Geophysical Research Letters* **35**(4), L04805.
URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/2007GL032591>
- Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L. E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J. and Zalazar, L. (2019), 'Contrasting Climates at Both Sides of the Andes in Argentina and Chile', *Frontiers in Environmental Science* **7**, 69.
URL: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2019.00069/full>
- Vilches, C. (2023), 'Impactos del cambio climático en el FIR Antofagasta'.
URL: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/climaticoAeronautico>
- Zamora Aguirre, R. C. (2010). 'Caracterización Observacional de la Capa Límite Marina en Antofagasta'.
URL: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102299/cf-zamora_ra.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Warren, S. and Hahn, C. (2002), 'Clouds: Climatology', *Encyclopedia of atmospheric sciences* **2**, 476-483.
- Zuidema, P., Painemal, D., Szoeki, S. d. and Fairall, C. (2009), 'Stratocumulus Cloud-Top Height Estimates and Their Climatic Implications', *Journal of Climate* **22**(17), 4652-4666.
URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/22/17/2009jcli2708.1.xml>

4 Anexos

A Análisis del total de datos

Análisis del total de datos disponibles por hora para las distintas variables utilizadas en el análisis de nubosidad.

Tabla 3. Total de datos (octas) 1992-2021.

Localidad (estaciones)	Hora (Local)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Arica	10816	3807	3780	10715	3776	3775	10705	3762	3759	10699	3767	3795
Iquique	10939	3921	3904	10954	3902	3902	10954	3901	3902	10957	3905	3904
Calama	10616	3502	3475	4381	2598	2506	9572	2473	2469	2668	3078	3450
Antofagasta	10916	4202	4183	10918	4183	4180	10916	4181	4179	10916	4179	4181
La Serena	10754	3670	3527	10049	3471	3414	9847	3327	3308	9649	3305	3688
Rodelillo	5889	13	0	0	0	0	5017	0	0	0	0	7
Sto Domingo	9218	24	5	4	0	0	6658	0	0	0	1	2533
Pudahuel	10793	4103	4082	10528	3565	3462	10096	3440	3488	10001	3857	3951
Curicó	7898	20	1	2048	1	1	7005	1	1	1956	2	4
Concepción	10918	4088	4059	10729	3779	3771	10580	3766	3771	10521	3776	3919
Valdivia	5514	190	132	121	69	51	5238	30	18	22	26	32
Osorno	7211	157	104	100	48	32	7052	18	18	19	28	33
Pto Montt	10574	4129	4104	10555	4080	4050	10468	4034	4013	10375	4018	4021
Coyhaique	10897	171	86	57	47	25	6984	10	6	5	9	15
Balmaceda	7413	205	132	2966	61	46	5871	25	16	4102	36	665
Pta Arenas	10732	3851	3831	10748	3828	3828	10747	3830	3828	10746	3827	3828
Pto Williams	6175	124	71	72	48	41	5644	29	27	66	139	383

Localidad (estaciones)	Hora (Local)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Arica	10816	3807	3780	10715	3776	3775	10705	3762	3759	10699	3767	3795
Iquique	10939	3921	3904	10954	3902	3902	10954	3901	3902	10957	3905	3904
Calama	10616	3502	3475	4381	2598	2506	9572	2473	2469	2668	3078	3450
Antofagasta	10916	4202	4183	10918	4183	4180	10916	4181	4179	10916	4179	4181
La Serena	10754	3670	3527	10049	3471	3414	9847	3327	3308	9649	3305	3688
Rodelillo	5889	13	0	0	0	0	5017	0	0	0	0	7
Sto Domingo	9218	24	5	4	0	0	6658	0	0	0	1	2533
Pudahuel	10793	4103	4082	10528	3565	3462	10096	3440	3488	10001	3857	3951
Curicó	7898	20	1	2048	1	1	7005	1	1	1956	2	4
Concepción	10918	4088	4059	10729	3779	3771	10580	3766	3771	10521	3776	3919
Valdivia	5514	190	132	121	69	51	5238	30	18	22	26	32
Osorno	7211	157	104	100	48	32	7052	18	18	19	28	33
Pto Montt	10574	4129	4104	10555	4080	4050	10468	4034	4013	10375	4018	4021
Coyhaique	10897	171	86	57	47	25	6984	10	6	5	9	15
Balmaceda	7413	205	132	2966	61	46	5871	25	16	4102	36	665
Pta Arenas	10732	3851	3831	10748	3828	3828	10747	3830	3828	10746	3827	3828
Pto Williams	6175	124	71	72	48	41	5644	29	27	66	139	383

B Hovmoller Estaciones

Promedio de los ciclos diurnos y anuales de la altura de la base de la nubosidad para el resto de las estaciones.

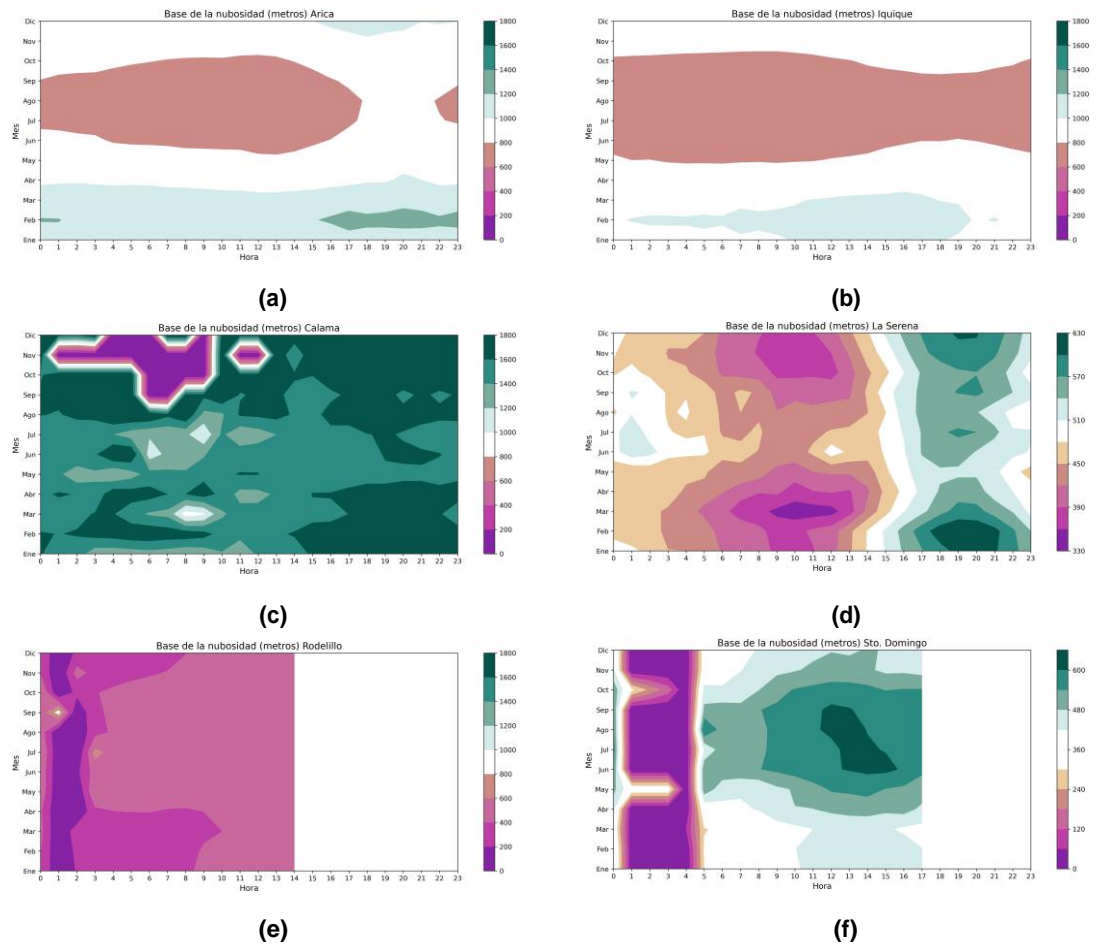


Figura B.1. Promedio de los ciclos diurnos y anuales de la altura de la base de la nubosidad para las estaciones de Arica, Iquique, Calama, La Serena, Rodelillo y Santo Domingo. Considerando la climatología entre 1992-2021.

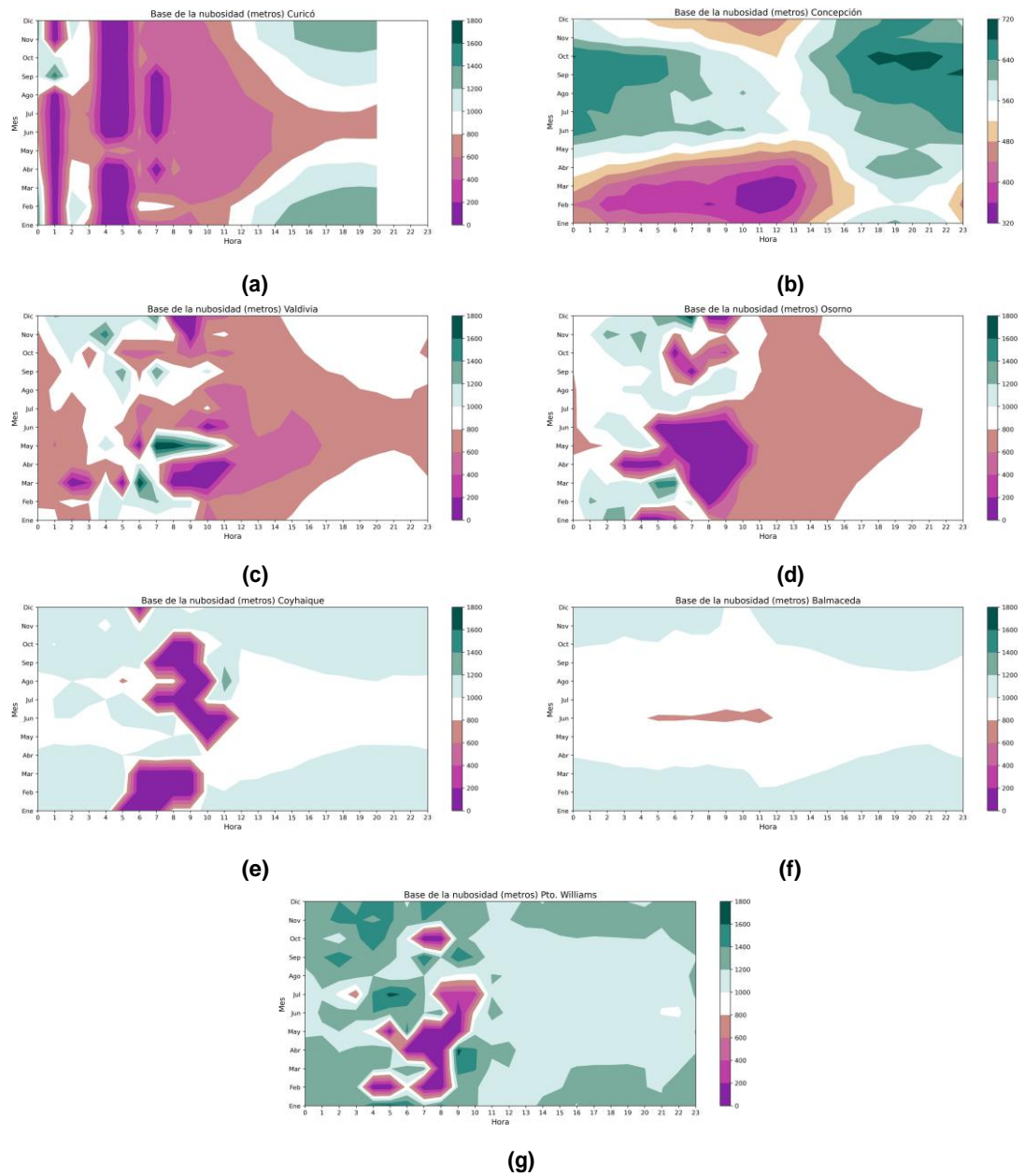


Figura B.2. Promedio de los ciclos diurnos y anuales de la altura de la base de la nubosidad para las estaciones de Curicó, Concepción, Valdivia, Osorno, Coyhaique, Balmaceda y Puerto Williams. Considerando la climatología entre 1992-2021.

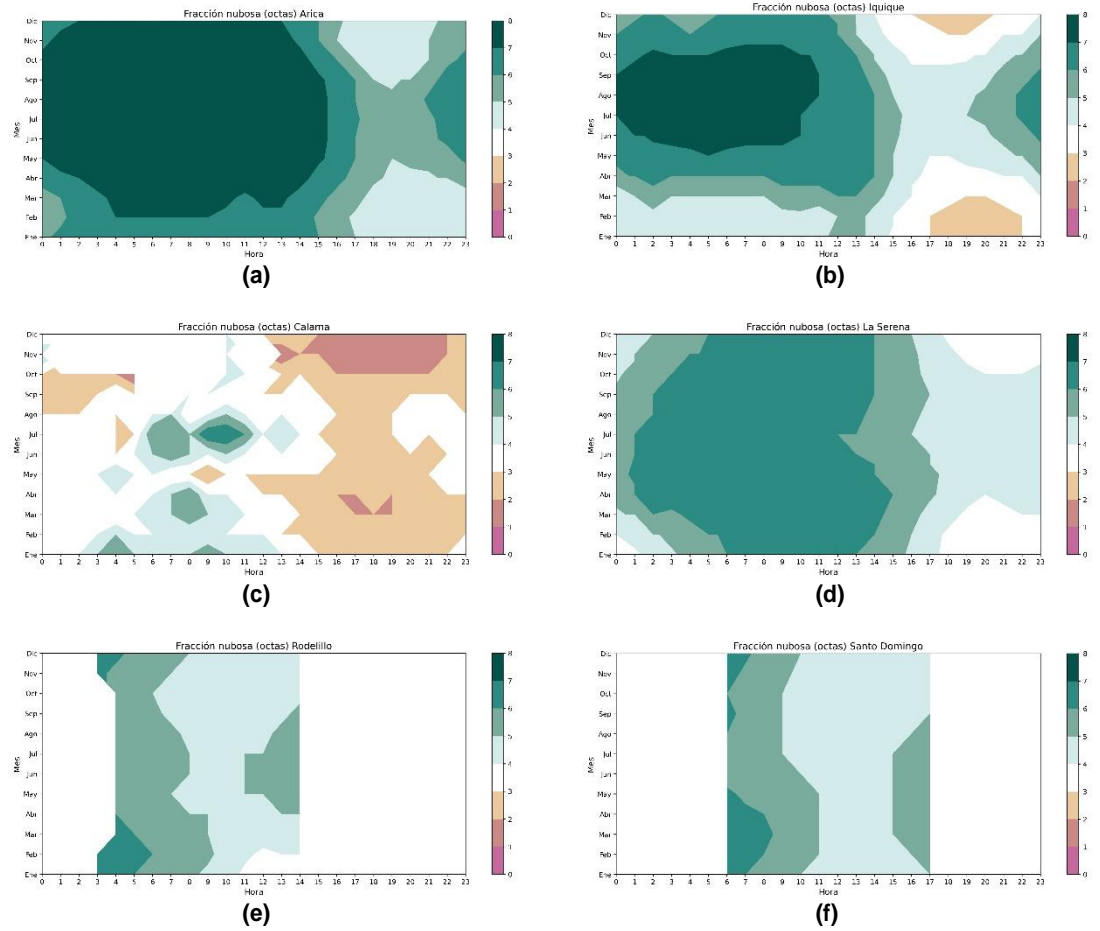


Figura B.3. Promedio de los ciclos diurnos y anuales de la fracción nubosa para las estaciones de Arica, Iquique, Calama, La Serena, Rodelillo y Santo Domingo. Considerando la climatología entre 1992-2021.

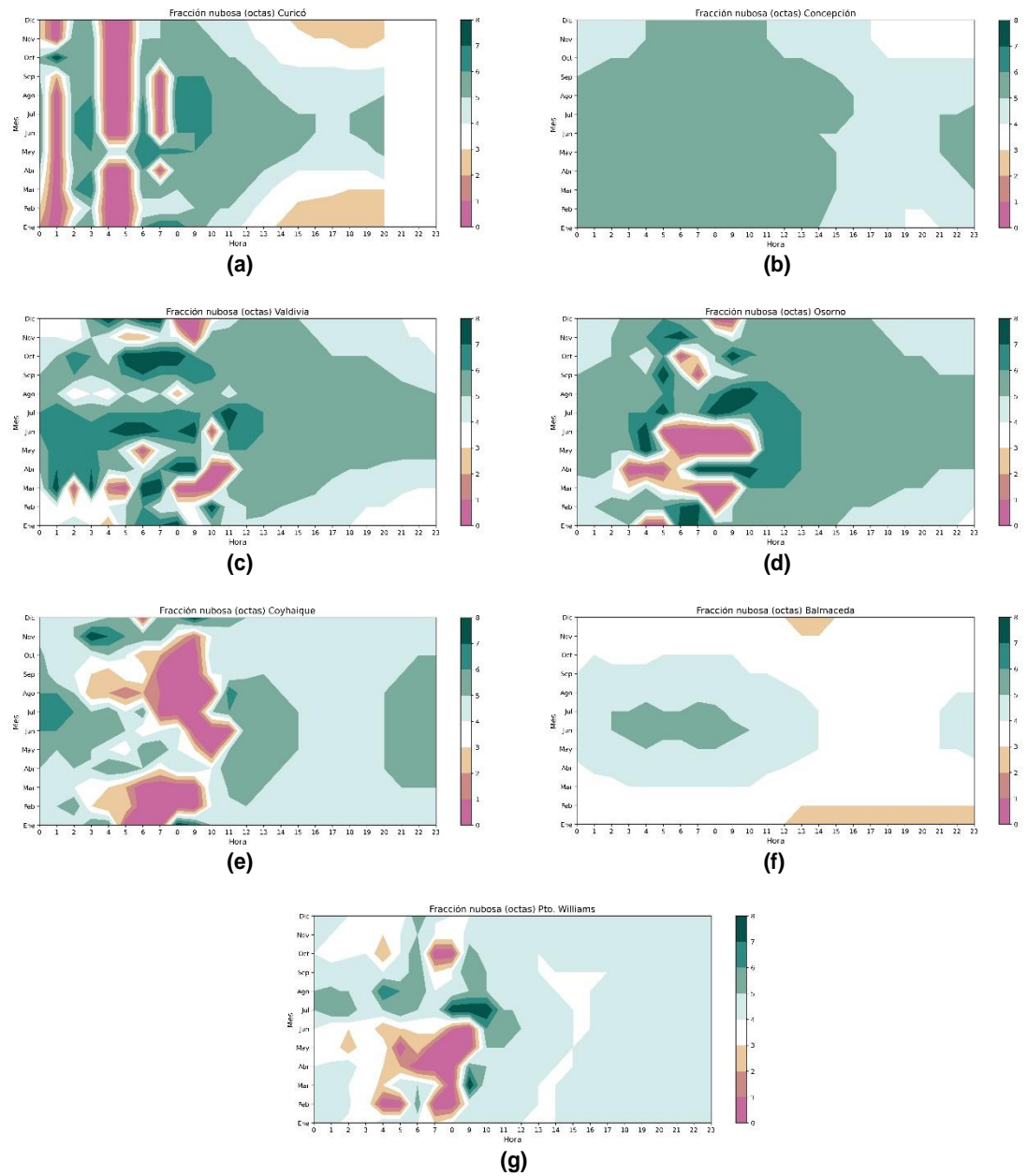


Figura B.4. Promedio de los ciclos diurnos y anuales de la fracción nubosa para las estaciones de Curicó, Concepción, Valdivia, Osorno, Coyhaique, Balmaceda y Puerto Williams. Considerando la climatología entre 1992-2021.

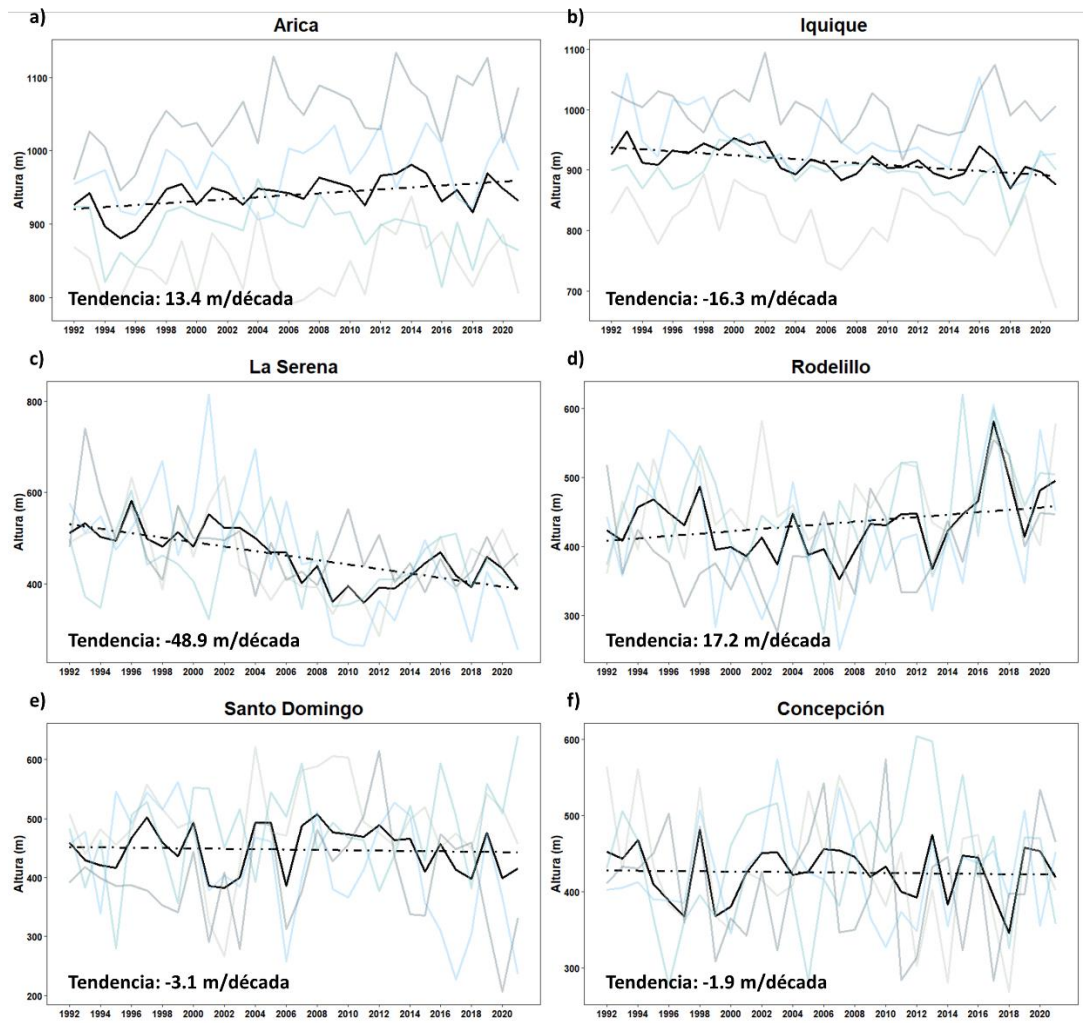


Figura B.5. Serie de los promedios anuales de la de la altura de la base de la nube. Promedio anual (negro), tendencia anual (línea segmentada negra) y promedio estacional; otoño (celeste), invierno (gris claro), primavera (calipso) y verano (gris oscuro).

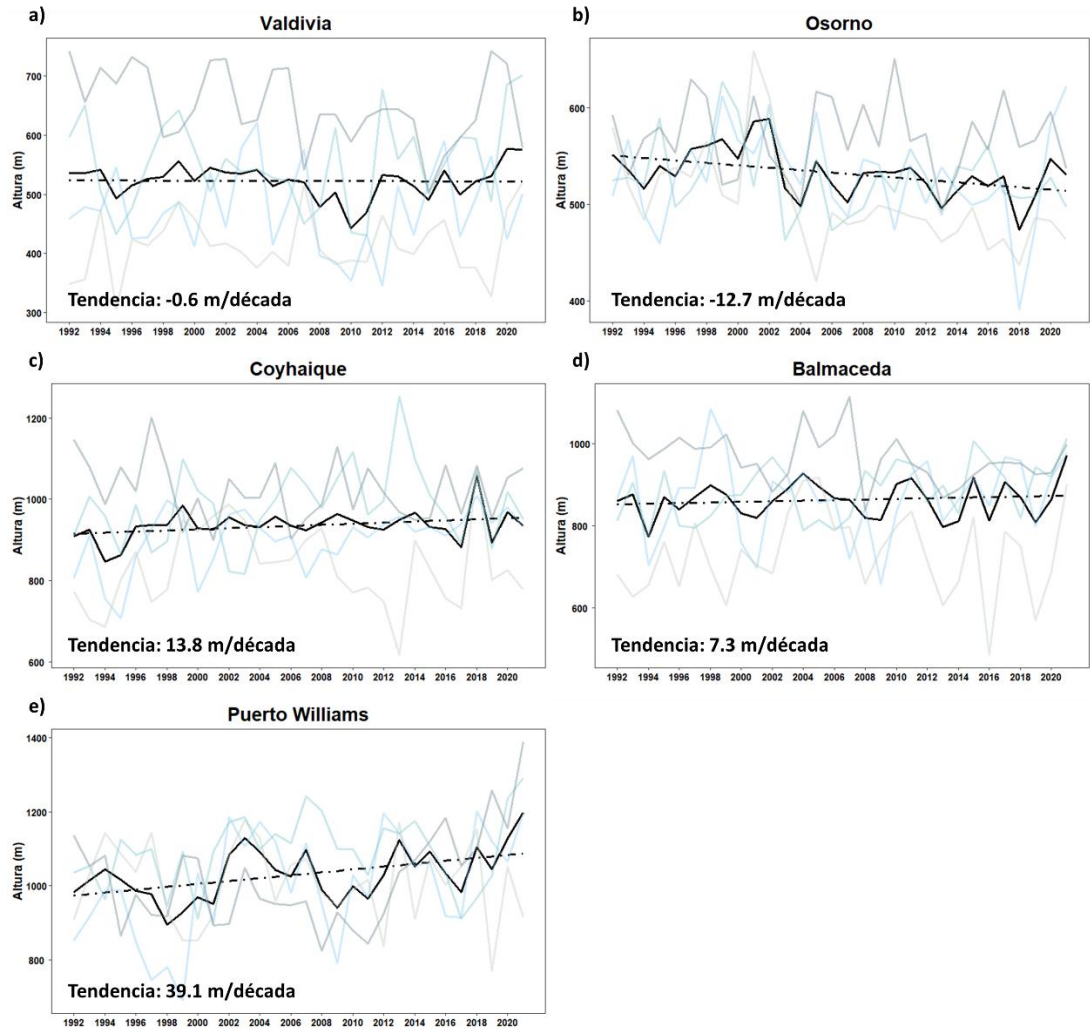


Figura B.6. Serie de los promedios anuales de la altura de la base de la nube. Promedio anual (negro), tendencia anual (línea segmentada negra) y promedio estacional; otoño (celeste), invierno (gris claro), primavera (calipso) y verano (gris oscuro).

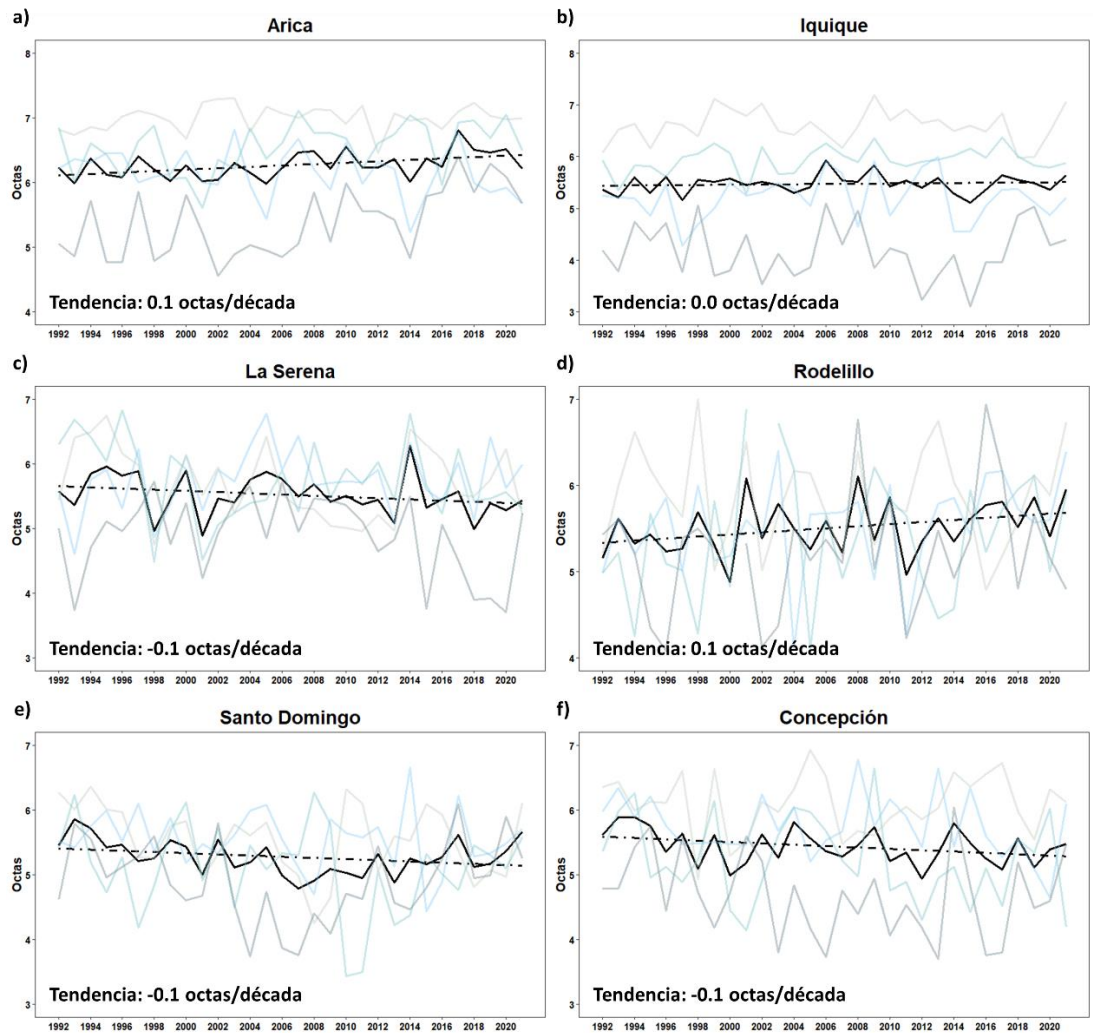


Figura B.7. Serie de los promedios anuales de la fracción nubosa. Promedio anual (negro), tendencia anual (línea segmentada negra) y promedio estacional; otoño (celeste), invierno (gris claro), primavera (calipso) y verano (gris oscuro).

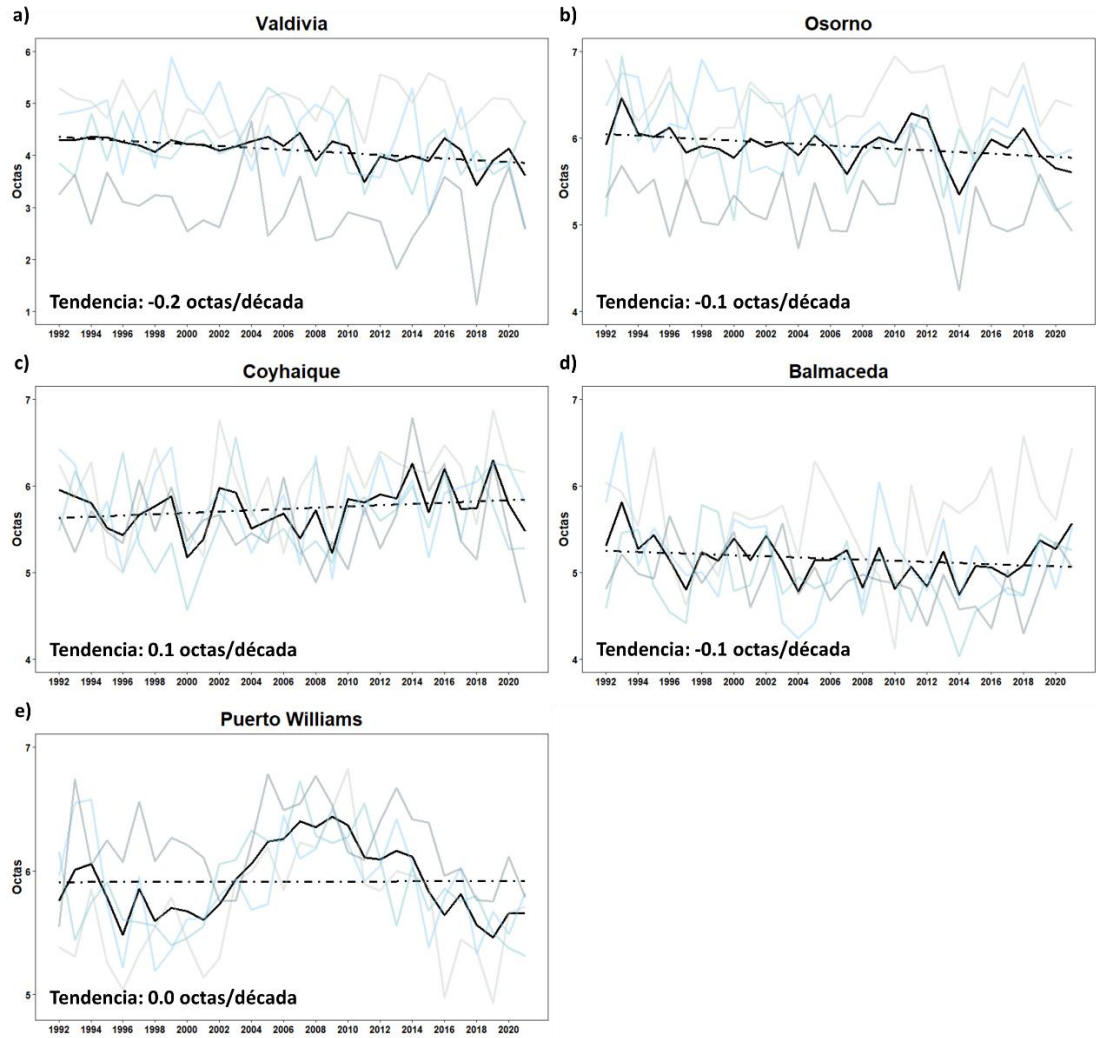


Figura B.8. Serie de los promedios anuales de la fracción nubosa. Promedio anual (negro), tendencia anual (línea segmentada negra) y promedio estacional; otoño (celeste), invierno (gris claro), primavera (calipso) y verano (gris oscuro).