UNIVERSIDAD Y TECNOLOGÍA

FUNDACIÓN PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Licitación N° 1588-170-LE10

"Uso de Modelos de Calidad del Aire en la Evaluación Ambiental de Proyectos

Elaboración de un Documento Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA"

Informe Técnico

Preparado para:

Servicio de Evaluación Ambiental

Septiembre 2011

Contenido

1 Introducción 3
2 Objetivos 6
3 Revisión de la modelación en los proyectos sometidos al SEIA 7
4 Datos de entrada para la modelación 9
5 Experimentos para definir terreno complejo 10
6 Aplicación del sistema de modelación CALMET/CALPUFF 26
7 Comparación de la estructura vertical de la tropósfera baja entre costa y valle 32
8 Comparación WRF/CALMET 43
9 Conclusiones 52
ANEXO 1 53
ANEXO 2 70

1 Introducción

Un elemento importante dentro del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) es el uso de modelos de calidad del aire. Estos modelos se aplican con fines de predecir y evaluar los impactos ambientales de futuros proyectos. Sin embargo, dentro del SEIA no existen criterios establecidos que definan el uso de esos modelos ni tampoco qué tipos de modelos de usar. Mientras este estudio apunta justamente a establecer tales criterios a través de un documento guía, la historia muestra que esta guía tiene que ser dinámica en el tiempo debido a que los modelos a la vez muestran cambios importantes que reflejan la incorporación de los avances a nivel científico.

La modelación atmosférica tiene sus orígenes en el pronóstico meteorológico en la primera mitad del siglo pasado. Mientras hasta fines del siglo 19 el pronóstico del tiempo era completamente subjetivo y basado en observaciones empíricas, fue el noruego Vilhelm Bjerknes quien propuso a principios del siglo 20 que el pronóstico meteorológico se debería basar en las leyes de la física y desarrolló muchos de los fundamentos que todavía hoy día se aplican en la ciencia de la atmósfera. El trabajo de Bjerknes originó mucho otros desarrollos tanto en términos meteorológicos como matemáticos (específicamente en la matemática numérica) que culminaron a mitad del siglo 20 en el primer pronóstico numérico (liderado por Jule Charney y John von Neumann de EE.UU.) usando el primer computador digital electrónico y, pocos años después, el primer pronóstico operacional por Carl-Gustaf Rossby del Instituto Meteorológico de Suecia. Fue justamente la explosión en capacidad computacional la que ha contribuido sustancialmente a los avances de la modelación atmosférica que hoy en día es la herramienta fundamental en los pronósticos tanto a nivel global (incluyendo aquellos a nivel climático) como regional.

En comparación con la modelación meteorológica la modelación de calidad del aire es una disciplina bastante reciente con sus comienzos en los años 1960. Fue unos 50 años después del trabajo de Bjerknes que se iniciaron experimentos a nivel de laboratorio con fines de entender mejor la formación de la contaminación fotoquímica y de material particulado. Dada la disponibilidad de los computadores, los resultados de estos trabajos experimentales se pudieron implementar en los llamados modelos de calidad del aire. El desarrollo de estos modelos desde entonces ha tenido fines científicos, de pronóstico y regulatorios. Y es justamente la gran variabilidad en el tipo de uso lo que a la vez explica la gran variabilidad en tipos de modelos disponibles – desde modelos Gaussianos simples que no consideran reacciones químicas hasta modelos acoplados que consideran procesos meteorológicos y químicos (y sus respectivas interacciones) en forma simultánea. En su gran mayoría todos los modelos disponibles hoy en día (desde los más simples hasta los más sofisticados) han sido desarrollados en EE.UU. y Europa.

El uso de modelos de calidad del aire en la evaluación de impacto ambiental hoy en día es una práctica común en muchos países del mundo. Sin embargo, no existe un acuerdo común a nivel internacional sobre el cómo se deberían usar los modelos, ni en qué caso y, menos aún, qué modelo (ni siquiera el tipo de modelo). A modo de ejemplo, en su catálogo el “European Topic Centre on Air and Climate Change” presenta un total de 142 modelos. A nivel nacional, existen países que

recomiendan modelos para la evaluación ambiental; a modo de ejemplo, la "Environmental Protection Agency" (EPA) da recomendaciones explícitas para el uso de dos modelos, mientras Alemania incluso define un solo modelo para estos fines. En términos generales, los modelos que se usan en los países norteamericanos y europeos se basan en las experiencias y desarrollos de los grupos científicos de cada país.

En Chile, a pesar de los avances significativos en gestión que se han logrado desde la entrada en vigencia del SEIA en el año 1997 no existen criterios establecidos para el uso de modelos de calidad del aire en la evaluación ambiental de proyectos. En caso que las autoridades exigen una modelación en estas evaluaciones, los titulares (en general a través de sus consultores) optan casi exclusivamente por los modelos recomendados por EPA. Mientras dentro de EPA existe una evaluación continua sobre cuáles son los modelos más apropiados y bajo qué condiciones, en Chile no existe tal evaluación continua y no se ha efectuado tampoco un diagnóstico sobre si los modelos usados en la actualidad son adecuados para la realidad chilena. Además, los modelos recomendados por EPA para fines regulatorios tampoco reflejan los avances científicos en algunas universidades a nivel nacional que podrían contribuir a una aproximación más objetiva sobre recomendaciones y lineamentos para un buen uso de las herramientas de modelación dentro del SEIA.

Tal como lo indican los Términos de Referencia (TdR) para este proyecto, el artículo 81 de la Ley N° 19.300 justamente hace necesario que el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) confeccione una guía sobre el uso de modelos de calidad del aire en el marco del SEIA basada en un análisis de los modelos disponibles hoy en día en general y dentro del contexto de la realidad chilena en particular. Considerando una guía como un conjunto de recomendaciones prácticas, ella debería cumplir con los siguientes requisitos principales:

- Uniformar criterios de necesidad de modelación para la evaluación de un proyecto.
- Uniformar criterios de selección y aplicación de modelos.
- Uniformar criterios de cómo configurar los modelos.
- Establecer criterios sobre uso de información meteorológica, geográfica, de superficie y otros datos de entrada.
- Asegurar base científica para el uso de las alternativas.
- Definir las características de la presentación de los resultados de la modelación.

Sin embargo, para cumplir con estos requisitos es necesario, además, entregar a las autoridades un análisis teórico de los modelos disponibles hoy en día, proveer un diagnóstico de las realidades nacionales (en particular aquellas relacionadas a sus condiciones geográficas y de disponibilidad de datos) y, finalmente, contextualizar el análisis teórico a las realidades nacionales.

Este informe forma la base técnica para la "Guía para el uso de modelos de dispersión atmosféricos en el SEIA". A pesar que existen otras guías a nivel internacional, éstas no necesariamente reflejan las particularidades chilenas. En este sentido, este informe apunta a dar respuestas específicas para el caso chileno sobre el cómo se debe aplicar la modelación dentro del SEIA. Con este fin, era necesario realizar algunas actividades a novel de experimentos de modelación y análisis de datos para poder

cumplir los objetivos del estudio que se entregan en la sección 2. El contexto histórico de la modelación dentro del SEIA entrega la revisión de la modelación en los estudios de impacto ambiental en el pasado (sección 3). En la sección 4 se describen brevemente los datos de entrada para los modelos disponibles para Chile y que –en parte- también se han ocupado para la modelación de los experimentos cuyos resultados se entregan en las secciones 5 y 6. La sección 5 describe los experimentos que tenían como objetivo principal generar una base técnica para evaluar cuán complejo es el terreno chileno. En la sección 6 a la vez se evalúa si en sus configuraciones aplicadas según en las modelaciones tal como las entrega la sección 3 el sistema de modelación CALMET/CALPUFF es capaz de representar las características del territorio de Chile. La sección 7 entrega un análisis sobre la información de datos meteorológico en altura que también se considera de mucha importancia en el uso de distintos tipos de modelos dentro del contexto de la realidad chilena. A nivel de estudio de caso, también se realizo un experimento comparando resultados de simulaciones de CALMET y WRF. Los resultados de este estudio se entregan en la sección 8. Finalmente, la sección 9 entrega las conclusiones de este informe técnico. En un anexo, se entrega el antecedente de una base de datos meteorológica (BDOM). Generar una base de datos no es objetivo de este estudio. Sin embargo, se considera un antecedente importante pare éste.

2 Objetivos

Los objetivos del Estudio son los indicados en los TdR, a saber:

Objetivo general

Mejorar la eficiencia del proceso de evaluación uniformando criterios en la evaluación de proyectos, particularmente para la evaluación del componente aire en relación a la protección de la salud de las personas y los recursos naturales, a través de la elaboración de una guía sobre el uso de modelos de calidad del aire en el marco del SEIA.

Objetivos específicos

1. Conocer la forma en que se ha venido abordando la evaluación ambiental del componente aire en los proyectos con emisiones atmosféricas significativas.
2. Conocer sobre aspectos teóricos de modelación de calidad del aire.
3. Conocer las principales características y diferencias de los modelos existentes.
4. Realizar una evaluación crítica de los modelos de calidad del aire disponibles.
5. Disponer de criterios de selección de modelos bajo distintas condiciones y características del dominio de modelación.
6. Disponer de criterios para evaluar la calidad, cantidad, origen, etc, de los datos de entrada utilizados en una modelación particular.
7. Disponer de criterios para definir la mejor configuración de determinados modelos de calidad del aire.
8. Mejorar el entendimiento al alcance de los modelos e interpretación de resultados por parte de los titulares de los proyectos y de la autoridad ambiental.
9. Establecer planes de seguimiento acordes a la naturaleza del proyecto y los resultados de los modelos utilizados.
10. Capacitar a profesionales del SEA en las materias señaladas anteriormente.
11. Disponer de una guía para el uso de modelos de calidad del aire.

3 Revisión de la modelación en los proyectos sometidos al SEIA

Antes de llegar al producto final de este estudio que es una guía de recomendaciones para la modelación atmosférica en el SEIA se ha considerado muy importante revisar cómo se ha hecho esa parte en los proyectos en el pasado. Con este fin, se han revisado 50 proyectos de energía como de minería cada uno. En ambos casos se eligieron los 50 proyectos de mayor inversión económica. En primer lugar, cabe señalar que no existe ningún formato establecido de cómo se debería entregar la información sobre la modelación junto con sus resultados. En consecuencia, no ha sido una tarea fácil buscar los detalles sobre la modelación para cada uno de los proyectos revisados. Mientras se ha hecho el mejor esfuerzo posible no se descarta la posibilidad que en algunos casos no se encontró la información aunque se haya entregado en alguna parte de las EIAs o DIAs.

En términos generales y en el caso de los proyectos de energía, en 28 casos en que se realizó una modelación está también disponible la información sobre sus resultados en el e-SEIA, en dos casos se hizo una modelación pero no se encuentra la información sobre sus resultados en el e-SEIA, y en el 20 casos restantes no se hizo ninguna modelación. En los 50 proyectos revisados en el caso de minería, en 24 casos se realizó una modelación está también disponible la información sobre sus resultados en el e-SEIA, en ocho se hizo una modelación pero no se encuentra la información sobre sus resultados en el e-SEIA, y en el 18 casos restantes no se hizo. La tabla 3.1 resume estos números y, además, entrega el tipo de modelos que usaron. En total, sólo se usaron cuatro sistemas de modelos, tres de ellos de tipo Gaussiano (SCREEN, ISCST3, AERMOD) y uno de tipo puff (CALMET/CALPUFF). El más moderno de los modelos Gaussianos, fue usado, en diez de los casos, mientras en 21 de los casos se optó por los modelos Gaussianos mucho más antiguos que son SCREEN e ISCST 3. En sólo once de los casos se optó por el sistema más complejo que es CALMT/CALPUFF, diez proyectos en energía y uno en minería.

	Número de proyectos sin modelación	Número de proyectos con modelación		Número de proyectos que usan modelo			
		Con información entregada	Sin información entregada	SCREEN	ISCST3	AERMOD	CALMET/ CALPUFF
Energía	**20**	**28**	**2**	**-**	**14**	**4**	**10**
Minería	**18**	**24**	**8**	**5**	**12**	**6**	**1**

Tabla 3.1: Resumen de la modelación en los proyectos de energía y minería, respectivamente. Además, se entrega la información sobre qué sistema de modelación se ocuparon en ambos tipos de modelación.

Mientras los modelos Gaussianos siempre necesitan información de una sola estación meteorológica, el desempeño del sistema CALMET/CALPUFF depende mucho de la cantidad de información meteorológica de entrada con que se alimenta el modelo. Esa información meteorológica puede ser provista por un modelo meteorológico numérico o de estaciones meteorológicas. En uno de los casos en que se aplicó el sistema CALMET/CALPUFF se usó información proveniente de un modelo numérico (MM5), sin embargo, no se entregó ninguna información sobre la configuración del modelo. En ocho de los todos los casos en que se usó este sistema de modelación (tanto en proyectos de energía como minería) se ocupó información de una sola estación meteorológica, en un caso de dos, en uno de cuatro y también en un caso de ocho estaciones (el caso que también uso información del MM5).

También es conocido que las mediciones atmosféricas pueden tener problemas de diferentes naturalezas, lo que a su vez podría reflejarse en la calidad de los datos. En este sentido y antes de usar datos atmosféricos con fines de modelación, siempre es recomendable revisar los datos por posibles inconsistencias, datos faltantes, etc. Sin embargo, en ninguno de los casos de todos los proyectos en que se hizo una modelación (con el sistema de modelación que sea) se informó o se mencionó sobre un control de calidad de la información meteorológica usada y posibles problemas en los datos.

Aparte de la información meteorológica, otra información de entrada para los modelos es la información topográfica, principalmente sobre orografía y uso de suelo. Mientras, en general, no se menciona la fuente donde se obtuvo la información topográfica, en ocho casos (seis de energía y dos de minería) se menciona como fuente “información satelital”, en dos casos el Instituto Geográfico Militar (para información orográfica), en un caso NASA SRTM (también para información orográfica) y una vez USGS (para información sobre uso de suelo).

Finalmente, para la mejor interpretación de los resultados es importante en qué forma se entregan ellos. En general, se incluyen en los documentos resultados resumidos a través de tablas y mapas de dispersión. En ninguno de los casos se encontraron los datos propiamente tal de las modelaciones.

En resumen, la información sobre la modelación se considera, sin excepción, muy escasa. Ninguna descripción de la modelación permite reproducir los resultados y, por tanto, ninguno de los proyectos revisados cumple con requisitos mínimos de buenas prácticas y transparencia. Cabe señalar que tampoco han existido normas o guías que exigieran mayor transparencia o dictaran formatos de cómo se deberían entregar los antecedentes y los resultados de la modelación.

En el CD que acompañaba el primer informe de esta consultoría están disponibles todos los detalles de la revisión.

4 Datos de entrada para la modelación

Mientras hace unos años el acceso a datos topográficos para Chile era muy difícil y, en muchos casos, significaba mucho trabajo a mano, traduciendo mapas a bases de datos digitales, hoy en día existe una gran base de datos con esa información a nivel mundial. Probablemente, una de las bases de datos más grandes en este sentido la provee el *Land Cover Insitutute del U.S. Geological Survey (USGS)* de *EE.UU.* De su base de datos se pueden obtener datos para Sudamérica de las siguientes variables (http://landcover.usgs.gov/landcoverdata.php#sa):

- Topografía
- Uso de suelo
- Contenido de agua del suelo

Esas variables están disponibles a una resolución de 30 segundos (aprox. 1 km).

Otras variables necesarias para algunos modelos son:

- Albedo
- Rugosidad
- *Leaf Area Index* (LAI)

De estas variables no existen bases de datos para Chile, y se relaciona generalmente el uso de suelo a valores característicos a través de tablas. Según el conocimiento del consultor, todos los modelos contienen estas tablas en sus códigos.

La aplicación de modelos fotoquímicos requiere inventarios de emisiones que dan cuenta sobre la distribución espacial y temporal y la especiación química de las emisiones de todas las fuentes emisoras dentro del área de interés. En este momento, la información disponible para Chile se encuentra en el Sistema Nacional de Calidad del Aire. En la actualidad no existen esos inventarios para todas las regiones del país, pero se están haciendo esfuerzo para completarlos continuamente.

Finalmente, los modelos numéricos requieren como información de entrada información de los modelos globales. También en este caso, existen muchas fuentes de datos. Sin lugar a duda, los más usados son los datos del *Global Forecasting System* (GFS) y los datos reanális ambos de NCEP de EE.UU. Ambos datos son gratis y se pueden bajar de internet.

En resumen, en la actualidad existe la disponibilidad de datos topográficos y de modelos globales de alta calidad y, en este sentido, no se considera una limitante para la modelación dentro de la evaluación de impacto ambiental.

5 Experimentos para definir terreno complejo

Motivación

Generalmente, los países desarrollados cuentan con algún tipo de guía sobre la modelación de calidad del aire con fines regulatorios. Por otra parte, no existe ningún estándar internacional sobre la materia, lo que resulta en que cada país cuenta con una guía (o un protocolo) propio. En este sentido, no es posible dentro de este estudio revisar todas las guías a nivel internacional (que, además, generalmente sólo están disponibles en el idioma del país de origen). Considerando que según la revisión de proyectos (sección 3) todos los modelos en uso dentro del SEIA han sido aquellos recomendados por la *Environmental Protection Agency* (EPA) de EE.UU. y que, además, la EPA cuenta con una guía muy detallada publicada en el año 2005, es justamente ésta el punto de partida para este estudio. La guía misma se encuentra disponible en internet (http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/appw_05.pdf).

También en EE.UU., se ha formado un grupo de trabajo representando distintas agencias gubernamentales (*Interagency Workgroup on Air Quality Modeling*, IWAQM) que tiene a su cargo hacer una revisión continua de los modelos disponibles y hacer recomendaciones de su uso. La última de estas revisiones se hizo en el año 2009 (http://www.epa.gov/scram001/guidance/reports/Draft_IWAQM_Reassessment_052709.pdf).

En términos generales, los modelos recomendados por EPA y el IWAQM con fines de evaluar la dispersión de contaminantes (sin reacciones químicas) son el modelo Gaussiano AERMOD y el modelo tipo puff CALPUFF (junto con su pre-procesador CALMET). Sin embargo, tanto la guía como la revisión por parte del IWAQM ponen en duda la capacitad de esos modelos en terrenos complejos. Tal como indica el documento elaborado en este estudio "Fundamentos de de la contaminación atmosférica" un terreno complejo puede inducir circulaciones secundarias como por ejemplo la brisa mar-tierra o valle-montaña. Estas circulaciones están fuertemente influenciadas por el terreno. A pesar que se sabe de la existencia de esos fenómenos todavía no es evidente cuáles son los criterios más objetivos para hablar de un terreno complejo (y, por lo tanto, asegurarse que un modelo refleje bien sus características meteorológicas). Considerando que cualquier lugar en Chile cuenta o con el mar o la cordillera cerca se podría esperar que todo Chile se debe caracterizar como terreno complejo. Para testear esa hipótesis se hicieron algunos experimentos que se describen a continuación.

Terreno complejo

En un terreno plano se puede esperar -en primera aproximación y dentro de un área limitado de menos de cientos de kilómetros- condiciones meteorológicas homogéneas en la horizontal. En este caso, es razonable el uso de un modelo Gaussiano para describir la dispersión de un contamínate. Sin embargo, en un terreno del mismo tamaño pero con la presencia de unas montañas o un cuerpo de agua la aproximación de una meteorología homogénea no necesariamente es válida ya que se pueden producir perturbaciones meteorológicas locales tanto en términos de viento (velocidad y

dirección) como en la estructura vertical de la atmósfera. Dado que un modelo Gaussiano asume una meteorología homogénea sus resultados están asociados a errores en estas situaciones; mientras más montañas/cuerpos de agua más grandes deberían ser los errores. Bajo estas suposiciones y con el fin de tener criterios más objetivos para decir que un terreno es complejo o no diseñaron unos experimentos para cuantificar esos errores. El concepto de esos experimentos se describe a continuación.

En un área limitado arbitrario que contiene cuerpos de agua y montañas la atmósfera es muy heterogénea. Esa heterogeneidad se refleja por ejemplo en los vientos en superficie. La figura 5.1 muestra a modo de ejemplo un área con un terreno con las características mencionadas. Además, la figura muestra también el patrón de viento en superficie (se considera este campo en este momento como ficticio). Ese campo claramente es muy heterogéneo. Se considera ahora una estación meteorológica en esta área indicado por el punto rojo que cumple con el rol tanto de una estación en superficie como un sistema de sondeo vertical. Es decir esta estación produce toda la información meteorológica necesaria para el uso de un modelo Gaussiano. Tomando esta información, el modelo Gaussiano entonces consideraría una meteorología homogénea que, por ejemplo, se reflejaría en campos de vientos superficiales horizontalmente homogéneos tal como lo indica la figura 5.2.

En los experimentos realizados en este estudio se hicieron ahora ambos tipos de simulaciones, la dispersión tomando en cuenta toda la complejidad (o heterogeneidad) de la atmósfera y la dispersión según una atmósfera horizontalmente homogénea. Para ambos tipos de simulaciones se consideraron las mismas tasas de emisión (unitarias). De esta manera y comparando los resultados de una simulación con la otra el origen de las diferencias proviene exclusivamente de la diferencia de una atmósfera homogénea y la otra heterogénea. La figura 5.3 muestra a modo de ejemplo los resultados promedios de la simulación para el área que también se consideró en las figuras 5.1 y 5.2. El panel a la izquierda muestra las concentraciones promedias según la simulación de meteorología heterogénea (las concentraciones son normalizadas a la concentración promedia máxima lo que explica la escala de color de 0 a 1). El panel derecho muestra las concentraciones promedias según la simulación de meteorología homogénea. Las concentraciones en este caso son normalizadas a la concentración promedia máxima también de la simulación con meteorología heterogénea. De esta manera, se puede observar ya que tanto en magnitud como en la forma de dispersión hay diferencias importantes entre una y otra simulación.

La pregunta clave ahora es ¿cómo evaluar las diferencias entre una y otra simulación? En primer lugar e independiente de la métrica que se ocupa para evaluar esa diferencia, se tiene que definir cuál es el área que se considera para la evaluación. En los dos extremos del área considerada están el punto de máximo impacto, PMI, (un punto) y el área completa (todos los puntos de la grilla del modelo). Es evidente que el resultado puede ser muy distinto entre un extremo y otro. La figura 5.4 muestra niveles intermedios de esos extremos (se sigue con el ejemplo empleado en las figuras 5.1 – 5.3). Cada panel tiene un título distinto: C20, C10, C5, C2. A modo de ejemplo, C20 significa que se consideran aquellos puntos en que las concentraciones promedias son mayores que el 20% a las del PMI. En forma equivalente, C10 indica los puntos con concentraciones mayores del 10% de PMI, C5 mayores del 5% y C2 mayores del 2%. La figura 5.4 muestra claramente que el área de evaluación

aumenta bajando los umbrales de concentración. Bajo la hipótesis que en un terreno complejo la representatividad de la información de una estación meteorológica disminuye en función a la distancia de la misma, se puede esperar que a su vez aumenten los errores entre las simulaciones con meteorología heterogénea y homogénea mientras más grande es el área de evaluación. Finalmente, dado que no hay criterios generalizados sobre qué área se debería evaluar en lo que sigue se toman justamente los criterios según la figura 5.4 más el PMI en la evaluación de los experimentos.

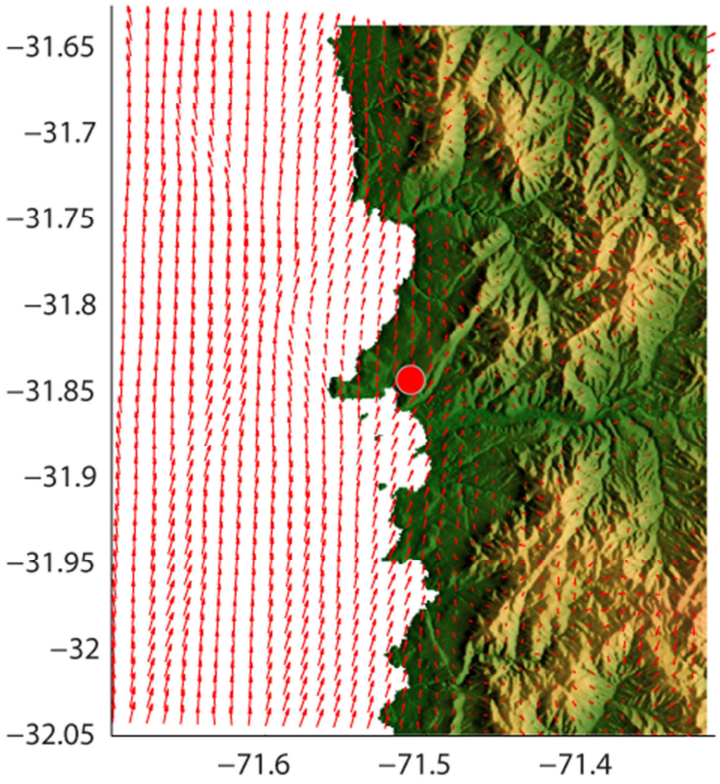

Figura 5.1: Ejemplo de un terreno complejo con vientos en superficie horizontalmente heterogéneos.

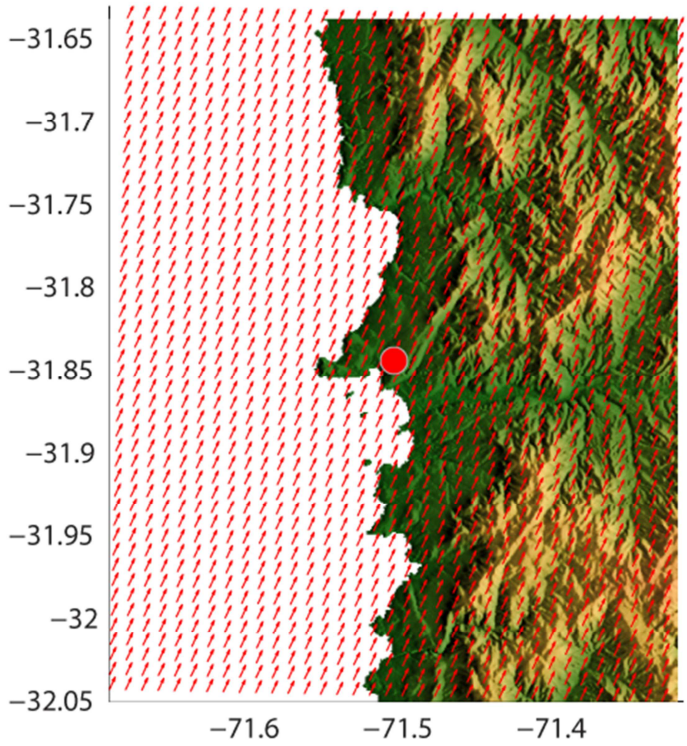

Figura 5.2: Ejemplo de un terreno complejo con vientos en superficie horizontalmente homogéneos.

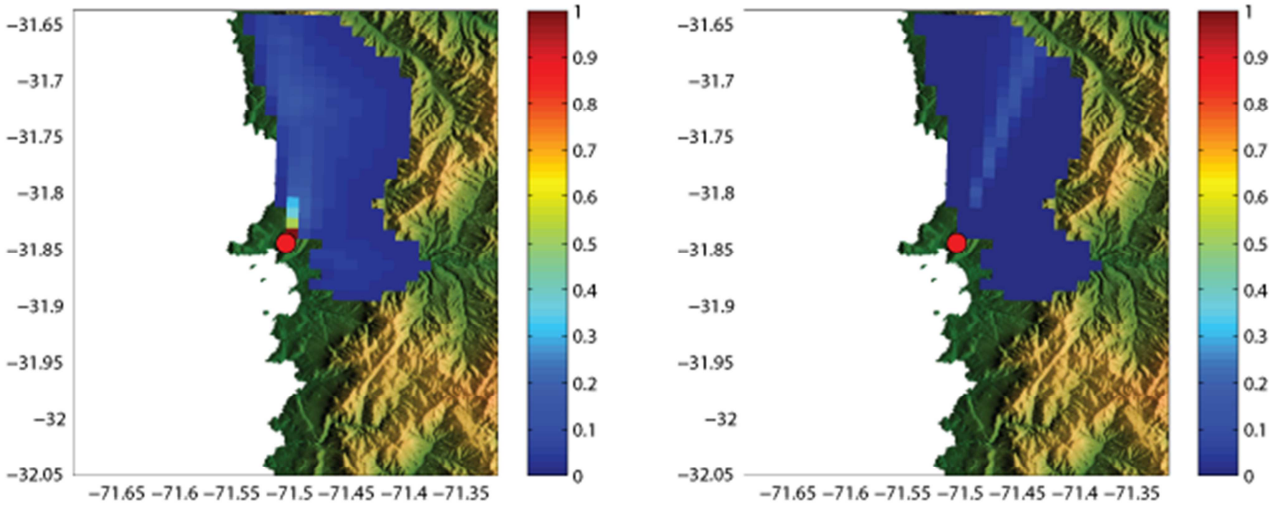

Figura 5.3: Campos de concentración ocupando una meteorología compleja (panel izquierdo) y una meteorología homogénea (panel derecho). En ambos casos se normalizaron las concentraciones con la concentración máxima del caso de la meteorología heterogénea.

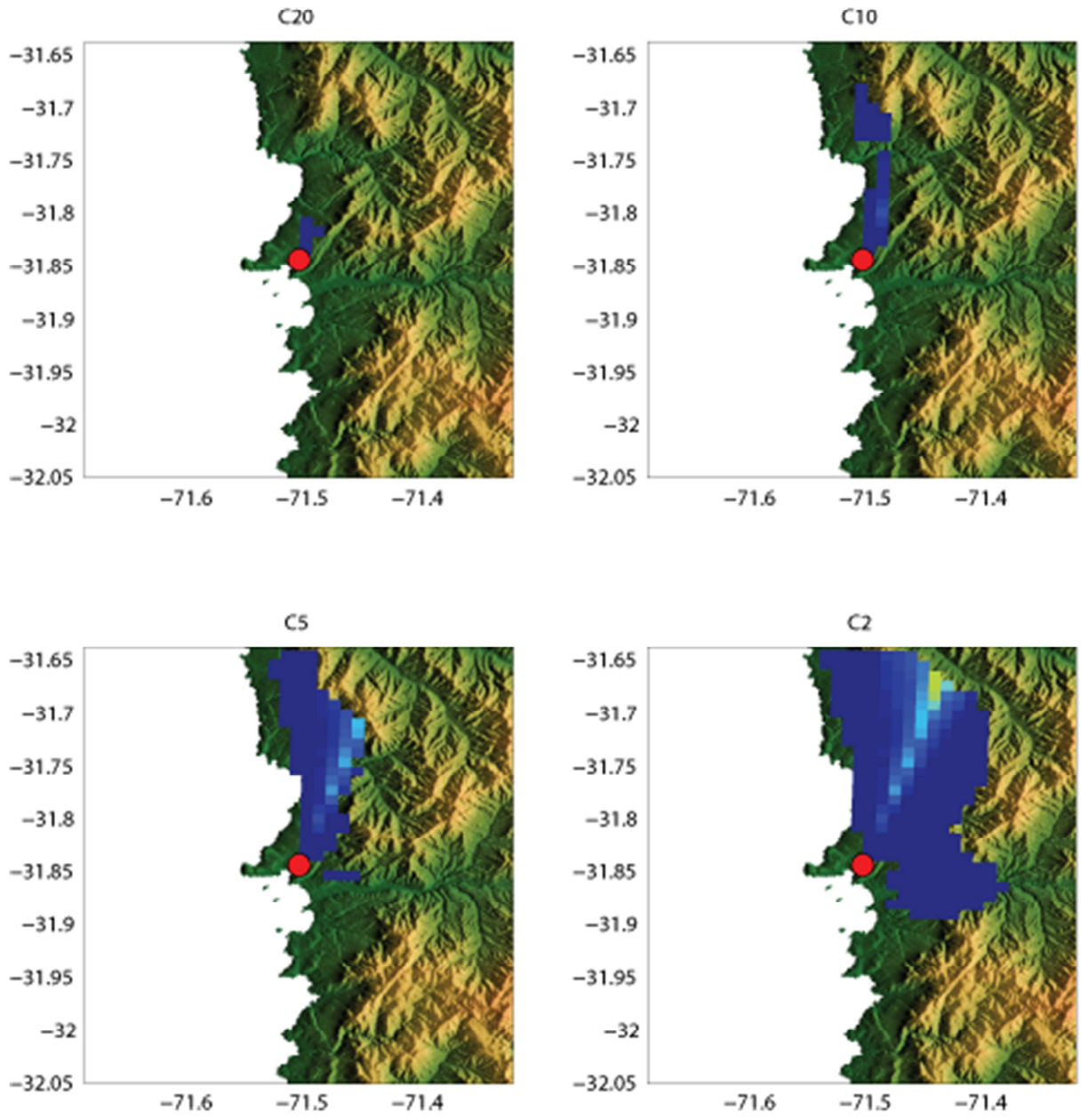

Figura 5.4: Ejemplo de las distintas áreas de evaluación según criterios C20, C10, C5 y C2, respectivamente.

Métricas de evaluación

Las métricas que se consideran en la evaluación son:

- La diferencia promedia entre las concentraciones con meteorología homogénea y heterogénea, normalizado por las concentraciones promedias con meteorología heterogénea. Esta métrica indica en unidades de porcentaje cuán grande es el error en promedio que se comete si no se considera la meteorología en toda su complejidad.
- El promedio de los percentiles 90 de las diferencias entre las concentraciones con meteorología homogénea y heterogénea, normalizado por las concentraciones con meteorología heterogénea. En este caso se calcula el percentil 90 de los errores en cada punto del área considerado y se toma el promedio de todos los percentiles 90 de esos puntos. Esta métrica refleja los mayores errores que se cometen a nivel horario.
- El promedio de los percentiles 10 de las diferencias entre las concentraciones con meteorología homogénea y heterogénea, normalizado por las concentraciones con meteorología heterogénea. En este caso se calcula el percentil 90 de los errores en cada punto del área considerado y se toma el promedio de todos los percentiles 10 de esos puntos. Esta métrica refleja los menores errores que se cometen a nivel horario y, de esta manera, indican de alguna manera el error base que se comete con la simplificación de una meteorología homogénea.

Datos usados

La información meteorológica usada en estos experimentos proviene de la base de datos del explorador eólico que fue desarrollado por parte del Departamento de Geofísica para el Ministerio de Energía (Falvey *et al.*, 2009[1]). En resumen, se trata de una gran base datos construida en base del modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). Los datos están disponibles a 1 km de resolución espacial Esa base de datos tiene en este momento una cobertura espacial desde el Norte del país hasta Chiloé con datos para los meses de enero, abril, junio y septiembre del año 2009. Todos los detalles y características, incluyendo las validaciones del modelo, se encuentran en el informe mencionado. En los experimentos realizados en este estudio se limitó a los datos para el mes de enero 2009.

Sistema de modelación

En los experimentos realizados se ha ocupado únicamente el sistema de modelación CALMET/CALPUFF alimentado por datos meteorológicos del modelo WRF. En el caso de meteorología homogénea se extrajeron datos de un punto (centro del domino del domino de simulación) tanto en

[1] Mark Falvey, Marcelo Ibarra, Martin Jacques, Ricardo Muñoz, Rainer Schmitz, René Garreaud, Alejandra Molina, 2009. Ámbitos de Investigación Necesarios para el Desarrollo Eólico en Chile Relacionados con el Comportamiento del Recurso Viento ,Informe Final, Comisión Nacional de Energía.

superficie como en altura representando una estación meteorológica y un radio sondeo “virtual”. Además, se consideró una topografía plana en el dominio lo que permite una representación homogénea de la meteorología en todo domino (ver también figura 5.2). En el caso de meteorología heterogénea, se ocuparon los datos tri-dimensionales de WRF para todo el domino. Se usaron datos SRTM para la orografía y MODIS para el uso del suelo. Análogo a los datos WRF, la resolución horizontal del modelo se fijó en 1 km y cada dominio tuvo un tamaño de 50 x 50 km. Para las simulaciones se consideraron dos fuentes puntuales en el centro de los dominios, cada una con emisiones unitarias, una ubicada a 20 metros, la segunda a 100 metros de altura. En ambos casos de los experimentos, se configuró el modelo según las recomendaciones del IWAQM (http://www.epa.gov/scram001/CALMET%20CLARIFICATION.pdf).

Dominios de modelación

Tal como se mencionó anteriormente, los experimentos tienen como objetivo definir terreno complejo y averiguar si el terreno nacional se puede tipificar como complejo. Para este fin, se deben hacer simulaciones a lo largo del territorio chileno. Sin embargo, por limitaciones de tiempo y computacionales, no se puede cubrir todo el terreno por completo (cada simulación con las características anteriormente mencionadas se demora unas tres horas en pre-procesamiento y aplicación de los modelos dentro de un sistema altamente automatizado). En este sentido, se tuvo que elegir algunas áreas específicas. Esta elección se fundamentó en la ubicación de las estaciones meteorológicas del BDOM (ver anexo 1). En primera instancia, se eligieron todas las estaciones meteorológicas de la BDOM. En un segundo paso, se puso una malla de 50 x 50 km sobre el territorio de Chile y se agruparon todas las estaciones que cabían dentro de la misma área. De esas estaciones se tomó el promedio de longitud y latitud que a su vez determinaron el punto central de cada dominio por modelar. La figura 5.5 indica todos esos puntos que se consideraron para las simulaciones. En caso que un dominio no cabían por entero dentro de un domino de la base de datos WRF no se descartó su uso para estos experimentos.

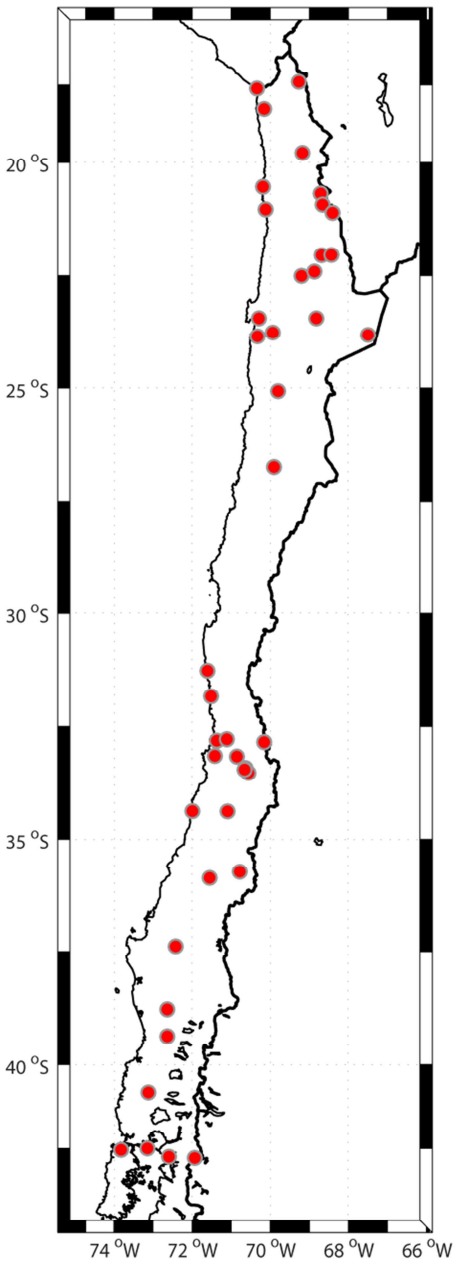

Figura 5.5: Puntos que se consideraron para las simulaciones. Alrededor de cada uno de los puntos se generaba un dominio de tamaño 50 x 50 km.

Resultados de los experimentos terreno complejo

En lo que sigue se entregan los resultados de los experimentos. Tal como se mencionó anteriormente, se consideraron dos fuentes fijas en cada dominio, una a 20 metros, la segunda a 100 metros de altura. Los siguientes análisis se hicieron para los dos casos por separado. Sin embargo, dado que los resultados en su esencia no son muy distintos se enfoca en lo que sigue sólo en aquellos resultados relacionados a la fuente de 100 metros de altura y se entregan todos los gráficos para la fuente a 20 metros de altura en el anexo 2.

Área considerada según criterio

Análogo a la figura 5.4, se aplicaron los criterios C20, C10, C5 y C2 en el análisis para cada dominio. Dado que la resolución horizontal del modelo es 1 km, cada punto de grilla es equivalente a 1 km^2 y, por lo tanto, el número de puntos de grilla que se consideran bajo los cuatro criterios es equivalente al área considerado en unidades de km^2. La figura 5.6 muestra como generalmente aumenta el área cuando se bajan los umbrales de concentración. Mientras para el criterio C20 en la mayoría de los casos son menos de 9 puntos que se consideran en la evaluación (equivalente a 9 km^2), en el caso de C2 son más de 100.

Diferencias en los PMI

La figura 5.7 muestra las diferencias promedias en los PMI para cada domino de simulación. En el panel izquierdo se evalúa el valor absoluto de la diferencia del máximo horario encontrado en la simulación, mientras el panel derecho evalúa la diferencia de los máximos de los promedios de las simulaciones. Cabe señalar que los PMI en caso de meteorología homogénea no necesariamente se encuentran en el mismo lugar que en el caso de meteorología heterogénea (en general coinciden las ubicaciones del PMI y sólo en casos aislados existen diferencias). Así que, el error que se indica en la figura 5.7 se calcula como diferencia absoluta entre la concentración promedia del PMI en meteorología homogénea y meteorología heterogénea normalizado por la concentración promedia del PMI en meteorología heterogénea. Es decir el ΔC indicado en la figura se expresa en porcentaje (se usa la misma definición de ΔC en todas las figuras que siguen; sólo el periodo de evaluación puede variar). También cabe indicar que los rangos elegidos son arbitrarios y se podrían cambiar si la contraparte técnica lo estima necesario. Generalmente, los PMI -en caso de sólo se considera la dispersión de contaminantes (sin reacciones químicas)- se encuentran relativamente cerca a la fuente; por lo tanto se esperaría que la aproximación de meteorología homogénea debería más válida que en los casos cuando se evalúan áreas más grandes. En este sentido, uno debería esperar diferencias relativamente menores en los casos de los PMI. Mientras en el caso de los valores mensuales efectivamente se dieron muchos casos con diferencias relativamente bajas, a nivel horario esos casos son más bien la excepción. En ambos casos, sin embargo también se muestran muchos puntos con diferencias mayores de 20%.

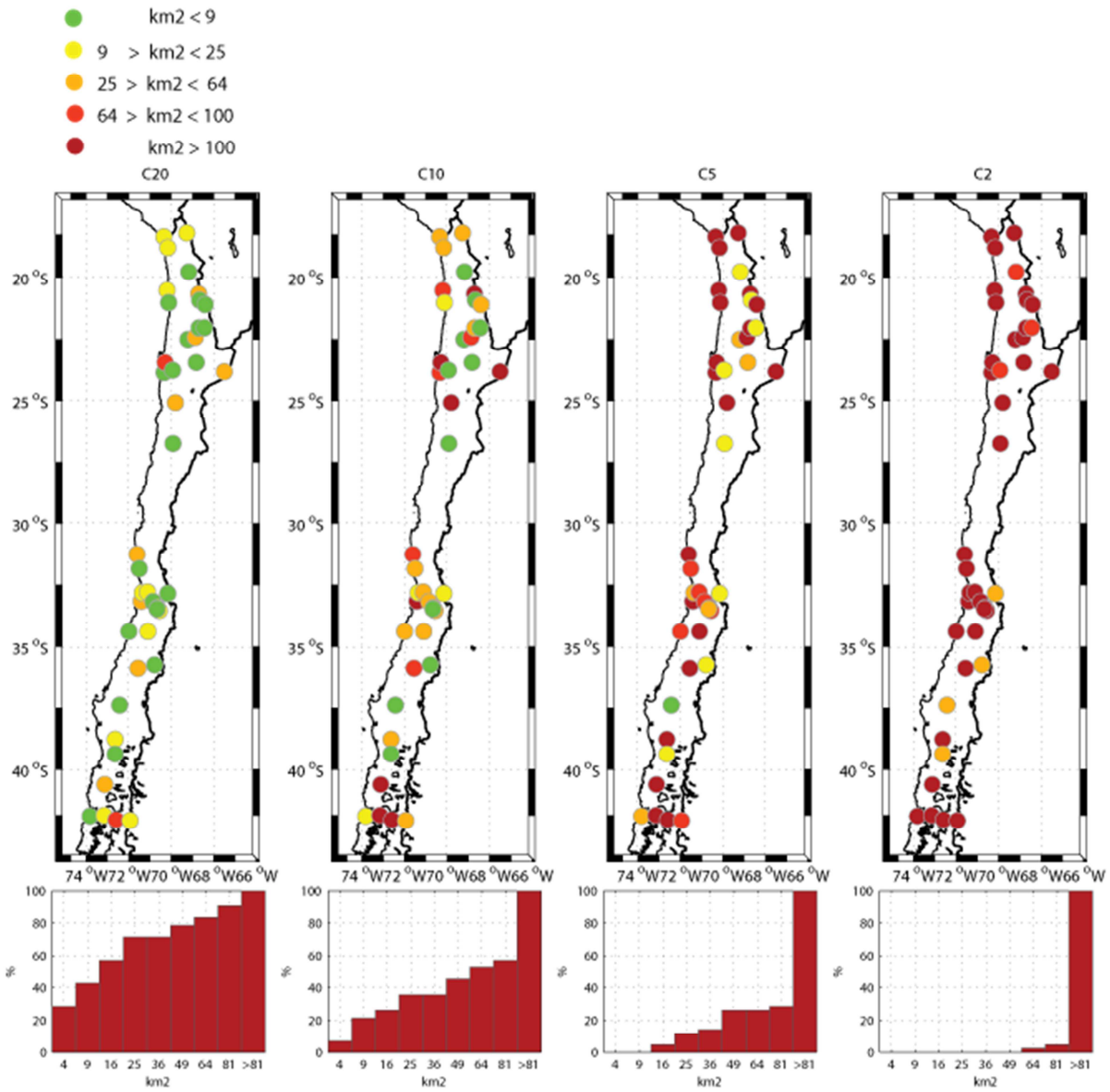

Figura 5.6: Extensión del área evaluada para cada dominio de simulación y criterio para el caso de una fuente fija de 100 metros de altura.

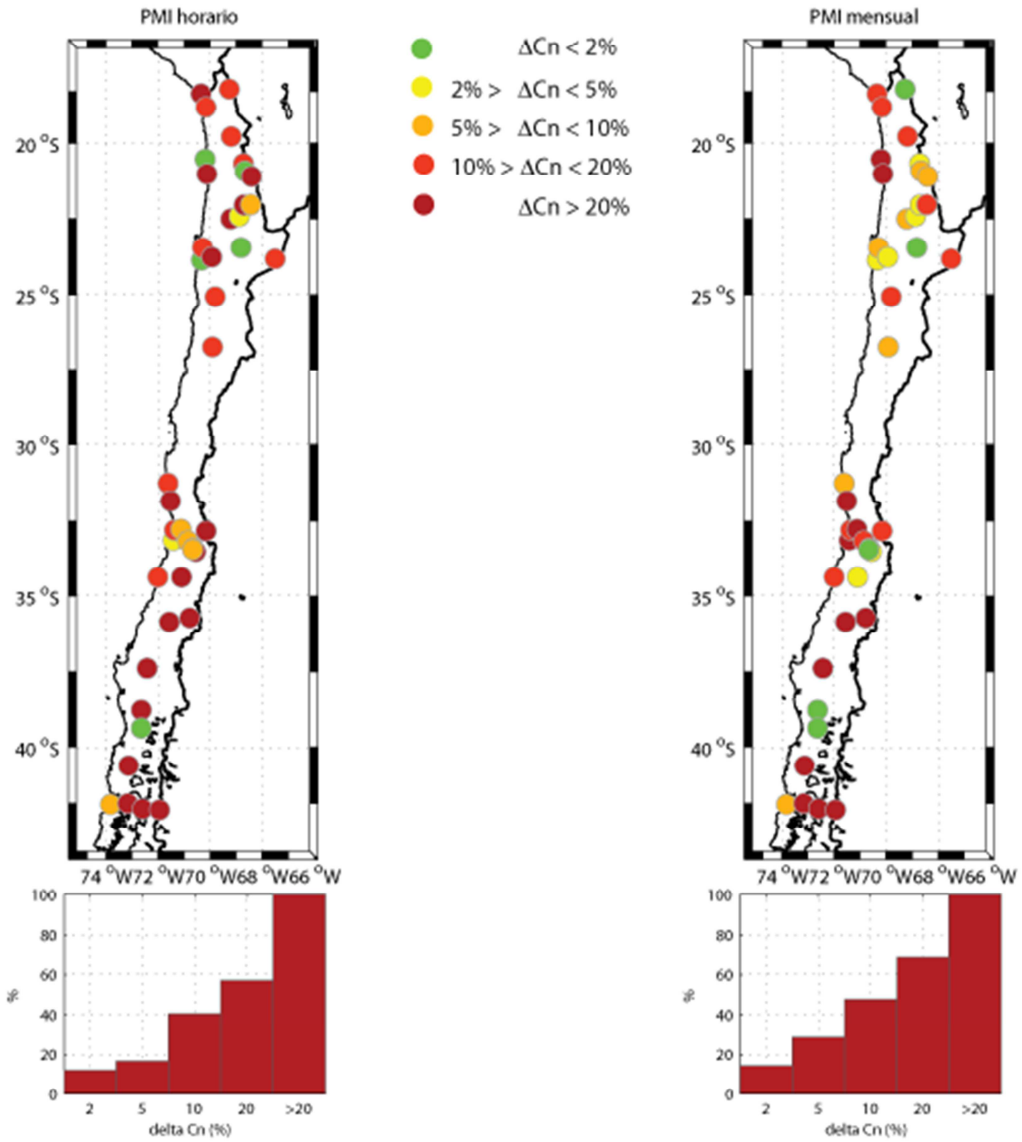

Figura 5.7: ΔC para los PMI según datos horarios (panel izquierdo) y promedios (panel derecho) para el caso de una fuente fija de 100 metros de altura.

Diferencias promedias

La figura 5.8 muestra las diferencias promedias para cada domino de simulación y según los criterios C20, C10, C5 y C2, respectivamente. Los colores representan los ΔC según los intervalos indicados en la figura. Dado que las áreas evaluadas son más grande que en caso de los PMI, obviamente también se esperan diferencias mayores lo que se refleja en los intervalos mayores. En este caso, se puede ver que en ningún caso existen diferencias menores de 5%. En el caso de C20 la mayoría de los dominios muestra diferencias entre 10 y 20% y 20 y 30% con algunos pocos casos con diferencias mayores de 30%. Siguiendo con los otros criterios, se puede observar que las diferencias aumentan rápidamente y, en el caso C2 las diferencias superan casi en la totalidad de los casos los 40%.

Percentiles 90 de las diferencias

Tal como se indicó anteriormente, el percentil 90 pone énfasis en las diferencias grandes. La figura 5.9 muestra el promedio de los percentiles 90 para cada dominio y cada criterio. Dado que se trata de diferencias mayores, también se eligieron valores mayores para los intervalos. Tal como se pudo observar, las diferencias aumentan aumentando el área evaluada. Aún así y en al caso C20, las diferencias en su mayoría son mayores de 40%, aumentando rápidamente a mayores de 50% cuando se consideran los otros casos.

Percentiles 10 de las diferencias

La figura 5.10 finalmente muestra el promedio de los percentiles 10 para cada dominio y cada criterio. En este caso se considera el 10% de las diferencias menores en todos los datos. Aún así y en el caso más favorable de C20, las diferencias se encuentran entre 5 y 20% (con pocos casos con diferencias menores o mayores). Nuevamente, esos valores aumentan cuando se aumenta el área de evaluación. En el caso C2, la mayoría de las diferencias es mayor de 20%.

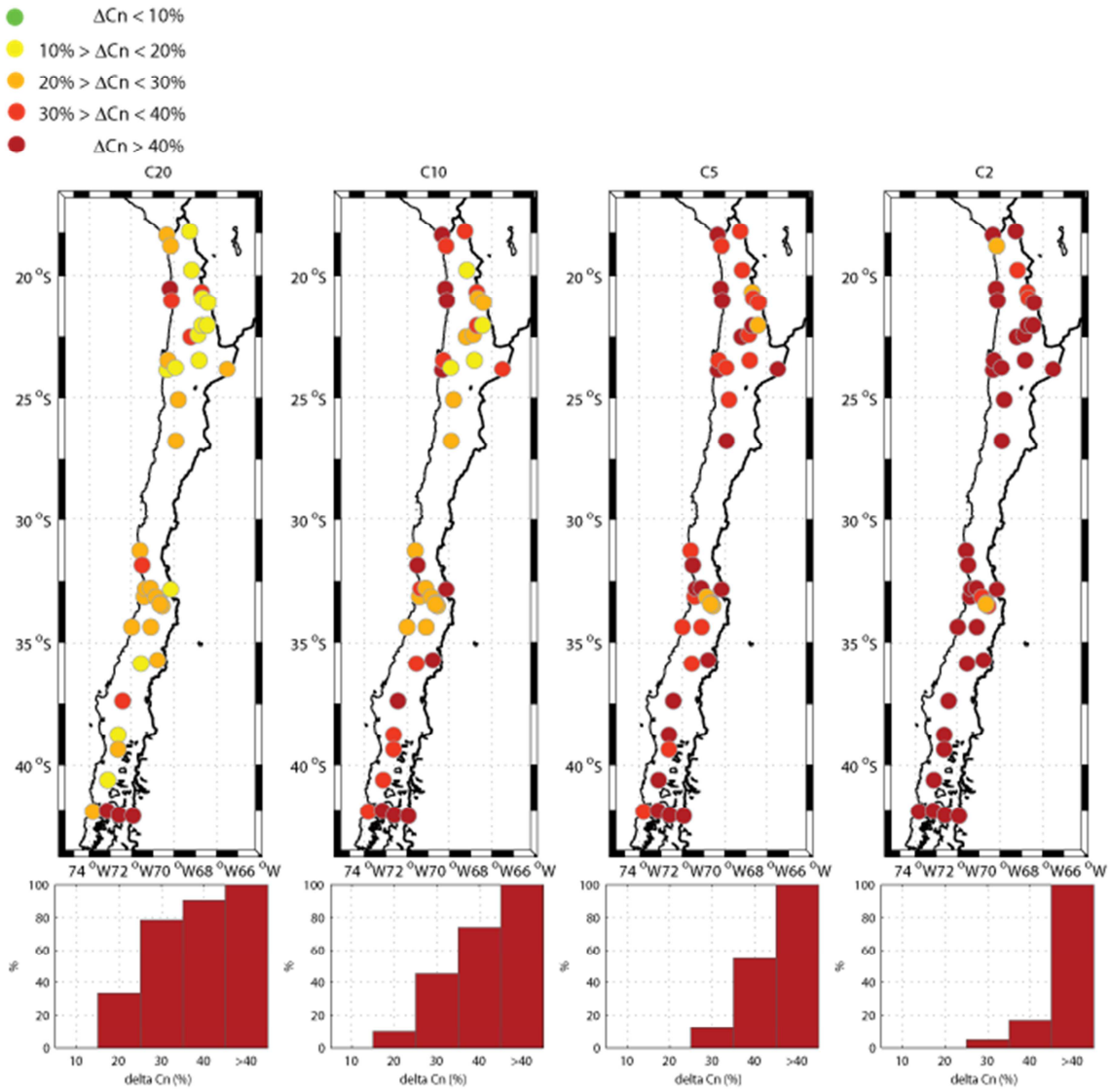

Figura 5.8: Diferencias promedias entre meteorología homogénea y heterogénea para cada dominio de simulación y criterio para el caso de una fuente fija de 100 metros de altura.

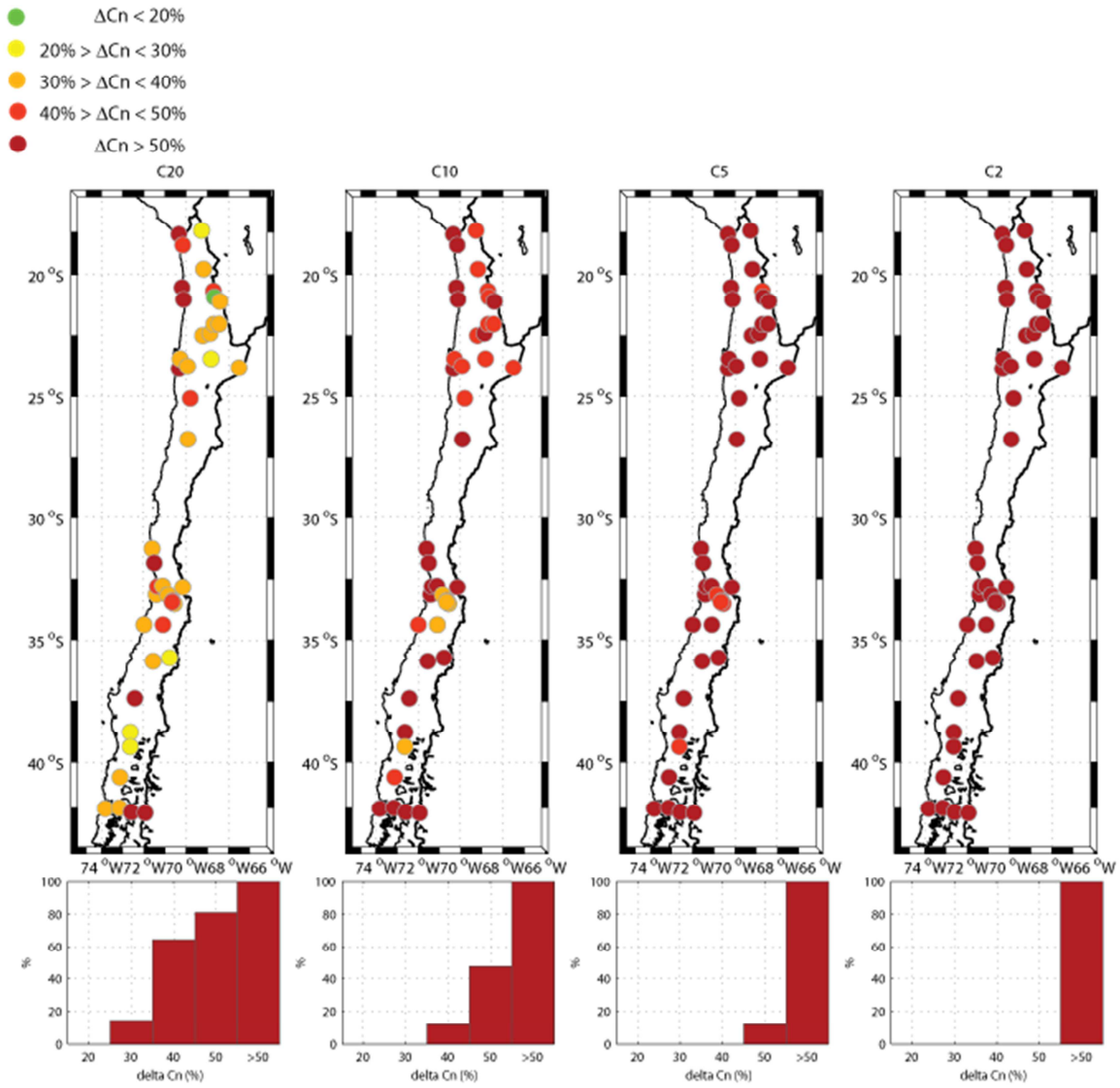

Figura 5.9: Percentil 90 Diferencias entre meteorología homogénea y heterogénea para cada dominio de simulación y criterio para el caso de una fuente fija de 100 metros de altura.

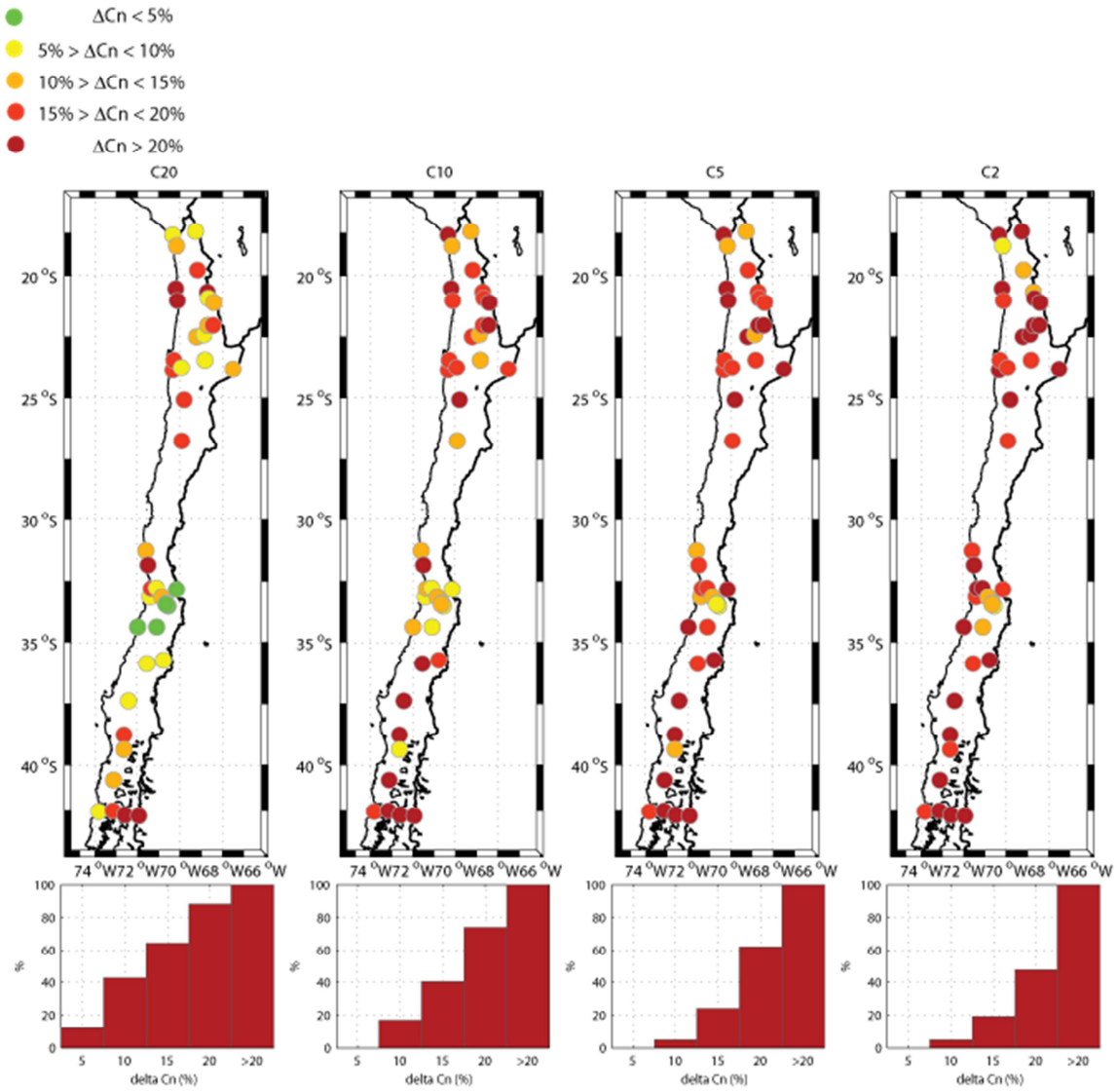

Figura 5.10: Percentil 10 Diferencias entre meteorología homogénea y heterogénea para cada dominio de simulación y criterio para el caso de una fuente fija de 100 metros de altura.

Conclusiones de los experimentos de terreno complejo

El objetivo de los experimentos realizados apuntaba, en primer lugar, a generar una base técnica para definir si el terreno chileno se puede caracterizar generalmente como “complejo”. La hipótesis en este sentido fue que en un terreno complejo se genera una meteorología heterogénea y que esta heterogeneidad se refleja en una dispersión de contaminantes distinta a aquella dentro de un terreno plano con meteorología homogénea. A pesar que las simulaciones obviamente sólo representan una muestra limitada del territorio nacional, los resultados indican a través de distintas métricas una diferencia importante entre las simulaciones con meteorología heterogénea y homogénea. Dado que para ambos caso se usó el mismo sistema de modelación, las diferencias se pueden atribuir exclusivamente a las características meteorológicas. También cabe mencionar, que a pesar que estos experimentos entregan resultados cuantitativos el criterio para definir un terreno como “complejo” siguen siendo subjetivos. Basado en los resultados entregados y a juicio del consultor, sin embargo, no cabe duda que el territorio chileno en su totalidad se debería considerar como terreno complejo.

En términos prácticos, estos resultados también muestran la gran limitación de los modelos Gaussianos. Aún en el caso que estuviera disponible información meteorológica observacional en superficie y en altura en el sitio de interés, esta información pierde rápidamente representatividad alejándose de ese punto de medición.

6 Aplicación del sistema de modelación CALMET/CALPUFF

En la sección 6 se pudieron mostrar las diferencias que se obtienen cuando se aplica un modelo que no considera las características de un terreno complejo y aquel que considera esas características en forma completa. Sin embargo, tal como se mostró en la sección 3 de este informe, en la práctica y con fines de evaluación de impacto ambiental se ocupa el sistema de modelación CALMET/CALPUFF con la información de una sola estación meteorológica y un radio sondeo. Sin embargo, se supone que en todos casos se consideró la complejidad topográfica. CALMET permite ese uso y crea campos meteorológicos tri-dimensionales a través de algunos ajustes según la situación meteorológica y topográfica. La figura 5.11 muestra a modo de ejemplo el efecto de esos ajustes. El panel izquierdo de la figura es equivalente a la figura 5.1, el panel derecho considera la misma información de entrada de la figura 5.2 pero, en este caso, modificado por CALMET considerando la topografía compleja del dominio.

Con fines de evaluar la validez de ese uso dentro del contexto de la complejidad geográfica en Chile se repitieron todas las simulaciones de la sección 6, reemplazando la meteorología homogénea a una meteorología inicialmente homogénea (proveniente de una sola estación virtual en superficie y un sólo perfil meteorológico vertical) modificado, en este caso por CALMET. En este sentido, la figura 5.6 también se aplica para este caso y las figuras 5.12 – 5.15 son equivalentes a las figuras 5.7 – 5.10, respectivamente.

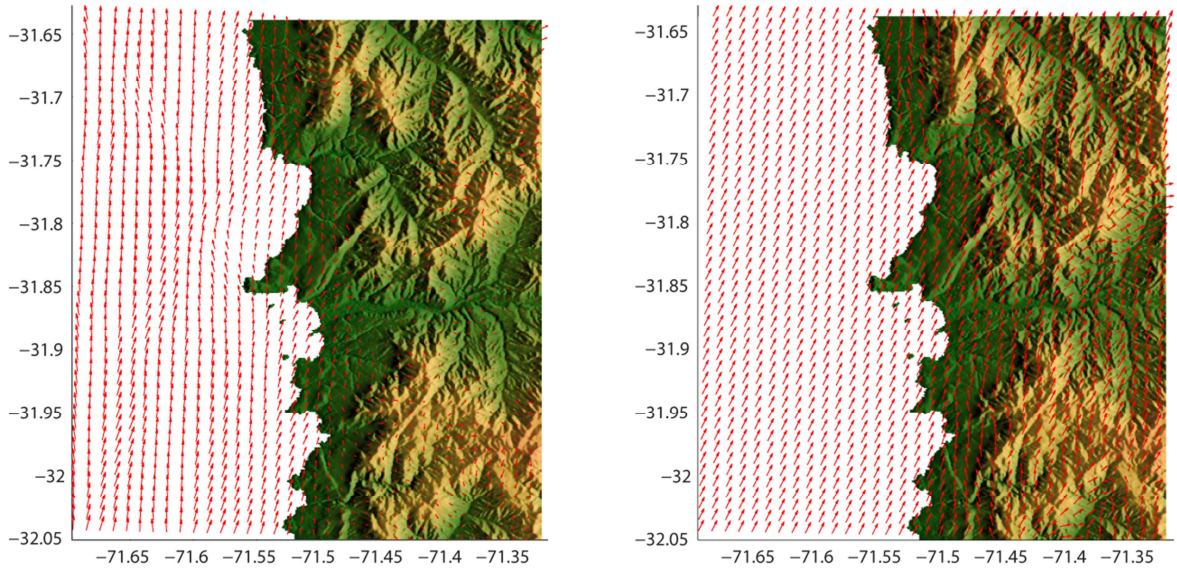

Figura 5.11: Ejemplo de un terreno complejo con vientos en superficie horizontalmente heterogéneos. El panel es equivalente a la figura 5.1. En el panel derecho se ocupó la misma información meteorológica como para la figura 5.2, pero en este caso ésta fue modificada por el modelo CALMET.

Tal como en el caso de los experimento, también en este caso se consideraron dos fuentes puntuales en el centro de cada dominio, una a 100 metros de altura, la segunda a 20 metros. Las figuras 5.12- 5.15 sólo entregan los resultados para la evaluación de la fuente en 100 metros de altura.

Generalmente, las tendencias de los resultados en estos experimentos y reflejados en las figuras 5.12 – 5.15 siguen las mismas tendencias que aquellos descritos en la sección 6. Se pueden observar algunas mejoras en este caso, sin embargo, las diferencias comparadas con las simulaciones que toman en cuenta toda la complejidad meteorológica todavía son muy grandes. En este sentido, las mejoras observadas tienen que ser consideradas marginales.

Conclusión de las simulaciones con meteorología modificada por CALMET

El objetivo de esta actividad fue evaluar la validez de ocupar la información de una sola estación meteorológica y un radio sondeo modificada por CALMET para representar la complejidad de la meteorología en el contexto de la realidad chilena. Se considera que el impacto del ajuste por parte de CALMET como marginal y, por lo tanto, los resultados obtenidos a través de esa metodología no se pueden considerar muy superiores a aquellos obtenidos por un modelo Gaussiano que, además usa terreno plano.

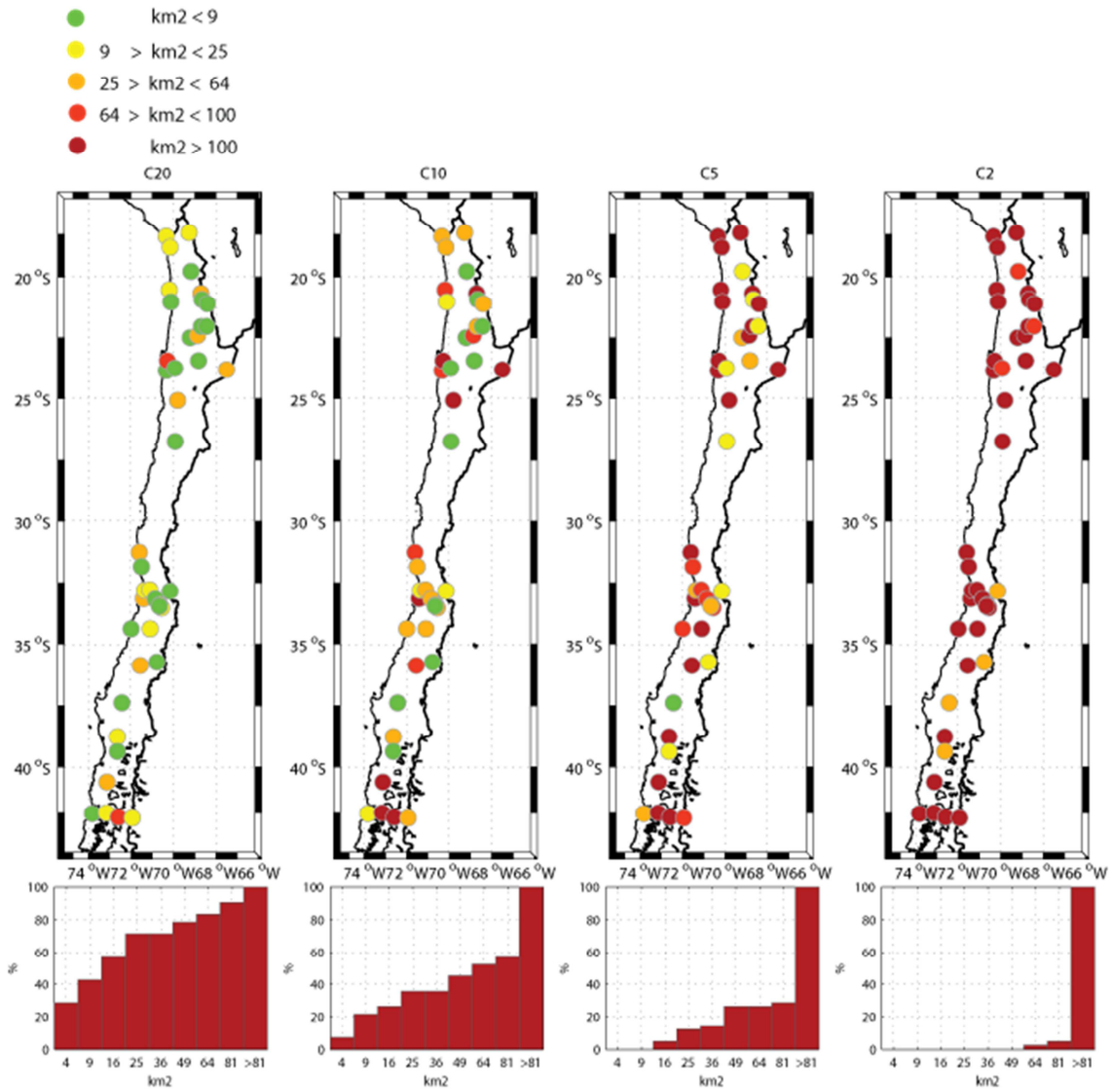

Figura 5.12: Equivalente a la figura 5.7, pero con meteorología inicialmente homogénea (proveniente de una sola estación virtual en superficie y un sólo perfil meteorológico vertical) y modificado por CALMET.

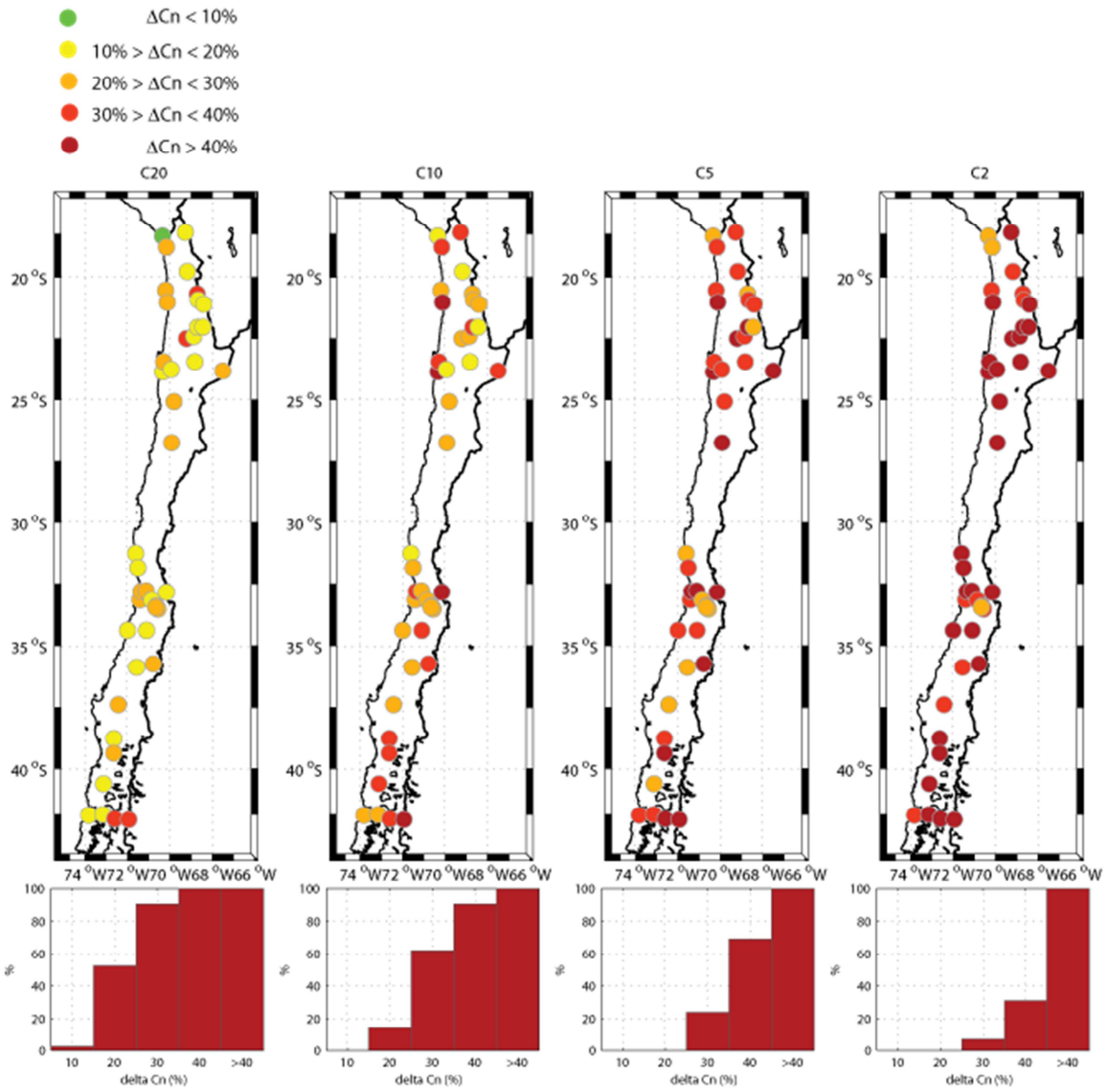

Figura 5.13: Equivalente a la figura 5.8, pero con meteorología inicialmente homogénea (proveniente de una sola estación virtual en superficie y un sólo perfil meteorológico vertical) y modificado por CALMET.

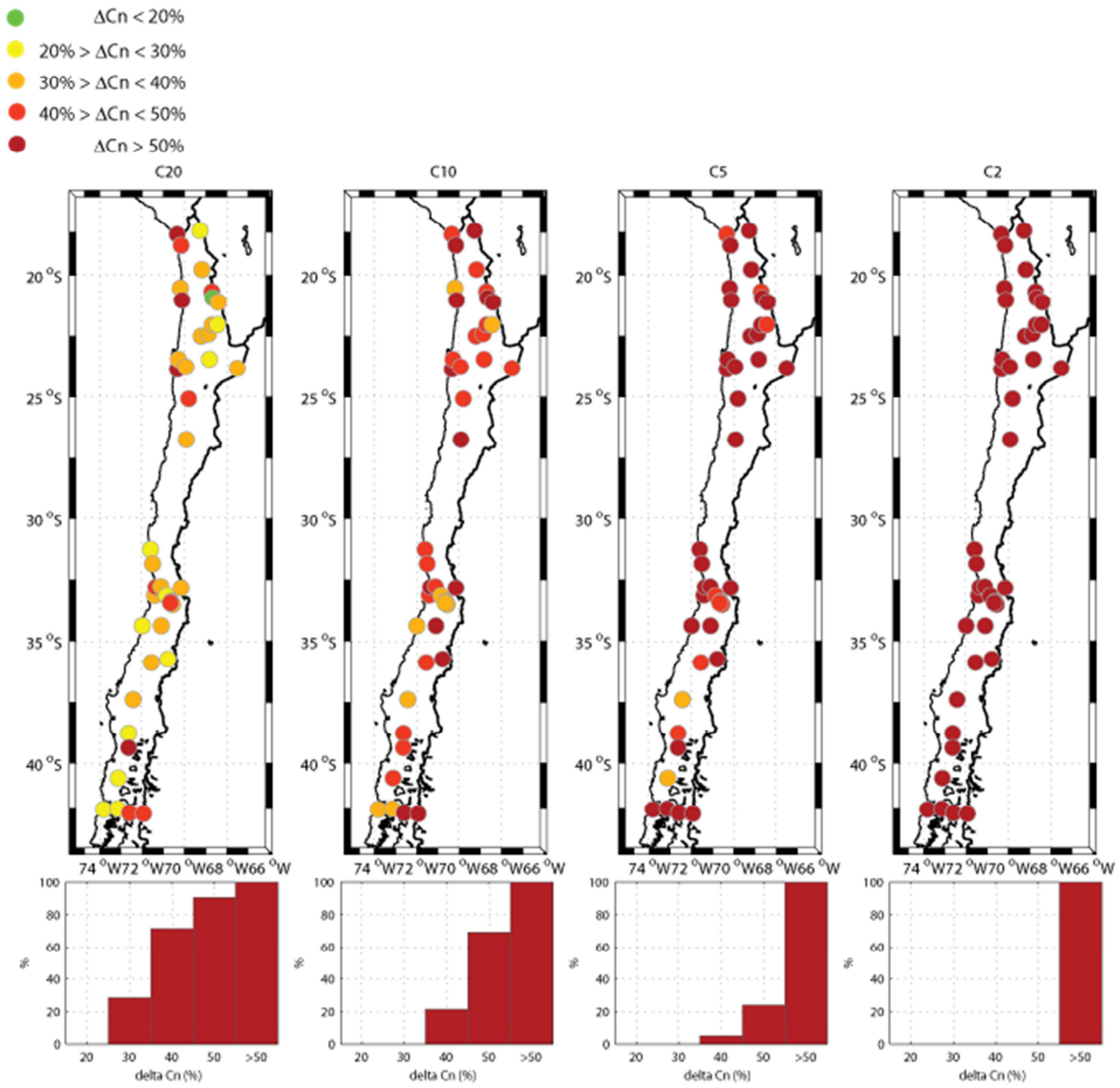

Figura 5.14: Equivalente a la figura 5.9, pero con meteorología inicialmente homogénea (proveniente de una sola estación virtual en superficie y un sólo perfil meteorológico vertical) y modificado por CALMET.

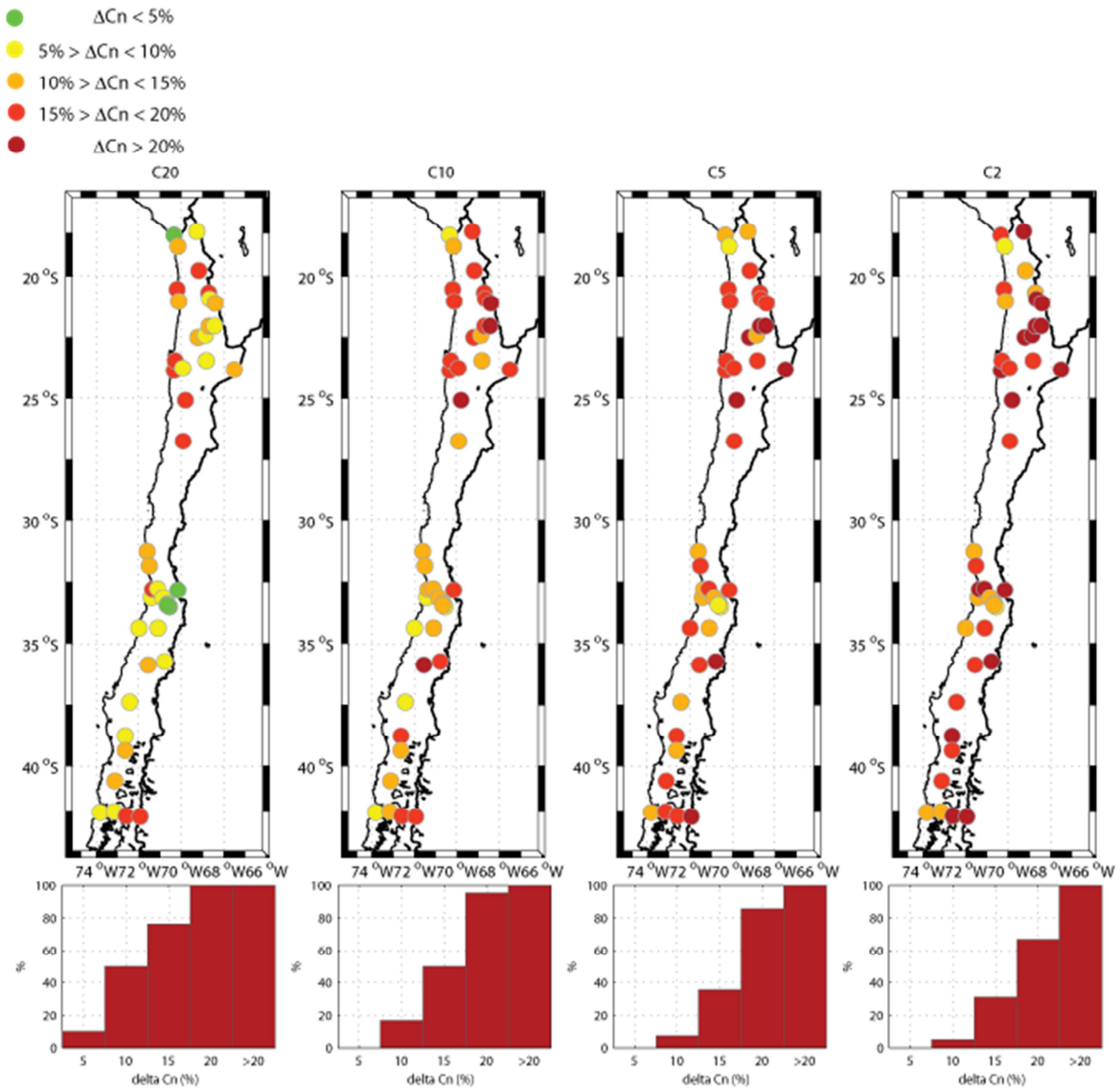

Figura 5.15: Equivalente a la figura 5.10, pero con meteorología inicialmente homogénea (proveniente de una sola estación virtual en superficie y un sólo perfil meteorológico vertical) y modificado por CALMET.

7 Comparación de la estructura vertical de la tropósfera baja entre costa y valle

En buena parte de las aplicaciones de modelos meteorológicos de diagnóstico con fines de evaluación de impacto ambiental se define la estructura vertical de la atmósfera (perfiles verticales de temperatura y viento en los primeros cientos de metros sobre el suelo) a partir de datos del radiosondeo operacional más cercano y se asume que la estructura vertical es horizontalmente uniforme. El propósito de esta sección es evaluar esta metodología para condiciones de terreno complejo. Dada la escasez de datos meteorológicos de altura en el país, el alcance de esta evaluación es necesariamente limitado, y será realizada utilizando dos bases de datos de altura disponibles para el consultor, según se describe en la siguiente sección.

Metodología y bases de datos

Se comparará la estructura vertical de la tropósfera baja determinada a partir de observaciones en dos puntos relativamente cercanos, uno correspondiente a la estación de radiosondeo de Santo Domingo, y el otro determinado en el valle de Santiago. De esta forma se espera ilustrar las diferencias de estructura vertical que podrían encontrarse en un valle central, respecto de la zona costera cercana. Dado que la mayor parte de las estaciones de radiosondeo del país son costeras, mientras que una fracción importante de los desarrollos productivos ocurre en valles centrales, este ejercicio tiene interés más allá de las dos zonas específicas consideradas. La comparación abarcará tanto la estructura promedio, como la variación estacional y sinóptica, y comprende por ahora sólo los perfiles de temperatura, aunque puede extenderse también a los perfiles de estabilidad y viento.

Los datos de Santo Domingo corresponden a radiosondeos operacionales de la Dirección Meteorológica de Chile, disponibles desde mediados de 1999 al presente en forma bi-diaria (00 UTC y 12 UTC). Esta base de datos se genera mediante procedimientos estándares para la obtención de información meteorológica de altura. En cuanto a cantidad de datos, esta base de datos es relativamente completa. En cuanto a calidad, si bien los datos básicos son en general de muy buena calidad, la base de información más común (www.wyo.edu) presenta en algunos casos datos erróneos, según se indica más adelante.

Los datos de altura sobre el valle de Santiago corresponden a datos AMDAR[2] registrados y reportados por algunos aviones comerciales que llegan o salen desde el Aeropuerto de Pudahuel. Este tipo de datos meteorológicos es ampliamente utilizado por centros meteorológicos mundiales en la inicialización de modelos numéricos de pronóstico del tiempo (Moninger *et al.*, 2003). En el caso de Santiago, son todavía pocos los aviones que cuentan con los sistemas necesarios para la medición y reporte de esta información, por lo que, en comparación con los radiosondeos, esta base de datos es el factor limitante del presente análisis.

La figura 7.1a ilustra la disponibilidad de datos AMDAR para Santiago. Se cuenta con datos entre los años 2003 y 2011, aunque con gran variabilidad en cuanto a frecuencia anual y horaria (las horas de estos datos dependen de los horarios de despegue y aterrizaje de los respectivos aviones comerciales).

[2] AMDAR: Aircraft Meteorological Data Reports

La comparación se realiza seleccionando los perfiles AMDAR más próximos a las horas 00 UTC y 12 UTC de los radiosondeos (menos de 3 horas de diferencia). Adicionalmente, se inspeccionaron visualmente todos los correspondientes perfiles de temperatura de los radiosondeos y se eliminaron del análisis 13 casos en que los datos son claramente erróneos. Después de estos filtros, los perfiles AMDAR que se comparan con los correspondientes radiosondeos de 00 UTC y 12 UTC se describen en la tabla 7.1, la figura 7.1b muestra la cantidad de casos disponibles para cada mes del año. Se debe tener presente que algunos promedios mensuales, especialmente de la hora 00 UTC, se realizan sobre un número muy restringido de casos.

	00 UTC	12 UTC
Número de perfiles	182	519
Hora UTC de perfiles AMDAR (*)	1.2 ; 0.7	13.8 ; 0.5
Número de datos bajo 800 hPa(*)	19 ; 3	10 ; 2
Años de la mayoría de los datos	2007 - 2011	2003 - 2005

(*) se indica: promedio; desviación estándar

Tabla 7.1: Perfiles AMDAR a comparar con radiosondeos (2003-Jun/2011)

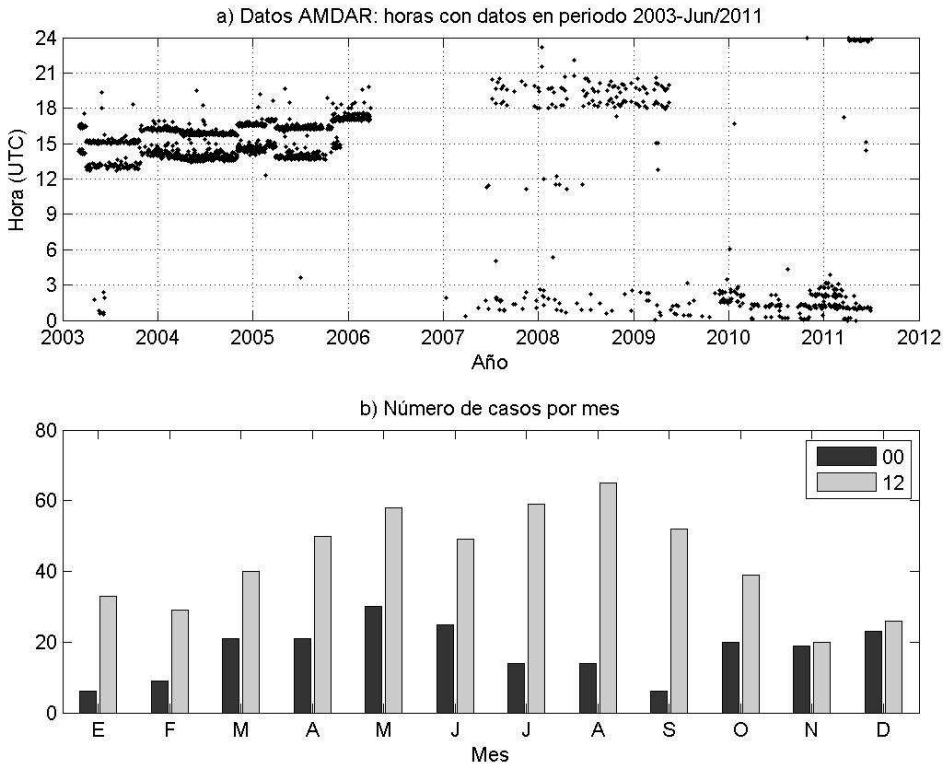

Figura 7.1: a) Horas con datos AMDAR disponibles en periodo 2003-2011. b) Número de casos por mes disponibles para comparación de horas 00 y 12 UTC.

Resultados: perfiles de temperatura

Perfiles promedios

La figura 7.2a muestra los perfiles verticales promedios de temperatura obtenidos para los dos lugares y las dos horas consideradas. Si bien en altura los perfiles tienden a converger, bajo los 2000 msnm se aprecia un aumento de la diferencia entre los perfiles costeros y sobre el valle. La figura 7.2b muestra la variabilidad de la temperatura. Sobre los 1000 msnm la variabilidad de todos los casos es similar. Bajo los 1000 msnm, los perfiles costeros muestran un marcado descenso en la variabilidad de la temperatura, presumiblemente asociado a la mayor estabilidad térmica de la capa límite marina. La variabilidad de la temperatura en el valle, en cambio, no disminuye notoriamente al acercarse a la superficie.

Variación estacional

La figura 7.3 muestra los ciclos anuales de los perfiles de temperatura obtenidos en ambos puntos, así como su diferencia. Debe notarse que estos ciclos anuales son obtenidos sólo en base a los casos de la tabla 7.1, por lo que en ningún caso pueden considerarse como promedios climatológicos. El aspecto general de la variación estacional de la temperatura es similar en ambos puntos. La diferencia entre la variación estacional en ambos lugares mostrada en los paneles inferiores de la Figura 7.3 muestra que las mayores discrepancias se dan en la zona entre 500 y 1000 msnm, especialmente en los sondeos de las 12 UTC (~ 08 HL; al final de la noche). En este caso, durante invierno las temperaturas cerca de la superficie de Santiago son en promedio hasta 3 ^{o}C más frías que las de Santo Domingo al mismo nivel. En verano, en cambio, la diferencia se revierte, y en la superficie de Santiago la temperatura promedio puede ser hasta 7 ^{o}C superior a la de Santo Domingo al mismo nivel.

Variabilidad sinóptica

La figura 7.4 ilustra la relación entre la variabilidad sinóptica de las temperaturas medidas sobre el valle y sobre la costa. Para esto se calculó la correlación entre las temperaturas de cada nivel, descontándoles en cada caso el correspondiente promedio mensual de temperaturas. Se aprecia que sobre los 1000 msnm la variabilidad de los sondeos realizados sobre la costa está altamente correlacionada con los sondeos sobre Santiago. Entre 500 y 1000 msnm, en cambio, la correlación entre los dos lugares disminuye, especialmente en el sondeo de las 12 UTC correspondiente al final de la noche.

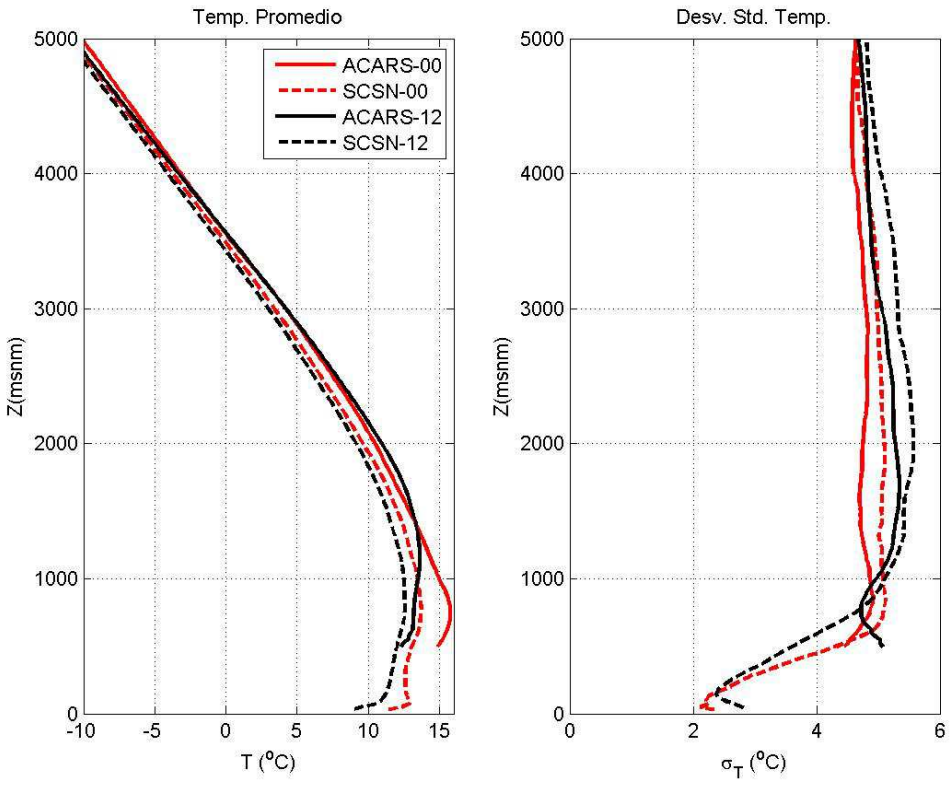

Figura 7.2: a) Perfiles de temperatura promedios para radiosondeos y datos AMDAR. b) perfiles de desviación estándar de temperatura.

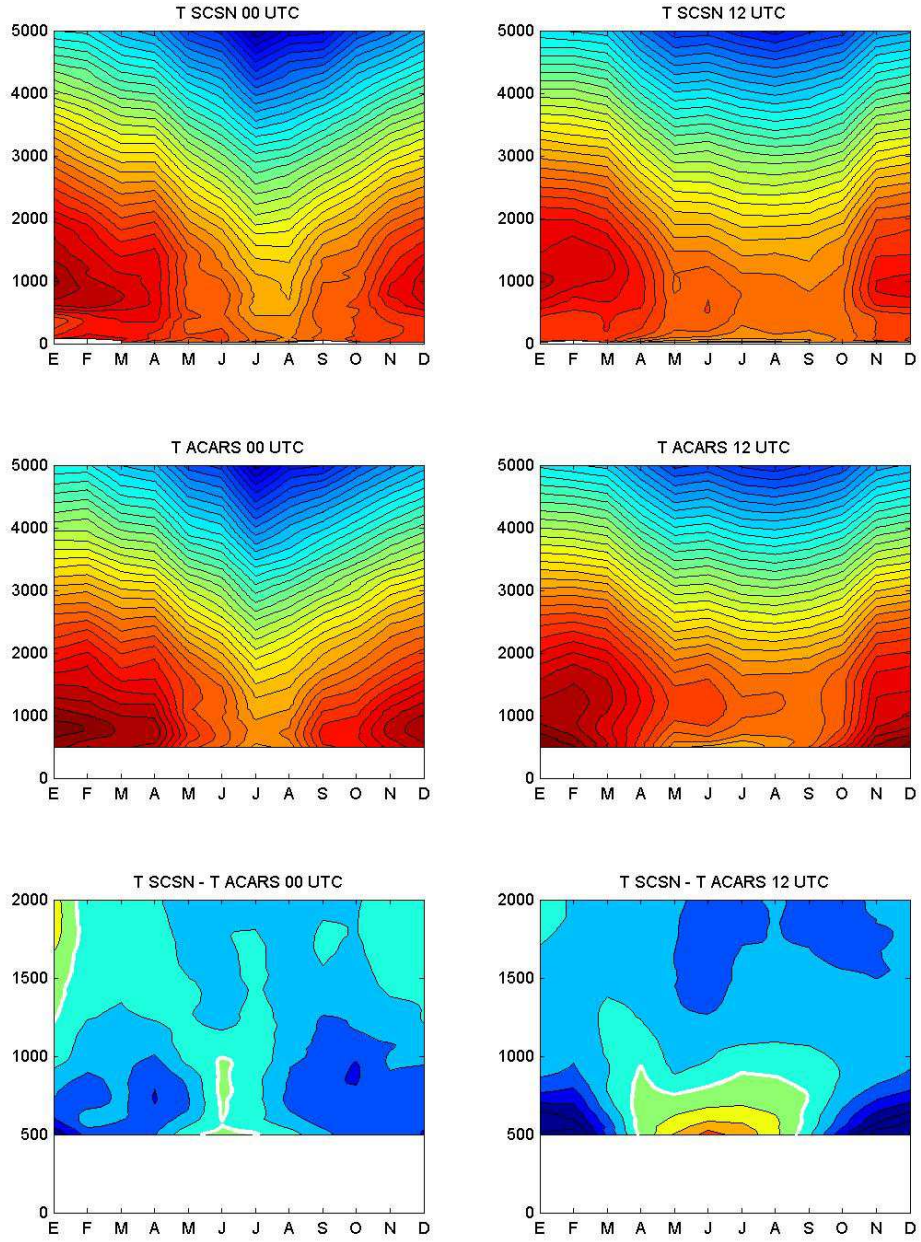

Figura 7.3: Variación estacional de temperatura según radiosondeos y datos AMDAR, y sus diferencias.

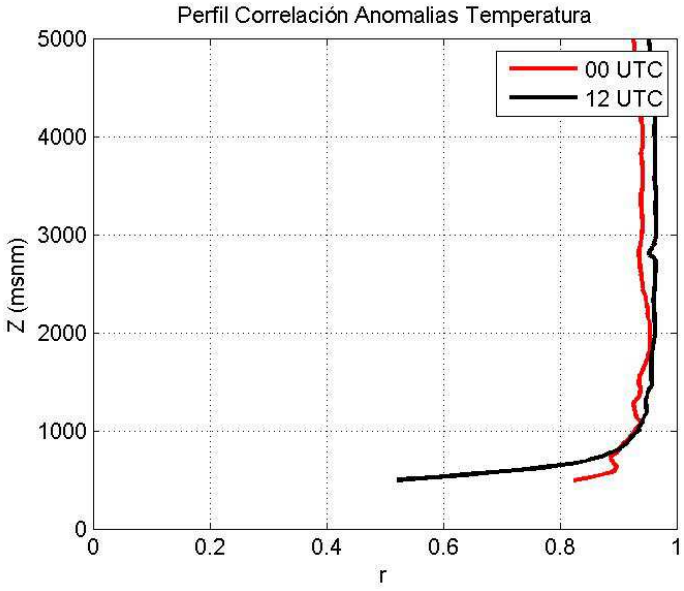

Figura 7.4: Correlación entre anomalías de temperatura respecto de promedios mensuales para temperaturas medidas con radiosondeos de Santo Domingo y datos AMDAR sobre Santiago.

Resultados: perfiles de viento

Perfiles promedios y variación estacional de la velocidad de viento

La Figura 7.5 muestra los perfiles medios de velocidad y de las componentes del viento obtenidas a partir de los radiosondeos de Santo Domingo y de datos AMDAR.Sobre los 4000 m todos los perfiles medios tienden a converger. Entre 2000 y 4000 m la mayor diferencia se observa en la componente meridional promedio, que sobre el valle de Santiago muestra una componente del norte más acentuada en comparación con los perfiles costeros. Esto es probablemente debido al efecto de bloqueo de la Cordillera de los Andes, que tendría un efecto mayor sobre Santiago. Entre 500 y 2000 m, la diferencia más notable se observa en las velocidades, que en el valle de Santiago presentan valores medios cercanos a la mitad de los observados al mismo nivel en los perfiles costeros. Esto es probablemente debido al efecto de encierro asociado a la topografía que enmarca al valle de Santiago.

La variación estacional de los perfiles verticales medios de velocidad del viento se muestran en la Figura 7.6. La intensificación del viento en altura en los meses de invierno es un rasgo que ambos conjuntos de datos muestran claramente. Los paneles inferiores de la Figura 7.6 muestran las diferencias de los promedios de velocidad para cada mes. Nuevamente se aprecia aquí la tendencia de los vientos sobre el valle a ser menores a los de la costa al mismo nivel, entre las alturas de 500 y 1500m, sin variación estacional muy significativa. Entre 2000 y 4000m, en cambio, el efecto de bloqueo parece incrementar el promedio de la velocidad del viento cercano a la cordillera, en comparación con el perfil más costero.

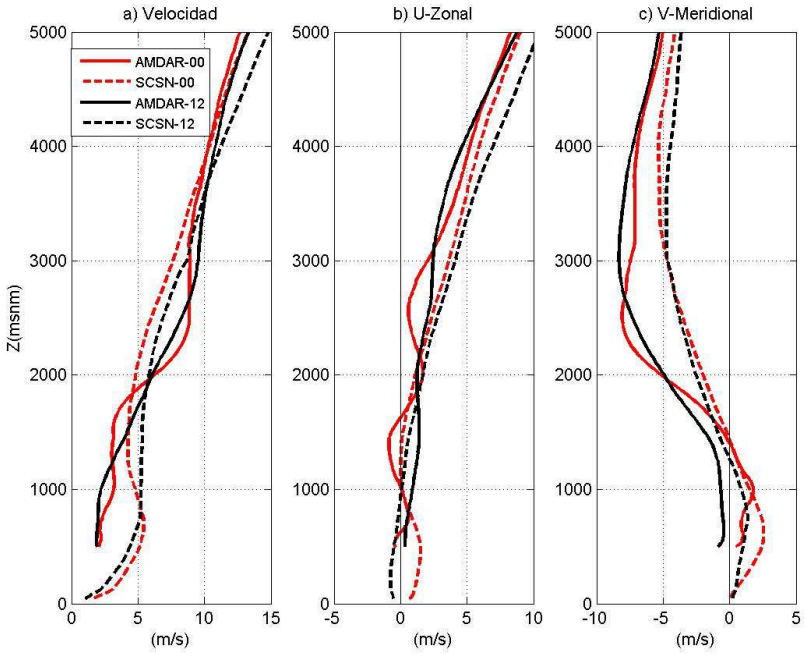

Figura 7.5: Perfiles verticales medios de a) velocidad de viento, b) componente zonal, c) componente meridional.

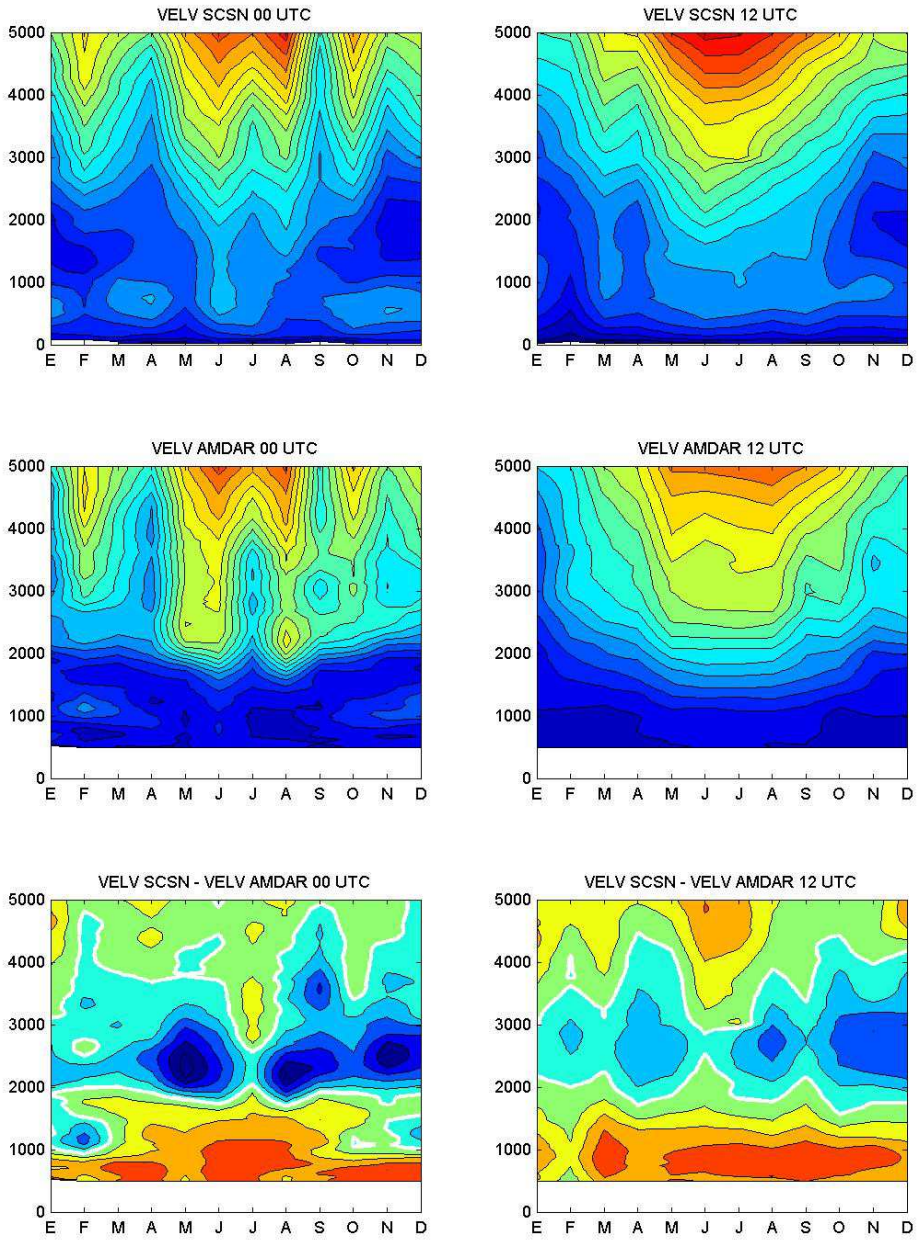

Figura 7.6: Variación estacional de velocidad de viento según radiosondeos y datos AMDAR, y sus diferencias. Contornos cada 1 m/s. En paneles inferiores el contorno blanco indica diferencia de 0 m/s.

Perfiles verticales de la dirección del viento

La Figura 7.7 muestra la variación vertical de la frecuencia de ocurrencia de la dirección del viento. Sobre los 4000 m el viento tiende a mostrar direcciones predominantes del Oeste en ambas bases de datos. Entre 2000 y 4000 el efecto del bloqueo se manifiesta en máxima ocurrencia de la componente Norte, definida muy claramente en los sondeos sobre Santiago. Bajo los 2000m se aprecia en la costa una alta ocurrencia de viento Sur, especialmente bien definidos en el sondeo de la mañana (12 UTC). Sobre Santiago, en cambio, los vientos Sur se observan más claramente en el sondeo de la tarde (00 UTC).

Variación sinóptica de la velocidad del viento

La figura 7.8 muestra los perfiles verticales de coeficientes de correlación entre las componentes del viento medidas sobre la costa y sobre Santiago. A diferencia de lo observado para temperatura, en que las correlaciones eran cercanas a 1.0, excepto en los primeros 500 m sobre el valle, la relación entre la variabilidad de los vientos sobre ambos puntos es bastante menor. Si bien sobre las 4000 m los coeficientes de correlación son relativamente altos, ellos bajan de 0.7 a los ~3000m, y son menores a 0.5 a alrededor de 1500 msnm.

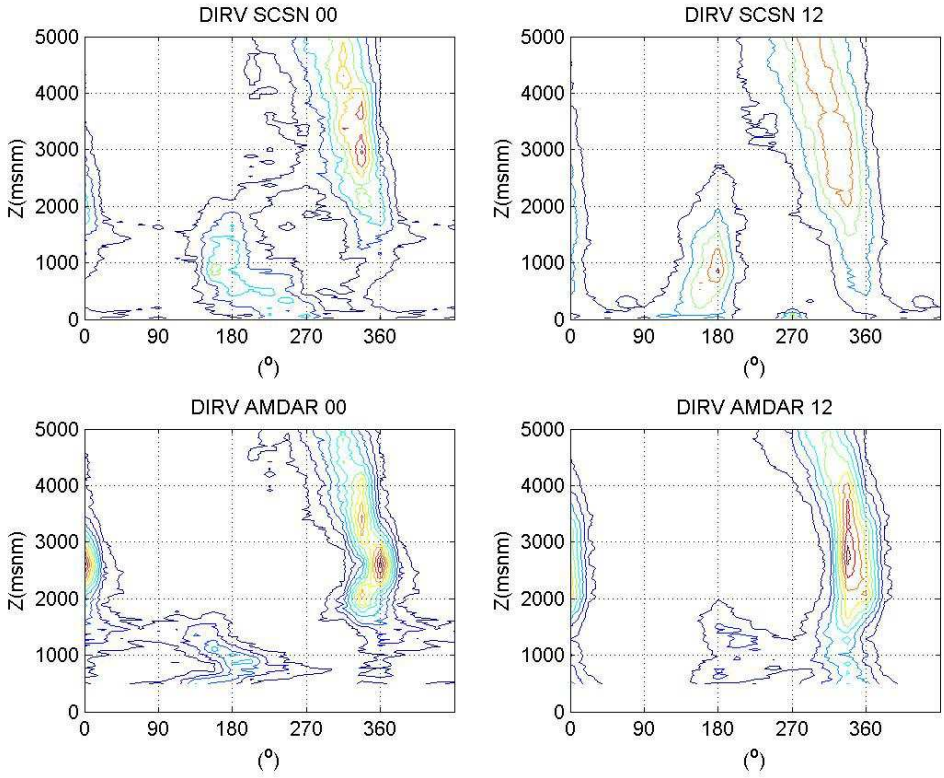

Figura 7.7: Distribución vertical de frecuencias de ocurrencia de dirección de viento. Contornos de isolíneas cada 5%.

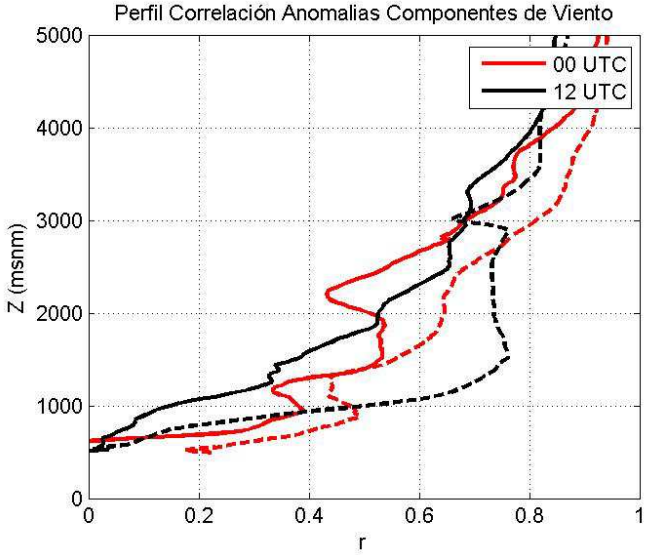

Figura 7.8: Perfil vertical de correlación entre componentes del viento medidas por radiosondeo de Santo Domingo y datos AMDAR sobre Santiago. Líneas continuas indican correlación entre componentes zonales, y líneas segmentadas indican correlación entre componentes meridionales.

Conclusiones de la comparación de la estructura vertical de la tropósfera baja entre costa y valle

Los resultados presentados aquí han permitido comparar las estructuras de los perfiles verticales de temperatura y de viento definidos mediante los radiosondeos operacionales de Santo Domingo (zona costera de la V Región) con los determinados mediante mediciones sobre el valle de Santiago.

En cuanto a los perfiles de temperatura, se aprecia que por encima de los ~500 m sobre el valle la estructura es similar, tanto en términos de perfil promedio, variación estacional y variación sinóptica. En los primeros 500 m sobre la superficie del valle, en cambio, los perfiles de temperatura medidos en el valle difieren significativamente de la estructura térmica medida en la zona costera a los mismos niveles sobre el nivel medio del mar. Estas diferencias se reflejan en los perfiles medios de temperatura, en su variación estacional y en su variabilidad sinóptica. Las diferencias son más notorias en los perfiles de las 12 UTC que corresponden a condiciones de final de noche. De especial relevancia es la diferencia de los perfiles al final de la noche (12 UTC) en los meses fríos del año, en que el perfil térmico en el valle de Santiago presenta una estabilidad significativamente mayor que la de los niveles correspondientes del perfil costero.

En cuanto a los perfiles de viento, se ha mostrado que la topografía compleja de la región produce dos efectos importantes en el viento de la tropósfera baja. Entre 2000 y 4000 msnm, la Cordillera de Los Andes produce un efecto de bloqueo que hace predominar las direcciones del Norte en los vientos y produce una intensificación del viento cercano a la cordillera, respecto de los perfiles costeros. Entre 500m y 1500 msnm, en cambio, los cordones que encierran el valle de Santiago hacen que las velocidades en estos niveles sean significativamente menores que las de los mismos niveles en el perfil costero. Estos efectos del relieve en los perfiles promedios de viento, se manifiestan también en una relativamente baja correlación entre la variabilidad de los vientos costeros respecto de los vientos medidos sobre el valle.

Los resultados anteriores sugieren que la suposición de homogeneidad horizontal utilizada para extrapolar información de radiosondeos costeros para describir la estructura atmosférica vertical en valles interiores tiene una validez limitada, especialmente cuando se trata de describir la estabilidad nocturna y los vientos. Estas dos variables son cruciales para la cuantificación de las condiciones de dispersión nocturnas, para el desarrollo de la capa de mezcla en condiciones diurnas, y para el cálculo de la advección (transporte) de los contaminentes.

Referencias

Moninger, W., R. Mamrosh, P. Pauley, 2003: Automated meteorological reports from commercial aircraft. *BAMS*, Feb. 2003, 203-216.

8 Comparación WRF/CALMET

Basado en lo expuesto en las secciones 5-7 es evidente que la información meteorológica existente en Chile es insuficiente para el uso de modelos Gaussianos y modelos meteorológicos de diagnóstico (tipo CALMET). En este sentido, surgen dos preguntas: ¿Son capaces los modelos numéricos de representar adecuadamente la meteorología en el territorio chileno? Y, en el caso hipotético que existieran más observaciones meteorológicas, ¿un modelo numérico tendría alguna ventaja sobre uno de diagnóstico?

Con respecto a la primera pregunta, en el estudio "Ámbitos de Investigación Necesarios para el Desarrollo Eólico en Chile Relacionados con el Comportamiento del Recurso Viento"[3] se ha ocupado el modelo numérico WRF con fines de explorar el potencial eólico a lo largo del territorio nacional. Las comparaciones de las simulaciones realizadas dentro de ese estudio han mostrado el buen desempeño del modelo en representar la complejidad de los vientos en distintos lugares en Chile de tal manera, que se ha decidido en el Ministerio de Energía hacer esa información pública a través de: http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/E3S/. No cabe dentro de este estudio realizar aún más simulaciones que en el estudio mencionado, pero tanto los resultados de este como la literatura científica internacional dejan en evidencia que WRF representa un modelo numérico muy potente y útil para fines de representar la meteorología en terreno complejo.

Esta sección apunta a dar una respuesta a la segunda pregunta anteriormente planteada a través de un experimento de simulaciones que involucran WRF y CALMET. El estudio de caso para llegar a esta respuesta es la zona de Calama dado que, en primer lugar, es una zona interesante e importante desde un punto de vista ambiental y, además, dispone de la información meteorológica que permite hacer el experimento necesario. En lo siguiente se describen los datos utilizados, el diseño del experimento, sus resultados y algunas conclusiones.

Datos utilizados

Como datos de entrada para el modelo CALMET se ocuparon datos de las estaciones siguientes estaciones de la red de monitoreo de CODELCO: Hospital del Cobre, Calama Norte, San José, Fundición, Talabre, Chiu Chiu y Radomiro Tomic para el año 2010. La tabla 8.1 indica las variables utilizadas y la disponibilidad para este periodo (en porcentaje). Dado que no hay información sobre la meteorología en altura, se ocupó la del radiosondeo en Antofagasta y disponible a través de: http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html. Cabe señalar que sólo se realiza un sondeo por día en Antofagasta (a las 1200 UTC). Sin embargo, ya CALMET requiere dos sondeos por día se asumió condiciones iguales para las 0000 UTC y las UTC del mismo día.

[3] Falvey M., Ibarra M., Jacques M., Muñoz R., Schmitz R., Garreaud R., Molina A., 2010, Ámbitos de Investigación Necesarios para el Desarrollo Eólico en Chile Relacionados con el Comportamiento del Recurso Viento ,Informe Final, Comisión Nacional de Energía.

En el caso de WRF, se ocuparon datos del estudio "Ámbitos de Investigación Necesarios para el Desarrollo Eólico en Chile Relacionados con el Comportamiento del Recurso Viento". Estos datos están disponibles a un kilómetro de resolución horizontal y una hora temporal. La configuración exacta del modelo está descrita en el informe respectivo.

	Velocidad de viento	Dirección de viento	Temperatura	Presión	Humedad relativa
Hospital de Cobre	99.97	99.97	99.97	99.97	99.97
Calama Norte	98.75	98.75	-	-	-
Talabre	76.13	76.13	76.16	76.16	76.16
Chiu Chiu	96.81	94.49	96.78	96.78	96.78
San José	99.91	99.91	95.00	99.94	-
Fundición	99.79	-	99.81	-	-
Radomiro Tomic	73.08	73.08	-	-	-

Tabla 8.1: Variables medidas en cada estación contemplada en este estudio de caso. Los números indican la completitud de las series (a nivel horario).

Diseño del experimento

La figura 8.1 muestra el dominio de simulación de CALMET. La resolución horizontal era igual a la de WRF de un kilómetro horizontal. El resto de la configuración de CALMET fue según la recomendación EPA.

Con fines de evaluar el desempeño del modelo CALMET se hicieron dos simulaciones independientes, una ocupando sólo las observaciones de las estaciones de la figura 8.1 marcadas en azul, otra sólo con las estaciones marcadas en amarrillo. Se puede ver en esta figura que, aparte de la estación de Radomiro Tomic, siempre hay dos estaciones relativamente cerca: Hospital del Cobre/Calama Norte, Talabre/Chiu Chiu y San José/Fundición. Para cada simulación sólo se ocupó una de los respectivos pares de manera tal que las que no se usaron so ocuparon para la evaluación independiente del desempeño del modelo CALMET. En el caso del modelo WRF, cabe reiterar que no ocupa información observacional en sus simulaciones, lo que significa que su comparación con las observaciones siempre es independiente.

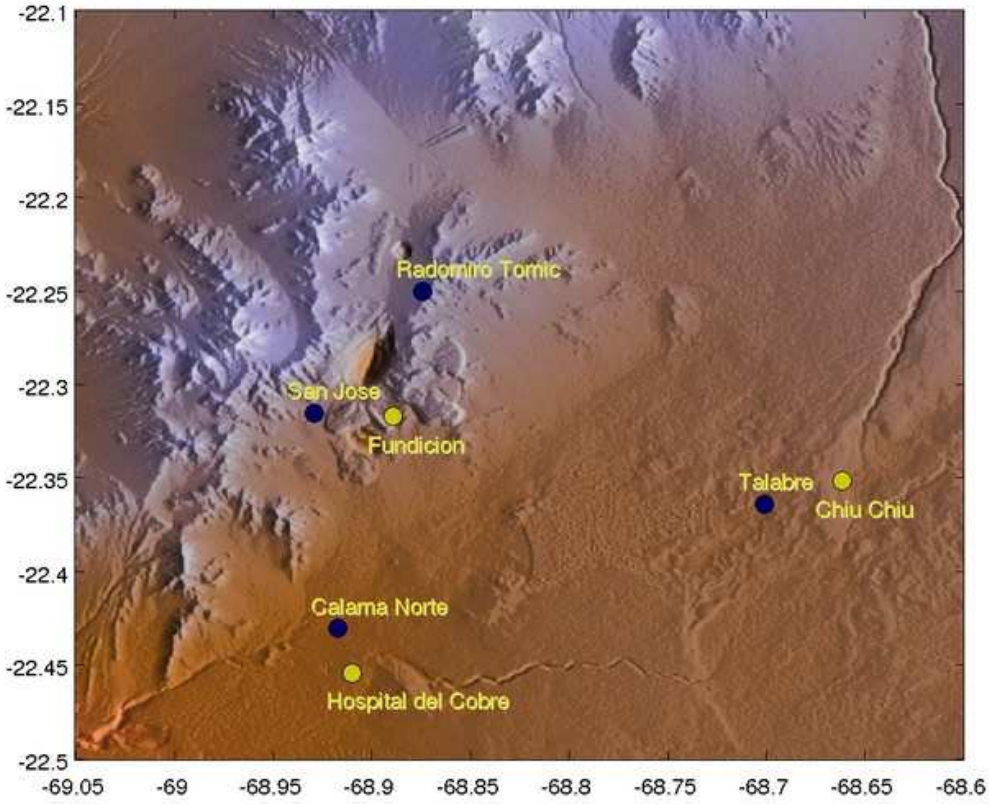

Figura 8.1: Topografía del dominio de modelación del modelo CALMET. También se indican las estaciones cuyos datos meteorológicos se usaron como información de entrada para este modelo. Para las dos simulaciones realizadas se usaron en forma independiente los datos de las estaciones marcadas en azul y amarrillo, respectivamente.

Resultados

De las tres variables que son las más importantes para la dispersión atmosférica (velocidad y dirección del viento y perfil vertical de la atmósfera), sólo se pueden evaluar los modelos, en el caso de este experimento, en términos de velocidad y dirección de viento. La figura 8. 2 muestra para cada una de las estaciones de monitoreo el ciclo diario promedio de la velocidad del viento (el promedio de todo el año 2007). La línea gris indica el ciclo diario según las observaciones, la línea roja el ciclo diario según CALMET y la línea verde el de WRF. El orden de los gráficos es de manera tal que los pares de estaciones cercanas siempre están una al lado de otra .En general, ambos modelos reproducen bien el ciclo diario observado. A pesar de ese buen desempeño general, también hay diferencias entre las observaciones y los modelos. En este sentido, el caso de la estación San José llama la atención en dos sentidos: en primer lugar, ambos modelos coinciden

con la velocidad máxima, sin embargo, sobre-estiman de manera considerable. En segundo lugar, comparado con todas las estaciones en general y la de Fundación en particular (que se ubica muy cerca) la velocidad del viento durante la tarde es muy baja. Dado que el consultor desconoce la ubicación de la estación tampoco sabe si está expuesta adecuadamente y, por lo tanto, si sus mediciones son representativas. Mientras la figura 8.2 muestra los ciclos diarios de los vientos promedios, las figuras 8.3 y 8.4 muestran los ciclos de los percentiles 90 y 10, respectivamente, de las observaciones y los dos modelos. Para ambas métricas se repite la sobreestimación mencionada en San José. Y también se considera el desempeño de los dos modelos muy satisfactorio para ambas métricas.

La segunda variable meteorológica importante en términos de la dispersión de contaminantes es la dirección del viento. La figura 8.5 muestra los ciclos diarios promedios de las observaciones y los dos modelos para cada una de las estaciones de monitoreo. La estación Fundición no cuenta con esta variable por lo que el respectivo panel no tiene una línea para las observaciones. Aún más importante, en la simulación en que se usaba los datos de Fundición no se contaba información sobre la dirección de viento en ese sector (cabe recordar que en esa simulación tampoco se usaba la información de San José). Mientras esa falta de información no se hace notar en la parte del ciclo diario del modelo CALMET que representa la tarde del día, tiene un impacto durante las horas de la madrugada. Se puede observar que todas las estaciones tienen una dirección de viento muy similar durante la tarde. De hecho, se sabe que por efectos térmicos el gradiente de presión durante la tarde es muy fuerte, lo que produce una dirección de viento más homogéneo que durante la noche, cuando los gradientes de presión son mucho más débiles. Y es justamente en estas situaciones débiles con un campo de viento menos organizado que CALMET pierde la capacidad de reproducir la dirección de viento en San José por falta de información en el sector.

Conclusiones de la comparación WRF/CALMET

La comparación entre ambos modelos sólo representa *un* estudio de caso. Sin embargo, el experimento permite hacer algunas conclusiones generales:

En primer lugar, es importante enfatizar que para este experimento no se disponía de información apropiada de la estructura vertical de la atmósfera ni como información de entrada para CALMET ni para fines de evaluar el desempeño de los modelos en estos términos. Tal como indicaba la sección anterior eso es un problema general a nivel nacional (con la excepción de las cercanías de Santo Domingo donde están disponibles dos sondeos al día).

En segundo lugar, también es evidente que ambos modelos son capaces de representar los ciclos diarios de la velocidad del viento y que en caso de WRF eso es independiente de la disponibilidad de información observacional. WRF mostró un desempeño igual de bueno para la dirección de viento. Por otro lado, los resultados de CALMET indican que el modelo tiene problemas de representar bien la dirección de viento en un campo de viento poco homogéneo; este resultado concuerda con la última revisión de las recomendaciones de modelación de IWAQM (ver sección 5) que también indica las limitaciones de CALMET en terreno complejo.

También cabe recordar que, en general, no se cuenta con una red de monitoreo de la misma calidad ni densidad como en la zona de Calama. Es decir, además de los datos faltantes en altura tampoco se dispone de tanta información en superficie (ver también sección 3). En este sentido y a pesar de los rasgos positivos que so pudieron observar en este estudio de caso, tanto las recomendaciones de la EPA como los resultados de las secciones anteriores dejan concluir que no se debe usar CALMET sólo en base de observaciones sino se recomienda el uso de modelos numéricos de tipo WRF.

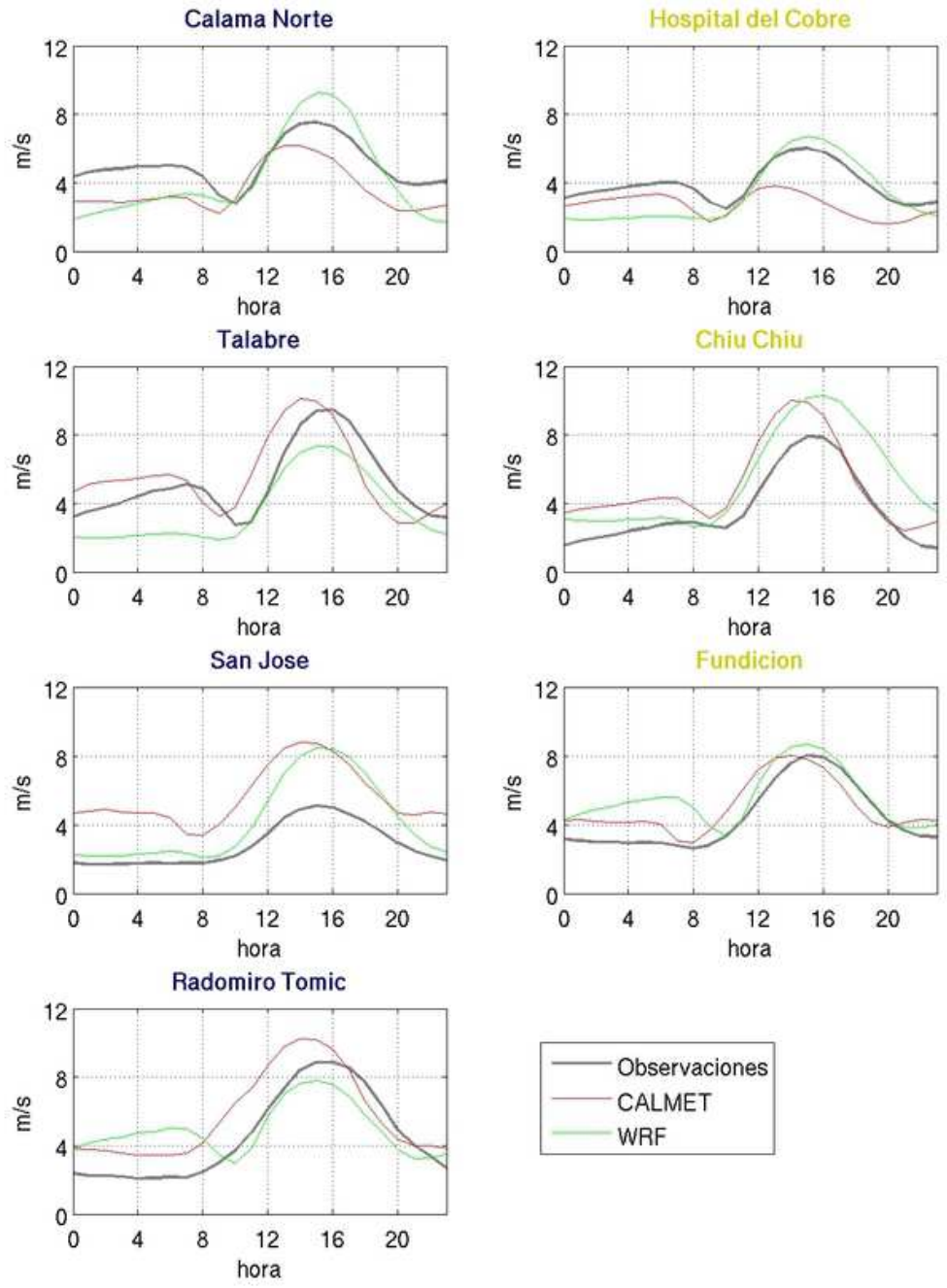

Figura 8.2: Ciclos diarios promedios del año 2010 según observaciones (línea gris), CALMET (línea roja) y WRF (línea verde) para todas las estaciones consideradas en este estudio de caso. Par cada una de las dos simulaciones de CALMET se ocupó en forma independiente las estaciones las estaciones de las columnas izquierda y derecha, respectivamente. En las figuras se comparan los resultados de CALMET con las observaciones que no se ocuparon en las respectivas simulaciones.

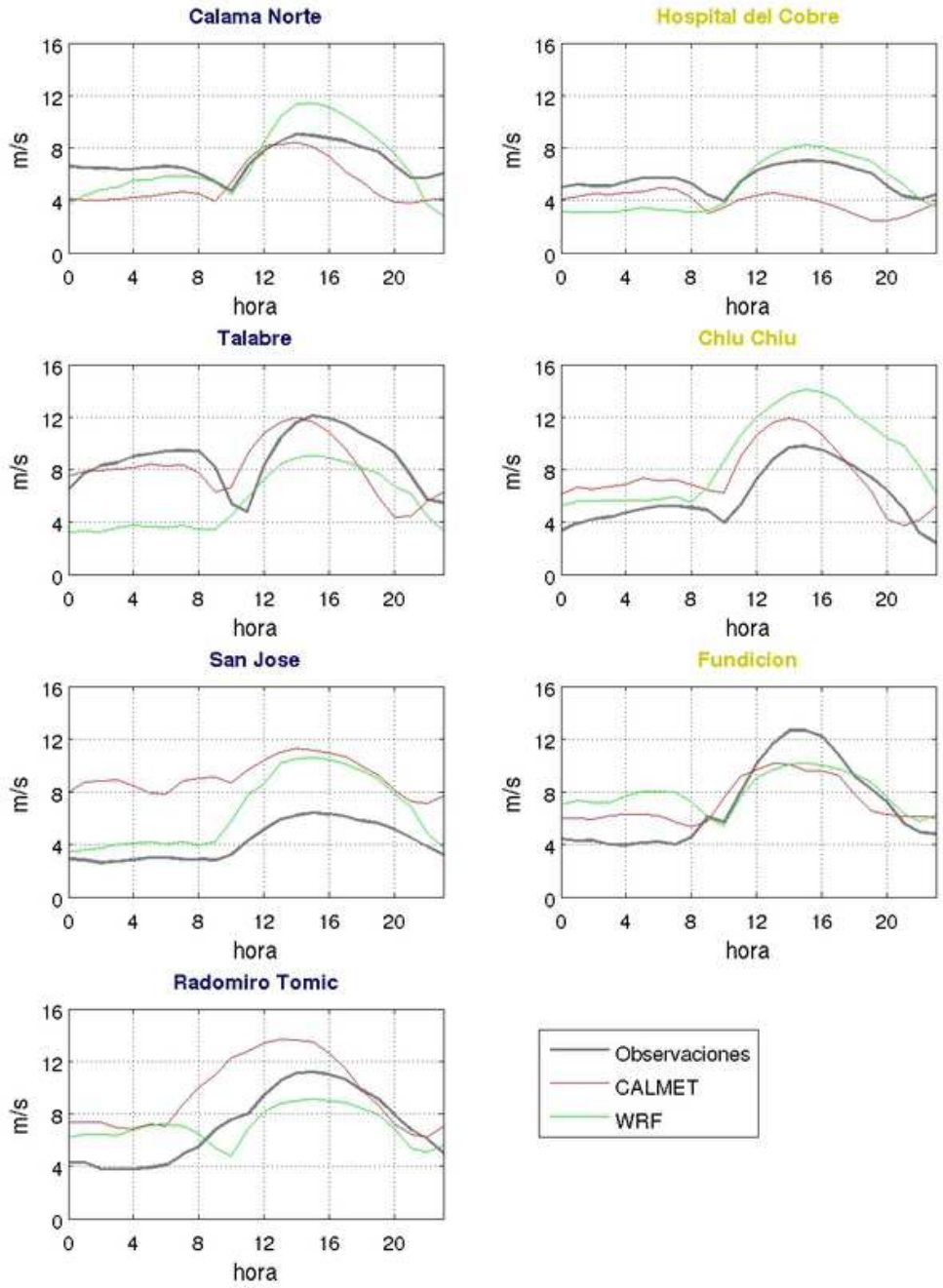

Figura 8.3: Equivalente a la figura 8.2 pero para el percentil 90 de los vientos más fuertes.

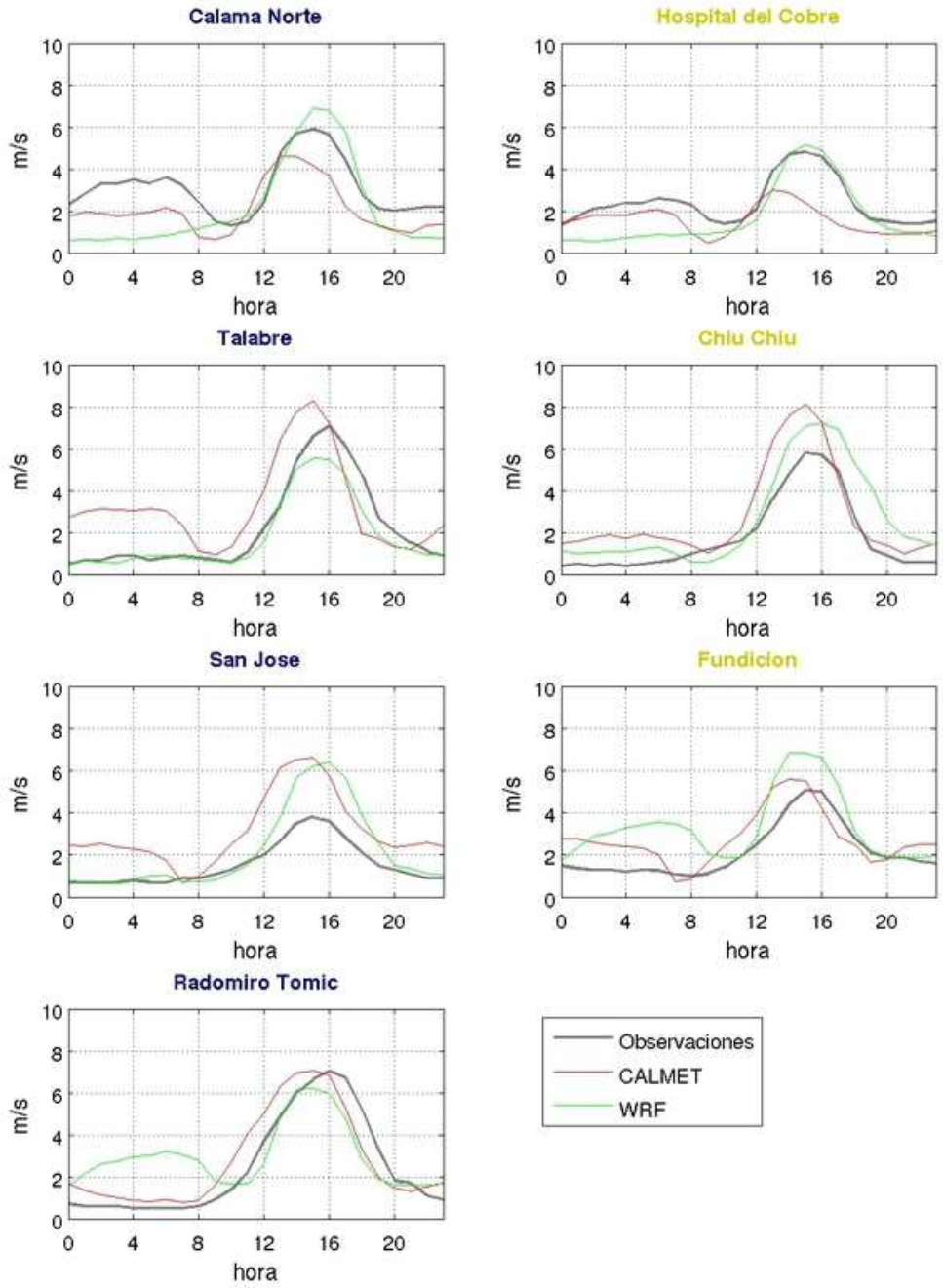

Figura 8.4: Equivalente a la figura 8.2 pero para el percentil 90 de los vientos más débiles.

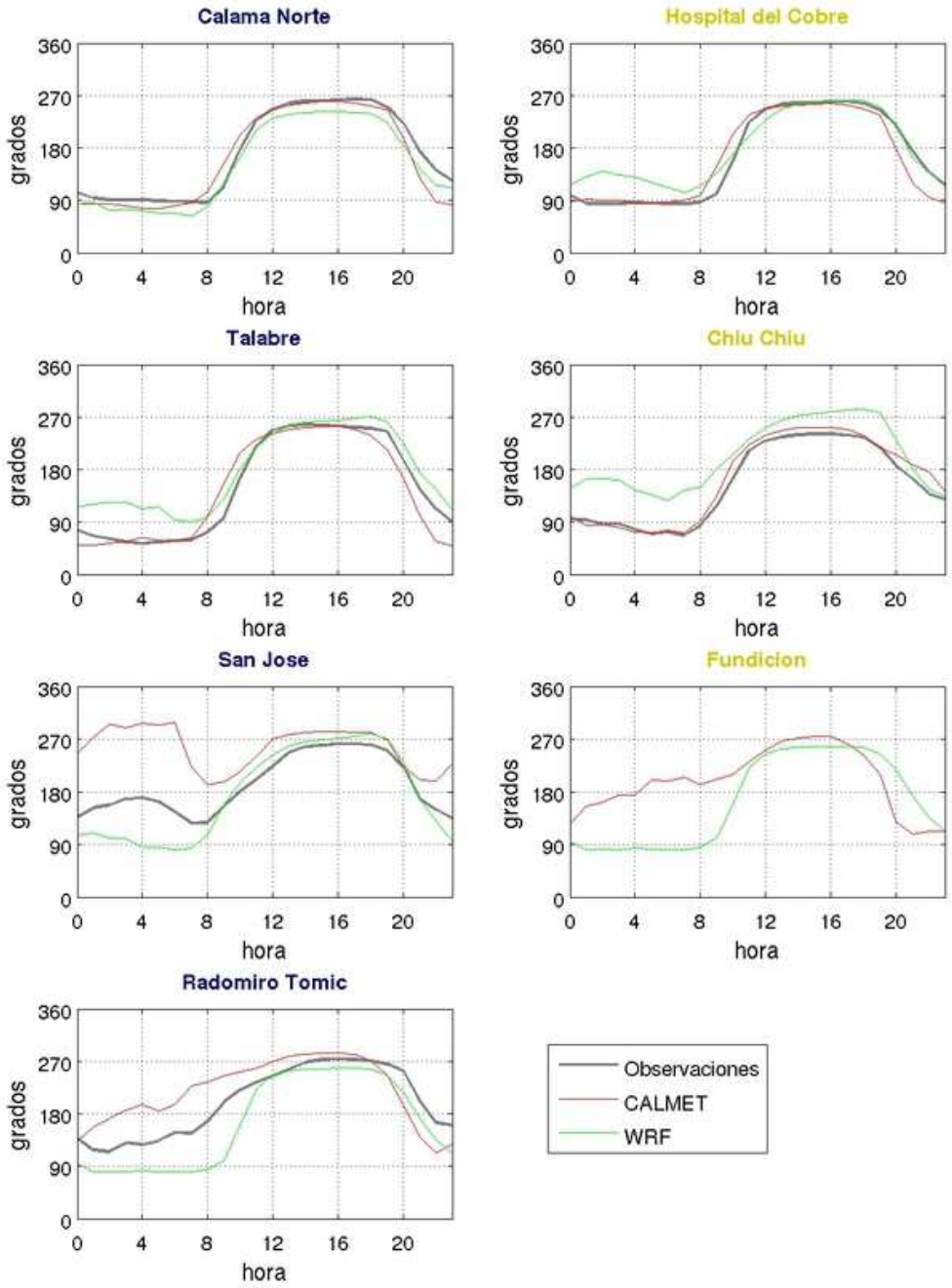

Figura 8.5: Equivalente a la figura 8.2 pero para la dirección de viento.

9 Conclusiones

Este informe representa la base técnica de la "Guía para el uso de modelos de dispersión atmosféricos en el SEIA". En este sentido, las conclusiones generales se plasman principalmente en esta Guía y sólo se entregan en lo siguiente las conclusiones más importantes.

En primer lugar, era necesario definir bien los desafíos de la modelación dentro del contexto chileno que se dan principalmente por las características del terreno nacional. Las conclusiones en este sentido son:

- Todo el terreno nacional se debería considerar como terreno complejo.
- El terreno complejo conduce a una meteorología espacialmente y temporalmente muy heterogénea.
- Para hacer modelación se debe utilizar modelos capaces representar esa heterogeneidad de la mejor manera posible.

También dentro del contexto nacional, la conclusión más importante del análisis de los datos de la estructura vertical es:

- Los datos obtenidos en los radiossondeos representan la estructura vertical de la costa y se diferencian sustancialmente con la continental.
- A pesar que no fue parte del análisis mencionado, es importante reiterar que en todas las estaciones de radiosondeo en Chile se lanza una sola radiosonda por día (menos en la estación de Santo Domingo donde se lanzan dos por día) y, en consecuencia, que esos datos no permiten un análisis de la evolución de la estructura de la capa límite durante el día.

Luego, de los experimentos de las secciones 5 y 6 las conclusiones más importantes son:

- Los modelos Gaussianos pierden rápidamente representatividad alejándose de su fuente.
- El sistema CALMET/CALPUFF no tiene un desempeño muy superior a los modelos Gaussianos cuando se usa una pura estación meteorológica y un radiosondeo como información de entrada.

ANEXO 1

Antecedentes sobre la Base de Datos de Observaciones Meteorológicas - BDOM

Tal como se mostró en la sección 3 de este informe, es muy común que en la modelación para la evaluación de impacto ambiental se usa la información de una sola estación meteorológica como información de entrada. En muchos casos, se trata de estaciones implementadas por las empresas a cargo del proyecto y que, antes de modelar los futuros impactos, tienen que esperar hasta que las estaciones provean datos de un periodo suficientemente largo (típicamente un año). En este sentido, sería importante disponer de una base de datos pública que contuviera información histórica y con la que se pudiera realizar modelaciones de forma inmediata. La idea de esta sección es justamente describir una base de datos meteorológica a nivel país y evaluar el potencial en su aplicación en el SEIA.

Los datos meteorológicos colectados desde estaciones de monitoreo son el resultado de iniciativas impulsadas por actores diversos y motivados por intereses específicos. Por ende, ciertos aspectos fundamentales de configuración dentro de esas iniciativas –tales como variabilidad espacio/temporal de la red de observación, variables a medir, estándares, entre otros– responden a interrogantes asociadas al interés particular.

Por otra parte, la escaza y débil relación que existe generalmente entre las diversas iniciativas de medición genera además una reconocida y elevada dificultad para acceder a sus resultados. Así, una situación común es que al quien requiere de mediciones meteorológicas para una zona particular le hace difícil saber si existen iniciativas de medición preexistentes en las cercanías de dicho lugar. Ello deja en evidencia la ausencia de mecanismos de comunicación y coordinación entre actores destinados a realzar el valor de dichos datos, ello pese a que estos son fácilmente asociables al impulso del desarrollo productivo y al cuidado del medioambiente.

Para hacer frente a esta situación, durante los últimos años el grupo consultor ha llevado adelante iniciativas tendientes a establecer una base de datos meteorológica lo más completa posible y de libre acceso, que lleva por nombre Base de Datos de Observaciones Meteorológicas (BDOM). Dado los contextos en que la iniciativa ha sido generada, en su etapa inicial de desarrollo la BDOM ha tenido un marcado énfasis hacia la caracterización del recurso eólico, por lo que se ha fijado como objetivo fundamental el reunir, estandarizar y divulgar series de tiempo de registros de velocidad y dirección de viento, variables que también son claves para la modelación de calidad del aire.

Es así como hoy la BDOM reúne registros de 410 estaciones meteorológicas. No obstante, es importante resaltar que sólo una fracción del contenido -correspondiente a registros provenientes de 330 estaciones- posee la condición de ‘dato público’, lo que posibilita su libre divulgación (por

ejemplo, a través de Internet). Los registros provenientes de las 80 estaciones restantes poseen la condición de 'dato privado' y son manejados de manera confidencial, inhabilitando la opción de divulgación total o parcial, tanto del contenido como de sus metadatos.

El contenido de la BDOM ha sido suministrado al DGF por una amplia diversidad de proveedores, quienes han ejecutado campañas de medición con variedad de objetivos. La tabla A1.1 muestra una breve descripción de los proveedores de datos que principalmente consiste en estaciones que se emplearon con fines de prospección eólica y estaciones que apoyan a una red meteorológica mundial. Llama la ausencia de todas las estaciones del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINCA). A pesar que SINCA debería manejar toda la información meteorológica de las estaciones relacionadas a la calidad del aire en el país, esta información todavía no está disponible en el sistema. Sin lugar a dudas, la disponibilidad de esos datos sería muy importante para ampliar más aún la información en la BDOM. La figura A1.1 muestra la cantidad de estaciones que aporta cada proveedor. Nuevamente se destacan los proveedores relacionados a prospección eólica y el DSS. Sin embargo, también se puede observar que el sector privado podría contribuir con una fuente de información muy importante. Finalmente, la figura A1.2 muestra la distribución geográfica de las estaciones según proveedor de contenido.

En la figura A1.1 es posible notar que el proveedor que entrega mayor cantidad de datos es DSS-NCEP que suma 106 estaciones, seguido por los estudios Eolo (1993, 2003 y 2005) que suman 150 estaciones. Otros importantes proveedores son CNE (sumando 74 estaciones) y los proveedores privados (80 estaciones). No cabe duda que justamente en el sector privado existe mucha información y sería muy útil poder contar con esa información para fines públicos.

En la figura A1.2 se distingue que la mayor concentración de observaciones públicas disponibles se concentra en ciertos sectores de la zona norte (por ejemplo en los alrededores de las ciudades Calama y Coquimbo) y centro del país (por ejemplo en el entorno de la ciudades Santiago y Quintero). Del mismo modo es distinguible la baja densidad de observaciones disponibles en el sur de Chile. También es posible apreciar que el contenido incluye un número considerable de estaciones emplazadas en países vecinos pertenecientes a la red DSS-NECP

Identificador	Nombre del estudio o institución proveedora / Aspectos relevantes
Eolo1993	Evaluación del Potencial Eólico Nacional.
	Fuente: Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), 1993. El estudio recopiló registros provenientes desde 71 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del territorio chileno. El estudio recibió aportes de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Empresa Nacional de Electricidad (ENDESA), Corporación Nacional del Cobre (CODELCO, Chuquicamata), Departamento de Geofísica (U. de Chile), European Southern Observatory (ESO), Empresa Nacional de Petróleos (ENAP), Compañía de Carbones de Chile (COCAR). A ello se suman aportes de C. Naveas y R. Tiemann, (U. de Playa Ancha, Valparaíso), R. Espejo (Dpto. de Física. U. del Norte, Antofagasta), R. Román (FCFM, U. de Chile), M. Grosjean, H. Romero (U. de Berna / U. de Chile), ELNOR (Depto. de Tarifas y Contratos. Antofagasta), Proyecto Geoecología de Atacama (U. de Erlangen-NŸrnberg. Alemania), Zuleta y Vergara (1992), Guzmán (1984), Instituto de la Patagonia (Punta Arenas). Para el presente estudio, se obtuvo acceso a registros provenientes de 52 estaciones.
Eolo2003	Mejoría del Conocimiento del Recurso Eólico en el Centro y Norte del País.
	Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE), 2003. El estudio generó una base de datos con registros acumulados provenientes de 129 estaciones meteorológicas distribuidas en la zona centro norte de Chile. El estudio recibió aportes de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA, regiones III, IV y V), Servicio de Salud (III región), U. de la Serena, Departamento de Geofísica y Centro de Modelamiento Matemático (U. de Chile), Centro Nacional del Medioambiente (CENMA), Guacolda Energía, Compañía Minera El Indio, Compañía Minera del Pacífico, Corporación Nacional del Cobre (CODELCO, Potrerillos), Empresa Nacional de Minería (ENAMI, Paipote) y Compañía Minera Candelaria Para el presente estudio, se obtuvo acceso a registros provenientes de 59 estaciones.

TablaA1.1: Descripción de los proveedores de contenido de la BDOM

Identificador	Nombre del estudio o institución proveedora / Aspectos relevantes
Eolo2005	Mejoría del Conocimiento y Administración de la Información Eólica en Chile.
	Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE), 2005. Generó un banco de datos con registros obtenidos desde 72 estaciones meteorológicas. Dichas estaciones distribuidas entre la región Metropolitana y la región de los Lagos. El estudio recibió aportes del Centro Nacional del Medioambiente (CENMA), SERPRAM, Empresa Nacional del Petróleo (ENAP Biobío), Observatorio Geodésico TIGO, Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Sistema de Vigilancia Calidad del Aire (SIVICA) y Departamento de Geofísica (U. de Chile). Para el presente estudio, se obtuvo acceso a registros provenientes de 39 estaciones.
CNE Norte Grande	Estudio de Prospección Eólica.
	Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE), 2009. Banco de datos generado por una red de 17 estaciones pertenecientes a diversas instituciones que se hallan distribuidas en el Norte Grande de Chile. La mayoría de las estaciones fueron implementadas para fines de prospección eólica. Todos los datos (17 estaciones) están disponibles para el presente estudio.
CNE GTZ Norte Grande	Datos CNE - GTZ Norte Grande.
	Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE) y Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), 2009. La iniciativa involucra 20 estaciones meteorológicas especialmente destinadas para la evaluación de potencial eólico que se encuentran ubicadas sobre 4 sectores del Norte Grande de Chile. Todos los datos (20 estaciones) están disponibles para el presente estudio.

Tabla A1.1: Continuación. Descripción de los proveedores de contenido de la BDOM

Identificador	Nombre del estudio o institución proveedora / Aspectos relevantes
CNE COASTAL	Datos CNE, GTZ, GEF y PNUD.
	Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE), Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Global Environment Facility (GEF), y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2009. La campaña involucró la instalación y administración de 8 estaciones meteorológicas destinadas a la evaluación de potencial eólico sobre sitios ubicados en las costas de las regiones de Atacama, de Coquimbo y del Maule. Todos los datos (8 estaciones) están disponibles para el presente estudio.
CNE, GEF, PNUD	Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables
	Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE), Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Global Environment Facility (GEF) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2009. La campaña impulsada por CNE, GTZ, GEF y PNUD entrega registros desde 29 estaciones meteorológicas emplazadas a lo largo del territorio nacional. Todos los datos (29 estaciones) están disponibles para el presente estudio.
DSS -NCEP	Data Support Section, National Center for Environmental Prediction
	Fuente: Data Support Section (DSS), National Center for Environmental Prediction (NCEP). La base de datos DSS-NCEP es un gran repositorio de datos de la Red Global de Estaciones Meteorológicas operadas por agencias nacionales de pronóstico del tiempo (la Dirección Meteorológica de Chile en el caso de Chile) que es mantenida por el NCEP de los Estados Unidos. Esta base de datos efectivamente contiene todos los reportes sinópticos estándares que han sido transmitidos por el sistema de transmisión global (GTS). El DSS del NCEP provee registros provenientes de 106 distribuidas a lo largo del territorio chileno, y sobre algunos puntos del territorio argentino, peruano y boliviano.

Tabla A1.1 Continuación. Descripción de los proveedores de contenido de la BDOM

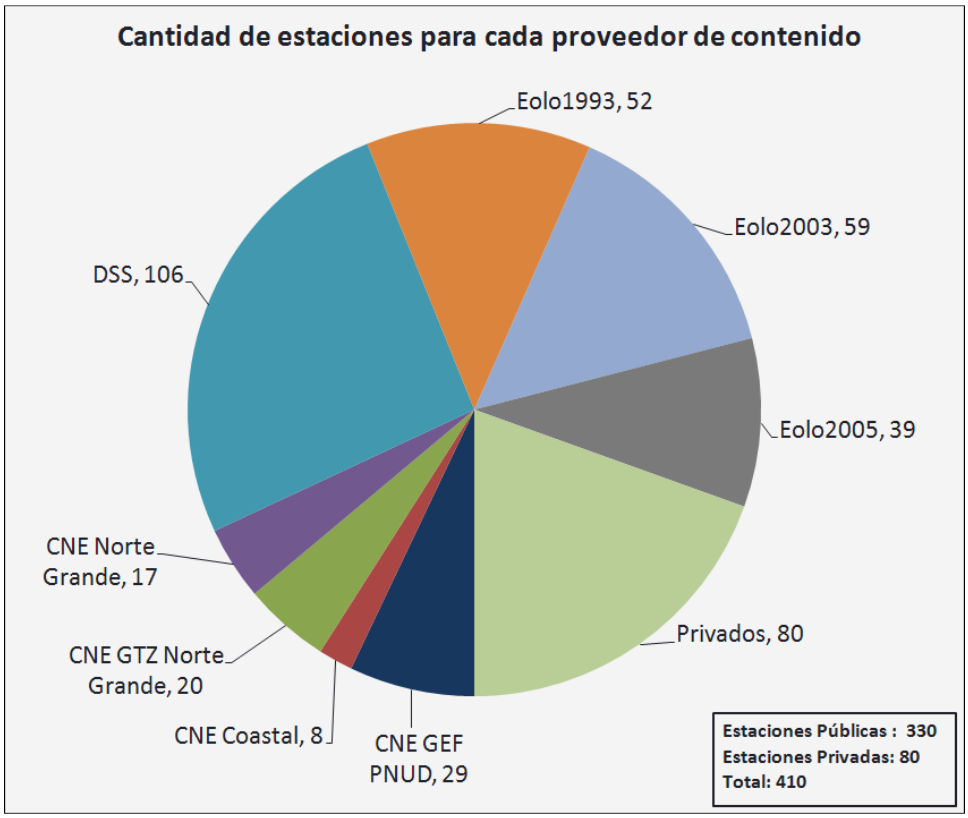

Figura A1.1: Proveedor de contenido. Número de estaciones meteorológicas aportadas por cada proveedor de contenido

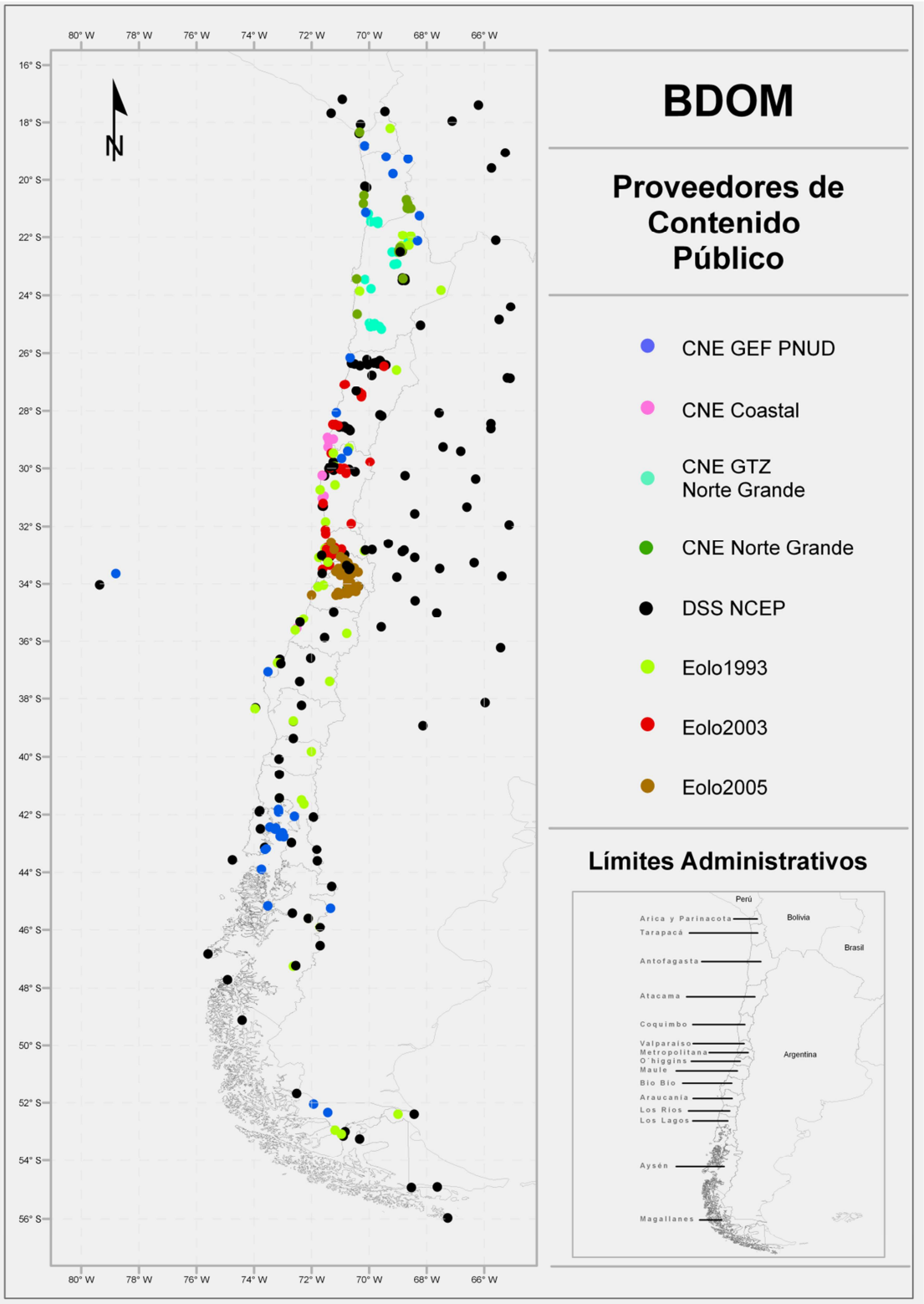

Figura A1.2: Distribución espacial las de estaciones meteorológicas públicas integradas a la BDOM, clasificadas según proveedor.

Dado que el contenido de la BDOM proviene de diversas fuentes, su diseño incluye procedimientos para la colección y estandarización de datos. Esta labor involucra la identificación y contacto de posibles proveedores, y la ejecución de iniciativas para la obtención de series de datos, concluyendo con el desarrollo de actividades destinadas al reformateo de las series de tiempo hacia un estándar adecuado para su uso ágil y expedito sobre herramientas modernas, especializadas y de uso común.

Es destacable que una de las grandes debilidades del contenido de la BDOM es que las estaciones presentan muy pocos metadatos. Los únicos metadatos disponibles corresponden al nombre de la estación, el nombre del proveedor de datos, las coordenadas de ubicación de la estación (aunque casi nunca especifican de manera detallada el sistema espacial de referencia en la que han sido definidas, y además según se ha comprobado las coordenadas no siempre parecen ser exactas) y la altura en que se instaló el sensor (aunque para muchas estaciones este dato no está disponible).

Así por ejemplo, no se hallan disponibles para ninguna de las estaciones contenidas en la BDOM metadatos más específicos asociados a sensores y hardware de apoyo (listado de hardware, tipo de tecnología, marca, modelo, año de fabricación, referencias técnicas, características del mástil), programación y configuración de datalogger (intervalo de muestreo, estándares para el manejo de las series de datos crudos medidos incluidos estándares para la compresión, almacenamiento e intercambio o comunicación de datos, configuración de cada canal de recepción, software utilizado por el datalogger), técnicas para la transformación de datos crudos a dato oficial de cada estación (formatos o estándar utilizado), detalles sobre aplicación de técnicas de corrección post-medición (uso de factor de corrección, redondeo/aproximación de decimales, relleno por interpolación de datos faltantes, análisis de saltos y tendencias de las series, identificación de causas, detección y corrección), actividades asociadas a calibraciones y mantenimiento de los componentes de la estación, historial y detalle de fallas, registro de la variación de las características del entorno que rodea la estación para las distintas estaciones del año (fotografías, esquemas, mapas, notas,) bitácora de visita a la estación, documentación de planes de mantención y calibración.

Dada esta debilidad, durante el desarrollo de la BDOM el grupo consultor ha hecho esfuerzos para implementar metadatos generados a partir del análisis de los datos. Así, dado el perfil eólico de la primera etapa de la BDOM, los metadatos generados a la fecha son velocidad media (m/s), densidad de potencia eólica (w/m2), alturas de anemómetro (m.s.n.s.), inicio de mediciones de velocidad de viento, término de mediciones de velocidad de viento, duración del período completo de medición (en días, meses y años), cantidad de datos posibles y cantidad de datos recuperados (en meses).

Adicionalmente, se desarrollaron esfuerzos para determinar si las series de datos de viento contenidos en la BDOM eran útiles para distintos tipos de aplicación, entre ellas la evaluación de impacto ambiental y la exploración del potencial eólico. Esta distinción involucró la aplicación de un conjunto de criterios resultando en un indicador que categoriza el contenido según su utilidad.

Los criterios generales utilizados para analizar las series de datos y definir su utilidad para análisis preliminares de potencial eólico fueron “Integridad” y “Coherencia”.

La integridad está asociada a que los datos disponibles cumplan condiciones básicas de completitud (también asociada a la discontinuidad de una serie de tiempo), con el fin de responder a las necesidades de representatividad temporal de una variable meteorológica en particular.

De manera similar, la coherencia de los datos está asociada con que los registros (tanto para un registro en particular, como para un conjunto o serie temporal de registros) se hallen dentro de ciertos umbrales o rangos de validez preestablecidos.

Finalmente, el desarrollo de la BDOM ha permitido implementar un mecanismo ágil y robusto para la divulgación del contenido de carácter público a través de Internet. Es así como hoy la BDOM se halla disponible para ser desplegada con la ayuda del software de visualización de datos geográficos GoogleEarth®, facilitando el reconocimiento de la distribución geográfica de las estaciones y permitiendo además el acceso a las series de datos públicas disponibles y metadatos.

Uso de la BDOM en la modelación de contaminantes atmosféricos

La BDOM adquiere una importancia fundamental dentro de los estudios de modelación atmosférica, debido a que puede ser utilizada tanto para inicializar modelaciones específicas (usando los datos de cada estación como datos meteorológicos de entrada) como para evaluar el desempeño de los modelos Eulerianos de tipo pronóstico por medio de la comparación estadística entre los resultados de simulaciones computacionales y las observaciones.

Con respecto a la información de entrada, son tres las variables requeridas para los modelos Gaussianos y/o meteorológico de tipo diagnóstico (por ejemplo CALMET) que en este momento también provee la BDOM: velocidad del viento, la dirección del viento y la radiación solar. (También existe la información sobre temperatura, pero todavía no se ha analizado.) En esta sección, se pretende describir la disponibilidad de dicho contenido -de carácter público- almacenado en la BDOM.

Respecto a la velocidad de viento, la BDOM posibilita el acceso a gran cantidad de anemómetros distribuidos sobre el territorio nacional. La figura A1.3 muestra la distribución espacial de las estaciones que poseen anemómetros. Se puede apreciar que cada uno de los proveedores apunta a necesidades específicos. Mientra la red DSS posee muchas estaciones desde la zona central hacia el sur con fines de detectar la variabilidad meteorológica que se debe a fenómenos a nivel sinóptico como por ejemplo sistemas frontales, gran parte de las estaciones CNE están ubicados en el norte con fines de la exploración eólica en esa zona (y también el gran consumo energético por parte de la industria minera). En términos de datos recuperados (en meses), la figura A1.4

indica que son muy pocas las estaciones que cuentan con un registro de más de un año de largo y que aquellas que con esos periodos largos están concentrados principalmente en la zona central y en el norte en zonas costeras. La tabla A1.2 muestra un resumen de esos registros (o datos recuperados) en términos de su promedio por proveedor . En esta tabla se destacan las estaciones de la red DSS que en promedio proveen más de cinco años de datos. Los otros proveedores más bien operaron de modo de campaña y, en consecuencia, los periodos de datos disponibles son más cortos. Otra información importante en la medición de viento es la altura en que los sensores se ubican la figura A1.5 muestra una clasificación justamente según la altura de los anemómetros. Se considera que las mediciones a diez metros de altura son representativas para el viento en superficie y son ellas que entran como información de entrada a todos los modelos de diagnóstico). Las mediciones arriba de los diez metros pueden también entregar información valiosa pero no son esenciales para la modelación. La tabla A1.3 muestra resumidamente la cantidad de estaciones meteorológicas públicas que poseen anemómetros a determinadas alturas y muestra que la gran mayoría justamente se encuentra a diez metros..

La figura A1.6 es relacionada a la otra variable relacionada al viento que es su dirección y muestra la distribución de las estaciones que ofrecen información desde veletas. Comparando las figuras A1.3 y A1.6 indica que generalmente las estaciones que cuentan con información sobre velocidad de viento también cuentan con aquella sobre su dirección.

Proveedor de Contenidos	**Datos Recuperados (meses)**
CNE GEF PNUD	16.7
CNE Coastal	24.0
CNE GTZ Norte Grande	4.6
CNE Norte Grande	52.2
DSS	69.0
Eolo1993	9.4
Eolo2003	28.2
Eolo2005	28.9

Tabla A1.2: Promedio de datos recuperados según proveedor de contenido, para las estaciones que conforman el contenido público de la BDOM.

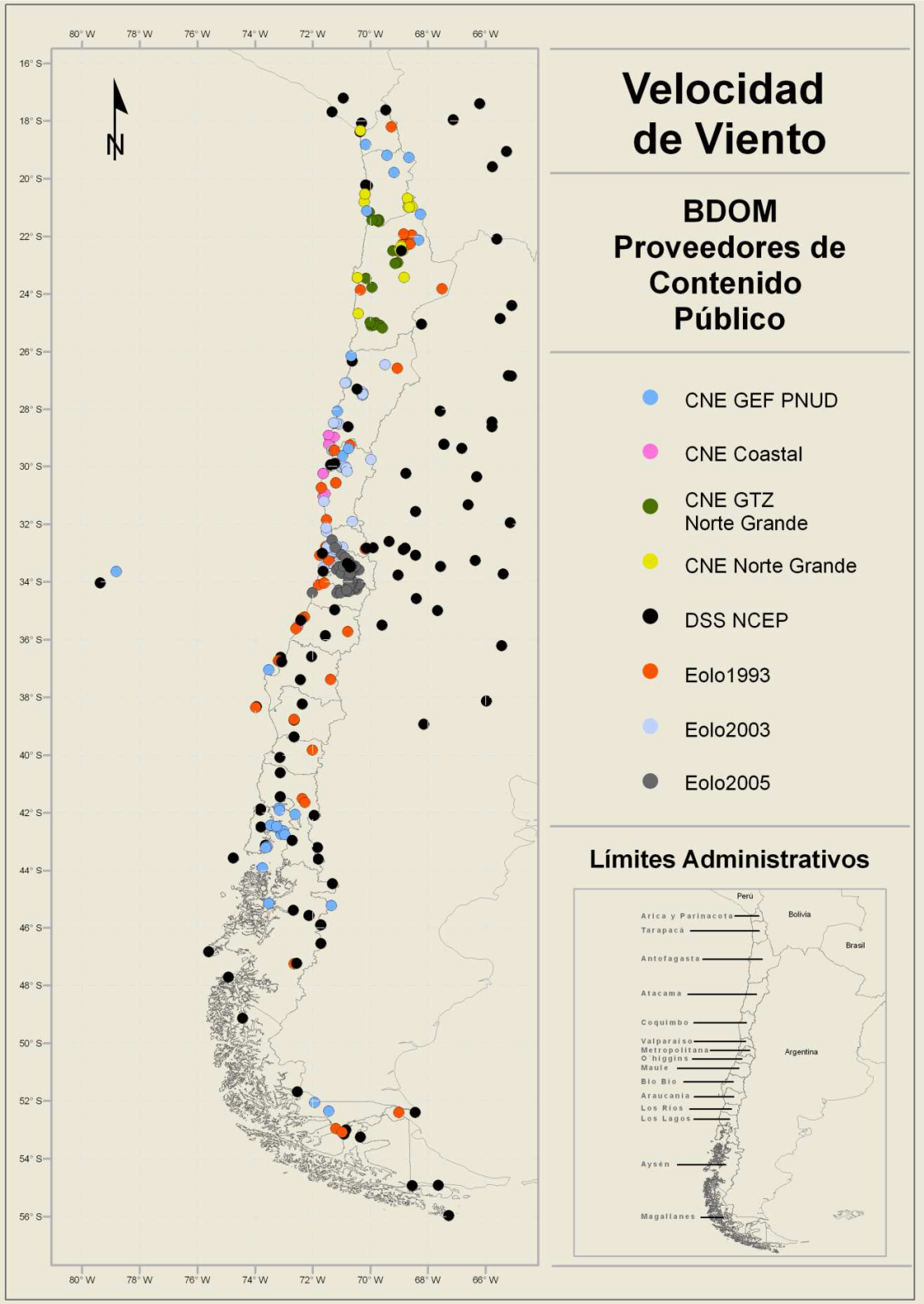

Figura A1.3: Distribución espacial de las estaciones públicas que poseen anemómetros

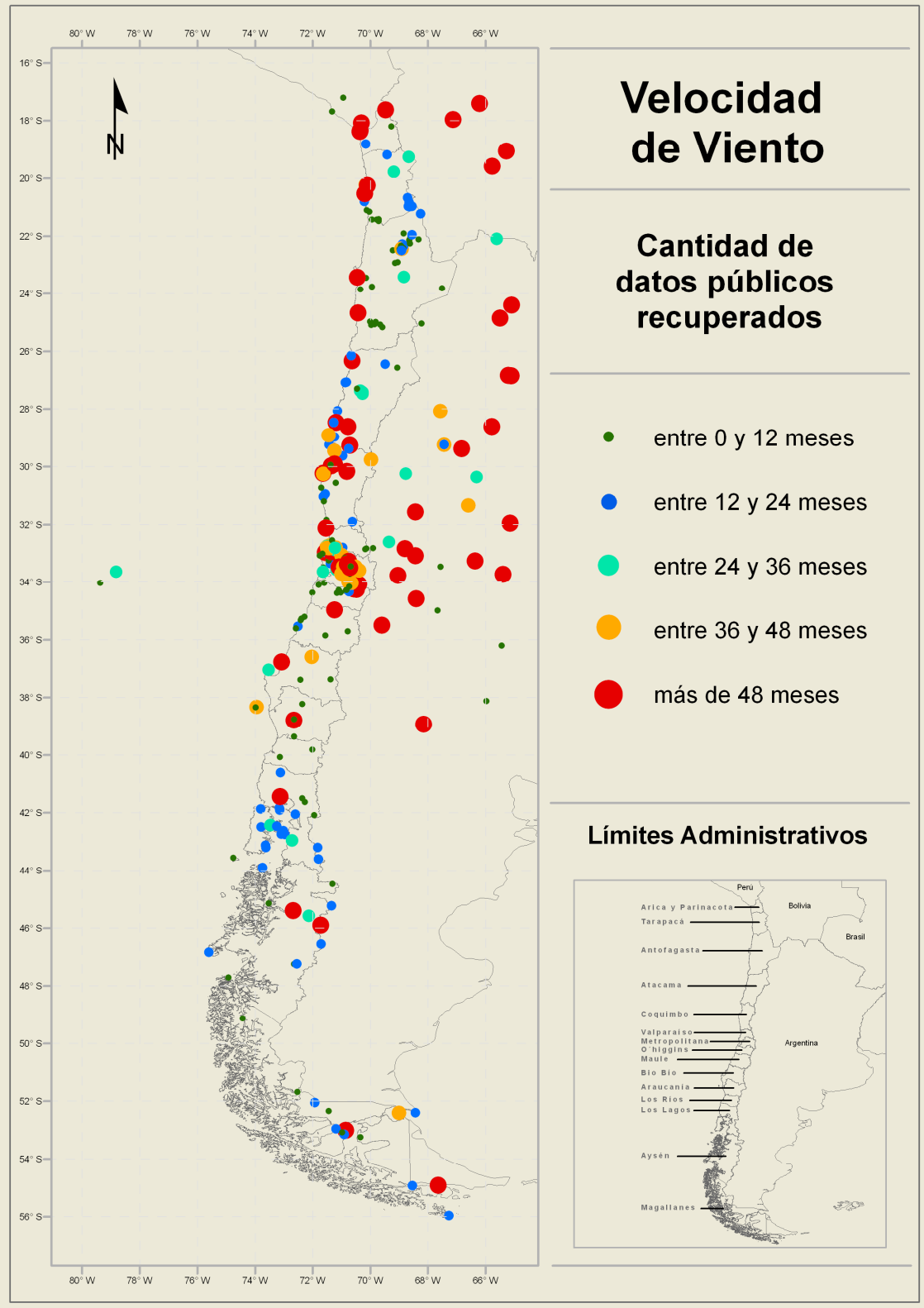

Figura A1.4: Reclasificación según cantidad de datos recuperados desde anemómetros

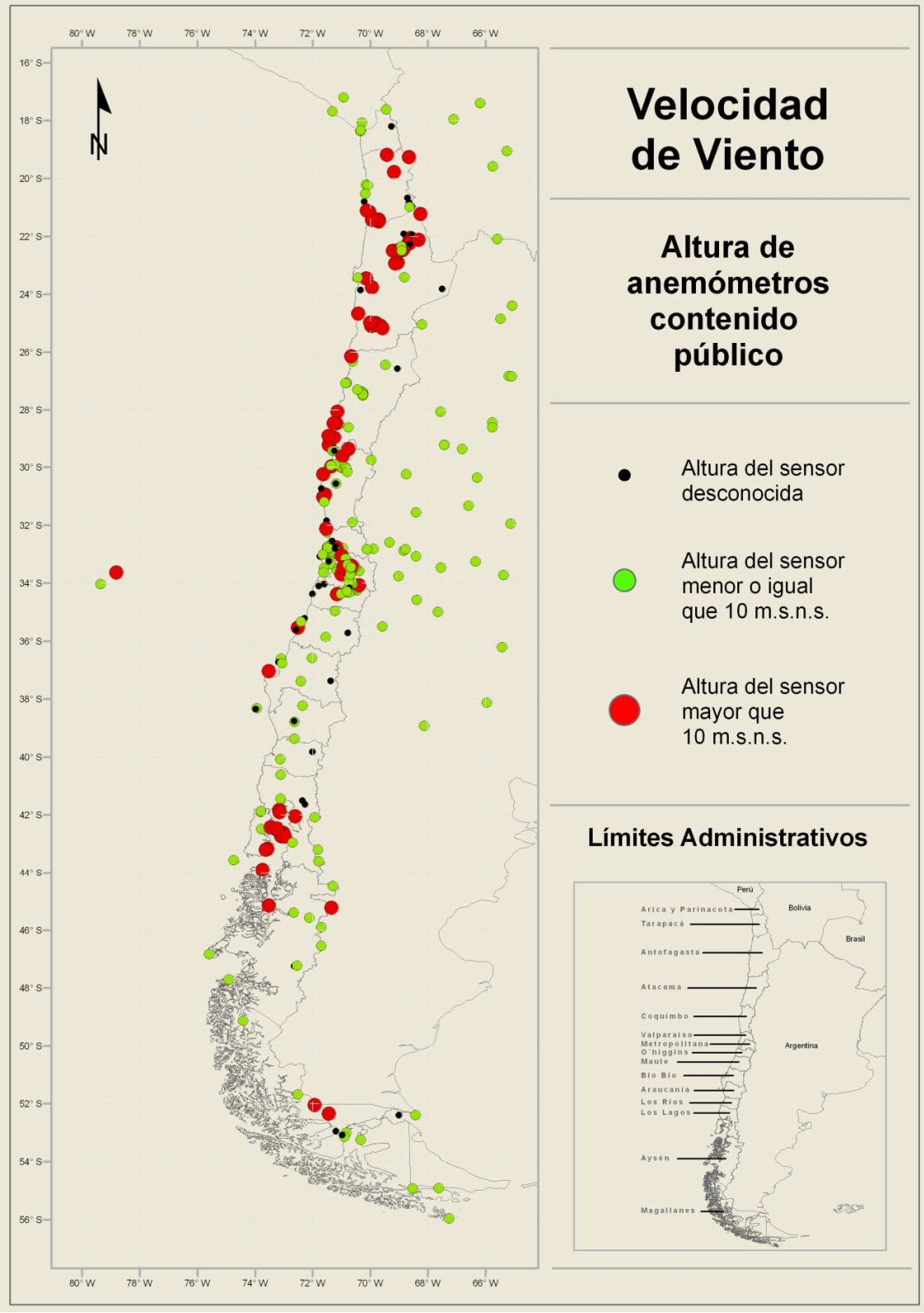

Figura A1.5: Reclasificación según altura de anemómetros

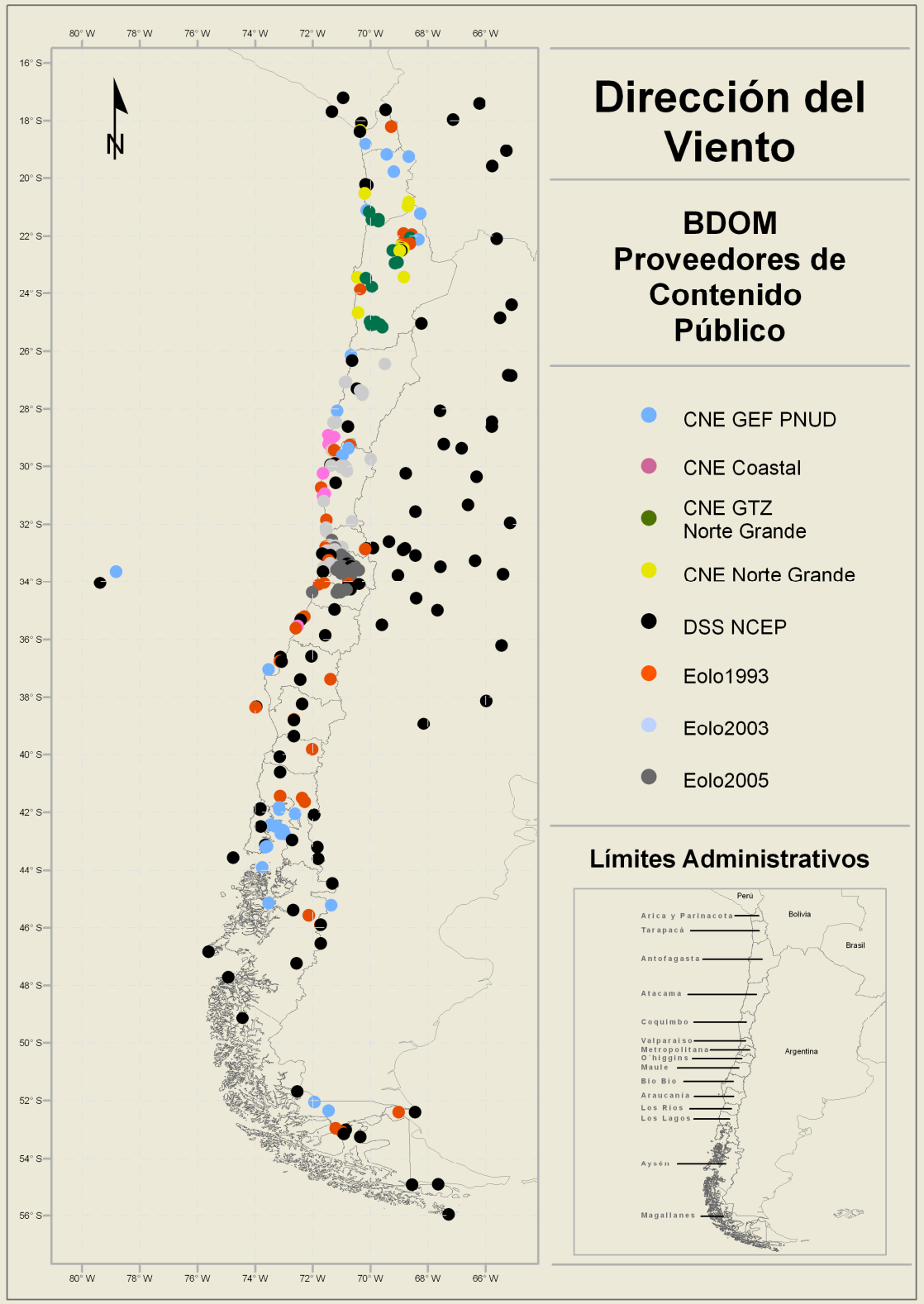

Figura A1.6: Distribución espacial de las estaciones públicas que poseen veletas

Altura del Anemómetro	Cantidad de Estaciones Meteorológicas
1m	3
2.5m	2
3.5m	1
3.8m	10
6m	2
9m	1
10m	176
12m	2
13m	2
15m	1
20m	14
22m	2
25m	1
33m	1
40m	1
45m	1
70m	1
10m y 20m	43
10m y 30m	3
10m, 20m y 30m	1
11m, 20m y 40m	1
20m, 30m y 40m	2
Desconocida	61

Tabla A1.3: Cantidad de estaciones meteorológicas públicas que poseen anemómetros a las alturas descritas.

Otra variable importante para los modelos Gaussianos es la cobertura nubosa. Ya que esta información generalmente sólo se obtiene a través de observaciones humanas ninguna de las estaciones cuenta con ella. Sin embargo, una alternativa para estimarla sería a través de las mediciones de radiación solar que sí se mide. La figura A1.7 muestra la distribución espacial de las estaciones públicas que miden radiación solar usando piranómetros. Queda en evidencia la escasa información sobre esta variable. Además, tal como lo indica la figura A1.8 que indica la cantidad de datos de radiación recuperados (en meses) es posible distinguir en ellas una mayor densidad de estaciones en el norte y en la Región de Los Lagos, pero que también en términos de cobertura temporal la información es deficiente.

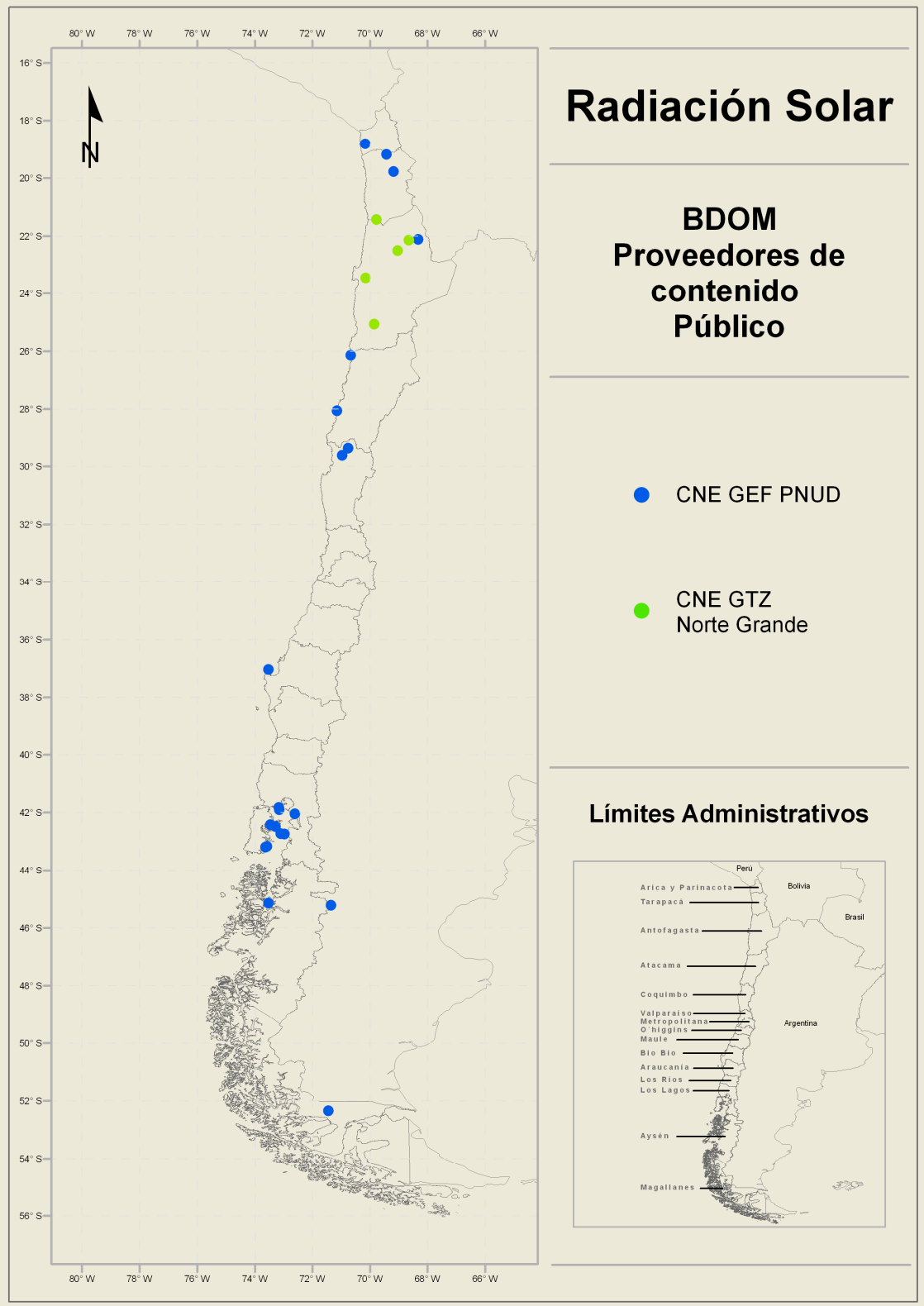

Figura A1.7: Distribución espacial de las estaciones públicas que poseen piranómetros

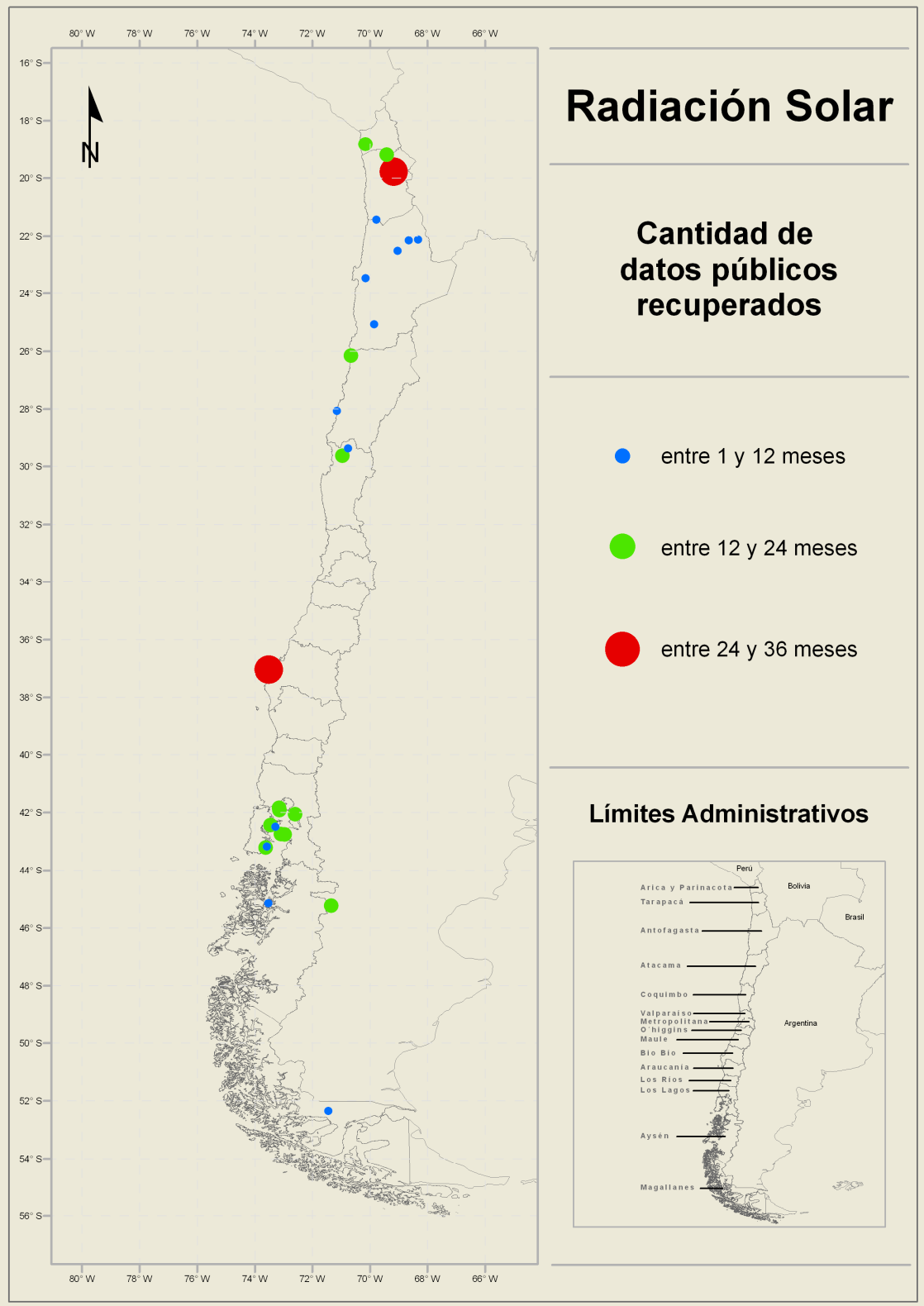

Figura A1.8: Reclasificación según cantidad de datos recuperados desde piranómetros.

ANEXO 2

Este anexo contiene las figuras equivalentes a las entregadas en los resultados de las secciones 5 y 6, pero para una fuente fija con altura de 20 metros.

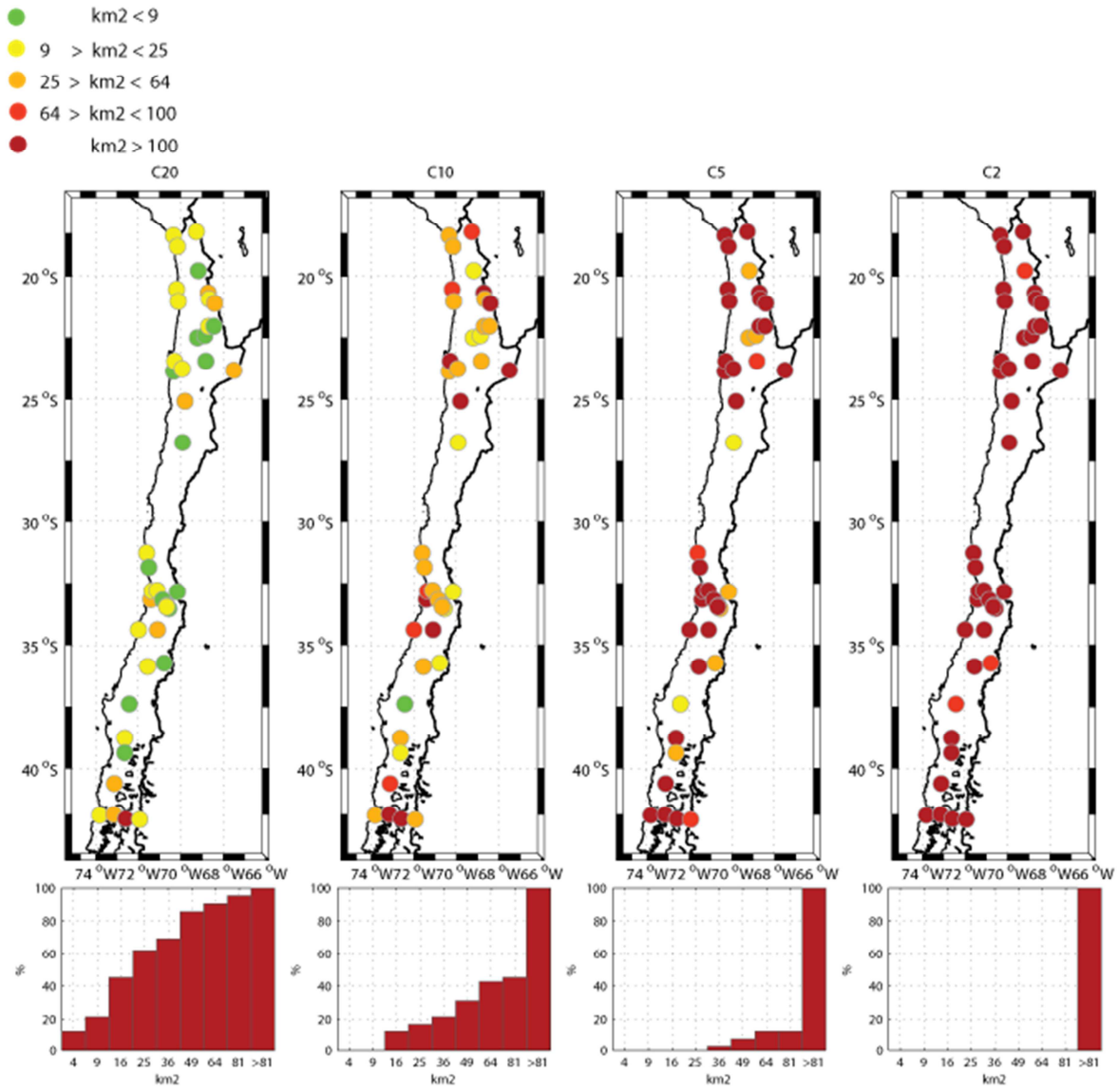

Figura A2.1: Equivalente a figura 5.7 pero con fuente fija a 20 metros de altura.

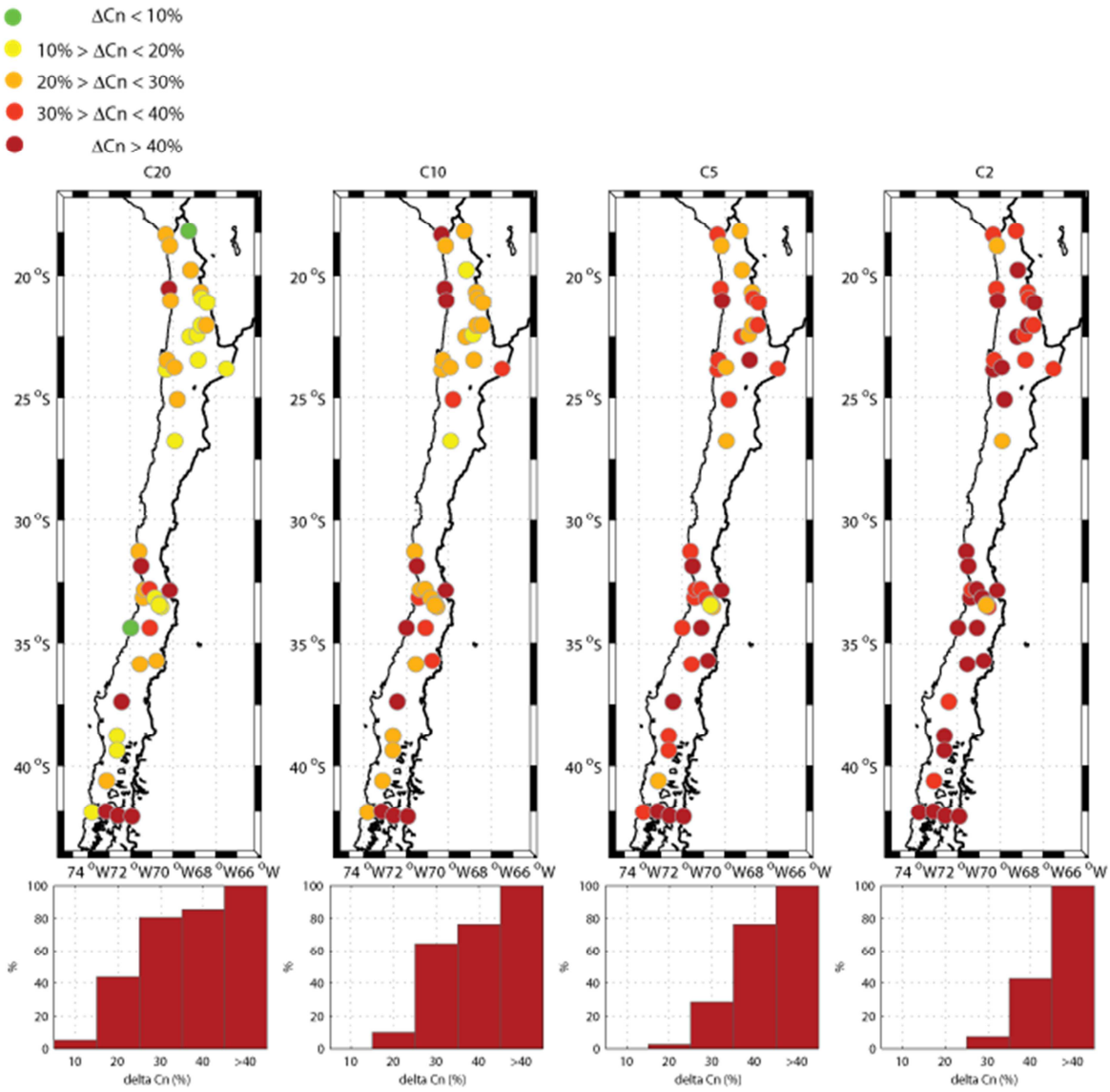

Figura A2.2: Equivalente a figura 5.8 pero con fuente fija a 20 metros de altura.

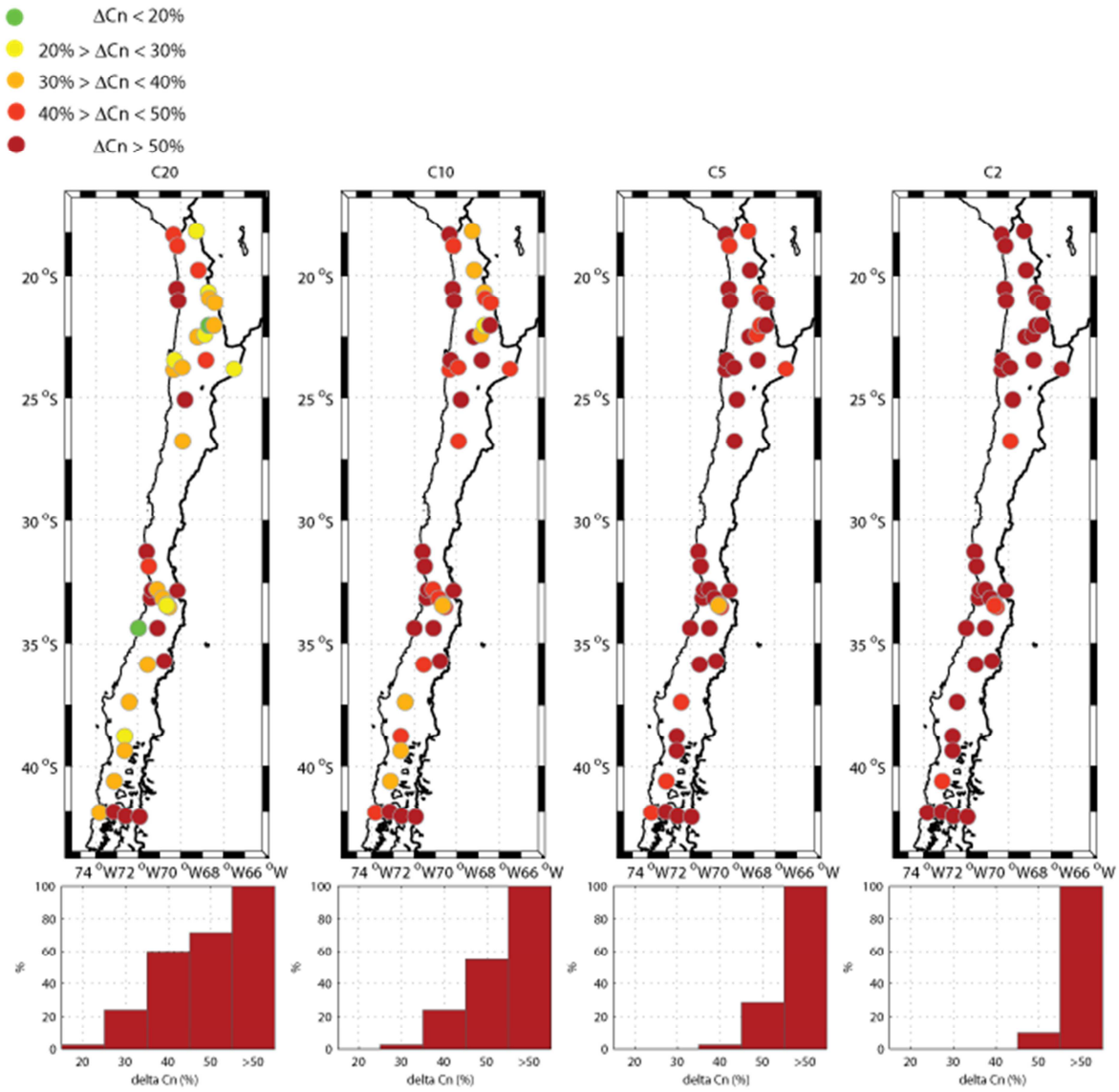

Figura A2.3: Equivalente a figura 5.9 pero con fuente fija a 20 metros de altura.

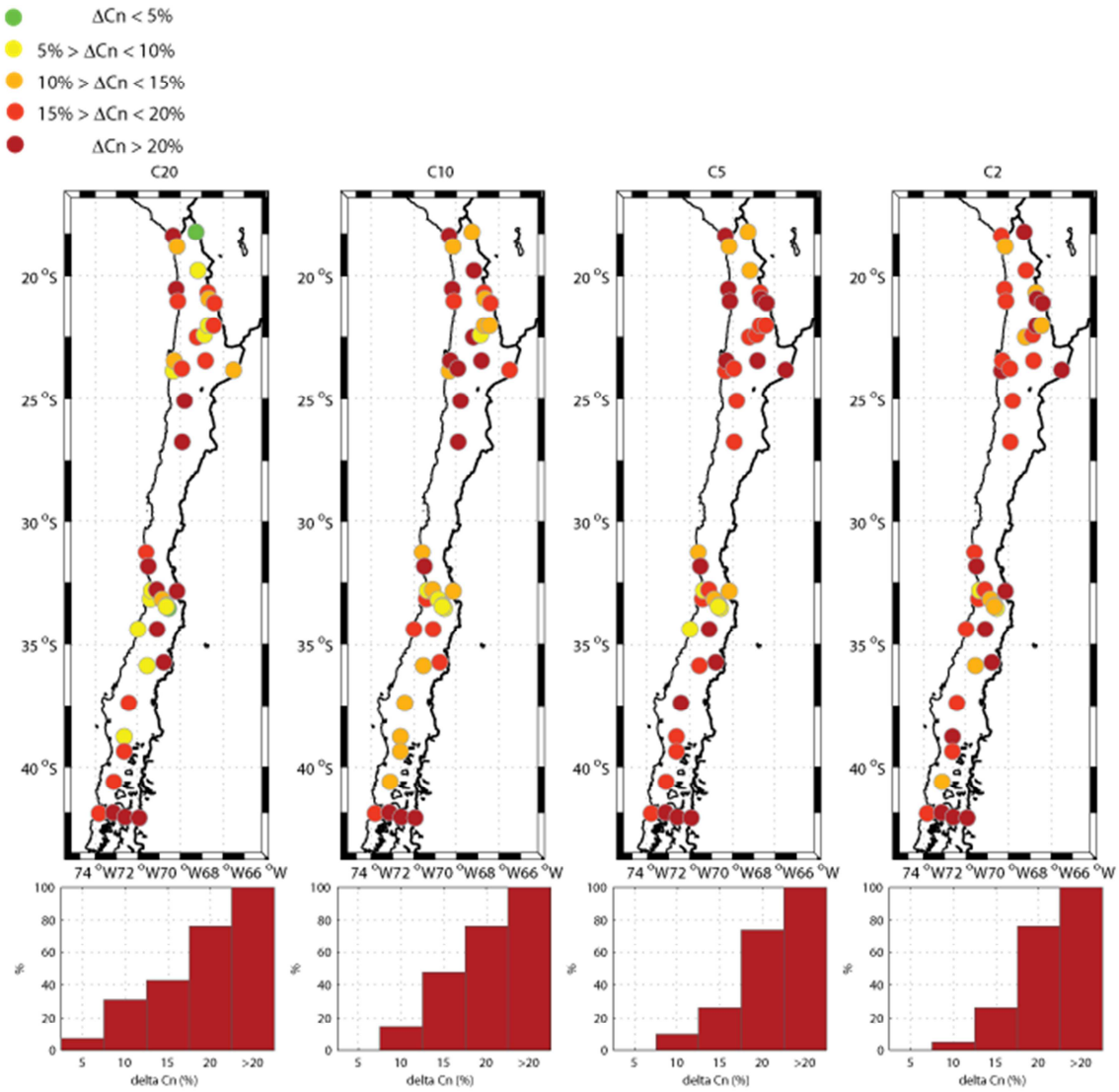

Figura A2.4: Equivalente a figura 5.10 pero con fuente fija a 20 metros de altura.

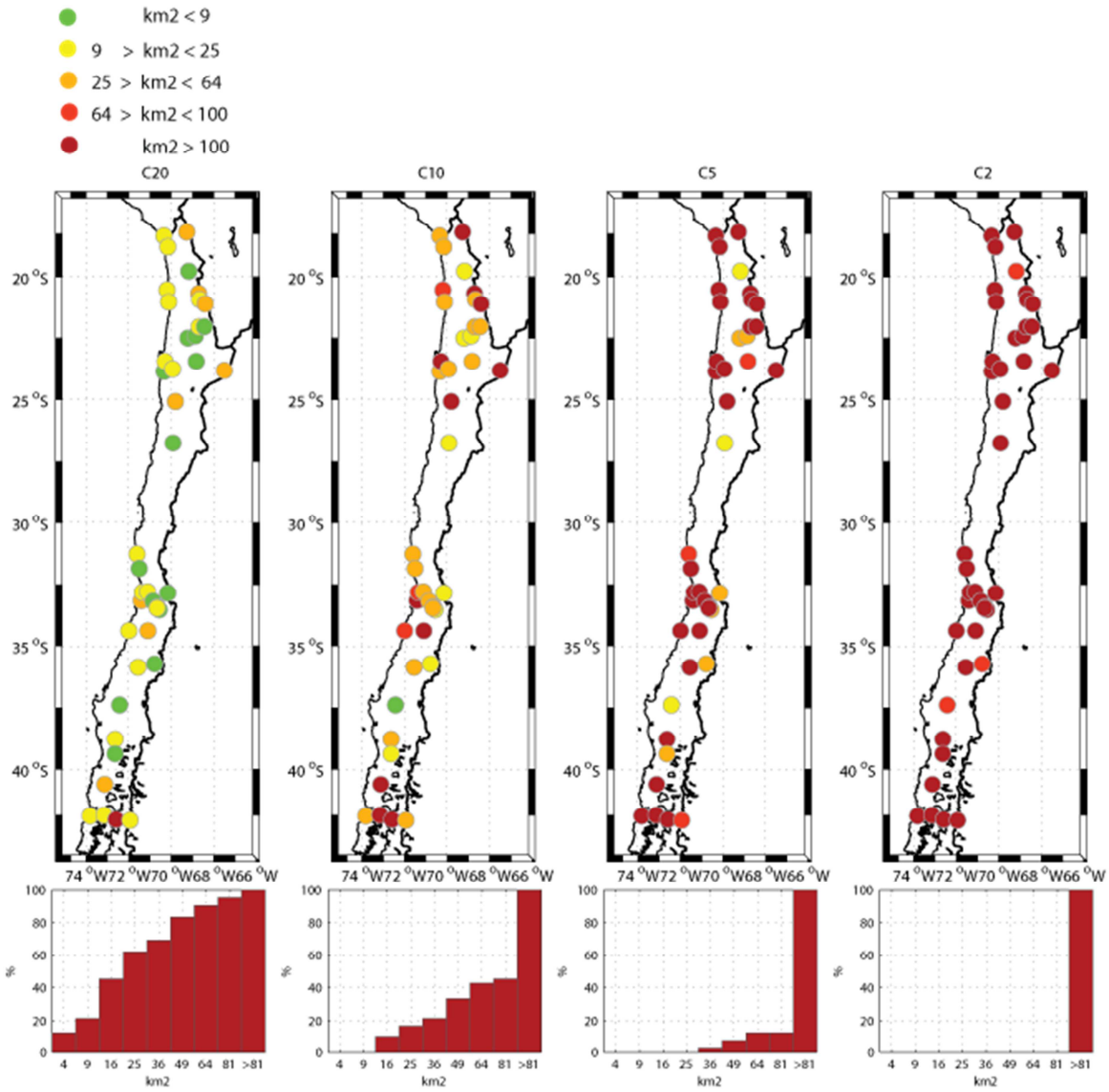

Figura A2.5: Equivalente a figura 5.12 pero con fuente fija a 20 metros de altura.

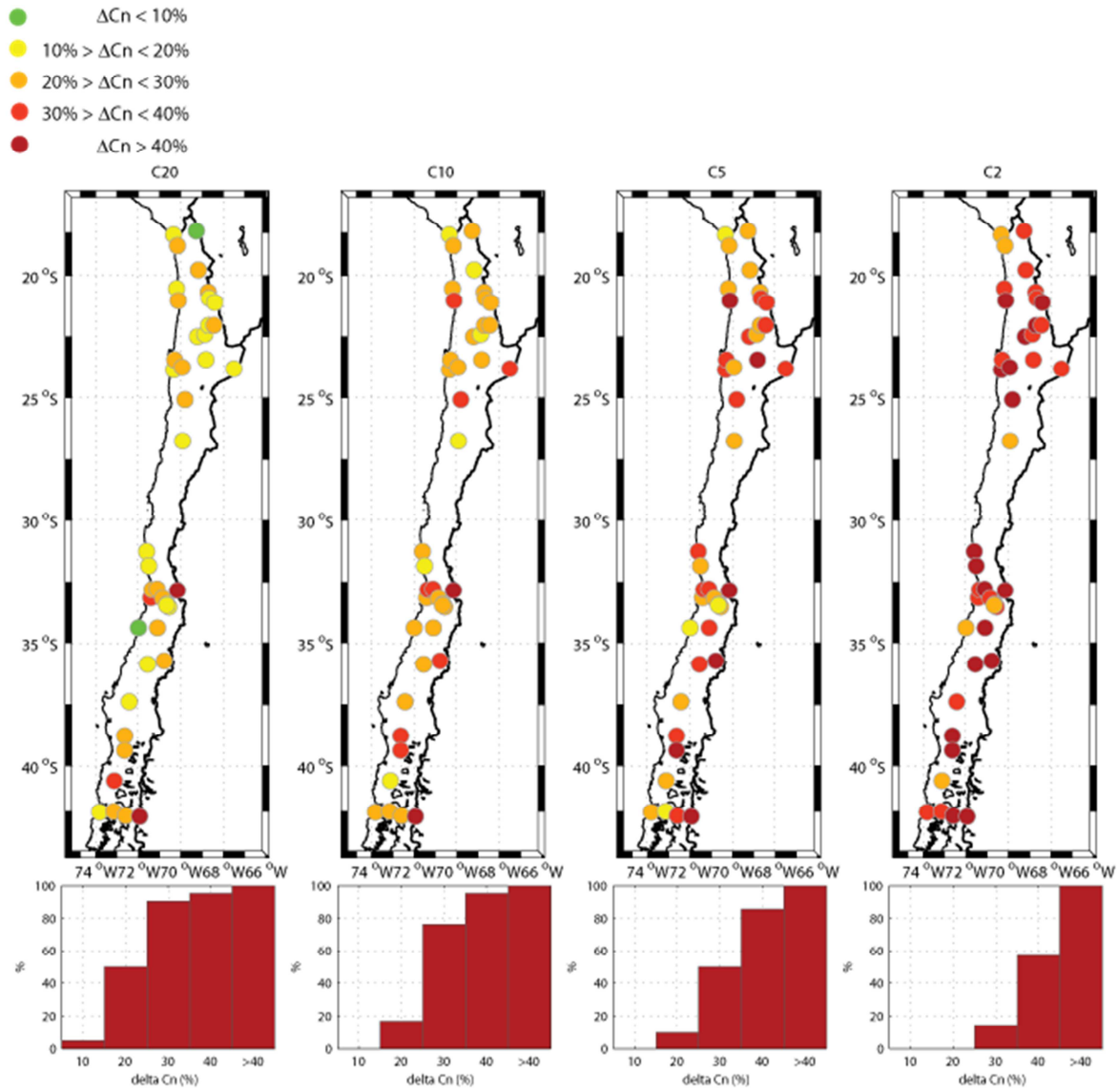

Figura A2.6: Equivalente a figura 5.13 pero con fuente fija a 20 metros de altura.

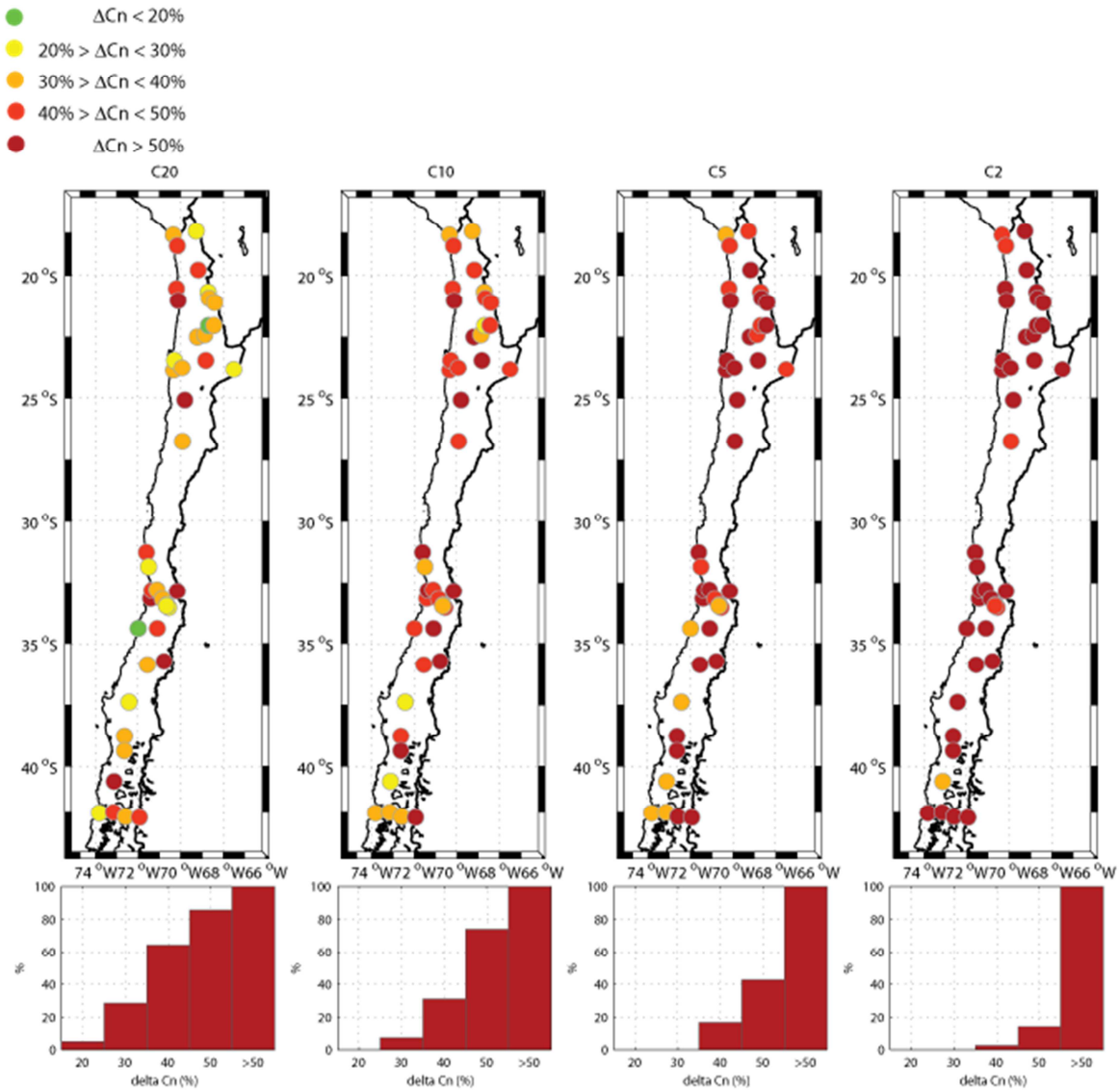

Figura A2.7: Equivalente a figura 5.13 pero con fuente fija a 20 metros de altura.

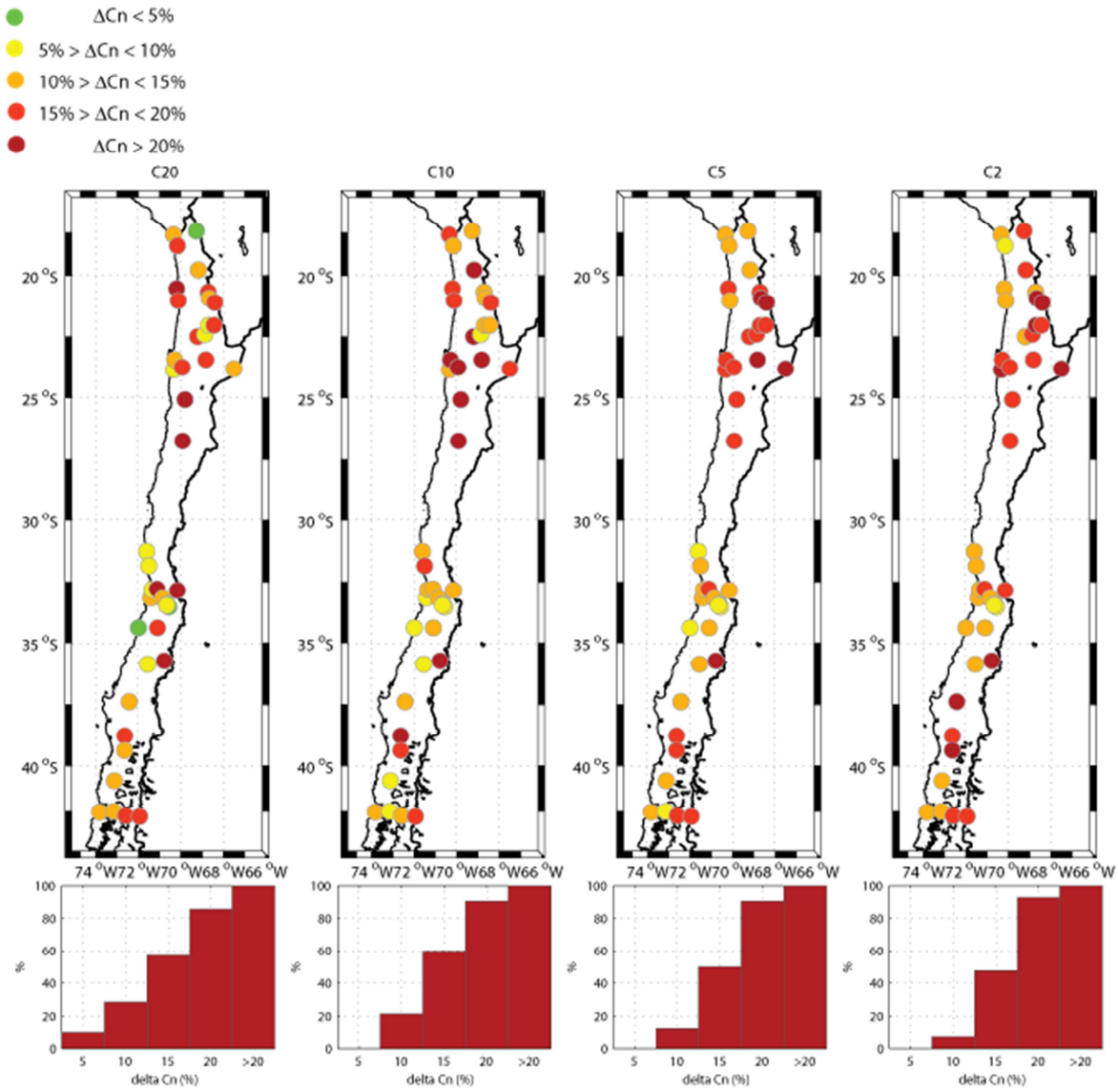

Figura A2.8: Equivalente a figura 5.14 pero con fuente fija a 20 metros de altura.