



UNIVERSIDAD Y TECNOLOGÍA
FUNDACIÓN PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Determinación de un índice de remoción de contaminantes atmosféricos para el territorio nacional

Informal Final

27 de Diciembre 2014

Preparado por

Fundación para la Transferencia Tecnológica

Para

El Ministerio de Medio Ambiente

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	2
Tabla de Figuras	3
Tablas	4
1 Resumen Ejecutivo	5
2 Introducción	10
3 Revisión bibliográfica y selección del Índice de Remoción.....	11
3.1 Aspectos generales.....	11
3.2 Índice de ventilación.....	12
3.3 Índice de estabilidad.....	16
3.4 Índice de recirculación	18
3.5 Experiencias Nacionales	20
3.6 Selección del Índice de Remoción	22
3.7 Definición del índice seleccionado	23
3.7.1 Remoción húmeda.....	24
3.7.2 Reacciones químicas y generación secundaria	25
3.7.3 Fuentes en altura.....	26
3.7.4 Recirculación	27
4 Metodología y Cálculo del Índice de Remoción	28
4.1 ¿Porque usar un modelo numérico?.....	28
4.2 El modelo WRF	29
4.3 Base de datos de simulaciones del recurso eólico	30
4.4 Cálculo del Índice de Remoción a Nivel País	33
4.4.1 Estimación de Índice de Remoción	33
4.5 Evaluación	37
4.5.1 Evaluación de la velocidad del viento	37
4.5.2 Altura de capa de mezcla	40
4.5.3 Relación con MP10	41
5 Entrega de Productos	43
5.1 Bases de datos geográficas y herramienta de visualización en-línea.....	43
Descripción de las Bases de datos geográfica	43
5.2 Índice de Remoción – Año Completo	43
Cálculo del promedio zonal del Índice de Remoción.....	45
5.2 Descripción de la herramienta de visualización de resultados en-línea.....	52

Tabla de Figuras

Figura 1 Ejemplo de mapas mensuales del índice de ventilación para la mañana (A) y tarde (B) para octubre calculado por Ferguson et al 2003. Rojo indica mala ventilación, amarillo es marginal, verde es moderado y gris significa buena ventilación. Esta figura es tomada de la figura 18 de Ferguson <i>et al</i> 2003.....	17
Figura 2 Ilustración de la definición del “wind run” S, “transport distance” L para un caso de T = 24 horas con observaciones en intervalos de 3 horas (Figura tomada de Allwine and Whiteman (1994).	19
Figura 3 Ejemplo del problema del índice de remoción para fuentes en altura. En el caso a la izquierda la chimenea está dentro de la capa de mezcla y el índice de remoción se aplica. Sin embargo en el caso de la derecha, la chimenea está por encima la capa de mezcla y en este caso el índice de remoción NO se aplica a la fuente en consideración.	26
Figura 4 Aspecto de la interfaz web del Explorador Eólico. Los colores indican el viento medio con un resolución espacial de 1 Km.....	33
Figura 5 Mapa del índice de ventilación calculado considerando todas las horas del día (izquierda), la noche (centro) y el día (derecha). No hay datos de modelación para el sector sur de la región de Aysén (campo de hielo sur).....	36
Figura 6 Diagrama de dispersión que representa la relación entre el promedio de viento observado desde estaciones meteorológicas y el simulado por WRF, tomando en consideración todos los meses de la simulación.	38
Figura 7 Distribución espacial de las estaciones públicas integradas a la BDOM y una reclasificación según la velocidad media observada (en m/s).....	39
Figura 8 Datos del nefobasímetro ubicado en la ciudad de Santiago que muestra el desarrollo de la capa de mezcla diurna. (Figura 2 en Muñoz y Undurraga, 2010).....	41
Figura 9 Relación entre el promedio de MP10 y el índice de remoción en el centro-sur de Chile. El promedio de MP10 contempla todo el periodo disponible en cada sitio. Se consideran sólo los sitios que cuentan con más de 6 meses de información.	42
Figura 10. Clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa ‘todo el día’ en periodo ‘invierno’ sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km por fuera del límite de la ciudad.....	47
Figura 11 Representación a nivel comunal de la clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa ‘todo el día’ en el periodo ‘todo el año’ sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km por fuera del límite de la ciudad. Se asigna valor Nulo a aquellas comunas en las que no existe superposición con la capa ‘Áreas Urbanas’ (subconjunto de datos según atributo “Ciudades”) descrita anteriormente	48
Figura 12 Representación a nivel comunal de la clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa ‘todo el día’ en el periodo ‘invierno’ sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km por fuera del límite de la ciudad. Se asigna valor Nulo a aquellas comunas en las que no existe superposición con la capa ‘Áreas Urbanas’ (subconjunto de datos según atributo “Ciudades”) descrita anteriormente	49
Figura 13 Representación a nivel comunal de la clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa ‘todo el día’ en el periodo ‘verano’ sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km por fuera del límite de la ciudad. Se asigna valor Nulo a aquellas comunas en las que no existe superposición con la capa ‘Áreas Urbanas’ (subconjunto de datos según atributo “Ciudades”) descrita anteriormente	50
Figura 14 Clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción a nivel regional para el periodo nocturno (20 a 08 hrs) año completo, invierno y verano.....	51
Figura 15. Vista inicial de la herramienta de visualización de resultados en-línea	52

Figura 16. Esquema que resume los componentes de la herramienta de visualización de resultados en-línea.....	53
--	----

Tablas

Tabla 1 Lista de referencias sobre el desarrollo y/o aplicación de índices para representar el potencial meteorológico para contaminación atmosférica. Se separan en las 3 categorías mencionadas anteriormente. Esta lista no es exhaustiva.	15
Tabla 2. Clasificación del Índice de Ventilación usado por Ferguson et al (2003).	15
Tabla 3 Definición del PMCA para MP10 Una versión más detallada se puede encontrar en Morales et al 2006, donde también se puede encontrar una versión de PMCA que ha sido desarrollado para Ozono.	21
Tabla 4 Intercomparación de los índices de remoción de contaminantes evaluados en este estudio.	23
Tabla 5. La reducción de la concentración debido a remoción húmeda estimada a partir de datos horarios de precipitación en diferentes localidades del país. Por ejemplo, en el sitio Río Llolléhue en la X ^o región donde la precipitación anual alcanza 1500 mm, la concentración considerando remoción húmeda es 95.8% de la concentración sin considerar este proceso. El cálculo supone una escala de tiempo de una hora ($\Delta t = 3600s$) para representar la remoción en el entorno de la fuente. Los datos de precipitación provienen de la red nacional hidrometeorológica operada por la Dirección General de Aguas.	25
Tabla 6 Configuración general de las simulaciones WRF del Explorador de Energía Eólica	32
Tabla 7 Parameterizaciones utilizadas en las simulaciones WRF. La esquema de capa límite QNSE (Quasi-Normal Scale Elimination) es el componente del modelo que estima continuamente la altura de la capa de mezcla.	32
Tabla 8 Categorización utilizada en el estudio de Ferguson et al (2003) para los Estados Unidos.....	35
Tabla 9 Altura de capa límite en la ciudad de Santiago basada en mediciones LIDAR para los años 2007 y 2008 (Muñoz y Undurraga 2010, Figura 7) y las simulaciones WRF para 2010. Las estadísticas se muestran para la época de invierno (izquierda) y verano (derecha).	40
Tabla 10. Resumen del contenido de las bases de datos geográficas.....	43
Tabla 11 Capas utilizadas para el cálculo del promedio zonal del Índice de Remoción	44
Tabla 12 Descripción de los campos contenidos en las capas de promedio zonal del Índice de Remoción.....	45

1 Resumen Ejecutivo

La calidad del aire es uno de los grandes problemas ambientales de Chile y afecta la salud de una proporción significativa de los habitantes del país, lo que hace necesario el desarrollo de herramientas para el diagnóstico de los factores que contribuyen a la contaminación en diferentes zonas del país.

Entre los factores que inciden en la calidad del aire de un lugar determinado, la meteorología juega un rol preponderante pero muchas veces difícil de caracterizar debido a la complejidad y rápida variación de los procesos atmosféricos involucrados. En este contexto, el Ministerio de Medio Ambiente ha encargado a la Fundación para la Transferencia Tecnológica (UNTEC) el desarrollo de un índice que permite contrastar la capacidad de remoción de distintas zonas del país de manera cuantitativa, objetiva y simplificada. Los objetivos específicos del estudio son: a) Proponer una metodología objetiva que permita estimar la capacidad de remoción de contaminantes para distintas zonas del país, y b) Estimar el índice de remoción de contaminantes utilizando la metodología propuesta.

El presente informe presenta el desarrollo y evaluación del índice de remoción de contaminantes para Chile. En lo que sigue se presenta un resumen de los principales resultados del estudio:

1) Definición del Índice de Remoción

Luego de una rigurosa revisión bibliográfica, se concluyó que el índice de remoción debe ser definido de la misma forma que el conocido “índice de ventilación” que ha sido utilizado en otros países para la gestión de calidad del aire. El índice de remoción para Chile (I_r) se define como el producto de la velocidad de viento en 10 metros (V_{10}) y la altura de capa de mezcla (h). Es decir:

$$I_r = V_{10}h$$

Las características claves del índice son las siguientes:

- El índice de remoción de contaminantes (I_r) cuantifica el nivel de remoción asociado a procesos meteorológicos de transporte horizontal y dispersión vertical para contaminantes emitidos dentro de la capa de mezcla.
- El índice debe tener una relación aproximadamente inversa con la concentración producida en el entorno de una fuente emisora ubicada dentro de la capa de mezcla.
- El uso de la velocidad de viento en 10 metros en vez de la velocidad media de la capa de mezcla, permite la evaluación de las estimaciones de viento y además

hace que los errores de viento sean independientes de errores en la estimación de la altura de mezcla.

- El índice de remoción NO considera procesos de remoción húmeda en condiciones de nubosidad o lluvia en la capa de mezcla. Este aspecto no tiene un impacto significativa en la representatividad del índice remoción (sección 3.7.1).
- El índice de remoción NO considera la remoción de contaminación debido a reacciones químicas (ver discusión en la sección 3.7.2).
- El índice de remoción NO representa procesos asociados con la recirculación de contaminación (ver discusión en la sección 3.7.3).
- El índice de remoción es valido para determinar el impacto de una fuente en su propio entorno pero no puede indicar el impacto en zonas aledañas ya que NO considera la dirección típica de transporte.
- El índice de remoción no está bien definido para fuentes elevadas (como chimeneas) cuyo punto de emisión supera la altura de la capa de mezcla. En esta situación el valor de I_r no está definido y por lo tanto el índice no es aplicable para este tipo de fuente (ver discusión en la sección 3.7.4).
- Dado que es poco común que la altura de la capa de mezcla este por debajo la altura de chimeneas (<100 metros) y considerando que las incertidumbres en la estimación de altura de mezcla son importantes, se recomienda usar el Índice de Remoción indiscriminadamente para fuentes en superficie y chimeneas.

2) Metodología de Cálculo

El índice de remoción se calculó para todo Chile utilizando datos de un modelo numérico de la meso-escala *Weather Research and Forecasting* (WRF). Las simulaciones fueron originalmente realizadas para construir un atlas de Energía Eólica para el Ministerio de Energía de Chile (MINENERGIA, 2012) y poseen campos de alta resolución espacial y temporal de viento y altura de capa de mezcla. La configuración del modelo WRF es consistente con la configuración recomendada por la guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA. Las características claves del cálculo son las siguientes:

- El índice de remoción se calculó para todo Chile continental con una resolución espacial de 1 km y intervalo temporal de 1 hora, para el año 2010.

- Antes de calcular el Índice de Remoción, se realizaron ciertos ajustes (detallados en la sección 4.4.1) para mejorar la calidad de las estimaciones de la altura de mezcla h entregados por el modelo WRF
- La simulación de viento ha sido extensivamente evaluada contra una base de datos de más de 400 sensores de viento a lo largo del país. El modelo muestra una muy buena comparación con las observaciones, la desviación estándar de la diferencia entre viento medio observado y simulado es igual a 1.1 m/s ($r = 0.9$)
- Debido a la escases de mediciones de la altura de la capa de mezcla (h) en Chile, no es posible determinar la incertidumbre en la estimación de la altura de mezcla de manera general. En Santiago se pudo comparar las estimaciones de h con una climatología basada en la mediciones de un instrumento denominado nefobasímetro, lo que revela que el modelo WRF tiende sobreestimar la altura de la capa de mezcla en este localidad (20% a 50% mayor que la altura real) . En la costa del Pacífico desde La Serena hacia el Norte la altura de mezcla es subestimado por el modelo, siendo entre 50% a 70% de la altura media real.
- La estimación de la altura de la capa límite se considera la fuente de incertidumbre más importante en el cálculo de I_r .
- Se identificaron sectores donde los valores de I_r se consideran menos confiables. Estas zonas incluyen la costa del centro y norte del país, el acantilado costero del Norte Grande y todas las zonas donde el terreno tiene pendiente mayor a 30°. Los datos entregados con este informe incluyen una capa que identifica las zonas de mayor incertidumbre.

La base de datos del Índice de Remoción fue utilizada para calcular campos del valor mediano del índice para todo el país para cada la hora del día y cada mes del año. Los resultados se disponen en formato GeoTIFF y GeoDatabase (estándar ESRI). Además, se ha levantado una sencilla herramienta disponible en línea que permite visualizar y analizar los datos de manera ágil e intuitiva sobre el servicio GoogleMaps®.

- Los mapas presentan el valor *mediano* de la distribución horaria de I_r . La mediana es usada en vez del promedio porque en general es más representativo del centro de la distribución de valores horarios. Note que el uso del valor mediano implica que los valores para I_r sean generalmente *menores* que los valores citados en otros estudios.
- Para categorizar los datos se utiliza una escala de color similar lo utilizado en el estudio de Ferguson et al (2003) para los Estados Unidos. La escala divide los valores de I_r en 4 categorías según la siguiente tabla:

Rango VI (m ² /s)	Categoría
0 a 1250	Pobre
1250 a 2500	Moderado
2500 a 3750	Buena
> 3750	Muy Buena

- Los mapas de I_r muestran un marcado patrón espacial caracterizado por condiciones de mala ventilación en el centro del país entre la VII^o y la IV^o regiones. En el Norte Grande la ventilación es más favorable salvo en ciertas franjas de la zona costera (donde la incertidumbre es mayor). Hacia el Sur, la ventilación tiende a aumentar. Entre la VII a X el índice de remoción se clasifica como moderada en el valle central (buena en la costa). Al sur de Puerto Montt hacia Punta Arenas, la ventilación es generalmente elevada.
- El índice muestra un marcado cambio entre el periodo nocturno y diurno. Sobre la mayor parte del país se experimentan malas condiciones de ventilación durante la noche, especialmente en el norte chico, la zona central y el centro-sur. Las regiones que experimentan ventilación moderada a buena en la noche se restringen al extremo sur del país, las cumbres de montañas, zonas costeras (aunque no todas) y zonas específicas del desierto del norte grande.
- El índice muestra un cierto contraste entre la estación de verano e invierno aunque este contraste no es tan marcado como la diferencia entre el día y la noche. Condiciones de ventilación son normalmente peores en los meses de invierno.
- Se debe recordar que los datos provienen de un modelo meteorológico para el año 2010 solamente. Por lo tanto los campos de I_r para meses y horarios principales se basan en el valor mediano de tan solo ~30 valores de un año específico. Para conseguir resultados más robustos, se calcularon campos agregados para el año completo, invierno (Abril a Septiembre) y el verano (Octubre a Marzo) y también para el día completo, el periodo nocturno (20:00 a 08:00) y el periodo diurno (08:00 a 20:00).
- Promedios zonales del I_r han sido calculados para algunas áreas de interés, tales como regiones, provincias, comunas y ciudades. La metodología utilizada ha sido descrita, y se presentan y evalúan ejemplos y resultados

Se considera que el índice de ventilación calculado para este proyecto como un primer paso hacia el desarrollo de una mejor caracterización de la calidad del aire en Chile. Aunque el índice de ventilación permite apreciar en una sola variable los rasgos meteorológicos más importantes, resulta evidente que el índice también representa una sobre-simplificación del fenómeno de remoción de contaminación atmosférica. Futuras iniciativas podrían considerar una aproximación más sofisticada y

multidimensional. De hecho, con la capacidad computacional disponible hoy en día es posible imaginar un servicio en-línea que permita efectuar dentro de unos minutos simulaciones completas de dispersión de contaminantes a partir una base de datos meteorológica pre-existente (del modelo WRF o similar) y un modelo de dispersión como CALPUFF o CAMx. Dicho servicio permitiría analizar en detalle el impacto de fuentes emisoras específicas tomando en cuenta los aspectos del problema que no se pueden representar con un simple índice, como por ejemplo la distancia entre la fuente y zonas pobladas, la posibilidad de recirculación, la elevación de la fuente emisora y otros procesos que afectan las concentraciones a las escalas local y regional.

2 Introducción

El presente reporte presenta los resultados del estudio “Determinación de un índice de remoción de contaminantes atmosféricos para el territorio nacional”. El estudio consiste en dos partes principales: Primero, una revisión bibliográfica y posterior discusión que tienen la finalidad de concretar la definición del índice de remoción más apropiado para Chile y segundo, la aplicación de dicha metodología para la estimación del índice sobre todo el país.

La estructura de este informe es la siguiente:

En el capítulo 3 se presenta la revisión de información bibliográfica sobre los índices de ventilación o el potencial meteorológico de contaminación atmosférica que han sido aplicados en otras partes del mundo. En base de lo anterior se define el índice de remoción a calcular y se comenta sobre su alcance e interpretación.

El capítulo 4 documenta la metodología utilizada para calcular el índice de remoción de contaminantes. Esta metodología es basada en el uso de datos de simulaciones numéricas de la atmósfera originalmente orientados a la caracterización de energía eólica a lo largo del país. Se describen las características principales del modelo meteorológico WRF junto a una descripción del método específico usado para el cálculo del índice de remoción.

El capítulo 5 describe las entregas asociadas a la presente iniciativa, que consisten en bases de datos geográficas del Índice de Remoción y pendiente de terreno, algunos ejemplos de su utilización bajo el acercamiento de promedios zonales aplicado en áreas de interés, finalizando con una descripción de la herramienta de visualización del Índice de Remoción en-línea.

Un resumen de los principales resultados del estudio y opciones para trabajo futuro están incluidos en el resumen ejecutivo que aparece al principio de este documento.

3 Revisión bibliográfica y selección del Índice de Remoción

En este capítulo se presenta la revisión de información bibliográfica que existe en materia de índices de ventilación o el potencial meteorológico de contaminación atmosférica que han sido aplicados en otras partes del mundo. Esa revisión recurre a la literatura científica, informes técnicos y descripciones de servicios de pronóstico disponibles en Internet. Además describe brevemente los antecedentes sobre el uso de índices de potencial de contaminación a nivel nacional, que, por razones obvias, es dominado por los estudios relacionados con el problema de calidad del aire en la ciudad de Santiago. Luego presenta una síntesis de la información obtenida en la revisión bibliográfica, lo cual permite la selección del Índice de Ventilación como el más apropiado para el presente estudio. Finalmente, se presenta la definición precisa del Índice de Remoción (I_r) que se usa en el resto del estudio y se agregan comentarios sobre su alcance y limitaciones.

La revisión bibliográfica aquí presentada se ha concentrado en la revisión de la literatura sobre el desarrollo y uso de índices de remoción (o ventilación) de contaminantes a nivel internacional. En particular, se ha enfatizado la búsqueda de documentos que dan cuenta de esfuerzos similares al presente estudio ya llevados a cabo en otros países, los cuales pueden servir como guía y respaldo de las metodologías que se adoptarán en el presente estudio.

3.1 Aspectos generales

La concentración de un contaminante emitido a la atmósfera depende de varios factores, entre los cuales la dispersión que se debe a procesos meteorológicos en el entorno de la fuente es fundamental. Los procesos de dispersión son conocidos por su gran complejidad, ya que dependen de movimientos turbulentos que son difíciles de resolver incluso con los más avanzados modelos numéricos. Sin embargo, es sabido que tanto el viento como la estabilidad de la atmósfera juegan papeles de primer orden.

El viento, en particular su velocidad, determina el transporte del contaminante una vez que se emite a la atmósfera. Mayor viento sobre el punto de emisión se asocia con una dilución más eficiente del contaminante y tiende a reducir la concentración en el entorno de la fuente. En este contexto, son de especial interés para la calidad de aire las condiciones calmas en que el movimiento del aire es prácticamente nulo. Estas condiciones de estancamiento pueden ser críticas para fuentes emisoras a nivel de superficie, ya que los contaminantes se acumulan en su lugar de origen y la concentración aumenta en el tiempo.

Por otra parte, la estructura vertical de la temperatura determina la estabilidad del aire cerca de la fuente que, a su vez, controla la dispersión del contaminante por dispersión turbulenta en la vertical. Condiciones de mayor estabilidad tienden a

asociarse con mayores concentraciones ya que se inhibe la mezcla de contaminantes emitidas cerca de la superficie con las capas del aire superiores. En el contexto nacional, la formación de inversiones térmicas que se desarrollan cerca del suelo y durante las horas de la noche es uno de los fenómenos más relevantes para la generación de episodios críticos.

En la literatura internacional se puede encontrar varias referencias a índices diseñados para representar y/o categorizar las condiciones atmosféricas que tienen una alta potencial de contaminación atmosférica. Esos índices generalmente se usan como herramienta de gestión de calidad del aire en zonas urbanas o para el control de quema de leña tanto en zonas urbanas como rurales.

A grandes rasgos, los índices que han sido hallados se pueden agrupar en 3 categorías:

- 1) **Índice de ventilación** basada en la altura de capa de mezcla y el viento
- 2) **Índice de potencial meteorológico de contaminación atmosférica** basada en la estabilidad y posiblemente el viento
- 3) **Factor de recirculación** basado en la evolución temporal del viento

La Tabla 1 contiene un resumen de las publicaciones que han sido encontrados y que desarrollan o utilizan dichos índices. En las siguientes secciones se describe en mayor detalle los antecedentes pertinentes a cada uno de los tres tipos de índice.

3.2 Índice de ventilación

Por lejos el índice más común que se encuentra en la literatura es el llamado Índice de Ventilación (VI), que en inglés es denominado como el *Ventilation Index* o *Venting Index* o *Clearing Index*.

El VI supone que las concentraciones de contaminantes emitidas de una fuente cerca de la superficie dependen de dos factores: 1) el espesor de la llamada “capa de mezcla” en que se distribuyen los contaminantes y 2) la tasa de remoción debido al viento dentro de esta capa. Entonces, el índice de ventilación normalmente se define como el producto del espesor de la capa de mezcla superficial por el viento dentro de la capa. Es decir:

$$VI = h\bar{V}$$

donde h es la altura de la capa y V es el viento medio. Definido así, el índice VI representa efectivamente el flujo (con unidades de m^2/s) por el que se dispersan los contaminantes emitidos en la superficie durante un determinado periodo de tiempo. Un mayor VI indica dispersión a través de un flujo mayor y, por ende, menores concentraciones de contaminantes y mejor calidad del aire.

Esta formulación del índice fue originalmente propuesta por Holzman (1967) y desde entonces ha sido mencionado y utilizado en numerosas publicaciones e informes técnicos a nivel internacional, tanto para el control de contaminación urbana como para la regulación de combustión en fuegos abiertos. La Tabla 1 (parte superior) muestra la lista de publicaciones encontrados. Se puede apreciar que el índice de ventilación ha sido aplicado en diversos lugares en el mundo (Estados Unidos, Europa, Asia) y en trabajos recientes (como Wu 2013 lo que indica que este índice, a pesar de su antigüedad, sigue siendo relevante hoy en día).

Cabe señalar que la definición exacta de la altura de capa de mezcla h no está cien por ciento consensuado dentro de la comunidad científica. En una revisión extensa sobre las maneras de determinar la altura de mezcla Seibert et al (1997) Comentarón que “existen tantas definiciones de la altura de mezcla como estudios sobre ella”. La definición que finalmente adoptaron es la siguiente, que también servirá como definición general para el presente trabajo: *La altura de mezcla (h) es la altura de la capa adyacente a la superficie sobre la cual contaminantes emitidos dentro de la capa se dispersan verticalmente a través de convección o turbulencia mecánica dentro de una escala de tiempo de aproximadamente una hora.*

La ecuación para VI es relativamente sencilla y su interpretación física es muy intuitiva. Sin embargo, el cálculo o la estimación de los parámetros h y V en cualquier sitio requiere conocimiento de la estructura vertical de la temperatura y el viento. En la literatura existe mucha discusión sobre los métodos que se deben utilizar para calcular la altura de la capa de mezcla a partir de datos de radiosonda o modelos numéricos. En general h se determina a través del método de levantamiento de parcelas, originalmente descrito en Holzworth 1967. En esta metodología la altura de la capa de mezcla se calcula como la altura donde una parcela de aire, levantado adiabáticamente desde la superficie, obtiene una temperatura menor que la temperatura ambiental en la misma altura. Modificaciones a esta metodología han sido propuestas para tomar en cuenta inversiones nocturnas y otros casos cuando efectivamente no hay capa de mezcla (que suele ocurrir en las cumbres de cerros) (Fergusen et al 2003). Cabe señalar que los modelos numéricos modernos, tanto regionales como globales, generalmente calculan continuamente la altura de la capa de mezcla durante la integración numérica (ver sección 4.3 para una descripción del método usado por las simulaciones WRF del presente estudio).

Autor	Año	Título	Revista	Lugar
-------	-----	--------	---------	-------

Índice de Ventilación basada en la altura de capa de mezcla:				
Holzworth	1967	Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States	Journal of applied meteorology*	EE. UU.
Jackman et al	1977	Some meteorological aspects of air pollution in Utah with emphasis on the Salt Lake Valley	NOAA technical Memorandum	Utah, EE. UU.
Ferguson et al	2003	Assessing Values of Air Quality and Visibility at Risk From Wildland Fires	Research Paper, United States Department of Agriculture	EE. UU.
Wu et al	2013	Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the Pearl River Delta in China	Atmospheric Chemistry and Physics*	China
Gross	1970	The National Air Pollution Potential Forecast Program	Technical Note, Environmental technical applications center	EE. UU.
Pope	1989	Respiratory Disease Associated with Community Air Pollution and a Steel Mill, Utah Valley	American Journal of Public Health	Utah, EE. UU
Eugensson et al	2005	Development of a New Meteorological Ventilation Index for Urban Air Quality Studies	Technical Note, Sweedish meteorological Institute	Sueia
Ferguson et al	2003	Regional Pollution Potential in the Northwestern United States	Technical report, U.S. Department of Agriculture, Forest Service	Oregon, EE. UU.
Índice de potencial meteorológico de contaminación atmosférica basada en la estabilidad				
Joukoff	1982	Daily forecasting of Air Pollution Potential	Atmospheric pollution 1982 (Acta del congreso)	Bélgica
Morales	2006	PMCA y material particulado MP10	Contaminación atmosférica Urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en Santiago (libro)	Santiago de Chile
Williams	1963	Air pollution potential over Salt Lake Valley of Utah as related to stability and Wind Speed	Journal of Applied Meteorology*	Utah, EE. UU.
Niemeyer	1960	Forecasting Air Pollution Potential	Monthly Weather Review*	EE. UU.
Mitsumi	1999	Development of an objective forecasting algorithm for Santiago using Model Output Statistics.	Japanese Meteorological Agency	Santiago
Termonia et al	2003	A New Transport Index for Predicting Episodes of Extreme Air Pollution	Journal of Applied Meteorology*	Bélgica
Factor de recirculación RF				
Allwine and Whiteman	1994	Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation	Atmospheric Environment	Arizona, EE. UU.
Venegas et al	1999	Atmospheric stagnation, recirculation and ventilation potential of several sites in Argentina	Atmospheric Research*	Argentina
Wu et al	2013	Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality	Atmospheric Chemistry and Physics*	China

		over the Pearl River Delta in China		
Pasch et al	2011	Meteorological characteristics associated with PM2.5 air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009 - 2010 Cleveland Multiple Air Pollutants Study	Atmospheric Environment	Ohio, EE. UU.

Tabla 1 Lista de referencias sobre el desarrollo y/o aplicación de índices para representar el potencial meteorológico para contaminación atmosférica. Se separan en las 3 categorías mencionadas anteriormente. Esta lista no es exhaustiva.

El valor de VI típicamente varía entre 0 y 10000 m²/s, con cualquier valor por sobre 3000 m²/s indicando buenas condiciones de ventilación. A modo de ejemplo, la Tabla 2 muestra la escala categórica del índice de ventilación usada por Ferguson et al (2003). Note que en algunas aplicaciones del VI se aplican factores de escala para obtener resultados en rangos “cómodos” como 0 a 100 m²/s o 0 a 1000 m²/s.

Rango VI (m ² /s)	Categoría	Inglés (original)
0 a 1175	Pobre	Poor
1176 a 2350	Marginal	Marginal
2351 a 3525	Moderado	Fair
> 3525	Buena	Good

Tabla 2. Clasificación del Índice de Ventilación usado por Ferguson et al (2003).

El VI ha sido utilizado para la caracterización espacial del potencial de contaminación atmosférica. En particular, en el estudio de Ferguson *et al*, (2003) utilizaron datos de radiosonda junto con un modelo numérico para estimar el VI con alta resolución espacial para todo EE. UU. continental y generaron mapas de VI para diferentes estaciones y horarios, tal como se pretende hacer en el presente estudio. Ejemplos de los mapas del índice de ventilación lograda en este estudio se muestran en la Figura 1. Cabe señalar que en el estudio de Ferguson et al el índice de ventilación fue definido en términos de la velocidad de viento en 10 metros (V_{10}) en vez de la velocidad media en la capa de mezcla. Las ventajas de este definición se discuten en la sección 3.7.

En la actualidad se encuentran varios servicios operativos que pronostican rutinariamente el VI. Estos incluyen el Utah, Salt Lake Clearing Index¹ y el British Columbia Venting Index². Ambos servicios se aplican principalmente para el control de combustión a fuego abierto.

¹ <http://www.airmonitoring.utah.gov/clearingindexarchive/>

² <http://www.bcairquality.ca>

3.3 Índice de estabilidad

En la literatura internacional se encuentran referencias a otros índices, similares al VI pero basadas en la estabilidad atmosférica en vez del espesor de la capa de mezcla. La estabilidad del aire (que depende esencialmente del gradiente vertical de la temperatura) cerca de la fuente controla la dispersión del contaminante por dispersión turbulenta en la vertical. Condiciones de mayor estabilidad tienden a asociarse con mayores concentraciones ya que se inhibe la mezcla de contaminantes emitidas cerca de la superficie con las capas del aire superiores. De aquí en adelante se referirá a esta clase de índice con el término general IE (Índice de Estabilidad).

La Tabla 1 (parte central) muestra las publicaciones encontradas que hacen referencia a, o utilizan, índices tipo IE. La definición de IE no es tan uniforme como el índice de ventilación, ya que cada estudio tiende a definir su índice de manera *ad-hoc*, dependiendo de las características del lugar de estudio y los datos disponibles. Un aspecto común que todos comparten es la utilización del gradiente de temperatura en la formulación del índice.

A modo de ejemplo, las ecuaciones abajo muestran la formulación del índice PMCA usado por Jaukoff (1980) para varias ciudades en Bélgica:

$$s = 10 \frac{H_d}{H} - 9$$

$$IE = \frac{25 - T}{\sqrt{v} s}$$

Donde H es el espesor de la capa de aire entre las alturas de 1000 hPa y 700 hPa y H_d es la altura que la misma capa tendría en condiciones de estabilidad neutra. El valor de H_d/H depende únicamente de la estabilidad del aire dentro de esa capa. Además, la ecuación incluye un término \sqrt{v} junto con la temperatura T (que en este caso es utilizado para representar el efecto del uso de fuentes de calor de hogares).

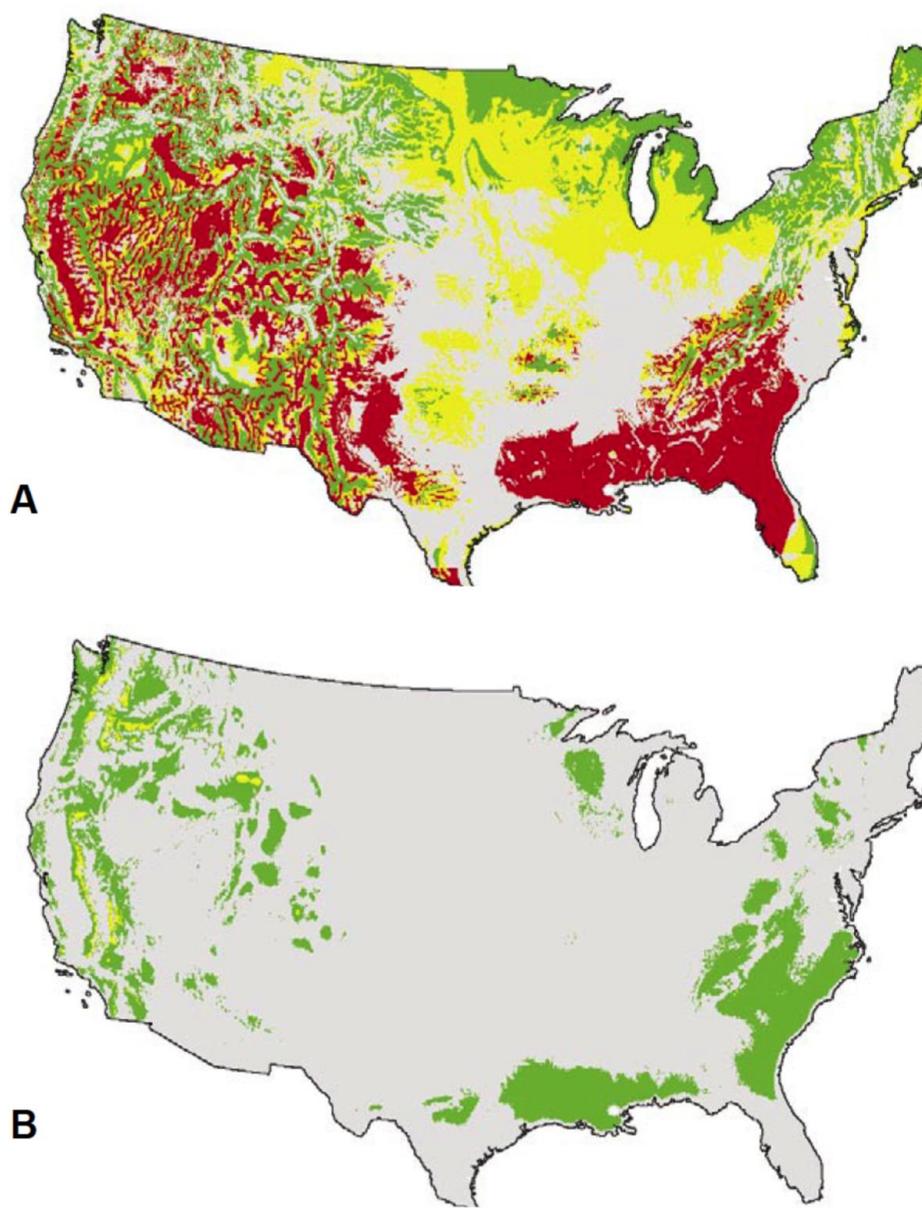


Figura 1 Ejemplo de mapas mensuales del índice de ventilación para la mañana (A) y tarde (B) para octubre calculado por Ferguson *et al* 2003. Rojo indica mala ventilación, amarillo es marginal, verde es moderado y gris significa buena ventilación. Esta figura es tomada de la figura 18 de Ferguson *et al* 2003.

Como otro ejemplo se presenta a continuación el índice documentado en Termonia *et al* (2003). En ese trabajo, el índice fue denominado como una “escala de longitud” (L) para la dispersión. Según Termonia *et al*, el IE se puede definir con la siguiente ecuación:

$$IE = \bar{u} \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz}}$$

donde u es la velocidad del viento cerca de superficie, θ es la temperatura potencial y $\partial\theta/\partial z$ es el gradiente vertical de la temperatura potencial. Note que este índice es definido solo para condiciones estables ($\partial\theta/\partial z > 0$).

3.4 Índice de recirculación

Otro índice mencionado a menudo en la literatura es el llamado “factor de recirculación” o *recirculation factor* en inglés (RF). El factor de recirculación trata de cuantificar eventos de recirculación de flujo que generalmente se asocian con una alta potencial de contaminación atmosférica. En este tipo de flujo, parcelas del aire (contaminado) inicialmente se transportan lejos de la fuente pero luego, debido a cambios en la dirección de viento, se devuelven a su lugar de origen. El factor de recirculación fue introducido en términos formales por Allwine and Whiteman (1994). El cálculo del RF requiere como insumo una secuencia temporal de mediciones de velocidad y dirección de viento en un cierto sitio. Dada una serie de viento V_j de intervalo T , es posible definir el factor de recirculación de la siguiente manera:

$$S_i = T \sum_{j=i}^{i+p} |\vec{V}_j| \quad \text{wind run}$$

$$X_i = T \sum_{j=i}^{i+p} u_j \quad \text{distancia oeste - este}$$

$$Y_i = T \sum_{j=i}^{i+p} v_j \quad \text{distancia norte - sur}$$

$$L_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad \text{distancia de transporte resultante}$$

$$R_i = 1 - \frac{L_i}{S_i} \quad \text{Factor de recirculación}$$

Donde V_j es la velocidad de viento en la hora j , u es el componente este-oeste de la velocidad y v es el componente norte-sur de la velocidad. Como se puede apreciar, el factor de recirculación (R_i) se define como el ratio de la distancia de transporte de un contaminante a la distancia de transporte escalar y su valor varía entre 0 y 1. Un valor $RF = 0$ indica transporte en una línea recta, mientras un valor de $RF = 1$ indica que no hay transporte neto. El $RF = 1$ puede ocurrir debido a una recirculación perfecta (aire que efectivamente se devuelve al lugar de origen durante el periodo considerado) o que simplemente la velocidad del viento se mantiene calma (condición de

estancamiento, $V = 0$). La figura 2 proporciona un diagrama que ayuda a la interpretación de las ecuaciones que definen el RF.

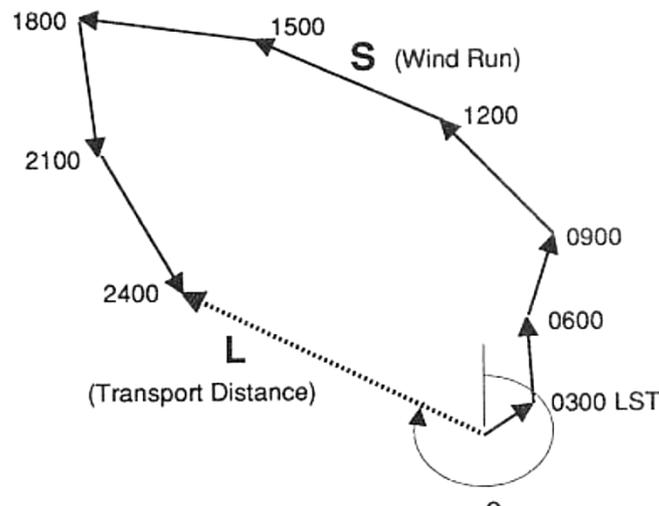


Figura 2 Ilustración de la definición del "wind run" S, "transport distance" L para un caso de $T = 24$ horas con observaciones en intervalos de 3 horas (Figura tomada de Allwine and Whiteman (1994)).

La Tabla 1 (parte inferior) contiene una lista de algunos estudios que han ocupado el índice de recirculación. El índice de recirculación ha sido utilizado en estudios en diversos países como Estados Unidos, China y Argentina.

Si bien el RF entrega información interesante sobre la circulación atmosférica relevante para episodios de contaminación, tiene algunas limitaciones importantes en el contexto de los objetivos del actual estudio:

- Toma en cuenta solo la velocidad horizontal del viento en un determinado lugar. No toma en cuenta la dispersión vertical que es un mecanismo de dispersión muy importante en muchos flujos reales.
- No se puede calcular para un instante. Se tiene que usar una secuencia de mediciones (Normalmente se usa un día de observaciones) por lo tanto no es posible generar estimaciones de este índice a nivel horario.
- El índice es diseñado para caracterizar solo la recirculación del flujo. Sin embargo, existen otras situaciones (inversiones térmicas) que son adversas en el contexto de calidad del aire que no se representan con el RF.

3.5 Experiencias Nacionales

Prácticamente todos las aplicaciones de índices de remoción de contaminación en Chile tienen que ver con el problema general de calidad del aire en Santiago.

Una referencia fundamental para el caso de Santiago es “*Meteorological Air Pollution Potencial for Santiago, Chile: Towards an Objective Episode Forecasting*” de Rutllant y Garreaud (1995). En este trabajo se identificaron las estructuras sinópticas que se asocian con episodios de contaminación en la ciudad y además se definió un *Meteorological Air Pollution Potencial Index* (MAPPI) en términos de variables meteorológicas medidas por la estación de radiosonda en Qunitero. La ecuación para MAPPI propuesta por Rutllant y Garreaud (1995) era:

$$\text{MAPPI} = 0.18T_{900} + 0.05DT_{900} - 2.29$$

Donde T_{900} es la temperatura en 900 hPa y DT_{900} es la 24 hora tendencia de la temperatura en la misma altura. Cabe señalar que en el caso de la cuenca de Santiago, el valor de la temperatura en 900 hPa durante la mañana es bastante representativo de la estabilidad nocturna. Sin embargo, esto es un aspecto particular a la zona geográfica de su estudio y no se espera que la misma relación sea aplicable a otras lugares. Por lo tanto, las conclusiones del estudio de Rutllant y Garreaud (1995) no son transferibles al presente estudio ya que se requiere una definición del índice que funciona a lo largo del país.

El Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) es un índice meteorológico propuesto con fines de uso en el pronóstico de la contaminación atmosférica invernal en Santiago (Morales 2006). Relaciona las situaciones sinópticas típicas que se presentan en el valle central del país con las condiciones de dispersión en la cuenca de la Región Metropolitana. Para efectos operacionales, sobre la base de las condiciones observadas y analizadas en 1996, se efectuó una tipificación de condiciones sinópticas asociadas a distintos valores del PMCA. Se definieron cinco categorías del PMCA que se resumen en la Tabla 3. Cabe señalar que el PMCA es una variable subjetiva y discreta³.

Existen algunas variaciones del PMCA que incluyen medidas objetivas de estabilidad como el índice de Mitsumi (Misumi, 1998) y el índice de Showaltar (Morales et al, 2006) Ambas representan la estabilidad atmosférica y en este sentido son similares al

³ El valor de PMCA se basa en la interpretación de la situación sinóptica que depende del juicio experto del un analista. Por ejemplo, el diagnóstico de la “presencia de configuraciones tipo A o BPF” que son necesarios para un alto PMCA depende del criterio del analista, tanto en su interpretación de los antecedentes disponibles sobre como se definen las configuraciones como también de su interpretación de la carta sinóptica disponible. Entonces, es posible que para el mismo día diferentes analistas asignarían un valor de PMCA diferente. Por lo tanto se debe considerar el índice PMCA como subjetiva.

índice MAPPI de Rutllant y Garreaud 1995. El índice de Mitsumi calcula la estabilidad a partir del gradiente en temperatura observada entre una estación de monitoreo en la ciudad y otra estación en un punto elevado en la Cordillera de la costa (Lo Prado) mientras el índice de Showalter se basa en la temperatura superficial y la temperatura en 500hPa obtenido de radiosonda o modelos numéricos.

El PMCA juega un rol determinante en el desempeño del pronóstico oficial para calidad del aire en Santiago (con el método estadístico de “Cassmassi”). Sin embargo, para el año 2012 se realizó una marcha blanca de un sistema de pronóstico actualizado (Cassmassi-2) para Santiago que efectivamente no ocupa PMCA, sino se basa en un modelo estadístico que ocupa variables atmosféricas tomadas directamente de un modelo de predicción de escala global (Ministerio de Medio Ambiente, 2013).

En el contexto del presente estudio, el PMCA para Santiago resulta poco relevante ya que es, en gran parte, subjetiva y depende fuertemente por la condición sinóptica de gran escala. Además, ha sido desarrollado específicamente para la ciudad de Santiago y no es transferible a otros lugares⁴. Entonces ese índice no puede cumplir con las exigencias del estudio del requieren que el índice permite distinguir entre diferentes zonas del país y ser evaluable para cada hora del día.

Categoría del, PMCA (Nº de denominación)	Condiciones de ventilación/dispersión de contaminantes	Características
1 Bajo	Muy buenas	<ul style="list-style-type: none"> • Ausencia de inversión térmica de subsidencia. • Sistemas frontales activos • Marcada inestabilidad
2 Regular/bajo	Buenas	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión térmica de subsidencia débil y/o elevada. • Sistemas frontales de regular actividad o inestabilidad ligera • Advecciones generalizadas de aire húmedo y nubosidad baja. • Bajas segregadas o núcleos fríos.
3 Regular	Regulares	<ul style="list-style-type: none"> • Predominio anticiclónico normal del período invernal • Ausencia de precipitaciones • Advecciones débiles de nubosidad baja al sector poniente de la cuenca
4 Regular/Alto	Malas a críticas	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de configuraciones tipo A o BPF. • Índice de circulación zonal medio o alto.
5 Alto	Críticas	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de configuraciones tipo A o BPF. • Bajo índice de circulación zonal.

Tabla 3 Definición del PMCA para MP10 Una versión más detallada se puede encontrar en Morales et al 2006, donde también se puede encontrar una versión de PMCA que ha sido desarrollado para Ozono.

⁴ Una versión de PMCA ha sido aplicado a la ciudad de Coyhaique pero su adaptación a esta zona involucraba estudios adicionales y cambios en la definición del índice

3.6 Selección del Índice de Remoción

La revisión bibliográfica realizada en la sección anterior permite apreciar que existe una cantidad importante de antecedentes y experiencias relativos al uso índices de remoción a nivel internacional. De hecho, índices de ventilación han sido utilizados en Estado Unidos y otros partes del mundo desde los años 60 y hoy en día es posible encontrar estudios científicos, servicios de pronóstico, y mapas oficiales basados en ellos. Entonces, se considera que el punto de partida para el presente estudio debe ser la aplicación de un índice de remoción existente y comprobado.

La Tabla 4 presenta una comparación de las características de clases de índice que fueron documentos en la sección anterior. La tabla considera varios aspectos que se consideran relevantes para los objetivos del presente estudio.

A partir de los datos de la tabla es posible apreciar de inmediato que el Índice de Ventilación (VI) se destaca como el más adecuado para el presente estudio. El VI es simple e intuitivo y toma en cuenta las variables conocidas como las más relevantes para la dispersión atmosférica. Este índice es fácilmente calculable con las salidas del modelo WRF ya que la altura de la capa de mezcla es una de las variables guardadas en los archivos de salida del modelo (ver sección 4.3). Además, es el índice que se encuentra con mayor frecuencia tanto en estudios científicos como en proyectos aplicados. Fue seleccionado y utilizado exitosamente por Ferguson *et al.* (2003) para generar mapas de ventilación para todo el Estados Unidos continental para el Departamento de Agricultura de EE.UU. y podría servir como un referencia fundamental para el presente estudio en Chile.

Los índices de potencial de contaminación atmosférica basados en la estabilidad del aire también representan una opción razonable y fácil de implementar con los datos del modelo WRF. Además, índices tipo PMCA tiene una larga historia de uso a nivel nacional en la ciudad de Santiago (y mas recientemente en Coyhaique). Sin embargo, estos índices no tienen una definición uniforme y cada estudio tiende definir ecuaciones de una manera *ad-hoc* dependiendo de la disponibilidad de datos y la asociación empírica entre la estabilidad y contaminación en la zona del estudio. La interpretación del índice tampoco es muy intuitivo y no se ha encontrado estudios que intentan hacer mapas de PCMA.

Por otra parte, el factor de re-circulación parece el más débil de las tres opciones ya que no provee un representación completa de los procesos de dispersión relevante y tampoco dispone información a nivel intra-diaria. Eventualmente, este índice podría ser considerado como un producto adicional complementario al índice principal, pero por si solo es insuficiente para los fines del estudio.

	Índice de Ventilación (VI)	Índice de potencial de contaminación basada en estabilidad (PMCA)	Factor de recircularon (RF)
Incorpore todas las variables relevantes	Si	Si	No
Permite la generación de mapas según estación del año y hora del día	Si	Si	No <i>(No es posible generar información a nivel sub-diario con esta índice)</i>
Simplicidad del método	Simple	No simple, no intuitivo, ad-hoc	No simple
Calculable en base de la información que dispone el Modelo WRF	Si	Si	Si
Usado en estudios anteriores para construir mapas de ventilación	Si <i>(Ferguson et al 2003)</i>	No encontrado	No encontrado
Publicada en revistas científicas reconocidas	Si	Si	Si

Tabla 4 Intercomparación de los índices de remoción de contaminantes evaluados en este estudio.

3.7 Definición del índice seleccionado

Basado en la discusión anterior el índice de remoción de contaminantes (I_r) que se usará para los fines del presente estudio se define de la misma manera que el índice de ventilación utilizado en Ferguson et al (2003):

$$I_r = V_{10}h$$

El uso del viento en 10 metros en vez del promedio de viento en la capa de mezcla se justifica por tres razones:

- a) donde V_{10} es la velocidad del viento en una altura de 10 metros sobre la superficie y h es la altura de la capa de mezcla. La velocidad simulada en 10

metros tiene la ventaja de ser *evaluable*, en el sentido de que existen muchos sitios de monitoreo de viento en el país que miden en esta altura.

- b) El uso de la velocidad de viento en una altura fija hace que los errores de la velocidad y de la altura de la capa de mezcla sean *independientes*. Si se usa el viento medio en la capa de mezcla, cualquier error en la estimación h también agrega un error a la estimación de V . Dado que hay mucha incertidumbre en la estimación de h , se considera prudente evitar la posibilidad de que los errores inevitables en h también introduzcan errores en la estimación de la velocidad.
- c) El uso de V_{10} es consistente con la definición del índice de ventilación usado en Ferguson et al (2003) para Estados Unidos, y hace que los resultados del presente estudio tengan mayor consistencia con un estándar ya establecido a nivel internacional.

El índice I_r se puede entender como el volumen en que se dispersan los contaminantes emitidos en la superficie durante un periodo de aproximadamente una hora. Un mayor I_r indica mayor dispersión y, por ende, menores concentraciones de contaminantes y mejor calidad del aire. La escala de tiempo de una hora resulta de la definición de la altura de mezcla (ver sección 3.2). Es evidente que el I_r representa una simplificación de los procesos de dispersión que ocurren en la atmósfera real, incluso en condiciones relativamente idealizadas. Además, el I_r sólo representa los procesos de dispersión relacionados con el transporte y mezcla vertical en el entorno inmediato del punto donde se calcula el índice. En la realidad existen varios procesos de remoción de contaminantes que no se representan por este índice, tales como remoción húmeda y reacciones químicas.

En las siguientes secciones se discuten en mayor detalle algunas de las limitaciones más importantes del índice de remoción.

3.7.1 Remoción húmeda

Cuando haya lluvia o nubosidad dentro de la capa de mezcla se activan procesos de remoción húmeda que pueden reducir las concentraciones de aerosoles en la atmósfera incluso en la ausencia de viento y dispersión vertical. La eficiencia de la remoción húmeda depende de varios factores incluyendo la tasa de precipitación y la distribución de tamaño de los aerosoles. El popular modelo de dispersión CALPUFF (Scire et al 2000) representa remoción húmeda en términos de un constante de tiempo, es decir:

$$C(t + \Delta t) = C(t)e^{-\Lambda R}$$

Donde $C(t)$ es la concentración en la hora t , Λ es un constante que depende del tamaño de aerosol y puede variar entre 10^{-4}s^{-1} y 10^{-7}s^{-1} , y R es la tasa de precipitación en mm/hora.

Suponiendo un valor de Λ de 10^{-4}s^{-1} la remoción de contaminantes durante un episodio de lluvia varía entre $\sim 10\%$ para lluvias débiles de 0.5 mm/hr , hasta $>85\%$ en condiciones de lluvia intensa ($> 5\text{ mm/hora}$). Claramente, la importancia de remoción húmeda dependerá de la distribución de la precipitación en el tiempo y cobrará mayor importancia en lugares donde la lluvia es más frecuente. Para tener idea del impacto integrado de remoción húmeda se ha calculado la remoción media en algunos puntos del país donde existen registros horarios de precipitación (Tabla 5). Es posible apreciar que el impacto integrado de la remoción húmeda es relativamente pequeño (escala de tiempo de una hora) incluso en lugares extremadamente lluviosos como el Glaciar San Rafael y por lo tanto no se considera necesario su inclusión en el índice de remoción.

Lugar	Precipitación anual	Fracción de la concentración sin remoción húmeda
Santiago	290 mm	99.2%
Río Lolléhue (Xª Región)	1,500 mm	95.8%
Glaciar San Rafael	3,900 mm	88.9%

Tabla 5. La reducción de la concentración debido a remoción húmeda estimada a partir de datos horarios de precipitación en diferentes localidades del país. Por ejemplo, en el sitio Río Lolléhue en la Xª región donde la precipitación anual alcanza 1500 mm, la concentración considerando remoción húmeda es 95.8% de la concentración sin considerar este proceso. El cálculo supone una escala de tiempo de una hora ($\Delta t = 3600\text{s}$) para representar la remoción en el entorno de la fuente. Los datos de precipitación provienen de la red nacional hidro-meteorológica operada por la Dirección General de Aguas.

3.7.2 Reacciones químicas y generación secundaria

La producción y destrucción de contaminantes debido a procesos químicos en la atmósfera es otro factor que puede alterar las concentraciones de un contaminante emitido en la superficie. Las reacciones químicas dependen de parámetros meteorológicos como la temperatura, humedad, la radiación solar entre otros, y también de la composición química del aire en el entorno de la fuente.

El índice de remoción usado aquí NO considera la influencia de reacciones químicas. Debido a la complejidad y no-linealidad de los procesos involucrados, se considera muy difícil (hasta imposible) construir un índice de remoción capaz de incorporar el impacto de química atmosférica de manera simple y entendible. Además, la gran mayoría de las reacciones químicas alteran las concentraciones de manera relativamente lenta (sobre escalas de tiempo de >4 horas a varios días, (e.g., Seinfeld y Pandis, 1997) y por lo tanto no cambian de manera significativa las concentraciones en el entorno de la fuente, sino afectan las concentraciones en una escala más bien

regional. Entonces, en el contexto de los objetivos del presente estudio, se concluye que el impacto de procesos químicos es en general despreciable.

3.7.3 Fuentes en altura

El índice de ventilación es aplicable principalmente para fuentes ubicadas cerca de la superficie que se encuentran siempre dentro de la capa de mezcla. Es posible que en condiciones muy estables una fuente elevada -como por ejemplo una chimenea de 100 metros de altura, estaría por encima de la capa de mezcla. En este caso el índice de remoción estaría mal definido y no sería apropiado para representar las condiciones de remoción.

Es importante señalar que valores de h menores de 100 m (una altura referencial para una chimenea de un complejo industrial grande) ocurren casi exclusivamente en la noche, y en general son poco frecuentes. Por ejemplo, en Santiago (un lugar caracterizado por mala ventilación) la altura de la capa de mezcla simulada es menor que 100 m en sólo ~10% de las horas simuladas.

Tomando en cuenta que: a) encontrar una altura de mezcla por debajo de la altura de una chimenea es en general poco frecuente, b) hay una importante incertidumbre en la estimación de la altura de la capa de mezcla, especialmente en condiciones estables y c) que existen procesos como el “*stack downwash*” que pueden reducir la altura efectiva de la chimenea, se recomienda *usar el índice de remoción indiscriminadamente tanto para fuentes en superficie como para fuentes en altura*. El usuario del índice debe tener presente que los resultados son, en general, más conservadores para fuentes en altura.

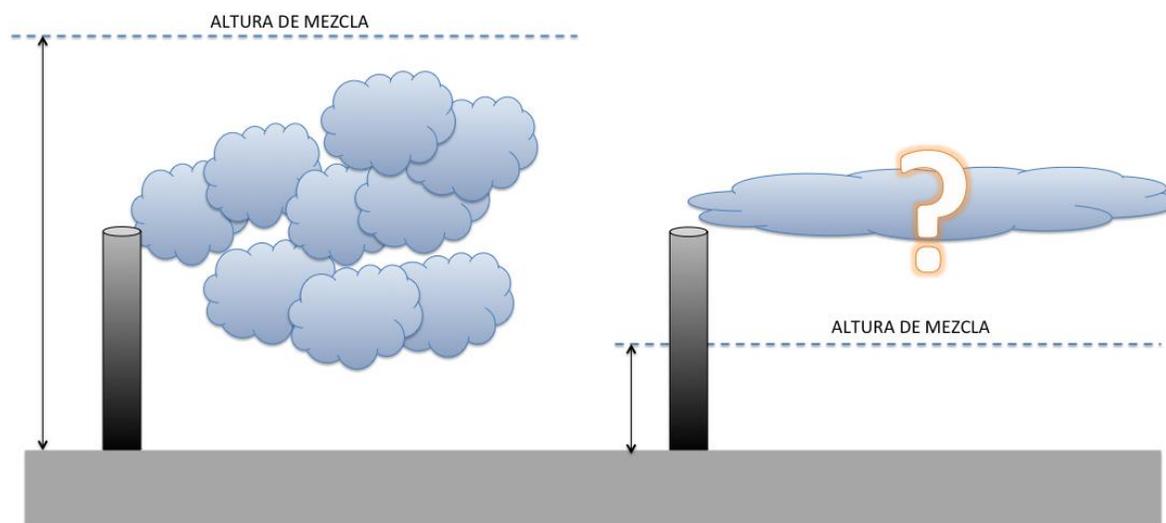


Figura 3 Ejemplo del problema del índice de remoción para fuentes en altura. En el caso a la izquierda la chimenea está dentro de la capa de mezcla y el índice de remoción se aplica. Sin embargo en el caso de la derecha, la chimenea está por encima la capa de mezcla y en este caso el índice de remoción NO se aplica a la fuente en consideración.

3.7.4 Recirculación

Al no considerar la posibilidad de cambios en la dirección de viento, el índice de remoción no representa la posible influencia de recirculación de contaminantes. En general, se espera que la contribución de recirculación sea relativamente pequeña en promedio. Sin embargo, la recirculación podría ser importante en cualquier lugar donde la dirección de viento cambia en aproximadamente $\pm 180^\circ$ de una manera reiterada. Este fenómeno ocurre en muchas localidades en el Norte y Centro del país, debido al fuerte control del ciclo de irradiación solar sobre la circulación atmosférica cerca de la superficie. En zonas de terreno inclinado es común que se generan flujos pendiente arriba durante el día y flujos de drenaje pendiente abajo durante la noche. En zonas costeras el calentamiento diferencial entre la tierra y el mar genera brisas marinas caracterizadas por un flujo hacia la costa durante la tarde y un flujo hacia el mar durante la noche. La posibilidad de recirculación es mayor en el periodo de transición (cuando el viento cambia de dirección) que usualmente ocurre unas horas (2-4) después de la salida o puesta del sol. Hacia el Sur del país (desde la IV° Región aproximadamente) el viento es cada vez más dominado por la variabilidad sinóptica de las latitudes medias con vientos semi-permanentes del oeste modulados por el tránsito de frentes y vaguadas. Por lo tanto, es probable que los episodios de recirculación en el Sur sean más esporádicos y de menor importancia en promedio.

4 Metodología y Cálculo del Índice de Remoción

En este capítulo se describe la metodología utilizada para calcular el índice de remoción a nivel nacional cuya característica fundamental es el uso de datos de simulaciones numéricas de la atmosfera con un modelo de alta (1 km) resolución originalmente implementado para desarrollo de un atlas de energía eólica para Chile. En la siguiente sección (4.1) se plantean las razones por usar el modelo numérico. En siguiente (sección 4.2) se presenta una breve descripción del modelo WRF y luego (sección 4.3) una descripción del proyecto de Energía Eólica que facilitó las simulaciones atmosféricas para todo el país. En la sección 4.4 se documentan los aspectos técnicos del procesamiento de datos usado para obtener mapas del índice de remoción –el entregable principal del proyecto. Finalmente la sección 4.5 presenta una evaluación de la estimación del índice de remoción basado en la comparación de los valores observados de viento, altura de mezcla y contaminación atmosférica en distintos sitios de monitoreo.

4.1 ¿Porque usar un modelo numérico?

Una característica muy importante de la metodología escogida es que el índice de remoción se calcula a partir de datos de simulaciones numéricas de la atmosfera y no a partir de observaciones de las redes de monitoreo meteorológicos y de calidad del aire que existen en el país. ¿Porque se tomó esta decisión?

Si bien son los datos de las redes de monitoreo meteorológico existentes en Chile, incluyendo los datos de la red de monitoreo de calidad del aire operado por el MMA, representan una fuente de información relevante y cada vez más completa, estas redes nacionales todavía no cuentan con una cobertura espacial suficiente para caracterizar la ventilación sobre todo el territorio chileno. Aunque la densidad de sitios es relativamente buena en algunas regiones (como por ejemplo la Región Metropolitana), hay extensas zonas a lo largo del país que carecen de información meteorológica *in-situ*. Además, muchos de los sitios de monitoreo presentan problemas de calidad de datos y son muy pocos los sitios que cuentan con datos de la estructura vertical de la temperatura, por lo cual no proporcionan información sobre la estabilidad.

Otro aspecto que restringe el uso de los datos observacionales es su limitada representación espacial dentro de terreno complejo. Tal como se demuestra en el informe técnico de la “Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA” del Servicio de Evaluación Impacto Ambiental., todo el territorio chileno se debe considerar terreno complejo. Una de las justificaciones de esta consideración es justamente que una observación meteorológica en un punto dado pierde rápidamente representatividad a la medida que uno se aleja de ella. Esta pérdida de representatividad es producto de que por ejemplo la dirección y la velocidad del

viento dependen principalmente de la presencia de un valle o una montaña. Dado que en casi la totalidad del territorio se encuentran valles o montañas, una observación sólo representa bien la situación en este punto.

Estas consideraciones nos permiten concluir que la única manera de obtener una estimación de ventilación para todo el país de manera consistente y confiable es a través del uso de modelos numéricos de la atmósfera. En particular, se usarán los resultados de simulaciones numéricos con el modelo de la mesoescala WRF (*Weather Research and Forecasting model*) que se describe en la siguiente sección.

4.2 El modelo WRF

WRF (Weather Research and Forecasting) es un modelo tipo no-hidrostático⁵ que resuelve las ecuaciones primitivas que controlan la circulación atmosférica. El modelo representa el estado de la atmósfera en una grilla tridimensional en términos de unas 10 variables fundamentales (las tres componentes de viento u-v-w, la temperatura, presión, humedad y varias especies microfísicas que representan las diferentes fases del agua líquida). El tamaño de las celdas de grilla es denominada la resolución del modelo. Dada una condición inicial y de borde, las ecuaciones del modelo se integran numéricamente (usualmente en pasos de unos segundos) para avanzar el estado del modelo hacia el futuro. Dependiendo de la capacidad computacional disponible el modelo puede ser integrado para periodos de días a múltiples años. Durante la simulación, el estado del modelo es almacenado periódicamente (usualmente con intervalos de una hora) en archivos de salida. De esta manera, una corrida del modelo WRF genera una base de datos que contiene una representación del estado de la atmósfera en cuatro dimensiones (longitud, latitud, altura y tiempo).

WRF resuelve las ecuaciones primitivas mediante aproximaciones numéricas, discretizando espacial y temporalmente en intervalos que dependen de la resolución. Las ecuaciones numéricas sólo pueden resolver adecuadamente los procesos meteorológicos cuyo tamaño sea mayor al de las celdillas del modelo. Debido a esto, los procesos de escalas más pequeñas deben ser parametrizados, lo que implica que sus efectos se deducirán a partir de las variables pronosticadas por el modelo para la celdilla. En particular, en el caso del modelo WRF, los principales tipos de parametrización física son: esquemas de microfísica, convección, radiación de onda corta y larga, capa superficial, superficie del terreno, capa límite atmosférica y difusión de escala sub-grilla.

⁵ La expresión “no-hidrostático” se refiere a que el modelo NO implementa la aproximación hidrostática en sus ecuaciones. Para escalas de moción mayores a ~ 10 km, la atmósfera se encuentra en un equilibrio hidrostático dado por la ecuación $dP/dz = -g*\rho$. Sin embargo, existen fenómenos de la mesoescala (como por ejemplo tormentas convectivas u ondas de montaña) que producen movimientos verticales que no satisfacen la aproximación hidrostática. El modelo WRF, siendo no-hidrostática, es capaz de simular correctamente este tipo de circulación.

El modelo WRF es el sistema de modelación atmosférico recomendado por el Servicio de Evaluación Ambiental de Chile (SEA) en la “Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA”. Específicamente, la configuración recomendada para las condiciones topográficas de Chile es de una resolución horizontal de 1 Km y al menos 40 niveles verticales. Cabe señalar que efectuar simulaciones con el modelo WRF es computacionalmente muy costoso. A modo de ejemplo, realizar una simulación para un estudio de impacto ambiental (de un año para una región de 70 x 70 Km) en un servidor de la última generación se demora entre 1 y 2 semanas. Cubrir todo el territorio de Chile requiere unos 300 simulaciones de esta naturaleza, que claramente está fuera del alcance del presente proyecto. Sin embargo, en vez de realizar nuevas simulaciones, UNTEC propone aprovechar una base de datos existente que ha desarrollado en proyectos anteriores para la evaluación del recurso eólico de Chile: El llamado Explorador Eólico.

4.3 Base de datos de simulaciones del recurso eólico

La historia del Explorador Eólico se remonta al 2008, año que marca el inicio a una nueva y fructífera etapa de colaboración entre el Ministerio de Energía (anteriormente la Comisión Nacional de Energía), la Agencia Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) y la Fundación para la Transferencia Tecnológica (UNTEC), con el objetivo de proveer una herramienta de prospección y análisis del recurso viento en el Norte Grande. Luego, sucesivas iniciativas (ver detalle en la sección 4.5) han dejado como resultado un explorador eólico con mayores capacidades y alcance espacial. Hoy, a más de 5 años de la primera versión, el Explorador Eólico posee información atmosférica de alta resolución (1 km) para todo el país y además ofrece una gran cantidad de recursos y herramientas destinadas a la visualización y análisis detallado del recurso.

El Explorador Eólico se basa en simulaciones del modelo WRF que fueron realizadas con un sistema de computación de alto rendimiento adquirido específicamente para el proyecto. Las simulaciones del modelo WRF para el Explorador Eólico fueron divididas en 26 dominios computacionales, cada uno con resolución espacial horizontal de 1 km y un espaciamiento de 10-30 metros en la vertical en la capa de la atmósfera más cerca de la superficie. En total, la región de modelación cubre todo el territorio del país, desde Arica a Puerto Williams y incluyendo la Isla Pascua. Se simuló un año completo (2010) almacenando los resultados del modelo con intervalos de una hora. La Tabla 6 y Tabla 7 resumen las características más importantes de simulaciones definitivas del modelo WRF. Se puede encontrar más información en la página Web del sitio (ver Figura 4) :

<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2>

El equipo consultor tiene acceso a las salidas completas de las simulaciones WRF, que consisten en campos de variables básicas como el viento, temperatura, humedad junto con variables de diagnóstico como la altura de mezcla que es estimada con el modelo

de capa límite. En este estudio, las variables que se ocupan para el cálculo del índice de ventilación son la velocidad de viento, la temperatura y la altura de la capa de mezcla. La altura de la capa de mezcla es diagnosticado por el modelo WRF por su esquema de turbulencia QNSE (Quasi-Normal Scale Elimination). Este esquema introduce una nueva variable, la energía cinética turbulenta (TKE), en el sistema de ecuaciones del modelo para simular la influencia de movimientos turbulentos en todo el dominio computacional del modelo. La altura de la capa de mezcla es definido como la altura en que la TKE se encuentra bajo un umbral de $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Las estimaciones de la altura de la capa de mezcla se disponen en los archivos de salida con un intervalo de una hora. Esta información, en combinación con perfiles de viento simulados por WRF, permite realizar el cálculo del I_r de manera relativamente sencilla para cada punto de grilla del modelo. Cabe mencionar que existen varios estudios que señalan que el esquema QNSE tiende a sobreestimar la altura de la capa de mezcla comparado con las alturas entregadas por otros métodos de capa de mezcla que ofrece el sistema WRF (Shin y Hong (2011), Duda (2004), Shrivastava (2011)). Desafortunadamente la altura de la capa de mezcla se calcula durante la integración del modelo WRF y no es posible aplicar esquemas alternativos con la información disponible en los archivos de salida.

Aspecto de la modelación	Versión 2012
Modelo Numérico	WRF-ARW versión 3.2
Periodo de simulación	Enero a Diciembre
Año de simulación	2010
Dominios computaciones	17
Resolución horizontal	1 km
Coordenada vertical	41 niveles (12 en los primeros 250 metros)
Condición de borde	GFS (<i>Global Forecast System</i>) análisis operacionales
Topografía	SRTM (90 m)
Características de la superficie	MODIS

Tabla 6 Configuración general de las simulaciones WRF del Explorador de Energía Eólica

Parametrización	Selección
Microfísica	WSM 5-especie
Radiación onda larga	RRTM
Radiación onda corta	Dudhia
Capa límite	QNSE
Capa superficial	QNSE
Suelo	Esquema simple de 5 capas

Tabla 7 Parameterizaciones utilizadas en las simulaciones WRF. La esquema de capa límite QNSE (Quasi-Normal Scale Elimination) es el componente del modelo que estima continuamente la altura de la capa de mezcla.

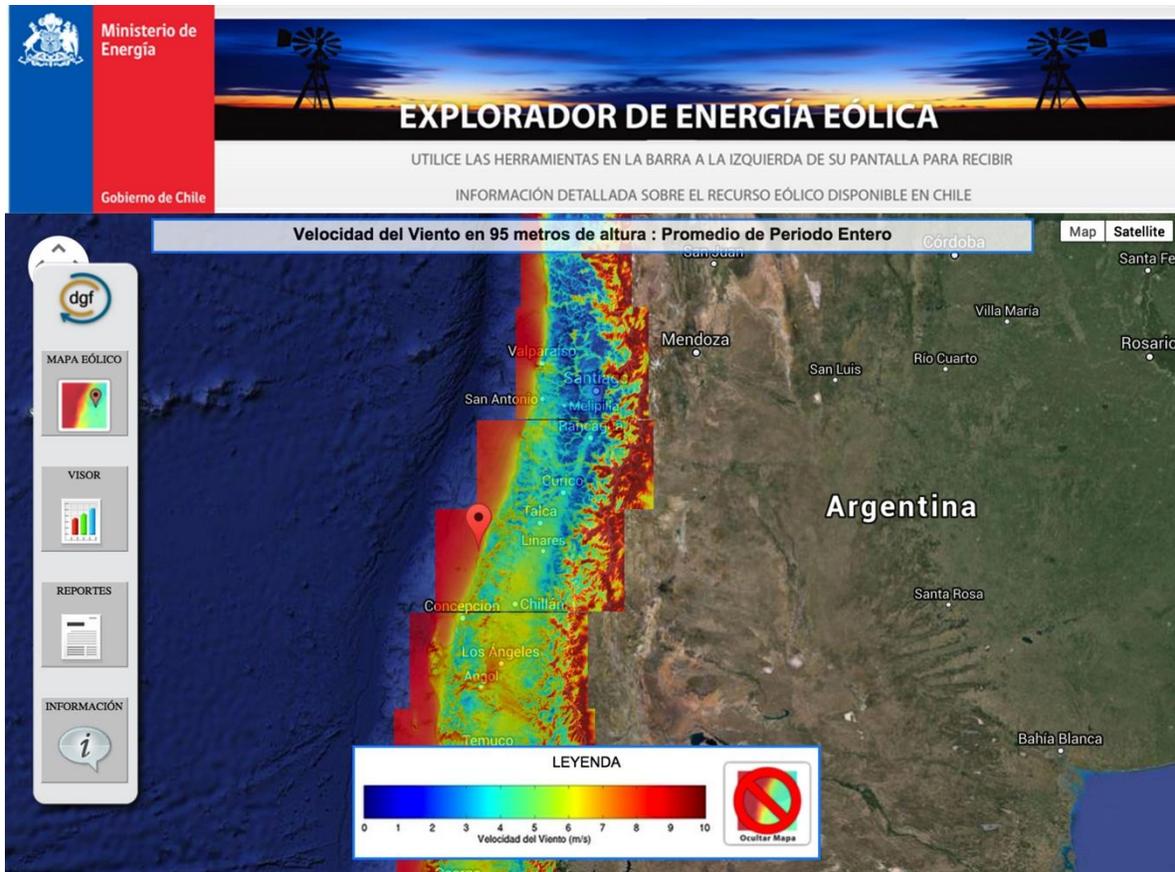


Figura 4 Aspecto de la interfaz web del Explorador Eólico. Los colores indican el viento medio con un resolución espacial de 1 Km.

4.4 Cálculo del Índice de Remoción a Nivel País

4.4.1 Estimación de Índice de Remoción

El índice de remoción es calculado a partir de las series horarias para cada punto de grilla del modelo. Inicialmente los cálculos del índice de remoción se realizaron usando solamente la velocidad de viento y la altura de la capa de mezcla simulado por el modelo. Sin embargo, al revisar los resultados se detectaron algunos problemas con las estimaciones de la altura de la capa de mezcla entregadas por el modelo. En particular, los problemas de la altura de mezcla se detectaron al analizar los datos en lugares del Sur de Chile. Se dio cuenta que los valores nocturnos de h eran inusualmente altos, especialmente durante la noche, superando 1000 metros incluso en casos de inversión térmica cerca de superficie. Esto, combinado con una amplia gama de experiencias reportadas en la literatura científica sobre el sesgo alto de la estimación de h del esquema QNSE (ver sección 4.3), motivó la implementación de los siguientes ajustes en la metodología:

- 1) La altura de la capa de mezcla entregada por el modelo basado en el esquema *Quasi-Normal Scale Elimination* (QNSE) (Sukoriansky et al, 2005) tiende ser sobreestimado. Este es una característica del esquema QNSE que se ha notado por otros investigadores corriendo el modelo WRF en otras partes del mundo (Shin y Hong (2011), Duda (2004), Shrivastava (2011)) y parece ser un defecto sistemático del esquema de parametrización. Por lo tanto, todos los valores de h entregados por el modelo fueron multiplicados por un factor de corrección de 0.4.
- 2) La sobreestimación de la capa de mezcla es particularmente fuerte en condiciones estables (nocturnas), sobretodo en el sur del país. Entonces, cuando se detecta una condición estable en la capa de aire cerca de la superficie⁶ la altura de mezcla se estima con un método alternativo de Seibert et al (1997) que es apto para condiciones estables. En este caso la capa de mezcla se da por la siguiente ecuación:

$$h = c u_*^{3/2}$$

Donde u_* es la velocidad de fricción y c es un constante ($2.1 \times 10^3 \text{ s}^2 \text{ m}^{-1}$).

- 3) El modelo tiende subestimar la altura de la capa de mezcla sobre el mar y cuerpos de agua. Entonces, sobre cuerpos de agua se impone una altura mínima de capa de mezcla de 300 m.

Los valores horarios del índice de remoción fueron utilizados para calcular campos representativos del índice para todo el país para cada la hora del día y cada mes del año. Los resultados se disponen varios formatos que se describen en mayor detalle en el capítulo 5.

Los mapas presentan el valor *mediano* de la distribución horaria de I_r . La mediana es usada en vez del promedio porque en general es más representativa del centro de la distribución de valores horarios. Note que el uso del valor mediano implica que los valores para I_r sean generalmente *menores* que los valores citados en otros estudios.

Para categorizar los datos se utiliza una escala de clasificación similar a la utilizada en el estudio de Ferguson et al (2003) para los Estados Unidos. La escala divide los valores de I_r en 4 categorías según la siguiente tabla.

⁶ Una condición estable se define como $\partial\theta/\partial z > 0$, donde θ es la temperatura potencial y z es la altura.

Rango VI (m ² /s)	Categoría
0 a 1250	Pobre
1250 a 2500	Moderado
2500 a 3750	Buena
> 3750	Muy Buena

Tabla 8 Categorización utilizada en el estudio de Fergusen et al (2003) para los Estados Unidos

La Figura 5 contiene mapas del índice de ventilación considerando todas las horas y meses. Los mapas de I_r muestran un marcado patrón espacial caracterizado por condiciones de mala ventilación en el centro del país entre la VII^o y la IV^o regiones. En el Norte Grande la ventilación es más favorable salvo en ciertas franjas de la zona costera (donde el incertidumbre es mayor). Hacia el Sur, la ventilación tiende a aumentar. Entre la VII a X el índice de remoción se clasifica como moderada en el valle central (buena en la costa). Al sur de puerto Montt hacia Punta Arenas, la ventilación en generalmente alta.

La Figura 5 también muestra el contraste del I_r entre las horas del día y las horas de la noche. Sobre la mayor parte del país prevalecen malas condiciones de ventilación durante la noche, especialmente en el norte chico, la zona central y el centro-sur. Las regiones que experimentan moderada a buena ventilación en la noche se restringen el extremo Sur, las cumbres de montañas, zonas costeras (aunque no todos) y zonas específicas del desierto del norte grande. El índice también indica un cierto contraste entre la estación de verano y invierno (no mostrado) aunque este contraste no es tan marcado como la diferencia entre el día y la noche.

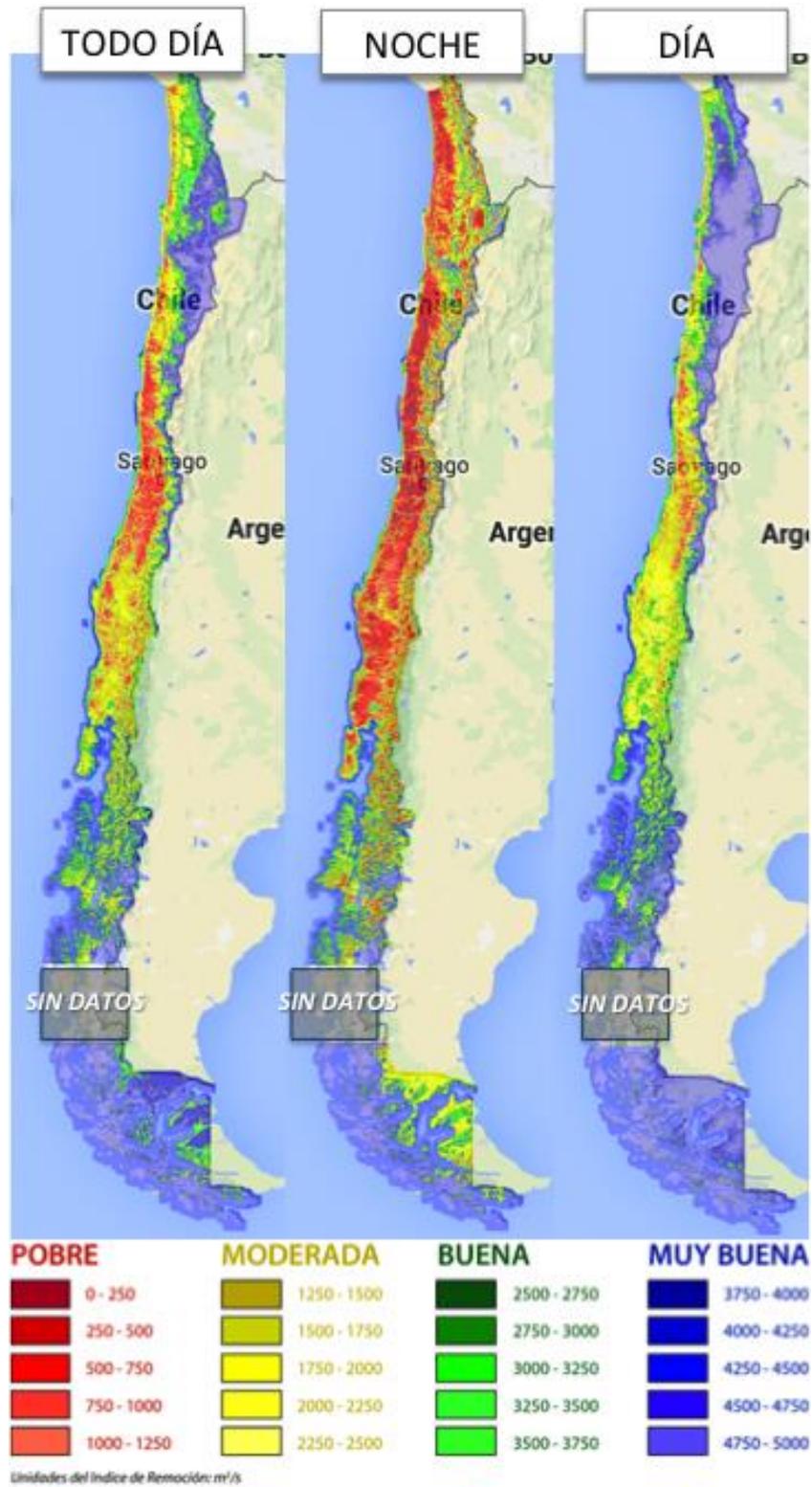


Figura 5 Mapa del índice de ventilación calculado considerando todas las horas del día (izquierda), la noche (centro) y el día (derecha). No hay datos de modelación para el sector sur de la región de Aysén (campo de hielo sur).

4.5 Evaluación

En esta sección se presenta una breve evaluación del índice de remoción. No existen mediciones del I_r propiamente tal, y la evaluación del índice se basa más bien en la evaluación de sus componentes V_{10} y h , que se presenta en las secciones 4.5.1 y 4.5.2, respectivamente.

Adicionalmente es de gran interés saber si efectivamente existe una relación entre el índice de remoción y los niveles de contaminación que se miden en las estaciones del Sistema de Información de Calidad del Aire (SINCA). Para este fin, se ha recopilado datos de MP10 en varias localidades en el centro y centro-sur del país. La comparación es presentada en la sección 4.5.3.

4.5.1 Evaluación de la velocidad del viento

Las simulaciones WRF del año 2010 han sido cuidadosamente evaluadas con el apoyo de una extensa base de datos de observaciones de viento in situ, por lo que la evaluación consistió en la comparación estadística entre los datos de viento generados por las simulaciones y los registros de observaciones contenidos en la Base de Datos de Observaciones Meteorológicas (BDOM). La BDOM es resultado de un esfuerzo permanente impulsado por los investigadores del Departamento de Geofísica desde el año 2008 (MINENERGIA, 2010) y a la fecha, reúne registros provenientes de 420 anemómetros. El mapa presentada en la Figura 7 muestra las ubicaciones de los sitios de monitoreo del BDOM y indica el promedio de viento en cada lugar.

Los campos de viento del modelo WRF, disponibles en intervalos de una hora, fueron interpolados a las ubicaciones de las estaciones meteorológicas contenidas en la BDOM. La mayoría de las estaciones miden el viento a 10m sobre la superficie y en estos casos el viento fue comparado directamente con el viento modelado a esa altura. Para las mediciones del viento en otros niveles, el perfil vertical del modelo fue interpolado linealmente a la altura del instrumento. Instrumentos de altura menor de 5m se compararon con los resultados del modelo en 5m (el nivel más bajo del modelo). Cada mes simulado fue comparado con los datos observados del mismo mes. En todos los casos se utilizaron todos los años disponibles para generar la estadística (es decir, una comparación con la climatología). Esta estrategia fue adoptada porque muchas estaciones tienen una importante cantidad de observaciones faltantes y la inclusión de años diferentes de 2010 aumenta considerablemente la cantidad de observaciones incluidas en la comparación. La Figura 6 provee un diagrama de dispersión que representa la relación entre el promedio de viento observado desde estaciones meteorológicas y el simulado por WRF, tomando en consideración todos los meses de la simulación. Visualmente es inmediatamente reconocible que las simulaciones tienen estrecha relación con la realidad. El coeficiente de determinación r^2 es 74%, lo cual es altamente significativo. Conjuntamente, la desviación estándar (STD) indica que el error estándar del viento es alrededor de 1.1 m/s.

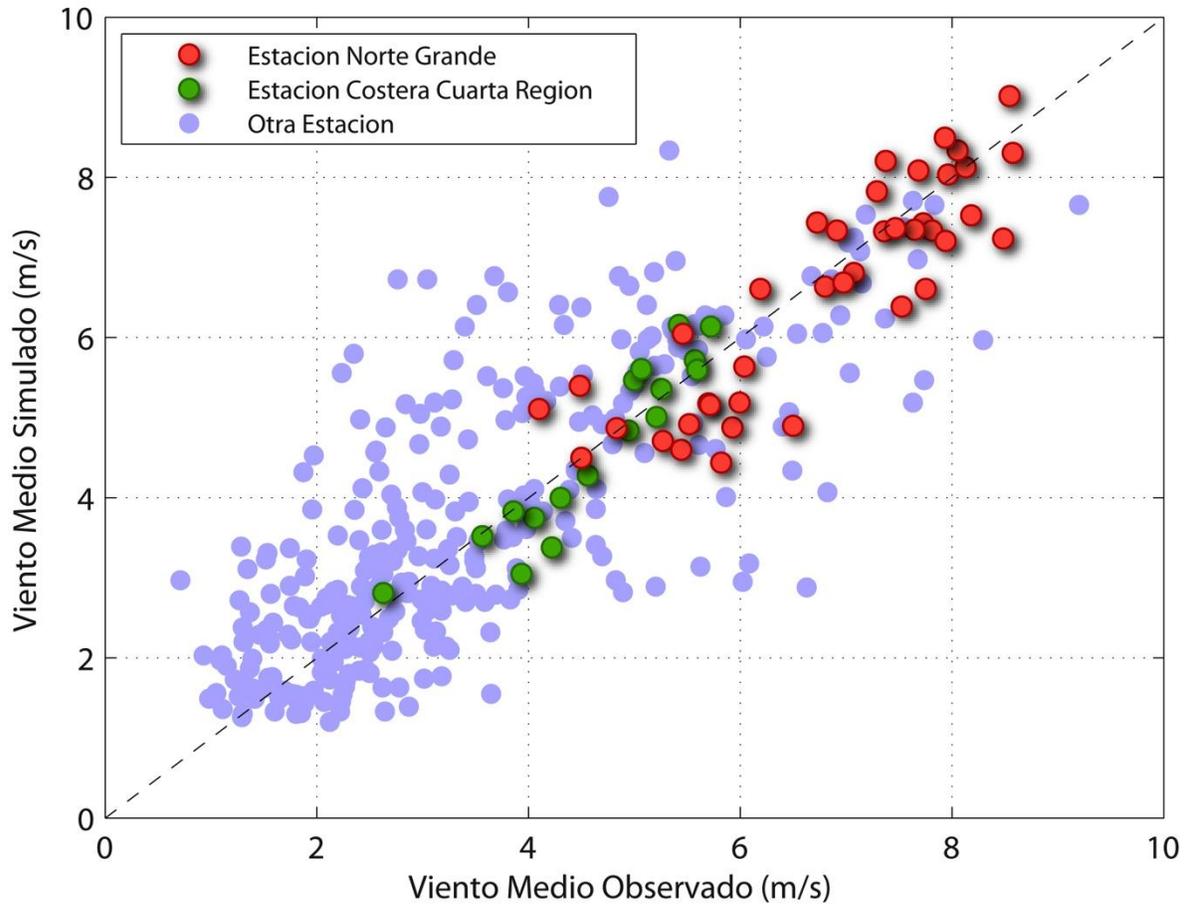


Figura 6 Diagrama de dispersión que representa la relación entre el promedio de viento observado desde estaciones meteorológicas y el simulado por WRF, tomando en consideración todos los meses de la simulación.

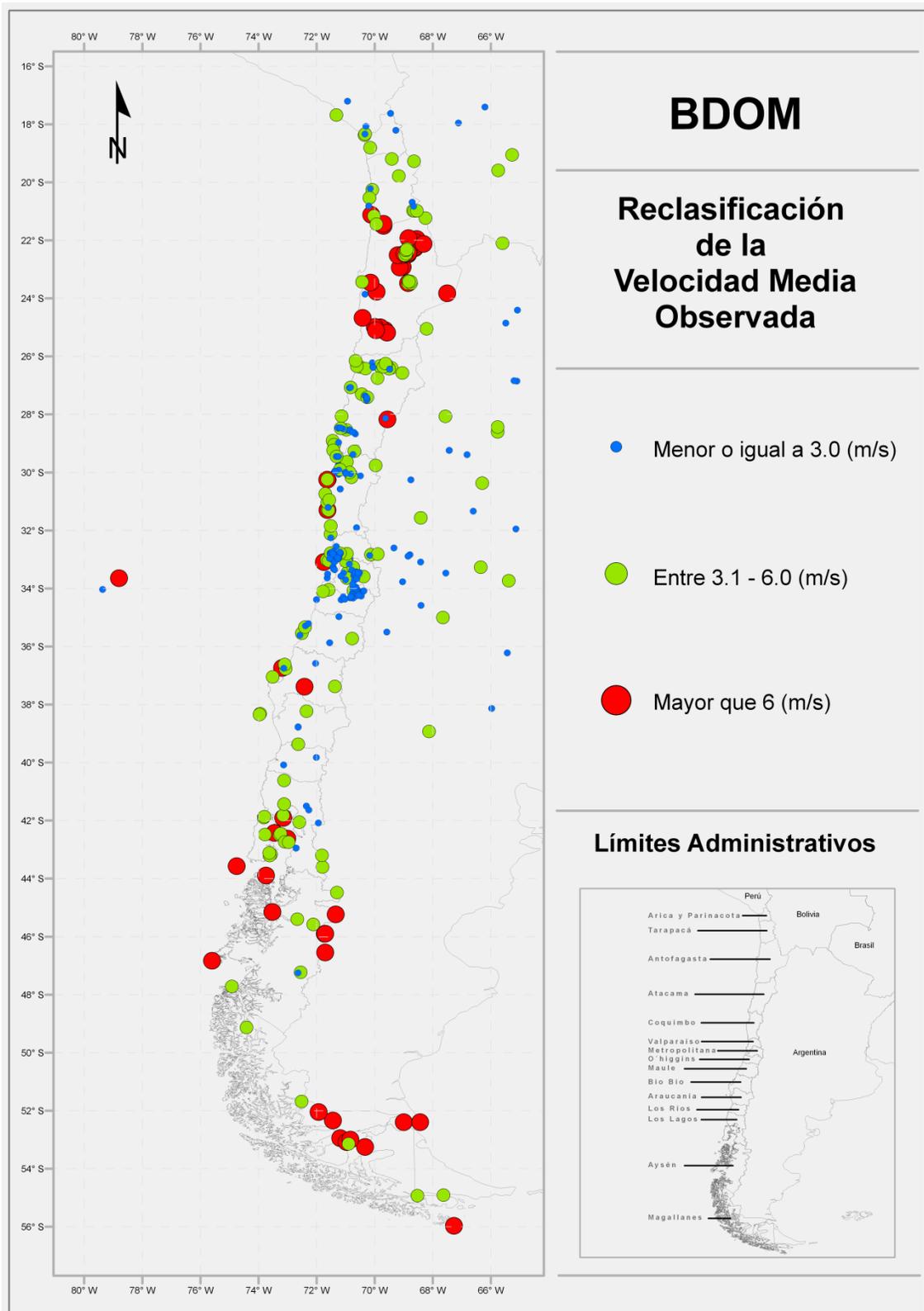


Figura 7 Distribución espacial de las estaciones públicas integradas a la BDOM y una reclasificación según la velocidad media observada (en m/s).

4.5.2 Altura de capa de mezcla

La altura de la capa de mezcla estimada por el modelo WRF es más difícil de evaluar ya que existen muy pocas mediciones de esta variable en Chile. La medición directa de la capa de mezcla requiere un sensor capaz de medir el perfil de aerosoles en la tropósfera baja. En la ciudad de Santiago, desde hace varios años se ha operado instrumentos LIDAR y Nefobasímetros que miden el perfil de aerosoles y permiten estimar de forma confiable la altura de la capa de mezcla. La Figura 8 presenta una secuencia de mediciones del nefobasímetro para el día 30 de agosto 2007 que muestra el desarrollo de una capa de mezcla diurna de aproximadamente 600 metros de altura.

Muñoz y Undurraga (2010) publicaron una climatología de la altura de la capa de mezcla diurna basada en estas mediciones. Los valores medios mensuales en distintos horarios se presentan en la Tabla 9 junto con los valores simulados por WRF para la misma estación y horario. Es posible apreciar que el WRF sobreestima la altura de la capa de mezcla diurna de Santiago. El error es más marcada en los meses de invierno cuando el WRF indica una altura aproximadamente dos veces mayor que lo observado.

	Mayo - Agosto		Noviembre - Febrero	
	Nefo.	WRF	Nefo.	WRF
10:00	75	250	450	390
11:00	190	340	600	620
12:00	290	590	700	760
13:00	330	670	760	980
14:00	390	750	780	1030
15:00	420	690	770	1220

Tabla 9 Altura de capa límite en la ciudad de Santiago basada en mediciones LIDAR para los años 2007 y 2008 (Muñoz y Undurraga 2010, Figura 7) y las simulaciones WRF para 2010. Las estadísticas se muestran para la época de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Otro lugar donde la altura de la capa de mezcla es relativamente bien conocida es la costa de la zona central y norte del país. Esta región se caracteriza por la presencia semi-permanente de una capa límite húmeda tapada por una inversión térmica en altura. En años recientes la capa límite marina ha sido objeto de números estudios científicos (Mechoso et al, 2014) y por lo tanto su estructura y variabilidad es ampliamente conocida. La altura de la capa de mezcla aumenta desde unos 400 metros en la zona central del país hasta más de 1000 metros en el Norte grande (Garreaud et al, 2008). En cambio, el modelo WRF simula una capa de mezcla de altura mas o menos constante de 500 metros a lo largo de este zona. Entonces, es probable que el índice de remoción este subestimado en la costa desde la región de Coquimbo hacia el Norte.

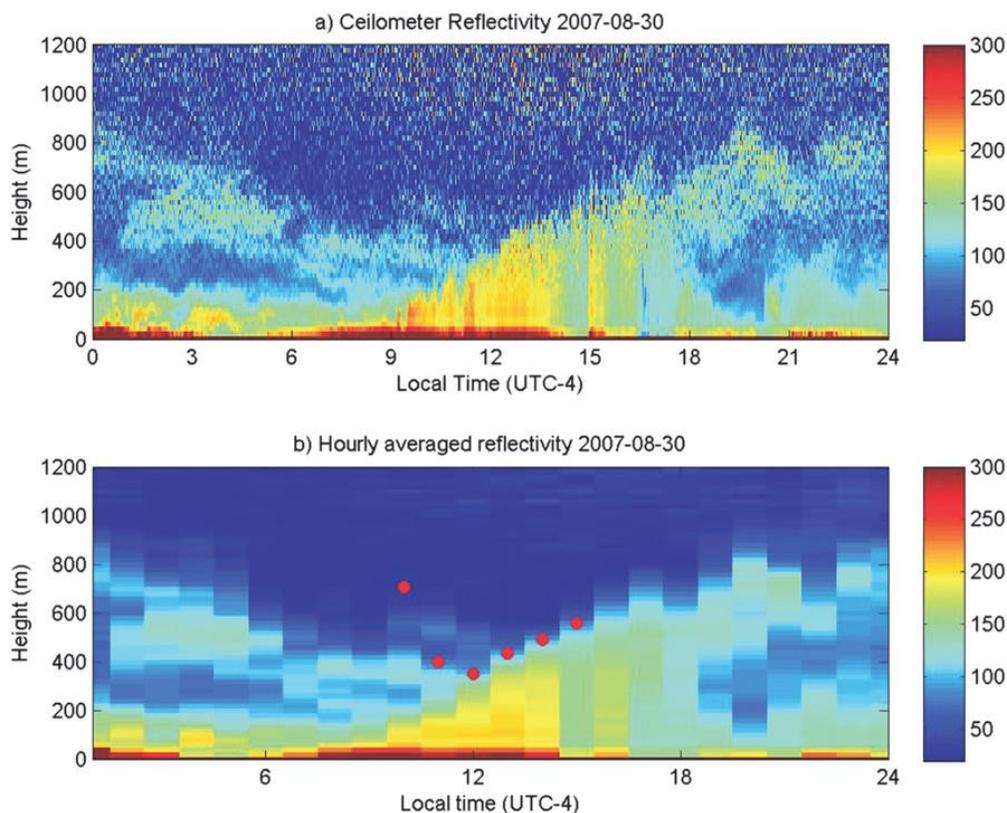


Figura 8 Datos del nefobasímetro ubicado en la ciudad de Santiago que muestra el desarrollo de la capa de mezcla diurna. (Figura 2 en Muñoz y Undurraga, 2010)

4.5.3 Relación con MP10

Para determinar si el índice de ventilación tiene o no alguna relación con los niveles de contaminación se utilizaron mediciones de MP10 tomadas de la red nacional de calidad del aire (SIMCA) para la zona central de Chile. Corresponden en la base de datos que está siendo recopilada por UNTEC en el marco del proyecto “Caracterización del factor meteorológico asociado a contaminación atmosférica y propuesta de diseño de redes meteorológicas para el seguimiento y pronóstico de calidad del aire en cuatro regiones del sur de Chile” para el Ministerio de Medio Ambiente, y que han sido sometidos a un riguroso control de calidad.

La Figura 9 muestra la relación entre el valor promedio de MP10 en cada localidad y el valor mediano del índice de remoción. Es posible apreciar que efectivamente existe una relación aproximadamente inversa entre el valor del índice y el nivel de contaminación. La relación es relativamente débil, seguramente debido a la influencia de la variación en los niveles de emisión de MP10 en las localidades consideradas. Es importante reconocer que este análisis solo considera una región acotada del país. Futuros análisis deben considerar una gama más amplia de estaciones considerando puntos de monitoreo en el Norte y el Sur del país.

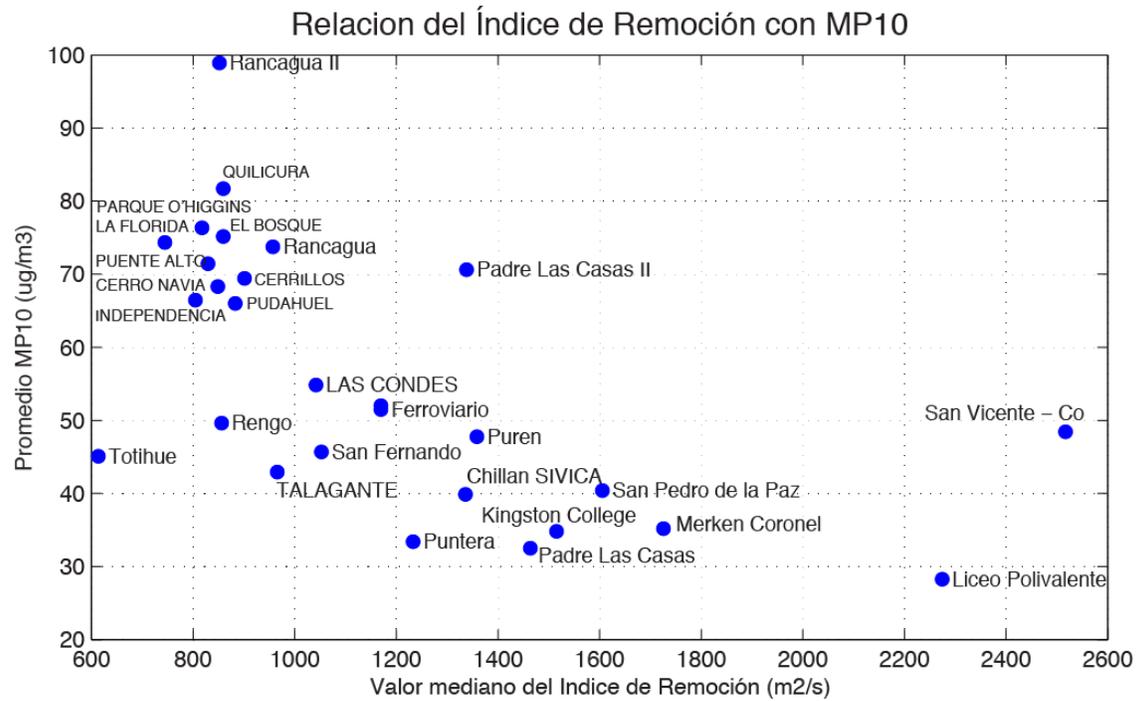


Figura 9 Relación entre el promedio de MP10 y el índice de remoción en el centro-sur de Chile. El promedio de MP10 contempla todo el periodo disponible en cada sitio. Se consideran sólo los sitios que cuentan con más de 6 meses de información.

5 Entrega de Productos

5.1 Bases de datos geográficas y herramienta de visualización en-línea.

El presente apartado describe la base de datos geográfica que contiene los resultados asociados al Índice de Remoción de contaminantes, así como la herramienta de visualización de resultados en-línea.

Descripción de las Bases de datos geográfica.

El contenido de la base de datos geográfica se resume en la Tabla 10.

Conjunto de datos	Descripción	Formato
Índice de Remoción – Año Completo	Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano anual del índice de Remoción	Raster, GeoTiff y Geodatabase
Índice de Remoción – Verano	Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano del Índice de Remoción para el semestre más cálido del año (período noviembre a fines de marzo)	Raster, GeoTiff y Geodatabase
Índice de Remoción – Invierno	Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano del Índice de Remoción para el semestre más frío del año (período abril a fines de octubre)	Raster, GeoTiff y Geodatabase
Índice de Remoción – Día (08 a 20 hrs)	Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano anual diurno del Índice de Remoción (entre las 08 y 20 hrs)	Raster, GeoTiff y Geodatabase
Índice de Remoción – Noche (20 a 08 hrs)	Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano anual nocturno del Índice de Remoción (entre las 20 y 08 hrs)	Raster, GeoTiff y Geodatabase
Base de datos completa del Índice de Remoción	Capas que representan la variabilidad espacial y temporal del valor mediano del Índice de Remoción	Raster, GeoTiff y Geodatabase
Promedio zonal del Índice de Remoción	Capas representativas del promedio zonal del Índice de Remoción sobre áreas de interés, tales como regiones, provincias, comunas, ciudades	Polígono, GeoDataBase (ESRI)
Mapas en diseño de impresión del resumen estadístico del Índice de Remoción sobre zonas de interés	Mapas de ejemplo en diseño de impresión que han sido confeccionados a partir de la base de datos que resumen Índice de Remoción sobre zonas de interés	Imagen, PNG

Tabla 10. Resumen del contenido de las bases de datos geográficas

Tal como muestra la Tabla 10, la base de datos geográfica del índice de Remoción puede ser categorizada en dos grupos. El primero consiste en los resultados del índice de Remoción en formato raster (GeoTIFF y Geodatabase), y el segundo a capas vectoriales con promedios zonales del índice de remoción, útiles para el análisis y la generación de mapas en diseño de impresión.

Las capas zonales utilizadas en el cálculo de promedios zonales del Índice de Remoción se describen en la Tabla 11. Los promedios zonales del índice de Remoción así como su categorización han sido almacenados en la tabla de atributos de cada capa según indica la Tabla 12.

Zona de Interés	Descripción
Región	Índice de Remoción promedio al interior del límite administrativo regional
Provincia	Índice de Remoción promedio al interior del límite administrativo provincial
Comuna	Índice de Remoción promedio al interior del límite administrativo comunal
Zonas pobladas	Índice de Remoción promedio al interior zonas pobladas. La base de datos de origen distingue entre ciudad, pueblo, localidad, caserío y aldea. Se ha seleccionado el conjunto Ciudades y se le ha aplicado un buffer de 1km.

Tabla 11 Capas utilizadas para el cálculo del promedio zonal del Índice de Remoción

Nombre del campo que contiene el promedio zonal	Descripción del campo que contiene el promedio zonal
median_latlon_dia_agno_completo	Valor promedio del Índice para el año completo periodo diurno (08 a 20hrs) sobre el área de interés
Class_median_latlon_dia_agno_completo	Categorización del Índice de Remoción para el año completo periodo diurno (08 a 20hrs) según la escala definida en Tabla 8
median_latlon_dia_invierno	Valor promedio del Índice de Remoción en invierno (abril a fines de octubre), periodo diurno (08 a 20 hrs) sobre el área de interés
Class_median_latlon_dia_invierno	Categorización del Índice de Remoción en invierno (abril a fines de octubre), periodo diurno (08 a 20 hrs) según la escala definida en Tabla 8
median_latlon_dia_verano	Valor promedio del Índice de Remoción en verano (noviembre a fines de marzo), periodo diurno (a 20 hrs) sobre el área de interés
Class_median_latlon_dia_verano	Categorización del Índice de Remoción en verano (noviembre a fines de marzo), periodo diurno (08 a 20 hrs) según la escala definida en Tabla 8
median_latlon_noche_agno_completo	Valor promedio del Índice de Remoción para el año completo periodo nocturno (20 a 08hrs) sobre el área de interés
Class_median_latlon_noche_agno_completo	Categorización del Índice de Remoción para el año completo periodo nocturno (20 a 08hrs) según la escala

	definida en Tabla 8
median_latlon_noche_invierno	Valor promedio del Índice de Remoción en invierno (abril a fines de octubre), periodo nocturno (20 a 08hrs) sobre el área de interés
Class_median_latlon_noche_invierno	Categorización del Índice de Remoción en invierno (abril a fines de octubre), periodo nocturno (20 a 08hrs) según la escala definida en Tabla 8
median_latlon_noche_verano	Valor promedio del Índice de Remoción en verano (período noviembre a fines de marzo), periodo nocturno (20 a 08hrs) sobre el área de interés
Class_median_latlon_noche_verano	Categorización del Índice de Remoción en invierno (período noviembre a fines de marzo), periodo nocturno (20 a 08hrs) según la escala definida en Tabla 8
median_latlon_todo_dia_agno_completo	Valor promedio del Índice de Remoción para todo el día, año completo sobre el área de interés
Class_median_latlon_todo_dia_agno_completo	Categorización del Índice de Remoción para todo el día, año completo según la escala definida en Tabla 8
median_latlon_todo_dia_invierno	Valor promedio del Índice de Remoción para todo el día en invierno (abril a fines de octubre) sobre el área de interés
Class_median_latlon_todo_dia_invierno	Categorización del Índice de Remoción para todo el día en invierno (abril a fines de octubre) según la escala definida en Tabla 8
median_latlon_todo_dia_verano	Valor promedio del Índice de Remoción para todo el día en verano (noviembre a fines de marzo) sobre el área de interés
Class_median_latlon_todo_dia_verano	Categorización del Índice de Remoción para todo el día en invierno (noviembre a fines de marzo), según la escala definida en Tabla 8

Tabla 12 Descripción de los campos contenidos en las capas de promedio zonal del Índice de Remoción

Cálculo del promedio zonal del Índice de Remoción

Estadísticas zonales del Índice de Remoción pueden ser calculadas para cualquier zona de interés a partir de las bases de datos geográficas en formato raster disponible en línea. El procedimiento para su cálculo consiste en el uso de la herramienta denominada Estadística Zonal⁷ contenida en la caja de herramientas de la extensión Análisis Espacial del Software ArcGIS (ESRI).

Para proceder, se debe definir la capa raster de interés (por ejemplo, capa GeoTIFF del Índice de Remoción – Invierno), la capa que utilizará como máscara (por ejemplo, un capa de polígonos representativa de ciudades, agregadas a nivel comunal) y finalmente definir el parámetro estadístico⁸ que se desea calcular (por ejemplo, el

⁷ <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/009z/009z000000w7000000.htm>

⁸ MEAN — Calcula la media de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida. MAJORITY — Determina el valor que más se repite de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida. MAXIMUM — Determina el valor más grande de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida. MEDIAN — Determina el valor mediano de todas las celdas en el ráster de valores que

promedio), lo que dará como resultado una capa con valores homogéneos para cada una de las zonas definidas por la capa utilizada como máscara.

A continuación se muestra el resultado acabado de un ejercicio de similares características al ejemplo antes mencionado. El ejercicio utilizó las siguientes capas raster de la base de datos GeoTIFF:

- Índice de Remoción para todo el día y periodo todo el año,
- Índice de Remoción para todo el día en invierno, e
- Índice de Remoción para todo el día en verano.

Conjuntamente, el ejercicio incluye la utilización de la capa Áreas Urbanas (y la definición de un subconjunto de datos según atributo “Ciudades”) del tipo polígono que ha sido descargada desde el Sistema de integrado de Información Territorial de la Biblioteca del Congreso Nacional⁹.

En una primera etapa, se aplica un buffer de 1 km a la capa de ciudades (resultado → ‘ciudades buffer 1km’). Seguidamente, se procede a cortar (herramienta ‘Clip’) la capa de comunas con la capa de ‘ciudades buffer 1km’. La capa resultante corresponde a un conjunto de polígonos que tiene la forma de ‘ciudades buffer 1km’, pero con una estructura de atributos idéntica a la de la capa de comunas (en adelante esta capa resultante se denomina ‘clip comunas’).

Luego, por medio del uso de la herramienta Estadística Zonal (de la extensión Analista Espacial de ArcGIS) y utilizando como entrada las capas raster anteriormente listadas en conjunto con la capa ‘clip comunas’, se obtiene como resultado capas con el promedio zonal sobre la zona definida por la capa ‘clip comunas’. Para finalizar, se le asigna el promedio zonal recién calculado a la capa ‘clip comunas’.

Así, la Figura 10 muestra el resultado para las ciudades emplazadas en la zona centro sur del país. Más específicamente, la figura muestra la clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa ‘todo el día’ para el periodo ‘invierno’ sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km.

pertenecen a la misma zona que la celda de salida. MINIMUM — Determina el valor más pequeño de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida. MINORITY — Determina el valor que menos se repite de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida. RANGE — Calcula la diferencia entre el mayor y el menor valor de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida. STD — Calcula la desviación estándar de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida. SUM — Calcula el valor total de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida. VARIETY — Calcula el número de valores únicos de todas las celdas en el ráster de valores que pertenecen a la misma zona que la celda de salida.

⁹ http://siit2.bcn.cl/mapas_vectoriales/index_html/

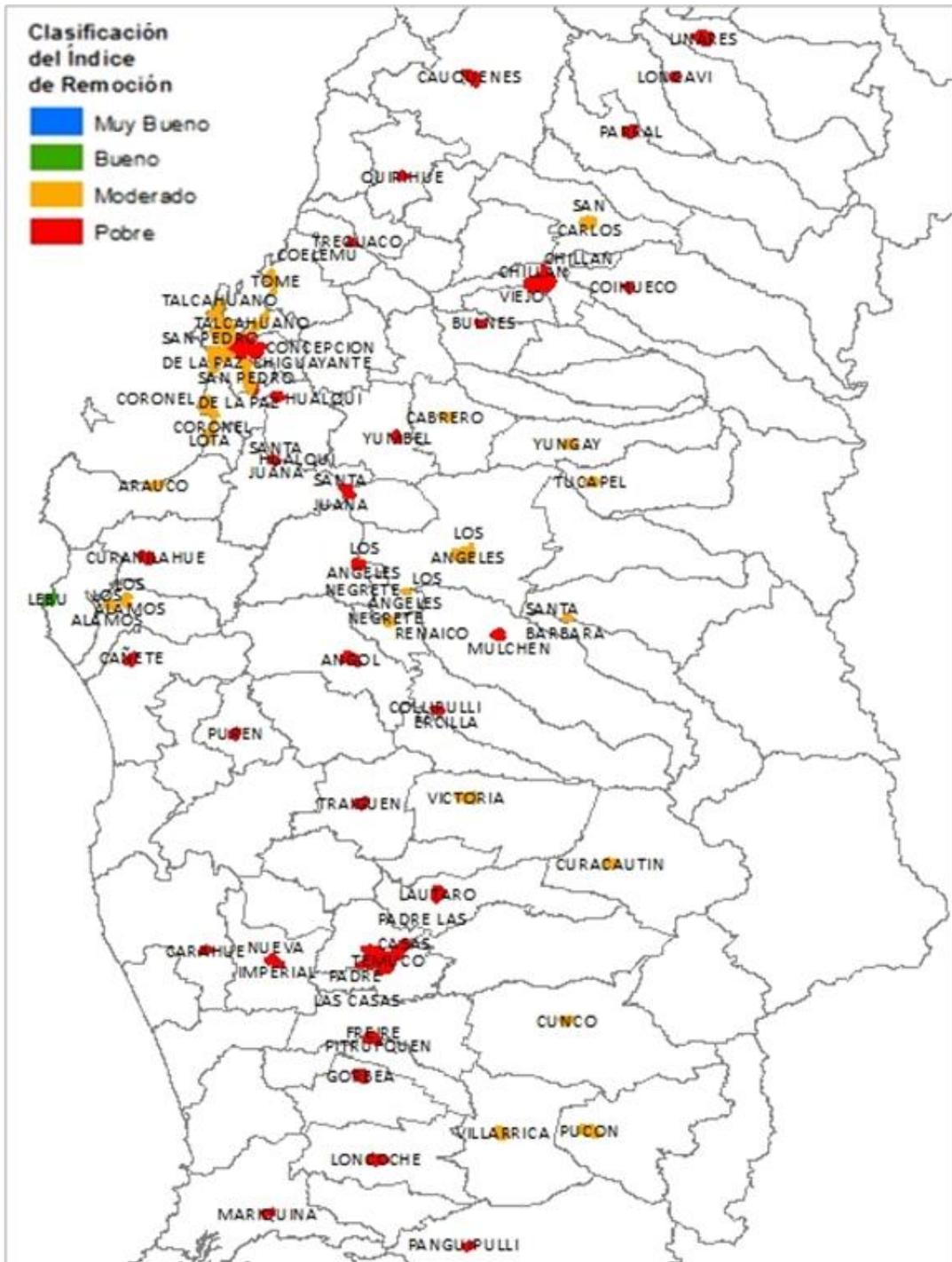


Figura 10. Clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa 'todo el día' en periodo 'invierno' sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km por fuera del límite de la ciudad.

El pequeño tamaño de los polígonos representados en la Figura 10 dificulta la visualización e inspección de un analista que desea tener una visión más general, como por ejemplo a nivel país. Es por eso que se ha aplicado una técnica destinada a anexar los resultados de la estadística zonal contenidos en la capa 'clip comunas' a la capa original de comunas, posibilitando de esta manera la generación de mapas de Chile continental más fáciles de leer y por tanto ventajosos para el análisis. Los resultados de esta representación complementaria son expuestos en la Figura 11, Figura 12 y Figura 13. En se distingue fácilmente la variabilidad comunal de la clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción sobre ciudades.

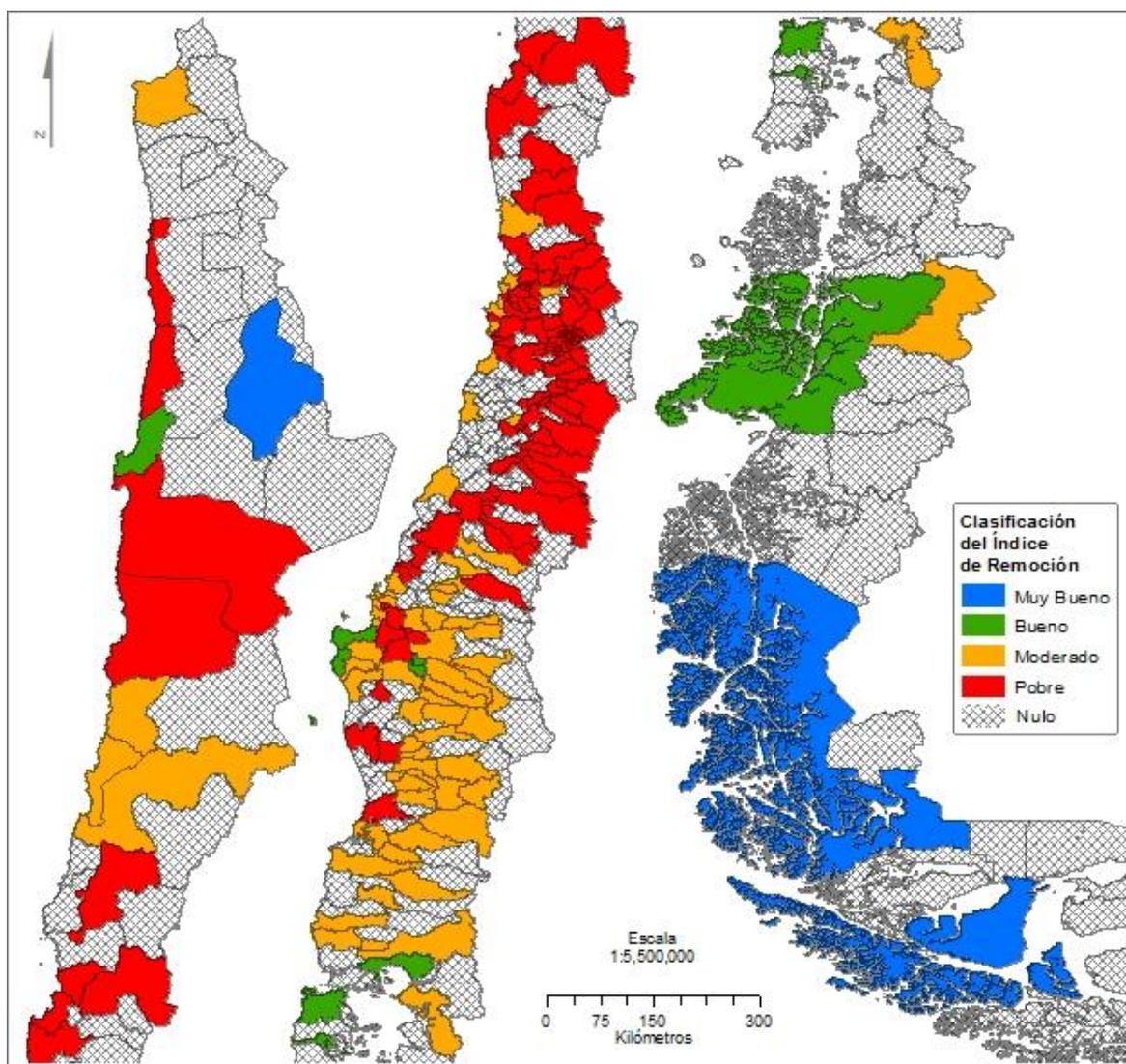


Figura 11 Representación a nivel comunal de la clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa 'todo el día' en el periodo 'todo el año' sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km por fuera del límite de la ciudad. Se asigna valor Nulo a aquellas comunas en las que no existe superposición con la capa 'Áreas Urbanas' (subconjunto de datos según atributo "Ciudades") descrita anteriormente

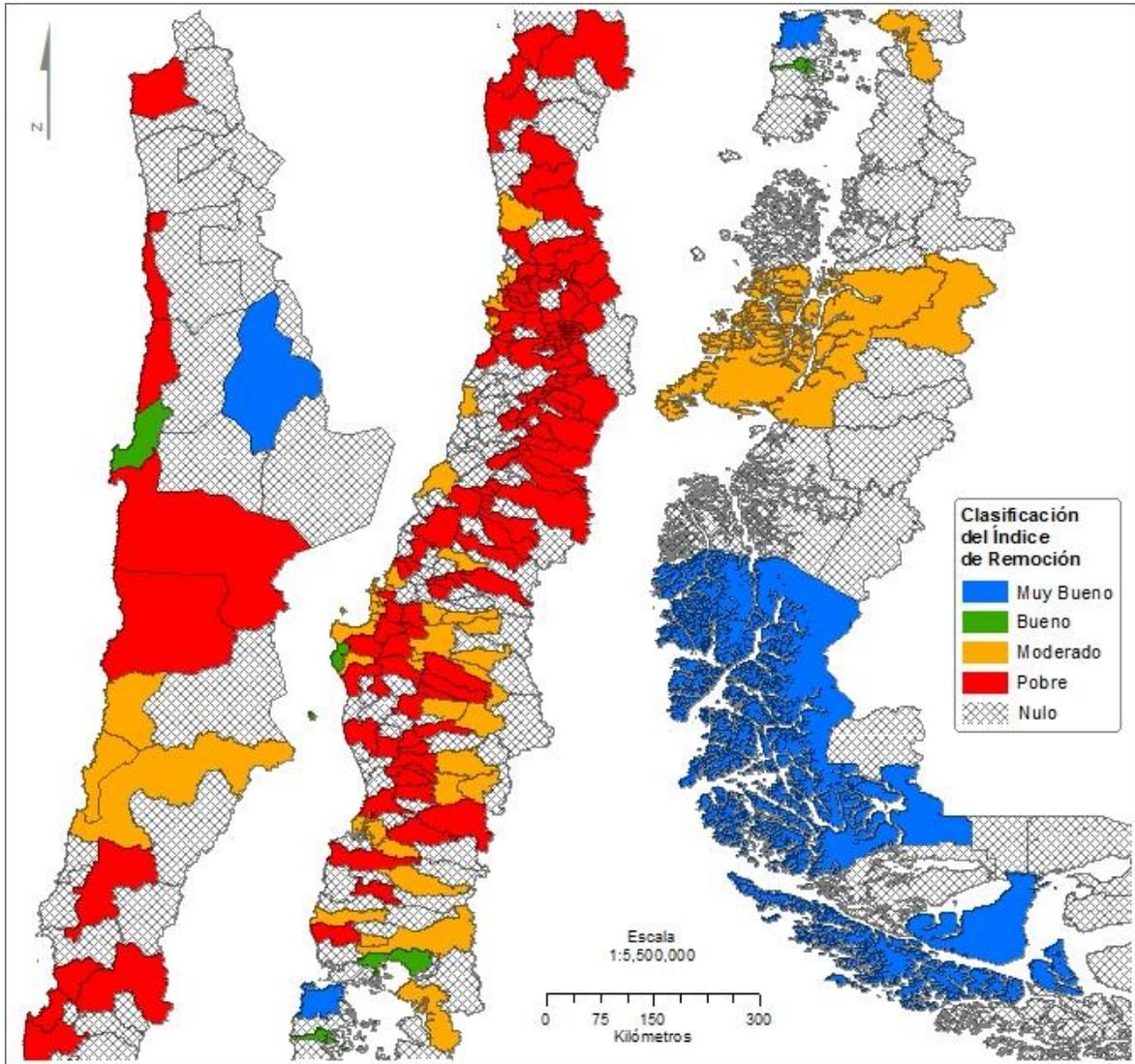


Figura 12 Representación a nivel comunal de la clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa 'todo el día' en el periodo 'invierno' sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km por fuera del límite de la ciudad. Se asigna valor Nulo a aquellas comunas en las que no existe superposición con la capa 'Áreas Urbanas' (subconjunto de datos según atributo "Ciudades") descrita anteriormente

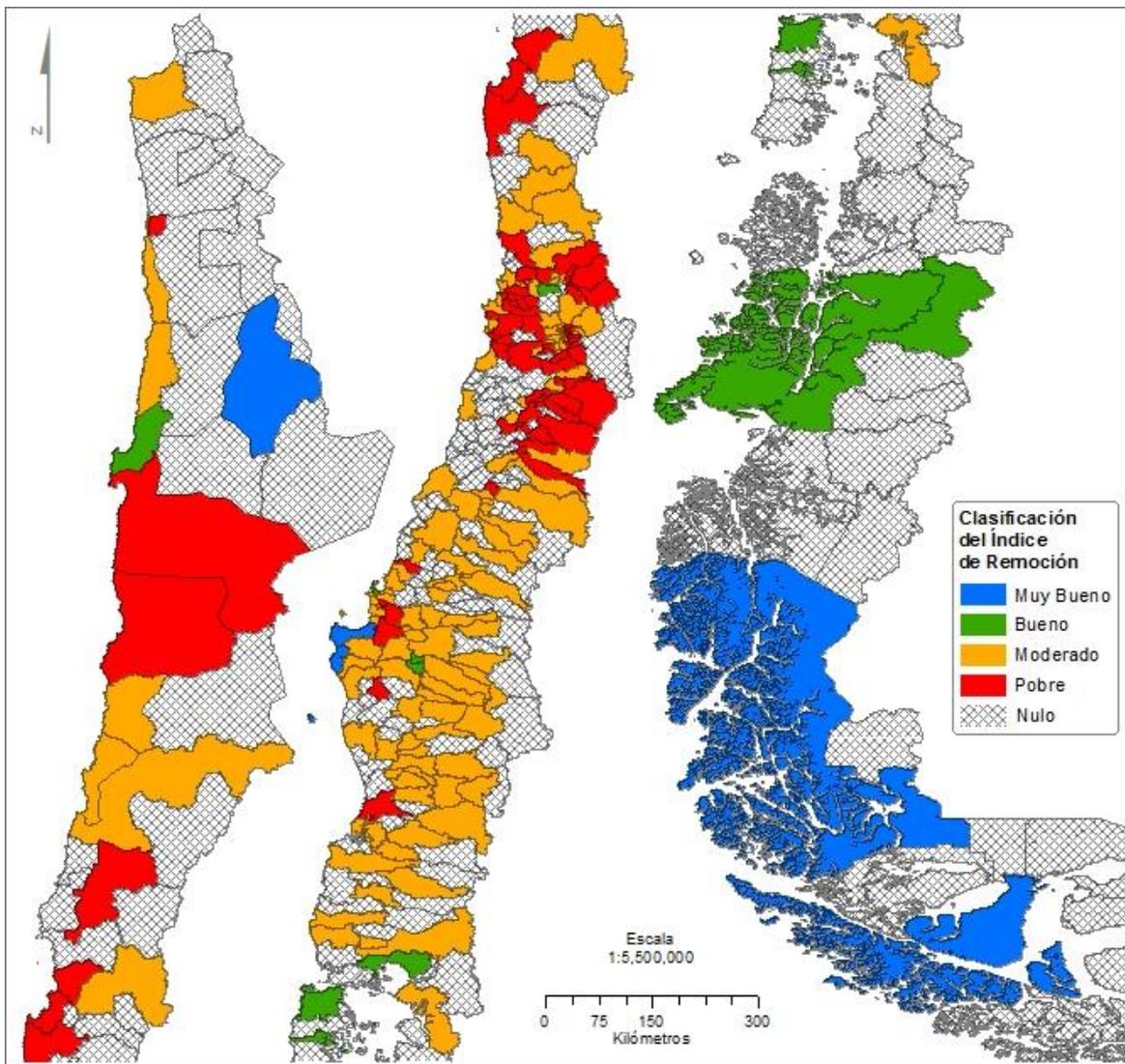


Figura 13 Representación a nivel comunal de la clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción aplicado a la capa 'todo el día' en el periodo 'verano' sobre áreas definidas como ciudades, anexando una zona buffer de 1km por fuera del límite de la ciudad. Se asigna valor Nulo a aquellas comunas en las que no existe superposición con la capa 'Áreas Urbanas' (subconjunto de datos según atributo "Ciudades") descrita anteriormente

Promedios zonales adicionales forman parte del contenido de la base de datos, entre los que se encuentran regiones, provincias, comunas y tal como se vio, ciudades. La Figura 14 muestra la Clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción a nivel regional para el periodo nocturno (20 a 08 hrs) año completo, invierno y verano.

La Figura 14 muestra una situación confusa y por tanto interesante de evaluar, ya que en ella se puede apreciar que el promedio zonal a nivel regional para el periodo nocturno (20 a 08 hrs) en la zona centro es más pobre durante el año completo y verano que durante el invierno, resultando contrario a lo que indica el sentido común. La explicación de esta situación se relaciona con eventos de viento en altura de

elevada magnitud de frecuente ocurrencia durante el invierno, los cuales tienen un fuerte impacto sobre la magnitud del Índice de Remoción en zonas cordilleranas. De lo anterior se desprende entonces la necesidad de proceder con cautela al momento de interpretar promedios zonales calculados sobre áreas de interés de gran tamaño y heterogeneidad como lo son en este caso las regiones.

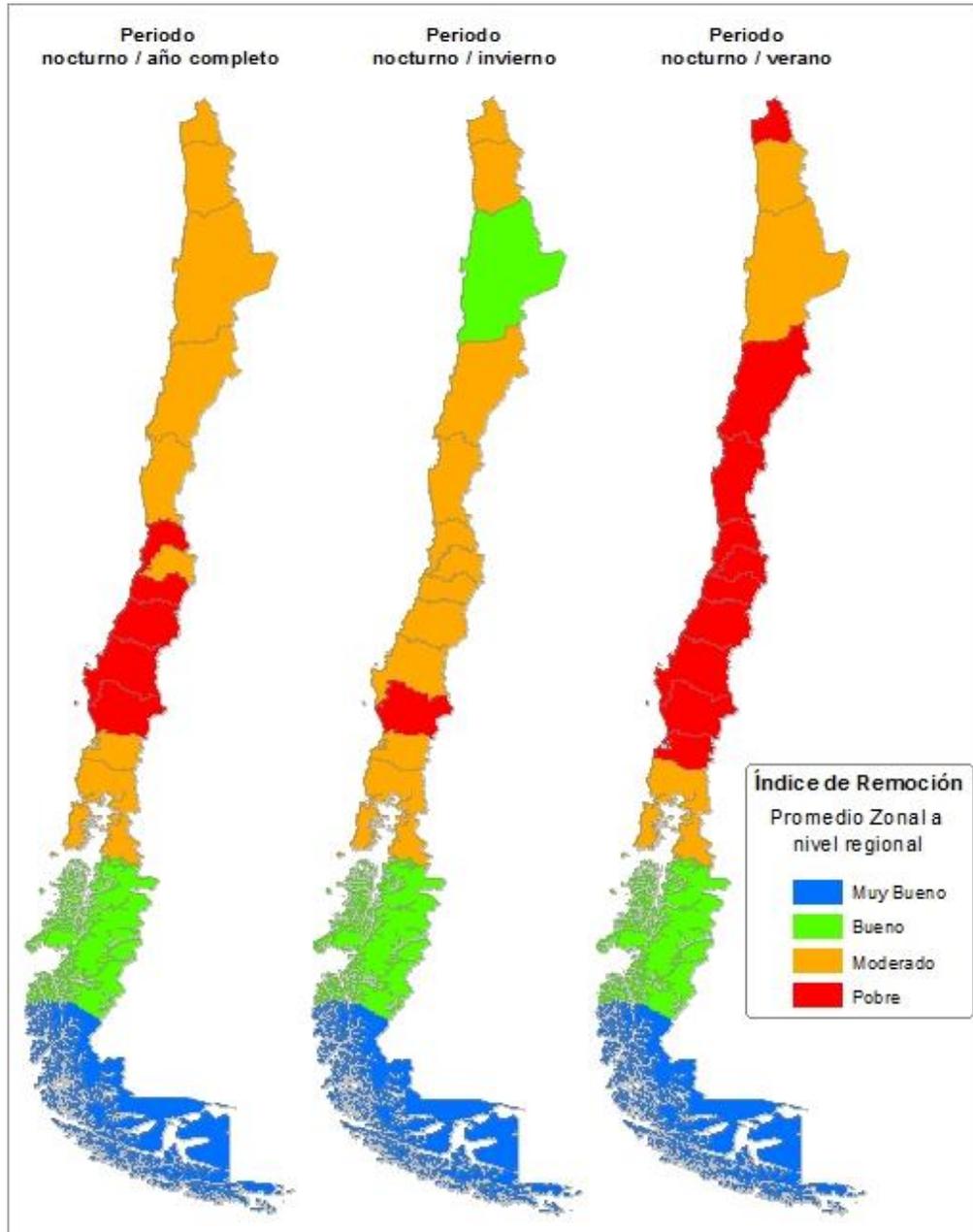


Figura 14 Clasificación del promedio zonal del Índice de Remoción a nivel regional para el periodo nocturno (20 a 08 hrs) año completo, invierno y verano.

5.2 Descripción de la herramienta de visualización de resultados en-línea.

La herramienta de visualización de resultados en-línea ofrece al usuario diversas alternativas para una revisión eficaz del Índice de Remoción. El sitio se alberga en el siguiente enlace:

<http://walker.dgf.uchile.cl/IndiceRemocion/>

El uso del servicio denominado Google Maps en combinación con Java Script y HTML contribuye a que el usuario experimente una navegación ágil e intuitiva. A continuación se presenta una breve descripción de la herramienta de visualización de resultados en-línea.

La Figura 15 muestra la vista de inicio de la herramienta de visualización de resultados en-línea. Seguidamente, la Figura 16 muestra un esquema que resume sus componentes.

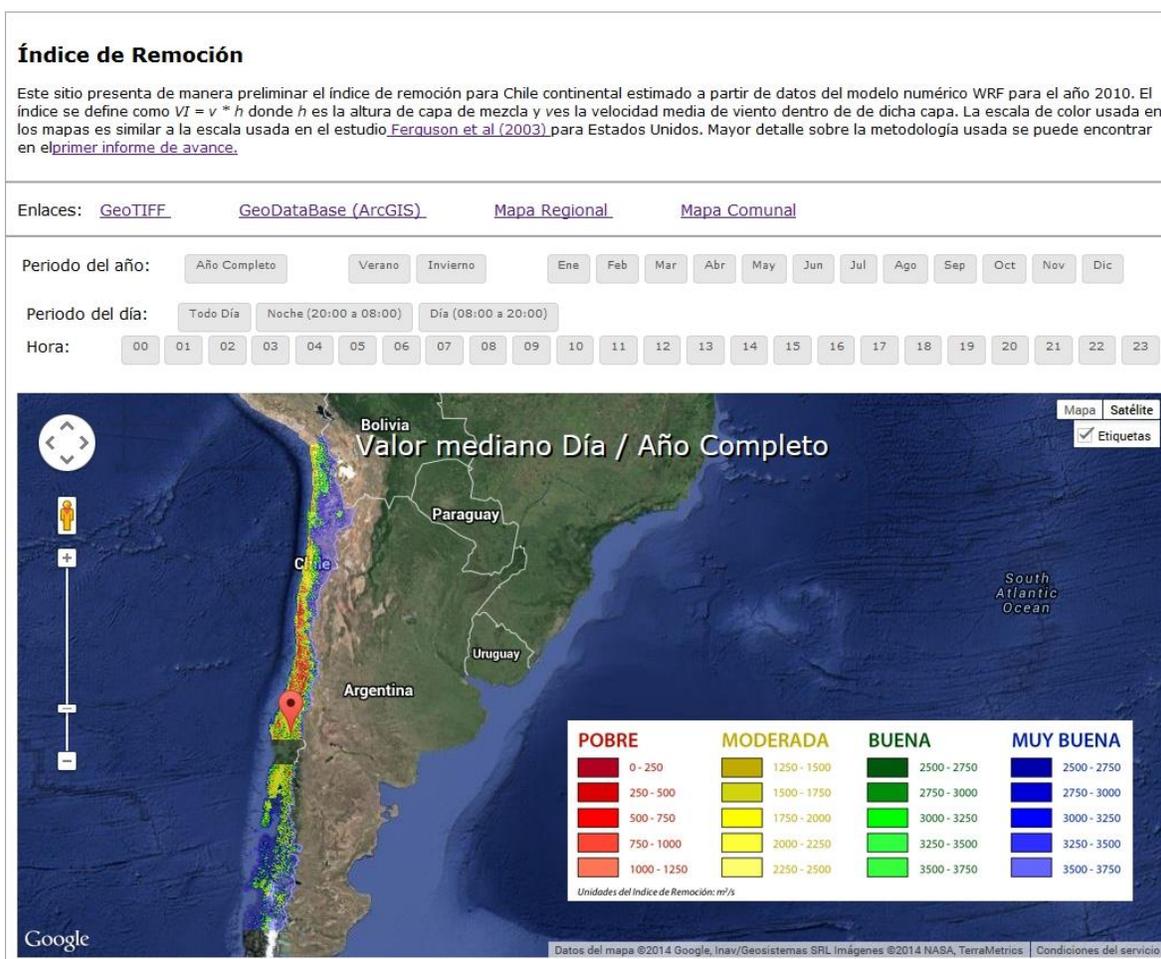


Figura 15. Vista inicial de la herramienta de visualización de resultados en-línea

Sección 'Título/Descripción' → Breve descripción del Índice de Remoción que incluye referencias bibliográficas.

Sección 'Enlaces' → Permite descargar bases de datos geográficas del Índice de Remoción en diversos formatos.

Sección 'controles de visualización' → Capas geográficas del Índice de Remoción desplegadas sobre Google Maps®.

El usuario puede activar el siguiente conjunto de resultados:

Periodo del año

- a) **Año completo:** Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano anual del índice de Remoción.
- b) **Estación de Verano:** Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano del Índice de Remoción para el semestre más cálido del año (periodo noviembre a fines de marzo).
- c) **Estación de Invierno:** Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano del Índice de Remoción para el semestre más frío del año (periodo abril a fines de octubre).
- d) **Valor mensual:** Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano del Índice de Remoción para cada mes del año

Periodo del día:

- a) **Todo el día:** Capa que representa el valor mediano del Índice de Remoción para todo el día (0 a 24 hrs).
- b) **Noche:** Capa que representa el valor mediano del Índice de Remoción Nocturno (20:00 a 08:00 hrs).
- c) **Día:** Capa que representa el valor mediano del Índice de Remoción Diurno (08:00 a 20:00 hrs).

Hora: Capa que representa la variabilidad espacial del valor mediano del Índice de Remoción para cada hora del día.



Figura 16. Esquema que resume los componentes de la herramienta de visualización de resultados en-línea

Referencias

- Allwine and Whiteman. 1994: Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation, *Atmospheric Environment*
- Duda 2004. A Modeling Study of PBL heights, *Unpublished Manuscript, University of Iowa*
- Eugensson et al. 2005: Development of a New Meteorological Ventilation Index for Urban Air Quality Studies, *Technical Note, Swedish meteorological Institute*
- Ferguson et al. 2003: Assessing Values of Air Quality and Visibility at Risk From Wildland Fires, *Research Paper, United States Department of Agriculture*
- Ferguson et al 2003: Regional Pollution Potential in the Northwestern United States, *Technical report, U.S. Department of Agriculture, Forest Service*
- Garreaud, R., J. Barichivich, D. A. Christie, and A. Maldonado 2008: Interannual variability of the coastal fog at Fray Jorge relict forests in semiarid Chile, *J. Geophys. Res.-Biogeosciences*, 113, G04011, doi:10.1029/2008JG000709.
- Gross 1970: The National Air Pollution Potential Forecast Program , *Technical Note, Environmental technical applications center*
- Holzworth 1967: Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States, *Journal of applied meteorology*
- Jackman et al 1977: Some meteorological aspects of air pollution in Utah with emphasis on the Salt Lake Valley, *NOAA technical Memorandum*
- Joukoff 1982: Daily forecasting of Air Pollution Potential, *Atmospheric pollution 1982 (Acta del congreso)*
- C. R. Mechoso, R. Wood, R. Weller, C. S. Bretherton, A. D. Clarke, H. Coe, C. Fairall, J. T. Farrar, G. Feingold, R. Garreaud, C. Grados, J. McWilliams, S. P. de Szoeke, S. E. Yuter, P. Zuidema, 2014: Ocean-Cloud-Atmosphere-Land Interactions in the Southeastern Pacific: The VOCALS Program. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 357-375; DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00246.1>
- Mitsumi 1999: Development of an objective forecasting algorithm for Santiago using Model Output Statistics. *Japanese Meteorological Agency*
- MINENERGIA 2012: El Explorador Eólico 2012: Descripción y Manual de Uso, Preparado por el Departamento de Geofísica , Universidad de Chile para el Ministerio de Energía de Chile

Ministerio de Medio Ambiente, 2012: Validación Independiente de las Metodologías De Pronóstico De Calidad Del Aire De Material Particulado (MP10 Y MP2,5), Preparado por UNTEC para el Ministerio de Medio Ambiente de Chile

Morales 2006: PMCA y material particulado MP10, *Contaminación atmosférica Urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en Santiago (libro)*

Muñoz y Undurraga 2010: Daytime Mixed Layer over the Santiago Basin: Description of Two Years of Observations with a Lidar Ceilometer, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*

Niemeyer 1960: Forecasting Air Pollution Potential, *Monthly Weather Review*

Pasch et al 2011: Meteorological characteristics associated with PM2.5 air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009 - 2010 Cleveland Multiple Air Pollutants Study, *Atmospheric Environment*

Pope 1989: Respiratory Disease Associated with Community Air Pollution and a Steel Mill, Utah Valley, *American Journal of Public Health*

Scire et al 2000: A Users guide for the CALPUFF dispersion model, *Earth tech inc.*

Seibert et al 1997: Mixing height Determination for Dispersion Modeling, *COST action 7 Working Group Report*

Shin y Hong, 2011: Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99, *Boundary Layer Meteorology*

Shrivastava et al, 2014: Evaluation of Parameterization Schemes in the WRF Model for Estimation of Mixing Height, *International Journal of Atmospheric Sciences*

Sukoriansky S, Galperin B, Perov V (2005) Application of a new spectral theory of stable stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice. *Boundary-Layer Meteorol* 117:231–257

Termonia et al 2003: A New Transport Index for Predicting Episodes of Extreme Air Pollution, *Journal of Applied Meteorology*

Venegas et al 1999: Atmospheric stagnation, recirculation and ventilation potential of several sites in Argentina, *Atmospheric Research*

Williams 1963: Air pollution potential over Salt Lake Valley of Utah as related to stability and Wind Speed, *Journal of Applied Meteorology*

Wu et al 2013: Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the Pearl River Delta in China, *Atmospheric Chemistry and Physics*