



**Proyecto FIC: 33-01-773: Estudio Para Evaluar el Impacto de la
Contaminación Atmosférica Sobre el Rubro Olivícola, Sector
Costero Valle del Huasco.**

INFORME FINAL

PREPARADO POR: DICTUC S.A. y Facultad de Agronomía, PUC.

PARA: SEREMI DE AGRICULTURA, REGIÓN DE ATACAMA

JUNIO 2012

Tabla de contenido

Antecedentes Generales de la zona olivícola del Huasco	7
a) Fuentes de contaminación industrial en el valle	7
b) Estudios previos de calidad del aire en la zona de Huasco.	8
i) Héctor Jorquera, 1999. "Particulate Matter Dispersion in the Huasco Valley, Chile"	8
ii) Universidad de Chile, 1999. "Estimación de la participación de las fuentes emisoras en el material particulado de la cuenca de Huasco".	9
iii) CENMA, 2006. "Estudio de la calidad del aire en la Comuna de Huasco"	12
Antecedentes del Proyecto	15
a) Descripción resumida del Proyecto	15
b) Objetivo General:.....	15
c) Objetivos Específicos:.....	15
I. Actividades asociadas al objetivo N° 1	16
a) Objetivo General	16
b) Productos esperados	16
1.a) Caracterizar todas las fuentes y la magnitud de sus emisiones a la atmósfera.....	17
a) Compilación de antecedentes de estudios existentes.	17
b) Información adicional y complementaria a estudios existentes.....	20
1.b) Caracterización física y química de las emisiones atmosféricas	23
1.d) Caracterización de la topografía del Valle de Huasco.....	26
1.e) Mapa de las concentraciones de contaminantes en la cuenca	28
a) Caso del Material Particulado Sedimentable (MPS).....	28
b) Concentraciones ambientales de SO ₂	33
1.f) Compilación y modelación de la meteorología.....	38
a) Compilación de la información meteorológica disponible.....	38
b) Modelación de la meteorología en el valle del Huasco, año 2009.	45
i) Resultados para las alturas de mezclado.	47
ii) Resultados para los campos de vientos.	54
iii) Relación entre meteorología y depositación de material particulado.....	61
1.g) Monitoreo complementario de MPS y hierro en el MPS, estimación de línea base. ...	62
1.h) Relación entre condiciones meteorológicas e impactos en la calidad del aire	77
a) Datos del monitoreo ambiental en Huasco.....	77
b) Resultados del modelo de dispersión CALPUFF para el SO ₂ en Huasco.....	79
c) Resultados del modelo de dispersión CALPUFF para el NO y NO ₂ en Huasco.....	81

d) Resultados del modelo de dispersión CALPUFF para el MP ₁₀ y MP _{2.5} en Huasco.....	83
1.i) Descripción de la información de entrada al modelo de dispersión	86
a) Dominio y grilla de modelación	86
b) Meteorología	86
i) Meteorología Superficial.....	87
ii) Meteorología en Altura	88
iii) Fuentes emisoras.....	88
iv) Receptores.....	89
1.j) Análisis de sensibilidad del modelo de dispersión	91
II. Actividades asociadas al Objetivo N° 2.....	92
a) Objetivo General.....	92
b) Productos Esperados	92
c) Metodología del estudio	92
i) Estudio del efecto de la contaminación por material particulado (MPS).	92
ii) Estudio del efecto de la contaminación ambiental por NO ₂ y SO ₂	94
iii) Estudio Anatómico	98
d) Actividades realizadas.....	98
2.a) Determinar la presencia y la concentración de elementos contaminantes.	98
a) Estudio del efecto de la contaminación por material particulado (MPS).	98
b) Estudio del efecto de la contaminación ambiental por NO ₂ y SO ₂	99
2.b) Correlación de producción y presencia o interacción con contaminantes.....	99
a) Estudio del efecto de la contaminación por material particulado (MPS).	99
i) Suelos	100
ii) Análisis de tejidos vegetales.....	102
iii) Lavado de hojas y frutos.....	105
iv) Lavado de hojas dentro del huerto – relación línea férrea	106
v) Lavado de hojas – relación planta pellets	107
vi) Lavado de frutos entre huertos – relación línea férrea	108
vii) Análisis de pulpa de frutos	111
viii) Lavado de frutos – relación planta pellets	112
b) Estudio Anatómico.....	114
i) Características del Material particulado	114
ii) Estudio anatómico de los tejidos vegetales (olivos)	115
iii) Estudio anatómico de los tejidos conductores o haces vasculares de las hojas.....	120

iv) Estudio anatómico de flores.....	121
c) Mediciones de Fotosíntesis.....	122
d) Mediciones del Índice de Cuaja.....	128
e) Estudio del efecto de la contaminación ambiental por NO ₂ y SO ₂	130
i) Suelos.....	130
ii) Estudio Anatómico.....	133
iii) Índice de Cuaja.....	136
2.c) Analizar trazas en los productos de la industria (aceites, aceitunas procesadas).	137
a) Introducción.....	137
2.d) Analizar el comportamiento de las trazas en cada uno de los procesos de elaboración de los alimentos.....	138
ii) Bibliografía.....	139
iii) Antecedentes estudios previos.....	140
2.e) Diagnóstico de la presencia y acumulación de metales específicos en el suelo.....	141
a) Introducción.....	141
b) Descripción del área de estudio.....	142
i) Características generales.....	142
ii) Propiedades de los suelos.....	143
iii) Fuentes de contaminación.....	144
c) Estudios previos relacionados a contaminación.....	144
i) Estudios previos en el Valle de Huasco.....	144
ii) Otros estudios con condiciones similares al área de estudio.....	146
d) Selección de sitios y muestreo de suelos.....	148
e) Análisis de laboratorio y análisis estadístico.....	151
f) Resultados.....	153
i) Caracterización de los sitios de muestreo.....	153
ii) Presencia de metales específicos en el suelo.....	161
iii) Cromo.....	164
iv) Manganeseo.....	165
v) Hierro.....	165
vi) Cobre.....	166
vii) Zinc.....	167
viii) Arsénico.....	167
ix) Plomo.....	168

x) Efecto de la distancia a las fuentes de emisión en la costa.....	169
xi) Efecto de la línea del tren.....	169
f) Conclusiones.....	173
g) Referencias.....	174
III. Actividades asociadas al objetivo N° 3	177
3.a) Determinar los índices máximos de emisión a los distintos contaminantes, sin afectar el desarrollo de la especie y la agroindustria asociada.	177
3.b) Proponer ajustes a las normativas (concentraciones máximas) o la creación de nuevas normas en caso de que no existiesen. Considerar el efecto agudo y crónico (Ej.: acumulación por años de sedimentación de MP).	177
3.c) Proponer metodologías para la remoción de los elementos encontrados, en caso de que existan y afecten, en el árbol o en el proceso de elaboración.....	177
Actividades asociadas al objetivo N° 4	178
a) Objetivo General.....	178
b) Productos esperados	178
4.a) Proponer la ampliación o adecuación de sistema de monitoreo de calidad del aire.	179
a) Propuesta de modificación y ampliación del monitoreo de calidad del aire.	180
b) Actividades en la segunda etapa del proyecto.....	181
4.b) Determinar las necesidades de información meteorológica que requiere el sistema de monitoreo para correlacionar las variables de tiempo-calidad del aire.	182
4.c) El sistema de monitoreo debe considerar un sistema envío automático de los resultados de monitoreos y especialmente de alerta ante el incumplimiento de las normativas.....	184
4.d) Proponer un sistema de administración institucional del modelo que garantice la difusión oportuna de los resultados.....	187
Conclusiones del primer año del Estudio.	188
Actividades asociadas al Objetivo N°1.....	188
1.a) Caracterizar todas las fuentes y la magnitud de sus emisiones a la atmósfera.....	188
1.b) Caracterización física y química de las emisiones atmosféricas.	188
1.c) Descripción del procesamiento ambiental de los contaminantes emitidos	189
1.d) Caracterización de la topografía del Valle de Huasco.....	190
1.e) Mapa de las concentraciones de contaminantes en la cuenca.	190
1.f) Catastro de la información meteorológica disponible.	190
1.g) Monitoreo complementario de MPS y hierro en el MPS, estimación de línea base.	190
1.h) Relación entre condiciones meteorológicas e impactos en calidad del aire.	191
1.i) Descripción de la información de entrada al modelo de dispersión.	192

1.j) Análisis de sensibilidad del modelo de dispersión.....	192
Actividades asociadas al Objetivo N°2.....	193
Actividades asociadas al Objetivo N°4.....	195
4.a) Proponer la ampliación o adecuación de sistema de monitoreo de calidad del aire y los elementos a monitorear, su temporalidad, frecuencia, metodología y tecnología (en línea). Definición de inversiones y recursos necesarios para dar sustentabilidad y seguimiento al monitoreo.....	195
4.b) Determinar las necesidades de información meteorológica que requiere el sistema de monitoreo para correlacionar las variables de tiempo-calidad del aire.	196
4.c) El sistema de monitoreo debe considerar un sistema envío automático de los resultados del monitoreo y especialmente de alerta ante el incumplimiento de la normativas.	196
4.d) Proponer un sistema de administración institucional del modelo que garantice la difusión oportuna de los resultados.	196

Antecedentes Generales de la zona olivícola del Huasco

El área del Estudio corresponde a la parte inferior del Valle del Río Huasco, ubicado en la Región de Atacama, Provincia de Huasco, en el área comprendida entre las comunas de Huasco y Vallenar (Figura 2). El Valle de Huasco propiamente tal es el segundo valle transversal de la región, y se extiende aproximadamente entre los paralelos 28°22' y 29°32' de latitud Sur, con una hoya hidrográfica de 9850 km². La fisonomía del Valle de Huasco responde a las típicas de la región costera de Atacama, donde se intercalan en forma sucesiva cordones montañosos y valles transversales (Figura 3).

Morfológicamente, el Valle de Huasco se puede dividir en dos grandes sectores: origen y curso inferior. Contado desde su nacimiento, el Río Huasco tiene una longitud de 88 km hasta su desembocadura en el mar, justo al norte de la ciudad de Huasco. En el sector del nacimiento del río y la desembocadura de la Quebrada El Jilguero (5 km al oriente de Vallenar), el río toma el típico curso de un cajón cordillerano, con un lecho relativamente estrecho, confinado por cerros de roca. En su curso inferior (desde la Quebrada El Jilguero, hasta la desembocadura), el río tiene una longitud de 55 km. En esta zona la caja del río se ensancha y aparecen extensas terrazas fluviales a lo largo del valle. Es así como próximo a la desembocadura la caja del río alcanza a más de 2 km de ancho.

En términos climáticos, el área de estudio se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo, con un incremento y máximo estacional de precipitaciones durante el invierno en su sector más árido, y un déficit hídrico durante más de la mitad del año. El Valle de Huasco se caracteriza por tener un periodo libre de heladas de 11 meses (de agosto a junio). Las temperaturas extremas se observan en julio (mínima de 5°C) y enero (máxima de 28°C).

En el sector comprendido entre la localidad de Vallenar y la desembocadura, dominan las plantaciones de olivos. Estos terrenos agrícolas se concentran en las áreas aledañas a las terrazas fluviales del cauce, y es la principal actividad económica silvoagropecuaria de la zona. El cultivo del olivo posee gran proyección en la región, dada las condiciones climáticas favorables y la extensión de su valle.

a) Fuentes de contaminación industrial en el valle

Las principales fuentes de contaminación en la zona corresponden a las Centrales Termoeléctricas Guacolda y ENDESA, y a la Planta de Pellets de Hierro de la Compañía Minera del Pacífico (CMP), todas ubicadas en la zona costera sur de la ciudad de Huasco.

En el caso de la Central Termoeléctrica Guacolda, ésta opera en base a mezclas de carbón bituminoso y sub-bituminoso para producir potencia eléctrica para el sector minero. La generación de energía corresponde a la mayor fuente de emisiones en la zona en términos de gases (SOx, NOx), como se detalla más adelante en la Tabla 7, y su actividad de generación eléctrica ha sido siempre creciente desde que se inició su operación en 1995.

La Central Termoeléctrica Huasco de ENDESA se compone de cinco unidades generadoras, las dos primeras asociadas a la Central Huasco Vapor, y las tres restantes a la Central Huasco TG. La Central Huasco Vapor es de tipo térmica en base a carbón. La Central Huasco TG es de tipo térmica de, con combustión a partir del petróleo diesel IFO 180. Los principales contaminantes emitidos desde estas centrales (Guacolda y ENDESA) son material particulado y dióxido de azufre (Tabla 3, Tabla 4). No obstante, esta central termoeléctrica emite mucho menos masa de contaminantes que la central termoeléctrica Guacolda, ya que su potencia instalada es de 16 MW a carbón y 75 MW con diesel IFO180, mientras que AES GENER tiene instalados 600 MW a carbón en Huasco (Unidades 1 a 4)¹.

La Planta de Pellets de Hierro de CMP, ubicada 5 km al sur del Puerto de Huasco, produce aglomerados de minerales de hierro y consta de una planta de molienda, más una unidad de pelletización industrial. El proceso de producción de hierro se realiza mediante la combustión de carbón de tipo bituminoso. Las emisiones de esta planta son principalmente material particulado con alto contenido de hierro, usado como materia prima, y contaminantes emitidos desde los procesos de secado y pelletización (Tabla 5). Esta es la mayor fuente de emisión de material particulado en la zona (ver resumen de emisiones en Tabla 12).

Con respecto a la caracterización química de las emisiones, en estudios previos se ha analizado la composición química de ellas (Estudio para la Generación de Información de Soporte Técnico necesaria para la Revisión del D.S. No4 del Ministerio de Agricultura). Dentro de los elementos más abundantes se mencionan el hierro (Fe) en el caso de la planta de pellets, y silicio (Si), aluminio (Al) y calcio (Ca) en el caso de las generadoras termoeléctricas (Tabla 21).

b) Estudios previos de calidad del aire en la zona de Huasco.

A continuación se resumen tres estudios previos que abordan la problemática de la calidad del aire en el valle del Huasco, específicamente a estimar hasta donde llega el aporte de la industria hacia el interior del valle o bien cuales son los impactos de dicha actividad en la calidad del aire en la ciudad de Huasco.

i) Héctor Jorquera, 1999. "Particulate Matter Dispersion in the Huasco Valley, Chile"

En ese trabajo se modeló por primera vez la dispersión y depositación de MPS en el valle del Huasco. Se usó como inventario de emisiones el desarrollado por la consultora Knight-Piesold como parte del proceso de generación de información técnica de apoyo al proceso de revisión del DS 4 del Ministerio de Agricultura, decreto que define la norma de MPS y de hierro sedimentable para el valle de Huasco. La información meteorológica (de la estación de monitoreo de CMP ubicada en Los Olivos de Bellavista, Huasco bajo) solo estaba disponible para los meses de Noviembre y Diciembre de 1998, que fue finalmente la utilizada en el

¹ Fuente: Centro de Despacho Económico de Carga, www.cdec-sic.cl

modelo de dispersión que se aplicó, que fue el ISC3 (*Industrial Source Complex*, versión 3) de la EPA de EEUU.

Los resultados de ese estudio indican que la depositación de hierro está bien representada por el modelo de dispersión (considerando la incertidumbre de estas estimaciones) para las estaciones de monitoreo de MPS cercanas al complejo industrial, pero que para las estaciones de monitoreo más alejadas de dicho complejo, la depositación simulada es muy inferior (3 a 4 veces) que la observada, lo que se puede explicar si se considera la posibilidad de que el polvo superficial sea resuspendido por el viento en todo el valle y así llegue hierro adicional a depositarse en dichos receptores más al este de Huasco. Así, las emisiones de hierro (reportadas en el citado documento de revisión de la norma) parecen estar correctas para el año 1998 modelado.

Respecto a la sedimentación total de partículas (MPS), el modelo ISC3 subestima dichos impactos en toda la red de monitoreo del SAG, lo que se puede explicar si se considera que las fuentes de tipo difuso como la erosión eólica de polvo superficial del valle no fueron consideradas en la modelación. En efecto, la información meteorológica analizada en el valle muestra un viento persistente neto hacia el interior del valle prácticamente en todo el año (ver Figura 29 a Figura 32), lo que respalda el concepto de que hay un transporte neto de contaminantes particulados sedimentables hacia el interior del valle, lo cual constituye un efecto acumulativo de las emisiones del complejo industrial. Tampoco se puede descartar el efecto de fuentes difusas de MP_{10} en la cercanía de los monitores: preparación de terrenos agrícolas, polvo levantado en caminos sin pavimentar, etc. que no están relacionados con la actividad industrial en el puerto de Huasco².

Adicionalmente, se estimó en ese estudio que el aporte de las emisiones del complejo industrial (chimeneas solamente) a las concentraciones de MP_{10} en la ciudad de Huasco alcanzaban a 10 – 15 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en base mensual y a 30 -40 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en base diaria, por lo que no son aportes menores, considerando que las normas anual y diaria del MP_{10} son de 50 y 150 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], respectivamente.

ii) Universidad de Chile, 1999. “Estimación de la participación de las fuentes emisoras en el material particulado de la cuenca de Huasco”.

En ese Estudio se analizó por primera vez la composición química de muestras de MPS tomadas en los sitios de monitoreo de MPS de la red del SAG, en distintas fuentes emisoras y en algunos receptores seleccionados. El análisis de la composición química del MPS se hizo por el método PIXE (*Proton Induced X-ray Emission*). Posteriormente los datos fueron analizados mediante un modelo de receptor (*Chemical Mass Balance Model*, EPA EEUU) para hacer la estimación del aporte de las diferentes fuentes al MPS.

En primer lugar, analizando y graficando los datos de la red de monitoreo del SAG, se constató que la depositación de MP es mayor en las estaciones de monitoreo más cercanas a

² Este tipo de efectos ha sido detectado en el análisis químico del MPS realizado en el presente estudio, ver resultados de la actividad 1.g) en este Informe Final.

la zona industrial (planta de pellets de hierro de CMP), tanto en el lado sur como en el lado norte del valle, lo que concuerda con el estudio de modelación recién presentado. La cantidad total de MPS disminuye al alejarse el punto de monitoreo de la zona industrial, al igual que la cantidad de hierro que está presente en el material particulado sedimentable. Al calcularse el factor de enriquecimiento de hierro en el MPS, es decir, el cociente entre el % de Fe en el MPS y el % de Fe en un suelo natural (5.8%), se halló que este cociente está entre 5 y 9 en las estaciones de monitoreo del SAG cerca de las fuentes emisoras, mientras que en las estaciones más alejadas del puerto (pertenecientes a la red original del SAG de quince estaciones), ese cociente alcanza valores entre 3 y 4, indicando una sobre abundancia de Fe en el valle, la que sólo puede ser explicada por la contribución de las emisiones de CMP.

En ese estudio se hicieron también análisis al MPS, MP_{10} ambiental, a hojas de olivo, polvo de caminos, acopio de materiales en CMP y termoeléctricas y en todas las chimeneas existentes a la fecha del estudio. Las muestras tomadas fueron las siguientes:

- a) Doce muestras tomadas en sendos monitores de la red de MPS, en Noviembre 1998.
- b) Polvo sedimentado en hojas de olivo en la parcela de propiedad del Sr. Rojo, con una muestra medida más cerca de la línea del tren.
- c) Tres muestras de MP_{10} ambiental recolectadas en la misma parcela (Sr. Rojo) en tres días consecutivos de Noviembre 1998.
- d) Polvo superficial de caminos: camino de tierra, camino pavimentado, suelo agrícola y polvo sobre la línea del tren, todos ellos en la misma parcela ya citada o sus alrededores.
- e) Materiales en la planta de pellets: pre-concentrado de hierro, concentrado de hierro, pellets de hierro, carbón.
- f) Chimeneas de Endesa, Guacolda, y tres chimeneas en CMP: 2-A, 2-B y Scrubber, usando muestreo isocinético en los cinco casos.

Además se usaron datos ya existentes:

- i) Composiciones químicas medidas en el año 1990 en las chimeneas de CMP (2-A y 2-B), estudio de CIMM.
- ii) Seis perfiles de emisiones de la base de datos de la EPA de EEUU: polvo suelo urbano, polvo de suelo, sulfatos + iones, sulfato, fertilizantes y aerosol marino. Estos se usan para aplicar el modelo de receptor CMB.

Lo primero que llama la atención en los datos medidos en ese estudio es que la concentración de hierro en la muestra de chimeneas de CMP es muy bajo en Noviembre 1998 (5 a 10%), en contraste con el 57% medido en el estudio de CIMM de 1990, y que hay altos contenidos de S, Si y Cl, lo cual contrasta con los resultados de la citada campaña de 1990, donde el Si estaba entre el 1 y 2%. Estas discrepancias no son aclaradas en este Informe. En esta revisión estimamos que hubo un error de muestreo o de análisis químico (o ambos errores) que explica esa gran discrepancia de resultados.

Al aplicarse análisis de componentes principales a los datos de la composición química de doce puntos de medición de MPS, en ese estudio se encontró cuatro tipos de conglomerados de elementos característicos: polvo del suelo (Si, K, Ca y Ti), sulfatos (P y S), emisión de CMP

(Fe y Cr) y finalmente V como elemento aislado, que podría asociarse a emisiones de termoeléctricas (Endesa y Guacolda). Sin embargo, la baja cantidad de datos (doce muestras solamente) le quita robustez estadística a esos resultados.

Posteriormente se aplicó el método del balance químico de masa (*Chemical Mass Balance Model*) para relacionar las concentraciones medidas en los distintos puntos de monitoreo de MPS con los perfiles de las fuentes emisoras ya descritos. Esta metodología corresponde a la de un modelo de receptor, donde se estima el aporte de distintas fuentes (de composición química conocida) a las concentraciones medidas en el ambiente; en este estudio se aplicó el modelo CMB (*Chemical Mass Balance Model*) de la EPA de EEUU (versión 7).

Los resultados indican que el polvo de suelos es una fuente muy relevante en todas las estaciones de monitoreo, con aportes que varían entre el 22 y 78% de la masa, y entre un 12 y un 44% del aporte de hierro. El aporte de CMP varía bastante entre sitios cercanos entre sí y alcanza a un 36% de la masa (y un 73% del hierro) en el punto de monitoreo ubicado en Freirina (sitio 15 en red de monitoreo original del SAG). Estos últimos valores son altos ya que en el punto 2 (Huasco bajo, a 12.5 km al oeste del sitio 15) el aporte respectivo es del 42% en masa y 88% en hierro. En otras palabras, el impacto de las chimeneas de CMP debería disminuir considerablemente con la distancia a la fuente (lo que está avalado por la modelación preliminar de la dispersión de esas emisiones), por lo que no es posible atribuirle directamente a las chimeneas de CMP el 100% del hierro que se midió en el sitio 15 en Freirina en ese estudio.

La explicación que encontramos para ese resultado es que los datos estarían indicando un proceso acumulativo de transporte de las emisiones de CMP hacia el interior del valle, causado por el viento³, y que va enriqueciendo el suelo del valle en hierro, con lo cual existe un aporte de hierro debido a la re-suspensión de polvo superficial por acción del viento y su posterior depositación en la cuenca del valle; este aspecto es recogido en ese estudio y constituye una de sus conclusiones más importantes.

Sin embargo, el mayor problema en este análisis es que el MPS de los monitores del SAG y el depositado en hojas de olivo es recolectado usando lavado con agua destilada, lo cual claramente solubiliza los iones presentes en las partículas (cloruros provenientes del aerosol marino, nitratos y sulfatos provenientes de las emisiones de NO_x y SO₂ de las termoeléctricas que han reaccionado en la atmósfera para dar origen a más material particulado).

Por contraste, los resultados del modelo de receptor aplicado a las muestras de MP₁₀ ambiental (suspendido en el aire) recolectadas en filtros, contienen aportes de sulfatos y aerosol marino que exceden a los aportes estimados para las chimeneas de CMP. Aunque esto se hizo solo en un sitio (parcela Sr. Rojo) y solamente en tres días consecutivos, esto nos indica que la metodología de recolección del MPS usando agua destilada lleva a perder parte

³ El viento es muy persistente hacia el interior del valle casi todo el año, ver Figura 29 a Figura 32 en el presente Informe Final.

de la muestra que corresponde a sulfatos y cloruros⁴. Esto hace que dichos componentes analizados posteriormente no conducen a aportes significativos ni de sulfatos ni de cloruros en las doce muestras de MPS ya descritas ni tampoco en las hojas de olivo, ya que dichas muestras no tienen cantidades relevantes de dichos iones (menos al 0.1% en masa); en contraste las muestras de MP₁₀ ambiental (en suspensión en el aire) tienen más de 10% en masa de cloruro y de sulfato, lo que indica que esta proporción se debería reflejar también en el porcentaje de cloruro y sulfato en el MPS, cosa que no ocurre por la deficiencia metodológica arriba comentada.

En resumen, los aportes estimados por el modelo de receptor aplicado a los datos muestreados en las estaciones de monitoreo de MPS y a las hojas de olivo (parcela Sr. Rojo) poseen mucha incertidumbre, debido a que se trata de pocos datos, y al sesgo del muestreo de MPS con agua destilada ya descrito. Por lo tanto, la validez de ellos es cuestionable, sobre todo en términos de estimar el aporte de todas las fuentes al MPS sedimentable. Por lo mismo, no es válida la afirmación en dicho informe de que “los aportes de material particulado de las centrales termoeléctricas no resultan significativos” ya que no se ha medido adecuadamente ni el nitrato ni el sulfato en el MPS recolectado en la red de monitoreo del SAG.

iii) CENMA, 2006. “Estudio de la calidad del aire en la Comuna de Huasco”

Ese estudio se orientó a evaluar los niveles de MP₁₀ en la comuna de Huasco, específicamente en la misma ciudad. Consistió en una campaña de monitoreo de MP₁₀, la generación de un inventario de emisiones de MP₁₀ y una modelación de la dispersión de las emisiones de MP₁₀ y su contribución a las concentraciones ambientales del MP₁₀ en Huasco. Finalmente, se entregaron recomendaciones de medidas a tomar en cuenta para reducir las concentraciones de MP₁₀ en el pueblo de Huasco.

Las dos estaciones de monitoreo existentes en Huasco correspondían a la Escuela José Miguel Carrera y al Cuerpo de Bomberos de Huasco, denominadas Escuela y Bomberos, respectivamente. Para el periodo 2003-2005 se había constatado un promedio de MP₁₀ de 45 y 61 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], respectivamente, en las mediciones hechas con muestreo de alto volumen. Por esto se realizó una campaña de monitoreo complementario de MP₁₀ mediante muestreo continuo (TEOM) y muestreo discontinuo (alto volumen) entre el 6 de octubre y el 31 de diciembre de 2005. En este periodo el promedio fue de 38.6 y 34.8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para Escuela y Bomberos, respectivamente. Estos menores valores con respecto a los promedios de los monitores históricos se deben a una mayor frecuencia de viento Sur en la zona en ese periodo de monitoreo, lo que redujo el impacto de las emisiones de las fuentes industriales sobre el pueblo de Huasco. Aquí cabe hacer notar que la fuente de datos meteorológicos para el modelo de dispersión usado (nuevamente ISC3 de la EPA EEUU) fue la estación de monitoreo ubicada en la central Guacolda de GENER.

⁴ Probablemente este protocolo de medición está orientado a medir solamente el hierro contenido en el MPS y no interesa lo que pasa con otros compuestos solubles en agua.

El inventario de emisiones para la zona de Huasco (año 2005) considera las emisiones del complejo industrial (CMP, Guacolda, Endesa), así como fuentes urbanas, línea de ferrocarril, y fuentes fugitivas tales como polvo de calles.

Se estimó que un 95% de las emisiones de MP_{10} provienen del complejo industrial Huasco, siendo el resto atribuido a fuentes fijas menores y a fuentes móviles urbanas. Como bien señala el estudio, estos aportes en emisiones no son directamente extrapolables a aportes en concentraciones ambientales de MP_{10} , ya que la dispersión de MP_{10} de una fuente de área es distinta a la del MP_{10} emitido por una chimenea, puesto que ésta última diluye las emisiones antes de que el penacho de la chimenea impacte el suelo.

Para estimar el aporte de las distintas fuentes emisoras a las concentraciones ambientales de MP_{10} , se utilizó una modelación de calidad del aire para todo el año 2005, usando el modelo ISC3 (*Industrial Source Complex*, versión 3) de la EPA de EEUU. La información de meteorología superficial se tomó de la estación de monitoreo ubicada en la central termoeléctrica Guacolda, y ella corresponde a un periodo de dos años (2004 y 2005) de datos horarios.

El modelo de dispersión estima un aporte anual de MP_{10} del complejo industrial de 7 y 9 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ para Escuela y Bomberos, respectivamente, como promedio anual. Este aporte corresponde casi exclusivamente a fuentes de área como pilas de acopio de carbón y de concentrados de minerales, ya que el aporte anual estimado de las chimeneas del complejo se estima en el orden de 1 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ como promedio de largo plazo. Para las fuentes locales de Huasco, incluyendo el tránsito ferroviario y las zonas aledañas erosionables, los aportes anuales son de 11 y 19 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ para Escuela y Bomberos, respectivamente, con lo cual el aporte de todas las fuentes modeladas en Huasco alcanzan a 17 y 28 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ para Escuela y Bomberos, respectivamente. Los mayores valores se presentan en zonas cercanas a la vía férrea y a las calles.

Al calibrarse el modelo de dispersión por comparación con los datos observados en Escuela y Bomberos, se obtiene una 'línea base' de 29 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ que incluye fuentes naturales como polvo erosionado, aerosol marino y además los aportes de las fuentes emisoras no consideradas en la simulación. Esta línea base es consistente con resultados de análisis de filtros de MP_{10} hechos en otras zonas similares, por ejemplo, Kavouras y colaboradores (2001)⁵ encontraron que el aporte del aerosol marino en Iquique fue de 24 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ en el año 1998, valor que es consistente con el hallado en Huasco en este estudio de CENMA.

Los resultados sugieren que las medidas que se deberían tomar en la zona industrial consisten en abatir las emisiones desde los acopios de carbón y concentrados de minerales, medidas que se consideran más efectivas que la reducción de emisiones desde las chimeneas de dicho complejo. El detalle específico de las medidas propuestas es el siguiente:

⁵ Kavouras I.G., Koutrakis, P., Cereceda-Balic, F. y Oyola, P., Source Apportionment of PM10 and PM2.5 in Five Chilean Cities Using Factor Analysis, *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 51:451-464, 2001.

- a) CMP: humectar canchas de acopio de carbón y de concentrado, elevar la altura de las mallas Rashed perimetrales hasta al menos 1 m por sobre la altura de las respectivas pilas; mejorar el encapsulamiento en la zona de descarga de vagones de pre-concentrado; implementar sistema de lavado de vagones después de la descarga; reducir las emisiones fugitivas desde los vagones (aparentemente el aglomerante usado no es suficiente).
- b) Guacolda: mantener permanentemente las buenas prácticas observadas en terreno: humectación y compactación de pilas de carbón, cobertura del vertedero de cenizas y escorias, incremento de altura de las mallas perimetrales de la cancha de acopio de carbón, etc.
- c) Endesa: agregar cubierta al patio de cenizas y escorias; agregar equipos de abatimiento a las unidades generadoras 1 y 2 (a carbón).

Los bajos resultados estimados para el aporte de las chimeneas al MP_{10} en Huasco en el estudio CENMA 2005 (con respecto al primer estudio de modelación de 1998) se pueden explicar en gran parte a que las emisiones utilizadas en ambos casos son muy diferentes, siendo las emisiones de hierro utilizadas en el estudio CENMA un tercio de las usadas en el estudio de Jorquera de 1998.

Cabe hacer notar que las emisiones de hierro del año 1998 se estimaron usando los datos promedio de los muestreos isocinéticos realizados en el marco del estudio de recopilación de antecedentes para la revisión de la norma del DS N°4 del Ministerio de Agricultura⁶. Se indica en el estudio de CENMA que las emisiones del inventario 2005 también se estimaron en base a mediciones isocinéticas, pero no se detallan esos datos⁷. Ciertamente los datos de emisiones de CMP (del estudio Conama de 1998 y del estudio de CENMA 2005) son inconsistentes entre sí, puesto que el monitoreo histórico del hierro en el MPS no muestra una reducción de los valores anuales de hierro sedimentado medidos entre 1998 y 2005 sino por el contrario, niveles muy similares y ambos cercanos a los 28 $[mg/(m^2 \cdot día)]$ como promedio anual en ambos años⁸.

⁶ Estudio realizado para el Departamento de Planes y Normas de CONAMA por la consultora Knight Piesold.

⁷ No se entregaron en el estudio de CENMA copias de los informes del monitoreo en chimenea de las principales fuentes emisoras.

⁸ Fuente: monitoreo histórico de hierro en el MPS, datos oficiales del SAG.

Antecedentes del Proyecto

a) Descripción resumida del Proyecto

Este proyecto tiene como objetivo aplicar un enfoque científico y multidisciplinario para abordar la problemática de la zona olivícola del Huasco, III Región, la que ha sido históricamente afectada por los impactos causados por las emisiones atmosféricas asociadas a las actividades del complejo industrial del Huasco, ubicado en el puerto del mismo nombre.

b) Objetivo General:

Determinar y evaluar, en forma integrada, los impactos ambientales negativos producidos por la emisión de contaminantes atmosféricos en la zona costera del Valle del Huasco, emitidos por el Complejo Industrial de Huasco.

c) Objetivos Específicos:

OE1: Determinar el comportamiento de los distintos contaminantes en la atmósfera, su sedimentación y las matrices ambientales afectadas, a partir de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos adaptado a la zona baja del Valle del Huasco.

OE2: Determinar el efecto producido por los distintos contaminantes emitidos por el complejo industrial de Huasco, sobre la producción de olivas y los alimentos procesados a partir de ellas.

OE3: Determinar los índices máximos de emisión a los distintos contaminantes, sin afectar el desarrollo de la especie y la agroindustria asociada, considerando el efecto acumulado de las emisiones.

OE4: Proponer un sistema de levantamiento permanente de información para alimentar el modelo predictivo, mediante un sistema de monitoreo de las emisiones asociado a los resultados del modelo.

En las siguientes secciones de este Informe Final se presentan las actividades realizadas en la ejecución del presente Proyecto.

I. Actividades asociadas al objetivo N° 1

a) Objetivo General

Determinar el comportamiento de los distintos contaminantes en la atmósfera, su sedimentación y las matrices ambientales afectadas, a partir de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos adaptado a la zona baja del Valle del Huasco.

b) Productos esperados

- 1) Caracterizar todas las fuentes y sus emisiones. Presentar en un mapa toda el área de influencia, con zonas de relevancia, áreas urbanas y de producción olivícola, ubicación de estaciones de calidad del aire y las estaciones meteorológicas. Presentar información en relación a los regímenes de operación de cada fuente. Modelando con régimen en plena carga y operaciones que impliquen mayores emisiones (cambios de combustibles, detención de equipos).
- 2) Listar todos los contaminantes y su caracterización física y química de todas las fuentes y determinar, en caso de que hubiese, la concentración de línea base.
- 3) Exponer los procesos que afectan a los contaminantes emitidos: circulaciones, transformaciones químicas y forma de incorporarse al ecosistema.
- 4) Presentar las características topográficas: Identificar elevaciones, exposición, dimensiones, y todas las características geográficas asociadas a los receptores: Medio natural y construido.
- 5) Presentar la extensión del área a modelar (grilla) identificando los receptores y las concentraciones de los contaminantes, especialmente las zonas de olivos, con mayores concentraciones.
- 6) Presentar la información meteorológica disponible de la zona: Tipo de información existente, cobertura espacial, cobertura temporal y su origen. Levantar información meteorológica necesaria para el modelamiento.
- 7) Determinar las condiciones meteorológicas que dan origen a las máximas concentraciones de los contaminantes (Horarias, diarias, mensuales, estacionales o anuales) identificando las zonas donde ocurren y la interacción de todas las fuentes.
- 8) Identificar y presentar con nivel de detalle todos los datos de entrada del modelo de manera de ajustar el modelo producto de modificaciones en el tiempo de las variables.
- 9) Identificar la sensibilidad del modelo en función de la información de entrada y las limitaciones de información. Proponer levantamientos de información para robustecer la herramienta y su nivel de certeza.

A continuación se presentan los resultados de las actividades planificadas para poder obtener los productos recién descritos.

1.a) Caracterizar todas las fuentes y la magnitud de sus emisiones a la atmósfera

a) *Compilación de antecedentes de estudios existentes.*

Se ha ordenado la información disponible de emisiones atmosféricas reportadas por diversos estudios elaborados a la fecha asociados a los tres principales emisores de la zona industrial de Huasco: Central Termoeléctrica Guacolda, Planta de Pellet de CMP y Central Termoeléctrica Huasco de Endesa. Debido a la disponibilidad de información meteorológica necesaria para aplicar el modelo de dispersión de contaminantes en el valle del Huasco, se decidió modelar el año 2009, que es donde más información meteorológica local se había compilado. Luego el inventario de emisiones atmosféricas se construyó para la información disponible de ese año. La información recopilada para cada industria considera la siguiente fuente de información:

Tabla 1. Fuente emisora y fuente de información de sus emisiones.

Industria	Fuente Emisora	Fuente Información	Año de datos
ENDESA	Unidad Vapor I	"Estudio de calidad del aire en la comuna de Huasco", Estudio Cenma, I. Municipalidad de Huasco, 2006	2005
	Unidad Vapor II		2005
	Turbo Generador 3		2005
	Turbo Generador 4		2005
	Turbo Generador 5		2005
	Pila carbón		2005
GUACOLDA	Unidad 1	EIA, "Unidad 5 Central Térmica Guacolda S.A". Fecha de Presentación: Enero2009;	2009-2010
	Unidad 2		2009-2010
	Unidad 3		2009-2010
	Unidad 4		2009-2010
	Unidad 5		Aun no entra en funcionamiento.
	Pila de Carbón y Coke	Estudio Cenma, I. Municipalidad de Huasco, 2006	2005
CMP	Chimenea 2A	EIA "Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets". Fecha de RCA: Septiembre de 2010	2009
	Chimenea 2B		2009
	Transporte		2009
	Carga		2009
	Descarga		2009
	Manejo de pilas		2009
	Erosión		2009

Tabla 2. Otras fuentes emisoras no industriales y fuente de información de sus emisiones.

Fuente	Fuente Información
Empresas pequeñas en Huasco	"Estudio de calidad del aire en la comuna de Huasco", Estudio CENMA, I. Municipalidad de Huasco, 2006
Transito urbano y tubo de escape	
Zonas erosionables en el entorno urbano	
Tránsito de ferrocarril (trayecto zona urbana)	
Tránsito de ferrocarril (trayecto fuera de zona urbana)	

Respecto a los datos de emisiones correspondientes a ENDESA, no se tiene a la fecha información más reciente que aquella reportada dentro del estudio de CENMA, datos que corresponden al año 2005. Si se observa la Figura 1, la generación bruta de esta central ha sido variable en el tiempo, debido a que es una central de emergencia. La generación del año 2005 es cerca de un 65% más alta que la del año 2009, sin embargo, la del 2005 es un 22% más baja que el promedio de los últimos 17 años, por lo cual, aunque la generación del año 2009 sea menor que la del 2005 se mantendrán las emisiones reportadas por CENMA escenario 2005 para el año 2009.

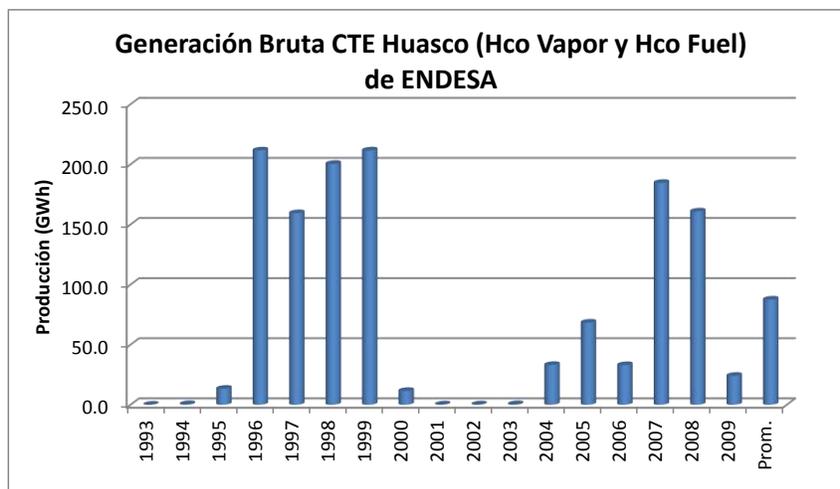


Figura 1. Generación anual, CTE Huasco.

Las tablas siguientes entregan las emisiones que serán utilizadas para la modelación de emisiones

Tabla 3. Emisiones puntuales de MP₁₀, ENDESA.

Fuente	MP ₁₀ [ton/año]	Altura Chimenea [m]	Temperatura [°C]	Velocidad Gases [m/s]	Diámetro. Chimenea [m]
Unidad Vapor 1	47.3	35.0	180	4.5	2.00
Unidad Vapor 2	47.3	35.0	180	4.5	2.00
Unidad TG 3	6.3	5.0	180	4.5	4.22
Unidad TG 4	6.3	5.0	180	4.5	4.22
Unidad TG 5	6.3	5.0	180	4.5	4.22

Fuente: "Estudio de calidad del aire en la comuna de Huasco", Estudio Cenma, I. Municipalidad de Huasco, 2006.

Tabla 4. Emisiones areales de MP₁₀, ENDESA.

Fuente	Altura pila [m]	Longitud [m]	Ancho [m]	Área aproximada [m ²]	Emisión de MP ₁₀ [ton/año]
Pila Carbón	4	90	79	7110	0.022

Fuente: "Estudio de calidad del aire en la comuna de Huasco", Estudio Cenma, I. Municipalidad de Huasco, 2006.

Tabla 5. Emisiones fuentes puntuales, Planta de Pellets de CMP, escenario 2009.

Nombre	Chimenea 2A	Chimenea 2B
Altura de chimenea [m]	60	30
Diámetro [m]	5	3
Velocidad Salida [m/s]	7.78	22.6
Temperatura Salida [°K]	328.15	320.45
MP ₁₀ [ton/año]	1,493	729
SO ₂ [ton/año]	788	770
NOx [ton/año]	434	288

Fuente: EIA del proyecto "Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets"

Tabla 6. Emisiones areales de MP₁₀ (ton/año), escenario anterior a implementación del proyecto "Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets", escenario 2009

Material	Transporte	Carga	Descarga	Manejo de Pilas	Erosión
Preconcentrado	0.0	103.4	9.7	0.0	8.0
Pellets	0.0	92.9	11.2	0.0	0.4
Pellets Chips	20.7	10.8	1.4	0.2	1.0
Pellets Feed	72.5	13.7	3.5	0.8	24.8
Carbón	4.7	0.7	0.5	0.1	3.1
Caliza	9.6	1.9	0.2	0.1	0.4

Fuente: EIA del proyecto "Ampliación y Mejoras Operacionales en Planta de Pellets"

Tabla 7. Emisiones Guacolda

Contaminante	Unidades 1 y 2	Unidad 3
PTS [t/año]	803	219
SO ₂ [t/año]	24,820	3,942
NOx [t/año]	5,439	2,920

Fuente: EIA del proyecto "Unidad 5 Central Térmica Guacolda S.A". Fecha de Presentación: Enero 2009, Fecha de RCA: Agosto de 2010.

Tabla 8. Emisiones consideradas para Guacolda, escenario 2009.

Nombre	Unidades 1 y 2	Unidad 3
Altura de chimenea [m]	89.0	79.5
Diámetro [m]	6.6	5.0
Velocidad Salida [m/s]	12.9	14.0
Temperatura Salida [°C]	140	57.5
MP ₁₀ [t/año]	803.0	91.3
SO ₂ [t/año]	24,820	1,642
NOx [t/año]	5,439	1,217

Nota: El año 2009 considera las emisiones de las Unidades 1 y 2 y 5 meses del año 2009 de la Unidad 3, ya que esta última Unidad empieza a funcionar en agosto de 2009.

Tabla 9. Emisiones otras fuentes emisoras escenario 2009.

Fuente	MP ₁₀ (ton/año)
Empresas pequeñas en Huasco	0.073
Transito urbano y tubo de escape	12.3
Zonas erosionables en el entorno urbano	2.7
Tránsito de ferrocarril (trayecto zona urbana)	0.5
Tránsito de ferrocarril (trayecto fuera de zona urbana)	0.99

b) Información adicional y complementaria a estudios existentes

Hubo un traspaso de información de la Seremi del MMA con respecto a los muestreos isocinéticos realizados en las mayores fuentes emisoras (CMP y Guacolda) realizadas en los años 2009 y 2010. Las siguientes Tablas resumen la información que se desprende de los informes de muestreo isocinético. Se aprecia que hay mucha variabilidad entre muestreos realizados en distintas fechas en la misma fuente emisora, especialmente en el caso de Guacolda. Esto indica que los niveles de las emisiones son variables, no pudiendo entonces asumirse que sean constantes en el tiempo, como es el caso de todos los EIA presentados por los titulares de las empresas al Sistema de Evaluación Ambiental.

Tabla 10. Emisiones medidas por muestreo isocinético, caso de planta de pellets CMP.

Chimenea	Fecha medición	PTS (kg/h)	MP10 (kg/h)	SO ₂ (kg/h)	NO _x (kg/h)	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Diámetro (m)
2-A	10-12-2009	51.1	20.9	85.3	2.5	7.1	47	5
2-A	28-12-2010	84.9		32.5	1.7	6.4	49	5
2-B	11-12-2009	46.5	13.3	81.7	2.4	23.4	48	3
2-B	29-12-2010	69.6		39.6	1.8	18.8	49	3

Tabla 11. Emisiones medidas por muestreo isocinético, caso de planta termoeléctrica Guacolda.

Chimenea	Fecha	PTS (t/año)	SO ₂ (t/año)	NO _x (t/año)	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Diámetro (m)	Potencia (W)
U1 y U2	11-02-2010	580	27,428	4,126	13.6	158	6.6	295
U1 y U2	12-05-2010	378	25,176	3,215	13.3	151	6.6	293
U1 y U2	24-08-2010	153	25,921	1,498	13.5	155	6.6	296
U1 y U2	25-11-2010	126	19,141	806	13.4	153	6.6	296
U3	19-05-2010	201	201	1,687	14.0	58	4.5	152
U3	17-08-2010	672	1,691	1,709	13.4	62	4.5	152
U3	30-11-2010	65	3,416	1,104	16.5	150	4.5	150
U4	27-11-2010	32	6,351	300	15.2	148	4.6	152

Dado que no es posible construir un inventario de emisiones con emisiones variables de las chimeneas de estas dos empresas, ya que no se cuenta con información continua (y los datos de mediciones muestran mucha variabilidad), se procedió a estimar condiciones de modelación más conservadoras, asumiendo emisiones constantes de cada fuente emisora en todo el año.

Para estos fines, se comparan las emisiones aprobadas ambientalmente con los máximos resultados de las dos tablas anteriores, que son las industrias que más emiten en la zona industrial de Huasco⁹. A continuación se muestran la comparación para los distintos contaminantes disponibles.

Tabla 12. Emisiones de fuentes puntuales principales [ton/año]

Empresa	Unidad	Emisiones Aprobadas Ambientalmente				Muestreo Isocinético			
		PTS	MP ₁₀	SO ₂	NO _x	PTS	MP ₁₀	SO ₂	NO _x
CMP	2A	1,492.9	1,492.9	788.4	433.6	744	-	747	21.9
CMP	2B	719.1	719.1	770.2	289.1	610	-	716	21
Guacolda	U _{1y2}	803	803	24,820	5,402	580	-	27,418	4,126
Guacolda	U ₃	219	219	3,942	2,920	672	-	3,416	1,709
Guacolda	U ₄	292	292	8,979	292	32	-	6,351	300

De la tabla anterior, se determinan cuáles son las mayores tasas de emisión, las que son consideradas finalmente en el modelo de dispersión.

Tabla 13. Emisiones máximas de fuentes puntuales principales [ton/año]

Empresa	Unidad	Emisiones Consideradas Modelación				Fuente de la información ¹⁰			
		PTS	MP ₁₀	SO ₂	NO _x	PTS	MP ₁₀ ¹¹	SO ₂	NO _x
CMP	2A	1,492.9	1,492.9	788.4	433.6	AA	AA	AA	AA
CMP	2B	719.1	719.1	770.2	289.1	AA	AA	AA	AA
Guacolda	U _{1y2}	803	803	2,7418	5,402	AA	AA	MI	AA
Guacolda	U ₃	672	672	3,942	2,920	MI	MI	AA	AA
Guacolda	U ₄	292	292	8,979	300	AA	AA	AA	MI

Con estas tasas de emisión conservadoras y asumidas constantes en todo el año, se modelaron los impactos de las emisiones industriales en las concentraciones y depositaciones de contaminantes en la parte baja del valle del Huasco.

Finalmente, se evaluaron las emisiones provenientes de los barcos que transportan carbón para las termoeléctricas y los pellets de concentrado de hierro producidos por CMP. No se tuvo acceso a los datos de la cantidad de barcos que circulan anualmente por el puerto de Huasco, por lo que hubo que hacer un procedimiento de estimación usando los datos del puerto de Ventanas y de ahí se obtuvieron factores de emisión para calcular emisiones en Huasco empleando datos de consumos de carbón de Guacolda y de embarques de pellets de hierro, ambos expresados en toneladas anuales. De esta forma, se asume que las flotas de barcos que operan en ambos puertos son tecnológicamente

⁹ En el caso de Endesa no se dispone de información de muestreos isocinéticos; en todo caso las emisiones de Endesa son considerablemente menores a las de CMP y Guacolda en conjunto.

¹⁰ AA: Aprobadas ambientalmente. MI: Muestreo isocinético.

¹¹ No se dispone de muestreo isocinético de MP₁₀, pero de acuerdo a lo declarado ambientalmente para dicho contaminante por la empresa, la emisión de PTS es prácticamente la misma emisión para MP₁₀, así que emplea el monitoreo de PTS para estimar tanto la emisión de PTS como la de MP₁₀.

equivalentes y por lo tanto sus emisiones solamente dependen de la cantidad de carga movilizada en ellos.

La siguiente Tabla resume las emisiones provenientes de barcos en el puerto de Huasco. Notar que estas emisiones no habían sido estimadas anteriormente en estudios de contaminación en la zona, como el caso del estudio de CENMA. Aunque el total de emisiones de SO₂ no parezca ser una cifra muy alta (en comparación a las emisiones de MP₁₀ y SO₂ de las chimeneas de Guacolda, ver Tablas anteriores), se trata de emisiones descargadas a baja altura, por lo que hay que considerarlas en las modelaciones de calidad del aire.

Tabla 14. Emisiones de barcos en Huasco, escenario 2009.

Insumo transportado	MP₁₀ (ton/año)	SO₂ (ton/año)	NO_x (ton/año)
Carbón para centrales térmicas Guacolda	1.56	121.3	62.3
Pellets de concentrado de Hierro de CMP	2.34	181.7	93.3
Totales emisiones de embarcaciones	3.90	303.0	155.6

1.b) Caracterización física y química de las emisiones atmosféricas

Para determinar las características de las emisiones de material particulado sedimentable, se han compilado los análisis de muestras disponibles¹², considerando tanto la distribución granulométrica como la naturaleza química de éstas.

Como el tamaño de las partículas es un parámetro fundamental¹³ en la sedimentación, se determinó la distribución de partículas del material particulado emitido por las distintas chimeneas de las fuentes, aplicando el método microscópico, que consiste en la medición de partículas, independiente de su forma, contra un patrón de referencia para el tamaño. El Estudio para la Generación de Información de Soporte Técnico Necesaria para la Revisión del D.S. N°4 del Ministerio de Agricultura entrega el análisis granulométrico de las emisiones de las distintas unidades, información que se indica en las siguientes Tablas.

Tabla 15: Distribución de partículas Chimenea A CMP

Tamaño [µm]	% Acumulado	% Diferencia
1.00	42.4	42.4
1.44	52.0	9.6
1.92	59.6	7.6
2.61	67.5	7.8
3.99	76.4	8.9
5.96	85.1	8.7
8.98	94.1	8.9
14.03	97.2	3.1
19.39	98.8	1.6

Tabla 16: Distribución de partículas Chimenea B CMP

Tamaño [µm]	% Acumulado	% Diferencia
1.00	51.8	51.8
1.27	60.1	8.3
1.53	67.2	7.2
1.97	74.8	7.6
2.46	81.7	6.9
3.19	86.7	4.9
4.63	90.9	4.3
6.69	95.6	4.7
9.65	98.8	3.1

¹² Análisis realizados para "Estudio para la Generación de Información de Soporte Técnico Necesaria para la Revisión del D.S. N°4 del Ministerio de Agricultura"

¹³ El otro es la densidad de las partículas.

Tabla 17: Distribución de partículas Endesa

Tamaño [μm]	% Acumulado	% Diferencia
0.99	15.4	15.4
2.13	23.9	8.5
3.49	32.0	8.1
5.00	41.1	9.2
6.66	50.8	9.6
8.68	62.2	11.4
11.49	71.5	9.4
16.10	82.1	10.5
19.83	88.5	6.5

Tabla 18: Distribución de partículas Guacolda

Tamaño [μm]	% Acumulado	% Diferencia
1.06	29.7	29.7
1.20	35.9	6.3
1.39	42.9	6.9
1.80	54.9	12.1
2.18	63.9	8.9
2.48	69.2	5.4
3.33	79.7	10.5
4.54	88.9	9.2
7.83	97.4	8.5

Para la modelación de las fuentes restantes, se consideran las distribuciones de partículas correspondientes al polvo de suelos y calles y a la combustión de petróleo, que predominan en el caso de estudio. A continuación se muestran las distribuciones presentadas por las emisiones antes mencionadas¹⁴.

Tabla 19: Distribución de partículas polvo de calles

Tamaño [μm]	% Acumulado	% Diferencia
1.00	4.5	4.5
2.50	10.7	6.2
10.00	52.3	41.6
50.00	100.0	47.7

Tabla 20: Distribución de partículas combustión de petróleo

Tamaño [μm]	% Acumulado	% Diferencia
1.00	87.4	87.4
2.50	97.4	10
10.00	99.2	1.8
50.00	100.0	0.8

Con respecto a la caracterización química, se han analizado los elementos más abundantes en cada emisión, como es el caso del hierro (Fe) para la planta de pellets y silicio (Si), aluminio (Al) y Calcio (Ca) para las generadoras termoeléctricas. Todos estos

¹⁴ Chow, J.C., Watson, J.G. (1998), Guideline on Speciated Particulate Monitoring, prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, San Francisco, CA, by the Desert Research Institute, Reno, NV.

metales están en forma de óxidos, y la gran diferencia en el caso del hierro es que las termoeléctricas emiten Fe_2O_3 , (hematita) mientras que CMP, aunque parte de sus emisiones consisten en hematita, emite mayoritariamente Fe_3O_4 (magnetita), lo que posibilita diferencias los aportes al MPS mediante técnicas de difracción de rayos X.

Tabla 21: Caracterización química de emisiones de fuentes principales

CMP		Endesa		Guacolda	
Composición	%	Composición	%	Composición	%
Si	1.4	SiO_2	47.6	SiO_2	48.0
Al	0.4	Al_2O_3	23.6	Al_2O_3	23.0
Fe	60.0	Fe_2O_3	15.0	Fe_2O_3	6.0
Ti	0.2	TiO_2	1.2	TiO_2	1.1
Ca	1.5	CaO	4.6	CaO	6.7
Zn	0.7	MgO	1.1	MgO	1.9
Na	0.1	Na_2O	3.9	Na_2O	1.9
K	0.2	K_2O	0.8	K_2O	0.5
S	1.1	SO_3	2.3	SO_3	7.1
Otros	34.4	Otros	0.0	Otros	3.8
Total	100.0	Total	100.0	Total	100.0

1.d) Caracterización de la topografía del Valle de Huasco

Se configuró un dominio de 65 km en dirección Oeste a Este por 25 km en dirección Sur-Norte, considerando todas las fuentes emisoras y el Valle de Huasco completo. El procesamiento de la información de terreno contempla la definición del borde costero, la asignación de las elevaciones de terreno a los distintos puntos de la grilla y elementos de la modelación (fuentes, receptores, etc.); y la definición de los distintos tipos de uso de suelo presentes en las diferentes celdas del dominio. A continuación se muestra la caracterización de la topografía con una resolución de 90 m.

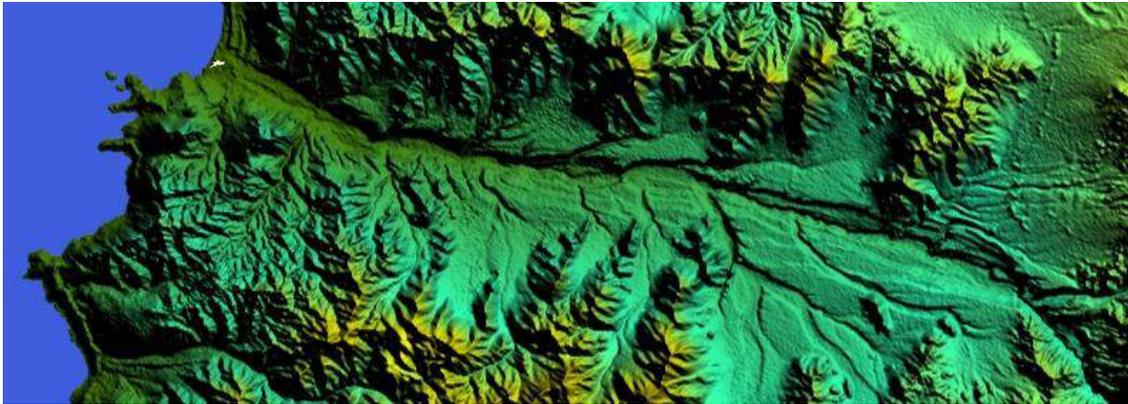


Figura 2. Elevaciones de terreno para la zona de Huasco.

Las curvas de nivel se obtienen de la misión topográfica de radar del transbordador espacial de la NASA¹⁵ y la asignación de uso de suelo se hizo considerando el *shapefile* de Chile proporcionado por el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) del Ministerio del Medio Ambiente. Tomando como referencia una grilla de modelación con una resolución de 1 km, se obtiene una distribución de los usos de suelo y de elevaciones de terreno como se indica en la siguiente figura:

La zona en estudio presenta cinco usos de suelo distintos, dentro de los cuales predomina *rangeland*¹⁶, los terrenos agrícolas y el mar. En la Figura 3 se aprecia que el sector urbano es pequeño, alcanzando una superficie cercana a los 1.6 km²¹⁷, ubicándose entre la bahía de Guacolda y la bahía de Huasco.

La región de interés está influenciada por la presencia del río Huasco, formando el valle donde se encuentran las plantaciones de olivos, el cual queda completamente incluido en la zona de modelación que se muestra en la figura anterior.

¹⁵ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

¹⁶ Rangeland comprende vegetación de tipo silvestre como pastizales, bosques, estepas, sabanas, matorrales, pastizales o praderas.

¹⁷ Fuente: División Político - Administrativa y Censal, 2007, Instituto Nacional de Estadísticas

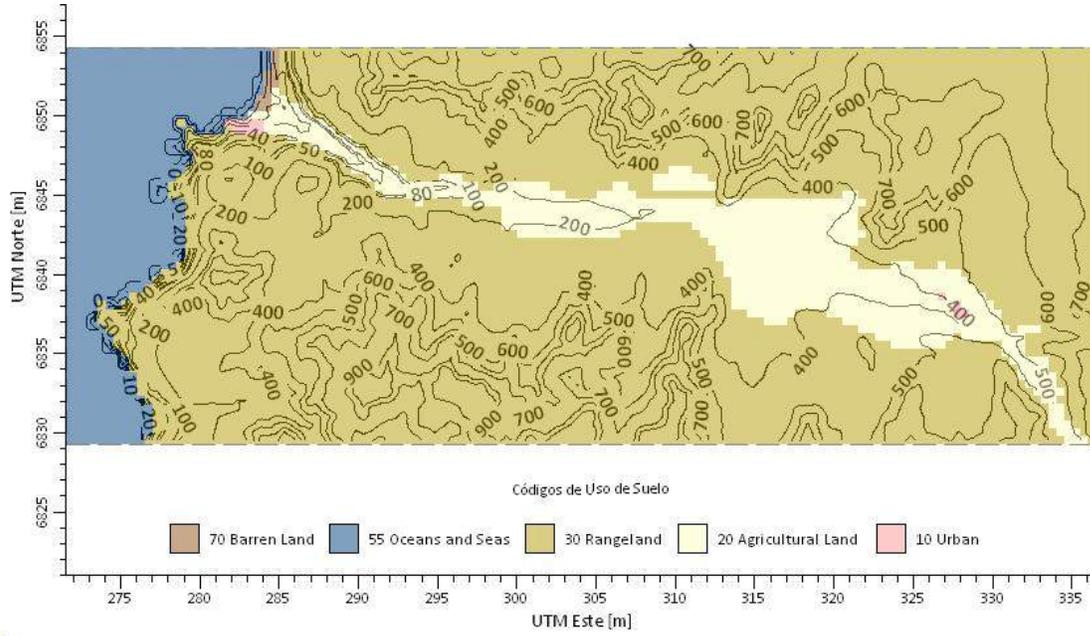


Figura 3. Caracterización de topografía (curvas de nivel con elevaciones numeradas) y uso de suelo en el dominio de modelación (en colores).

1.e) Mapa de las concentraciones de contaminantes en la cuenca

Para poder determinar los puntos de mayor impacto de las emisiones generadas por las fuentes principales ubicadas en la zona de Huasco, como las termoeléctricas y la planta de pellets, se realizó una modelación aplicando el modelo CALMET/CALPUFF con los datos meteorológicos disponibles para el año 2009, y con la caracterización de la magnitud de las emisiones de MP y su distribución de tamaño de partículas resumidas en la sección 1.a) de este informe. A continuación se muestran los mapas de depositación de partículas y de concentración de gases en la zona de estudio.

a) Caso del Material Particulado Sedimentable (MPS)

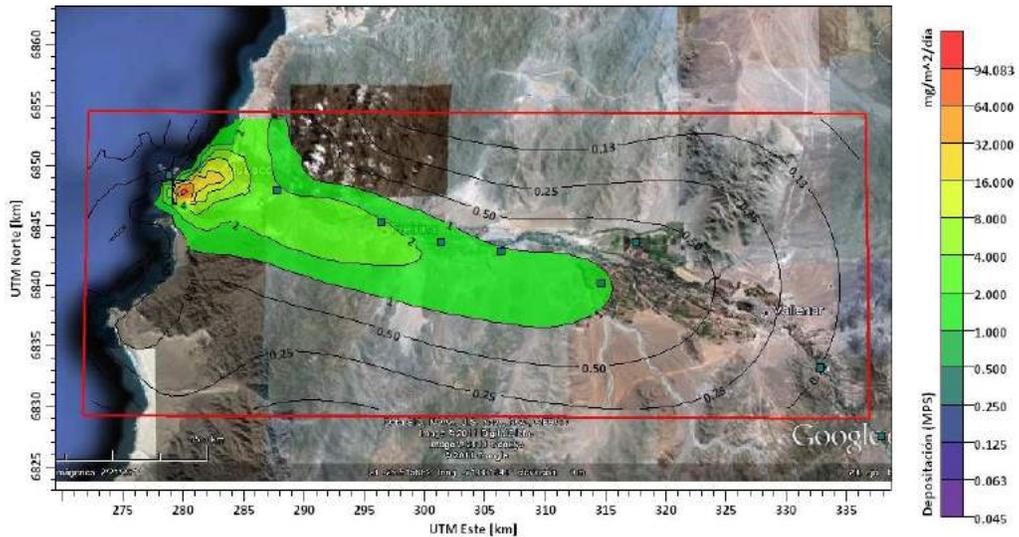


Figura 4. Depositación promedio Enero MPS, [mg/(m²·día)]

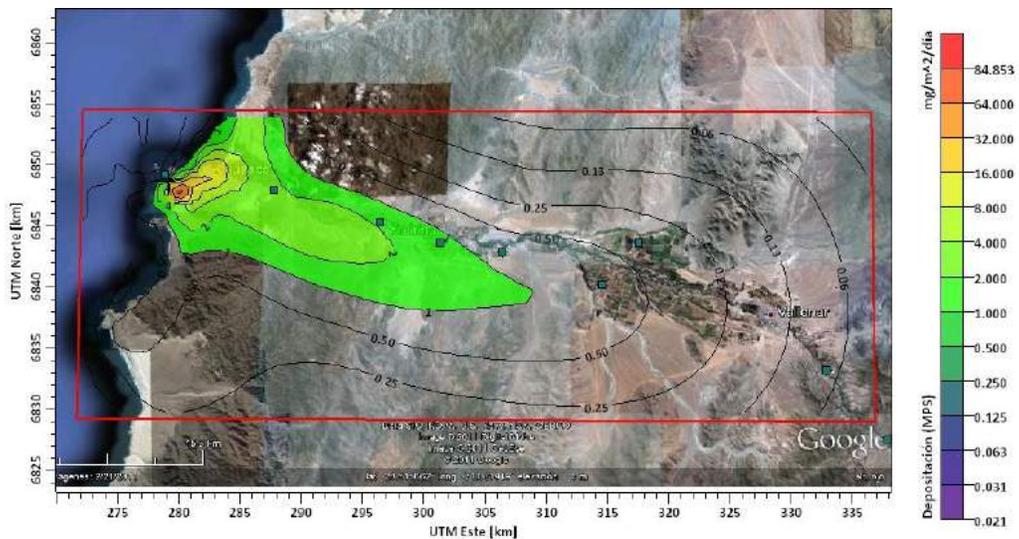


Figura 5. Depositación promedio Febrero MPS, [mg/(m²·día)]

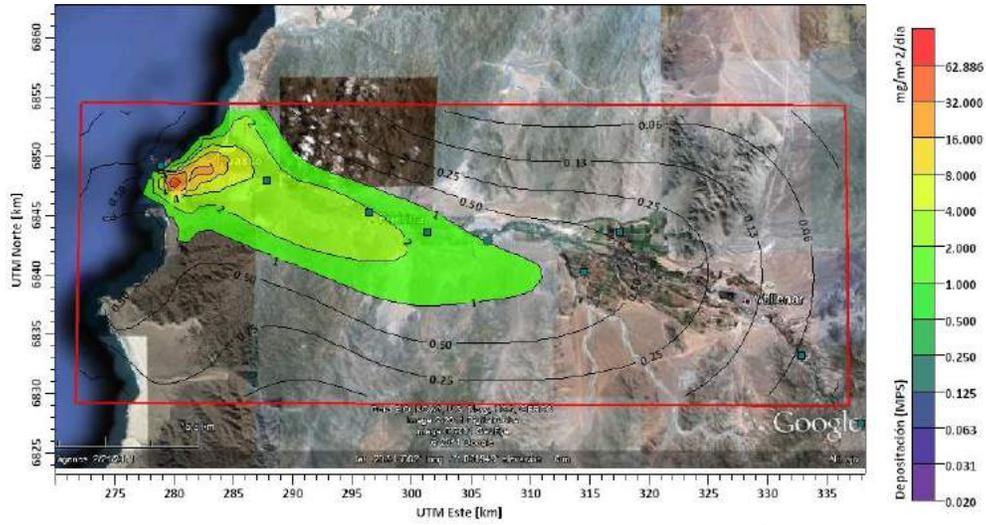


Figura 6. Deposición promedio Marzo MPS, [mg/(m²-día)]

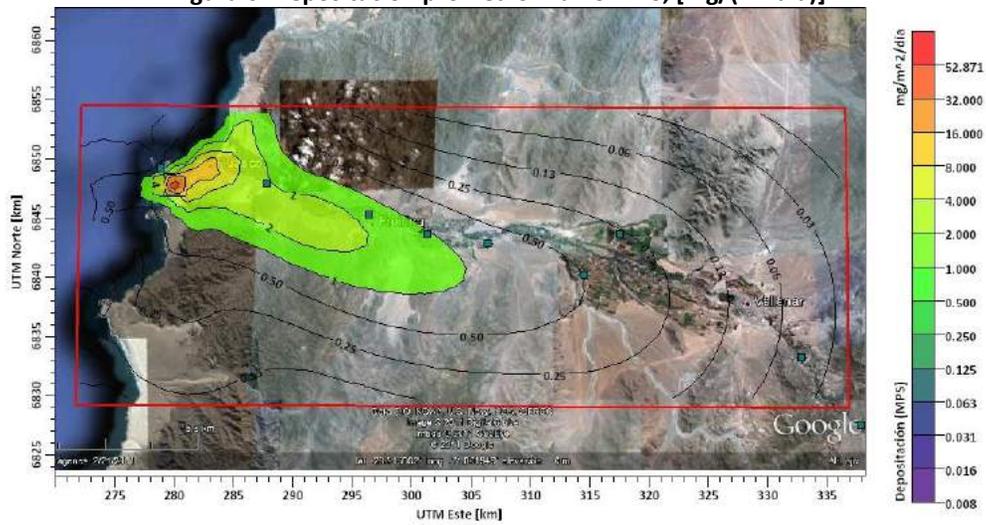


Figura 7. Deposición promedio Abril MPS, [mg/(m²-día)]

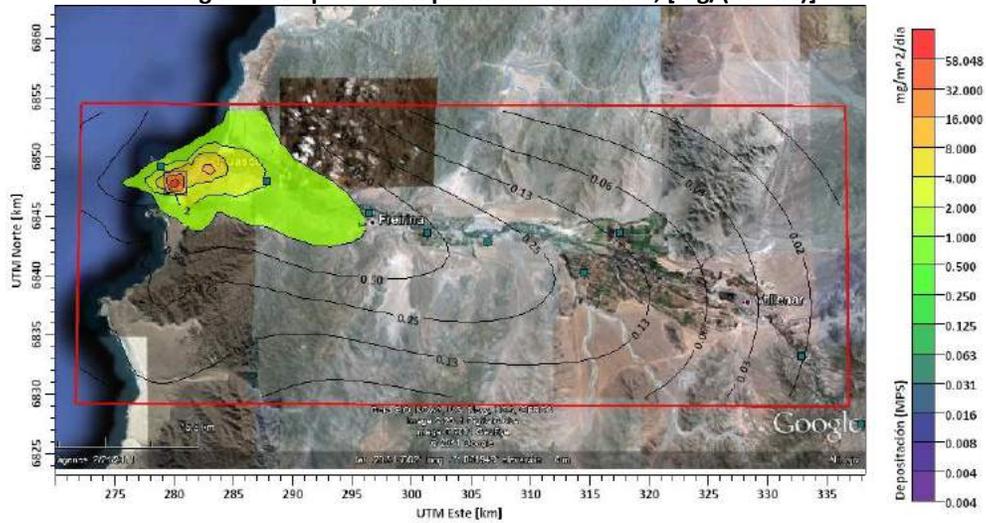


Figura 8. Deposición promedio Mayo MPS, [mg/(m²-día)]

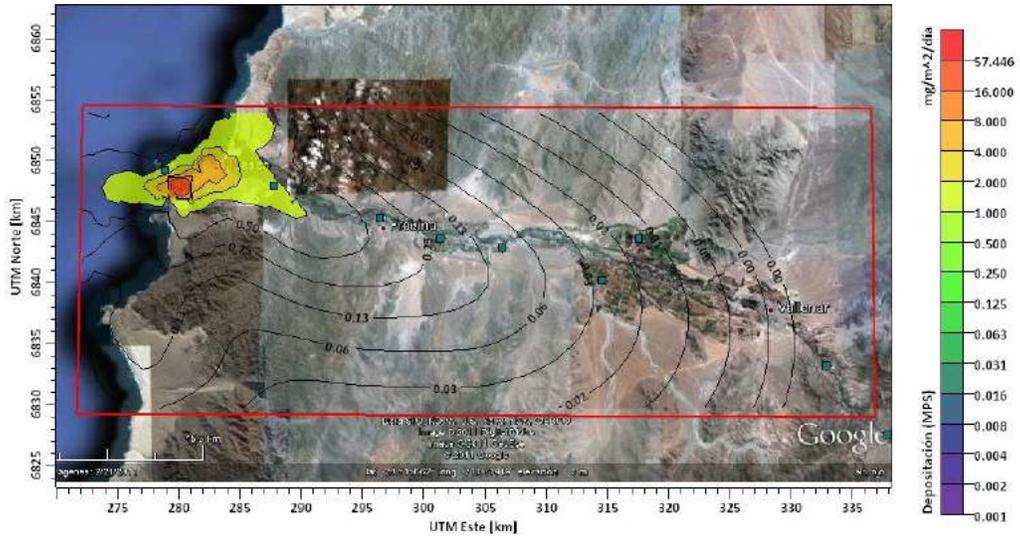


Figura 9. Deposición promedio Junio MPS, [mg/(m²-día)]

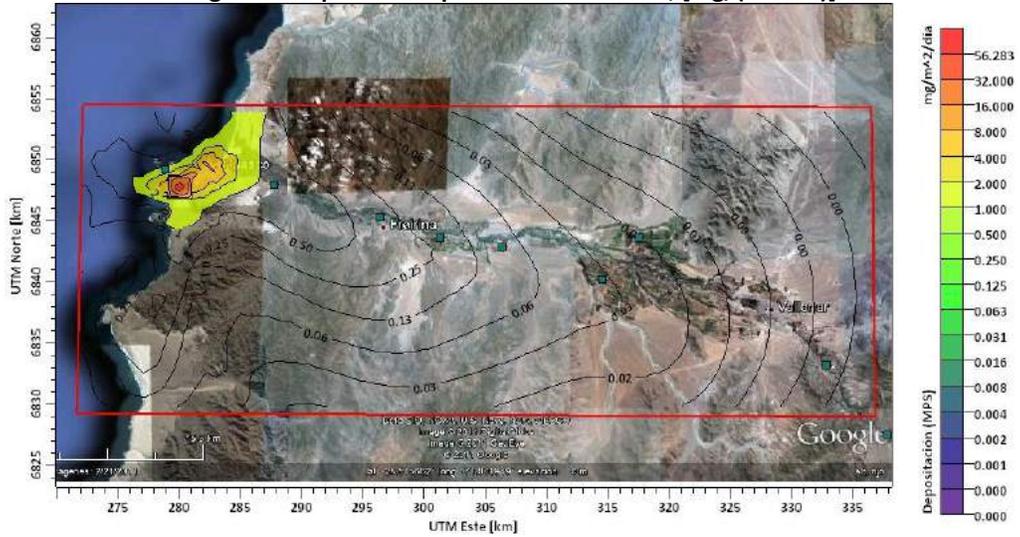


Figura 10. Deposición promedio Julio MPS, [mg/(m²-día)]

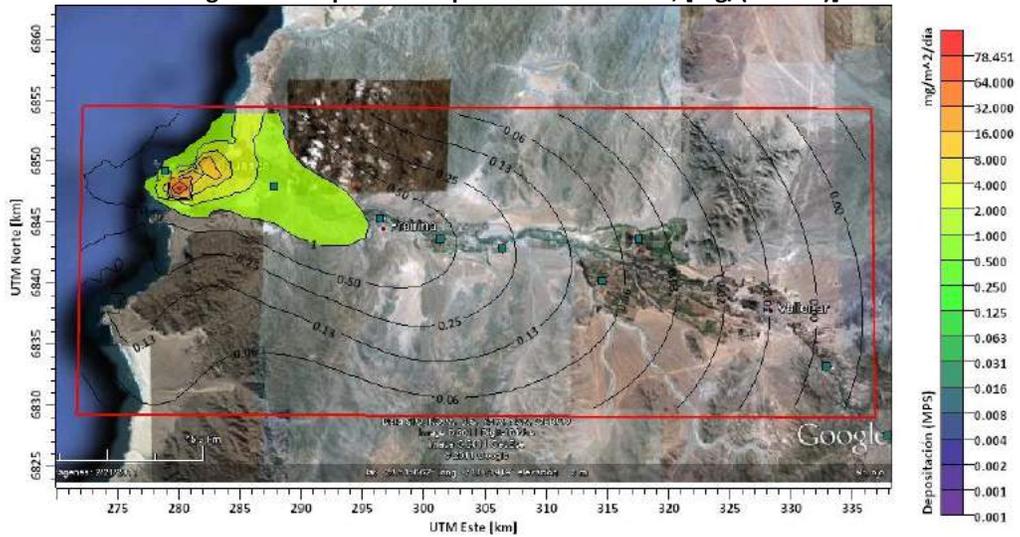


Figura 11. Deposición promedio Agosto MPS, [mg/(m²-día)]

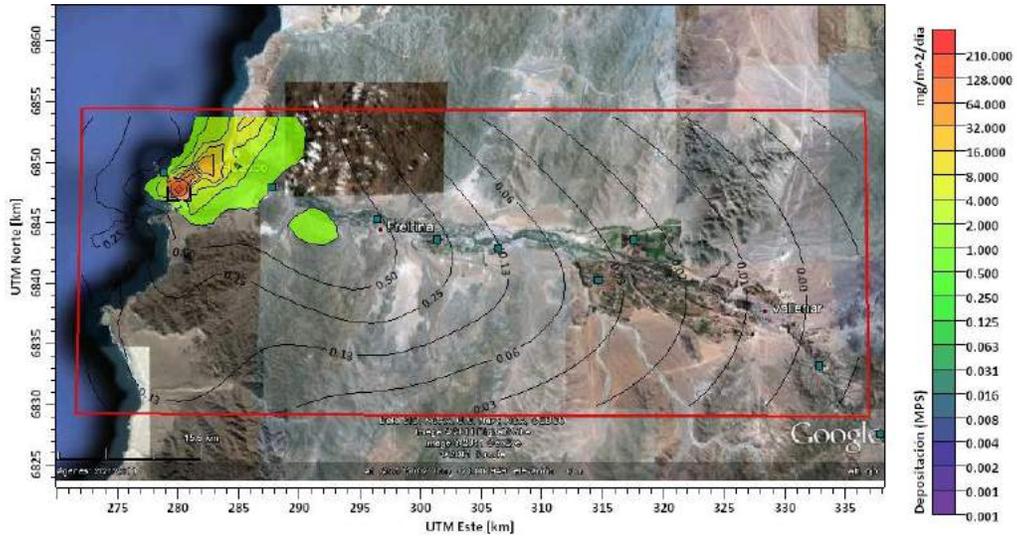


Figura 12. Deposición promedio Septiembre MPS, [mg/(m²-día)]

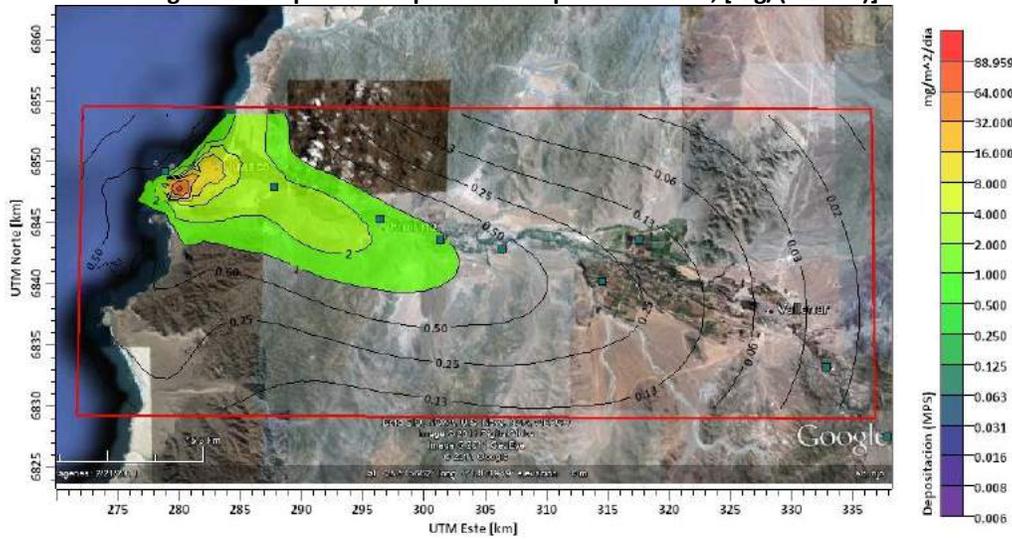


Figura 13. Deposición promedio Octubre MPS, [mg/(m²-día)]

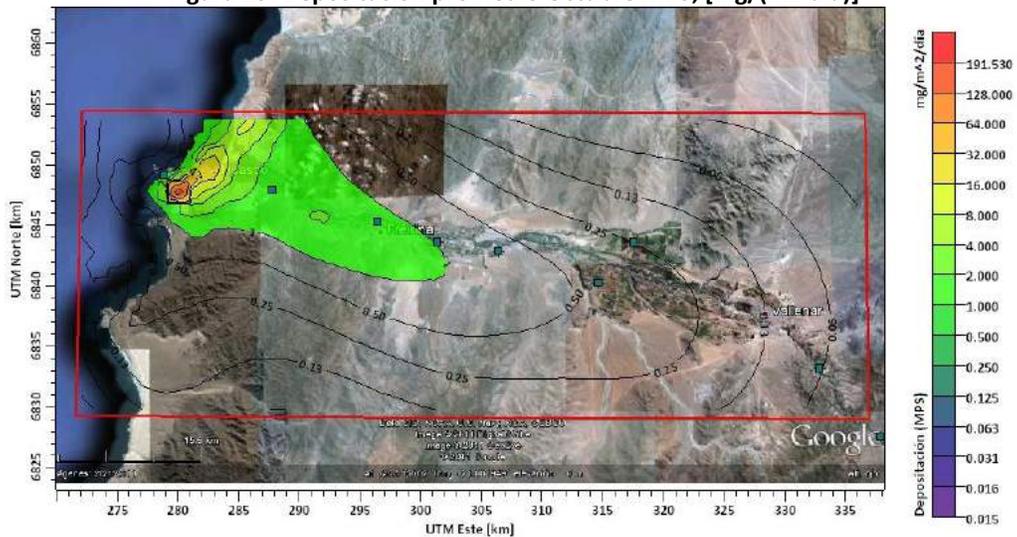


Figura 14. Deposición promedio Noviembre MPS, [mg/(m²-día)]

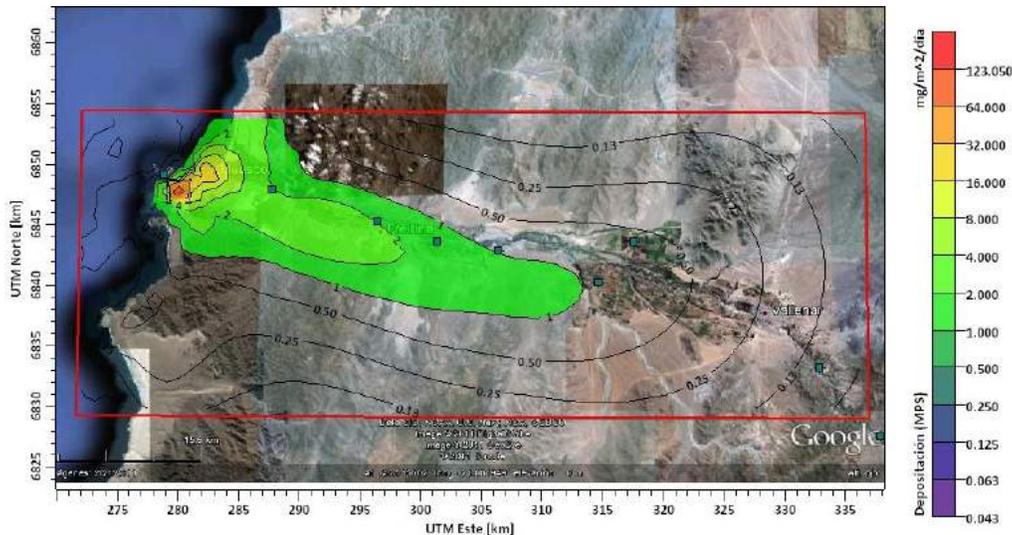


Figura 15. Deposición promedio Diciembre MPS, [mg/(m²·día)]

Los mapas de concentraciones muestran que los mayores impactos se producen en las cercanías de las fuentes principales, como son las termoeléctricas y la planta de pellets de hierro, reduciéndose hacia el este del valle. Los valores modelados son inferiores a los valores medidos en la red de monitoreo del SAG (ver reporte de actividad 1.d) más adelante en este Informe).

La explicación para la diferencia (observada - modelada) en la sedimentación de partículas se puede atribuir a que existe suspensión de polvo superficial, lo que contribuye a transportar las emisiones de partículas emitidas por el complejo industrial de Huasco hacia el interior del valle prácticamente todo el año. En efecto, los datos de velocidades del viento indican que es normal que haya vientos de hasta 8 m/s en la zona del valle, e incluso mayores en la península donde están las principales fuentes emisoras¹⁸.

La emisión por suspensión de polvo es difícil de ser estimada ya que depende de un número considerable de actividades que no ocurren de manera continua en el año (preparación de terreno agrícola, circulación de vehículos por caminos sin pavimentar, emisiones fugitivas causadas por el viento, etc.) y para las cuales no existen registros directos, por esta razón esta categoría de emisiones no fue incluida en el modelo de dispersión, y la diferencia (observada - modelada) indica que ella tiene aportes relevantes. Por ejemplo, como se comenta más adelante en la actividad 1.g), hay evidencia de que en al menos uno de los monitores de MPS emplazados en este estudio hay impactos por actividades agrícolas cercanas (preparación de terrenos con tractores), y esto es muy difícil de incluir en el modelo de dispersión. Además, hay un efecto acumulativo sobre el suelo del valle, ya que los metales allí depositados poseen poca movilidad, por lo que pueden permanecer inertes por mucho tiempo, a la vez que pueden ser transportados por el viento hacia el interior del valle.

¹⁸ Fuente: gráficas de magnitud del viento disponibles en el SINCA (<http://sinca.mma.gob.cl/>).

De acuerdo a las figuras anteriores, la extensión de la pluma varía según el mes modelado, con mayor cobertura espacial en los meses más cálidos (cuando los vientos son más intensos), a diferencia de la temporada de invierno, donde los impactos tienen características más locales ya que el viento no es tan persistente hacia el interior del valle. Los meses que presentan mayores concentraciones corresponden a los de primavera, específicamente Septiembre y Octubre. Por cierto estas comparaciones son de carácter cualitativo ya que no se han modelado todas las fuentes emisoras que afectan a la depositación de partículas, como se ha mencionado en el párrafo anterior.

b) Concentraciones ambientales de SO₂

Para el caso del SO₂, se produce una situación similar al caso del MPS, tanto en los meses de mayor concentración como en lo referente a la extensión de pluma hacia el interior del valle.

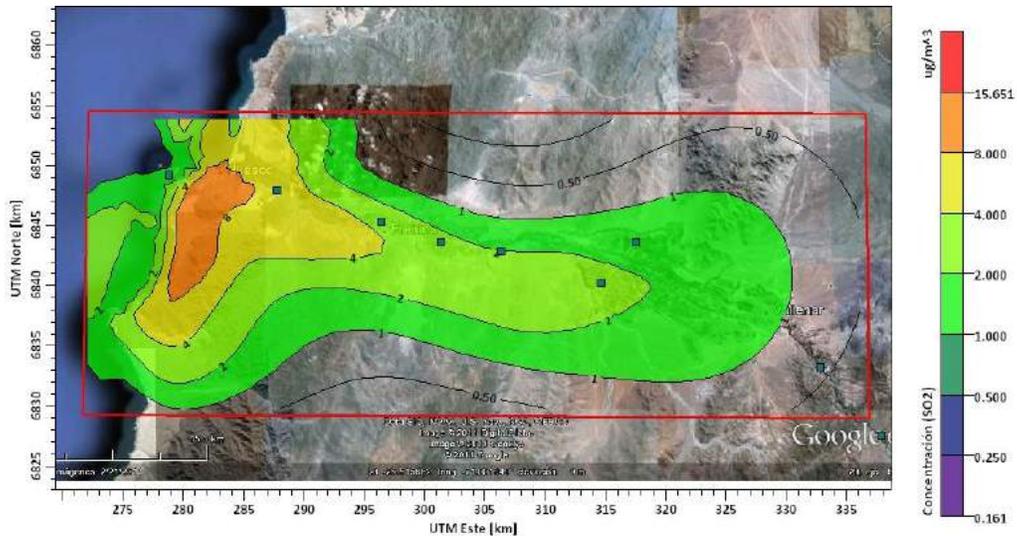


Figura 16. Concentraciones promedio Enero SO₂, en [µg/m³]

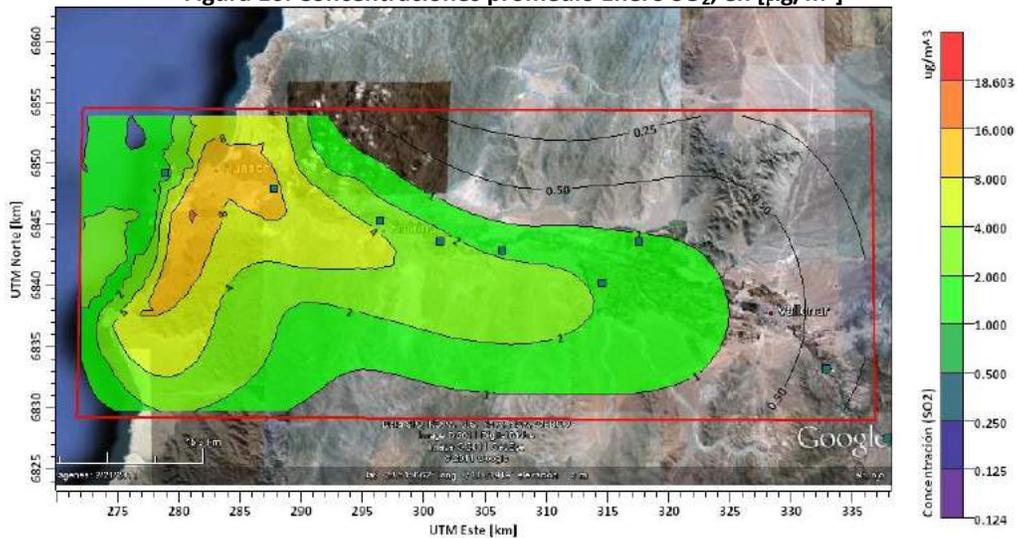


Figura 17. Concentración promedio Febrero SO₂, en [µg/m³]

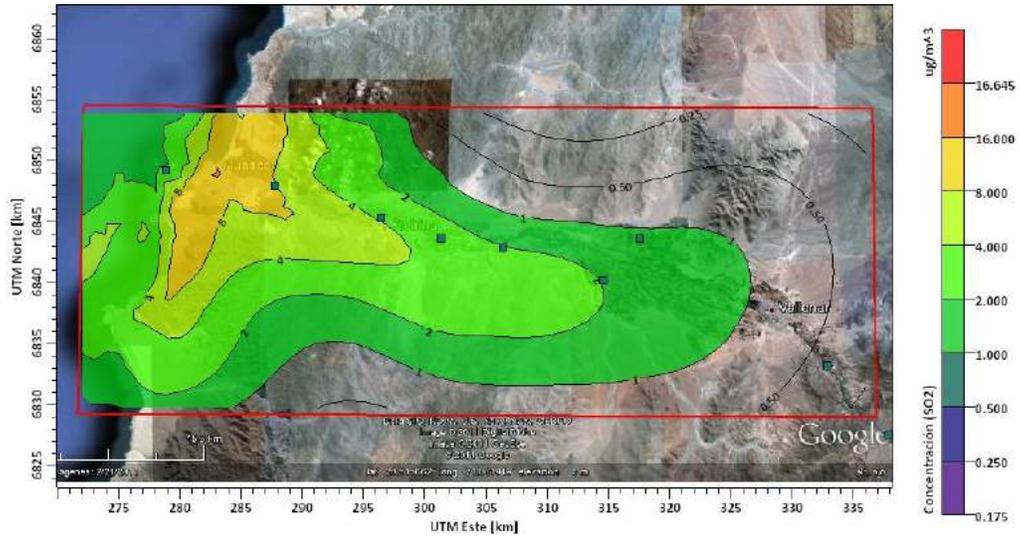


Figura 18. Concentración Promedio Marzo SO₂, en [μg/m³]

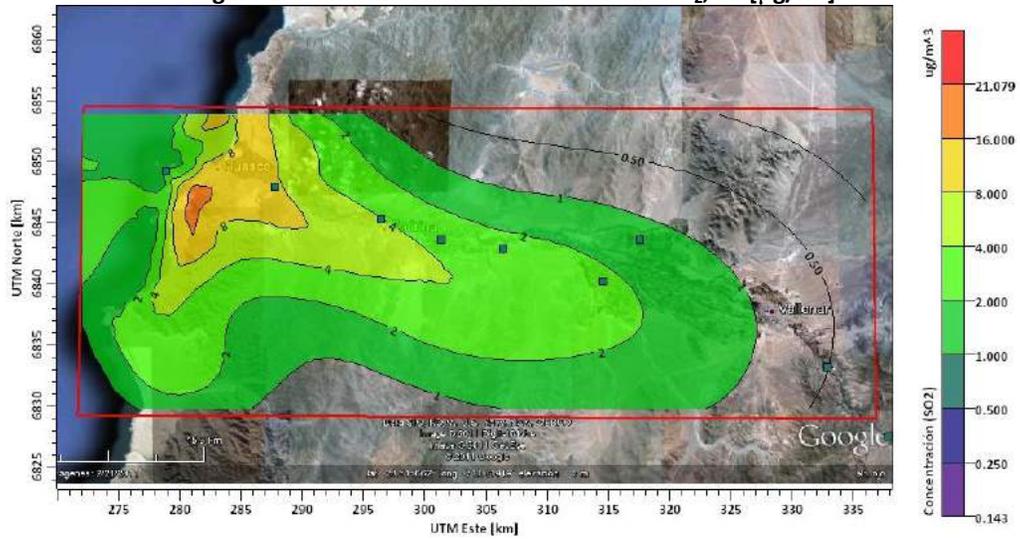


Figura 19. Concentración promedio Abril SO₂, en [μg/m³]

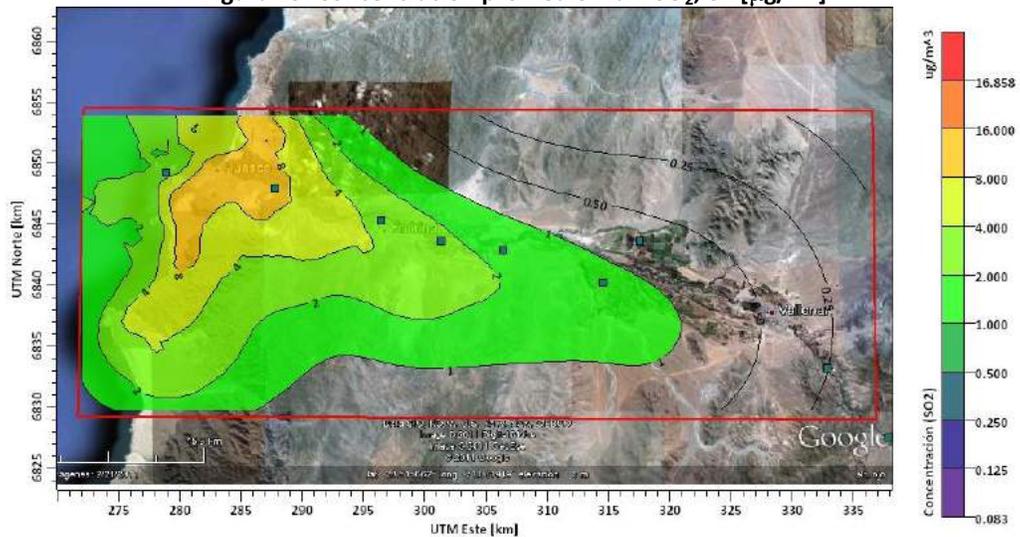


Figura 20. Concentración promedio Mayo SO₂, en [μg/m³]

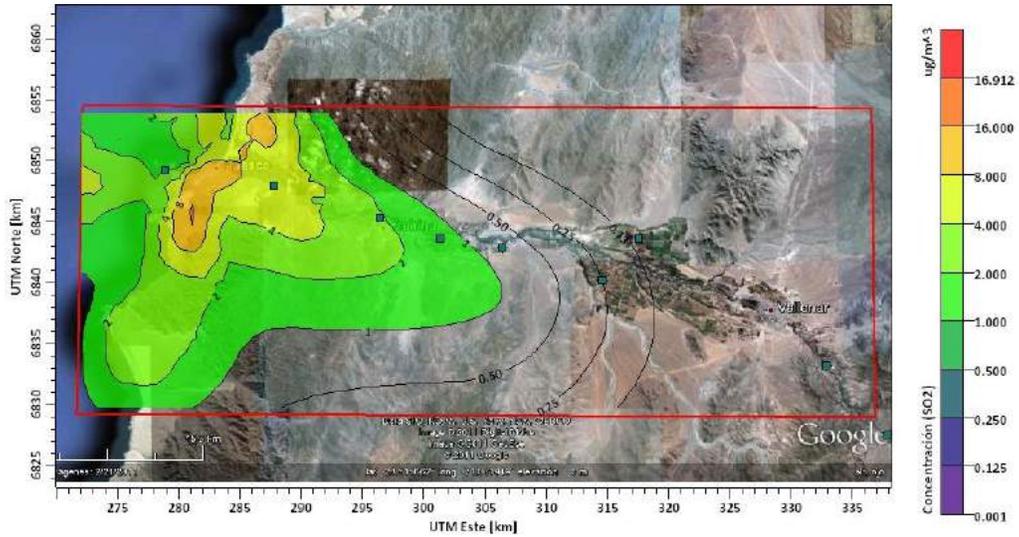


Figura 21. Concentraciones promedio Junio SO₂, en [µg/m³]

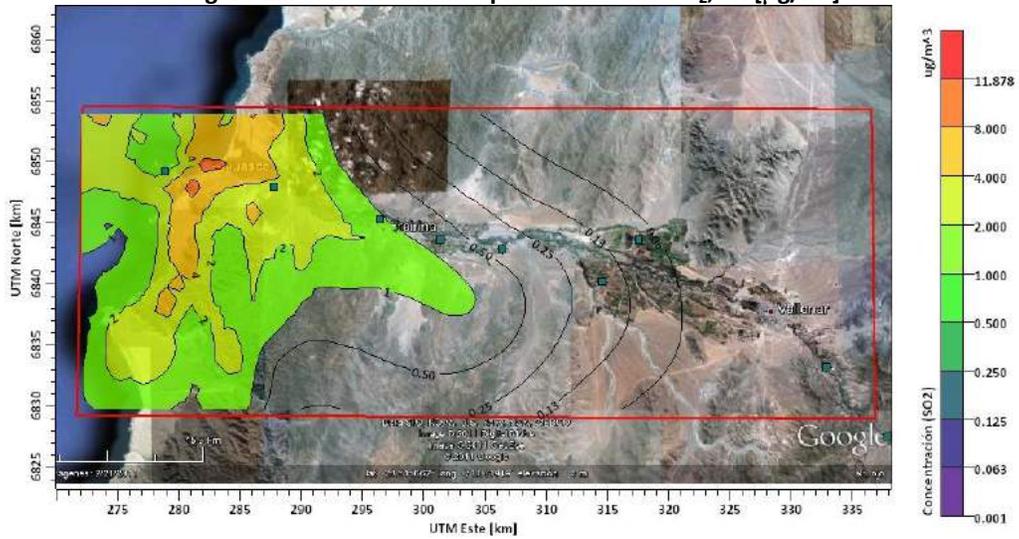


Figura 22. Concentración promedio Julio SO₂, en [µg/m³]

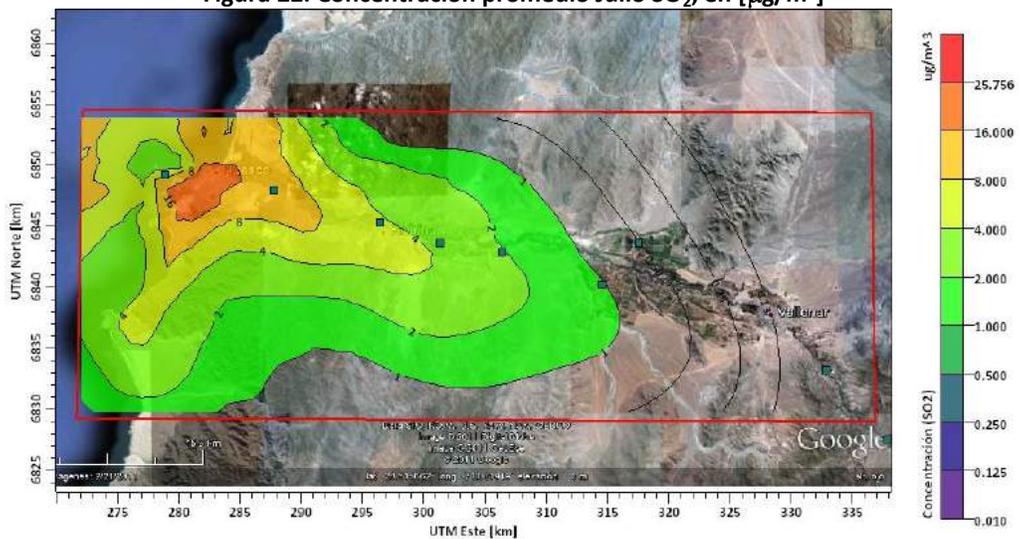


Figura 23. Concentración promedio Agosto SO₂, en [µg/m³]

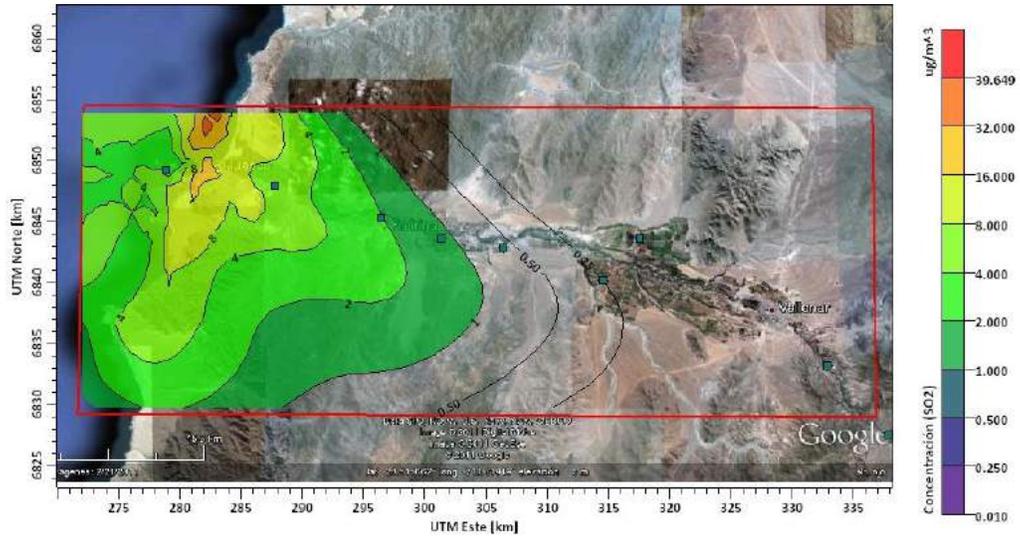


Figura 24. Concentración promedio Septiembre SO₂, en [µg/m³]

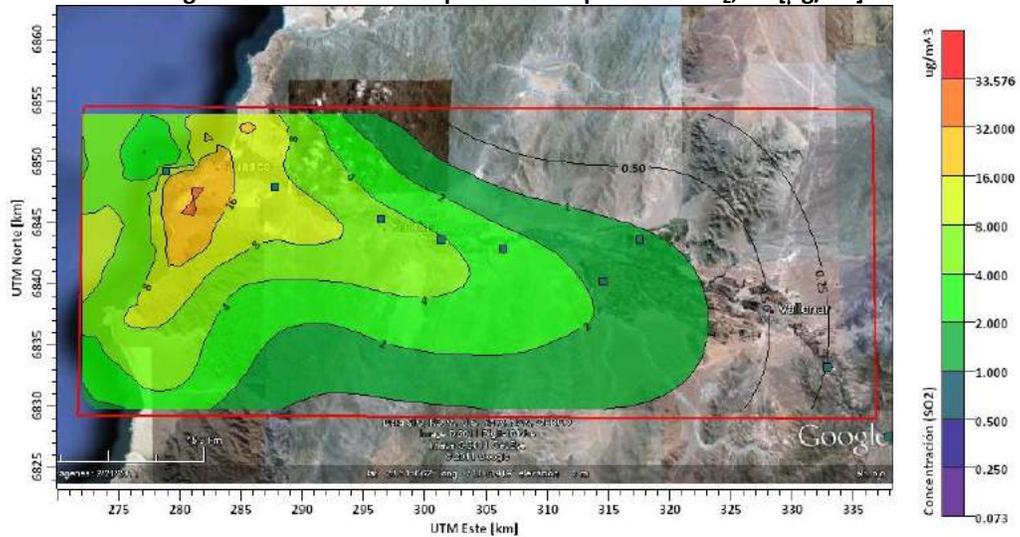


Figura 25. Concentración promedio Octubre SO₂, en [µg/m³]

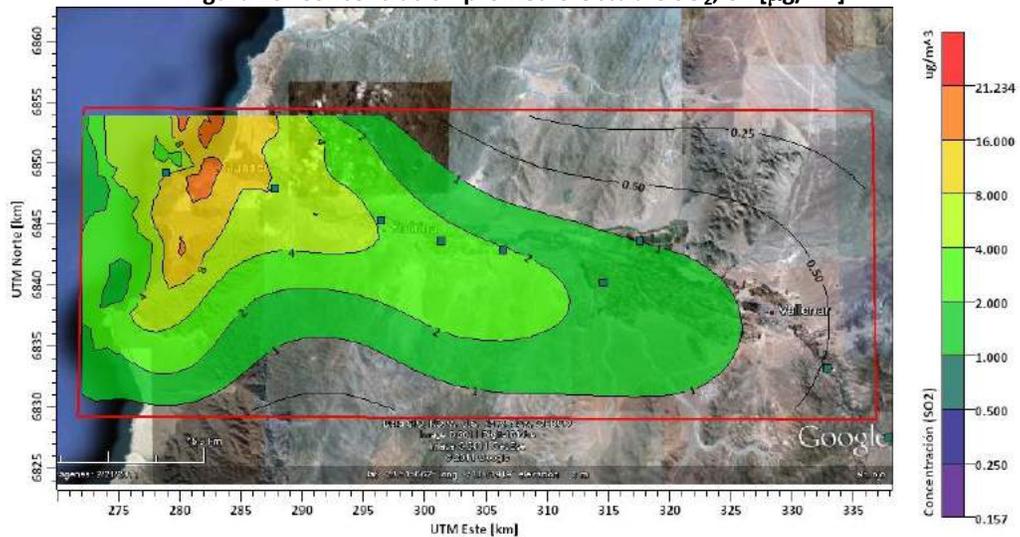


Figura 26. Concentración promedio Noviembre SO₂, en [µg/m³]

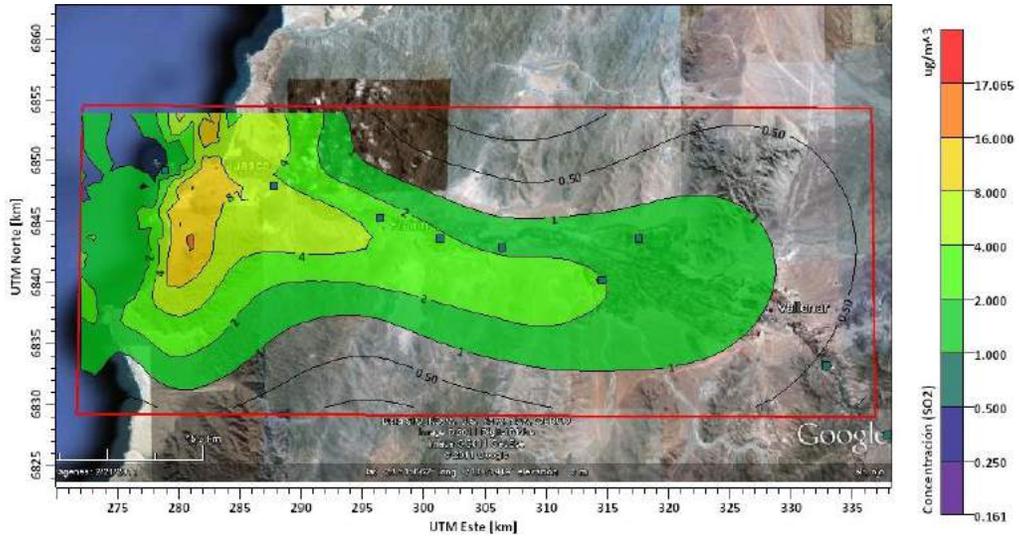


Figura 27. Concentración promedio Diciembre SO_2 , en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$

Los resultados de las figuras precedentes para el caso del SO_2 han sido utilizados para definir puntos de muestreo de hojas, frutos y suelos a lo largo del valle, de manera de poder comparar huertos cercanos y alejados de los impactos por SO_2 en el valle. Esos resultados se presentan más adelante en este Informe Final en el reporte de las actividades asociadas al objetivo N° 2.

1.f) Compilación y modelación de la meteorología

a) Compilación de la información meteorológica disponible

Se analizó la información entregada por el SEREMI de Medio Ambiente de la Región de Atacama, correspondiente a las mediciones registradas en las estaciones pertenecientes a la red Guacolda, junto a las obtenidas de la red agro-meteorológica del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)¹⁹ y a la estación Los Olivos de Bellavista, de la red de CMP. Estos registros corresponden a los años 2009 y 2010, debido a que estos períodos son los más recientes y son los más completos. Consolidando esta información, se obtiene que dentro del dominio de modelación se ubican diez estaciones meteorológicas con datos horarios (requisito del sistema de modelación CALMET/CALPUFF): SM4, SM8 y EME ME (Red Guacolda), de los cuales SM4 y SM8 miden sólo datos del viento (magnitud y dirección) y EME ME registra todos los parámetros (WS, WD, Tº, RH, radiación, presión, precipitación); Bodeguilla, Imperial, Longomilla, Nicolasa, Santa Juana y Ventanas (Red CEAZA) que registran WS, WD, Tº, RH y radiación y Los Olivos de Bellavista (red CMP) que registra WS, WD, Tº, RH y radiación. La distribución de las estaciones en la zona de modelación se indica en la Figura 28.



Figura 28. Ubicación de estaciones meteorológicas disponibles para el año 2009.

Es importante destacar que la información recopilada debió ser sometida a un control de calidad de los datos y a procesamiento, de manera de darle el formato correspondiente al sistema CALMET/CALPUFF. Además, se debe tener en consideración que el modelo necesita que como mínimo se disponga de un registro de los distintos parámetros meteorológicos por hora, por lo que en caso que no se cumpla esta condición, se debe emplear una metodología como interpolación para poder obtener los valores necesarios.

¹⁹ <http://www.cezamet.cl/huasco/>

Según los datos recopilados, la información disponible es la siguiente:

Tabla 22: Porcentaje de información disponible²⁰

Estación	Parámetro											
	T (°C)		HR (%)		WS (m/s)		WD (°)		Radiación Solar (W/m ²)		Presión (mbar)	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
EME ME	97.7	99.9	97.7	99.9	97.7	99.9	97.7	99.9	97.7	99.9	99.9	99.9
Los Olivos	88.0	-	87.7	-	88.0	-	85.1	-	88.0	-	88.0	-
SM4	-	-	-	-	100	100	100	100	-	-	-	-
SM8	-	-	-	-	98	100	98	100	-	-	-	-
Nicolasa	76.3	75.2	76.3	75.2	76.3	75.2	76.3	75.2	76.3	75.2	-	-
Bodeguilla	96.1	37	96.5	41.3	96.6	41.3	96.6	41.3	96.5	41.3	-	-
Longomilla	54.2	41.3	54.2	41.3	54.2	41.3	54.2	41.3	54.2	41.3	-	-
Ventanas	78.1	25	84.6	25	84.7	25.1	84.7	25.1	84.6	25.0	-	-
Imperial	84.1	21.4	84.1	21.4	84.3	21.4	84.3	21.4	84.1	21.4	-	-
Santa Juana	82.6	75.2	82.6	75.2	82.6	74.4	82.6	74.4	82.6	75.2	-	-

Según la Tabla 22, para el año 2009 existe una cantidad considerablemente mayor de mediciones que en el 2010, por lo que se consideró el año 2009 para fines de modelación de la situación actual en el valle del Huasco.

En las modelaciones de dispersión y transporte de contaminantes la meteorología es crítica para obtener buenos resultados, especialmente la velocidad y dirección del viento, que son un indicador que cómo y hacia dónde se dispersará la pluma de las emisiones. Para poder analizar los vientos registrados en las distintas estaciones meteorológicas es conveniente hacer una clasificación por estaciones del año, de manera de estudiar los patrones que se producen en cada una de ellas. En la zona de estudio se identifican las siguientes estaciones:

Tabla 23: Definición de estaciones del año

Estación	Período
Verano	Enero, Febrero y Marzo
Otoño	Abril, Mayo y Junio
Invierno	Julio, Agosto y Septiembre
Primavera	Octubre, Noviembre y Diciembre

²⁰ Tomando como referencia 8760 horas, correspondientes a un año no bisiesto

En la época de verano se aprecian vientos intensos y con dirección predominante SW para la estación EME ME, situación característica de este período en la zona costera. En la Figura 29 se observan claramente los efectos de la topografía en los campos de viento, ya que los flujos de aire siguen la orientación del valle del río Huasco, quedando en evidencia además, la reducción en la magnitud de la velocidad a medida que se va adentrando en el valle y los efectos de las zonas más angostas (aumenta la velocidad del viento).

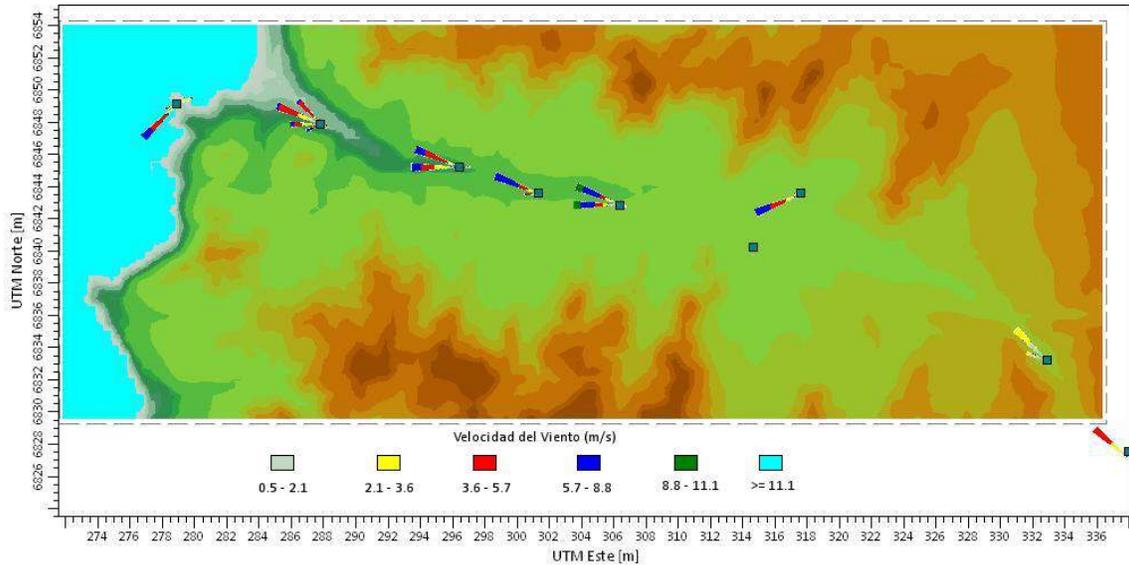


Figura 29: Rosas de los vientos en verano

En los meses de otoño (Figura 30) se cumple un patrón similar al de verano, presentándose una reducción en la intensidad de los vientos y aumentando la frecuencia de una componente de circulación tierra – mar, generada por el enfriamiento diferencial nocturno de las superficies, la que tiene una menor magnitud de la velocidad que en el periodo diurno.

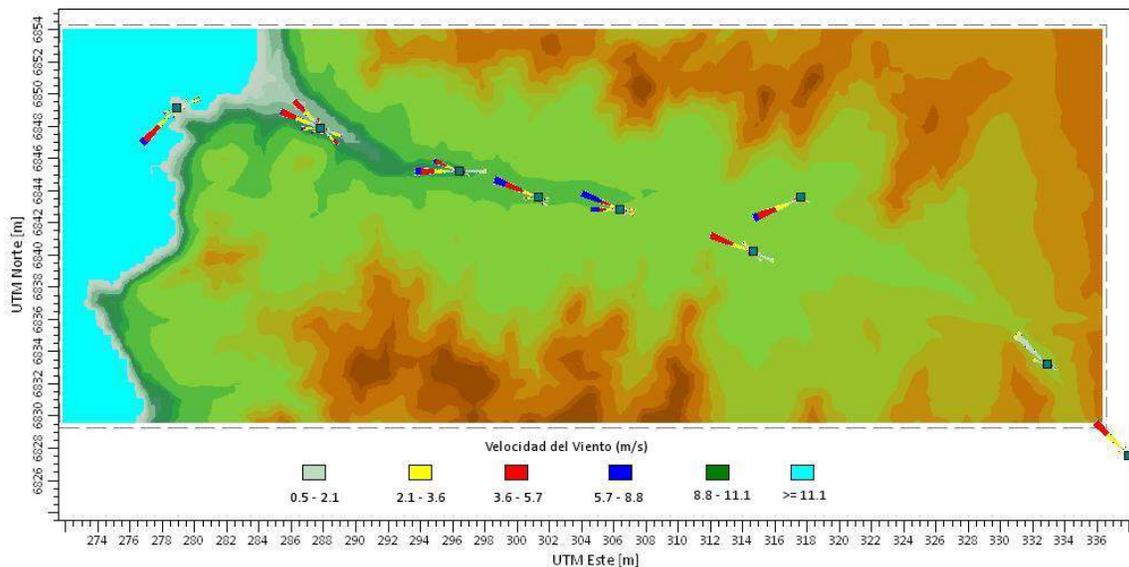


Figura 30: Rosas de los vientos otoño

Durante el invierno (Figura 31) se aprecia una reducción más significativa en la frecuencia de las corrientes diurnas, alcanzando los valores más bajos del año; además en la estación EME ME se producen vientos ENE de mayor intensidad, lo que puede ser explicado por los efectos de la vaguada costera, fenómeno que presenta zonas de baja presión atmosférica sobre el borde costero, las que inducen circulación de viento hacia el océano incluso durante el día. Esa condición sinóptica, unida a la mayor duración del periodo nocturno en invierno, explica que la frecuencia y magnitud de los vientos valle-mar se tienden a igualar a aquellos de la circulación mar-valor.

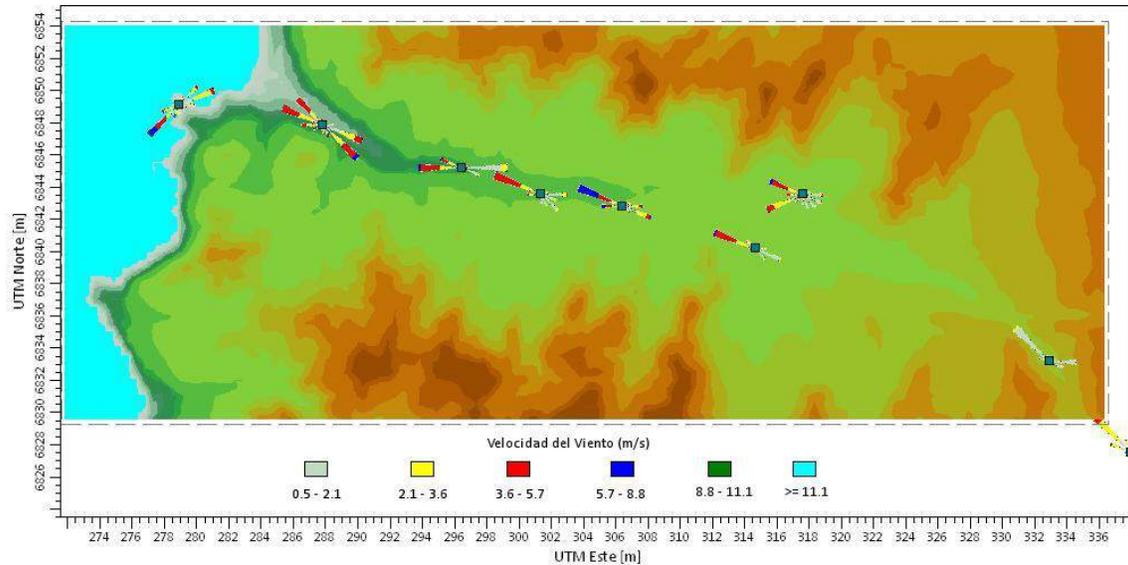


Figura 31: Rosas de los vientos invierno

En primavera (Figura 32), se generan vientos asociados a meses más cálidos como se indica anteriormente, con el consiguiente aumento de la intensidad de ellos y el predominio estival de la mayor frecuencia de vientos mar-valor.

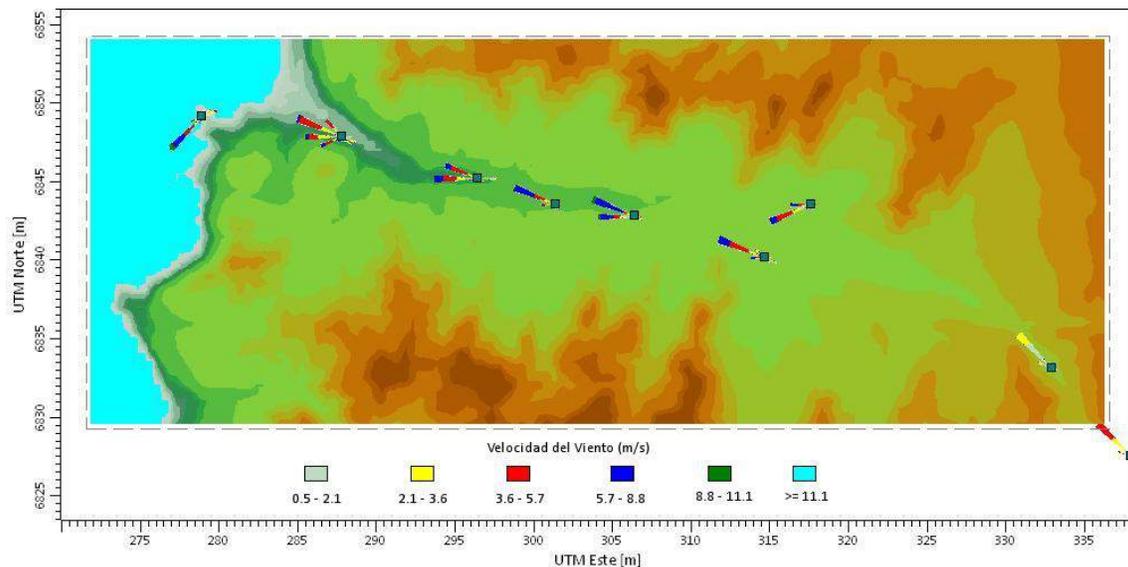


Figura 32. Rosas de los vientos primavera

En las siguientes figuras se muestra los promedios mensuales de los perfiles horarios de temperatura y radiación solar, los cuales son consistentes con la tendencia general de este parámetro y la ubicación de las estaciones, presentando valores más altos alrededor del mediodía, reduciéndose hasta llegar a cero por las noches, y mostrando además una mayor intensidad en los meses más cálidos. Los gráficos muestran un aumento paulatino de la radiación a medida que se avanza hacia el Este, lo que se explica porque las estaciones se encuentran a una elevación mayor a medida que se alejan de la costa, reduciéndose así el efecto de la nubosidad costera, la que atenúa la radiación que llega a la superficie donde está la estación de monitoreo.

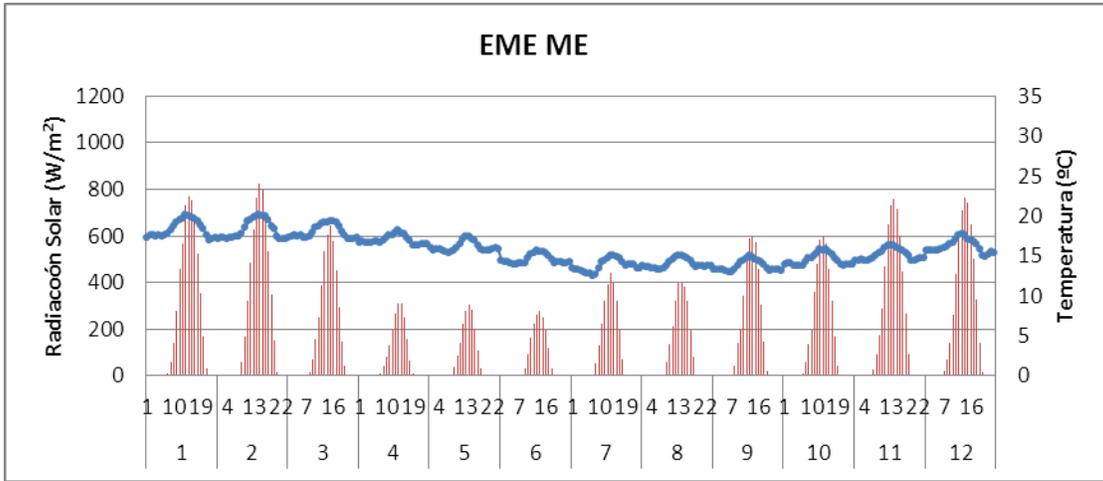


Figura 33: Promedio mensual de perfil horario de temperatura y radiación solar.

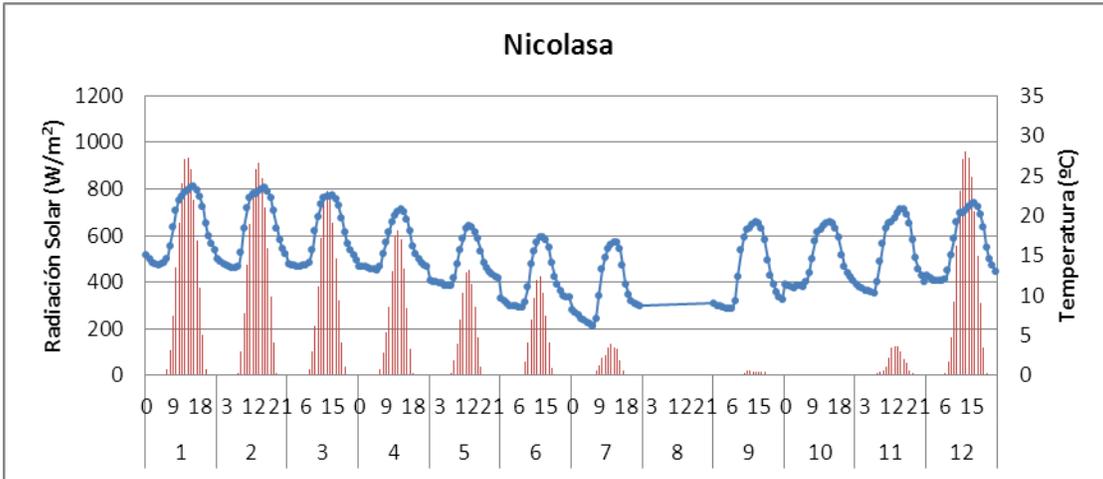


Figura 34: Promedio mensual de perfil horario de temperatura y radiación solar.

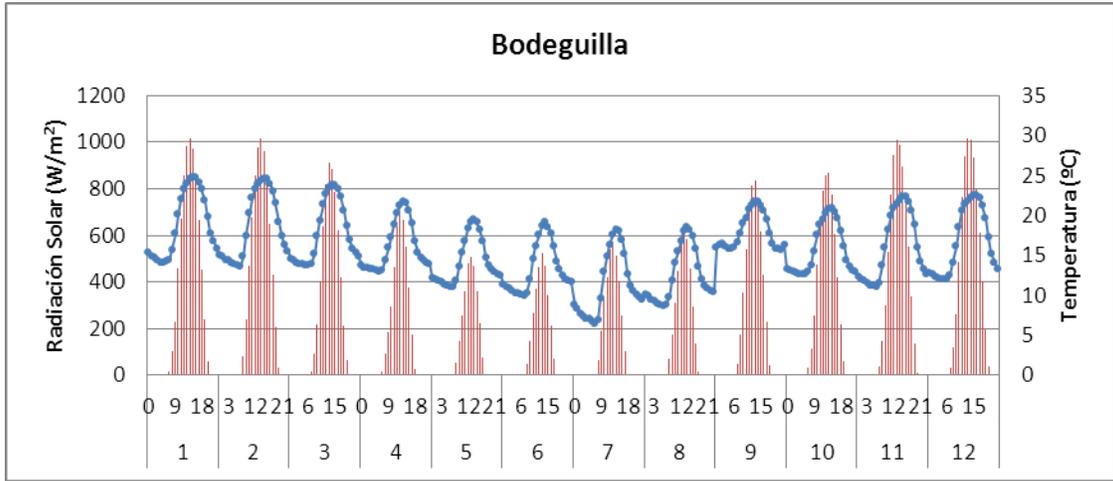


Figura 35: Promedio mensual de perfil horario de temperatura y radiación solar.

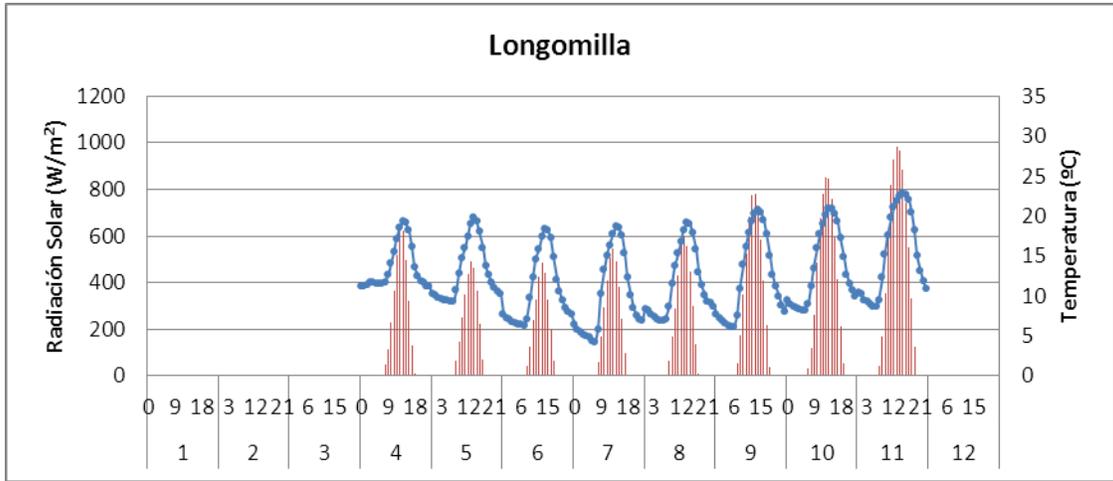


Figura 36: Promedio mensual de perfil horario de temperatura y radiación solar.

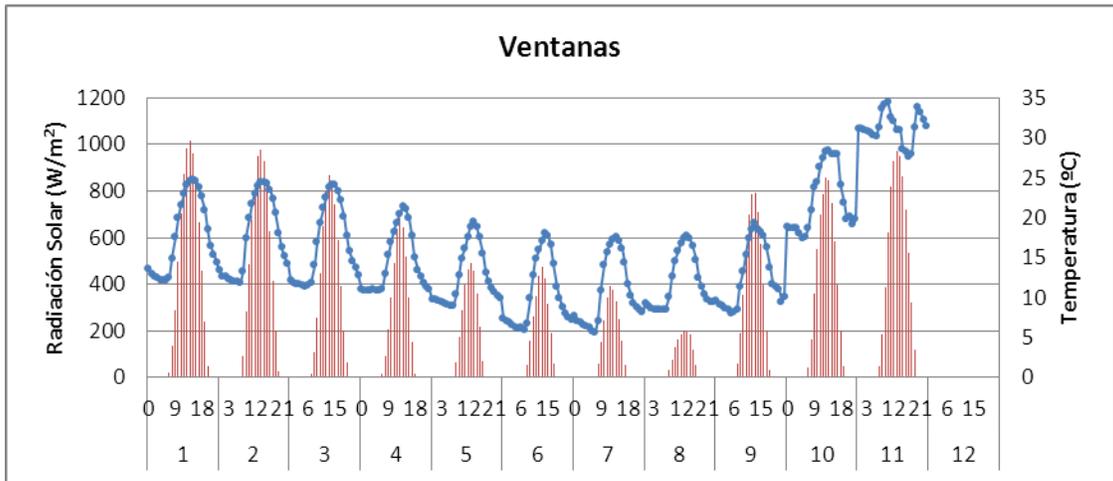


Figura 37: Promedio mensual de perfil horario de temperatura y radiación solar.

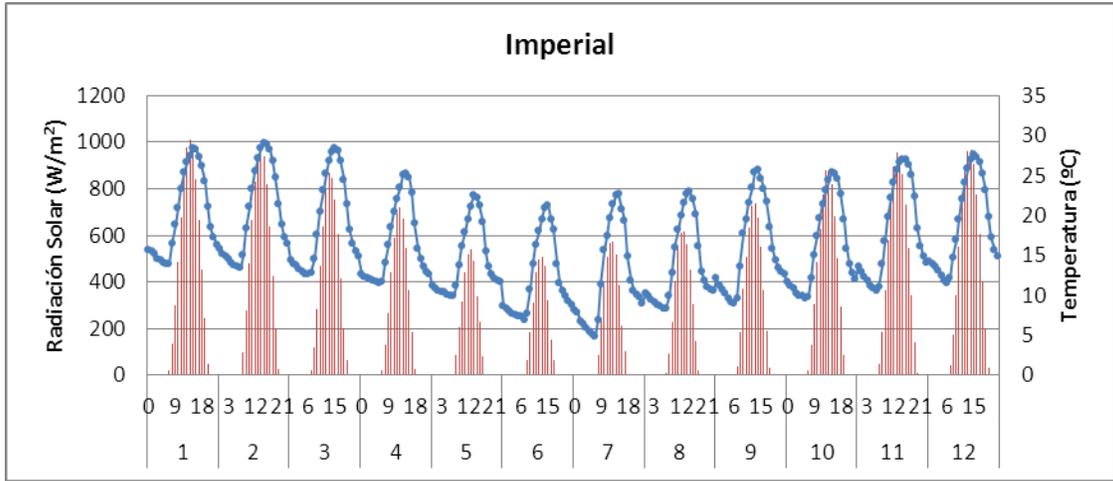


Figura 38: Promedio mensual de perfil horario de temperatura y radiación solar.

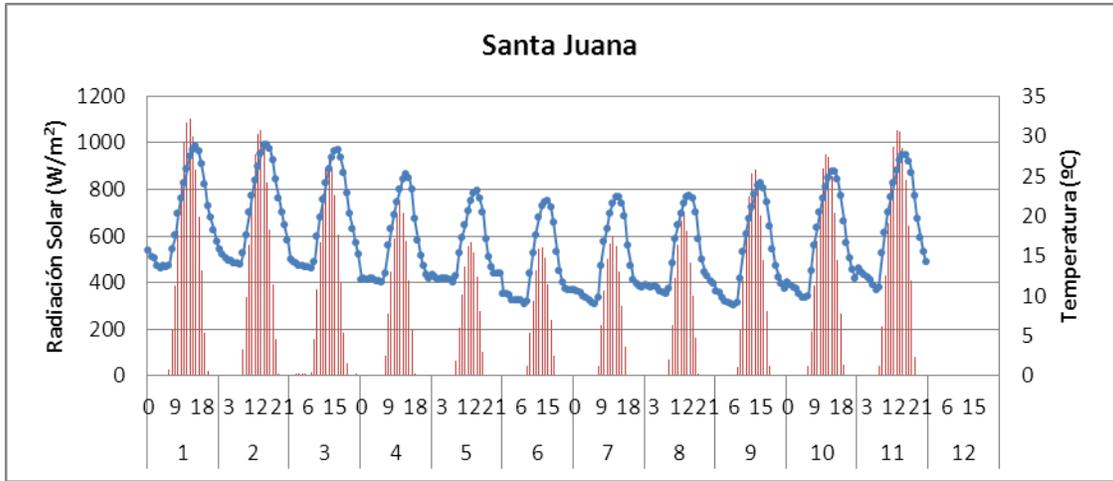


Figura 39: Promedio mensual de perfil horario de temperatura y radiación solar.

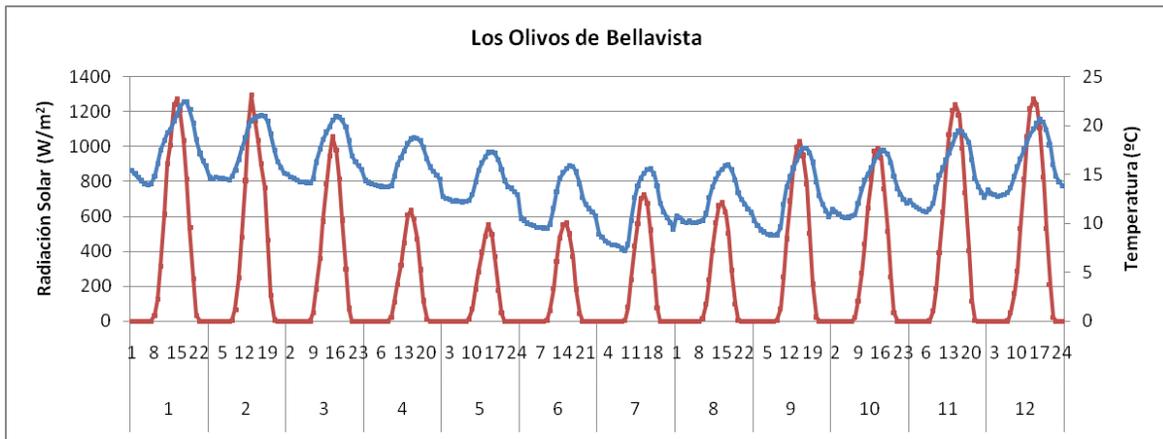


Figura 40: Promedio mensual de perfil horario de temperatura y radiación solar.

b) Modelación de la meteorología en el valle del Huasco, año 2009.

Para completar la información meteorológica disponible de estaciones monitoras en la zona del proyecto a modelar con CALPUFF, se ha realizado una simulación con el modelo meteorológico de meso-escala WRF²¹, modelo desarrollado por el NCAR²² y NOAA²³ estadounidenses con la ayuda de otras instituciones. Se crearon cuatro dominios anidados con espaciamiento horizontal de 27, 9, 3 y 1 kilómetro correspondientemente, los cuales se muestran en las siguientes imágenes. El cuarto dominio abarca la totalidad del dominio de modelación que se utilizará en CALMET y CALPUFF.

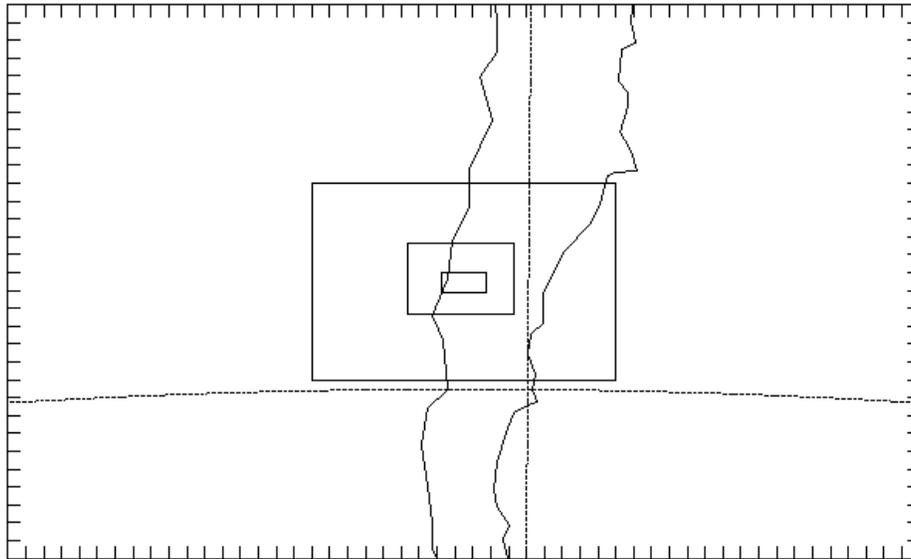


Figura 41. Cuatro dominios anidados configurados en simulación de WRF.

Los colores de las siguientes dos imágenes corresponden a cotas de nivel respecto al nivel del mar, pero aquí se utilizan con el único objetivo de mostrar las extensiones de cada dominio. En la siguiente figura se pueden apreciar los dominios 2, 3 y 4 según distintos niveles de transparencia utilizados en cada capa superficial de imágenes.

²¹ Weather Research and Forecasting model

²² U.S National Center of Atmospheric Research

²³ U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration

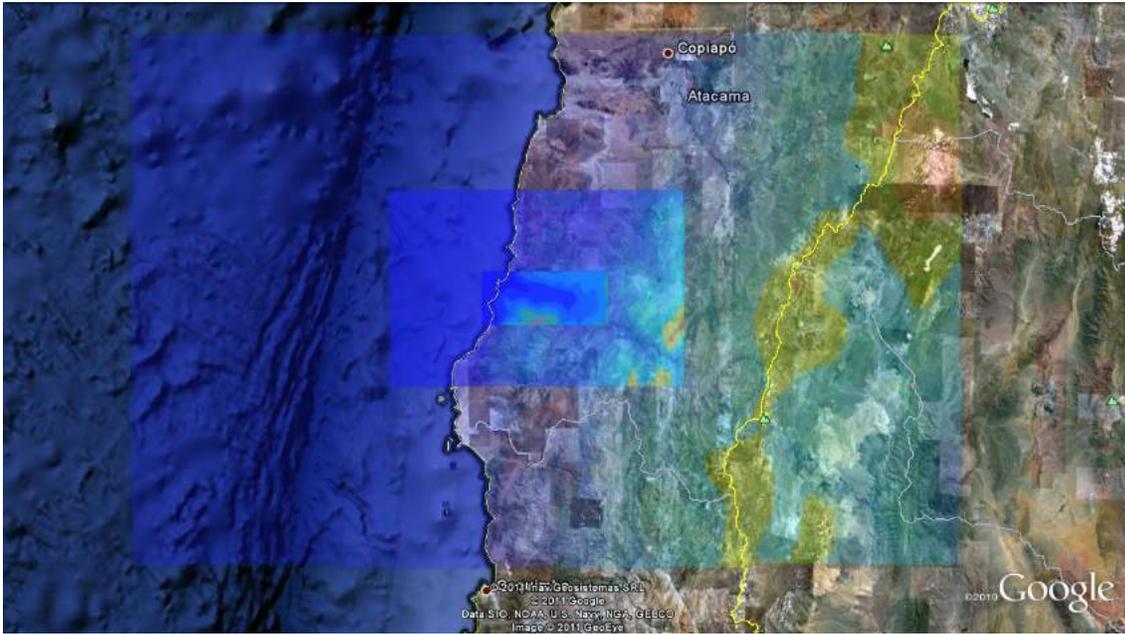


Figura 42. Extensiones de los dominios 2, 3 y 4

El rectángulo rojo de la siguiente imagen corresponde al dominio que se utilizará en las simulaciones de CALMET/CALPUFF.

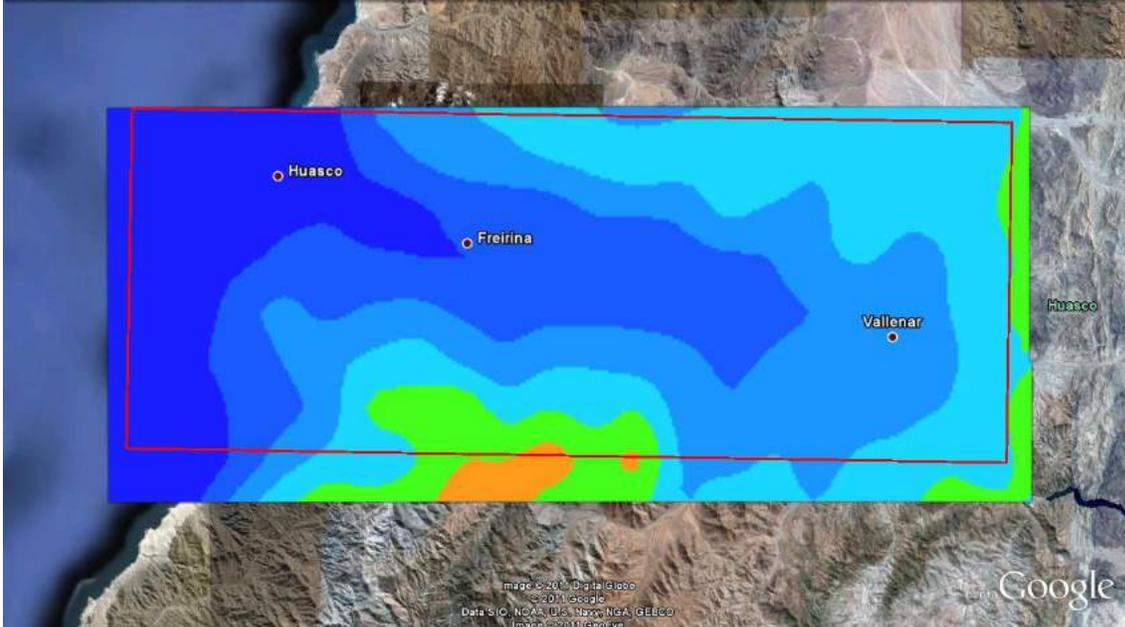


Figura 43. Dominio 4 configurado en WRF y dominio del proyecto a modelar en CALPUFF.

i) Resultados para las alturas de mezclado.

La altura de mezclado corresponde al límite vertical hasta donde pueden mezclarse los contaminantes atmosféricos en una zona dada, y son medidas con respecto al suelo. Luego, es un parámetro crítico para representar el proceso de dispersión de contaminantes. A mayor altura de mezclado, mayor es la dilución de los contaminantes en el aire, y menores los impactos causados por las emisiones de contaminantes.

Las siguientes figuras muestran la evolución de este parámetro en dos días de distintas estaciones del año: 10 de Marzo y 10 de Agosto 2009, respectivamente. Notar que los gráficos de cada mes poseen distintas escalas de valores, siendo mayores los valores de marzo que los de agosto.

Los resultados para marzo indican alturas de mezclado entre 100 y 1000 m en condiciones nocturnas, mientras que en el día se alcanzan alturas de hasta 2000 m, especialmente hacia el este de Freirina y asociadas a mayores elevaciones de terreno, es decir, sobre las colinas que rodean al valle en su zona este. Estas alturas de mezclado disminuyen rápidamente al atardecer con la puesta del sol, alcanzado valores mínimos a la medianoche.

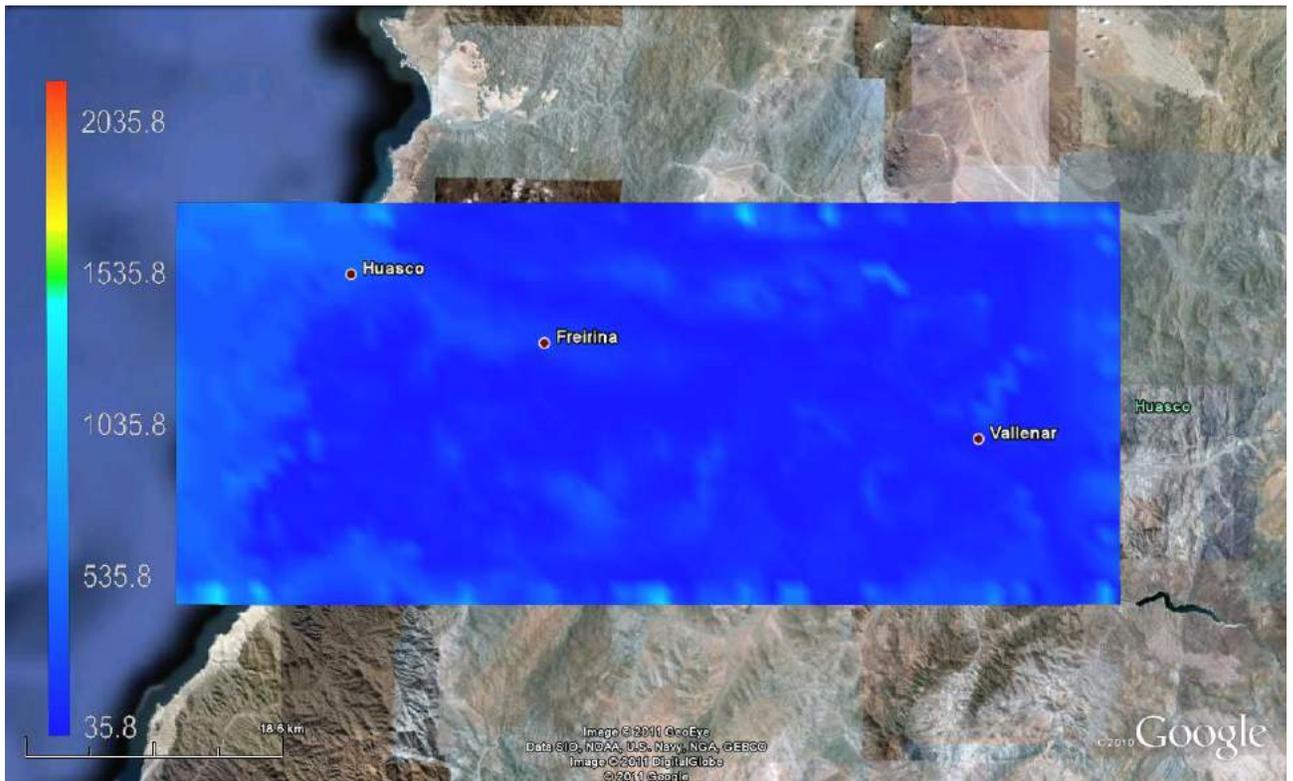
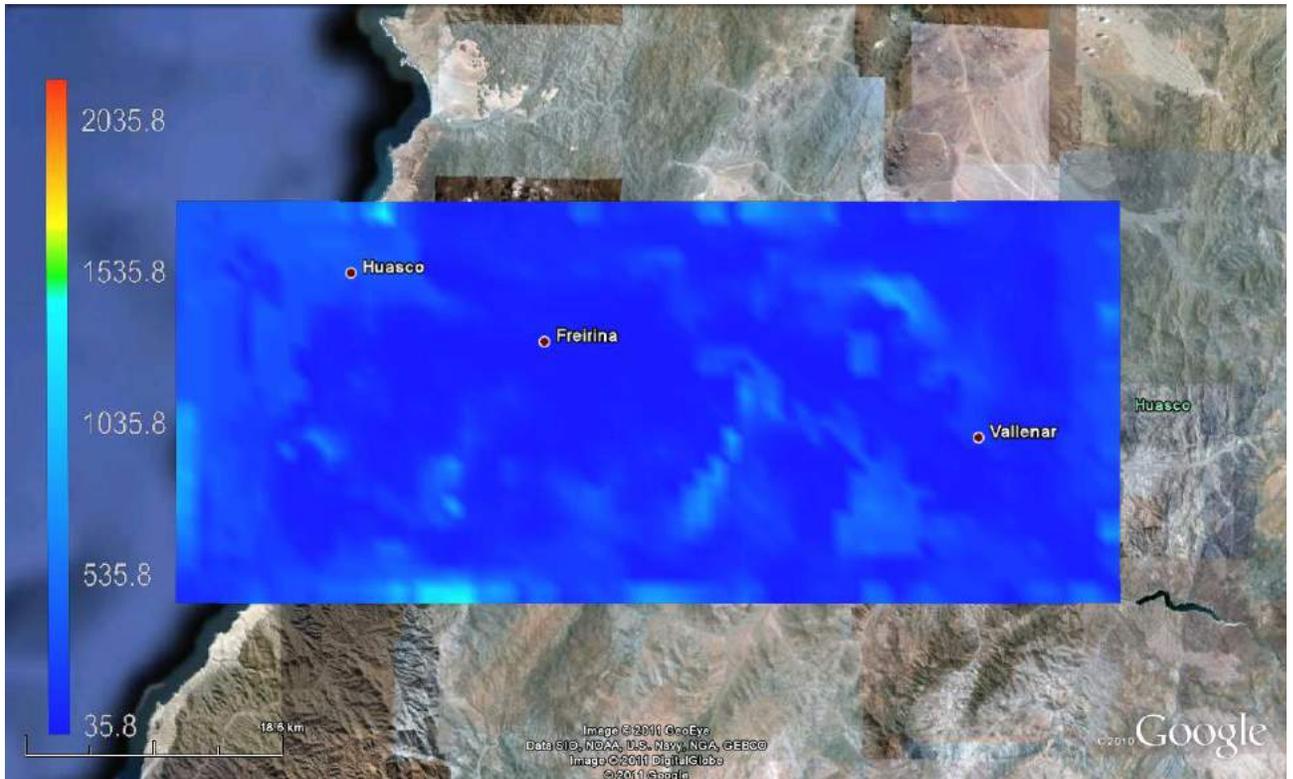


Figura 44. Altura de mezclado en el valle del Huasco (en m sobre el suelo) para el 10 de marzo de 2009 a las 0 y 6 horas locales, respectivamente.

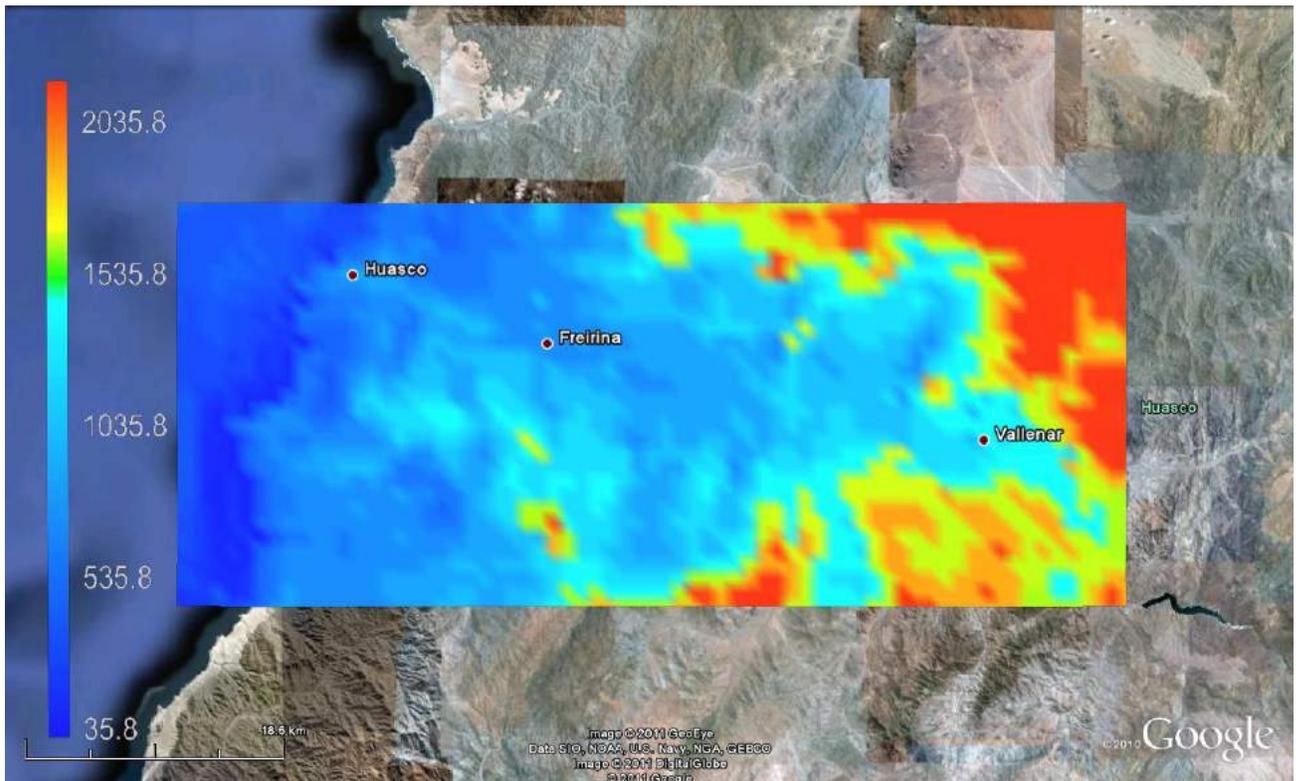
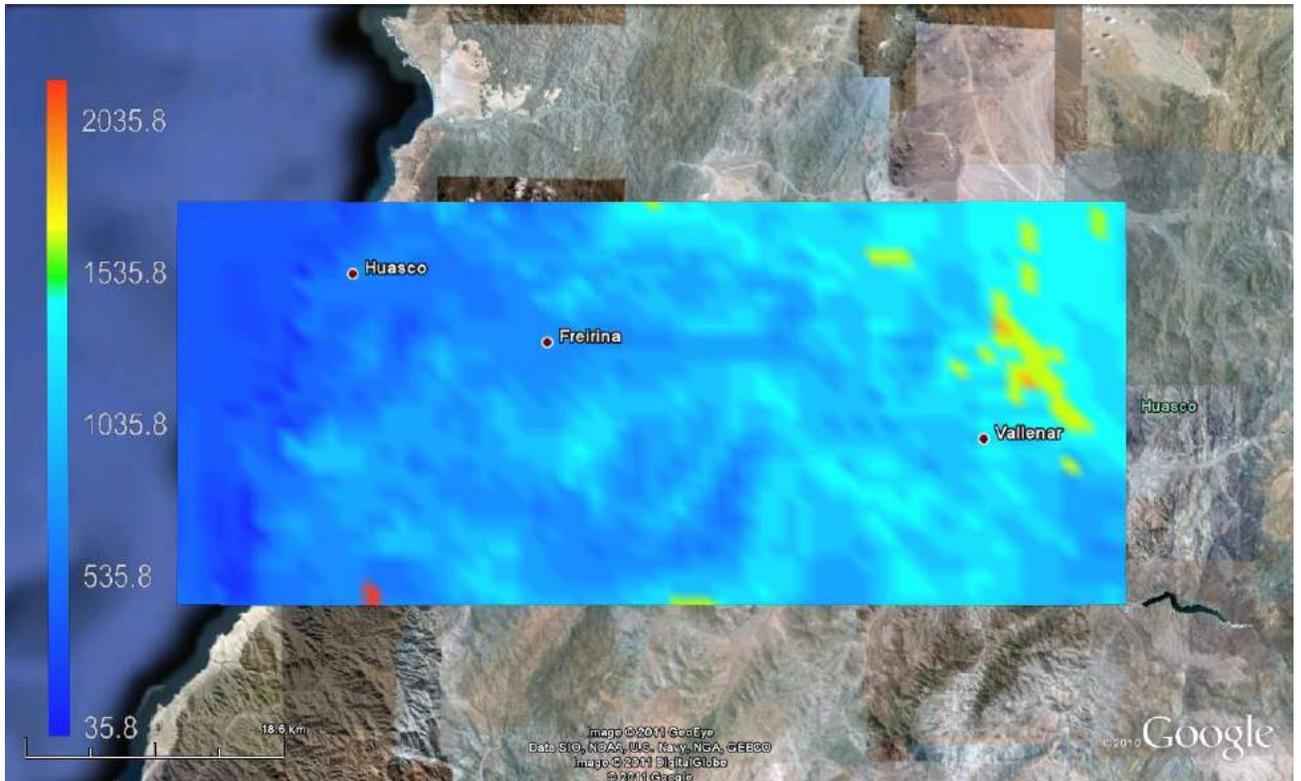


Figura 45. Altura de mezclado en el valle del Huasco (en m sobre el suelo) para el 10 de marzo de 2009 a las 12 y 15 horas locales, respectivamente.

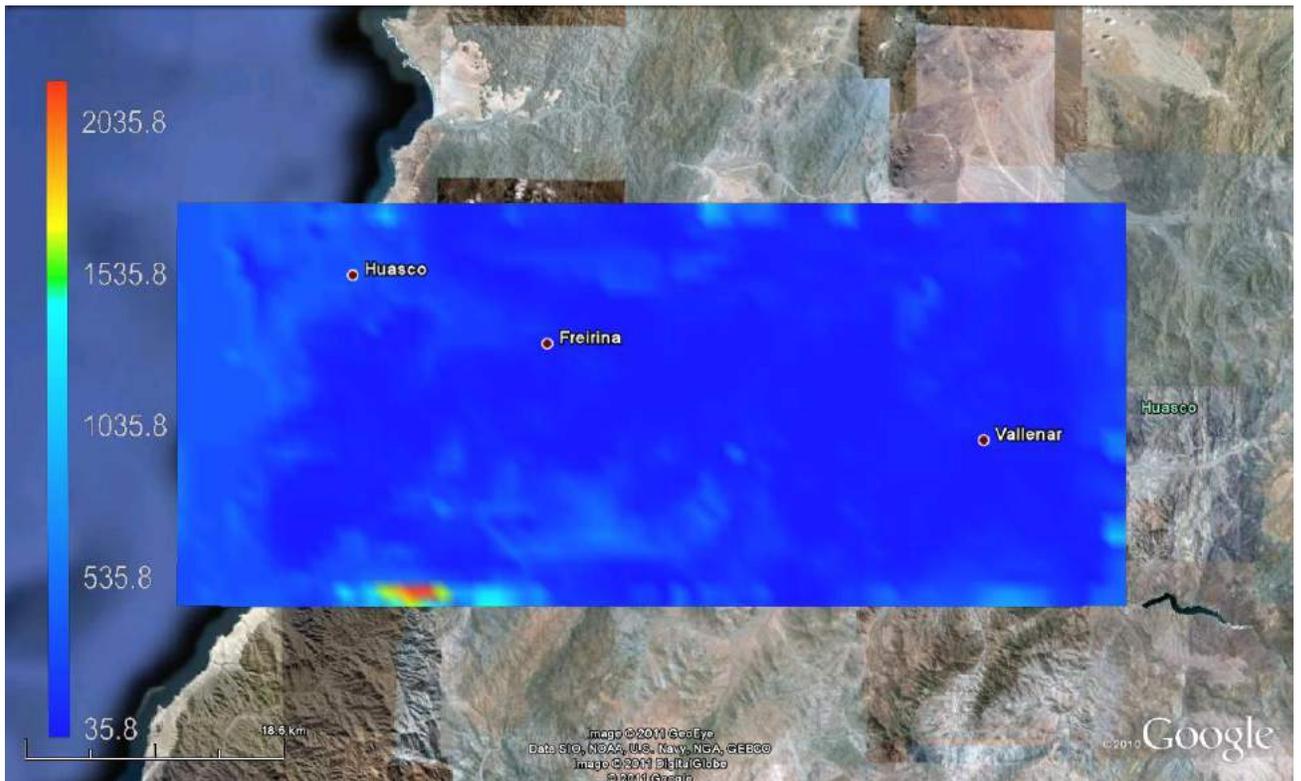
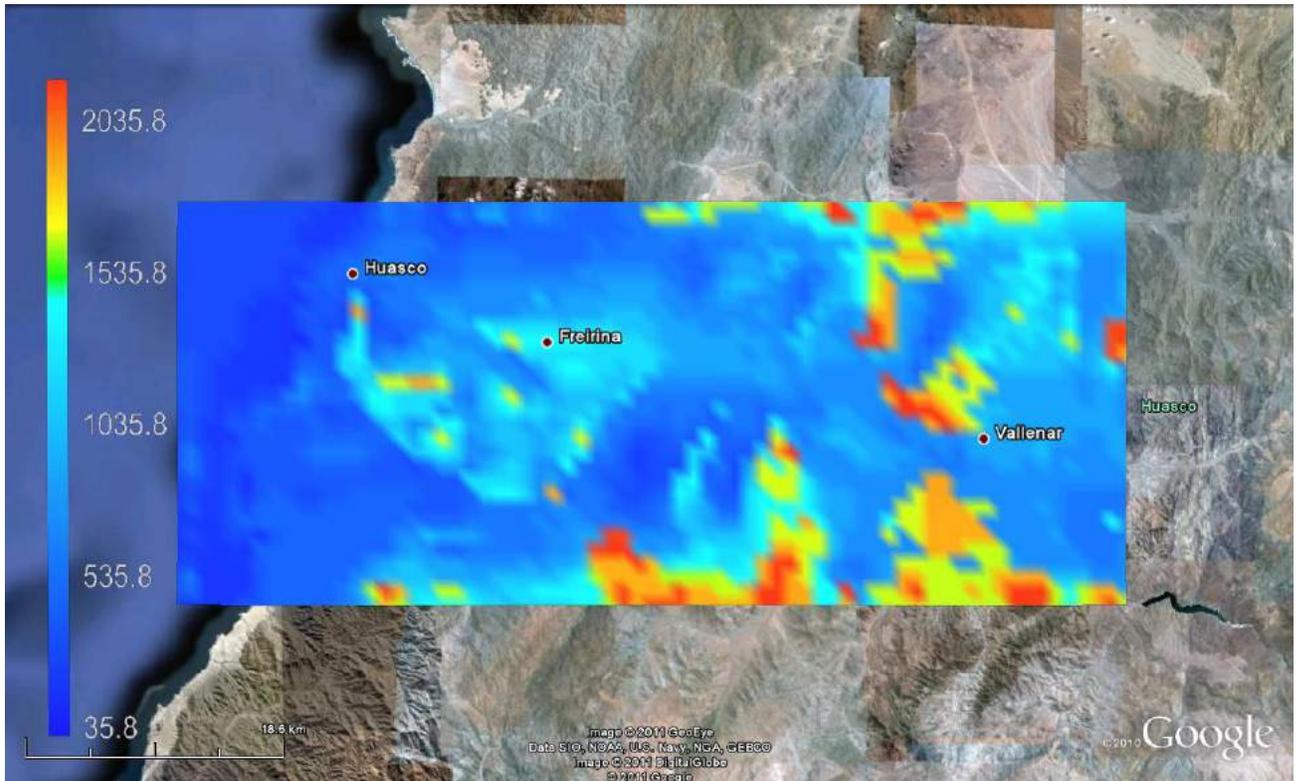


Figura 46. Altura de mezclado en el valle del Huasco (en m sobre el suelo) para el 10 de marzo de 2009 a las 18 y 24 horas locales, respectivamente.

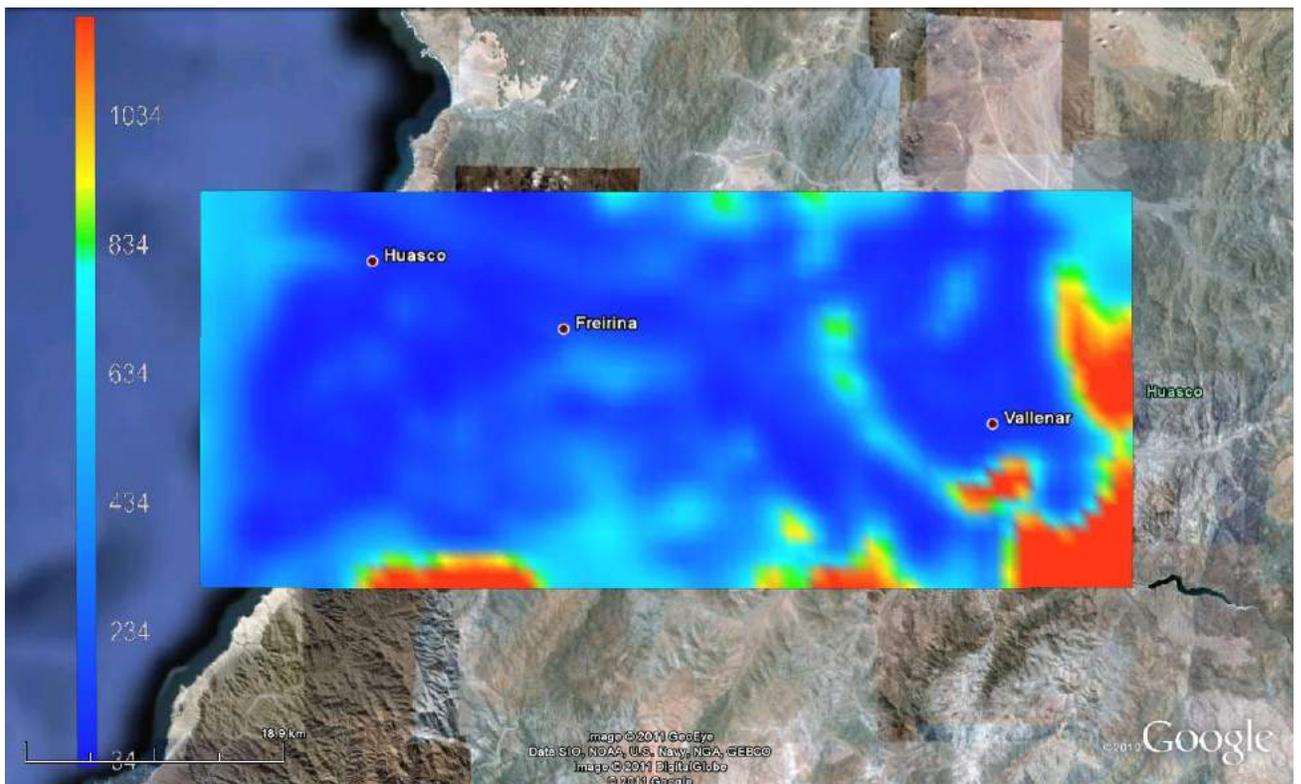
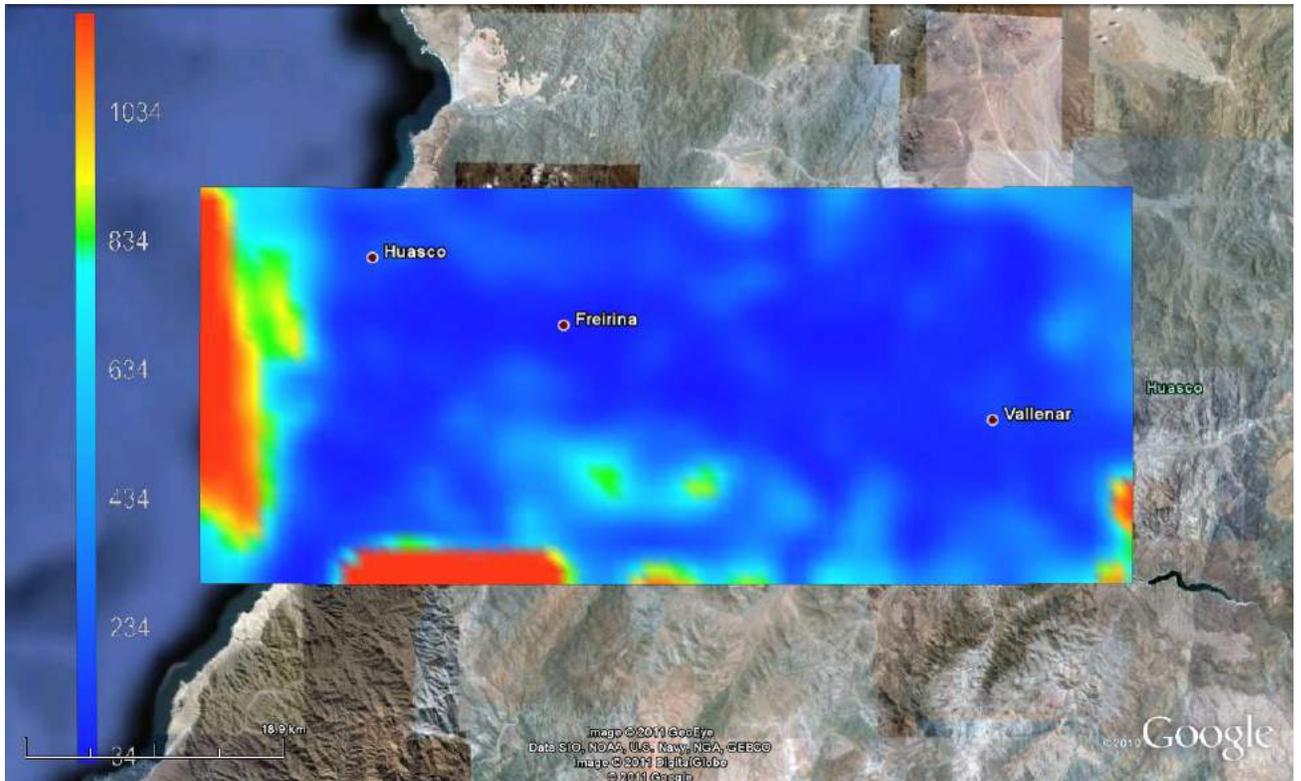


Figura 47. Altura de mezclado en el valle del Huasco (en m sobre el suelo) para el 10 de agosto de 2009 a las 0 y 6 horas locales, respectivamente.

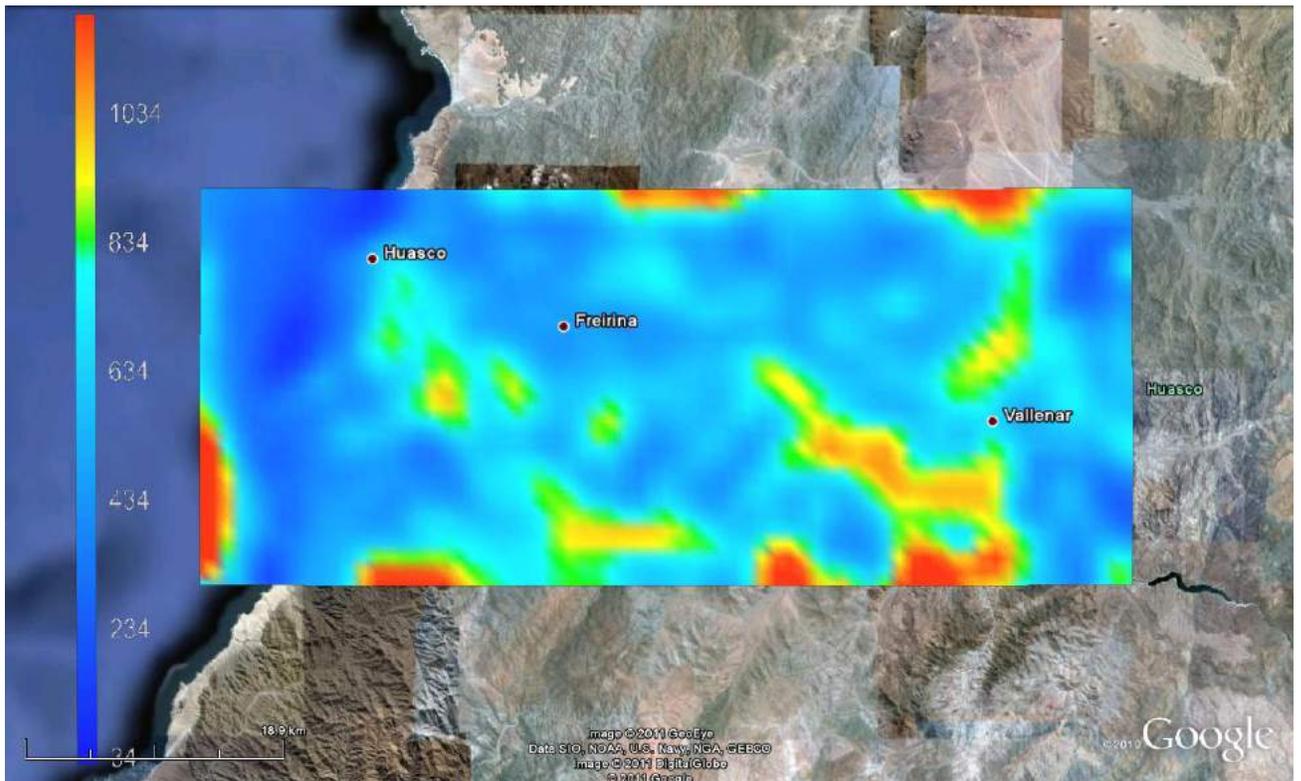
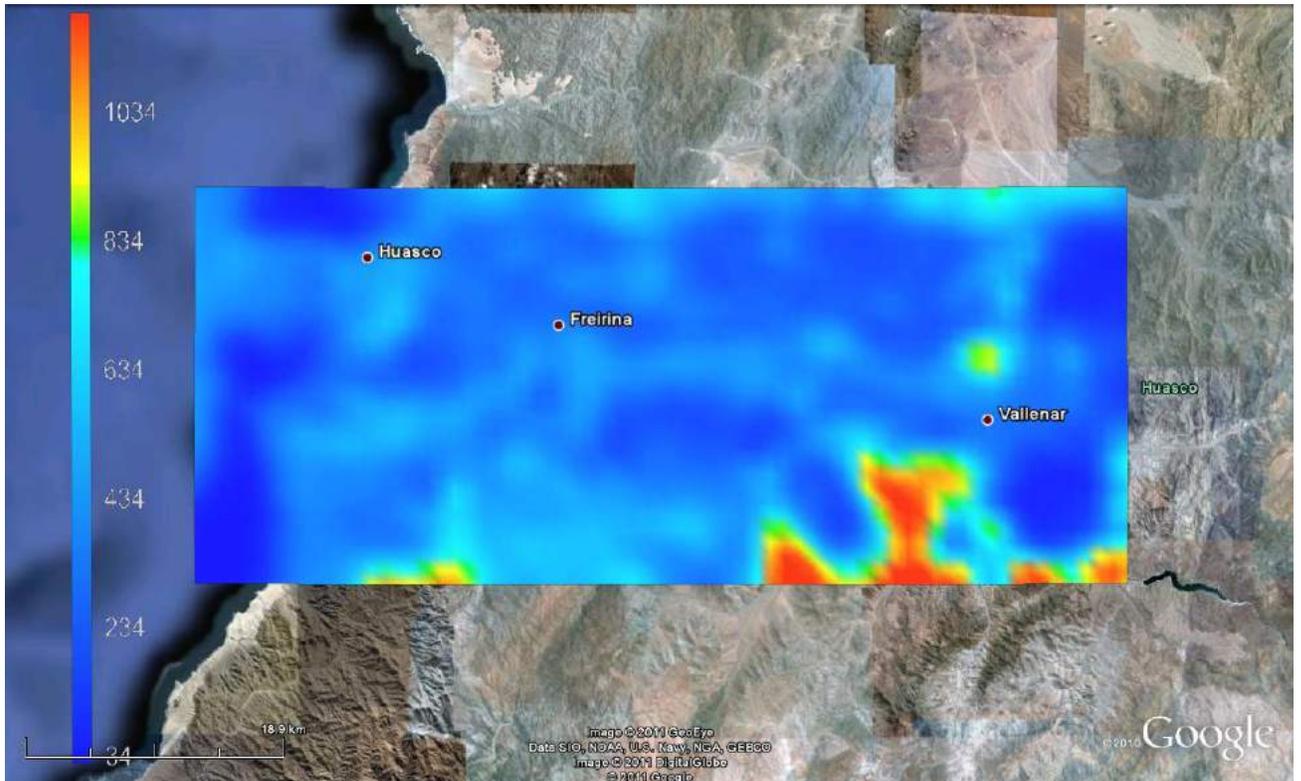


Figura 48. Altura de mezclado en el valle del Huasco (en m sobre el suelo) para el 10 de agosto de 2009 a las 12 y 15 horas locales, respectivamente.

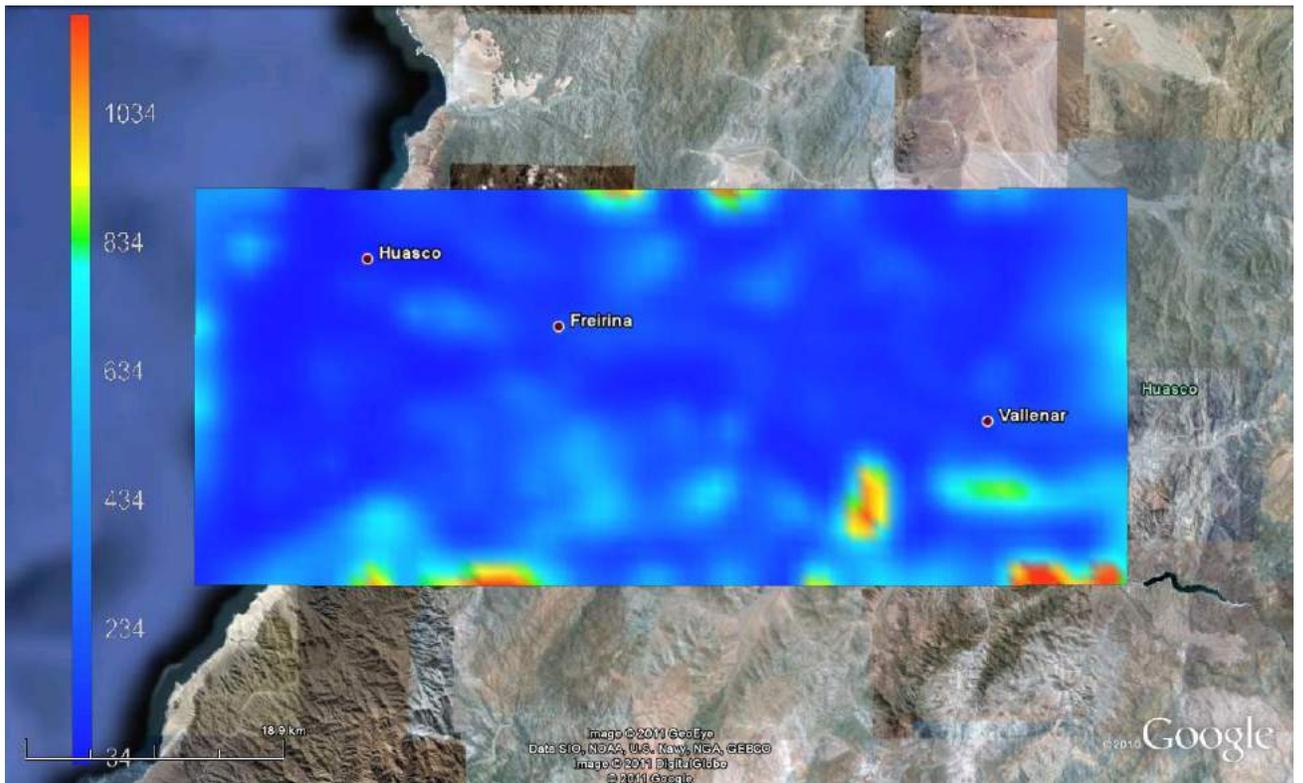
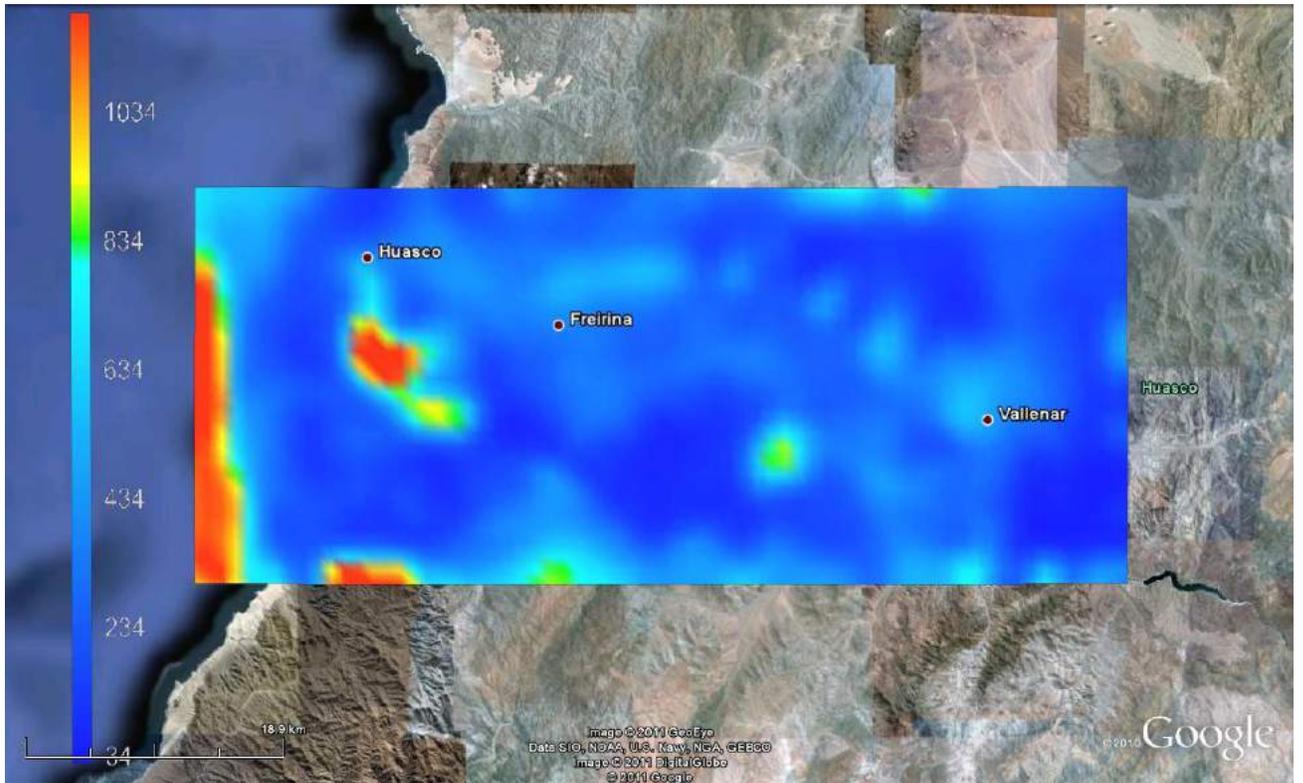


Figura 49. Altura de mezclado en el valle del Huasco (en m sobre el suelo) para el 10 de agosto de 2009 a las 18 y 24 horas locales, respectivamente.

En el mes de marzo los resultados indican un ciclo diario caracterizado por un crecimiento de las alturas de mezclado a lo largo del día, alimentadas por la radiación solar que es reflejada por el suelo y que calienta el aire, alcanzando las alturas de mezclado un máximo a las 18 horas locales aproximadamente. Al atardecer se acaba la radiación incidente y el suelo se empieza a enfriar por radiación, causando una reducción rápida de la altura de mezclado, la que alcanza bajos valores a la medianoche, para repetirse posteriormente el ciclo al día siguiente.

Con respecto a la situación de Agosto, se aprecia que tanto en el día como en la noche hay zonas con alturas de mezclado de hasta 1000 m sobre el suelo; en horas de la noche esas mayores alturas están sobre el océano o bien sobre las mayores elevaciones de terreno que rodean el valle. Debido a esto, se pueden asociar a zonas donde hay mayores velocidades del viento y son, por lo tanto, generadas de manera mecánica.

Sobre el valle mismo, las alturas de mezclado permanecen a elevaciones entre 100 y 700 m, y solamente en las tardes se aprecia un aumento de la altura de mezclado de hasta 800 a 1000 m de elevación en algunas partes del valle; estos máximos por la tarde también se pueden atribuir al calentamiento del aire a través de la radiación solar reflejada por el suelo.

En términos estacionales, el modelo predice que hay mayores alturas de mezclado en los meses cálidos que en invierno, lo cual es consistente con el mecanismo térmico de generación de la altura de mezclado durante el día, asociado a la radiación solar que es reflejada por el suelo y que posteriormente calienta la columna de aire.

ii) Resultados para los campos de vientos.

Las siguientes figuras muestran campos de vientos (a 10 m sobre el suelo) simulados por el modelo WRF para los días 10 de marzo y de agosto, respectivamente.

Notar que en este caso las escalas de la magnitud del viento (0 a 10 m/s) son las mismas para ambos periodos, de manera que esta vez se constata que el modelo WRF predice magnitudes del viento similares en ambos meses.

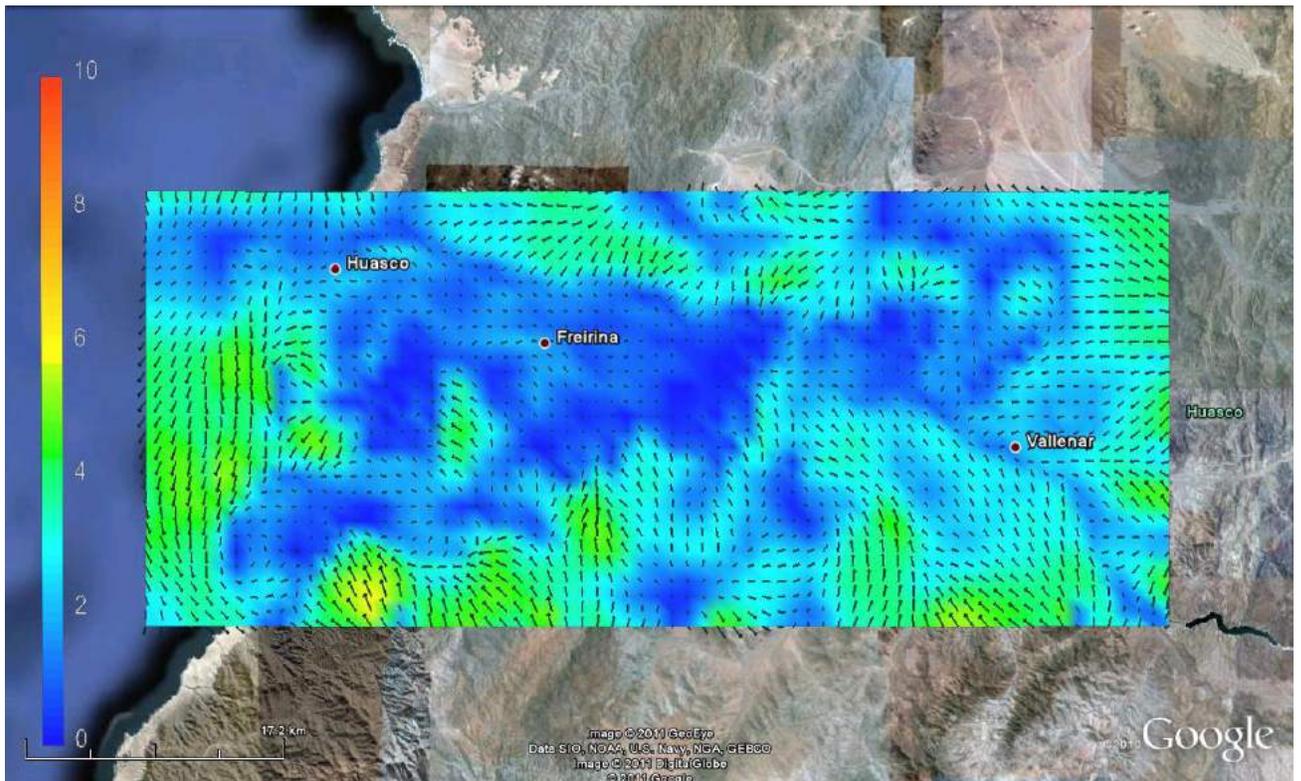
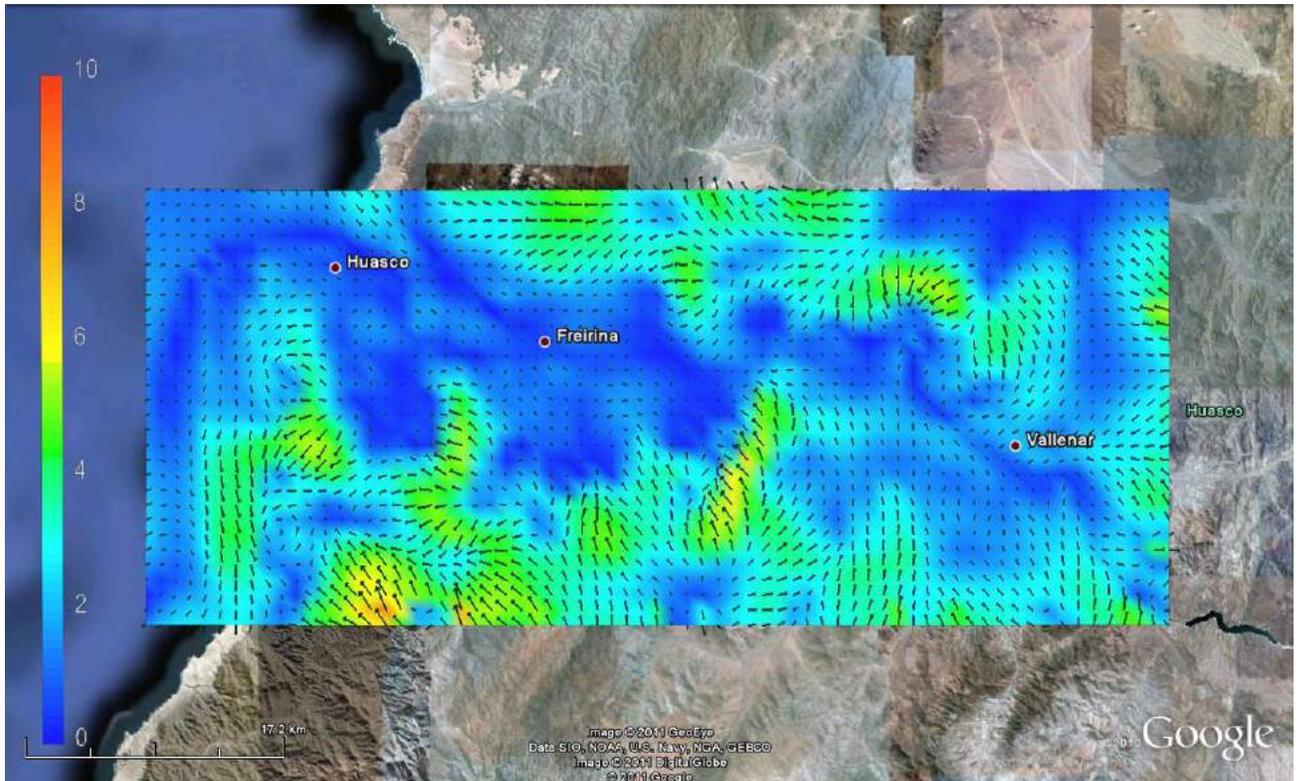


Figura 50. Vientos en el valle del Huasco (en m/s) para el 10 de marzo de 2009 a las 0 y 6 horas locales, respectivamente. Las magnitudes del viento se destacan en escala de colores y tamaño del símbolo.

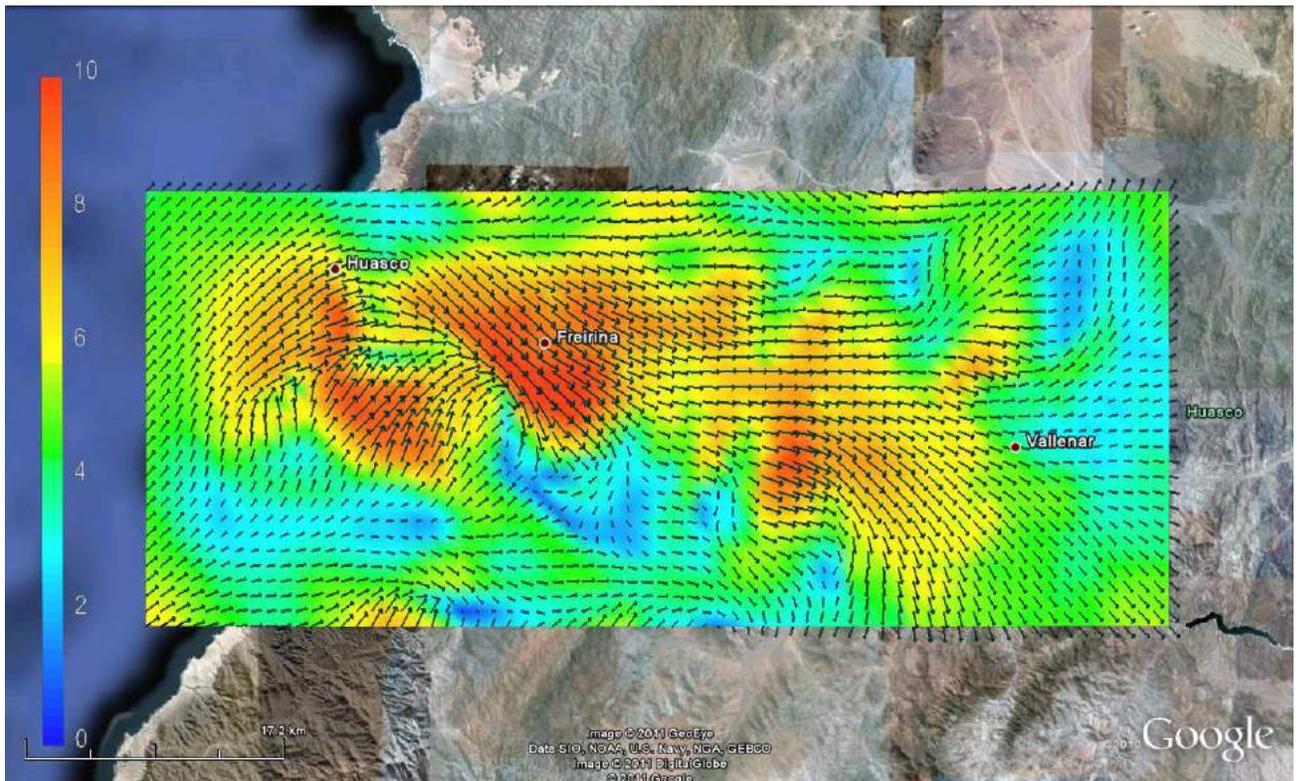
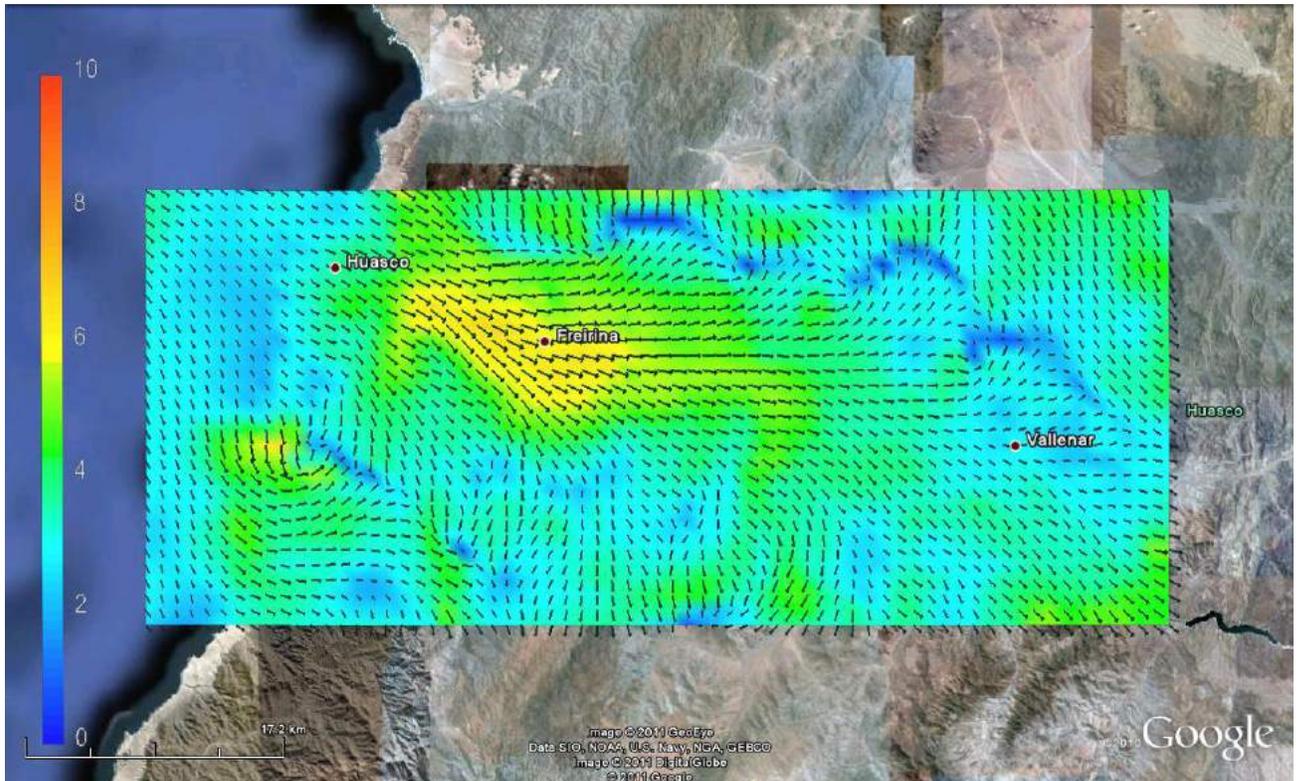


Figura 51. Vientos en el valle del Huasco (en m/s) para el 10 de marzo de 2009 a las 12 y 18 horas locales, respectivamente. Las magnitudes del viento se destacan en escala de colores y tamaño del símbolo.

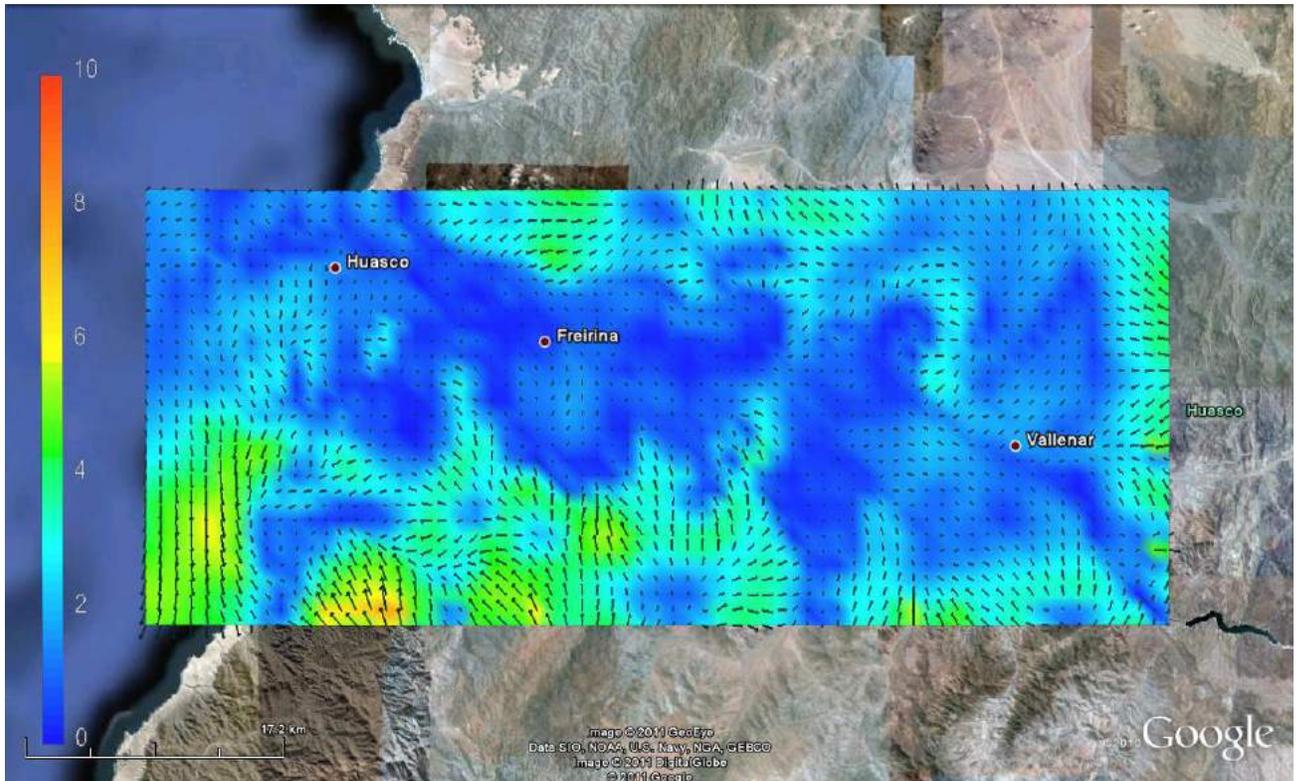


Figura 52. Vientos en el valle del Huasco (en m/s) para el 10 de marzo de 2009 a las 24 horas locales. Las magnitudes del viento se destacan en escala de colores y tamaño del símbolo.

Sin embargo, al compararse las direcciones del viento (marcadas con vectores en las figuras), se aprecian diferencias entre ambos meses:

- a) En condiciones nocturnas, los vientos alcanzan hasta 6 m/s en marzo, mientras que en agosto alcanzan hasta 10 m/s; los mayores valores del viento ocurren en las zonas de mayor elevación, pero en el caso de agosto aparecen altos valores del viento sobre el océano.
- b) También en condiciones nocturnas, el viento en marzo presenta más recirculaciones y no tiene una clara dirección hacia el océano, mientras que en agosto el viento nocturno es más intenso en la parte baja del valle y va claramente desde el valle hacia el océano.
- c) En condiciones diurnas en marzo se desarrolla una brisa mar-valle que ya está desarrollada al mediodía y que se refuerza en la tarde, alcanzándose velocidades de 10 m/s en todo el ancho del valle, desde Huasco hasta Vallenar. Por contraste, en agosto al mediodía la circulación del viento todavía es hacia el océano, y solamente en horas de la tarde se establece un flujo de aire hacia el interior del valle, pero con menores velocidades que en el caso de marzo.

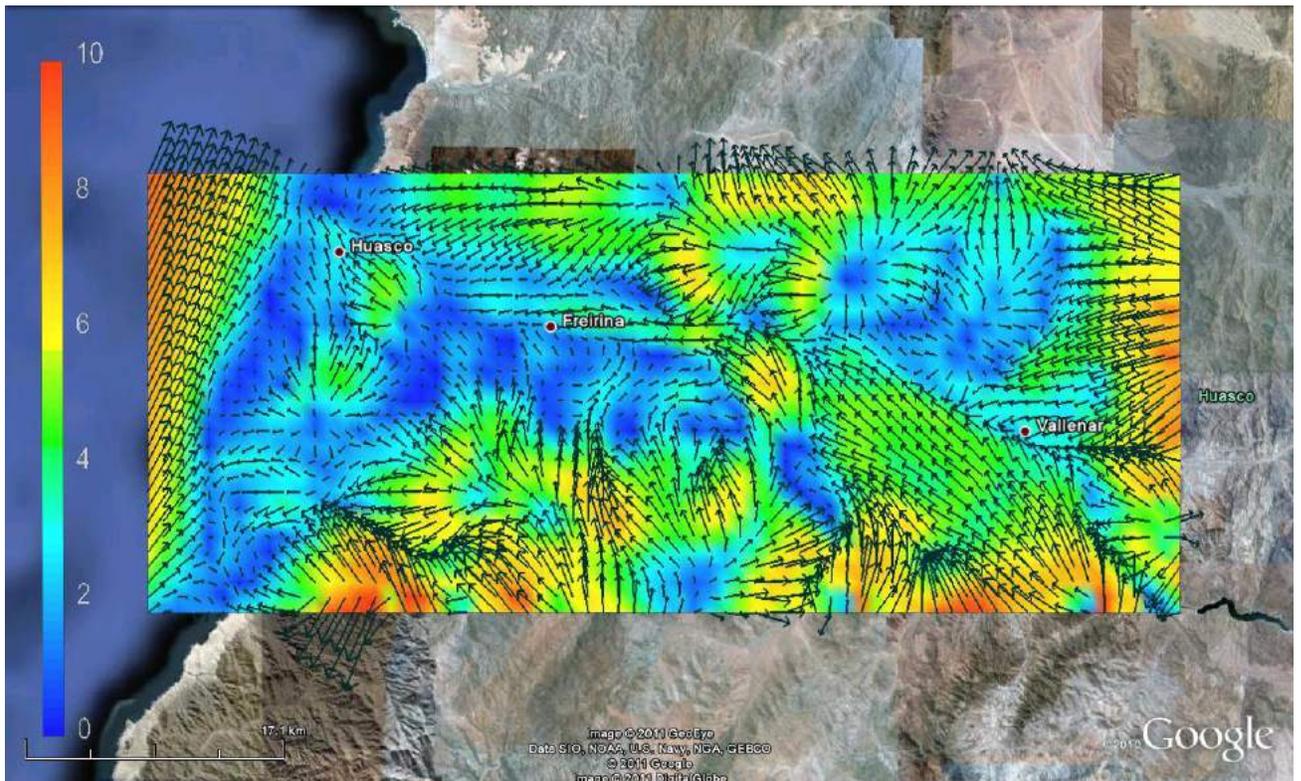
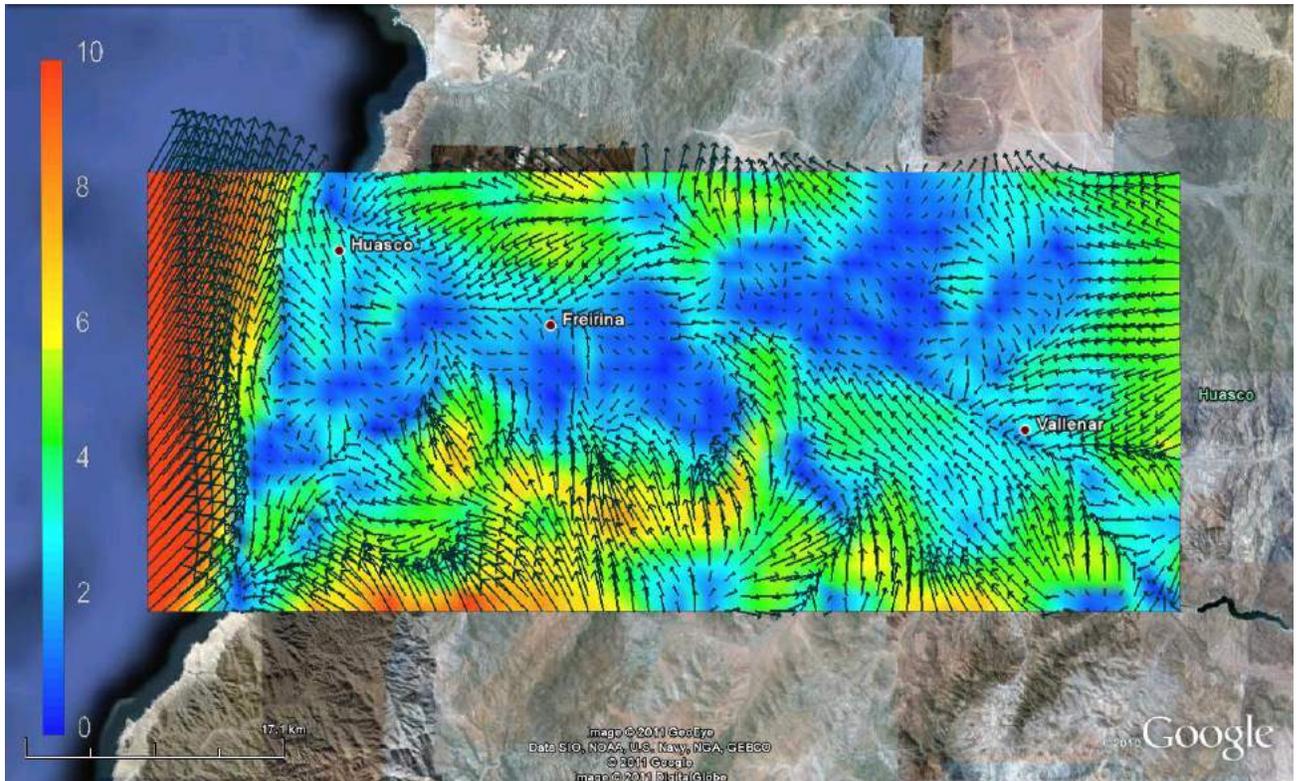


Figura 53. Vientos en el valle del Huasco (en m/s) para el 10 de agosto de 2009 a las 0 y 6 horas locales, respectivamente. Las magnitudes del viento se destacan en escala de colores y tamaño del símbolo.

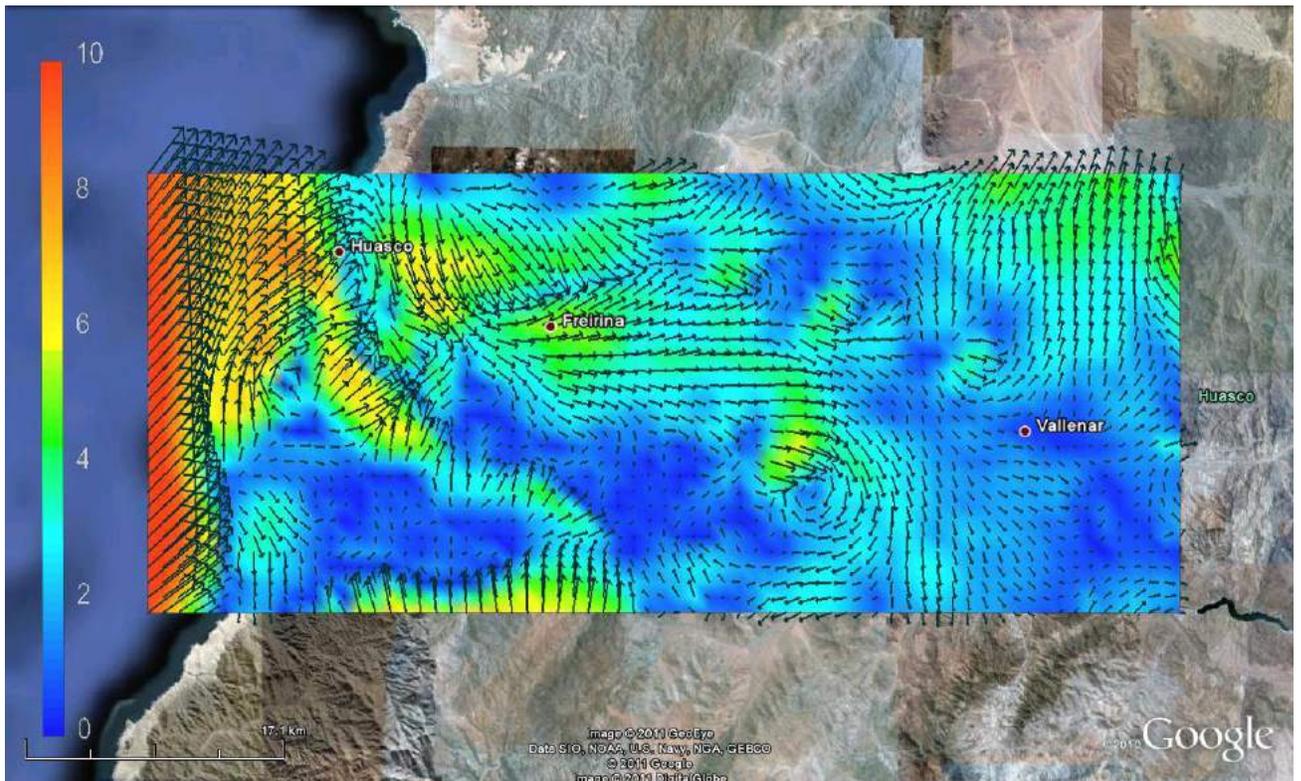
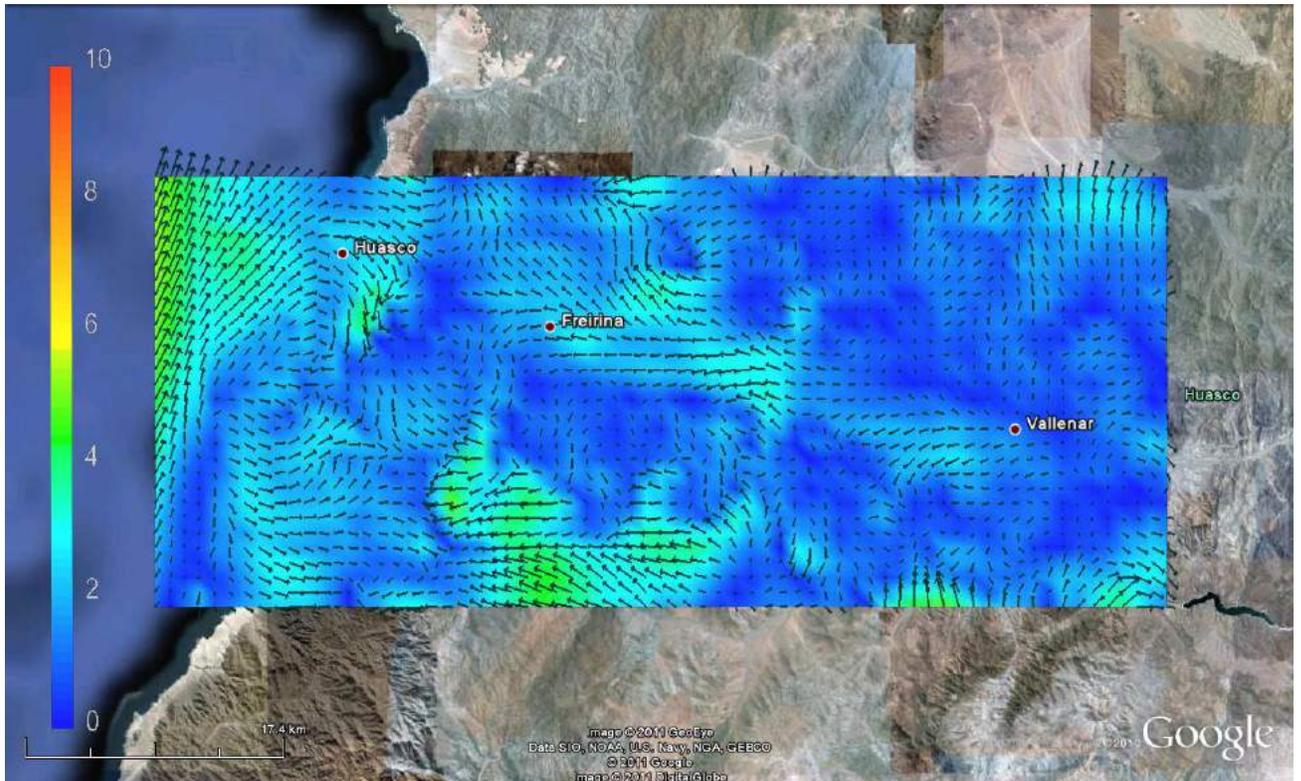


Figura 54. Vientos en el valle del Huasco (en m/s) para el 10 de agosto de 2009 a las 12 y 18 horas locales, respectivamente. Las magnitudes del viento se destacan en escala de colores y tamaño del símbolo.

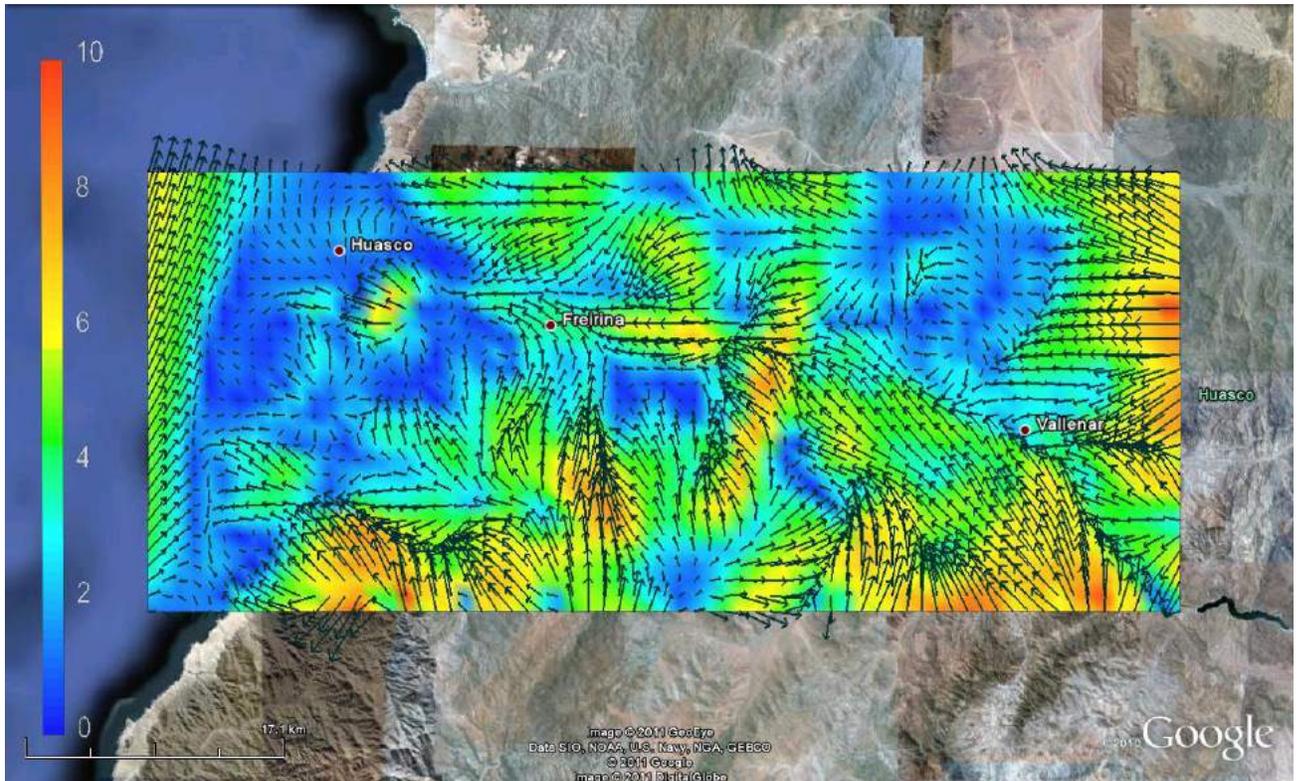


Figura 55. Vientos en el valle del Huasco (en m/s) para el 10 de agosto de 2009 a las 24 horas locales. Las magnitudes del viento se destacan en escala de colores y tamaño del símbolo.

- d) Finalmente, a la medianoche en marzo se aprecian vientos débiles, de magnitud menor a 4 m/s en el valle, con una circulación de drenado de aire desde las alturas hacia el valle y con una circulación hacia el océano poco marcada en la zona del valle cercana al río. En el caso de agosto, las magnitudes del viento son mayores, alcanzándose hasta 10 m/s en algunos lugares, y con una clara circulación valle-océano en gran parte del valle, incluyendo la zona cercana al río.

Luego, es posible constatar que el modelo WRF predice una rosa de los vientos con alta proporción de viento oeste en verano y una proporción mayor de viento este en invierno, lo cual concuerda con las rosas del viento medidas en las estaciones de monitoreo meteorológico superficial distribuidas a lo largo del valle (ver Figura 29 a Figura 32).

Además, este comportamiento de los vientos explica que haya mayor depositación de material particulado en el valle en los meses de verano, en comparación con los meses de invierno, puesto que el viento persistente desde el océano hacia el interior del valle es más intenso en los meses de primavera y verano, facilitando el ingreso de masas de aire desde el puerto y sector industrial hacia el este. Por el contrario, en meses de invierno en condiciones nocturnas y matinales hay una componente de viento que transporta masas de aire hacia el océano, retardándose así el transporte neto de contaminantes hacia el interior del valle.

iii) Relación entre meteorología y deposición de material particulado.

La siguiente figura, derivadas de los datos de la red de monitoreo del SAG en seis sitios muestran que se constata una estacionalidad en las mediciones de material particulado total sedimentable (MPS) con valores claramente mínimos en los meses de invierno²⁴.

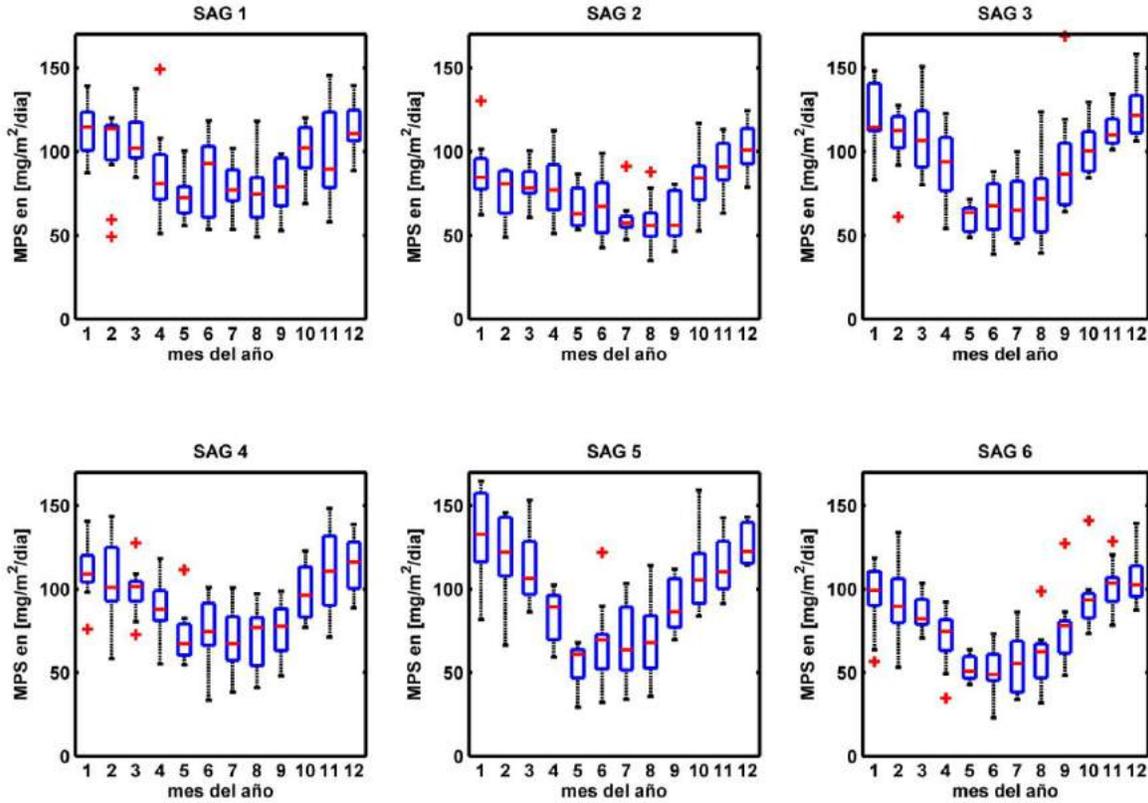


Figura 56. Estacionalidad de la deposición total de material particulado medido en la red de monitoreo del SAG, periodo 2000 a 2010.

De la misma forma, la siguiente figura muestra el hierro sedimentable medido en la red de monitoreo del SAG para el mismo periodo de once años de datos (2000 – 2010). Se constata que también existe una marcada estacionalidad en la magnitud del hierro sedimentable que se mide en la red del SAG.

Notar que hay numerosos meses en los cuales hay valores de hierro muy por debajo de la tendencia promedio de los datos, lo que indica eventos en que hubo deposición de material particulado con bajo contenido de hierro. Asimismo, hay varios meses en los

²⁴ Para mayor claridad, en la gráfica se han omitido varios valores extremos que ocurren en meses de primavera y verano.

cuales el hierro depositado supera la tendencia media de los datos, y que corresponden a situaciones con aportes relevantes de hierro proveniente de las emisiones del sector industrial de Huasco, o bien de polvo erosionado y transportado hacia el interior del valle por el viento.

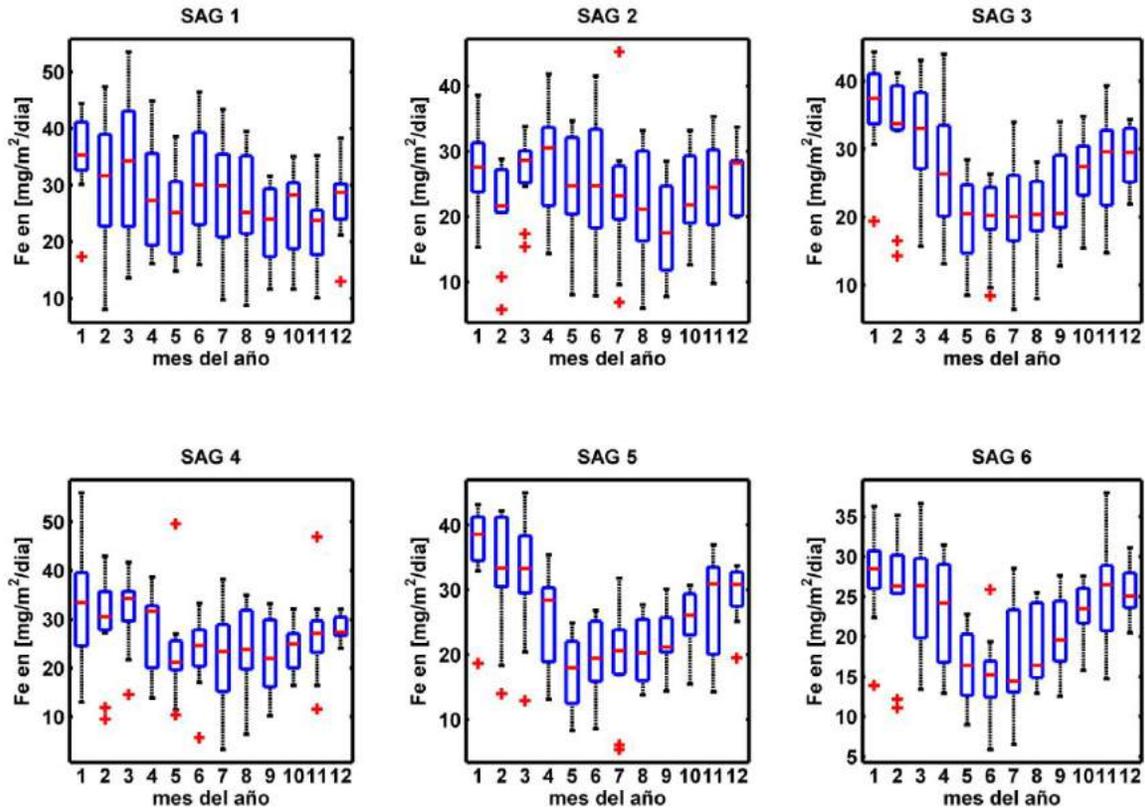


Figura 57. Estacionalidad de la depositación de hierro en el material particulado medido en la red de monitoreo del SAG, periodo 2000 a 2010.

1.g) Monitoreo complementario de MPS y hierro en el MPS, estimación de línea base.

Las siguientes figuras muestran las ubicaciones de los nueve monitores de MPS desplegados en el valle del Huasco, la mayoría de los cuales se encuentran en la zona de Huasco Bajo, pero alcanzan hasta la zona de Vallenar (sitio MPS9).



Figura 58. Detalle de los monitores de MPS instalados en la zona Oeste del valle.



Figura 59. Detalle de los monitores de MPS instalados en la zona Este del valle.

La siguiente Tabla presenta los valores de depositación total de MPS, en $[\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}]$, para el muestreo en los puntos de monitoreo de MPS, para los meses de Julio 2011 a Diciembre 2012.

Tabla 24. Valores del monitoreo de material particulado sedimentable total (MPS), en $[\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}]$.

Sitios	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
MPS1	43.3	32.0	30.5	50.1	46.4	(e)
MPS2	97.4	73.5	68.1	(a)	(a)	(a)
MPS3	34.2	36.8	46.1	46.7	42.9 ^(c)	56.5
MPS4	22.3	36.8 ^(b)	35.7	52.1	46.6	66.1
MPS5	70.5	34.2	40.5	99.5	153.4	126.6
MPS6	42.5	31.1	33.8	41.3	40.3 ^(d)	60.7
MPS7	38.7	26.2	37.5	43.3	45.5	(e)
MPS8	8.0	11.6	30.2	34.6	42.4	52.7
MPS9	26.3	13.1	32.0	16.1	17.3	35.7

Notas:

(a): Vaso colector fue roto, posteriormente fue robado y en el último mes no se puso colector.

(b): vaso contenía aceitunas, las que se removieron para el pesaje del MPS.

(c): presencia de hormigas en el frasco colector.

(d): indicios de caída del frasco colector.

(e): monitor y vaso colector en el suelo, pérdida de la muestra.

Se aprecia que hay una variación espacial de la depositación total de MPS, la que va disminuyendo a medida que el sitio de monitoreo se desplaza hacia el este, puesto que los menores valores medidos ocurren en los sitios MPS8 y MPS9. Los mayores valores de depositación se han medido en el sitio MPS5 (Fundo Montt), aspecto que se comenta más adelante en este Informe. Entre julio y septiembre se constatan los mínimos valores medidos en cada sitio, lo que concuerda con la estacionalidad histórica medida en la red SAG (Figura 56).

Las siguientes Tablas entregan las concentraciones de elementos en las muestras de MPS recolectadas en los nueve sitios de la red de monitoreo desplegada en este proyecto, expresados como % del total de material particulado sedimentable medido en cada sitio.

Se puede apreciar que, a medida que aumenta la distancia a la costa, disminuye el % de aerosol marino (NaCl) en el MPS, y disminuye drásticamente el % de Fe en el MPS, éste último es un indicador del aporte del complejo industrial al MPS, lo que nos está indicando que hay variación espacial de impactos del complejo industrial, los que disminuyen hacia el Este. El porcentaje de hierro en la zona de Huasco Bajo varía entre el 10 y 30 % en peso del MPS, lo que está en concordancia con los datos históricos de la red de monitoreo del SAG (Figura 57). En los sitios cercanos a Freirina y Vallenar el porcentaje de hierro está bajo el 5%, lo que se explica por la distancia a la fuente emisora.

Tabla 25. Concentraciones de elementos en el material particulado sedimentable total (MPS) para el mes de Julio 2011, en %.

Sitio	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
MPS1	15.82	39.91	2.30	0.73	1.67	7.55		5.98	2.77	0.95	6.31	0.16
MPS2	37.73	12.96	1.78	0.34	0.51	2.59		0.85	7.56	0.57	1.45	
MPS3	20.17	36.76	5.05	1.16	0.96	6.92	0.04	3.35	13.95	1.27	2.23	0.06
MPS4	12.44	39.46	3.32	0.59	1.59	9.05	0.31	6.41	8.75	1.98	4.93	0.21
MPS5	8.05	37.06	3.93	1.11	3.02	10.76	0.32	1.74	9.62	1.38	1.47	
MPS7	50.37	34.61	2.39	0.45	0.53	1.45		2.79	2.39	0.39	1.54	
MPS8	12.84	44.87	2.13	1.49	1.87	7.87	0.20	4.16	2.54	1.09	3.58	
MPS9	24.69	41.55	0.94	0.90	3.54	11.65	0.10	0.39	0.94	1.51	0.77	0.22

V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Mo	Sn	Sb	Ba	Pb
0.06		0.29	14.19			0.30	0.30		0.43	0.79		0.79
	0.19	0.23	31.42	0.50			2.40	1.22				0.51
0.06	0.07		6.32		0.09	0.14		0.44	0.11	0.16	0.16	1.49
0.37			10.29	0.18		0.28						2.32
0.22			20.11						0.59	0.60		1.80
	0.18		2.37		0.12				0.31			0.37
		0.23	15.18			0.42	2.48		0.62		0.28	
			11.99			0.64		0.57				0.31

Tabla 26. Concentraciones de elementos en el material particulado sedimentable total (MPS) para el mes de Agosto 2011, en %.

Sitio	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
MPS1	20.19	36.59	3.91	1.46	1.68	4.46	0.10	1.00	6.70	0.77	1.38	0.13
MPS2	24.13	33.75	7.38	1.19	1.16	3.13	0.03	1.31	7.07	0.40	2.07	0.06
MPS3	32.72	29.33	4.85	1.26	1.72	3.92		0.54	4.82	0.37	0.81	0.05
MPS4	33.67	40.08	2.16	1.49	1.86	4.78	0.31	0.77	3.08	1.86	1.37	0.44
MPS5	21.77	40.85	3.64	1.08	1.47	4.39	0.09	1.43	6.23	0.85	2.15	0.13
MPS7	31.29	29.14	7.95	1.20	0.64	2.88		0.42	7.46	0.39	0.97	0.05
MPS8	10.06	44.61	3.93	1.43	0.69	4.90	0.51	0.68	3.62	0.72	13.83	0.10
MPS9	40.17	42.04	1.30	0.62	0.96	6.13	0.29	0.49	1.16	0.84	1.01	0.09

V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Mo	Sn	Sb	Ba	Pb
0.06		0.06	20.46	0.04		0.04	0.53	0.25	0.19	0.28		0.60
0.04		0.04	16.72	0.05		0.06		0.43	0.15	0.11		0.74
0.07		0.07	17.96				0.63	0.24	0.10		0.08	0.46
0.13	0.06	0.09	7.27	0.13	0.03		0.41	0.42	0.72	0.07	0.26	0.39
0.07		0.07	13.28	16.38	0.15	0.12	0.57		0.35	0.33		0.65
0.05			15.90				0.45	0.46			0.09	0.66
		0.08	12.71			0.09	0.80			0.51	0.26	0.47
			3.66				0.96				0.07	0.21

Tabla 27. Concentraciones de elementos en el material particulado sedimentable total (MPS) para el mes de Septiembre 2011, en %.

Sitio	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
MPS1		36.45	1.53	1.28	1.71	5.73	0.44	2.54	11.92	1.45	3.96	0.27
MPS2		38.74	1.05	0.92	2.06	6.82	0.22	4.52	8.03	1.97	6.57	0.20
MPS3	0.63	39.07	0.68	0.93	0.88	4.02		6.95	5.33	1.02	9.68	0.44
MPS4	4.15	43.25	2.65	1.37	2.45	9.50	0.16	1.62	9.93	3.94	2.05	0.12
MPS5		46.98	2.00	1.39	1.00	3.19	0.85	3.60	12.25	2.42	11.26	0.24
MPS7	13.68	40.56	3.78	1.02	0.82	2.19	0.49	2.24	21.69	1.15	4.64	0.38
MPS8		42.15	0.81	1.10	1.97	19.01	0.37	1.75	5.30	1.56	2.89	0.29
MPS9	8.67	45.39	2.08	1.41	1.23	5.09	0.54	2.72	14.78	2.22	3.45	0.39

V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Mo	Sn	Sb	Ba	Pb
		0.26	31.21					0.40				1.21
			26.93			0.50					0.35	1.55
			27.47			0.44	2.30		0.52	0.51		2.07
0.10		0.15	16.93	0.16	0.16	0.14	0.41	1.31	0.44	0.40		1.01
0.09		0.31	13.74			0.61			0.89	0.38		1.76
0.08	0.23	0.08	6.12			0.14		1.02	0.58	0.88		1.34
0.20	0.12	0.18	26.27	18.77		0.19						0.54
0.12		0.12	9.18		0.19	0.46		0.89			0.22	1.77

Tabla 28. Concentraciones de elementos en el material particulado sedimentable total (MPS) para el mes de Octubre 2011, en %.

Sitio	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
MPS1	14.49	44.43	2.30	1.34	1.78	5.15	0.20	2.45	12.68	1.59	4.13	0.13
MPS2												
MPS3	17.28	39.56	5.25	1.46	1.74	5.79	0.20	1.61	14.27	1.08	2.16	0.18
MPS4	17.14	39.96	3.43	1.48	1.65	7.02	0.08	1.96	5.32	0.78	2.55	0.12
MPS5	4.78	53.72	2.23	1.40	3.37	13.62	0.11	1.74	3.35	1.47	5.31	0.52
MPS7	32.39	36.30	4.46	1.08	1.06	2.89	0.16	1.06	8.80	0.77	1.37	0.11
MPS8	16.62	47.95	1.38	1.12	2.51	8.06	0.25	1.57	4.87	1.35	2.45	0.29
MPS9	23.07	48.55	1.51	1.37		2.77	0.90	0.93	4.83	3.18	9.54	

V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Mo	Sn	Sb	Ba	Pb
0.08	0.08		7.38			0.22		0.83		0.55		1.50
			8.36					1.09	0.15			1.21
0.11		0.11	17.31			0.07	1.14	0.23	0.23			0.64
0.08		0.13	6.72	0.08		0.10	2.11		0.34	0.38	0.21	0.74
0.10			8.10					0.60	0.34	0.27	0.09	0.65
		0.23	10.79								0.23	0.62
0.20			0.99		0.71	0.18	0.91		0.65			0.71

Tabla 29. Concentraciones de elementos en el material particulado sedimentable total (MPS) para el mes de Noviembre 2011, en %.

Sitio	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
MPS1	12.17	42.26	2.46	1.35	2.51	7.42	0.20	2.34	7.66	1.47	4.08	0.23
MPS2												
MPS3	7.60	42.89	2.29	1.51	2.44	7.64	0.14	2.05	6.89	1.30	6.07	0.27
MPS4	23.09	42.87	2.27	1.30	1.19	5.13	0.23	1.81	6.62	1.21	2.38	0.10
MPS5	6.01	50.82	2.04	1.01	3.69	14.39	0.12	2.09	4.10	2.92	5.78	0.31
MPS7	25.42	33.13	6.00	0.64	0.98	3.11		1.15	20.02	1.07	2.97	0.11
MPS8	15.88	45.40	1.20	1.27	3.02	9.63	0.38	1.56	3.85	1.53	3.76	0.24
MPS9	7.30	46.57	2.21	2.29	2.58	9.36	0.21	2.13	6.13	1.55	4.29	0.30

V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Mo	Sn	Sb	Ba	Pb
		0.14	14.51							0.33	0.29	1.10
0.07			17.01					0.51	0.59	0.49		0.83
0.13		0.06	10.83		0.16	0.16			0.25	0.15		0.82
		0.14	5.85		0.21				0.26	0.35		0.98
		0.10	4.36	0.13	0.13			0.95		0.59		1.18
0.08		0.11	11.21		0.12	0.12			0.37		0.23	0.64
0.09		0.26	13.49	0.14		0.28			0.40	0.32		0.74

Tabla 30. Concentraciones de elementos en el material particulado sedimentable total (MPS) para el mes de Diciembre 2011, en %.

Sitio	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
MPS1												
MPS2												
MPS3	27.60	40.75	2.86	1.48	1.91	6.57	0.09	0.74	4.41	0.61	1.63	0.11
MPS4	29.93	35.76	2.66	1.21	1.30	4.03	0.14	0.90	3.09	0.70	1.76	0.12
MPS5	12.53	45.49	4.26	2.16	2.34	9.33	0.37	2.62	4.46	1.40	6.84	0.16
MPS7	9.83	46.90	1.90	1.25	2.12	8.08	0.14	1.63	4.90	1.28	3.31	0.28
MPS8	8.70	45.74	1.70	1.52	2.49	9.58	0.17	1.51	3.75	1.08	3.72	0.22
MPS9	13.29	49.36	1.24	1.55	2.62	8.10	0.17	1.46	5.14	1.16	2.92	0.15

V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Mo	Sn	Sb	Ba	Pb
0.11			10.46					0.34		0.19	0.19	0.42
0.06		0.07	17.32		0.11	0.09		0.44	0.23	0.24		0.36
	0.05	0.11	6.67						0.36	0.25		0.79
0.10		0.08	16.58			0.15		0.62	0.34	0.28		0.70
	0.18		18.98	0.14					0.53			0.86
0.08	0.14	0.18	11.60						0.17	0.32	0.16	0.74

La inspección de los resultados de la composición elemental del material particulado sedimentable (MPS) nos permite evaluar la capacidad de monitoreo de elementos traza emitidos por actividades antropogénicas, especialmente aquellas provenientes del complejo industrial de Huasco. Lo que se puede concluir es lo siguiente:

- a) Las concentraciones de carbono y de oxígeno no aportan mucha información ya que tienen interferencia por material orgánico (ejemplo: restos de vegetación recolectados en el monitor), por lo que no son específicos a las emisiones antropogénicas.
- b) Las concentraciones de Al, Ca y Si no muestran una tendencia clara con la distancia al complejo industrial de Huasco. Hay veces en que los mayores porcentajes se dan en el sitio MPS9, cerca de Vallenar, pero la mayor parte del tiempo se presentan en el sitio MPS5 (fundo Montt). Esto indica que estos elementos están altamente influenciados por actividades agrícolas locales donde hay mucha suspensión de polvo superficial, el que va a parar en el monitor respectivo.
- c) El cloro es un elemento en alta proporción en el MPS, y muestra un claro gradiente espacial, disminuyendo siempre hacia el interior del valle, lo que muestra que la entrada de aerosol marino en el valle es progresivamente menor hacia Vallenar. Lo mismo ocurre en el caso del sodio²⁵.
- d) El azufre, que podría ser un trazador de las emisiones de SO₂ del complejo industrial, ya que este gas se oxida a sulfato partícula, no presenta una tendencia clara con la distancia a la costa. Posiblemente esto se deba a que se está muestreando las partículas totales y no exclusivamente el material particulado fino MP_{2.5} (de tamaño menor a 2.5 micras) que es donde se concentra mayoritariamente el sulfato en fase partícula.
- e) El magnesio no muestra mucha correlación con el cloro ni con el sodio, indicando que proviene mayoritariamente del suelo y no del aerosol marino.
- f) El bromo tampoco muestra una asociación tan clara con el cloro, sin embargo es más abundante que el plomo, por lo que aparece como proveniente principalmente del aerosol marino y después del transporte.
- g) Para los restantes elementos de origen mayoritariamente antropogénico (Cr, Mn, Zn, Ni, As, Mo, Sn, Sb, Ba y Pb) no se aprecia un gradiente espacial importante, salvo en el caso del níquel que presenta un par de valores elevados en agosto y septiembre, aunque en sitios distintos. La mayoría de estos metales pesados estarían asociados a las emisiones del transporte.

A continuación se muestran las concentraciones de varios elementos medidos en el MPS, pero esta vez en magnitudes absolutas de [mg/(m²·día)], y se comenta su comportamiento con respecto a la ubicación de las principales fuentes emisoras en Huasco.

²⁵ Las mediciones de concentraciones de iones en agua de lluvia han entregado concentraciones de sodio y cloro con una proporción muy similar a la del agua de mar (ver reporte actividades del objetivo N°2).

La Figura 60 presenta los valores de depositación total de MPS, obtenidos en los nueve puntos de muestreo y su comparación con los resultados de la red SAG. Se aprecia que la variabilidad espacial de los datos de MPS es alta, tanto en la red instalada en este proyecto como en la red existente del SAG.

La estacionalidad de los datos es similar en ambas redes de monitoreo, con valores mínimos en periodo de invierno y valores máximos en primavera y verano. Se aprecia que hay un variación espacial de la depositación total de MPS, la que va disminuyendo a medida que el sitio de monitoreo se desplaza hacia el este (de Huasco hacia Vallenar).

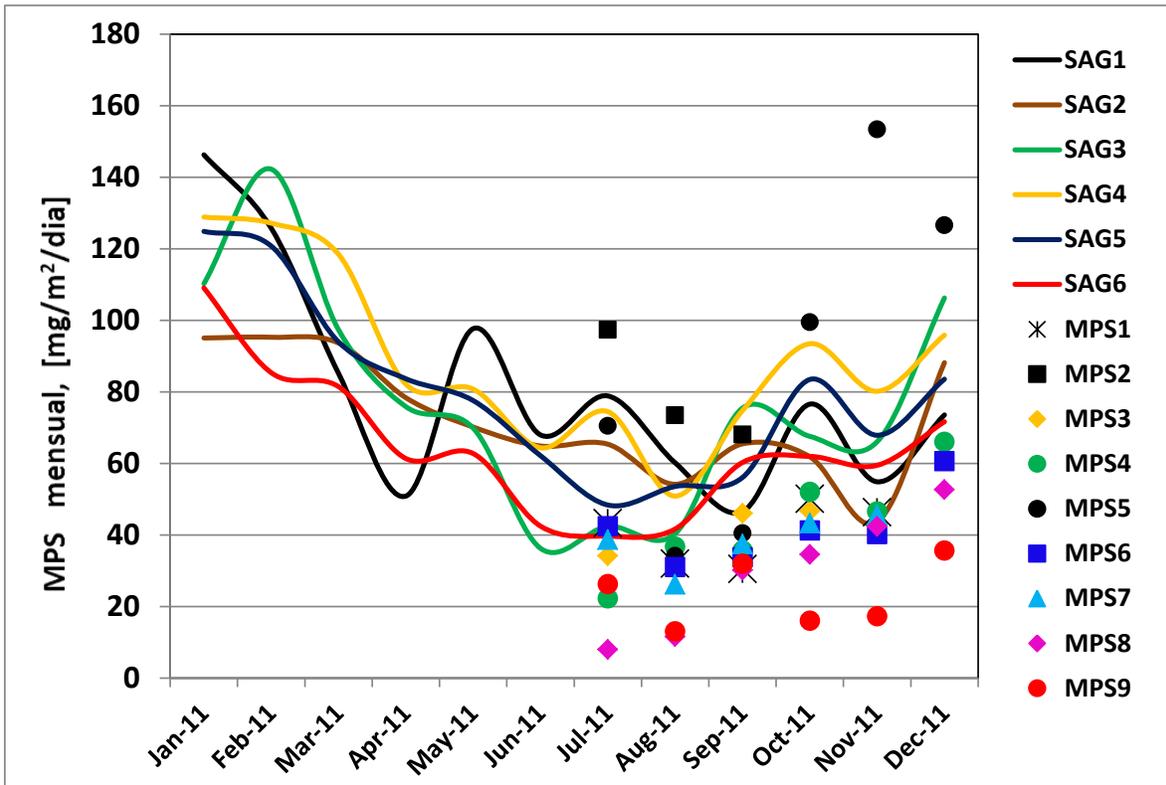


Figura 60. Monitoreo de MPS en la red de SAG y en los 9 monitores utilizados en el presente estudio.

También se constata que la red de nueve puntos de monitoreo usada en el presente estudio tiene mayor variabilidad de depositación a lo largo del valle, ya que incluye estaciones más cerca de Vallenar como MPS8 y MPS9. Además, incluso considerando solamente las estaciones MPS1 a MPS6, ellas presentan más variabilidad que las seis estaciones del SAG que están en la misma zona. Por ejemplo, el sitio MPS5 (fundo Montt) es el que presenta las mayores cantidades de MPS en toda la red; como ya se ha comentado, ese comportamiento se debe principalmente a actividades locales de preparación de terrenos, lo que se confirma más adelante en esta Sección del Informe Final.

La Figura 61 muestra el monitoreo de hierro en el material particulado sedimentable, tanto el medido en la red del SAG como el medido en los nueve puntos de monitoreo del presente estudio. Los valores indican nuevamente que hay mayor variabilidad en los datos medidos en la red de nueve sitios del presente estudio, comparada con la variabilidad de las seis estaciones del SAG. En particular el sitio MPS2 (predio de Homero Callejas) muestra los mayores valores de hierro depositados en ambas redes, en los meses en que hubo mediciones en dicho punto²⁶. Además, en promedio nuestros puntos de monitoreo miden menos depositación de hierro que la red del SAG.

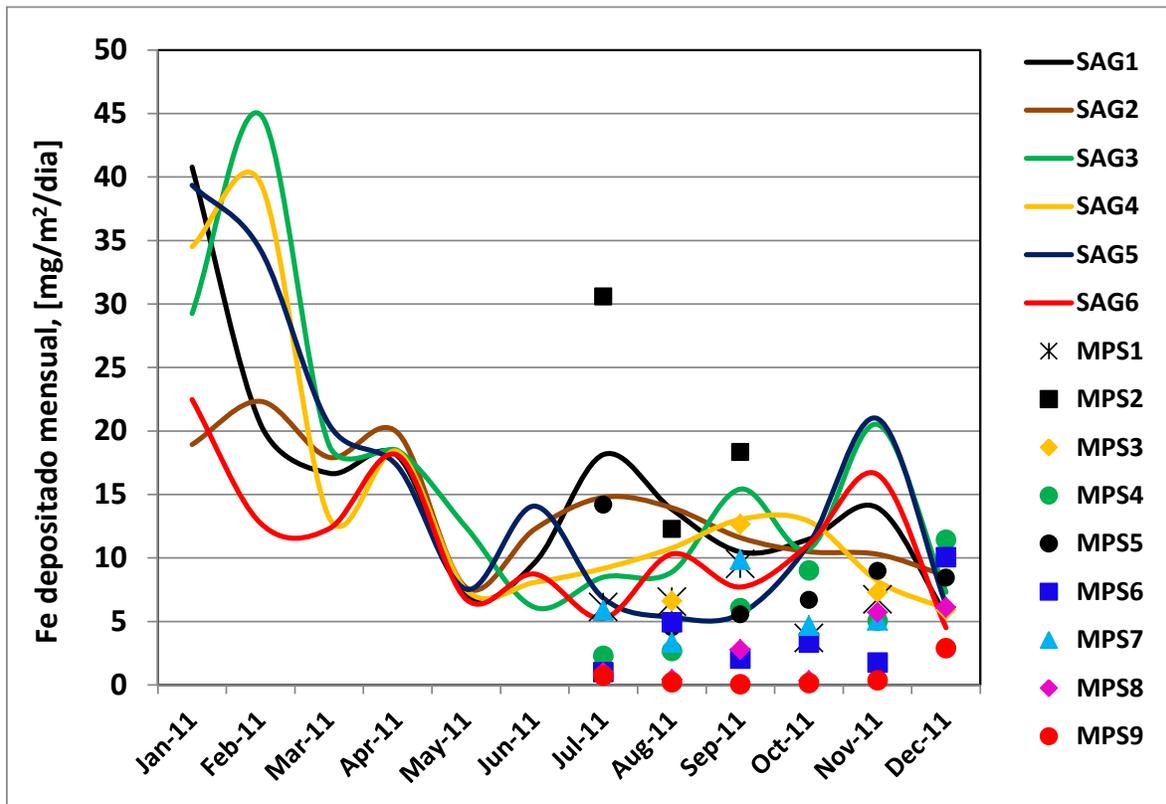


Figura 61. Monitoreo de Fe en el MPS, para la red SAG y para los nueve sitios usados en el presente estudio.

La Figura 62 muestra la cantidad de cloro en el material particulado depositado. Este elemento es un trazador de masas de aire marino que ingresan al valle. La Figura 62 muestra que hay una gran variabilidad mes a mes y sitio a sitio a la entrada del valle (sitios MPS1 a MPS6); en los sitios más al interior del valle (MPS8 y MPS9) los valores son menores (pero no son cero), indicando una menor frecuencia de eventos de llegada de aire costero a dichos receptores. Las estaciones con mayores concentraciones de cloro

²⁶ Hay que tener presente que el cuarto mes el vaso fue roto y el quinto mes fue robado, por lo que esas dos muestras se perdieron, lo que hizo que no pudiéramos una muestra allí en el último mes de la campaña.

corresponden a MPS2, MPS3, MPS5 y MPS6, es decir, receptores más cercanos al borde costero.

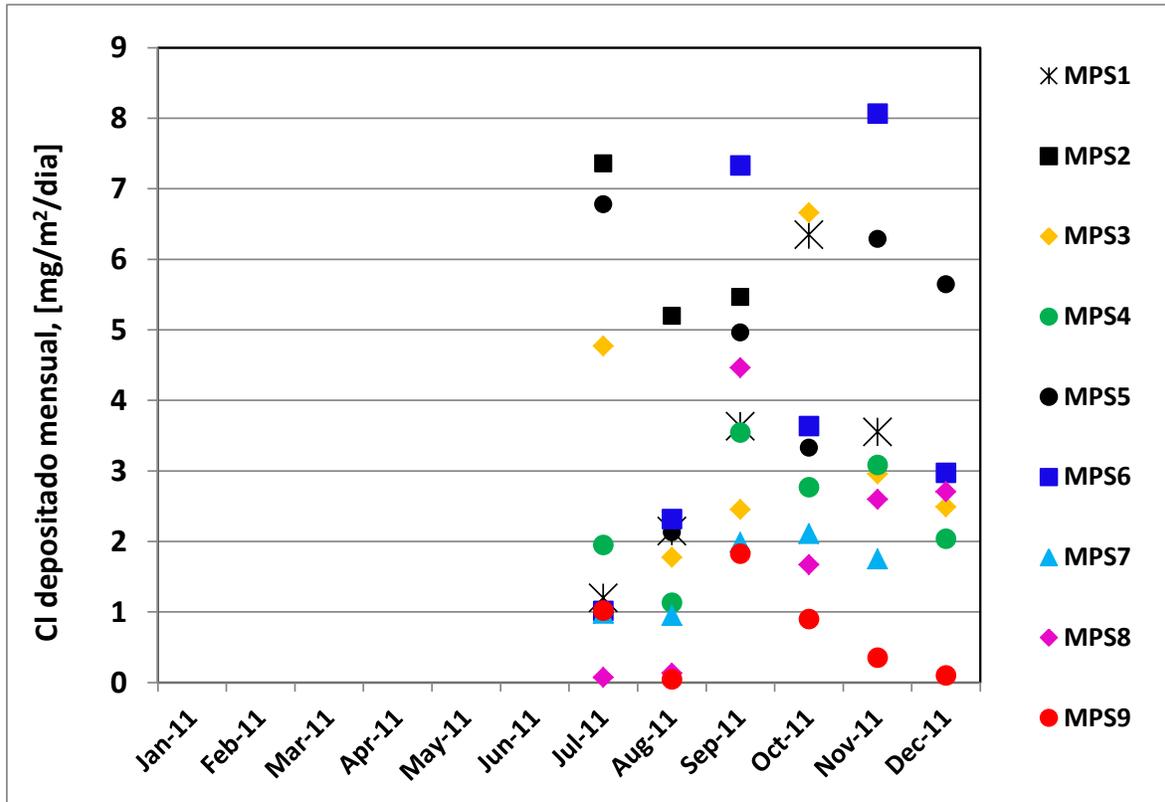


Figura 62. Monitoreo de Cl en el MPS en los nueve sitios usados en el presente estudio.

Otro elemento abundante en el material particulado sedimentable es el silicio, que es un componente mayoritario del suelo. La Figura 63 muestra los valores medidos de este elemento en los nueve receptores desplegados en el valle. Se aprecia que los altos valores de Si son coincidentes con los altos valores de MPS medidos en el receptor MPS5 (Fundo Montt), lo cual nos indica un efecto de actividades de manejo agrícola con el consecuente levantamiento adicional de polvo del suelo. Esos altos valores no se dan en los receptores cercanos a dicho sitio (MPS3, MPS4), lo cual nos indica claramente que se trata de un efecto muy local²⁷. Para el calcio (otro elemento abundante en el suelo) se encuentra una figura muy similar a la del silicio, por lo cual no se presenta aquí.

Si asumimos que todo el azufre en fase partícula sólida corresponde a sulfato, entonces podemos construir la Figura 64, donde se aprecia que en valor absoluto, el sulfato se deposita preferentemente a la entrada del valle, en los receptores MPS1, MPS2, MPS3 y MPS5. Sin embargo, también aparecen altos valores en el receptor MPS9, cerca de Vallenar. Este aspecto merece ser estudiado con mayor profundidad, lo que se indica más abajo en este Informe Final (actividad 4.a), ya que el sulfato es un indicador de las

²⁷ Y difícil de representar en el modelo de dispersión, ya que se trata de una emisión que no es continua sino intermitente.

emisiones de SO_2 del complejo industrial, las que se van oxidando a sulfato en la atmósfera, por lo que se trata de un indicador claro del impacto del complejo en la calidad del aire en el valle, sobre todo en el largo plazo ya que es parte del $\text{MP}_{2.5}$.

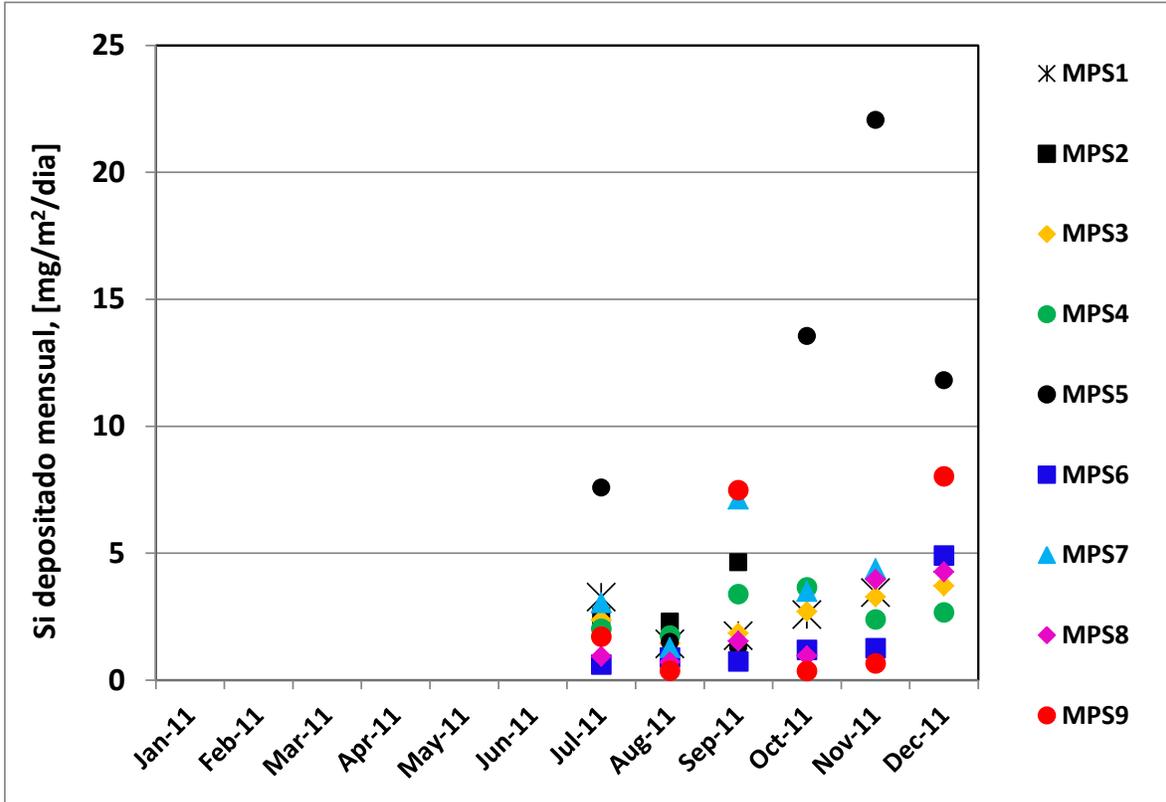


Figura 63. Monitoreo de Si en el MPS en los nueve sitios usados en el presente estudio.

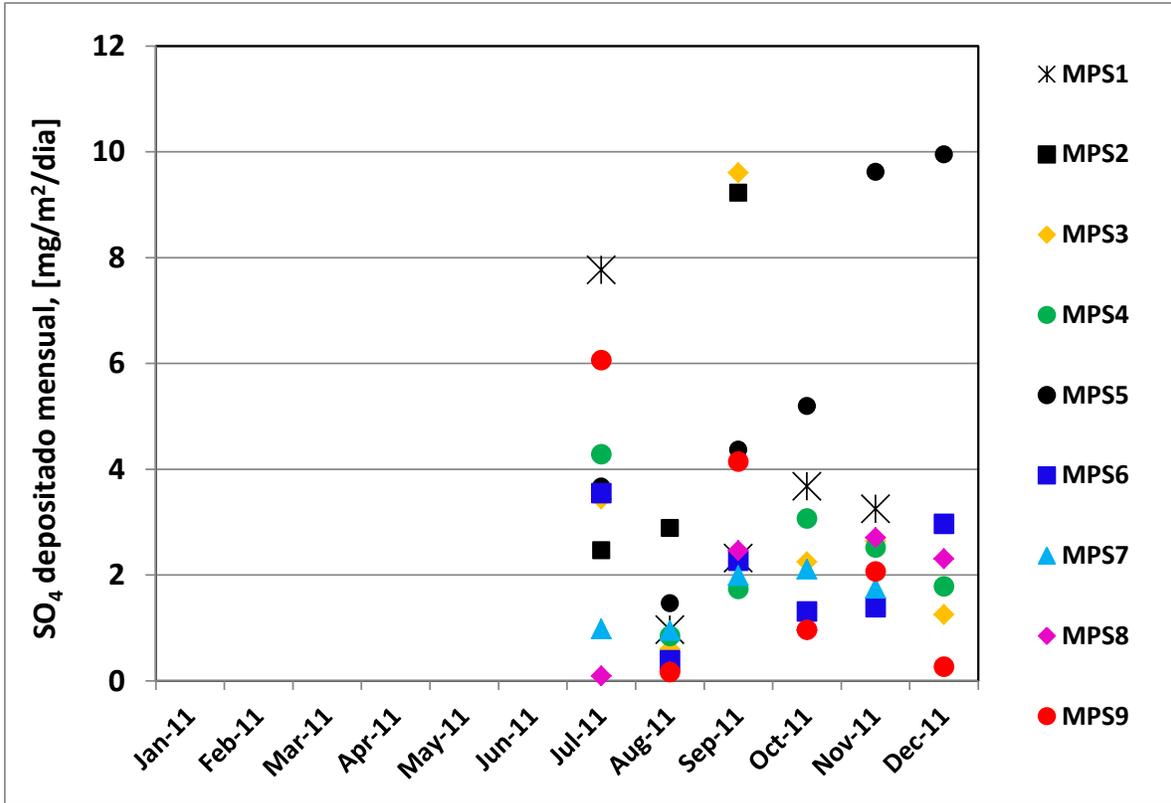


Figura 64. Monitoreo de SO_4 en el MPS en los nueve sitios usados en el presente estudio.

En resumen, los resultados obtenidos indican que hay una gran variabilidad de los datos mensuales entre un receptor y otro. Dado que se esperaría que el proceso de dispersión y depositación de material particulado emitido por las chimeneas del sector industrial del Huasco debería tener una menor variabilidad espacial a lo largo del valle, consideramos que es necesario modificar la estrategia de monitoreo de material particulado sedimentable en el valle, complementándola con un monitoreo que permita llevar un seguimiento más preciso de los impactos de las fuentes industriales a lo largo del valle. El monitoreo actual de material particulado sedimentable posee muchas interferencias por actividades locales y aportes naturales (aerosol marino), lo que reduce la capacidad de hacer seguimiento de las actividades del complejo industrial del Huasco y sus impactos en la calidad del aire en el valle olivícola.

Este tema se va a desarrollar con mayor profundidad en la actividad 4.a: Proponer la ampliación o adecuación de sistema de monitoreo de calidad del aire, la que se presenta más adelante en este Informe de Ejecución.

1.h) Relación entre condiciones meteorológicas e impactos en la calidad del aire

a) Datos del monitoreo ambiental en Huasco

La meteorología cumple un rol fundamental en la dispersión y transporte de los contaminantes, afectando tanto la forma de la pluma como sus alcances.

El viento es uno de los principales parámetros meteorológicos relacionados con los impactos en la calidad del aire, y ya se ha analizado el comportamiento de la dirección del viento medido en el valle en las distintas estaciones del año (ver Figura 29 a Figura 32), donde se ha constatado que los vientos son más persistentes hacia el este en primavera y verano, mientras que en meses de otoño e invierno tienen una componente dirigida desde el valle hacia la costa que predomina más, retardando el transporte de contaminantes hacia el interior del valle.

A continuación se presentan las concentraciones mensuales de SO_2 medidas en la red de monitoreo de calidad del aire existente en el valle, la que se muestra en la siguiente figura.

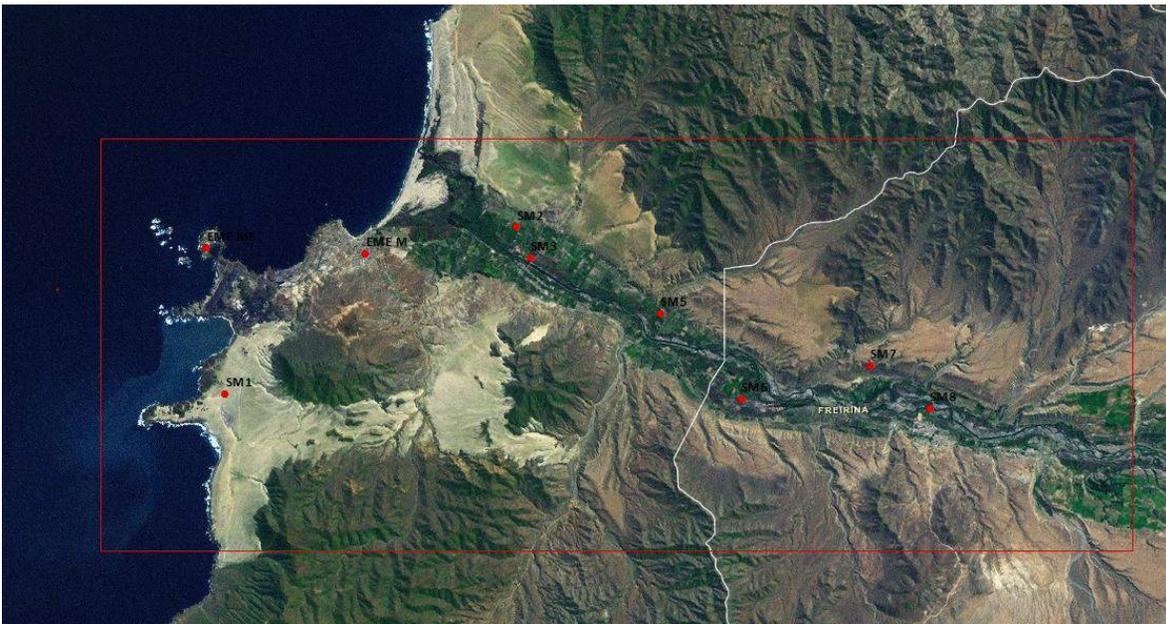


Figura 65. Red de monitoreo de SO_2 existente en el valle del Huasco.

La siguiente figura muestran las concentraciones mensuales de SO_2 medidas en las estaciones de monitoreo presentadas en la figura anterior. Se aprecia que todas las estaciones de monitoreo registran datos que tienen una gran estacionalidad de las concentraciones, las que son máximas en invierno (meses fríos) y mínimas en los meses de primavera y verano, para todas las estaciones de monitoreo de la red. La única excepción es SM3 que el año 2009 mostró máximos en enero y febrero.

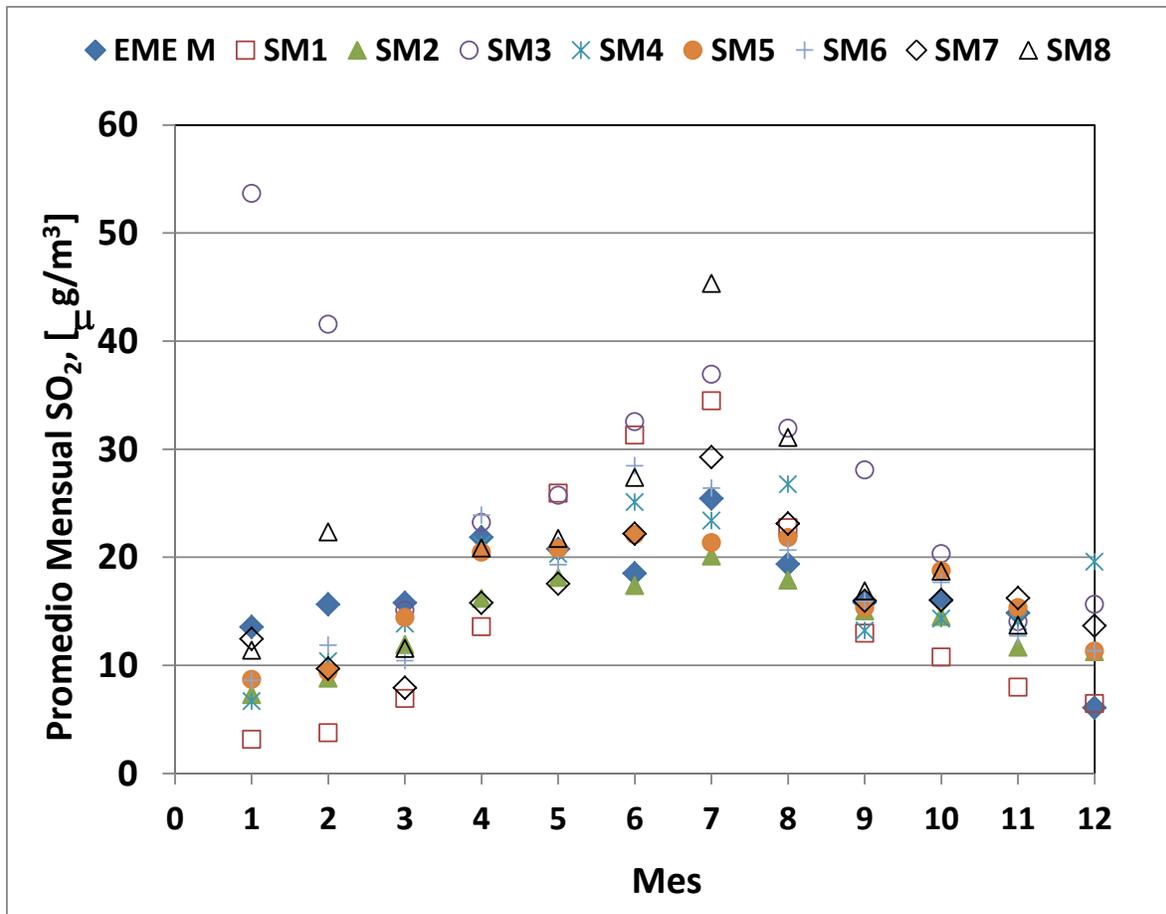


Figura 66. Concentraciones mensuales de SO₂ medidas en las estaciones de monitoreo.

Los factores meteorológicos que explicarían la estacionalidad de las concentraciones observadas son:

- La oxidación más lenta del SO₂ a sulfato en condiciones de invierno, por las menores temperaturas ambientales.
- Las menores alturas de mezclados en invierno, que reducen el volumen disponible para que se dispersen los contaminantes y por ende causan aumentos de las concentraciones ambientales de ellos en el valle.
- El régimen de vientos, que en invierno presenta una dirección Este bien marcada y que tiende a evitar que se transporten eficazmente los contaminantes hacia el interior del valle, y que además promueve acumulaciones de masas de aire contaminado por las emisiones de las industrias en Huasco sobre el océano, las que ingresan por las tardes al valle con altas concentraciones de SO₂.

Además de estos factores climáticos o de largo plazo, en una zona costera como el caso de Huasco, se genera un fenómeno conocido como “fumigación de la pluma”, producido cuando la pluma de una chimenea es liberada justo debajo de una capa de inversión térmica y el aire que se encuentra en esa capa muestra condiciones de inestabilidad (ver

Figura 67). Lo anterior produce un bloqueo por la parte superior, y un rápido transporte en la parte inferior, debido a la turbulencia atmosférica existente cerca del suelo, lo que puede provocar altos impactos a nivel de suelo, lo que ayuda a explicar los altos impactos horarios obtenidos en las cercanías de las fuentes principales, como es el caso del punto R en la Figura 67.

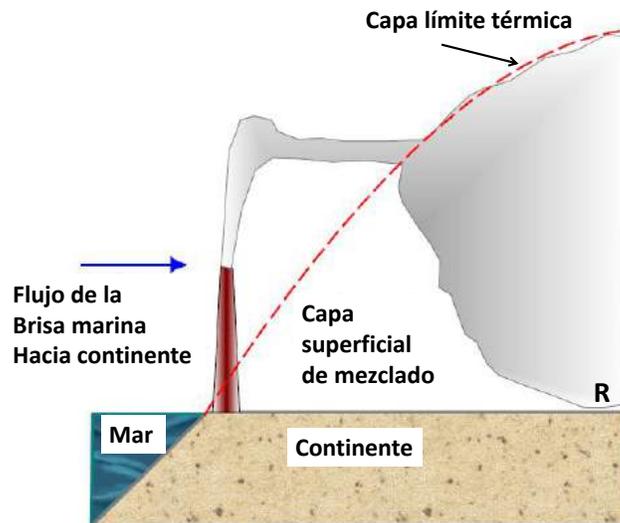


Figura 67. Fenómeno de fumigación de una pluma de chimenea ubicada en el borde costero.

b) Resultados del modelo de dispersión CALPUFF para el SO₂ en Huasco.

A continuación se presentan los resultados del modelo de dispersión CALPUFF aplicado a las emisiones del complejo industrial del Huasco, cuando se modelan las concentraciones de SO₂ en los mismos puntos donde están ubicadas las estaciones de monitoreo ambiental (ver Figura 65).

En primer lugar, la Figura 68 muestra el desempeño del modelo para el caso del periodo de verano 2009 (enero a marzo); se aprecia que el modelo sobrestima ampliamente las concentraciones en las dos estaciones más cercanas a las fuentes emisoras (EME M y SM1), sobrestima levemente en una estación en Huasco bajo (SM6), mientras que en todas las demás estaciones el modelo subestima las concentraciones observadas. Este comportamiento del modelo se podría explicar en parte porque se está simulando mucha fumigación de las plumas de las chimeneas cerca de las estaciones EME M (en el pueblo de Huasco) y al sur de Huasco (SM1), lo que podría explicar por qué en las estaciones más hacia el interior del valle los impactos son menores. En el caso de la estación SM6 la explicación podría deberse a que el modelo representa adecuadamente trayectorias de las plumas de las chimeneas que se van primero hacia el sur de Huasco y posteriormente llegan al valle en la zona donde está emplazada la estación SM6, trayectoria que está presente en las modelaciones meteorológicas (ver Figuras 51 y 54).

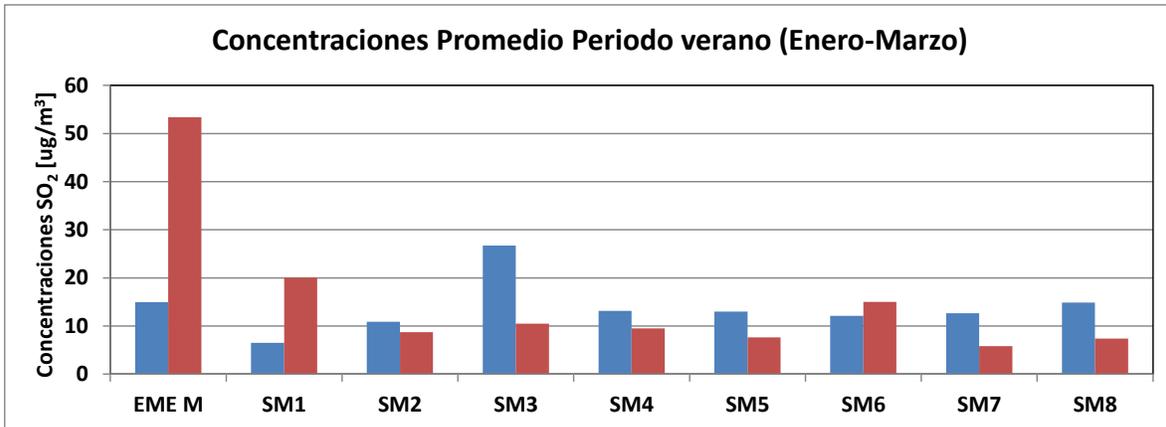


Figura 68. Comparación entre las observaciones y las modelaciones (barras azules y rojas, respectivamente), para las concentraciones de SO_2 en el valle de Huasco, trimestre de verano 2009.

En la estación de primavera 2009 los resultados que se muestran en la Figura 69 son similares al caso del verano, con grandes sobrestimaciones de concentraciones en las estaciones EME M y SM1, buen desempeño en la estación SM6 y subestimaciones variables en las demás estaciones de monitoreo.

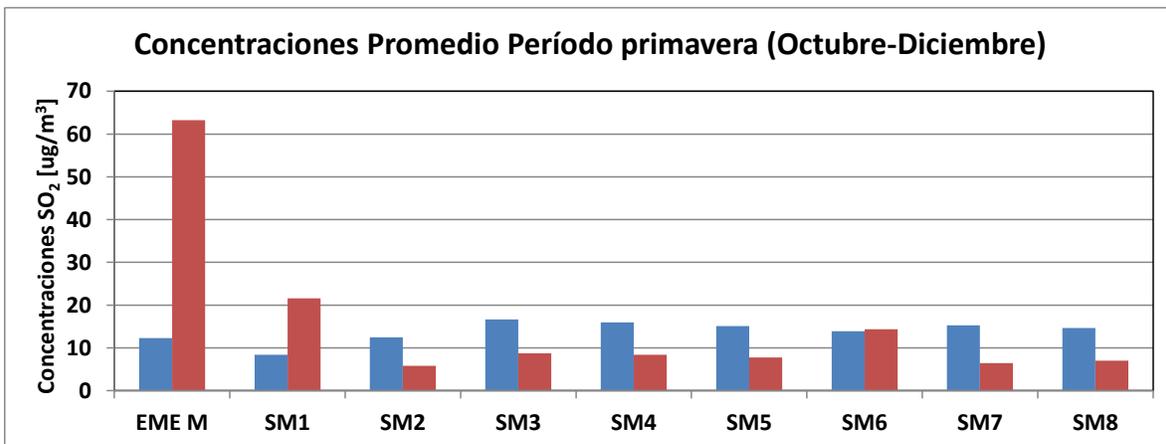


Figura 69. Comparación entre las observaciones y las modelaciones (barras azules y rojas, respectivamente), para las concentraciones de SO_2 en el valle de Huasco, trimestre de primavera 2009.

Para el caso de los meses de otoño e invierno, los resultados del modelo son de menor calidad, la siguiente figura muestra el caso de invierno. Este bajo desempeño del modelo puede deberse a problemas para modelar adecuadamente la meteorología de la zona en otoño e invierno, particularmente en el caso de la altura de la inversión térmica sobre el valle, que está muy influenciada por la entrada de brisa marina fría en la parte baja del valle, en contraste con el calentamiento del aire en los cerros que bordean el valle. Es probable que dado lo angosto del valle (en dirección Norte-Sur), este fenómeno no esté siendo bien representado por el modelo meteorológico.

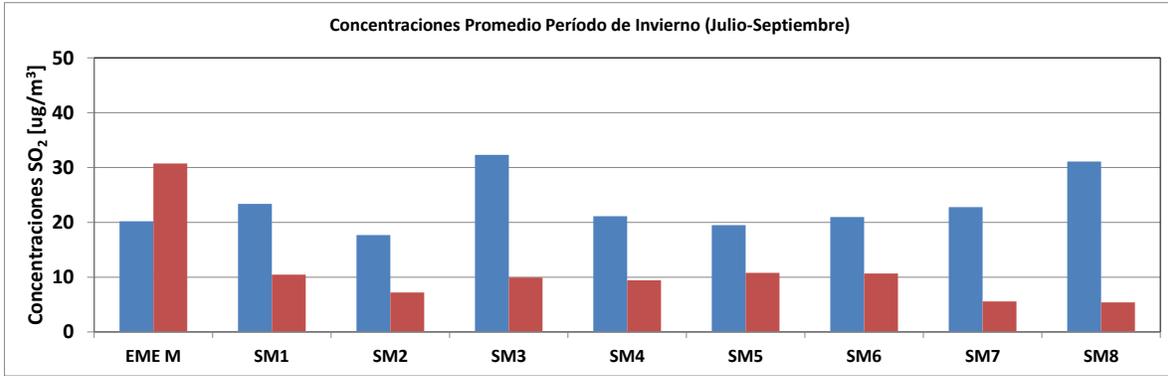


Figura 70. Comparación entre las observaciones y las modelaciones (barras azules y rojas, respectivamente), para las concentraciones de SO₂ en el valle de Huasco, trimestre de invierno 2009.

c) Resultados del modelo de dispersión CALPUFF para el NO y NO₂ en Huasco.

En el caso de los óxidos de nitrógeno (NO_x = NO+NO₂), solo hay monitoreo en una estación: EME M. Las siguientes figuras resumen los promedios estacionales de NO y de NO₂ observados y modelados por CALPUFF para ese receptor.

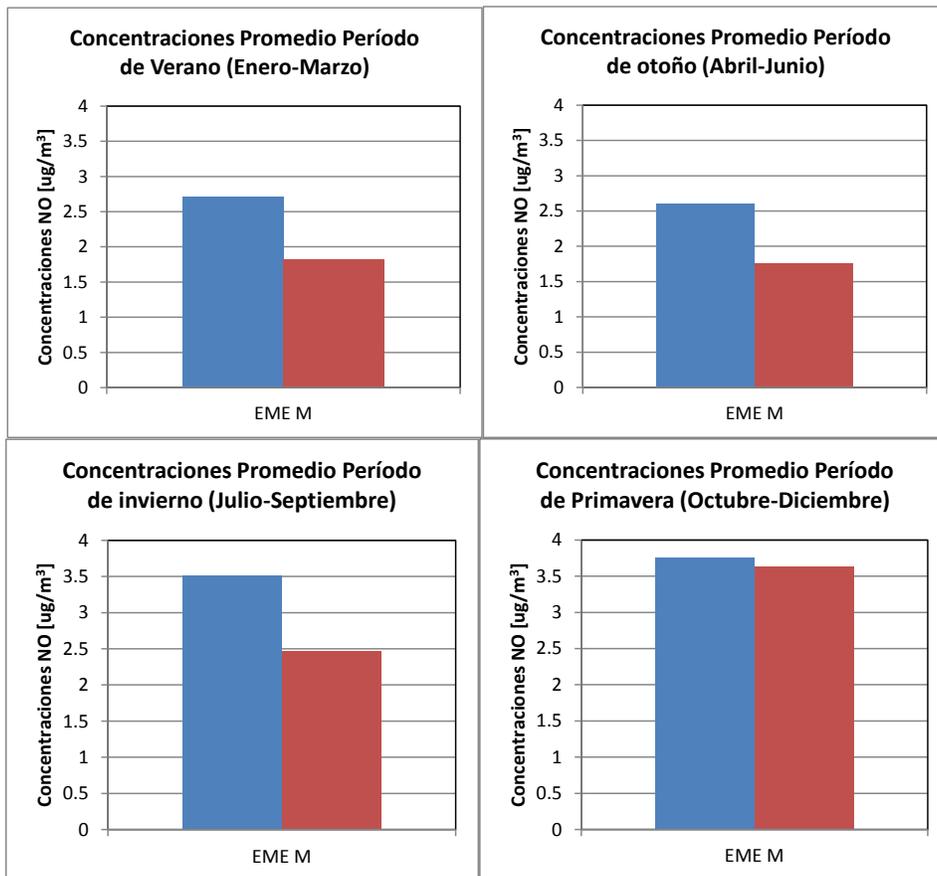


Figura 71. Promedios estacionales de NO observados y modelados (barras azules y rojas, respectivamente), para el receptor EME M, año 2009.

En el caso del NO, la figura anterior muestra que el modelo subestima los impactos por NO en otoño e invierno, pero anda bien en el trimestre de primavera.

La siguiente figura muestra los resultados para el NO₂, donde se aprecia que el modelo sobrestima este contaminante todo el año. Notar que el NO₂ es un contaminante secundario, es decir, está determinado principalmente por la oxidación del NO a NO₂ por acción oxidante de la atmósfera, principalmente la presencia de radicales libres. La alta sobrestimación del NO₂ en primavera y verano nos indica que se está sobrestimando la oxidación de NO a NO₂, lo que es consistente con la interpretación de que el SO₂ se está subestimando justamente por esa misma razón: se oxida demasiado rápidamente a sulfato. En resumen, el modelo CALPUFF estaría sobrestimando las oxidaciones de gases en la atmósfera del valle de Huasco y esto estaría contribuyendo a la sobrestimación del NO₂ y a la subestimación del SO₂. Este sesgo, junto con el sesgo ya mencionado de las alturas de inversión térmica sobre el valle explicarían en gran parte las discrepancias entre lo observado y lo modelado.

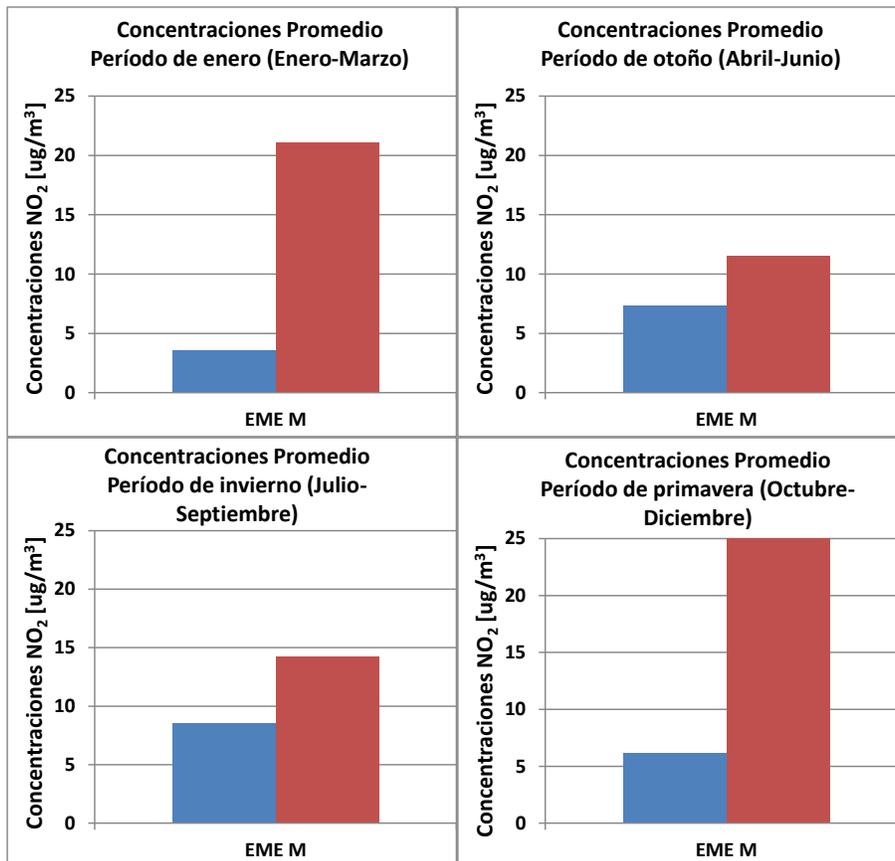


Figura 72. Promedios estacionales de NO₂ observados y modelados (barras azules y rojas, respectivamente), para el receptor EME M, año 2009.

Otra conclusión que se desprende de los resultados del modelo CALPUFF es que es altamente probable que la tendencia a la subestimación de impactos de las emisiones de las chimeneas del complejo industrial esté también presente en los EIA y DIA previamente ingresados al SEA y que ya cuentan con aprobación mediante una RCA. En efecto, si nuestra modelación presenta una subestimación de la línea base actual de SO_2 porque hay factores meteorológicos que no están siendo bien representados (como sobrestimar la altura de la inversión térmica sobre el valle, especialmente en invierno), entonces es probable que los estudios previos, realizados con modelos como AERMOD o ISC3 y que simplifican bastante la meteorología que se ingresa al modelo, hayan ignorado dichos efectos y también subestimen los impactos.

En la sección de conclusiones de este Informe Final se formulan recomendaciones para mejorar la representación de la meteorología y la química en el modelo de dispersión, con el fin de tener una herramienta de mayor precisión para estimar impactos en la calidad del aire en el valle.

d) Resultados del modelo de dispersión CALPUFF para el MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ en Huasco.

En esta sección se muestra el desempeño del modelo CALPUFF para el caso del MP_{10} , para lo cual se comparó los valores simulados por el modelo CALPUFF con los datos del monitoreo diario de MP_{10} en tres puntos de monitoreo en Huasco: EME M, EME F y 21 de Mayo, todas calificadas como EMRP y que se muestran en la siguiente figura.



Figura 73. Ubicación de las estaciones de monitoreo de MP_{10} EME F, EME M y 21 de Mayo en Huasco.

La siguiente figura muestra las comparaciones entre el MP_{10} observado y el MP_{10} modelado. Hay que tener presente en las comparaciones que el modelo no representa la contribución por el aerosol marino, la que puede alcanzar a unos $10 \text{ } [\mu\text{g}/\text{m}^3]$, pero que si está presente en las observaciones. Considerando esto, se aprecia que el modelo subestima levemente en primavera y verano las concentraciones en las estaciones EME F y EME M, y que claramente sobrestima las concentraciones medidas en la estación 21 de Mayo. En el caso de otoño e invierno, las subestimaciones son mayores en las estaciones EME F y EME M, aunque persisten las sobrestimaciones en la estación 21 de Mayo.

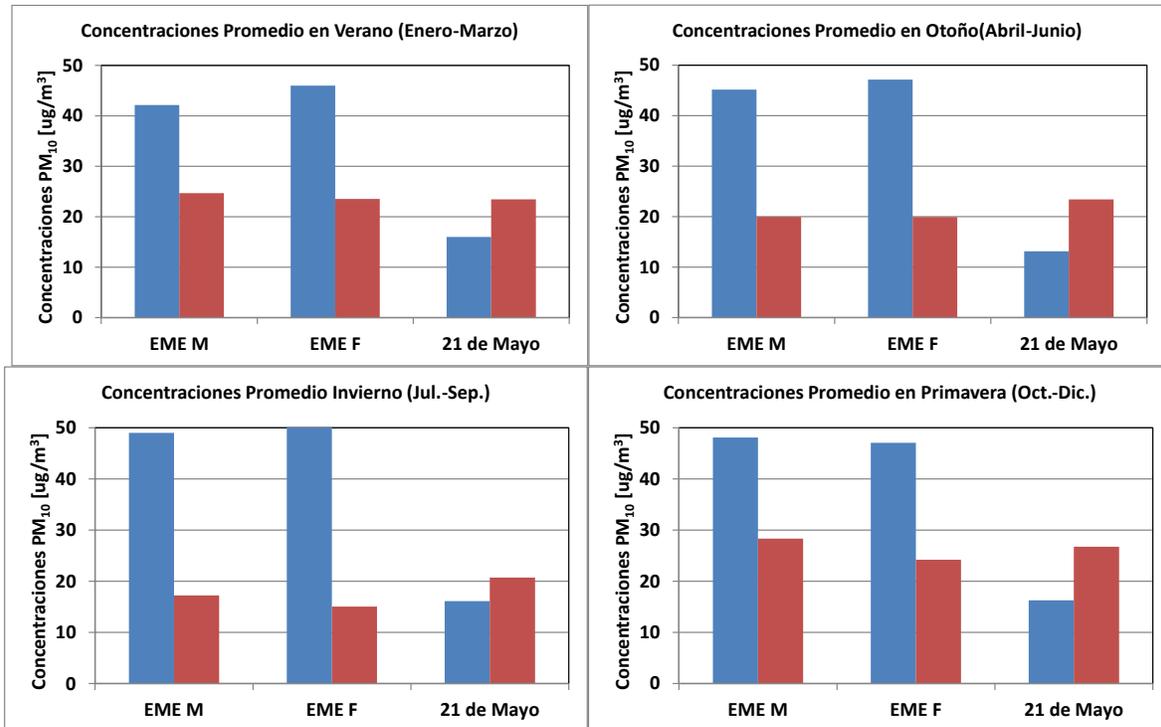


Figura 74. Promedios estacionales de MP_{10} observados y modelados (barras azules y rojas, respectivamente), para los receptores EME F, EME M y 21 de Mayo, para el año 2009.

La explicación para este comportamiento del modelo en el pueblo mismo de Huasco se puede deber a la meteorología estimada para esa zona: no hay una estación de monitoreo meteorológico en dicha zona, y se debería agregar una estación allí para poder representar mejor las trayectorias del viento que cruzan el pueblo. Los resultados muestran que el modelo tiende a estimar mayores concentraciones hacia el suroeste del pueblo, y menores concentraciones hacia el noreste, mientras que el monitoreo está indicando la tendencia opuesta.

La siguiente figura muestra las concentraciones de $MP_{2.5}$ modeladas en las mismas tres estaciones de monitoreo. Si bien no hay observaciones para el año 2009, los datos nos permiten tener una aproximación a las concentraciones de $MP_{2.5}$ en el pueblo de Huasco. Se aprecia que hay una estacionalidad clara, con mayores concentraciones modeladas en primavera y menores valores en invierno. A estas concentraciones modeladas habría que

agregarles el aporte natural de aerosol marino y de polvo fugitivo levantado por el viento, valor que puede estar alrededor de los 5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], dependiendo de la estación del año.

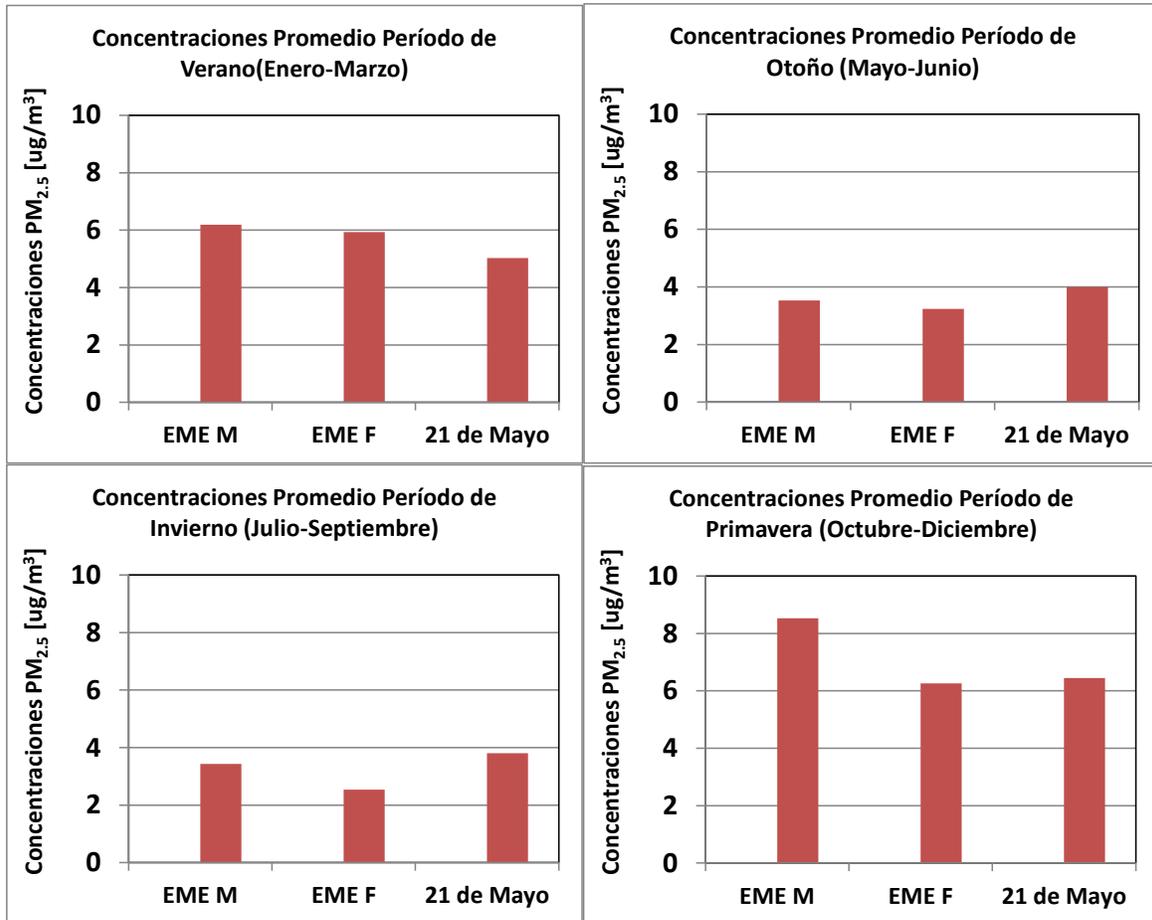


Figura 75. Promedios estacionales de MP_{10} modelados, para los receptores EME F, EME M y 21 de Mayo, para el año 2009.

En general los resultados de las modelaciones para el MP_{10} y para el $\text{MP}_{2.5}$ muestran que las concentraciones del material particulado respirable presentan concentraciones similares a través del pueblo de Huasco, mientras que las observaciones en la red de monitoreo indican una mayor variabilidad espacial en el caso del MP_{10} .

Una explicación para esta discrepancia está en la meteorología, ya que no hay estaciones de monitoreo de meteorología en el mismo pueblo de Huasco, por lo que puede haber sesgos en el campo de vientos sobre el pueblo que expliquen las diferencias entre lo modelado y lo observado.

1.i) Descripción de la información de entrada al modelo de dispersión

a) Dominio y grilla de modelación

Para llevar a cabo la modelación en la zona de Huasco se define un dominio de modelación de 65 kms de ancho por 25 kms de largo, con el fin de incluir la totalidad de las fuentes de emisión, los receptores puntuales y los sectores poblados más importantes, como son Huasco, Freirina y Vallenar. El espaciamiento horizontal de la grilla es de 1 km. y su elección se basa en las limitaciones computacionales asociadas a la definición de un dominio de dichas dimensiones, que no permiten definir una grilla más fina.

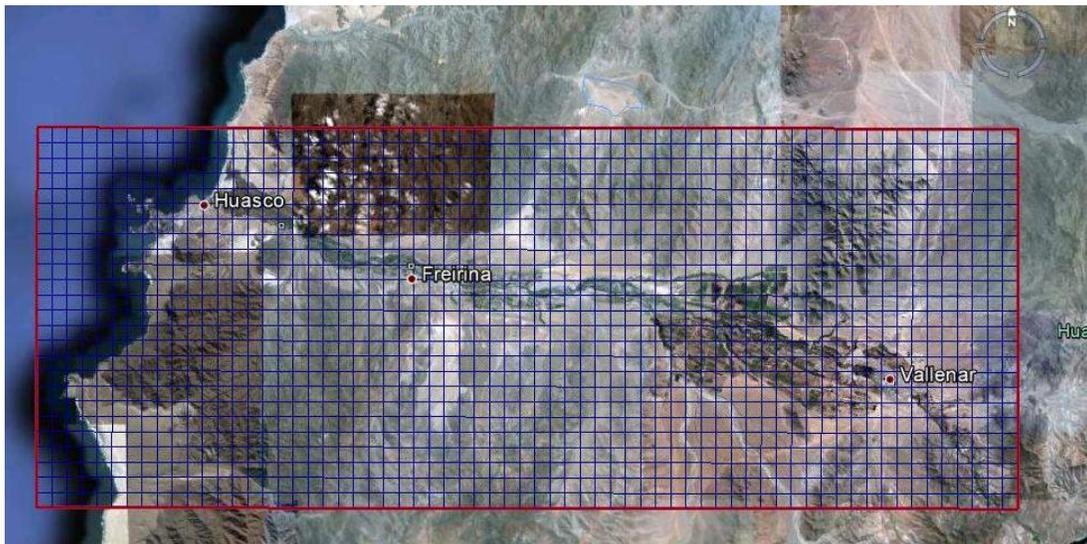


Figura 76. Dominio y grilla meteorológica considerados en el modelo

b) Meteorología

El sistema CALMET/CALPUFF requiere de información meteorológica registrada en estaciones superficiales, además de emplear meteorología a distintos niveles de altura. Para estos fines se emplea la información disponible en el Sistema de Información de Calidad del Aire del Ministerio del Medio Ambiente²⁸ y en la red meteorológica del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas²⁹ para la meteorología superficial y las salidas de una modelación en WRF para el caso de altura, considerando como escenario meteorológico el 2009, por ser el más reciente con mayor cantidad de datos válidos.

²⁸ <http://sinca.conama.cl>

²⁹ <http://www.ceazamet.cl/huasco/>

i) Meteorología Superficial

Las fuentes indicadas anteriormente contienen información de diez estaciones meteorológicas: SM4, SM8 y EME ME (Red Guacolda), donde SM4 y SM8 miden sólo datos de viento y EME ME registra todos los parámetros requeridos por CALMET (velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, humedad relativa, radiación, presión y precipitación); Bodeguilla, Imperial, Longomilla, Nicolasa, Santa Juana y Ventanas (Red CEAZA) que registran viento (dirección e intensidad), temperatura, humedad relativa, radiación y precipitación y Los Olivos de Bellavista que mide las mismas variables que la red CEAZA. La distribución de las estaciones en la orientación W-E se indica en Tabla 31 y ya se ha presentado la Figura 28 donde se muestran las ubicaciones de ellas en el valle.

Tabla 31. Ubicación estaciones de meteorología superficial (WGS 84, Huso 19 S)

Estación	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]
EME ME	278,938	6,849,086
Los Olivos	286,110	6,849,150
SM4	287,875	6,847,820
SM8	296,473	6,845,185
Nicolasa	301,431	6,843,515
Bodeguilla	306,476	6,847,740
Longomilla	314,689	6,840,139
Ventanas	317,639	6,843,524
Imperial	332,937	6,833,120
Santa Juana	337,975	6,827,491

Es importante destacar que la información recopilada debió ser sometida a control de calidad de los datos y a procesamiento, de manera de darle el formato correspondiente al sistema CALMET/CALPUFF. Además, se debe tener en consideración que el modelo necesita que como mínimo se disponga de un registro de los distintos parámetros meteorológicos por hora, por lo que en caso que no se cumpla esta condición, se debe emplear una metodología como interpolación para poder obtener los valores necesarios. Según los datos recopilados, la información disponible es la siguiente:

Tabla 32. Porcentaje de información disponible

Estación	Parámetro					
	T [°C]	HR [%]	WS [m/s]	WD [°]	Radiación Solar [W/m ²]	Presión [mbar]
EME ME	97.7	97.7	97.7	97.7	97.7	99.9
Los Olivos	88.0	87.7	88.0	85.1	88.0	88.0
SM4	-	-	100	100	-	-
SM8	-	-	98	98	-	-
Nicolasa	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	-
Bodeguilla	96.1	96.5	96.6	96.6	96.5	-
Longomilla	54.2	54.2	54.2	54.2	54.2	-
Ventanas	78.1	84.6	84.7	84.7	84.6	-
Imperial	84.1	84.1	84.3	84.3	84.1	-
Santa Juana	82.6	82.6	82.6	82.6	82.6	-

ii) Meteorología en Altura

Para la meteorología en altura se utilizan las salidas de una modelación en WRF con una grilla de resolución horizontal de 1 km. El dominio considerado en dicha modelación se muestra en la Figura 43.

iii) Fuentes emisoras

La modelación considera dos tipos de fuentes: puntuales, que representan a las chimeneas, y de área. Según la información recopilada, las fuentes puntuales en la zona de Huasco son las que se muestran en la Figura 77 y en la Tabla 13.



Figura 77. Distribución de fuentes puntuales.

El resto de las emisiones se representa como fuentes de área como se indica en la Figura 78. Las emisiones consideradas para las distintas fuentes se indican en la sección 1.a) del presente informe de ejecución.



Figura 78. Distribución de fuentes de área.

iv) Receptores

Para poder estimar las concentraciones en los distintos puntos del dominio, se definen receptores de grilla, para estimar las concentraciones en los centros de cada celda y receptores puntuales, que representan las estaciones de monitoreo ya instaladas en el lugar. En el caso de la grilla, se consideran las dimensiones del dominio de modelación, empleando una resolución horizontal de 1 km.

En las siguientes figuras se muestra la distribución de los receptores puntuales en la zona de estudio.



Figura 79. Receptores comuna de Huasco.



Figura 80. Receptores comuna de Freirina.



Figura 81. Receptores comuna de Vallenar

1.j) Análisis de sensibilidad del modelo de dispersión

Inicialmente el modelo se aplicó al valle olivícola con una grilla de celdas con dimensiones horizontales de 1 x 1 km (ver Sección 1.i). Sin embargo, debido a los resultados obtenidos, que mostraron subestimación de las concentraciones ambientales de SO₂, se optó por realizar una serie de análisis de sensibilidad para ver si el modelo era capaz de reproducir las concentraciones observadas en la zona. Las simulaciones incluyeron las siguientes modificaciones a la configuración del modelo CALPUFF o bien a sus parámetros de entrada:

- a) Se redujo la dimensión de las celdas de la grilla de modelación a un tamaño horizontal de 250 x 250 m.
- b) Se redujo la cantidad de ozono de background en el mecanismo de reacciones químicas que producen MP_{2.5} secundario, para estimar si se estaba sobrestimando la oxidación del SO₂ a sulfato. Cabe hacer notar que este contaminante no se ha medido en el valle, aunque debería tener valores menores que en zonas como la Región Metropolitana, por ejemplo.
- c) Se incluyó el algoritmo que considera la fumigación de una pluma de chimenea en una zona costera (Figura 67), para mejorar el desempeño del modelo en aquellas estaciones de monitoreo más cercanas a la costa.
- d) Se redujo la altura de la inversión térmica sobre el valle en meses de otoño e invierno, de manera que no superara los 500 m de elevación sobre el valle.

Sin embargo, todas estas modificaciones a la configuración del modelo o en sus parámetros de entrada no cambiaron significativamente los resultados de las modelaciones, manteniéndose los resultados de subestimación del SO₂ ya presentados en la actividad 1.h).

Debido a estos resultados es que se ha considerado que se debería levantar más información para conseguir un desempeño del modelo de dispersión más acorde con las concentraciones observadas en el monitoreo ambiental. Una explicación para la subestimación del SO₂ en el valle olivícola es que se estaría sobrestimando la inversión térmica sobre él. Este es un aspecto que se debe estudiar más mediante análisis de sensibilidad en la segunda etapa del proyecto, incorporando información satelital para mejorar el desempeño de la meteorología, especialmente en el tema de la inversión térmica.

A futuro se debería considerar agregar más estaciones de meteorología superficial para mejorar el desempeño del modelo de dispersión, lo que se indica en la actividad 4.b) de este informe.

II. Actividades asociadas al Objetivo N° 2

a) Objetivo General

Determinar el efecto producido por los distintos contaminantes emitidos por el complejo industrial de Huasco, sobre la producción de olivas y los alimentos procesados a partir de ellas.

b) Productos Esperados

- 1) Informe técnico de laboratorio con resultados de contaminantes presentes en los diferentes tejidos y matrices evaluadas.
- 2) Análisis estadístico de datos y de acuerdo a normativas ambientales.
- 3) Informe técnico de datos con mapas de SIG y análisis de laboratorio.
- 4) Informe técnico de factores productivos el Olivo en las tres zonas de estudio.
- 5) Análisis estadístico de correlación con la presencia de contaminantes.
- 6) Informe técnico de datos con mapas de SIG y análisis de laboratorio.
- 7) Informe técnico de laboratorio con resultados de contaminantes presentes en los diferentes productos procesados.
- 8) Análisis estadístico de datos y de acuerdo a normativas ambientales
- 9) Informe técnico de laboratorio con resultados de contaminantes presentes en los diferentes productos procesados.
- 10) Análisis estadístico de datos y de acuerdo a normativas ambientales.
- 11) Identificación de áreas potencialmente afectadas por deriva de contaminantes.
- 12) Identificación georeferenciada de lugares de muestreo de suelos.
- 13) Caracterización fisicoquímica rápida de muestras. Metales totales en suelos estimados por fluorescencia de rayos X (20 muestras) (Pb, Zn, As, Fe, Cr, Cu, Mn)
- 14) Caracterización fisicoquímica detallada en laboratorio certificado de muestras seleccionadas. Metales totales en suelos para tres metales considerados críticos de acuerdo a caracterización preliminar (10 muestras)
- 15) Otros análisis. Textura (20 muestras de suelos).

c) Metodología del estudio

El estudio se dividió en dos estudios independientes; estudio del efecto de la contaminación por material particulado (MPS) o fierrillo, y estudio del efecto de la contaminación atmosférica por emisión de contaminantes de SO₂ y NO₂.

Según los resultados obtenidos en el objetivo N°1 del presente proyecto, se designaron los huertos de estudio, que se encontraban en etapa productiva, ubicadas a una determinada distancia respecto de la fuente contaminante, tanto para las emisiones de MPS de hierro, como las emisiones de contaminantes atmosféricos.

i) Estudio del efecto de la contaminación por material particulado (MPS).

Se seleccionaron tres huertos a lo largo del valle (de este a oeste) que se encontraran contiguos a la línea férrea, por el cual se transporta el material de pellets de hierro, según la Figura 82. La selección de los huertos se realizó considerando, tanto su distancia a la línea férrea, como a la planta de emisiones (ver Tabla 33).

Tabla 33. Coordenadas y distancia aproximada a planta contaminante.

Puntos	Coordenadas		Distancia a la fuente contaminante
H1	28°29'23.83" S	71°08'51.68" O	10 km
H3	28°31'26.38" S	70°56'30.24" O	30 km
H2	28°33'43.61" S	70°49'03.50" O	45 km



Figura 82. Ubicación georeferenciada de huertos para estudio de contaminación por MPS – Fierrillo.

Para determinar el efecto del MP emitido a través del transporte de pellet, se evaluaron tres puntos dentro de cada huerto; cerca, medio, lejos, con una distancia mínima de 100 metros desde la línea del tren, hasta las plantas más alejadas, para reducir la variabilidad propia que existe dentro del valle (Figura 83).



Figura 83. Puntos de muestreo en cada uno de los huertos de acuerdo a su distancia en relación a la línea férrea.

Dentro de los criterios utilizados para la selección de huertos, se consideró adicionalmente, huertos con una ubicación de oeste a este, para evaluar el efecto del MP que proviene de la planta de emisiones y que es transportado a través del viento, para lo cual se incorporaron tres huertos según la Figura 84.



Figura 84. Puntos de muestreo adicionales de acuerdo a su distancia en relación a la fuente de emisiones.

ii) Estudio del efecto de la contaminación ambiental por NO_2 y SO_2

Según los resultados obtenidos en el Objetivo N° 1 del estudio respecto de la contaminación ambiental por emisiones atmosféricas de NO_2 y SO_2 de las termoeléctricas (Figura 85 y Figura 86).

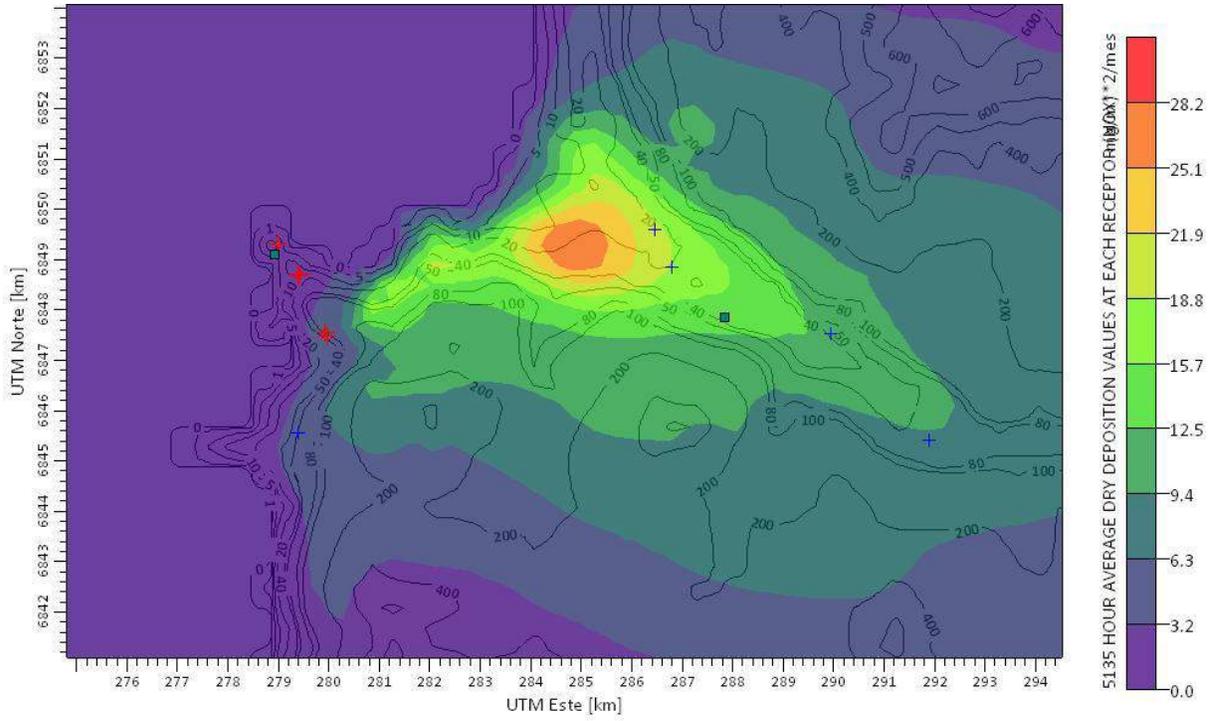
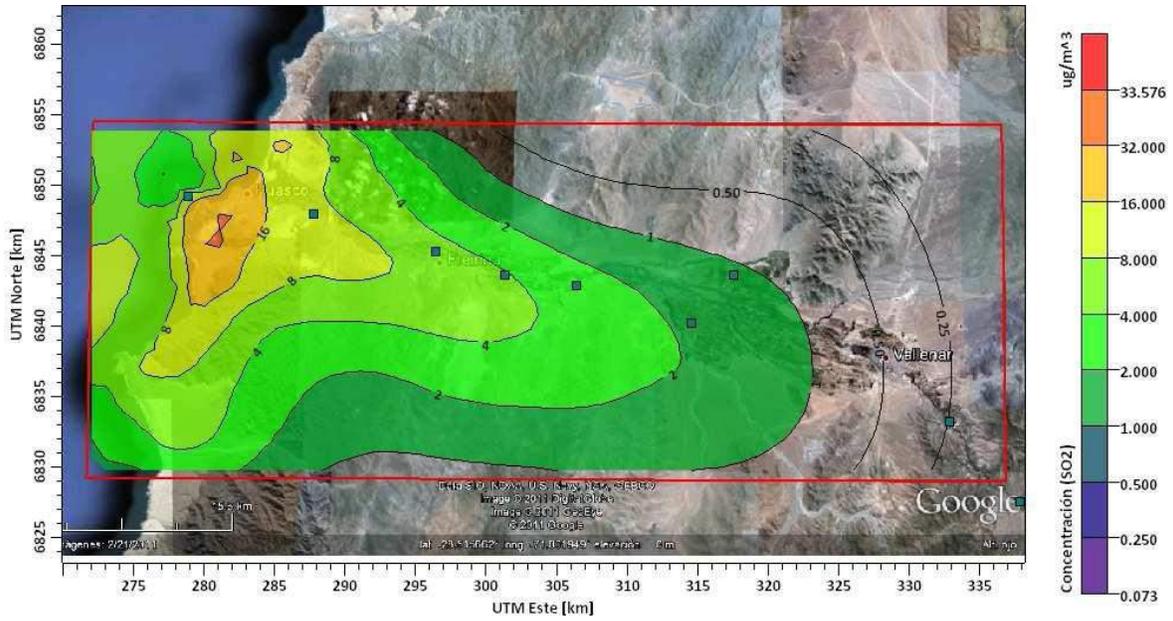


Figura 85. Deposición de NO₂ anual valle de Huasco.



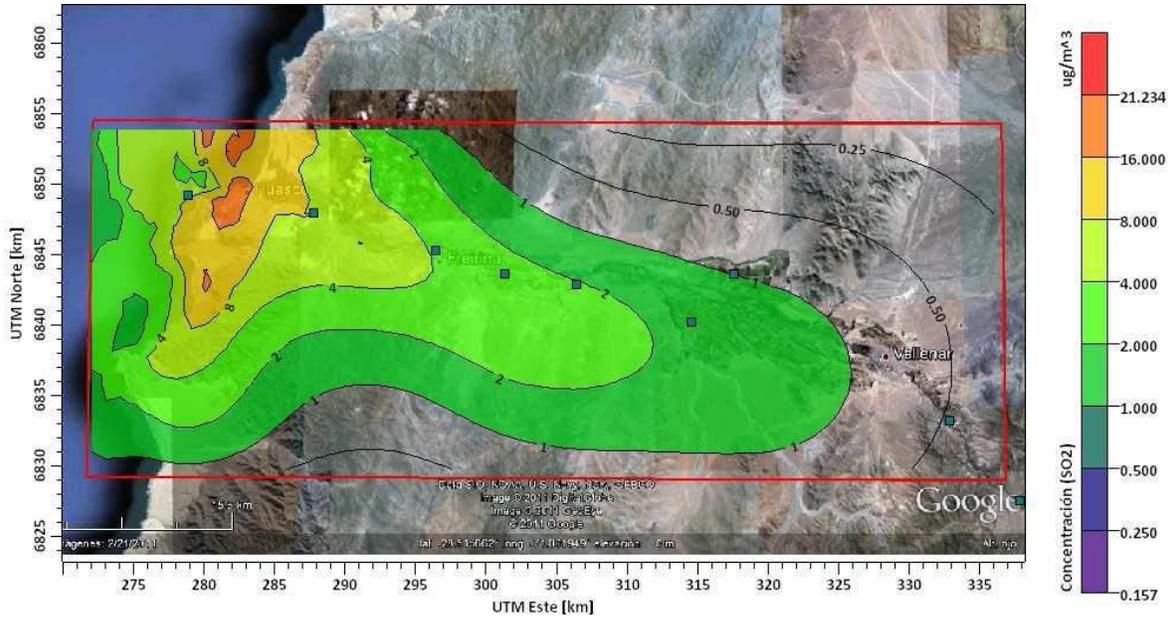


Figura 86. Concentración promedio de SO₂ (ug/m³) durante los meses de octubre y noviembre en el valle de Huasco.

Se designaron puntos de muestreo ubicados a distinta distancia de la fuente contaminante; puntos 1 al 10 (Figura 87) y se incluyeron dos puntos dentro del valle fuera de la nube de contaminación, puntos 11 y 12 (Figura 88).



Figura 87. Puntos de muestreo (puntos 1 al 10) para estudio de contaminación ambiental, sector Huasco a Freirina.



Figura 88. Puntos de muestreo (puntos 11 y 12) fuera de la nube de contaminación ambiental, Freirina a Vallenar.

Los huertos fueron numerados de acuerdo a su cercanía al punto de mayor concentración tanto de NO_2 como de SO_2 en el aire, siendo el huerto número 1 el más cercano al punto de mayor contaminación y el punto 12, el más alejado (Tabla 34).

Tabla 34. Distancias aproximadas a la planta de emisiones.

Huerto	Distancia (km)
1	4,3
2	5,0
4	5,5
6	5,7
7	6,5
8	6,5
9	8,2
10	9,5
11	30,0
12	43,0

iii) Estudio Anatómico

Existen numerosos antecedentes en la bibliografía sobre estudios anatómicos, que tienen como finalidad distinguir cambios morfológicos, que sufren las estructuras vegetales al someterlas a diferentes condiciones, entre esas estrés ambientales, como los que pueden producir tanto el material particulado que queda sobre los tejidos y la lluvia ácida que cae sobre éstos.

Por esta razón, en el presente proyecto se realiza un estudio anatómico, el cual tiene por objetivo distinguir efectos de la contaminación ambiental y de fierrillo, sobre los tejidos vegetales de olivo y determinar si es que producen un daño en esta especie. Para ello, se recolectaron muestras de hojas cerca, lejos y a una distancia intermedia de los puntos de mayor concentración de material particulado, y de contaminación por NO₂ y SO₂, según mapas entregados en el Objetivo N°1 del presente proyecto.

d) Actividades realizadas

2.a) Determinar la presencia y la concentración de elementos contaminantes.

a) Estudio del efecto de la contaminación por material particulado (MPS).

Para determinar cuáles son los elementos que están presentes en el material particulado, tanto del polvillo emitido a través del transporte de pellets, como del material particulado emanado por la industria, se procedió a evaluar el contenido mineral del polvillo presente en la línea del tren (Tabla 35). De este modo, se identificaron los elementos presentes, lo que permite evaluar la presencia y concentración de estos elementos en el proceso productivo.

Tabla 35. Contenido mineral del polvillo presente en la línea del tren.

	pH	Fe %	Mg %	Ca %	Al %	S %	Cu %	Zn %	Mn %
MPS	8,46	13,9	0,79	0,46	0,45	0,37	<0,01	<0,01	<0,01

Los resultados coinciden con los expresados por el INIA en estudios anteriores, en que se establece que mayoritariamente son minerales férricos. Adicionalmente concuerda con los resultados obtenidos en el objetivo N°1 de este mismo proyecto, en que el material particulado emitido por la Compañía Mineral del Pacífico, presenta un 60% de Fe, y las termoeléctricas Endesa y Guacolda, presentan entre un 6 a un 15% de óxidos de hierro, respectivamente.

Según los antecedentes recolectados durante la temporada, la proporción total de partículas emanadas por la CMP de tamaño menor a 1 um corresponde a un 50% del total emanado, partícula que por su tamaño, puede alcanzar grandes distancias a lo largo del valle.

Adicionalmente se observa la presencia de magnesio, calcio y aluminio. En concordancia con lo indicado por INIA en estudio de Tipificación de elementos particulados en el valle de Huasco, el hierro es uno de los elementos de mayor validez diagnóstica, dado que los elementos como el magnesio, calcio y aluminio, son elementos que se encuentran naturalmente en los suelos u otras fuentes contaminantes, lo que impide atribuir sus concentraciones, únicamente al MP emitido por la industria de pellets.

b) Estudio del efecto de la contaminación ambiental por NO₂ y SO₂

En cuanto a la contaminación ambiental por efecto de las termoeléctricas, se realizó un estudio mineral de agua caída en el período de lluvia de octubre del 2011 (Tabla 36).

Tabla 36. Composición de la lluvia caída durante octubre del 2011.

AGUA DE	pH susp.	C.E mS/cm	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	Cl mg/l	Na mg/l	HCO ₃ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l
LLUVIA	6,21	0,20	42,7	20,4	18,8	9,66	10,98	10,42	0,97	2,35

Los resultados indican que el pH de la lluvia es ácido y que entre sus principales componentes se encuentra los iones sulfato y nitrato (SO₄ y NO₃). Al estar esta zona dentro del área de contaminación ambiental por las termoeléctricas, es posible atribuirlo a esas fuentes contaminantes, ya que ellas emiten grandes cantidades de SO₂ y de NO_x, los que se oxidan en el aire para producir ácido sulfúrico y nítrico, respectivamente.

Los niveles de Cl y Na que también se encuentran presentes, son atribuibles al efecto costero y la influencia del mar, más que a una contaminación antrópica.

Durante la segunda fase del proyecto se va a determinar la cantidad y concentración mineral de la gota de neblina que se deposita, principalmente durante los meses de floración.

2.b) Correlación de producción y presencia o interacción con contaminantes.

a) Estudio del efecto de la contaminación por material particulado (MPS).

La contaminación sobre los olivos del material particulado, fierrillo, llegaría por dos vías, por el tren que lo carga y por lo que arrastra el viento desde la chimenea de la planta de pellets, que se dirige desde oeste a este según mapa de depositación entregado en objetivo N° 1 por equipo DICTUC. Por los antecedentes actuales y de estudios anteriores, la partícula que llega desde el tren, no tendría un alcance de más de 250 m (INIA, Tipificación de elementos particulados en el valle del río Huasco, III Región), sin embargo, existe un aporte de material particulado que va por el valle y que en cantidad disminuiría hacia el interior, cuyas partículas pueden ser más finas con un alcance mayor, que el fierrillo que lleva el tren.

i) Suelos

Se procedió a realizar nuevos muestreos de suelos, en aquellos puntos en los cuales los resultados presentaban mucha variabilidad, diferenciando profundidad, dentro y fuera de la taza de manejo. Utilizando toda esta información nueva más la realizada anteriormente, se presentan los siguientes resultados.

En la Figura 89 y Figura 90 se muestran los niveles de hierro en los suelos de los huertos 1 y 2, respectivamente, a diferentes distancias de la línea del tren; cerca (C), medio (M) y lejos (L). En ambos casos se observa que los suelos más cercanos a la línea del tren, presentaban una tendencia a contener más hierro. Este resultado es importante, ya que el factor manejo está aislado al considerarse distintos puntos dentro de un mismo huerto. Cabe señalar que, los valores de hierro fueron mayores en el huerto 1, el cual se encontraba más cerca de la fuente contaminante (industria de pellets) que el huerto 2.

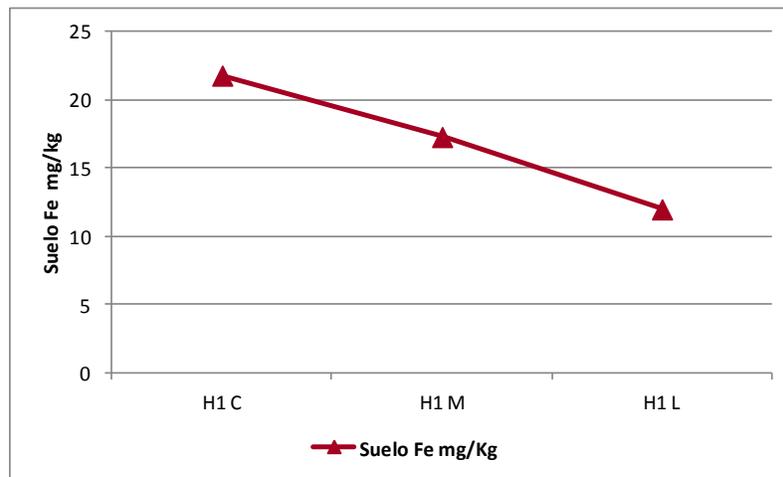


Figura 89. Hierro (Fe) en el suelo del Huerto 1, a diferentes distancias de la línea del tren (C) cerca; (M) medio y (L) lejos.

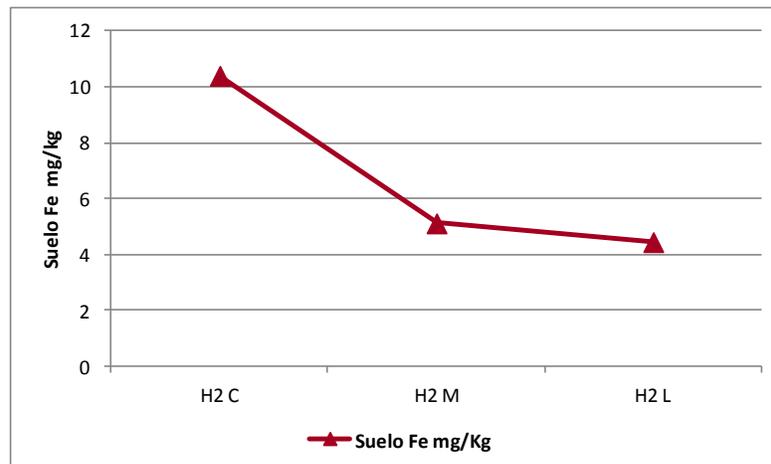


Figura 90. Hierro (Fe) en el suelo del Huerto 2, a diferentes distancias de la línea del tren (C) cerca; (M) medio y (L) lejos.

En la Figura 91 se observa los niveles de hierro en el suelo de los dos huertos (H1 y H2), y los niveles de hierro foliar, sin presentar una relación entre los contenidos del suelo y de las hojas. Esto puede explicarse porque los suelos naturalmente contienen cantidades altas de hierro y, adicionalmente, en pH alcalinos, como los presentes en el valle, el hierro precipita y está menos disponible para las plantas. Por lo tanto, aunque se encuentre en mayor cantidad en el suelo, ya sea en forma total como soluble, no se produce una diferencia en la cantidad absorbida de este elemento por los olivos y por lo tanto no tiene influencia en la nutrición o toxicidad de las plantas.

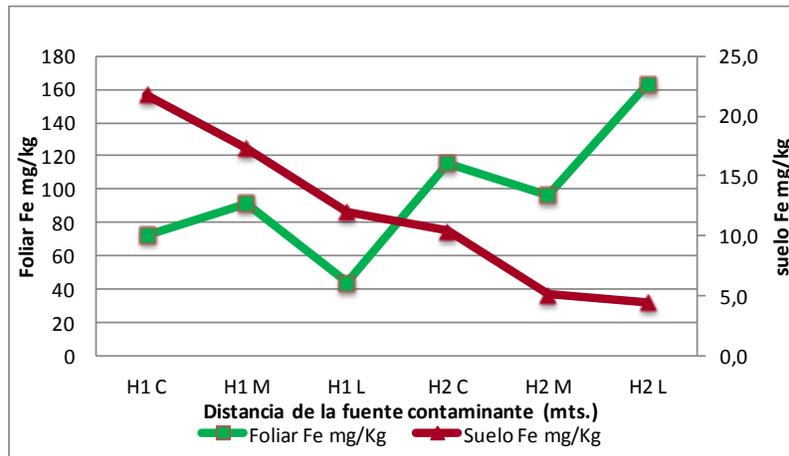


Figura 91. Hierro (Fe) en el suelo y concentración en las hojas de los olivos del Huerto 1 y 2, a diferentes distancias de la línea del tren (C) cerca; (M) medio y (L) lejos.

Respecto a los demás elementos encontrados en el material particulado, éstos no tendrían una respuesta clara a la distancia de la fuente contaminante y responden más bien a los contenidos propios de elementos de estos suelos o a factores de manejo.

Para evaluar el efecto del MP de menor tamaño emitido por las chimeneas y que se dispersa por el viento de oeste a este, se observaron los niveles de hierro en el suelo y en las hojas de seis huertos a lo largo del valle, a diferentes distancias de la fuente contaminante (industria de pellets) y, al igual que lo que se mostró anteriormente, y a lo que indicó el estudio previo del INIA, existe mayor cantidad de hierro en aquellos huertos más cercanos a la fuente contaminante, por lo que se puede atribuir a la contaminación. Sin embargo, se observa también, que esto no se evidencia a nivel de tejido vegetal, lo que indica que no existe absorción de este nutriente ya sea por las raíces o vía aérea, y por lo tanto, no afecta la nutrición o causa daño por ésta vía a las plantas (Figura 92). Adicionalmente se puede indicar, que los niveles de Fe foliar, se encuentran dentro de los valores adecuados para la especie, de 50 a 200 mg/kg.

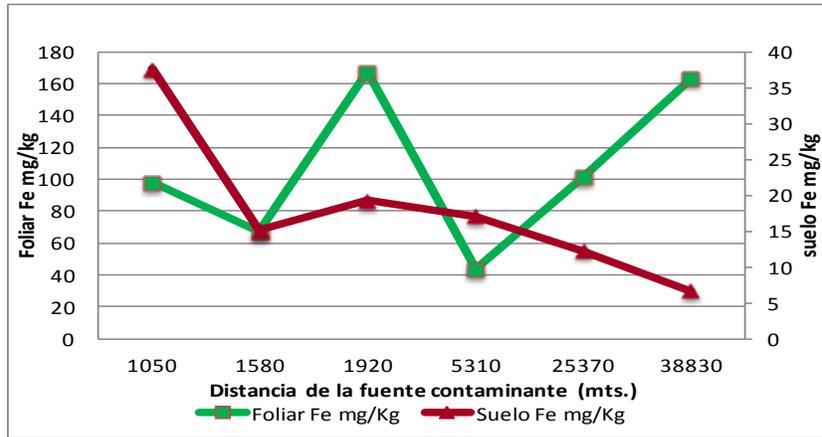


Figura 92. Hierro (Fe) en el suelo y concentración en las hojas de los olivos de diferentes huertos a distintas distancias de la fuente contaminante.

ii) Análisis de tejidos vegetales

En los huertos antes señalados se realizó un estudio del estado nutricional y se evaluó si se encontraba alguna correlación, ya sea positiva o negativa, con el aporte mayor de hierro a los suelos a través del material particulado.

En la Figura 93 se observa el contenido de N, tanto en el suelo como en la planta, viéndose una correlación entre estos dos indicadores, es decir, independiente del nivel de hierro en los suelos, la nutrición nitrogenada responde al suministro de N y por lo tanto, a la absorción por las raíces, la que no se vio afectada por los niveles altos de hierro, sin embargo, los niveles de N en las hojas presentan una tendencia a ser más altos, lejos de la línea del tren, aunque se puede observar una respuesta más asociada al huerto y por lo tanto a su manejo.

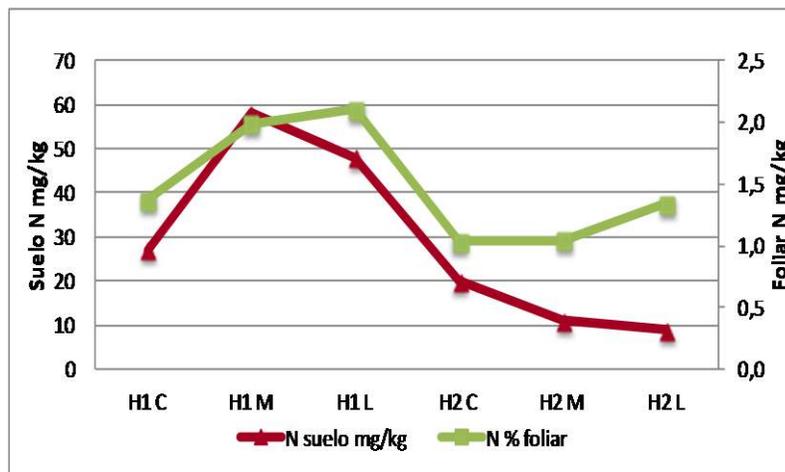


Figura 93. Nitrógeno (N) en el suelo y concentración de N en las hojas de los olivos del huerto 1 y 2, a diferentes distancias de la línea del tren (C) cerca; (M) medio y (L) lejos.

Así mismo, la nutrición con nitrógeno, magnesio y hierro, tienen estrecha relación con la clorofila de las hojas y con ello, con una de las funciones fisiológicas más importantes como es la fotosíntesis, observándose una relación asociada al huerto (Figura 94).

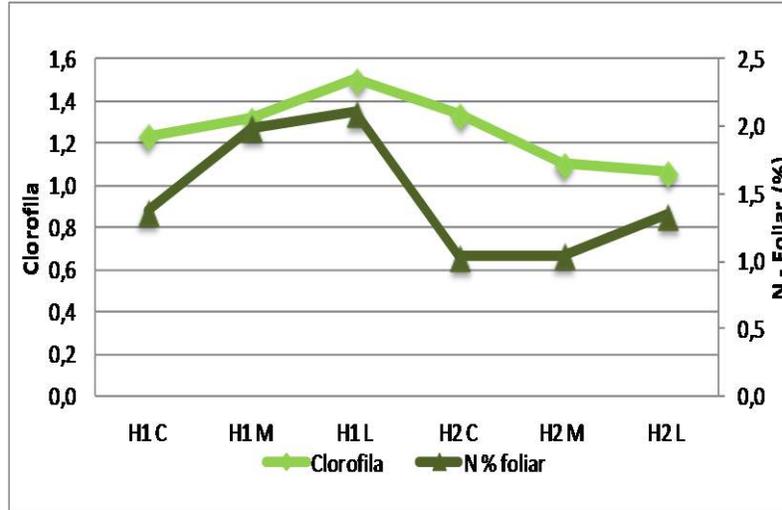


Figura 94. Clorofila y Nitrógeno (N) en las hojas de los olivos del huerto 1 y 2, a diferentes distancias de la línea del tren; (C) cerca (M) medio (L) lejos.

Finalmente, lo que también se relaciona con la nutrición nitrogenada de las plantas y de manera bastante clara, es el contenido de N del suelo y de la materia orgánica que éste contenga, la cual al descomponerse hace disponible el N que contiene (Figura 95).

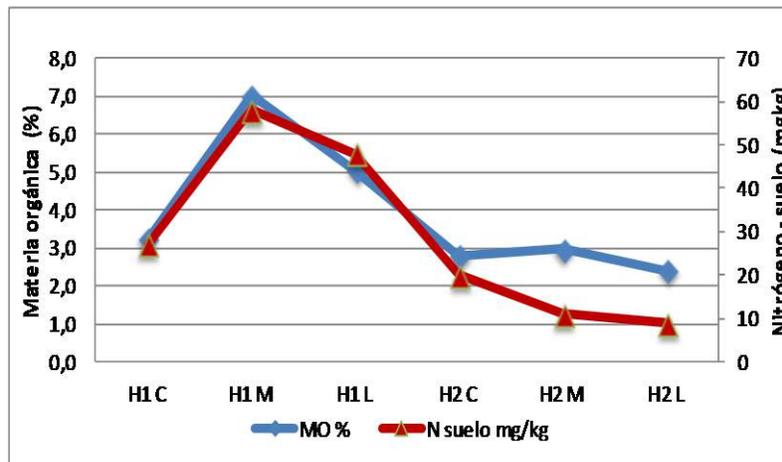


Figura 95. Porcentaje de materia orgánica del suelo y contenido de Nitrógeno (N) disponible en el suelo del huerto 1 y 2, a diferentes distancias de la línea del tren (C) cerca; (M) medio y (L) lejos.

Lo anterior sugiere que la nutrición de los olivos no responde a los contenidos de hierro del suelo y más bien tiene que ver con los suministros de nutrientes que tengan los huertos, lo cual depende de la fertilidad natural del suelo y del manejo de fertilización que

se realice. Se observa en la Figura 96 que hay una relación entre los suministros de fósforo y potasio de los distintos huertos, lo que indicaría que esos suelos han recibido manejos de fertilización diferentes.

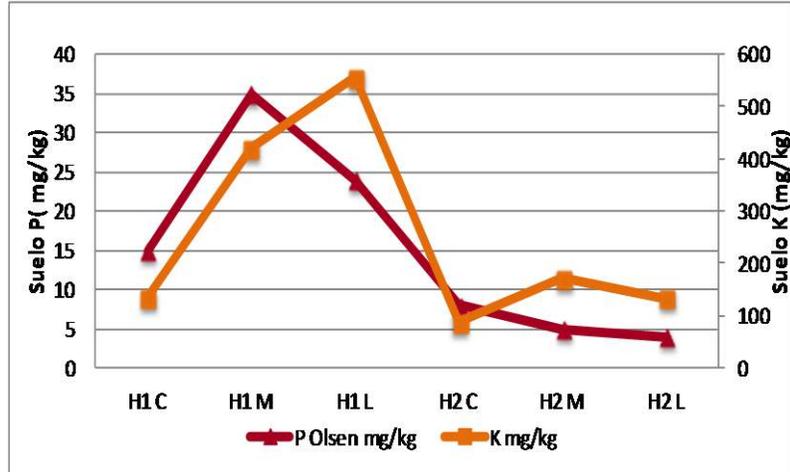


Figura 96. Suministro de Fósforo (P) y Potasio (K) en el suelo de los olivos del huerto 1 y 2, a diferentes distancias de la línea del tren (C) cerca; (M) medio y (L) lejos.

De la misma forma, se observa en la Figura 97 el huerto que presenta una mejor nutrición, coincidiendo en uno de ellos, una mayor concentración de distintos macro nutrientes esenciales, como el potasio y magnesio en las hojas, lo que puede explicarse, por un mejor manejo de la fertilización o mejores condiciones de absorción de nutrientes.

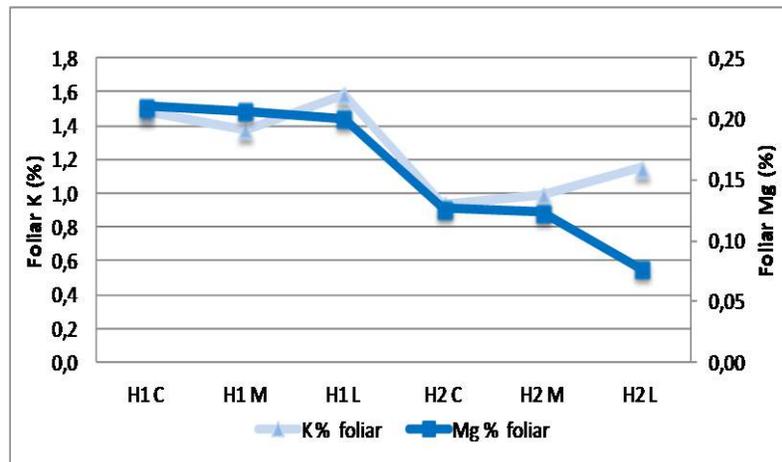


Figura 97. Concentración de Potasio (K) y Magnesio (Mg) en las hojas de los olivos del huerto 1 y 2, a diferentes distancias de la línea del tren (C) cerca; (M) medio y (L) lejos.

iii) Lavado de hojas y frutos

Se lavaron hojas muestreadas de huertos a distintas distancias (5310, 25370 y 38830 m), desde oeste a este, con el fin de determinar la composición del material particulado en la superficie del tejido. Tomando en consideración la composición del material particulado, se observó un mayor contenido de elementos como el magnesio (Figura 98) y calcio (Figura 99) sobre las hojas, en los huertos más cercanos a la fuente contaminante, aunque es importante indicar que los datos presentaron gran variabilidad al tratarse de huertos distintos. Cabe señalar, que el material particulado, contiene ambos elementos aunque a bajas concentraciones. Adicionalmente, el calcio es un elemento que se encuentra en forma abundante en estos suelos, por lo que podría atribuirse también, a otras fuentes tales como el polvo del suelo y procesos que utilizan caliza, lo que concuerda con el estudio de Calidad del Aire en la Comuna de Huasco elaborado por CENMA.

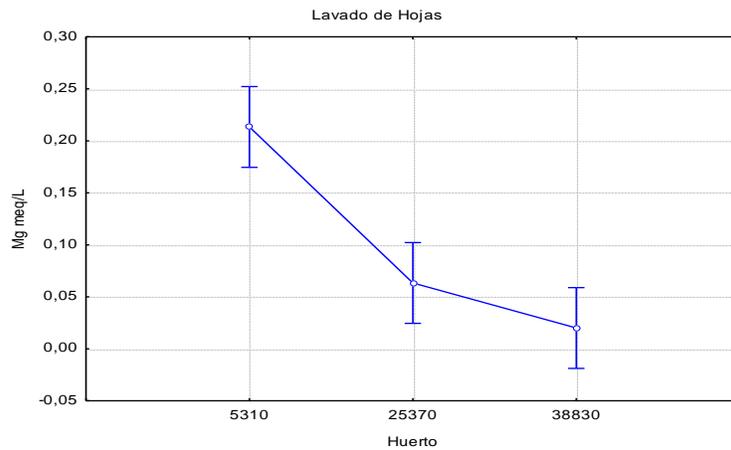


Figura 98. Magnesio (Mg) en aguas de lavado de hojas de huertos a diferentes distancias (m) de la fuente contaminante del material particulado.

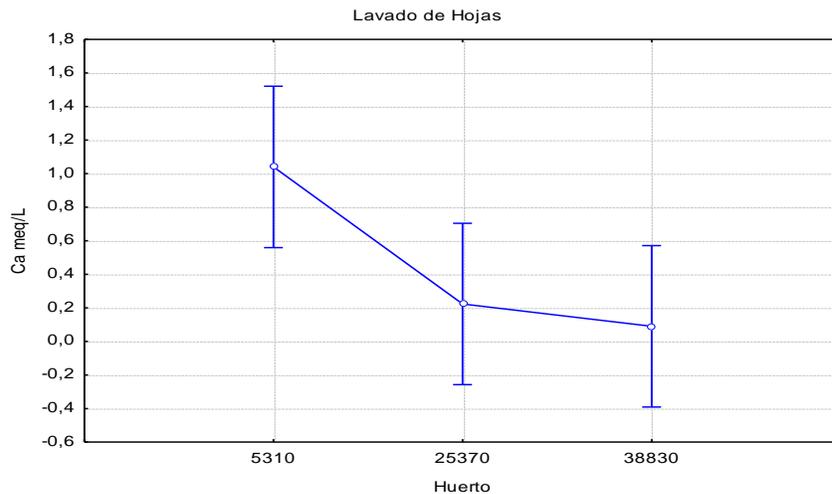


Figura 99. Calcio (Ca) en aguas de lavado de hojas de huertos a diferentes distancias (m) de la fuente contaminante del material particulado

El principal elemento del material particulado es hierro, por lo cual en las aguas de lavado de hojas se esperaba encontrar principalmente este elemento, sin embargo en un primer muestreo, no se observó una relación significativa entre el contenido de hierro superficial de la hoja con la distancia a la fuente contaminante. Cabe señalar que, los resultados presentaron gran variabilidad y por lo tanto impedían relacionar los niveles de hierro con la distancia a la fuente contaminante (Figura 100).

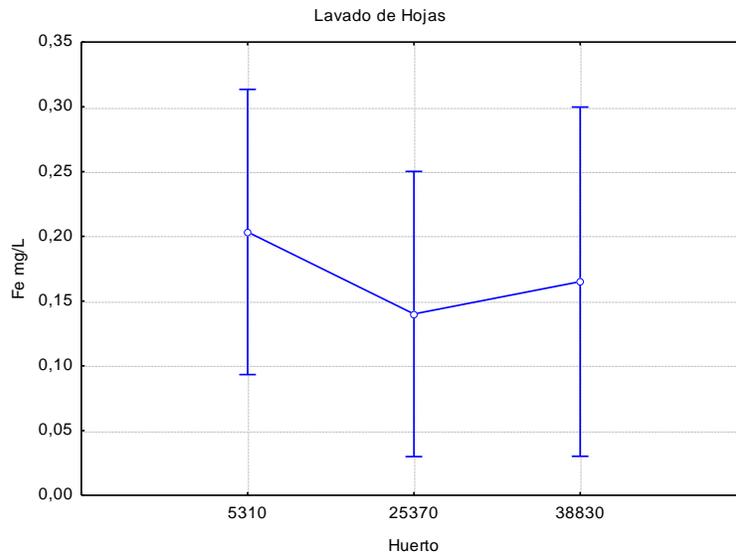


Figura 100. Hierro (Fe) en aguas de lavado de hojas de huertos a diferentes distancias (m) de la fuente contaminante del material particulado.

Por esta razón se realizó un nuevo muestreo de hojas y frutos, dentro del huerto (en relación a la línea del tren) y entre huertos (en relación a la planta de pellets), específico para determinar hierro, con mayor número de repeticiones.

iv) Lavado de hojas dentro del huerto – relación línea férrea

Nuevamente los resultados concuerdan con lo obtenido inicialmente, en que el huerto 1, cerca de la línea del tren, presenta una mayor concentración de hierro en el agua de lavado de las hojas, que lo observado lejos de la línea férrea, siendo aproximadamente el doble (Figura 101). Sin embargo no se repite esta situación en las hojas del huerto 2, pudiendo deberse a; condiciones de viento que puedan dispersar en mayor medida la partícula de hierro y con ello diluir su efecto en el aire, plantas más pequeñas y de tamaño de hojas también menor, con una consiguiente menor superficie de contacto, entre otros. Por otra parte, la cantidad de Fe que llega a las hojas en el huerto 2, es significativamente menor que en el huerto 1 (H2; 0,21 y H1C; 0,78 H1L; 0,43).

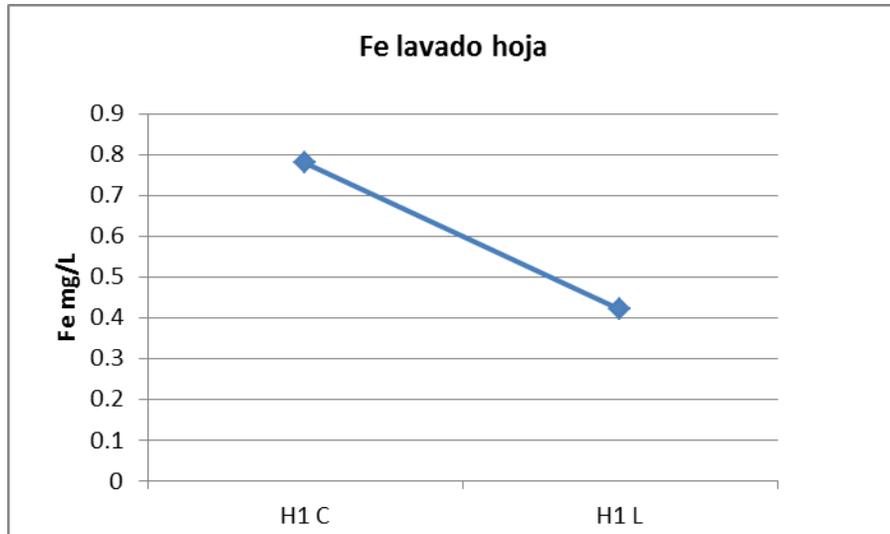


Figura 101. Contenido de Fe (mg/L) en agua de lavado, en plantas ubicadas cerca (H1C) y lejos (H1L) de la línea del tren.

v) Lavado de hojas – relación planta pellets

En este caso, los puntos P1 (cercano a la planta de pellets) y el P4, que presenta evidentes problemas de mal drenaje y salinidad, con menor densidad de follaje (huertos a 5 y 6.2 km de la planta de pellets, respectivamente), impiden sacar conclusiones respecto a que pueda existir mayor contenido de Fe en las aguas de lavado, de más cerca a más lejos de la contaminación (Figura 102). Sin embargo, habría que analizar más en detalle si estos huertos presentan algún tipo de protección a la contaminación por material particulado fino, ya sea que la dirección o velocidad del viento, impidan que se depositen en mayor cantidad las partículas, presencia de una barrera natural que los proteja, entre otros. En tal caso, se podrían obviar estos dos puntos y abrir la posibilidad de que existiera una relación entre una mayor acumulación de material particulado fino sobre las hojas, respecto de la cercanía a la planta de pellets.

Dado que el tejido de la hoja se encuentra en el árbol por mucho mayor tiempo que el del fruto, se puede explicar que en este tejido se acumule una mayor cantidad de partículas más finas, en una magnitud que es posible de detectar en un simple lavado del tejido, como lo que se ha observado en este estudio.

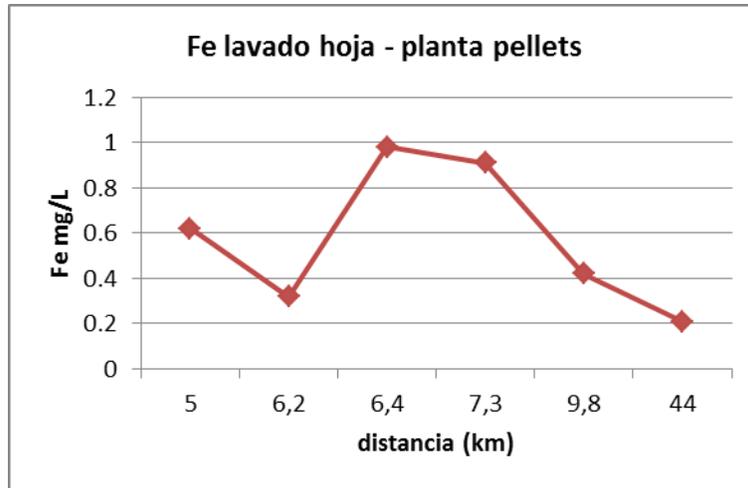


Figura 102. Contenido de Fe en agua de lavado, en plantas ubicadas cerca y lejos de la planta de pellets.

Cabe destacar que se debe continuar estudiando el factor de manejo que pueda estar afectado la interpretación de los resultados, especialmente, aquellos huertos que se encuentran cercanos a la fuente contaminante y con una baja concentración de Fe en la superficie de las hojas.

vi) Lavado de frutos entre huertos – relación línea férrea

Al muestrear frutos cerca y lejos de la línea del tren en huertos diferentes, se observa que fue mayor el contenido de elementos como el magnesio (Figura 103), el calcio (Figura 104) y aluminio (Figura 105) en los puntos cercanos a la línea férrea, presentándose una clara diferencia estadística. Cabe destacar que estos tres elementos, aunque a bajas concentraciones, se encontraban presentes en la composición química del material particulado emanado por el transporte de pellets.

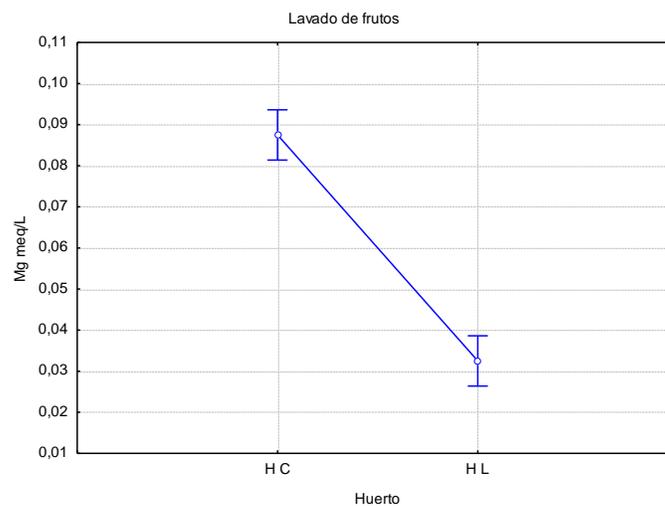


Figura 103. Magnesio (Mg) en aguas de lavado de frutos de 4 huertos cerca (C) y lejos (L) de la línea tren.

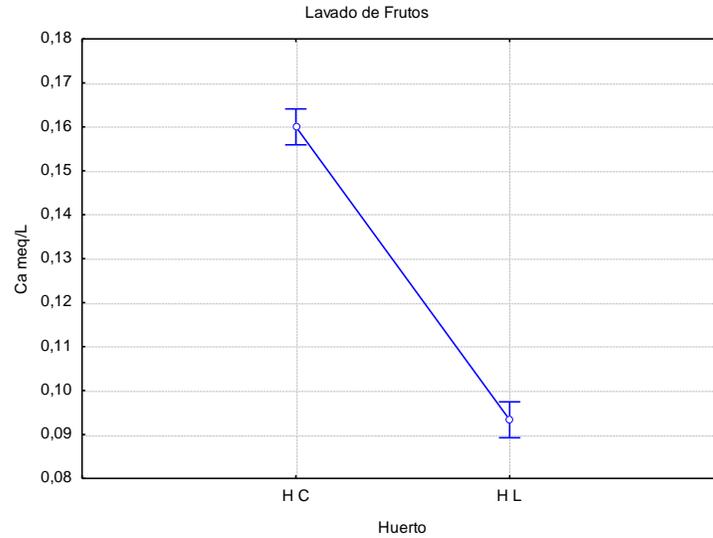


Figura 104. Calcio (Ca) en aguas de lavado de frutos de 4 huertos cerca (C) y lejos (L) de la línea del tren.

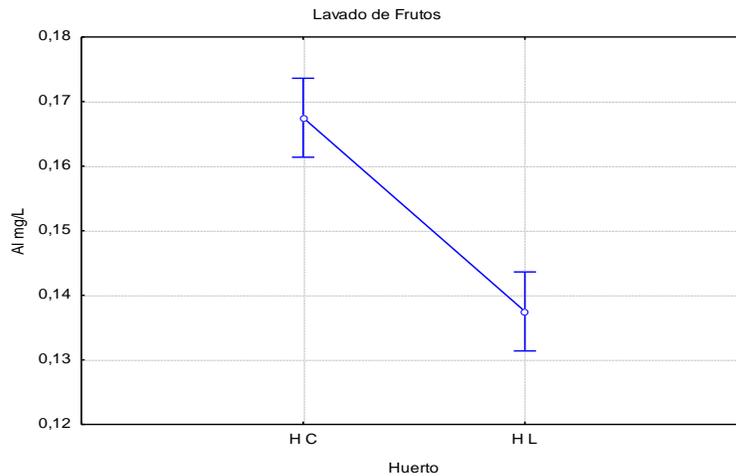


Figura 105. Aluminio (Al) en aguas de lavado de frutos de 4 huertos cerca (C) y lejos (L) de la línea del tren.

En el caso de los resultados respecto del hierro en la superficie de los frutos, se observó que existen diferencias estadísticas entre los que se encuentran cerca y lejos de la línea del tren en el huerto H2, en muestras recolectadas en Julio de 2011 (Figura 106). Este resultado es consistente con lo observado en el contenido de hierro en los suelos cercanos a la línea, presentados previamente.

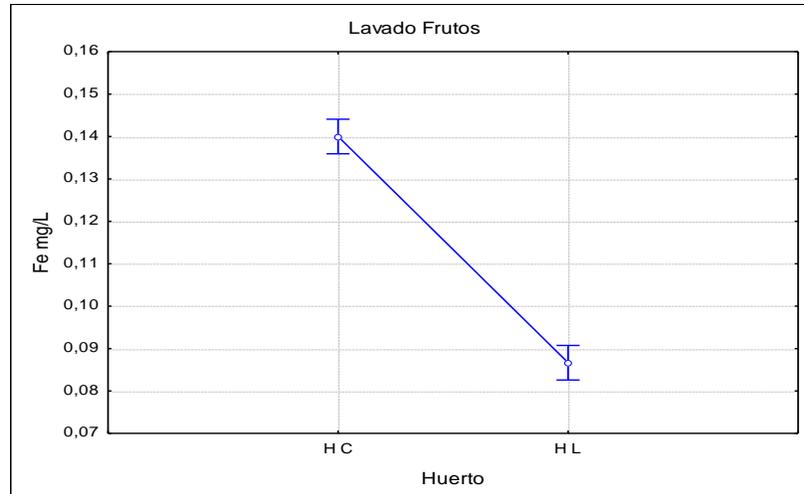


Figura 106. Hierro (Fe) en aguas de lavado de los huertos cerca (C) y lejos (L) de la línea del tren.

De todas maneras se realizaron dos muestreos adicionales de frutos en dos huertos H1 y H2, cerca y lejos de la línea del tren, con mayor número de repeticiones, durante el mes de enero, de tal forma de tener más representatividad.

Los resultados del lavado de frutos adicionales, mostraron que en el caso del lavado de frutos dentro de un mismo huerto, existe consistencia en que la cantidad de Fe cerca de la línea del tren es mayor que lejos de ésta (Figura 107).

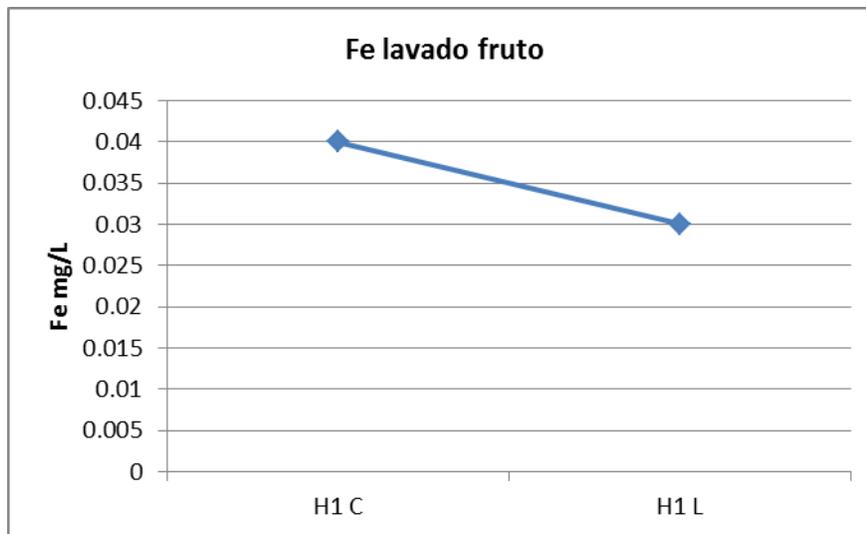


Figura 107. Contenido de Fe en agua de lavado de frutos, en plantas ubicadas cerca (H1C) y lejos (H1L) de la línea del tren, recolectados en enero.

En el caso del huerto 1 ocurre lo mismo que con el lavado de las hojas en que cerca de la línea del tren, los tejidos superficiales de los frutos, retienen más Fe que lejos. En el huerto 2, las hojas no muestran esa diferencia, pero sí los frutos (Figura 108). Como se mencionó anteriormente, H2 es un huerto de características de tamaño de los árboles y densidad foliar distintas, lo que podría explicar este resultado.

Se destaca que en ambos casos y concordante con los estudios iniciales, los frutos, que son los que se procesan, presentan mayor cantidad de Fe cerca de la línea férrea.

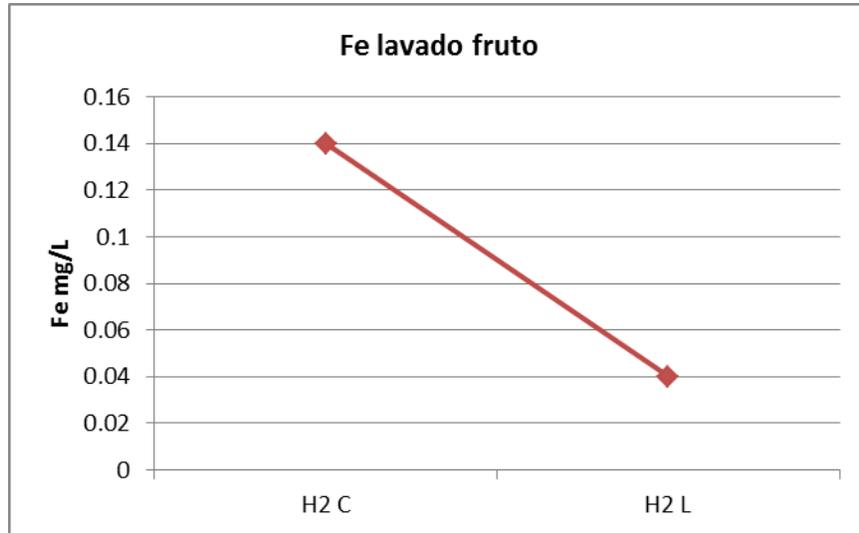


Figura 108. Contenido de Fe en agua de lavado de frutos, en plantas ubicadas cerca (H2C) y lejos (H2L) de la línea del tren.

vii) Análisis de pulpa de frutos

Por otra parte, al medir el contenido de hierro en la pulpa de los frutos, éste no fue diferente entre los que estaban cerca y lejos de la línea del tren, tal como se muestra en la Figura 109. Esto indica que la depositación del hierro en los frutos es por el aire (material particulado suspendido) y queda en la superficie de los tejidos, sin ser absorbido por raíces o los tejidos aéreos, es decir no penetra dentro del fruto. Por lo tanto, corresponde a lo que se deposita sobre el tejido durante su periodo de crecimiento, que para el caso de los frutos, es de aproximadamente 7 meses.

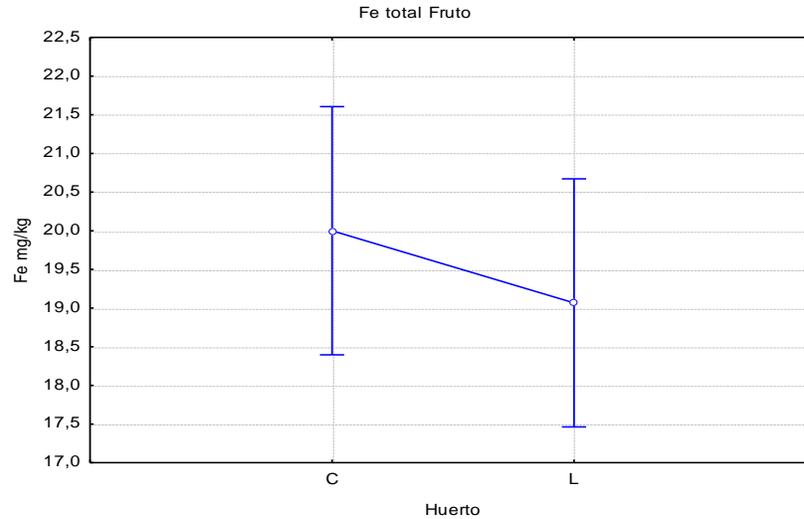


Figura 109. Hierro (Fe) total en pulpa de 4 huertos cerca (C) y lejos (L) de la línea del tren.

El análisis de la pulpa de los frutos se muestra en la Tabla 37, en que se ve que el hierro dentro de los frutos no tiene relación con la cercanía a la línea férrea en el huerto 1 y 2.

Tabla 37. Análisis de los componentes de la pulpa en frutos del huerto H1 y H2 cerca (C) y lejos (L) de la línea férrea.

Huerto	Al mg/100g	Ca mg/100g	Mg mg/100g	Fe mg/100g
H1 C	0,28	33,6	13,7	0,49
H1 L	0,46	24,8	13,5	0,46
H2 C	0,15	16,8	11,5	0,88
H2 L	0,54	48,1	15,4	1,18

viii) Lavado de frutos – relación planta pellets

En el caso del lavado de frutos, respecto de la planta de pellets, no se ve un patrón de comportamiento del contenido de Fe, que se explique por la distancia a la planta (Figura 110 y Tabla 38). En este caso, es distinto a lo que ocurre con las hojas, lo que se puede explicar, porque estas partículas finas no logran acumularse en el tiempo en que se encuentra el fruto en el árbol, en una magnitud tal que pueda ser detectado en el lavado. En el caso de las hojas, éstas permanecen más de un año por lo que pueden retener mayor cantidad de partículas.

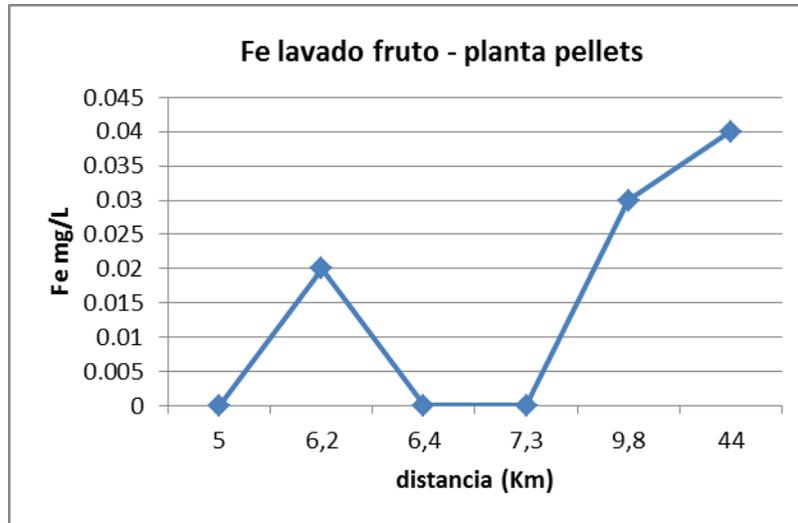


Figura 110. Contenido de Fe en lavado de frutos, en plantas ubicadas cerca y lejos de la planta de pellets.

Tabla 38. Análisis de frutos de distintos huertos ordenados desde más cerca a más lejos de la planta de pellets.

Distancia a las fuentes (km)	Al mg/100g	Ca mg/100g	Mg mg/100g	Fe mg/100g
5,0	0,34	42,1	14,2	0,66
6,2	0,40	40,5	17,0	0,53
6,4	0,27	35,1	16,9	1,05
7,3	0,32	30,8	14,6	0,66
9,8	0,46	24,8	13,5	0,46
44,0	0,54	48,1	15,4	1,18

El lavado de hojas indicó, que existe mayor cantidad de hierro en aquellas cercanas a la línea férrea, pero no concluyó respecto a su relación con la planta de pellets, en que se estaría midiendo el material particulado más fino depositado. En el caso de los frutos, presentaban mayor cantidad de hierro en superficie aquellos cercanos a la línea del tren, pero tampoco se manifestó una relación de acuerdo a la distancia a la planta de pellets. El material particulado recogido con las aguas de lavado, contenía aluminio, calcio, hierro y magnesio, que están entre los elementos más abundantes en el material particulado sedimentable³⁰. Por último la composición de la pulpa de los frutos, no tuvo relación con la distancia de éstos a la línea férrea ni a la planta de pellets, lo que permite concluir que el material queda en la superficie y no penetra dentro de las hojas o los frutos (Tabla 38).

Se espera continuar con el monitoreo en la segunda etapa del proyecto, cuando se tengan las cosechas de esta temporada para mayor representatividad y aislando el factor manejo o condición de huertos que podría estar interfiriendo en los resultados.

³⁰ Ver reporte de la actividad 1.g) en este mismo Informe Final.

b) Estudio Anatómico

Una forma de evaluar los efectos de la contaminación ambiental es a través del estudio de las partículas que generan la contaminación, en cuanto a su tamaño, morfología y composición química (Aragón et al., 2006) y por otro lado a través de la anatomía de los tejidos vegetales expuestos a la contaminación (Graciano, et al., 2003; Sant Anna, et al., 2006; Bruno et al., 2007).

i) Características del Material particulado

En trabajos realizados en México, en una zona sometida a contaminación minero-metalúrgica, se estudiaron las partículas contaminantes, tanto su composición química como su tamaño y morfología, utilizando microscopía electrónica. Se encontraron varios tipos de partículas con un metal pesado dominante, lo que permitió su clasificación en partículas ricas en hierro, cobre, aluminio y otros. En el caso de Huasco se utilizó la misma metodología, determinándose que la composición química del material particulado contenía aluminio, calcio y el metal hierro. Este material se vio en el microscopio electrónico con distintos aumentos, lo que se observa en la Figura 111.

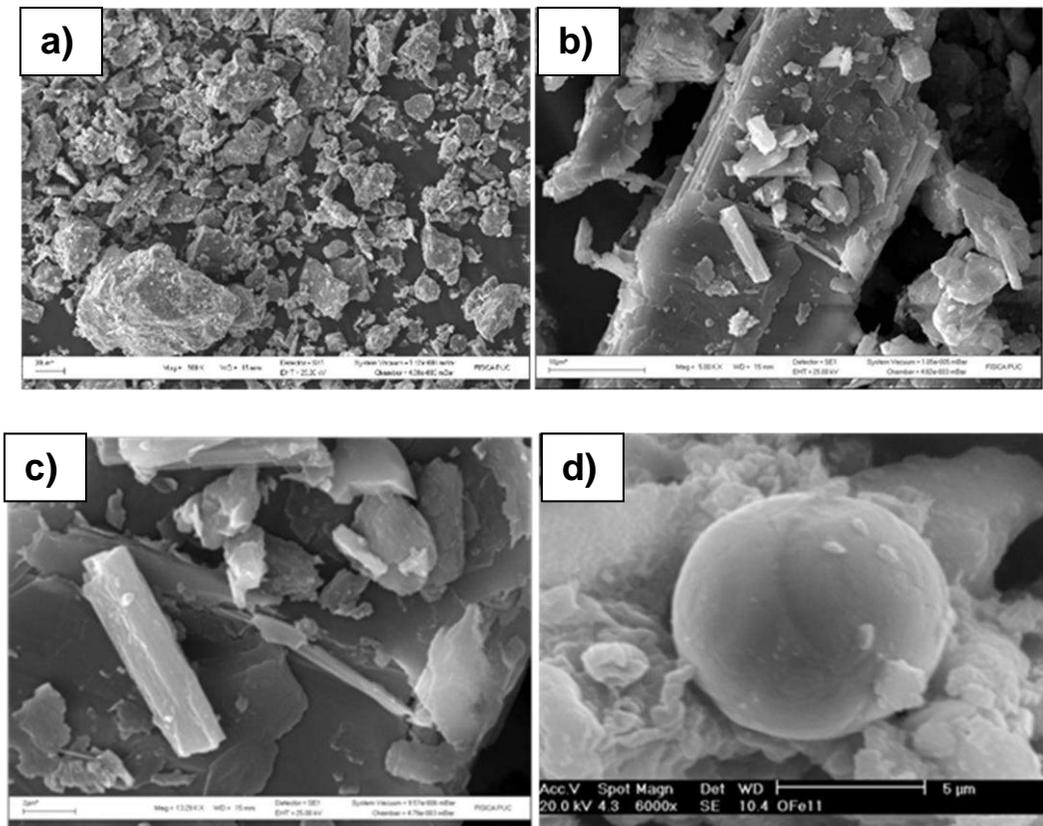


Figura 111. Partículas de fierrillo del Valle de Huasco (a) 500 veces aumento, b) 5000 y c) 13000; d) partículas de óxido de Fe en estudio contaminación de México aumento 6000 veces (barra de dimensión, fig a. 30um, b.10um, c. 2um y d. 5um)

Como se ve en la Figura 111, existen partículas de distintos tamaños de fierrillo, algunas de ellas miden más de 30 μm y algunos menos de 2 μm . Por otra parte, cabe indicar que los estomas, que son las aperturas presentes sobre las hojas, que conectan los tejidos internos con el ambiente externo, presentan dimensiones entre 5 y 15 μm , lo cual ya ha sido caracterizado hace muchos años por Willard, (1937). De acuerdo a estos antecedentes existen partículas de fierrillo que por su tamaño, podrían ingresar vía estomas al interior de las hojas.

Al realizar los análisis del tejido interno de las hojas, no se detectó fierrillo dentro de ellas, sin embargo, al lavarlas sí se detectó fierrillo en superficie, es decir, partículas que no ingresaron vía estomas al interior del tejido y se acumularon por fuera, a pesar que algunas por su tamaño podrían haber entrado. Se procedió entonces a estudiar detenidamente los tejidos foliares, con el fin de dar respuesta a lo anteriormente mencionado.

ii) Estudio anatómico de los tejidos vegetales (olivos)

En la Figura 112, se presenta un corte de hoja de olivo *Olea europaea* (Lakusic et al., 2007), en condiciones normales donde se distinguen la epidermis superior, parénquima en empalizada, parénquima esponjoso y epidermis inferior que permite caracterizar y comparar morfológicamente hojas de olivo.

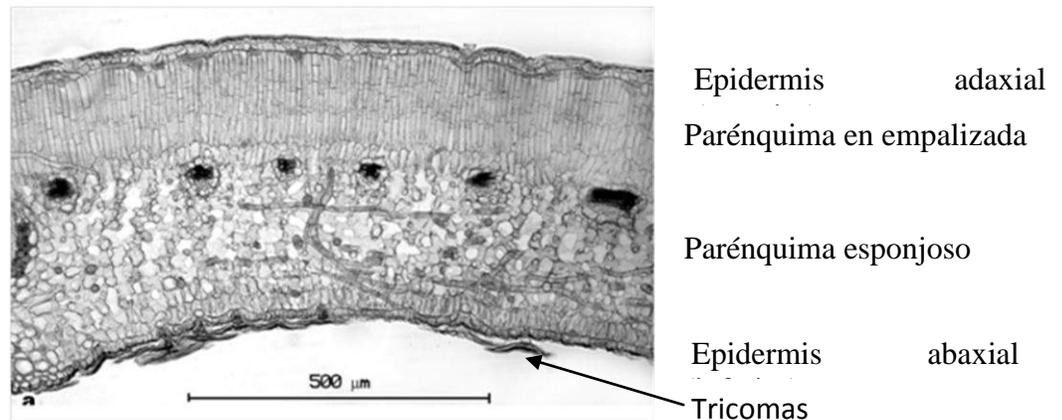


Figura 112. Corte transversal de hoja *Olea europaea*. Lakusic et al., 2007.

Los estomas se encuentran principalmente en la cara inferior de la hoja, ya que en la cara superior existen elementos de protección como cutina, ceras y otros. Se observan estructuras en el inferior de las hojas de olivo, que no son estructuras que se presenten en todas las hojas, sólo en algunas especies en las cuales las plantas han requerido mecanismos de protección adicionales, como por ejemplo en zonas áridas, en que la planta se resguarda de la iluminación excesiva, de las altas temperaturas y de no perder agua, cuando ésta es escasa. En el presente estudio se tomaron muestras de hojas en huertos de olivos del valle de Huasco, para estudiar la epidermis superior e inferior, a través de microscopía electrónica, lo que se muestra en la Figura 113.

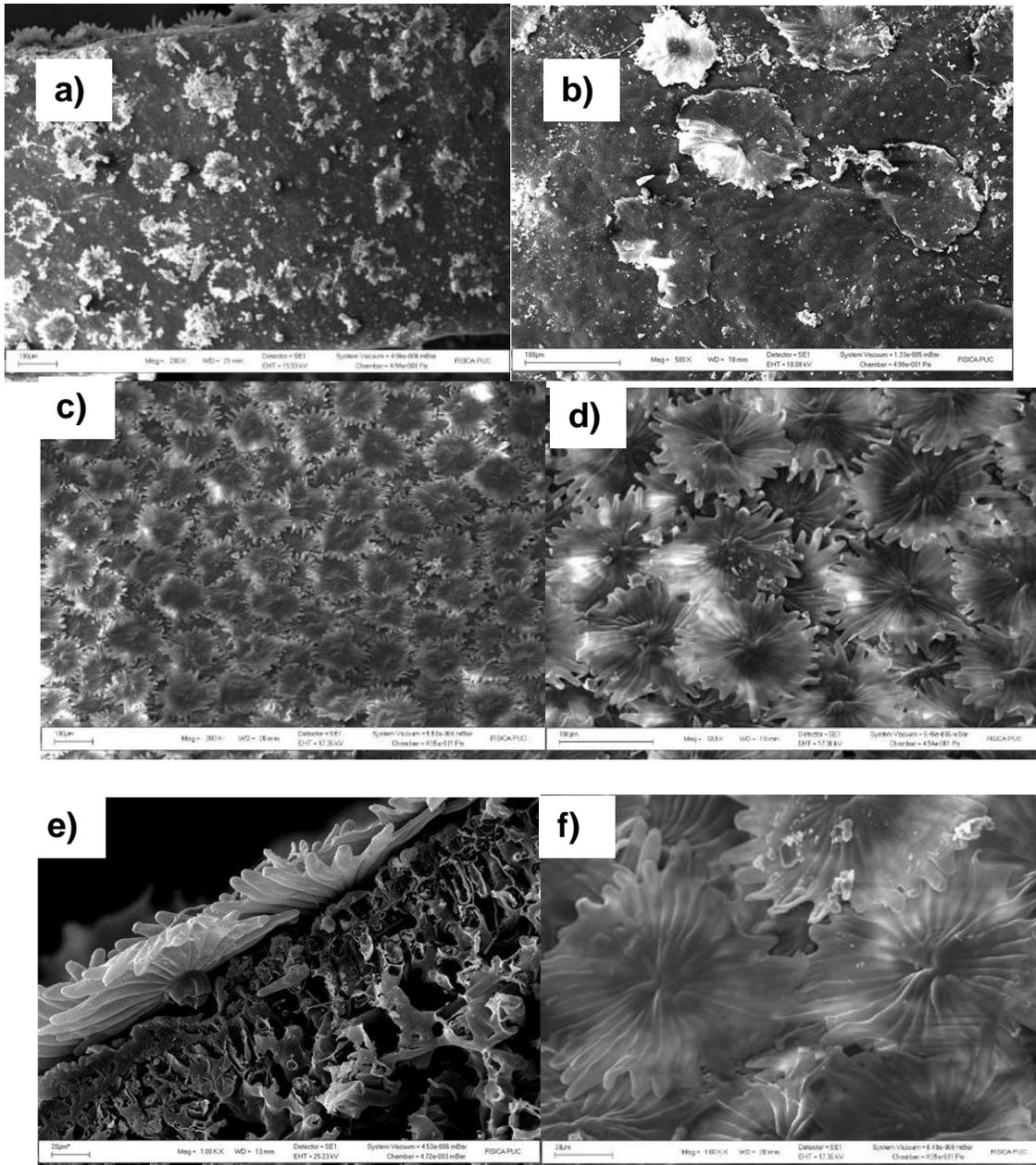


Figura 113. Cara superior de hojas de olivo con presencia de tricomas (a) 200 X (aumento) b) 500 X. (c) Cara inferior de hojas de olivo 200 X (d) 500 X (e y f) 1000 X.

En la cara superior de la hoja Figura 113 (a y b), no se aprecian estomas, a su vez se observan algunos tricomas y una superficie que presenta ceras, cutina y otros elementos de protección, sumado a algunas partículas, de polvo u otros. En la cara inferior de la hoja, (c y d), utilizando los mismos aumentos de la cara superior, se observa una capa densa de tricomas, bajo los cuales se debieran encontrar los estomas. Por último en la figura (e y f) con un aumento de 1000 veces, se observa de mejor forma la densa capa de tricomas, que retienen partículas sobre el tejido, haciendo difícil su penetración por los estomas.

Con el fin de comparar las hojas de olivo con otras del lugar, se muestrearon hojas de una maleza, cercana a la línea del tren, lo que se observa en la Figura 114.



Figura 114. Cara inferior de la hoja de una maleza muestreada cerca de la línea férrea, izq. 1500 X y derecha 5000X.

Se observa en la hoja de la maleza, la presencia de estomas en la cara inferior, sobre los cuales se presentan partículas que en algunos casos, como en la figura de la derecha, causarían un daño al entorpecer la actividad del estoma. Con esto se muestra la diferencia que existe con las hojas del olivo, las cuales están muy protegidas por la capa de tricomas, en la cara inferior donde se encuentran los estomas.

Silva et al., (2001) señalan que así como la pubescencia (presencia de tricomas), es necesario estudiar otras variaciones en la anatomía del tejido fotosintético como su grosor, grosor de la cutícula, presencia de ceras, N° y posición de los estomas, espesor de los parénquimas, entre otros, ya que representan las distintas adaptaciones que las plantas presentan para sobrevivir y adecuarse al medio ambiente.

En el presente estudio para verificar si existían cambios morfológicos de las estructuras vegetales atribuibles al material particulado o toxicidad por elementos contaminantes, se realizó un estudio anatómico, recolectando de cada sitio muestras de hojas en los puntos de mayor concentración de material particulado y muestras control.

En la Figura 115 se presenta un corte transversal de una hoja de olivo sana, recolectada lejos de la fuente contaminante (muestra control), con la misma organización y estructuras detalladas previamente. Se puede distinguir la epidermis, que está formada por una capa de células vivas, donde además existen ceras y cutina. Luego el parénquima en empalizada, el esponjoso y en la parte inferior la epidermis abaxial, en el envés de la hoja, lugar donde se encuentra la mayor parte de los estomas que son los responsables del intercambio gaseoso (fotosíntesis) y de la transpiración (regulación de temperatura de la planta).

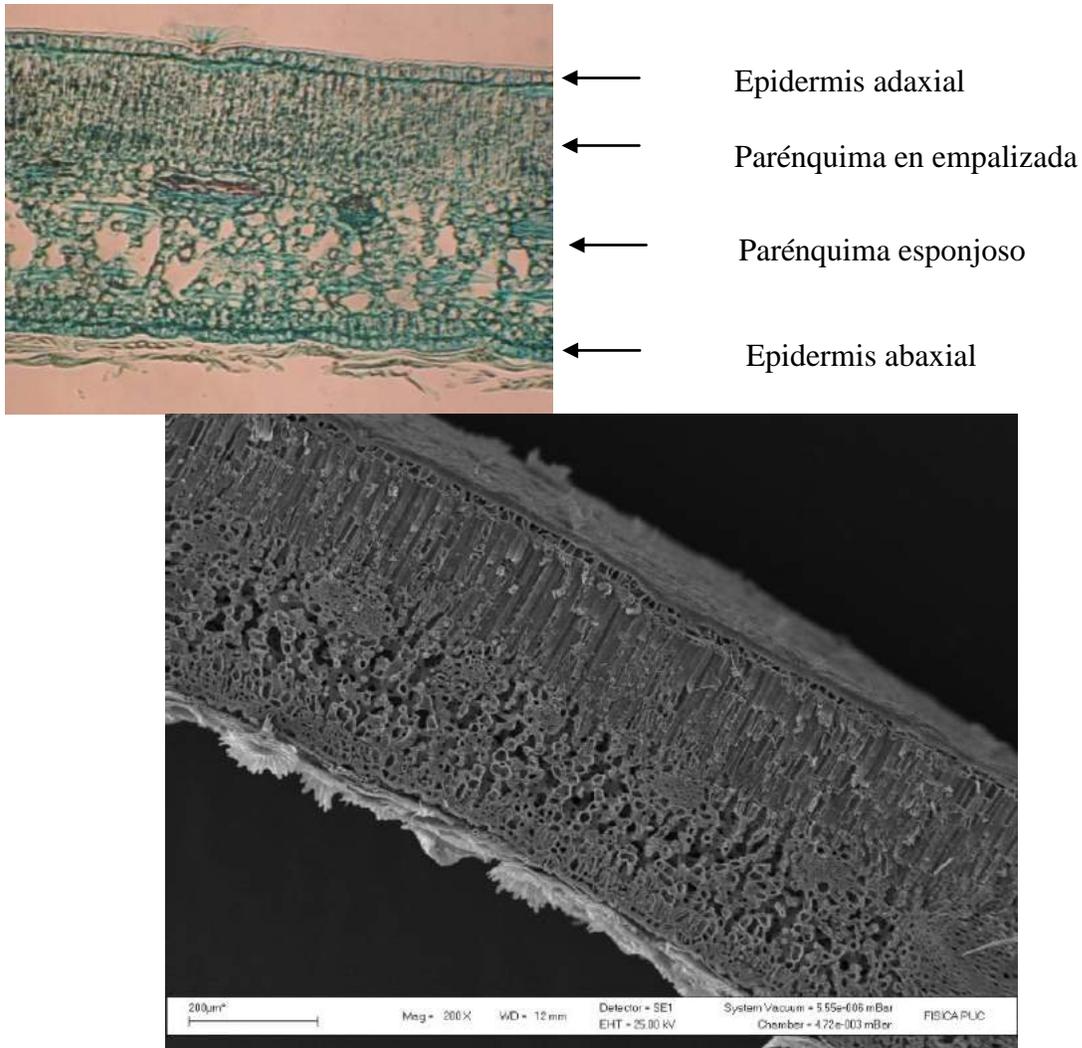


Figura 115. Corte transversal de hoja de olivo *Olea europaea*. Arriba Microscopia de luz; abajo Microscopia electrónica, 200X.

En terreno se obtuvieron muestras de hojas ubicadas cerca y lejos de la fuente de contaminación por MP en los cuales se observó evidente presencia de elementos de color negro sobre las hojas. Estas muestras fueron recolectadas y fijados para su posterior estudio con microscopia electrónica y convencional. En la Figura 116 se verificó la presencia de estructuras ajenas al tejido de una hoja sana, por lo que se continuó evaluando estas partículas para identificación.



Figura 116. Corte transversal de hojas de olivo recolectadas cerca de la fuente contaminante.

Una vez realizado el estudio anatómico mediante microscopía convencional, se pudo distinguir la presencia de un hongo sobre la hoja, en un estado inicial de infección (A) y un estado más avanzado, donde se ve la penetración del hongo a través de los tricomas, hacia el parénquima de la hoja (B) (Figura 117).

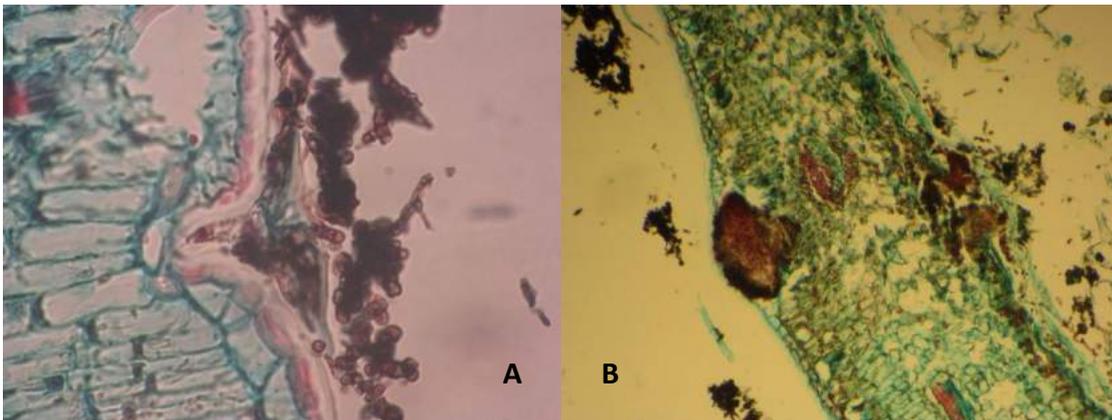


Figura 117. Corte transversal de hojas de olivo recolectadas, infección inicial del hongo (A) e infección avanzada con daño celular evidente (B).

Por otra parte, estas muestras se observaron bajo microscopía electrónica de barrido, en las cuales se pudo observar una alta cantidad de estructuras que pueden asociarse a hifas, principalmente en el envés de la hoja. También se observó estructuras de hongos en el interior de la hoja, provocando un daño severo tanto en el parénquima esponjoso como en el de empalizada, tal como se ve en la Figura 118. Se pudo observar la presencia estructuras tanto en la superficie (Figura 118.A) como en el interior de la hoja (Figura 118. B, C y D).

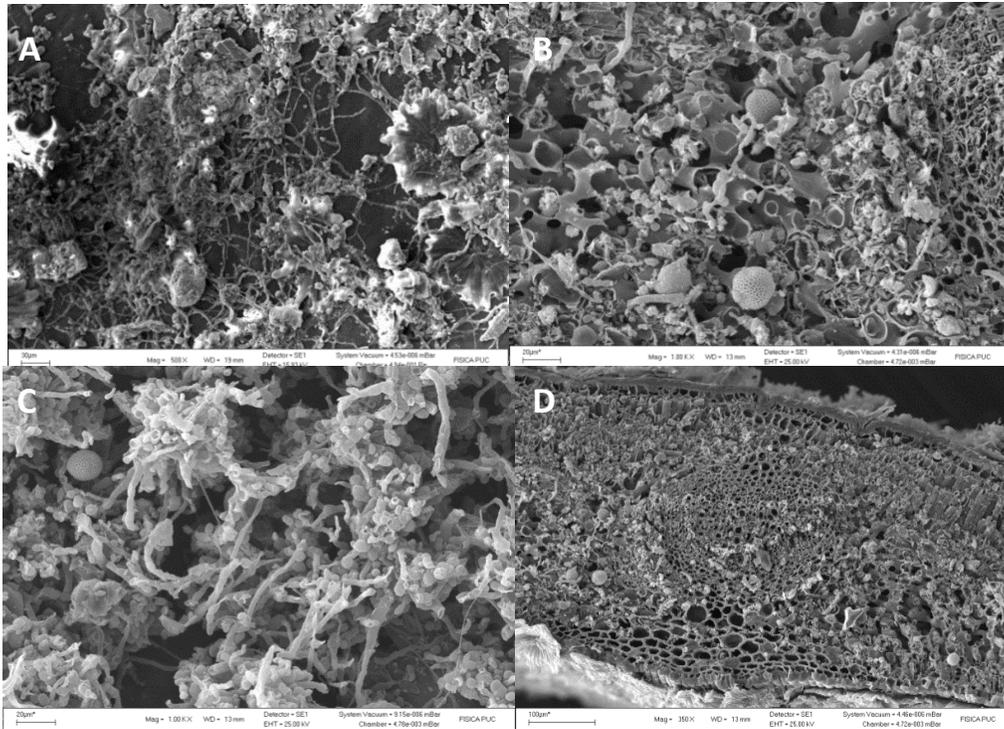


Figura 118. Hojas de olivo con presencia de hongos en distintos estados de la infección. A: zona adaxial; B: zona abaxial; C: parénquima esponjoso con estructura de hongo; D: corte transversal. Microscopía electrónica de barrido.

iii) Estudio anatómico de los tejidos conductores o haces vasculares de las hojas

Se recolectaron hojas en sitios ubicados cerca y lejos de la fuente de contaminación, obteniendo tejidos similares sin detectar cambios evidentes en sus estructuras.

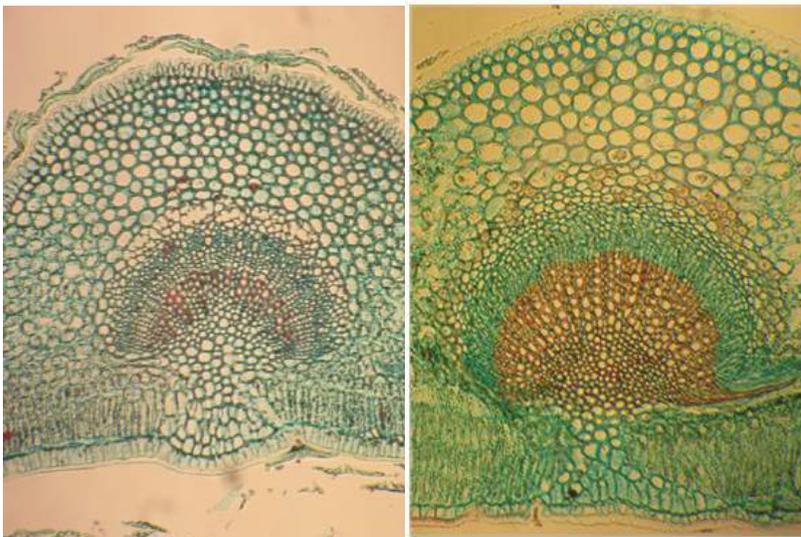


Figura 119. Estudio de tejidos conductores en hojas (izquierda) de sitios lejanos a la contaminación y (derecha) sitios muy cercanos a la contaminación.

iv) Estudio anatómico de flores

Se recolectaron yemas y flores de sitios cercanos a la contaminación y lejanos, sin observarse cambios o daños que permitieran concluir una relación entre la contaminación y la anatomía de estos tejidos, Figura 120.

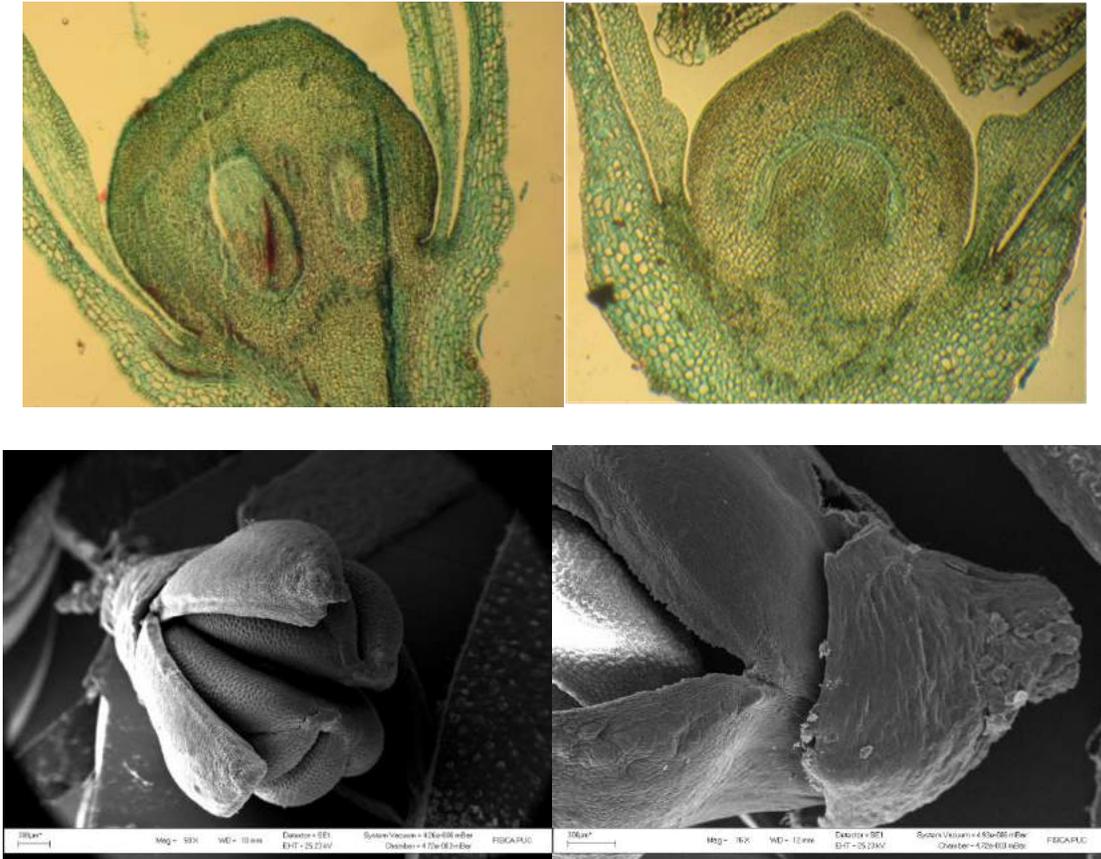


Figura 120. Flores sin diferencias detectables por efecto de la contaminación por fierrillo.

Finalmente, se realizó un estudio en lupa, de hojas de olivo provenientes de zonas donde se acumulaba el fierrillo, el cual se veía a simple vista. Se pusieron bajo lupa, sin someterlas a ningún lavado. Se observaron hojas tal cual estaban al momento de recolectarlas y a una parte de ésta, se le removió la primera capa de tejido, tal como se ve en la Figura 121.



Figura 121. Hoja de olivo sometida a acumulación de fierrillo. Arriba con extracción de primera capa de tejido y abajo, sin remoción.

Los tricomas se presentan de color plumizo claro, los colores más oscuros, corresponden al material particulado de hierro; al remover la primera capa de tejidos, se puede observar tejido intacto, sin tricomas, bajo el cual se encuentra el color de la clorofila, sin presencia de polvillo, demostrando que las partículas quedaban sobre estas estructuras, con poca facilidad de entrar al tejido.

c) Mediciones de Fotosíntesis

En el valle en estudio existen condiciones climáticas favorables para el cultivo de los olivos. Respecto de la planta, la productividad dependerá de la superficie foliar disponible y de la funcionalidad de dichas hojas. A medida que aumenta la intensidad luminosa, aumenta la tasa fotosintética hasta que se alcanza la saturación. El intercambio de gases a nivel de la hoja (O_2 , H_2O y CO_2) se realiza a través de los estomas, su apertura y cierre está regulado por la planta, en función de factores internos y ambientales.

La fotosíntesis en los olivos, puede verse disminuida porque las hojas no puedan interceptar la luz, en la parte en que se encuentran los estomas (envés o parte inferior de la hoja), ya sea porque se cubren de polvo o cualquier película que no permita su apertura o por cualquier sustancia que le haga daño al tejido.

Existen estudios como los de Farmer (1993), que señalan que el polvo puede afectar la fotosíntesis, la transpiración y permite la penetración de gases fitotóxicos. Se ha estudiado, el efecto del polvo que produce la industria del cemento, en distintos cultivos como arroz y raps (Liu et al., 1997), trigo (Pandey y Kumer, 1996) y algodón (Satao et al., 1993), coincidiendo que se reduce la clorofila y la productividad.

La medición en terreno, de la fotosíntesis neta (P_n , $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{seg.}$), que considera ya la respiración; y la conductancia estomática, permiten diagnosticar el funcionamiento de las hojas, es decir, si el proceso de la fotosíntesis es normal; proceso por el cual las hojas verdes, absorben la energía de la luz, para sintetizar los carbohidratos, utilizando CO_2 y

agua como materia prima. Por su parte, la conductancia estomática es una medida numérica de la velocidad máxima de paso de vapor de agua o CO_2 a través de los estomas, cuya unidad es $\text{mmol/m}^2/\text{seg}$. Es decir, es un índice de la apertura y cierre de los estomas, al medir el flujo de gases o la difusión que se realiza a través de éstos.

En general, la literatura señala que existe una estrecha relación entre la fotosíntesis neta y la conductancia estomática. En estudios específicos con olivos se indica que uno de los factores ambientales más determinantes que limita la fotosíntesis, es la sequía y salinidad, lo que disminuye el crecimiento de la planta y su rendimiento (Flexas, et al., 2004; Bacelar et al., 2007).

En el estudio de olivos de Moriana (2002), se establecen relaciones entre la conductancia estomática y la fotosíntesis neta del olivo, como la Figura 122 y se concluye que cuando la fotosíntesis es cercana a $2 \text{ umol/m}^2/\text{seg}$ la planta está en un severo estrés hídrico.

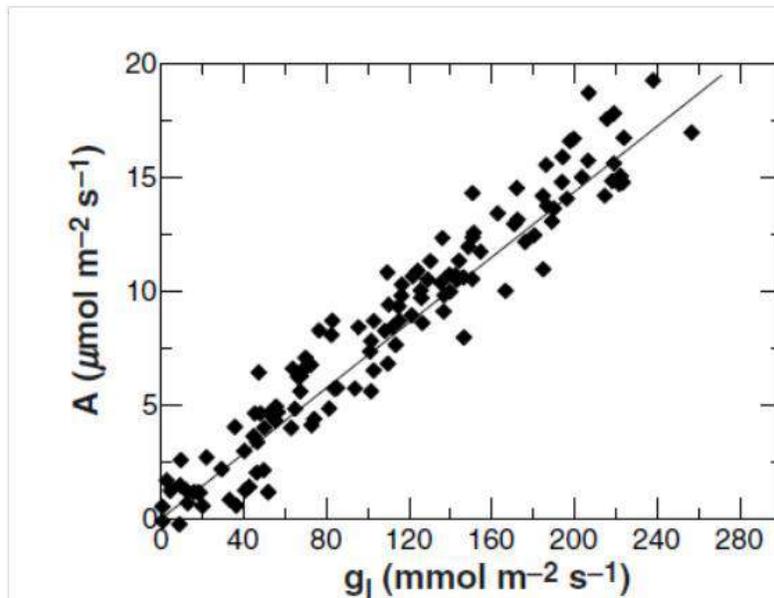


Figure 2. Regression of photosynthesis (A ; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) on leaf conductance (g_l ; $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Each point represents the average of 12 measurements taken during the diurnal cycles on trees where midday Ψ_x was higher than -4.5 MPa . ($y = 0.074x$; $R^2 = 0.92^{***}$;

Figura 122. Regresión de fotosíntesis (A ; $\text{um/m}^2/\text{s}$) y conductancia estomática en hojas (g ; $\text{mmol/m}^2/\text{s}$). Moriana (2002).

En el estudio actual de Huasco se encontraron relaciones como las presentadas en la figura anterior, entre la conductancia estomática y fotosíntesis neta. En la Figura 123, se observa que la fotosíntesis neta varió entre 1 y $10 \text{ umol/m}^2/\text{seg}$ y la conductancia estomática entre 10 y $80 \text{ mmol/m}^2/\text{seg}$. En general, se puede decir que en el valle existirían huertos que presentan muy bajos valores de fotosíntesis, asociados a una baja

conductancia estomática y que los valores máximos de fotosíntesis observados son medios, respecto de los presentados en otras localidades.

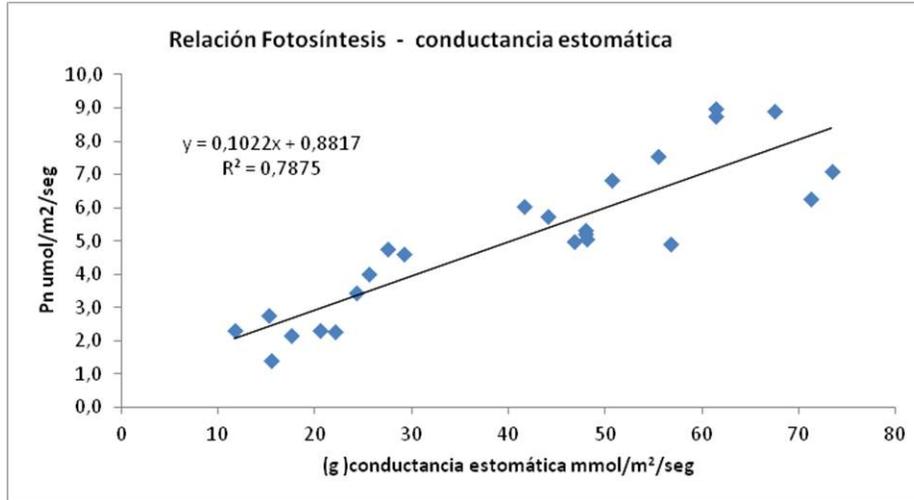


Figura 123. Relación entre conductancia estomática (g) y Fotosíntesis neta (Pn), en algunos huertos del Valle de Huasco.

Investigadores griegos han relacionado factores de estrés con la fotosíntesis neta de los olivos, así Angelopoulos et al., (1996), muestra en la Figura 124, los valores de fotosíntesis neta en plantas que no están sometidas a estrés (círculo), comparándolas con plantas sometidas a estrés hídrico (triángulo). Se puede ver que las plantas estresadas, en general presentan fotosíntesis bajo 3 umol/m²/seg.

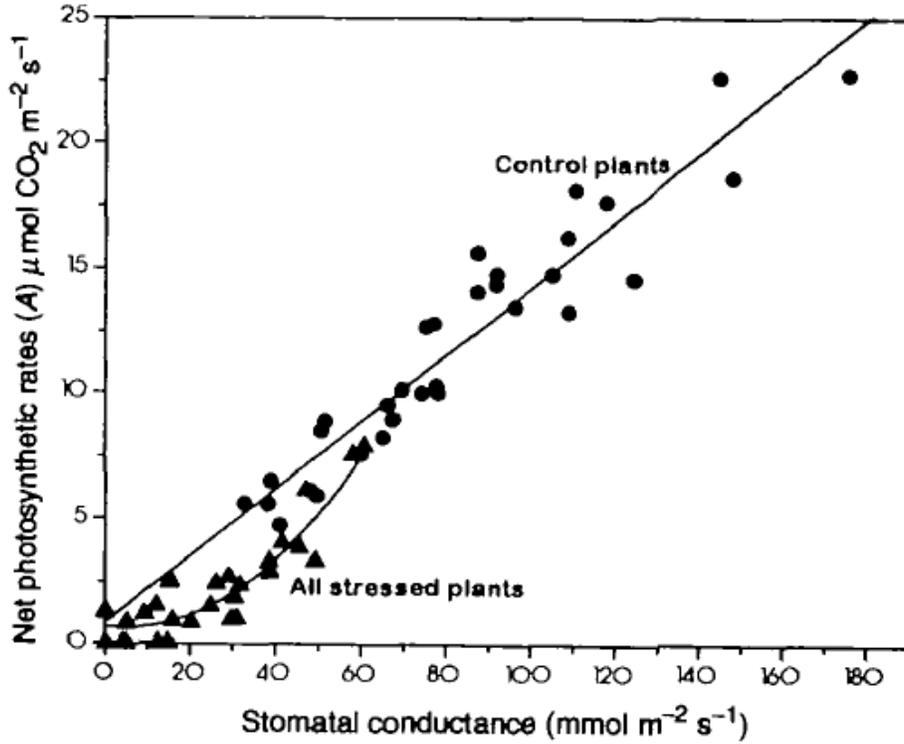


Fig. 4. Correlation between maximal net photosynthetic rates and stomatal conductance in control plants (—●—) and (—▲—) in all stressed plants.

Figura 124. Correlación entre fotosíntesis neta máxima (Net photosynthetic rates; A; $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) y conductancia estomática (Stomatal conductance ($\text{mmol}/\text{m}^2/\text{s}$)) en plantas control y plantas sometidas a estrés.

Por otra parte, este investigador relaciona tanto la fotosíntesis neta y la conductancia estomática, con los distintos niveles de estrés y las horas del día. Se observa en la Figura 125, que en las primeras horas de la mañana, la fotosíntesis neta es mayor, lo que después durante el día va disminuyendo. También se observa que el aumento del estrés hídrico, va disminuyendo la fotosíntesis hasta niveles cercanos a 0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{seg}$.

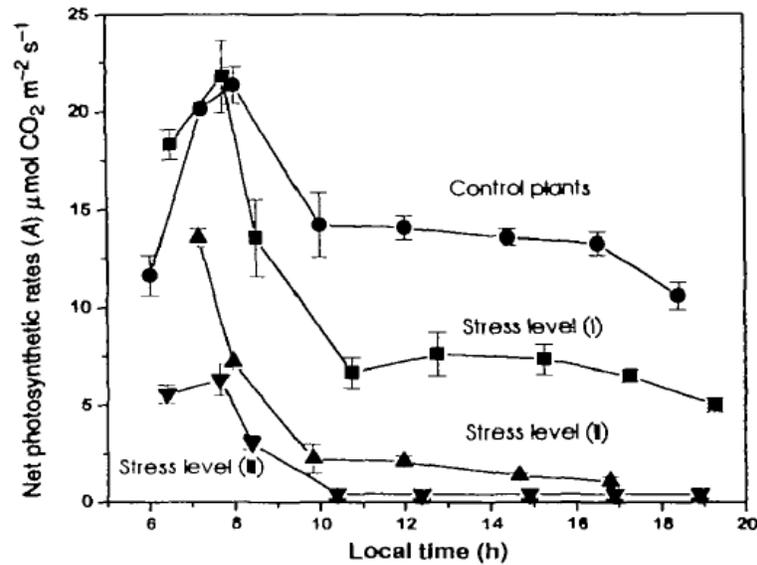


Fig. 2. Diurnal course of net photosynthetic rates in control plants (—●—) and in different stress level plants (—■—) stress level (I), (—▲—) stress level (II), (—▼—) stress level (III).

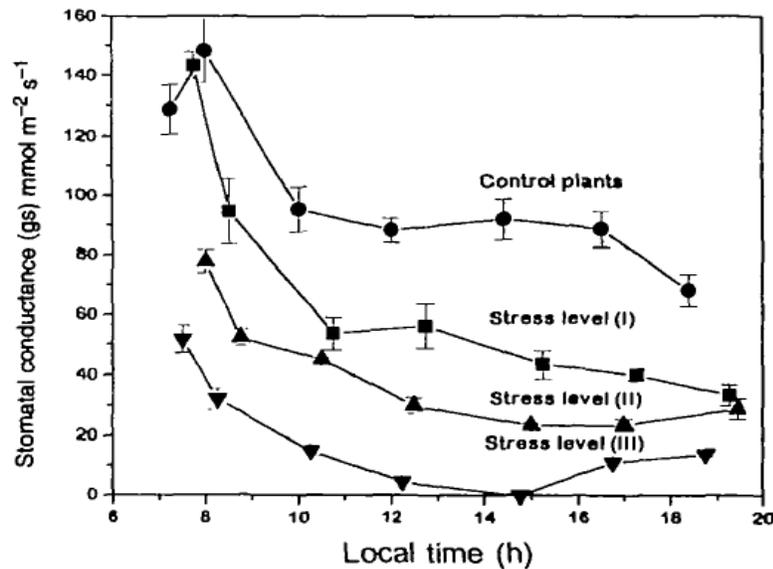


Fig. 3. Diurnal course of stomatal conductance in control and stressed plants (Symbols as in Fig. 2).

Figura 125. Tasa de fotosíntesis neta (arriba) y conductancia estomática (abajo), a lo largo del día, en plantas control y plantas sometidas a diferente estrés. Angelopoulos, et al., 1996.

En el caso de los huertos estudiados en el valle de Huasco, se observó que existía la relación entre la fotosíntesis neta y la conductancia estomática. Si bien, se requerirían un gran número de mediciones para establecer con certeza, las relaciones que se establecen entre la fotosíntesis neta y los factores de estrés, se pudo obtener una aproximación que relacionó el estrés con valores bajos de fotosíntesis (Figura 126). Entre éstos se consideró el estrés hídrico y la fumagina.

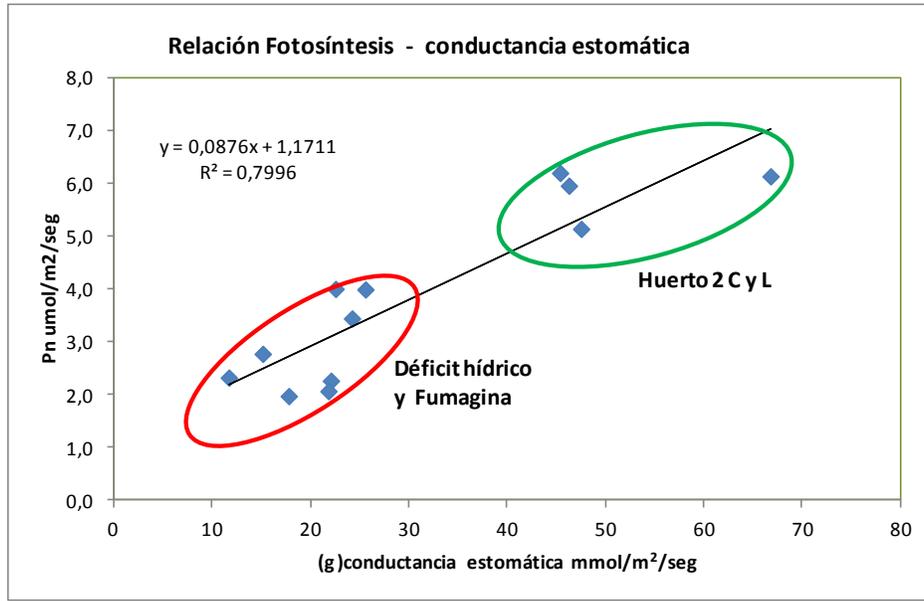


Figura 126. Relación entre conductancia estomática (g) y Fotosíntesis neta (Pn).

Respecto a las partículas sobre las hojas, ésta podría afectar la fotosíntesis neta mediante dos vías; una, corresponde al daño físico directo en los tejidos y la otra, corresponde al impedimento físico de intercepción de luz. Como se mencionó previamente, las partículas de fierrillo, no penetran a través de los estomas, por lo que no estarían causando un daño por esta vía. Sin embargo, éstas partículas podrían afectar la fotosíntesis neta, por disminuir la radiación que pueda interceptar la hoja. La diferencia más importante entre el polvillo y la fumagina, es que ésta última puede afectar en ambas vías, al adosarse al envés o parte inferior de la hoja, donde se encuentran los estomas, sin poder removerse fácilmente y penetrando en los tejidos de ésta, a pesar de la densa capa de tricomas, (como se podrá observar en este informe en las fotos con microscopía electrónica).

En el caso del fierrillo sobre la hoja, es de fácil remoción, sin penetrar al tejido de la hoja (Figura 127).



Figura 127. Izq. Hojas de olivo del valle con material particulado, fierrillo. Der. Hojas de olivo con fumagina.

Por otra parte, investigadores como Chartzoulakis (2005), relacionaron la fotosíntesis neta de los olivos con salinidad, observando que si bien, las variedades se comportaban diferentes, existía un efecto de disminución en la fotosíntesis por causa de sales como el cloruro de sodio (Figura 128). La salinidad tiene un efecto en la disponibilidad de agua para las plantas, y de esta forma causa una forma de “sequía fisiológica”, por lo cual para la planta, mientras más salinidad se encuentre en el suelo o el agua de riego, le será más difícil absorberla, produciendo un efecto similar al estrés hídrico. En la Figura 128 se observa el efecto del NaCl en la fotosíntesis neta de diferentes variedades de olivo, siendo las barras oscuras las que muestran las plantas sometidas a estrés.

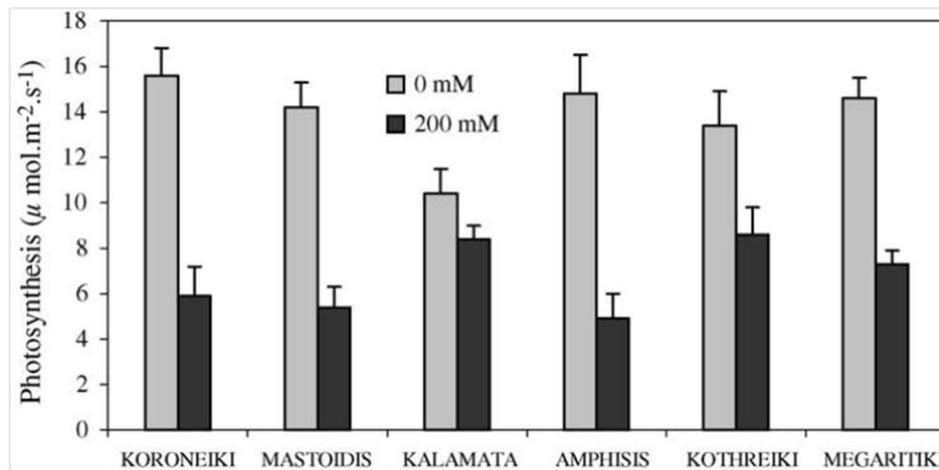


Figura 128. Fotosíntesis de seis cultivares de olivos desarrollados bajo 0 a 200 mM NaCl por seis meses. Valores corresponden a la media de seis repeticiones. (Chartzoulakis, 2005).

Por último cabe señalar, que en general, los huertos medidos en este estudio presentaron fotosíntesis netas con valores medios a bajos, lo que se podría explicar por condiciones de salinidad, propias de algunos suelos del valle y que si bien los olivos son especies que la pueden tolerar, de igual forma tienen un efecto en la fotosíntesis, por la menor disponibilidad de agua y esto puede incidir en que los potenciales productivos sean de medios a bajos.

En la segunda etapa del proyecto, se continuará con evaluaciones dirigidas de fotosíntesis y parámetros fisiológicos de plantas sometidas a diferentes condiciones ambientales.

d) Mediciones del Índice de Cuaja

El índice de cuaja, corresponde a una proporción entre la cantidad de flores presentes y la cantidad de frutos cuajados, luego de las caídas naturales. Éste índice es una medida que se relaciona con la producción de un huerto y en este caso, permite comparar entre huertos de baja o alta contaminación, sin embargo, al ser evaluado en una sola temporada, tiene la desventaja de que no considera el factor añerismo o alternancia en la producción, lo que tiene gran importancia en especies como el olivo.

El índice de cuaja se podría ver afectado si existe algún efecto negativo de la contaminación ambiental, que pueda alterar el desarrollo normal de las flores y la polinización o la cuaja de los frutos, lo que incidiría directamente en la producción del huerto. Respecto a lo anterior, las flores son los tejidos que tienen menor protección y se podrían ver afectadas por numerosos factores, dentro de los cuales se encuentran la contaminación ambiental, exceso de humedad, material particulado, enfermedades, entre otros.

En este estudio el índice de cuaja se determinó contando flores de brotes que fueron marcados previamente en huertos, tanto cerca como lejos de la línea del tren, en el período de plena flor y luego se contaron los frutos cuajados, después de las caídas naturales en enero. A pesar de que el Olivo presenta caída de frutos que se da en condiciones naturales, la comparación dentro del huerto, en plantas que se encuentran cerca y lejos de la fuente contaminante, puede entregar antecedentes del daño directo sobre las flores de las plantas, en los huertos que se encuentran expuestos al material particulado.

Cuando se compararon dos huertos (H1 y H2), se puede observar que no existe una respuesta consistente respecto a la fuente contaminante (cerca y lejos de la línea del tren), sin embargo, se puede observar que existe un claro comportamiento atribuible al huerto, ya que los niveles de cuaja del huerto H1, son notoriamente menores al huerto H2, lo que se puede observar en la Figura 129.

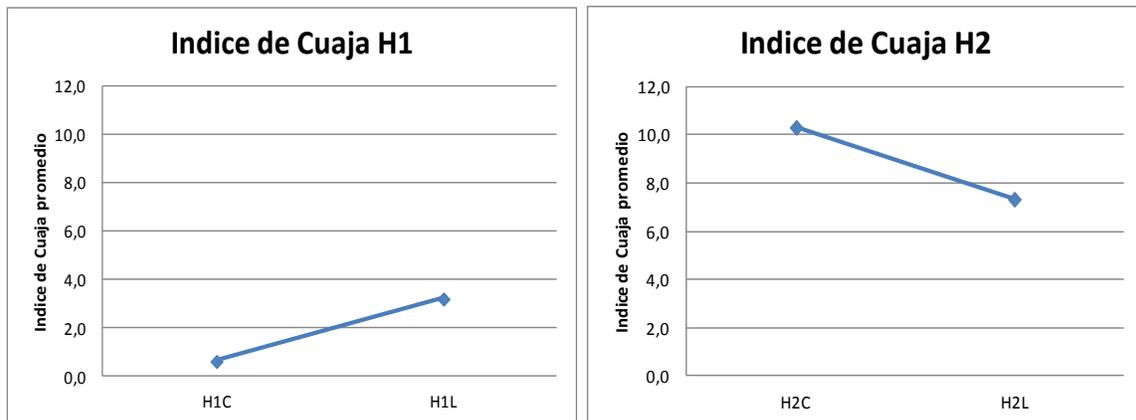


Figura 129. Índice de cuaja promedio de tres mediciones cerca y lejos de la línea férrea en H1 y H2.

Por otra parte, si se considera la cantidad de flores que produce cada huerto, ya sea cerca o lejos de la fuente contaminante, también se observa una respuesta diferente en relación al huerto. En el huerto 1, se observa menor porcentaje de cuaja y número de frutos, sin embargo, una cantidad similar a mayor de flores, respecto al huerto 2 (Figura 130). Esto se podría explicar por un factor de suelo o manejo, pero no se podría descartar que sea el material particulado, ya que cuando se hizo el lavado de hojas, se obtuvo una cantidad significativamente mayor de material particulado en el huerto 1, en relación al huerto 2 (Figura 131). Por esta razón y dada la variabilidad de los datos observados, es difícil

concluir cual es el factor que interviene en el resultado de cuaja, sumado a que al ser sólo una temporada, no se puede obviar el fenómeno de añerismo.

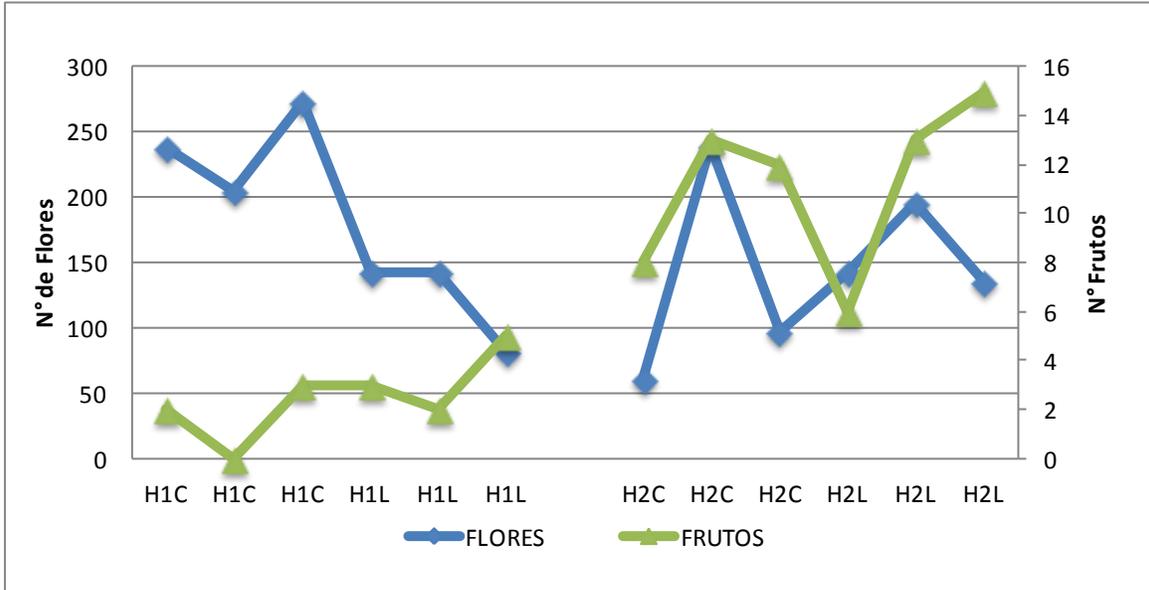


Figura 130. N° de flores y frutos en los huertos 1 y 2.

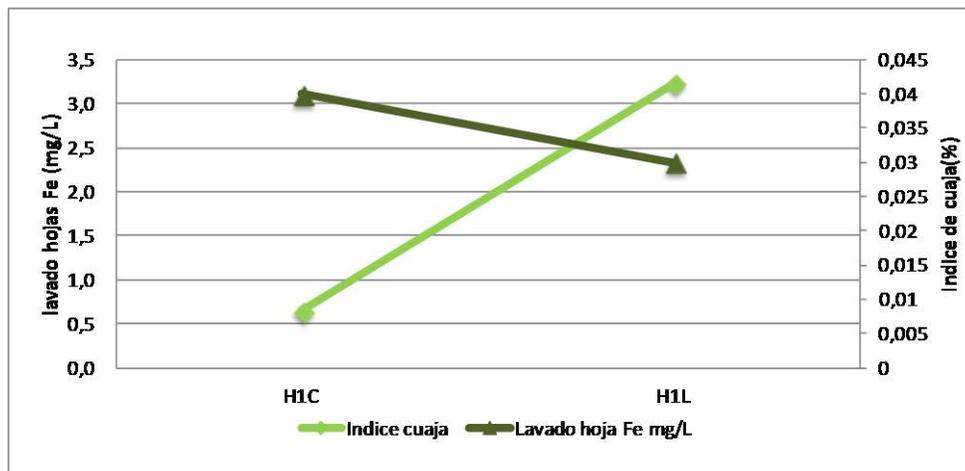


Figura 131. Lavado de hojas del material particulado en el huerto 1 y su índice de cuaja.

e) Estudio del efecto de la contaminación ambiental por NO₂ y SO₂

i) Suelos

Se realizó un muestreo de suelo y hojas a lo largo del valle desde oeste a este, desde sitios con mayor concentración de SO₂ y NO₂ en el aire, hacia áreas con una menor concentración de éstos.

Se observa que el contenido de N del suelo no responde a la distancia a la fuente contaminante, es decir, la mayor o menor concentración de éste elemento en el suelo no se explica por la depositación vía aérea.

No se puede afirmar que no exista depositación en el suelo y hojas de compuestos nitrosos, ya que éste no alcanza a ser un factor relevante que marque una diferencia en los suelos de los distintos huertos. Una de las variables que más explica el nitrógeno del suelo es la materia orgánica que lo contiene (Figura 132).

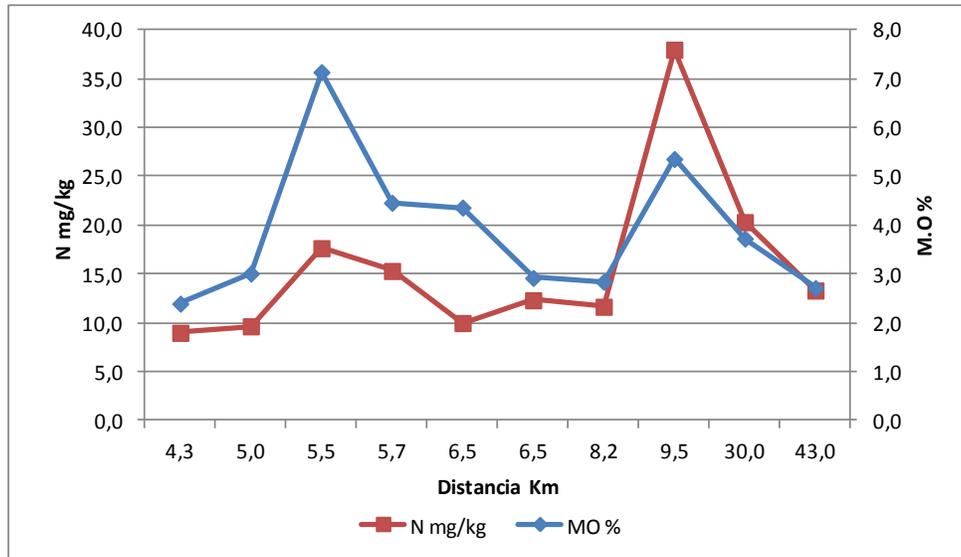


Figura 132. Nitrógeno disponible y materia orgánica en el suelo, de huertos de olivos ubicados a diferentes distancias desde la costa hacia el interior del valle.

La lluvia ácida considera dentro de sus componentes, compuestos azufrados que en contacto con la humedad o el agua se transforman en ácidos como el H_2SO_4 . Respecto del contenido de azufre tanto en el suelo como en las hojas, al igual que el caso del N, no responde a la distancia respecto de la fuente contaminante, lo que se observa en la Figura 133 y Figura 134. Estos suelos, en general, por su material de origen presentan cantidades altas de sulfatos y por lo tanto, lo que cae por depositación del aire, es de una magnitud que no alcanza a hacer una diferencia significativa en los huertos.

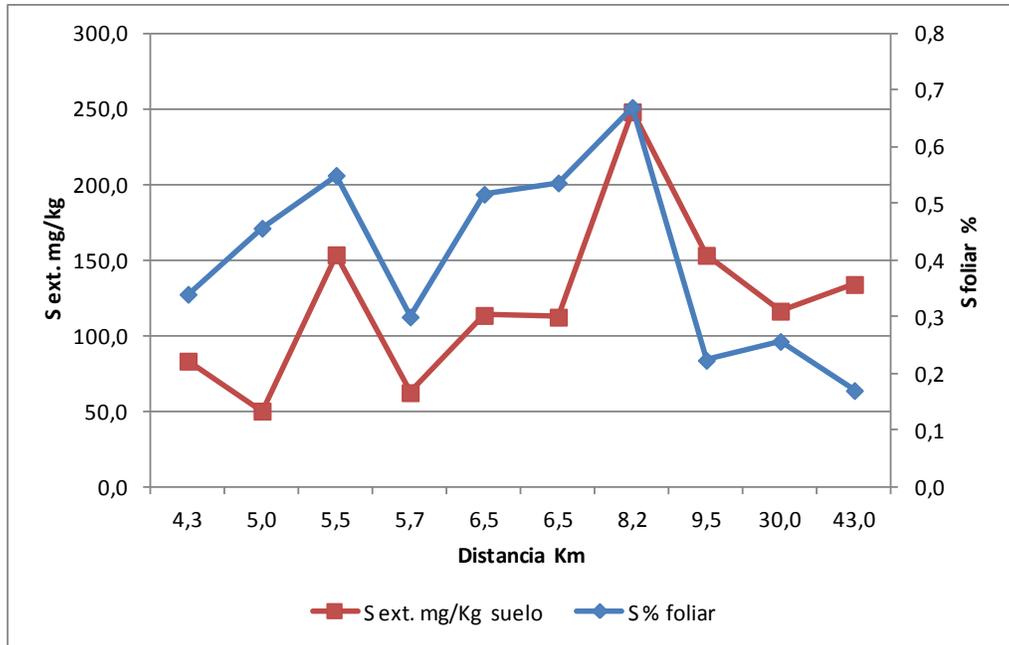


Figura 133. Azufre en el suelo y concentración en las hojas, de huertos de olivos ubicados a diferentes distancias de oeste a este dentro del valle de Huasco.

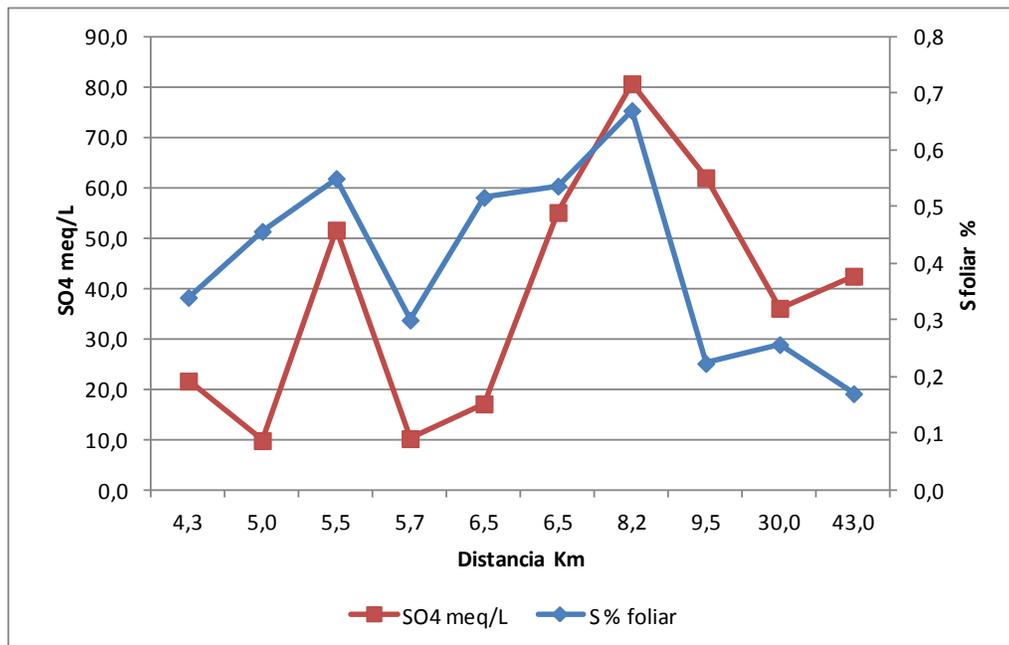


Figura 134. Sulfatos en el suelo y concentración de S en las hojas, de huertos de olivos ubicados a diferentes distancias desde la costa hacia el interior del valle de Huasco.

Los suelos de la zona son reconocidos por contener sales, entre esas los sulfatos son una de las más abundantes. Una de las formas de medir salinidad en los suelos es a través de un indicador llamado conductividad eléctrica que permite inferir la cantidad de iones presentes en la solución del suelo. Como se ve en la Figura 135 los sulfatos están relacionados con este indicador, es decir, explican en gran medida las sales contenidas en estos suelos, lo que es una condición propia de la zona. Por lo tanto, la presencia de

sulfatos en los suelos es de tal magnitud, que la depositación de compuestos por el aire, no son significativos para los suelos y nutrición de la plata.

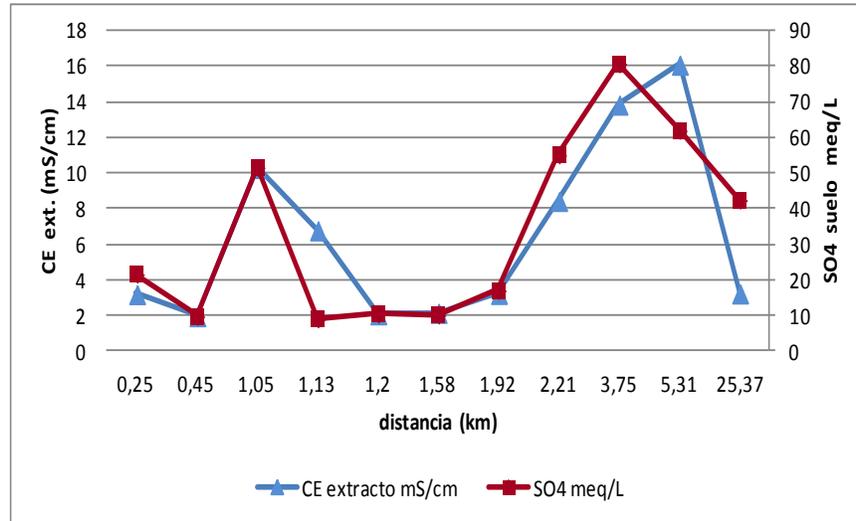


Figura 135. Sulfatos en el suelo y concentración de S en las hojas, de huertos de olivos ubicados a diferentes distancias desde la costa hacia el interior del valle.

Por lo tanto, la depositación de óxidos de nitrógeno o de azufre, desde el aire hacia el suelo, provenientes del complejo industrial de Huasco, no alteran los contenidos en el suelo, ni la absorción de nitrógeno y azufre por las plantas. Es decir, no existiría un daño a los árboles por vía absorción radicular o aérea.

ii) Estudio Anatómico

El efecto de los óxidos presentes en el aire que se depositan en el suelo, podrían causar un daño por absorción de algún elemento en exceso. Sin embargo, el daño puede ser directo al caer como ácidos sobre las plantas, es decir daño por depositarse sobre tejidos vegetales vivos, como lo son hojas y flores. Éstos, por contacto, pueden hacer daño a nivel de epidermis de hojas y frutos, deteriorando el tejido y cambiando la permeabilidad de membranas y, en casos más severos, dañar a nivel de parénquimas, afectando la funcionalidad de la hoja, y dependiendo de la severidad del daño, afectando la productividad de las plantas.

Una de las formas de estudiar estos efectos es por medio de técnicas de microscopia convencional y de barrido (electrónico), ya que los daños a nivel de la anatomía de las hojas no son visibles a simple vista. Lo primero que se debe realizar en estos casos, es una revisión bibliográfica que permita identificar los daños, a través de trabajos similares en que se presenten estudios con fotografías y cuantificación de daños, y en este caso particular, sobre el efecto de lluvia ácida, a nivel de tejido foliar y floral. De esta forma se pueden hacer evaluaciones comparativas y al momento de analizar muestras bajo los microscopios, saber antes los síntomas que se deben buscar en los tejidos y de esta forma

poder atribuirlos a la contaminación, en este caso específicamente por depositación de ácidos.

En la literatura, existe bastante información acerca de los efectos en tejidos vegetales de los daños por la lluvia ácida, así Bruno et al., (2007), presenta los efectos de la lluvia ácida, encontrando daños a nivel de epidermis y en casos más severos, disminución del grosor de los parénquimas, pudiendo llegar finalmente a necrosis de estos tejidos. En la Figura 136 se muestra los efectos que señala la literatura.

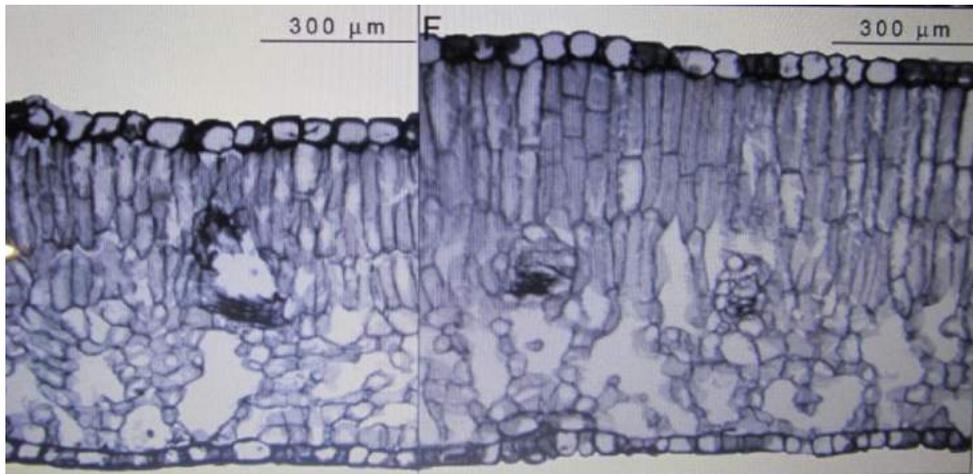


Figura 136. Izq. Hoja sometida a contaminación ambiental, la cual reduce su parénquima en empalizada y Der. Hoja sin contaminación (Bruno et al., 2007).

Otros estudios como los de Sant'Anna-Santos et al., (2006), presentan a nivel de epidermis, colapso de células, llegando a la necrosis de éstas, hipertrofia en los parénquimas y cicatrización de tejidos (Figura 137).

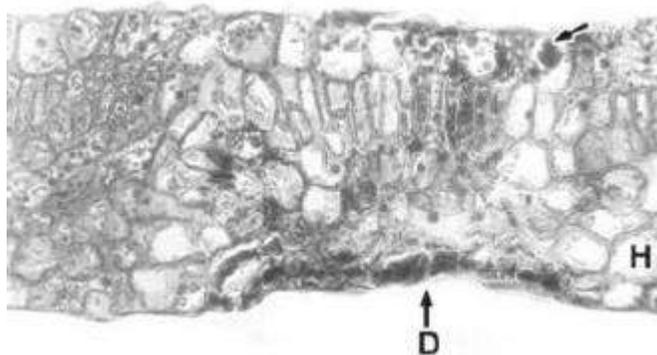


Figura 137. Corte transversal hoja de *Genipa americana* sometida a lluvia ácida. D: zona necrótica, células epidermales con contenido negro. H; Hipertrofia. Sant'Anna-Santos et al., 2006.

En el caso de los olivos del valle de Huasco, se recolectaron hojas de la zona en que se ha monitoreado más cantidad de SO_2 en el aire y se hizo un contraste con hojas de zonas libres de contaminación. En este estudio anatómico no se han encontrado daños en las

hojas, como los que se mencionan en la literatura, que puedan correlacionarse con la ubicación respecto de la fuente contaminante (Figura 138), por lo que se continuará estudiando, mediante ensayos dirigidos en centro experimental.

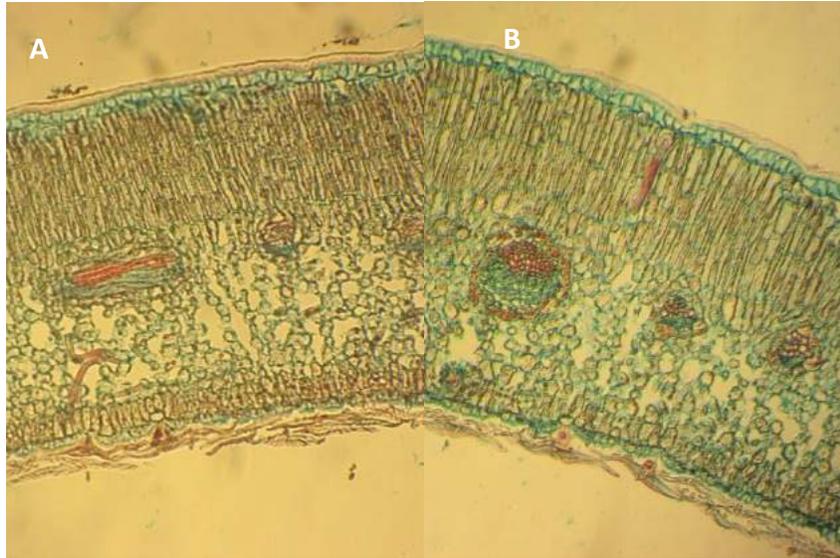


Figura 138. Corte transversal de hoja de olivo en zona cercana (A) y lejana (B) a la fuente contaminante.

Respecto a lo que se observó en tejidos florales, no existe una relación directa con la distancia a la fuente contaminante, sin embargo, se pudo observar tejido dañado, como se puede observar en la Figura 143. El daño celular observado en las flores, se puede atribuir a una serie de condiciones, ya sea naturales propias de la planta (senescencia natural) o a daño externo, por lo que se continuará estudiando, mediante ensayos dirigidos en centro experimental y en terreno, para determinar si es atribuible a la lluvia ácida. Dado que las flores son tejidos más sensibles, afectarían directamente la producción de las plantas.

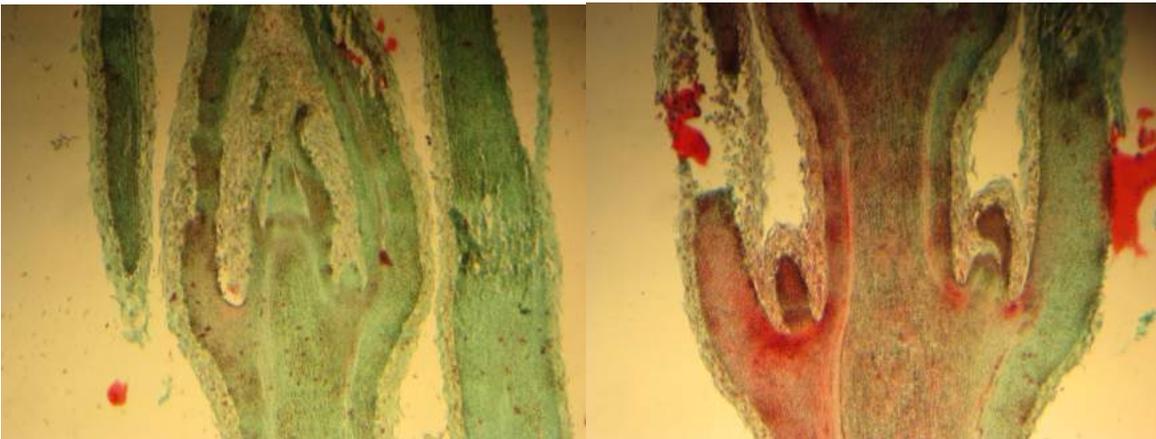


Figura 139. Corte de flores de olivo en el valle de Huasco.

Si bien, en el estudio anatómico para lluvia ácida, no se encontraron síntomas o efectos evidentes de daño en los tejidos vegetales, que permitieran diferenciar zonas

contaminadas de aquellas libres de contaminación, no se puede descartar que exista o pueda existir en el futuro cercano. Los contenidos de óxidos en el aire van cambiando y en el caso particular del valle del Huasco pueden ir aumentando, al incorporar más industrias o chimeneas en la zona. Por lo tanto, es muy necesario, por una parte, determinar en el aire cuanto óxido se encuentra y cuánto reacciona con el agua (neblina o lluvia) y es potencialmente, depositado como ácido. Por otra parte, se debe identificar en condiciones controladas de laboratorio y en condiciones de campo, la concentración umbral del contaminante (ácidos) que causa daños a nivel anatómico, para lo cual se debe forzar esa sintomatología con distintos niveles conocidos de contaminante, aplicados a diferentes tejidos vegetales.

iii) Índice de Cuaja

Del mismo modo que en el caso de la contaminación por fierrillo, el índice de cuaja se podría ver afectado si existe algún efecto negativo de la contaminación ambiental, que pueda alterar el desarrollo normal de las flores y la polinización o la cuaja de los frutos, lo que incidiría directamente en la producción del huerto. Respecto a lo anterior, las flores son los tejidos que tienen menor protección y se podría ver afectado por numerosos factores, dentro de los cuales también se encuentran la contaminación ácida y el exceso de humedad, enfermedades, entre otros.

En este estudio el índice de cuaja se determinó contando flores de brotes que fueron marcados previamente en huertos tanto cerca como lejos de la fuente contaminante, en el período de plena flor y luego se contaron los frutos cuajados, después de las caídas naturales en enero. A pesar de que el olivo presenta caída de frutos que se da en condiciones naturales, la comparación entre huertos que se encuentran cerca y lejos de la fuente contaminante, puede entregar antecedentes de daño directo sobre las flores de las plantas, en los huertos que se encuentran expuestos a la contaminación ácida en combinación con la mayor humedad presente en el valle.

En la Figura 140 se puede observar la relación que existió entre el índice de cuaja y la distancia a la fuente contaminante (entre 5 y 44 km). Como se puede apreciar, no existe una respuesta clara del índice de cuaja con la distancia respecto de la fuente contaminante, sin embargo, al evaluar con más detalle los huertos, se puede observar que el huerto ubicado a 6,4 km de la fuente contaminante, presenta una cuaja, muy por sobre los demás huertos evaluados. Dado los resultados obtenidos en terreno, se requiere investigar en mayor medida, cuáles son las condiciones de cada huerto evaluado, para poder aislar los factores que puedan estar interfiriendo en la interpretación de los datos. Si no se considerara el huerto ubicado a 6,4 km de la fuente contaminante, se tendría una respuesta a la ubicación con respecto a la fuente contaminante, por lo que vale la pena estudiar si existe, ya sea, un mejor manejo de las plantas, ubicación más protegida del viento, variedades, sistema de riego, entre otros.

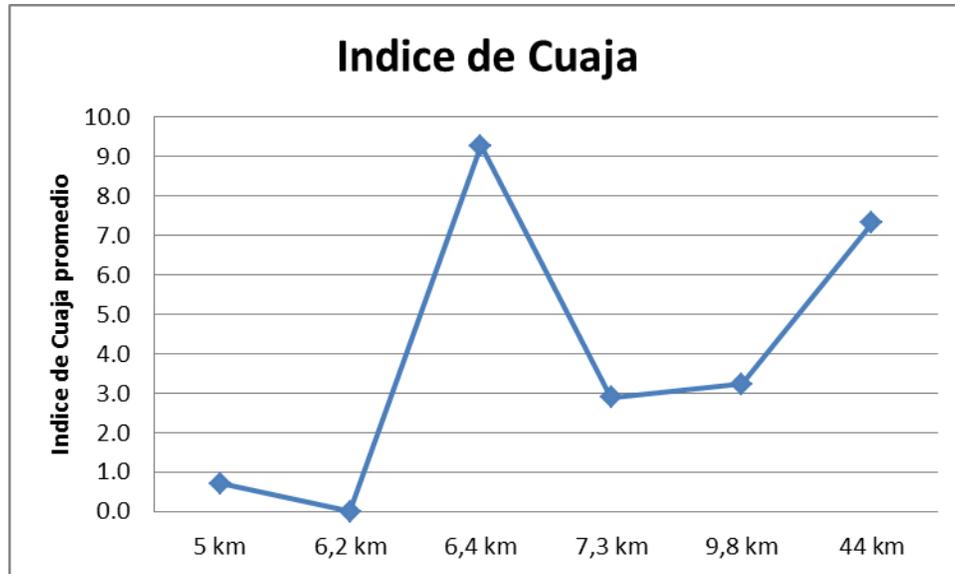


Figura 140. Índice de Cuaja en plantas ubicadas cerca y lejos de la planta de pellets.

Se continuará con estas evaluaciones en la segunda etapa del proyecto ya que la especie, al presentar añerismo, entrega valores que no son representativos en una temporada.

2.c) Analizar trazas en los productos de la industria (aceites, aceitunas procesadas).

a) Introducción.

Existen antecedentes de un estudio en Huasco elaborado por el INIA en que parten de la hipótesis que la producción de aceituna en el valle del Huasco se afectaría por la presencia de hierro en el ambiente, el cual sería adsorbido, acumulándose en la aceituna, disminuyendo al alejarse de la fuente de emisión. Parte de las conclusiones obtenidas fueron, que efectivamente, existía una mayor concentración de hierro en aceitunas, cuyas plantaciones estaban cercanas a la fuente emisora de este elemento contaminante y que en las muestras analizadas de aceite de oliva, los niveles de hierro se encontraban bajo el máximo permitido.

En el estudio actual al efectuar un lavado de los frutos se determinó también una acumulación del material particulado en superficie, lo que permitió identificar sectores que se ven más afectados por el material. Previamente, este material se había identificado teniendo como metal dominante al hierro, por lo que se podría esperar que el aceite tuviera mayor cantidad de hierro, el cual deteriora la calidad.

Hay distintas normativas que indican los niveles de hierro máximos que pueden tener los aceites, siendo una de las más importantes la que indica el "Consejo Oleícola Internacional – COI". La que rige actualmente es: COI/T.15/NC No 3/Rev. 6 November 2011, cuyo nombre oficial es: Trade Standard Applying to Olive Oils and Olive-Pomace Oils.

En este documento que rige para todos los aspectos de calidad química y organoléptica del aceite, se menciona que en el aceite de oliva no debe haber más de 3,0 mg/kg de hierro.

En un estudio muy completo realizado por la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de Granada (Martin-Lagos, 2007), se determinan todos los parámetros de calidad de los aceites de oliva que producen, encontrándose el hierro en un rango de 0,01 a 0,75 mg/kg, indicándose que están bajo la norma española y también la del COI que es de 3,0 mg/kg.

En otro estudio se señala que si el aceite es proveniente de apriete de orujos, existe mayor variabilidad del contenido de hierro, encontrándose valores de hasta 3,63 mg/kg (Roca, 1998), lo que sobrepasaría la norma. Por otra parte, en un estudio se midieron los aceites de oliva extra vírgenes que se producían en 14 zonas de Croacia, sin sobrepasar la cantidad de 0,18 mg/kg (Zeiner, 2005). Se señala también en la bibliografía, que la acidez de los aceites de oliva, influye en los niveles de hierro que contienen.

En el estudio actual de Huasco se analizaron diferentes muestras de aceites de oliva, cuyo origen correspondía a diferentes localidades, una de ellas de aceitunas de Copiapó, pero procesado en Huasco, otra de aceitunas provenientes de un Huerto cerca (HC) del área de contaminación y otro lejos (HL), lo que se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39. Resultados de los análisis realizados a aceites de oliva, provenientes de aceitunas de distintos huertos, lejos y cerca de la fuente de contaminación.

Elemento (mg/kg)	Copiapó	Huerto lejos (HL)	Huerto cerca (HC)
Al	<1	<1	<1
Ca	20,2	22,7	31,6
Mg	8,6	3,3	4,5
Ni	<0,5	<0,5	<0,5
Fe	1,3	<0,1	<0,1

De acuerdo a la normativa que establece el COI, los niveles de hierro están dentro de los rangos permitidos.

Para evaluar en mejor medida el efecto de la contaminación en los alimentos, se evaluará en la segunda temporada del estudio, mediante ensayos dirigidos y en condiciones de terreno.

2.d) Analizar el comportamiento de las trazas en cada uno de los procesos de elaboración de los alimentos.

De acuerdo a los resultados, por una parte, se tiene que en la fruta se encontraron partículas de fierrillo, que se pudieron identificar al hacerles lavados y recoger las partículas arrastradas por el agua destilada. Sin embargo, en los aceites analizados no se encontró una relación entre la concentración de hierro y el lugar de donde provenían las

aceitunas, a partir de las cuales se elaboraron. Dada esta situación, es necesario estudiar con mayor profundidad el proceso por el cual pasan las aceitunas, ya que puede que esto esté marcando la diferencia de contenido de hierro en el aceite.

Por otra parte, es necesario realizar muestreos en las diferentes partes del proceso de elaboración, tanto del aceite como de las aceitunas de mesa. En este punto cabe señalar que se realizarán en la segunda etapa de este proyecto, elaboraciones iguales de aceites, con aceitunas de distinta procedencia, solo de esa forma será posible aislar los factores, que intervienen en la concentración de hierro en el producto elaborado.

La no existencia de contaminantes dentro de la fruta aseguraría que en el producto tampoco exista. Salvo que existan contaminaciones en el proceso de elaboración o que el daño se produzca superficialmente y que afecte la comercialización de la fruta.

ii) Bibliografía

- 1) Angelopoulos K., B. Dichio and C. Xiloyannis. 1996. Inhibition of photosynthesis in olive trees (*Olea europaea* L.) during water stress and rewatering. *Journal of Experimental Botany*, 47: 1093-1100.
- 2) Bacelar, E. D. Santos, J. Moutinho, J. Lopes, T. Ferreira y C. Correia. 2007. Physiological behavior, oxidative damage and antioxidative protection of olive trees grown under different irrigation regimes. *Plant and Soil* 292: 1-12.
- 3) Bruno, G., L. Stiefkens, M. Hadid, I. Liscovsky, M. Cosa y N. Ottori. 2007. Efecto de la contaminación ambiental en la anatomía de la hoja de *Ligustrum lucidum* (Oleaceae). *Bol. Soc. Argent. Bot.* 42: 231-236.
- 4) Chartzoulakis K. 2005. Salinity and olive: Growth, salt tolerance, photosynthesis and yield. *Agricultural Water Management* 78: 108–121.
- 5) Farmer, A. 1993. The effects of dust on vegetation – a review. *Environ Pollut* 79: 63-75.
- 6) Flexas, J. J. Bota, F. Loreto, G. Cornic y D. Sharkey. 2004. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology* 6: 269-279.
- 7) Lakusic, B., Popov, V. and Runjajic-Antic, D. 2007. Morpho-Anatomical characteristics of the raw material of the herbal drug *Olivae Folium* and its counterfeits. *Arch. Biol. Sci., Belgrade*, 59 (3), 187-192.
- 8) Liu J., M. Du, K. Shang, S. Chen and H. Xu. 1997. The effects of cement dust pollution on rice, rape and soil. *J. Plant Res Env.* 6: 42-47.
- 9) Martín-Lagos, J. 2007. Estudio de índices de calidad de aceite de oliva de la provincia de Granada. Dpto. Nutrición. Facultad de Química y Farmacia. Universidad de Granada.
- 10) Moriana, A., F. Villalobos y E. Ferreres. 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive leaves to water deficits. *Plant, Cell and Environmental* 25: 395-405.
- 11) Nanos, G. and F. Ilias. 2007. Effects of inert dust on Olive. Leaf Physiological parameters. *Env. Sci. Pollut Res.* 14: 212-214.

- 12) Pandey, D. y D. Kumer, 1996. Impact of cement dust pollution on biomass, chlorophyll, nutrients and grain characteristic of wheat. *Env. Ecol.* 14: 872-875.
- 13) Roca, A. 1998. Estudio del contenido mineral como parámetro de calidad del aceite de oliva. Memoria de tesis doctoral. Universidad de Granada.
- 14) Satao R., H. Kene, R. Nalamwar and R. Ulemale. 1993. Effect of cement dust pollution on growth and yield of cotton. *Ann. Plant Physiol.* 7: 73 -77.
- 15) Sant' Anna–Santos, B., Campos da Silva, L., Azevedo, A. and Rosane, A. 2006. Effects of simulated acid rain on leaf anatomy and micromorphology of *Genipa americana* L. (Rubiaceae). *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 49 (2): 313-321.
- 16) Silva, H., E. Acevedo y P. silva. 2001. Anatomía del tejido fotosintético de diez taxa de *Opuntia*, establecidos en el secano árido mediterráneo de Chile. *Rev. Chilena de Historia Natural* 74: 341 -351.
- 17) Willard M. Porterfield Jr. 1937. Histogenesis in the Bamboo with Special Reference to the Epidermis. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, Vol. 64, No. 7. pp. 421-432
- 18) Zeiner, M., I. Steffan and J. Juranivic. 2005. Determination of trace elements in olive oil by ICP-AES and ETA-AAS: a pilot study on the geographical characterization.

iii) Antecedentes estudios previos

- I. *Tipificación de elementos particulados en el valle del río Huasco, III región, (INIA, 1991).*
- II. *Estimación de la participación de las fuentes emisoras en el material particulado de la cuenca de Huasco, (U. de Chile, 1999).*
- III. *Mediciones fotosintéticas en cultivos de Olivo en el Valle de Huasco, III Región, (U. de Atacama, 2000).*
- IV. *Elementos Analíticos Conceptuales de la coexistencia de las Actividades Mineras y Agrícolas, (Fundación Chile, 2005).*
- V. *Estudio de calidad del Aire en la Comuna de Huasco, (CENMA, 2006).*
- VI. *Estudio para determinar los niveles de Hierro y Níquel en aceitunas de mesa en el Valle de Huasco, Región de Atacama, (INIA, 2007).*

2.e) Diagnóstico de la presencia y acumulación de metales específicos en el suelo.

a) Introducción

Con el objetivo de evaluar la presencia y acumulación de metales específicos en los suelos de la sección inferior del Valle del Río Huasco se realizó una campaña de terreno tomando muestras en la superficie del suelo (contacto reciente) y en profundidad (registro histórico). Los sitios de muestreo se definieron tomando en consideración los resultados de la modelación preliminar de la dispersión de contaminantes atmosféricos desarrollada en este estudio por la Unidad Ejecutora. Se seleccionaron 16 sitios para el muestreo de suelo, prefiriendo terrenos con presencia de huertos de olivo. Catorce de estos sitios se ubicaron en el sector comprendido entre la parte baja de Huasco y Freirina. Los dos sitios restantes (puntos de control) se establecieron en un área potencialmente menos afectada por la deriva de las emisiones provenientes de la zona del puerto, esto es, entre Freirina y Vallenar.

Dado el tipo y ocurrencia de contaminación documentada en el área se realizó un análisis de metales del tipo *screening* con un instrumento portátil de fluorescencia de rayos X (XRF) y posteriormente un análisis más detallado con fluorescencia de rayos X con reflexión total (TXRF). Este tipo de análisis mide la concentración total de cada elemento en el suelo, y sobre esta base se elaboran los resultados y conclusiones de esta sección del informe.

En forma paralela se realizó una revisión de los estudios existentes relativos a la presencia de metales en los suelos de la sección inferior del Valle del Río Huasco. Se revisó la información entregada por la Contraparte Técnica del estudio, así como también informes anteriores recopilados por la Unidad Ejecutora. En esta revisión se puso especial énfasis en la caracterización de la interacción entre las emisiones declaradas por los titulares de las termoeléctricas Guacolda y ENDESA y de la Planta de Pellet de la Compañía Minera del Pacífico (CMP) y la presencia de elementos contaminantes en los suelos del Valle de Huasco. También se revisaron otros estudios y experiencias relativas a la identificación de metales pesados en suelos contaminados por emisiones de plantas termoeléctricas y faenas mineras, tanto en Chile como en el extranjero. Se realizó una búsqueda sobre normativas medioambientales relacionadas con la contaminación por metales pesados de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (U.S. EPA) y la Agencia Europea de Medioambiente (EEA).

En base a esta información, se presenta a continuación una síntesis de los resultados obtenidos en este estudio. La información presentada incluye una descripción de los antecedentes encontrados relativos a contaminación por metales en los suelos del Valle de Huasco. Se incluye también una descripción e Identificación georeferenciada de los lugares de muestreo. Se describe el protocolo de muestreo de suelos y el resultado de la caracterización fisicoquímica de las muestras (presencia de metales, granulometría,

contenido de materia orgánica, pH y conductividad eléctrica). De acuerdo a los resultados del *screening*, el análisis detallado se centra en los elementos Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As y Pb, poniendo especial énfasis en la ubicación de los puntos de muestreo y las fuentes de contaminación, considerando distintos factores asociados a la posible deriva de contaminantes.

b) Descripción del área de estudio

Este estudio sobre contaminación de suelos por metales pesados se llevó cabo en la parte inferior del Valle del Río Huasco ubicado en la Región de Atacama, Provincia de Huasco, en el área comprendida entre las comunas de Huasco y Vallenar. El Valle de Huasco propiamente tal es el segundo valle transversal de la región, y se extiende aproximadamente entre los paralelos 28°22' y 29°32' de latitud Sur, con una hoya hidrográfica de 9850 km². El origen del Río Huasco está en la confluencia de los Ríos del Tránsito y del Carmen, siguiendo su curso una orientación Este-Oeste. La fisonomía del Valle de Huasco responde a las típicas de la región costera de Atacama, donde se intercalan en forma sucesiva cordones montañosos y valles transversales.

i) Características generales

Morfológicamente, el Valle de Huasco se puede dividir en dos grandes sectores: origen y curso inferior. Contado desde su nacimiento, el Río Huasco tiene una longitud de 88 km hasta su desembocadura en el mar, justo al norte de la ciudad de Huasco. En el sector del nacimiento del río y la desembocadura de la Quebrada El Jilguero (5 km al oriente de Vallenar), el río toma el típico curso de un cajón cordillerano, con un lecho relativamente estrecho, confinado por cerros de roca. En su avance, los conos de deyección de las quebradas laterales interrumpen el río, y lo desvían de un lado a otro. En su curso inferior (desde la Quebrada El Jilguero, hasta la desembocadura), el río tiene una longitud de 55 km. En esta zona la caja del río se ensancha y aparecen extensas terrazas fluviales a lo largo del valle. Es así como próximo a la desembocadura la caja del río alcanza a más de 2 km de ancho.

Los principales tributarios del Río Huasco son los Ríos del Tránsito que viene del Noreste y del Carmen que viene del Sureste. Estos dos últimos ríos también se presentan encajonados y rodeados por cerros rocosos de laderas escarpadas. No obstante lo anterior, la caja del Río del Tránsito es considerablemente ancha desde la localidad de Conay a la Junta del Carmen, dejando extensas playas de ripio. Esto genera múltiples meandros. Destacan en ellos los amplios conos de deyección de las quebradas laterales, que son aprovechados con cultivos agrícolas.

En términos climáticos, el área de estudio se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo, con un incremento y máximo estacional de precipitaciones durante el invierno en su sector más árido, y un déficit hídrico durante más de la mitad del año. El Valle de Huasco se caracteriza por tener un periodo libre de heladas de 11 meses (de

agosto a junio). Las temperaturas extremas se observan en julio y enero. La mínima de julio alcanza los 5°C y la máxima del mes de enero los 28°C. La zona posee un régimen de fuertes vientos diurnos, el cual se repite prácticamente todos los días, con una alta variación en su dirección, no sólo entre días consecutivos sino que también dentro de un mismo día.

En el sector comprendido entre la localidad de Vallenar y la desembocadura, dominan las plantaciones de olivos. Estos terrenos agrícolas se concentran en las áreas aledañas a las terrazas fluviales del cauce, y es la principal actividad económica silvoagropecuaria de la zona. El cultivo del olivo posee gran proyección en la región, dado las condiciones climáticas altamente favorables y la extensión de su valle.

ii) Propiedades de los suelos

La zona de estudio consiste de un valle estrecho con series de suelo muy poco extendidas entre las terrazas aluviales, algunas de éstas con problemas puntuales de salinidad en los horizontes superficiales. Estas terrazas se caracterizan por tener pendiente suave, y drenaje y permeabilidad normal. No obstante lo anterior, la parte baja de las terrazas próximas al río presentan sectores de mal drenaje y alta concentración de sales. Entre las series de suelo del área de estudio se encuentran: Bellavista, Freirina y Paona. En general los suelos son pobres en materia orgánica. En superficie dominan las texturas del tipo franco arenoso y franco arenoso fino, de color pardo oscuro y pardo grisáceo. Además, en su mayoría son suelos poco profundos, y debido a su origen aluvial presentan gravas y arenas en el subsuelo.

Las principales características físico-químicas de las series de suelo se describen a continuación. La serie Bellavista posee textura franco arenosa fina, es de origen aluvial, presenta color pardo oscuro, con 0,5 a 1,2 m de profundidad, subsuelo de arena, y limitantes para el cultivo producto de una napa freática a 0,9 m. La serie Freirina posee textura franco arenosa, es de origen aluvio coluvial, es de color pardo oscuro, con profundidad de 0,65 m, subsuelo de clastos y arena, y limitantes para el cultivo producto de la pendiente. Por último, la serie Paona tiene textura franco arenosa fina, fisiográficamente corresponde a una terraza reciente, posee color pardo grisáceo, con 1,0 m de profundidad, subsuelo correspondiente a sustrato de clastos, y napa freática a 0,8 m.

En general los suelos del Valle de Huasco prácticamente no presentan problemas de salinidad, a excepción de casos puntuales en las cercanías de la desembocadura del Río Huasco y en suelos del área de Huantemé (al norte de Vallenar). Los sectores con problemas de salinidad en el área de estudio coinciden con las series Bellavista y Paona. La condición salina presente en estos sectores se debe principalmente al aporte de aguas de

riego con una alta salinidad. Esto se ve agravado por la presencia de una napa freática superficial, encontrándose el agua en algunos casos a menos de un metro de profundidad.

iii) Fuentes de contaminación³¹

Las principales fuentes de contaminación en la zona costera de Huasco tienen su origen en las Centrales Termoeléctricas Guacolda y ENDESA (que operan en base a carbón bituminoso y sub-bituminoso), y a la Planta de Pellets de Hierro de la Compañía Minera del Pacífico (CMP). En el caso de la Central Termoeléctrica Guacolda, la emisión de contaminantes proviene de la generación de energía y de la transferencia y acopio de materiales. En particular, la generación de energía corresponde a la principal fuente de emisiones, con mayor implicancia en la composición química y dispersión del material en la atmósfera antes de depositarse sobre los suelos del área de influencia.

La Central Termoeléctrica Huasco de ENDESA se compone de cinco unidades generadoras, las dos primeras asociadas a la Central Huasco Vapor, y las tres restantes a la Central Huasco TG. La Central Huasco Vapor es de tipo térmica en base a carbón. La Central Huasco TG es de tipo térmica de gas oil, con combustión a partir del petróleo diesel. Los principales contaminantes emitidos desde estas centrales (Guacolda y ENDESA) son material particulado y dióxido de azufre.

Por último, la Planta de Pellets de Hierro de CMP ubicada 5 km al sur del Puerto de Huasco produce aglomerados de minerales de hierro y consta de una planta de molienda, más una unidad de pelletización industrial. El proceso de producción de hierro se realiza mediante la combustión de carbón de tipo bituminoso. Las emisiones de esta planta son principalmente material particulado con alto contenido de hierro, usado como materia prima, y contaminantes emitidos desde los procesos de secado y pelletización.

Con respecto a la caracterización química de las emisiones, en estudios previos se ha analizado preliminarmente la composición química de ellas (*Estudio para la Generación de Información de Soporte Técnico necesaria para la Revisión del D.S. N°4 del Ministerio de Agricultura*). Dentro de los elementos más abundantes se mencionan el hierro (Fe) en el caso de la planta de pellets, y silicio (Si), aluminio (Al) y calcio (Ca) en el caso de las generadoras termoeléctricas.

c) Estudios previos relacionados a contaminación

i) Estudios previos en el Valle de Huasco

Producto de la revisión de antecedentes se identificó una serie de estudios previos relacionados a contaminación en la parte baja del Valle de Huasco. A continuación se

³¹ Para más detalles sobre las cantidades de contaminantes emitidas por cada fuente industrial, ver resultados de actividades 1.a) y 1.b) en este Informe Final.

resumen los principales alcances de estos estudios en relación a contaminación de suelos. Los estudios se presentan en orden cronológico.

En el estudio *Tipificación de Elementos Particulados en el Valle del Río Huasco, III Región*, realizado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA, 1991), se llevó a cabo un muestreo de suelo en dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) en el sector agrícola del valle. El área correspondió a aquella donde se instalaron receptores de partículas sedimentables. Además se efectuó un muestreo tanto en cerros y caminos aledaños, además del material proveniente de la planta de pellets. Las muestras analizadas de la planta estaban constituidas mayoritariamente por óxidos de hierro, esencialmente magnetita (Fe_3O_4). Sin embargo, las muestras basales analizadas provenientes de los cerros y caminos eran mayoritariamente ricas en cuarzo y feldespatos de plagioclasa. Se demostró así que la fuente de origen de hierro en el valle era la Planta de Pellets CMP. Se concluyó que un aumento en el contenido de hierro, acompañado de una disminución en el contenido de silicio, es reflejo de una mayor participación industrial en el particulado sedimentable. Por el contrario, una disminución en los niveles de hierro, acompañada de un aumento en los niveles de silicio, denota una contaminación de origen distinto al industrial. Adicionalmente se detectaron algunas muestras de suelo con niveles críticos de salinidad para la producción de los olivos.

Un segundo estudio fue llevado a cabo por el Centro de Agricultura y Medioambiente de la Universidad de Chile (AGRIMED, 1999). En el estudio titulado *Estimación de la Participación de las Fuentes Emisoras en el Material Particulado de la Cuenca de Huasco*, se realizó un análisis para determinar las concentraciones de diferentes elementos químicos en muestras ambientales, de polvo de suelo y de materiales industriales en el Valle de Huasco. Se concluyó que la contaminación por material particulado en el valle se debía al transporte del mismo, desde las fuentes emisoras hasta el valle, y su consecuente decantación sobre los suelos. Se observó un gradiente en la concentración del material particulado sedimentable en el valle desde la costa hacia el interior del mismo. Además, el factor de enriquecimiento de hierro mostró un valor más alto cerca de la Planta de Pellets CMP, con cifras que superaban cinco veces el contenido de hierro de un suelo estándar.

En el trabajo titulado *Estudio de Calidad del Aire en la Comuna de Huasco*, realizado por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA, 2006), se llevó a cabo un análisis de las mediciones de calidad de aire en la Red de Monitoreo Guacolda. La red correspondía a dos lugares de muestreo ubicados a 25 y 50 m.s.n.m. en el área urbana de Huasco. Entre otros objetivos del estudio estaba el de evaluar la representatividad de las estaciones de monitoreo, las cuales mostraron diferencias sistemáticas principalmente debido al aporte de fuentes cercanas. Además se intentó caracterizar química, mineralógica y morfológicamente la composición del material particulado MP_{10} capturado en los filtros de las estaciones de monitoreo y otras fuentes. Se encontró que los elementos Zn, Ba, Al, Mn y Fe presentaban mayores concentraciones relativas (mg/kg). Hierro presentó una mayor concentración en la fracción gruesa, mayor inclusive a lo esperado para polvo

natural. Si bien estos análisis no corresponden a mediciones en suelo, sino en aire, describen las principales características de las emisiones contaminantes.

Posteriormente, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias desarrolló el trabajo titulado *Estudio para Determinar los Niveles de Hierro y Níquel en Aceitunas de Mesa en el Valle de Huasco, Región de Atacama* (INIA, 2007). Este estudio tuvo entre sus objetivos la determinación del contenido de hierro y níquel en aceitunas y aceite de oliva proveniente de huertos en el Valle de Huasco. Para ello se muestrearon transeptos en sentido longitudinal y transversal al valle. Si bien en este trabajo no se midieron las concentraciones de contaminantes en el suelo, se encontró una estrecha correlación entre la contaminación de los frutos y su cercanía con las fuentes de emisión. Se demostró que los niveles de hierro eran más altos en las muestras de aceituna y aceite de oliva en la medida que éstas provenían de sitios cercanos a la Planta de Pellets CMP. A su vez, los niveles disminuían a medida que los puntos de muestreo se alejaban de la fuente emisora. Por otro lado, los niveles de níquel en las muestras de aceituna y aceite de oliva eran inferiores al umbral de detección del método de análisis utilizado.

Recientemente el estudio titulado *Indicadores de Coexistencia Minería y Agricultura realizado por Fundación Chile* (Fundación Chile, 2010) abordó el tema de la problemática ambiental en el Valle del Huasco. Abarcando distintos componentes ambientales, este proyecto en curso tiene entre otros objetivos, el desarrollo de una metodología para evaluar el riesgo ecológico basado en una metodología recomendada por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.

ii) Otros estudios con condiciones similares al área de estudio

Con el objetivo de ampliar la información base sobre procesos de contaminación de suelos bajo condiciones similares a las observadas en el Valle de Huasco, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre situaciones análogas. Producto de esta revisión se identificaron los estudios que se describen brevemente a continuación.

En general, las emisiones generadas por las centrales termoeléctricas son similares a los procesos de combustión. La combustión de carbón y petróleo proporciona metales pesados (si se encuentran en concentraciones significativas en el combustible), óxidos de sulfuro y nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. La calidad y composición del combustible es clave para determinar el tipo de residuo. Es así como las emisiones de PM₁₀ pueden contener cenizas, compuestos de carbón (frecuentemente como resultado de la combustión incompleta), ácidos condensados, sulfatos, nitratos y también plomo, cadmio y otros metales (Brigden y Santillo, 2002; Kröppl et al., 2011; Sushil y Batra, 2006; USDA-NRCS, 2000)

González e Ite (1992) publicaron un estudio titulado *Acumulación Metálica en Suelos del Área bajo Influencia de las Chimeneas Industriales de Ventanas* (Provincia Valparaíso, V Región). En este trabajo se muestreó suelo superficial (0 y 20 cm) en el área de influencia

de las emisiones atmosféricas de las chimeneas de la zona industrial localizada en Ventanas. El objetivo principal fue evaluar el enriquecimiento metálico en los suelos del área industrial. Para esto, se determinó la concentración total de metales en las muestras de suelo y luego se compararon con los resultados analizados ocho años antes. Se observó un incremento sustancial en los contenidos de cobre, plomo, zinc y cadmio en las muestras de suelo luego de ocho años. Esto es, un aumento en 330 veces en el cobre, 48 veces en el plomo y en el cadmio y 13 veces en el zinc. Además se determinó la presencia de arsénico, no evaluado en las muestras tomadas ocho años antes, mostrando valores por encima de lo habitual en los suelos de la zona.

A nivel internacional, Singh *et al.* (2010) desarrollaron el estudio titulado *Accumulation and Translocation of Heavy Metals in Soil and Plants from Fly Ash Contaminated Area*. Evaluaron la acumulación de metales pesados en muestras de suelo y en varias especies vegetales (tanto de raíces como de brotes) en un terreno contaminado con las cenizas provenientes de una planta termoeléctrica en el distrito de Sonebhadra, India. Estas muestras fueron comparadas con muestras de suelo y de plantas provenientes de zonas alejadas al área de influencia de las emisiones termoeléctricas. Los resultados mostraron que en las muestras del terreno contaminado, el nivel medio de todos los metales (Cd, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, Mn y Fe) fue significativamente más alto que en el sitio no contaminado.

A nivel forestal, Hernández *et al.* (2003) desarrollaron el estudio *Heavy Metals Distribution in some French Forest Soils: Evidence for Atmospheric Contamination*. En este estudio midieron la concentración de metales pesados en muestras de suelo a tres profundidades en 11 terrenos forestales de Francia. La concentración de metales pesados medidos en estos suelos disminuía de la siguiente manera: Cr>Zn>Pb>Ni> Cu>Co>Cd. El menor contenido de metales pesados se observó en los suelos ácidos, mientras que las mayores concentraciones se encontraron en los suelos calcáreos. Los autores observaron que la concentración de cada metal pesado variaba dependiendo de la profundidad del suelo, y de las propiedades físicas y químicas del suelo tales como pH, potencial redox y el contenido de humedad. Estas propiedades afectaban de manera directa la tasa de transformación química de cada elemento en la fase sólida.

Otro estudio, más reciente es el desarrollado por Machado *et al.* (2010), *Influencia de una Planta Termoeléctrica en la Concentración de V y Ni en Sedimentos de la Ciudad de Maracaibo, Venezuela*. En este trabajo se determinó la distribución y concentraciones de vanadio y níquel en sedimentos viales y la relación de dicha concentración con las cenizas en suspensión generadas de la combustión del fuel oil en la planta termoeléctrica de Maracaibo. La distribución de las concentraciones demostró la influencia de la planta termoeléctrica en las emisiones de estos metales, obteniéndose valores más altos en el sector cercano a la planta. Los investigadores concluyeron que la dispersión de estas cenizas es una de las principales causas de la presencia de los metales níquel y vanadio en los sedimentos. Este último, una vez depositado, podría ser un inhibidor de la actividad enzimática en el suelo.

d) Selección de sitios y muestreo de suelos

Utilizando la modelación preliminar de la dispersión de contaminantes atmosféricos desarrollada en este estudio por la Unidad Ejecutora, se determinaron los sectores que presentan mayor impacto producto de la depositación de partículas generados por las Plantas Termoeléctricas Guacolda y ENDESA y la Planta de Pellet de CMP. En base a esto se seleccionaron 16 sitios para el muestreo de suelo y análisis de metales pesados. Los puntos de muestreo identificados y georeferenciados formaron un transecto desde las posibles fuentes contaminantes hasta el interior del valle. Esto corresponde al sector comprendido entre la parte baja de Huasco y Freirina (sitios HS1 al HS14). En la selección específica de cada sitio de muestreo se prefirieron terrenos con presencia de huertos de olivo.



Figura 141. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo en Valle de Huasco.

Además de lo anterior, y con el objetivo de establecer valores de referencia en el valle, se muestrearon dos puntos de control entre Freirina y Vallenar (sitios HS15 y HS16), en un área potencialmente menos afectada por la deriva de las emisiones provenientes de la zona del puerto. La distribución espacial de los puntos de muestreo se presenta en la Figura 141.

Las coordenadas UTM y altura de cada sitio de muestreo se indican en la siguiente Tabla. Nueve de estos sitios coinciden o se encuentran muy cerca de los puntos de monitoreo de MPS instalados por la Unidad Ejecutora.

Tabla 40. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo en el Valle de Huasco.

Sitio de muestreo	Coordenadas UTM WGS-84		Altitud (m)
	Este	Norte	
HS01	283920	6848844	34
HS02	285411	6849216	26
HS03	285866	6849688	6
HS04	286267	6850302	23
HS05	286327	6848387	35
HS06	286770	6849626	10
HS07	286813	6848064	38
HS08	287474	6848945	11
HS09	287609	6849416	9
HS10	288363	6848873	20
HS11	288536	6847654	20
HS12	289543	6846834	37
HS13	294486	6844876	95
HS14	294663	6845584	67
HS15	309894	6843271	217
HS16	322333	6839253	371

Otra variable considerada en la selección de los sitios de muestreo fue la presencia de la línea del tren y el transporte de material a lo largo del valle. Con el fin de evaluar el posible efecto del arrastre de material debido al viento, se muestrearon sitios ubicados a distintas distancias y orientaciones (norte y sur) en relación a la línea del tren. Tal como se muestra en la Figura 142, los sitios se distribuyeron de forma tal que se muestrearon puntos desde 60 m hasta 1200 m de distancia de la línea del tren.

La tercera semana del mes de julio de 2011 se llevó a cabo la campaña de terreno para el muestreo de los suelos en los sitios seleccionados. Se tomaron 32 muestras de suelo, correspondientes a 16 sitios y dos profundidades de suelo (0-5 cm y 20 cm). Las muestras se tomaron de preferencia sobre la hilera de plantación, equidistante entre dos árboles consecutivos. En cada uno de los puntos de muestreo se realizó una descripción del sitio y su entorno, condición general del huerto, y descripción preliminar de las características físicas del suelo (Figura 143). Las muestras de suelo, de aproximadamente 1 kg, se dispusieron en bolsas ziploc debidamente rotuladas y se trasladaron a Santiago para análisis de laboratorio.

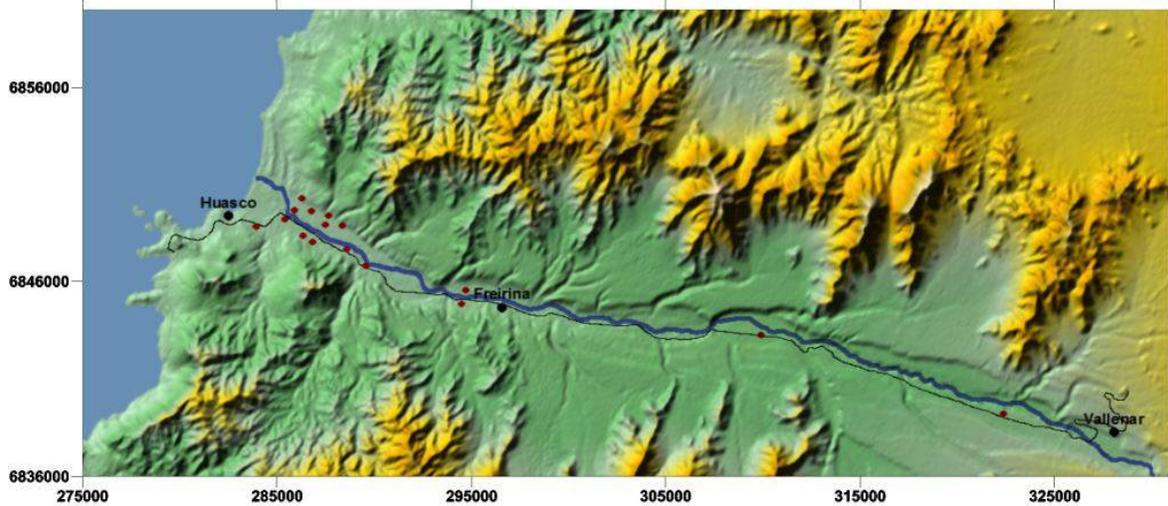


Figura 142. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo (círculos rojos) en relación al trazado de la línea del tren (línea negra). Con la línea azul se muestra la ubicación del eje central del río.



Figura 143. Muestreo de suelo en el Valle de Río Huasco. En cada punto de muestreo se realizó una descripción del lugar y su entorno, condición general del huerto y descripción preliminar del suelo.

e) Análisis de laboratorio y análisis estadístico

Dado el tipo y ocurrencia de contaminación documentada en el área, se utilizó una combinación de un análisis de tipo *screening* (barrido) y uno que consistía de técnicas rutinarias más demorosas y bajo certificación. El análisis tipo *screening* se empleó para determinar la presencia de metales específicos. Se utilizó para ello un instrumento portátil de Fluorescencia de Rayos X (XRF). Esto permitió realizar mediciones rápidas de metales y metaloides para definir los elementos para análisis detallado. El análisis detallado se

realizó con la técnica de Fluorescencia de Rayos X con Reflexión Total (TXRF). Estos resultados fueron validados mediante el envío de contra muestras a un laboratorio externo para análisis con técnicas rutinarias más demorosas y bajo certificación.

Las muestras de suelo fueron preparadas en el laboratorio para su análisis de metales y metaloides mediante XRF y TXRF. En forma paralela, una parte de las muestras fue separada y enviada para análisis de textura y materia orgánica al Laboratorio de Análisis Foliar y de Suelo de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Para el análisis de XRF las muestras de suelo fueron secadas por 16 horas a 40°C y posteriormente tamizadas a < 2 mm (el material de mayor tamaño fue descartado). Un espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X portátil (Olympus Innov-X XRF) fue usado para la determinación de metales. Se utilizaron dos métodos de medición: *Soil*, el cual determina elementos entre P a U y entrega resultados como mg kg⁻¹ y *Mining*, que mide elementos entre Mg a Cd, entregando resultados porcentuales. En el análisis se utilizó Mylar film sobre la muestra para disminuir las interferencias en la lectura del instrumento. Los valores de concentración así obtenidos fueron utilizados para definir los elementos para el análisis detallado. Los elementos así identificados fueron los siguientes: Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As y Pb.

En el caso del análisis de TXRF, cada muestra de suelo fue secada por 16 horas a 40°C y luego tamizada a < 2 mm (el material de mayor tamaño fue descartado). Las muestras fueron luego digeridas según el protocolo EPA 3051A (EPA, 2007), utilizando un digestor de microondas CEM MARS Xpress. Las muestras digeridas fueron diluidas y se les adicionó una cantidad conocida de estándar interno (Ga). Posteriormente, 10 µL de esta suspensión fueron transferidos a un portamuestra de cuarzo y secados en una placa calefactora (40-50°C) en cámara de flujo laminar. Un espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X por reflexión total (S2 PICOFOX, Bruker) fue usado para la determinación de metales. Las mediciones fueron llevadas a cabo por 500 segundos por triplicado. El espectro fue evaluado con el software Spectra (Bruker) y la cuantificación fue calculada por adición de estándar interno.

En los análisis de comparación de medias se usó la prueba de t. Para el nivel de significancia se empleó un valor *p* igual o menor a 0,05 en todos los análisis estadísticos. En los casos en los cuales se empleó análisis de correlación para evaluar la relación entre dos series de datos, se utilizó Excel y un procedimiento de ajuste por mínimos cuadrados.

f) Resultados

i) Caracterización de los sitios de muestreo

A continuación se entrega una descripción de los puntos de muestreo en términos de la descripción del lugar y su entorno, condición general del huerto y descripción preliminar de las características del suelo.

Sitio HS01

UTM 283920 m, 6448844 m

Huerto con hileras de olivos plantados en camellón y sistema de riego por goteo con goteros cada 1 metro. Plantas en condición de regular a mala (árboles muertos y hojas quemadas), sin frutos. Muestra de suelo tomada entre dos goteros consecutivos sobre la hilera y a 50 cm del tronco de un árbol en estado regular. Horizonte de suelo superior con abundante hojarasca, poroso e insectos pequeños. Suelo pedregoso en profundidad con guijarros de 3 cm. Suelo color pardo bien estructurado, agregados de 1 cm, no compactado. Textura Franco arenosa, pH de 7,93, conductividad eléctrica de 8,75 mS/cm y contenido de materia orgánica de 3,37 %.



Sitio HS02

UTM 285411 m, 6849216 m

Huerto de olivos de 3 m de alto plantados a 8 x 8 m. Sin sistema de riego y sin camellones. Plantas en estado regular con frutos y hojas con fumagina. Muestras de suelo tomadas a 1,5 m del tronco del árbol. Suelo homogéneo, poroso y con gran cantidad de arena. Abundante pedregosidad en superficie. Presencia de chéptica y otros pastos. Textura Franco arenosa, pH de 8,36 y conductividad eléctrica de 1,38 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 3,17 %.

**Sitio HS03**

UTM 285866 m, 6849688 m

Huerto con plantación irregular de olivos, sin manejo y sin camellones. Árboles antiguos de aproximadamente 9 m de alto y en su mayoría sanos y con frutos. Muestra de suelo tomada entre dos árboles consecutivos. Suelo con abundante presencia de materia orgánica y abundante humedad. Lecho de vega con maleza y matorral de vega. Textura Franco arenosa, un pH de 8,19 y conductividad eléctrica de 22,60 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 6,25 %.



Sitio HS04

UTM 286267 m, 6850302 m

Terreno de dunas al costado de camino de la ruta costera. Suelo arenoso con escasa intervención, desagregado y presencia de pasto superficial. Textura Arena francosa, un pH de 8,42 y conductividad eléctrica de 1,77 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 0,72 %.

**Sitio HS05**

UTM 286327 m, 6848387 m

Huerto de olivos plantados a 8 x 8 m y de 8 m de alto. Riego por surcos. Árboles en buen estado con un poco de fumagina. Muestra de suelo tomada entre dos árboles. Suelo con abundante arena, homogéneo y con piedras de aproximadamente 3 cm. Maleza en superficie del suelo. Textura Franco arenosa, pH de 8,42 y conductividad eléctrica de 1,65 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 3,35 %.



Sitio HS06

UTM 286770 m, 6849626 m

Huerto de olivos plantados en cuadrícula de 8 x 8 m de aproximadamente 8 a 10 m de alto, riego por inundación. Árboles en excelente condición y con frutos. Pasto en superficie. Propietario del huerto mejoró la condición del suelo mediante la instalación de drenes y ripio hace 30 años. Textura Franca, pH de 8,59 y conductividad eléctrica de 3,06 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 5,04 %.

**Sitio HS07**

UTM 286813 m, 6848064 m

Huertos de olivo originalmente plantado a 8 x 8 m, actualmente a 4 x 4 m con árboles de diferentes tamaños. La toma de muestra se realizó entre 2 árboles (uno de 80 cm de alto y el otro de 2 m). Suelo con abundante porosidad y uniforme en profundidad. Guijarros de 2 cm de diámetro en promedio. Suelo con malezas, abundantes raíces y lombrices. Textura Franco arenosa, pH de 8,51 y conductividad eléctrica de 2,58 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 4,73 %.



Sitio HS08

UTM 287474 m, 6848945 m

Árboles de distintas edades plantados a distancia de 6 x 8 m con perales intercalados. Algunos árboles en buenas condiciones y otros secos. Toma de muestra entre dos árboles. Suelo superficial desagregado. Horizonte B más compactado y abundante arcilla. Bien consolidado. Suelo húmedo con alto contenido de materia orgánica. Textura Franco limosa, pH de 8,82 y conductividad eléctrica de 107,0 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 6,47 %.

**Sitio HS09**

UTM 287609 m, 6849416 m

Huerto de olivos plantados a distancia de 6 x 8 m y de 6 m de alto. Árboles mezclados, de entre 15 y 60 años. Árboles en buen estado. Toma de muestra entre 2 árboles. Suelo superficial rico en arena, con vegetación y abundantes raíces. Horizonte B con abundante arena. Textura Franco arenosa, pH de 8,34 y conductividad eléctrica de 1,28 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 2,99 %.



Sitio HS10

UTM 288363 m, 6848873 m

Huerto de olivos plantados a 8 x 8 m. Árboles de diferentes tamaños, de entre 4 y 6 m de alto. Riego en platabanda. Muestreo de suelo entre dos árboles. Suelo en superficie con algo de arena. Abundante maleza y rastrojos en la hilera. Suelo con alto nivel de macroporos y presencia de raíces. Horizonte inferior con más arena y abundantes lombrices. Textura Franco limosa, pH de 8,13 y conductividad eléctrica de 20,68 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 4,51 %.

**Sitio HS11**

UTM 288536 m, 6847654 m

Huerto de olivos originalmente plantados a 8 x 8 m. Árboles de diferentes tamaños (en su mayoría de 4 a 5 m). Algunos árboles afectados con fumagina. Toma de muestra entre dos árboles. Suelo bien estructurado, abundantes raíces, malezas y algunas piedras pequeñas. Suelo húmedo con insectos y chanchitos. Horizonte inferior con abundantes piedras de 5 a 10 cm. Textura Franco arenosa, pH de 8,30 y conductividad eléctrica de 1,00 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 4,86 %.



Sitio HS12

UTM 289543 m, 6846834 m

Huerto de olivos plantado a 8 x 8 m en zigzag. Plantas de 6 m de alto. Sistema de riego por microject. Árboles relativamente sanos con poca fumagina. Muestreo de suelo entre 2 árboles consecutivos. Suelo con hojarasca en superficie, homogéneo, poroso, de buena estructura y pedregosidad mediana a alta. Textura Franco arenosa, pH de 7,73 y conductividad eléctrica de 11,60 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 7,73 %.

**Sitio HS13**

UTM 294486 m, 6844876 m

Huerto de olivos con árboles de 6 m plantados a distancia de 8 x 8 m. Riego por platabanda. Huerto en buen estado. Muestreo de suelo entre dos árboles. Presencia de chéptica y maleza sobre y entre la hilera. Suelo de buena estructura, con arena y arcilla. Suelo compactado en horizonte inferior. Textura Franca, pH de 7,60 y conductividad eléctrica de 1,34 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 3,63 %.



Sitio HS14

UTM 294663 m, 6845584 m

Huerto de olivos plantados a distancia de 8 x 8 m. Árboles de aproximadamente 7 m de alto, de más de 50 años, regados por surco y con siembra de hortalizas en la entre hilera. Plantas en buen estado y algunas con inicio de chanchito blanco y fumagina. Se muestreo entre dos árboles. Lecho de río. Suelo arenoso, oscuro y sin malezas. Alta humedad. Textura Franco arenosa, pH de 8,72 y conductividad eléctrica de 27,00 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 3,07 %.

**Sitio HS15**

UTM 309894 m, 6843271 m

Huerto de olivos plantados a 5 x 5 m. Árboles de diferentes tamaños entre 1,5 y 4 m. Sistema de riego por goteo a 2 hileras con goteros en el árbol. Algunos árboles en buen estado y otros secos. Muestreo entre dos árboles. Suelo superficial rico en materia orgánica, abundantes raíces y hojas en descomposición (2 centímetros de capa vegetal). Horizonte inferior muy pedregoso y abundante en raíces. Textura Franca, pH de 8,08 y conductividad eléctrica de 6,49 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 7,55 %.



Sitio HS16

UTM 322333 m, 6839253 m

Huerto de olivos jóvenes plantados a 3 x 6 m. Plantas en buen estado, de aproximadamente 2,5 m de alto. Sistema de riego por goteo a 50 cm. Hileras enmalezadas. Muestreo entre dos árboles. Suelo con algo de arena, muy pedregoso y con abundantes raíces. Buena estructura, color café pardo. Los dos horizontes se observan homogéneos. Textura Franco arenosa, pH de 8,35 y conductividad eléctrica de 27,90 mS/cm. Contenido de materia orgánica de 1,32 %.



ii) Presencia de metales específicos en el suelo

Mediante el análisis de TXRF se midieron las concentraciones de los siguientes metales identificados en el *screening*: Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As y Pb. A continuación se presenta un análisis de las concentraciones medidas en relación a la ubicación del punto de muestreo y las fuentes de contaminación. La Tabla 41 entrega un resumen de las mediciones y el detalle de los valores de concentración medidos se presentan en la Figura 144. En los casos donde existe documentación al respecto, se discute sobre los rangos típicos en los cuales se encuentran estos metales en los suelos cultivados y se comparan dichos estándares con los valores medidos en los puntos muestreados.

Tanto los resultados del análisis de *screening* (XRF) como los provenientes del análisis de fluorescencia de rayos X con reflexión total (TXRF) fueron validados mediante la comparación con 16 contramuestras enviadas a un laboratorio certificado (Análisis Ambientales S.A., ANAM). Los coeficientes de correlación (r) calculados entre los valores certificados y los provenientes del análisis de TXRF fueron todos superiores a 0,74. Las correlaciones obtenidas para cada elemento individual fueron las siguientes: cromo $r = 0,86$; manganeso $r = 0,85$; hierro $r = 0,90$; cobre $r = 0,99$; zinc $r = 0,74$; arsénico $r = 0,90$ y plomo $r = 0,79$.

Tabla 41. Concentraciones de metales medidos en el muestreo de suelo en el Valle de Huasco.

Elemento	Profundidad cm	Promedio	Desviación	Coficiente	Máximo	Mínimo
			estándar	de variación		
		mg/kg				
Cr	0-5	33	9	0.27	45	17
	20	47	36	0.76	151	27
Mn	0-5	553	170	0.31	865	312
	20	680	528	0.78	2581	303
Fe	0-5	28228	7074	0.25	45035	20066
	20	33775	27001	0.80	132437	17869
Cu	0-5	67	111	1.66	480	19
	20	75	105	1.41	446	21
Zn	0-5	118	36	0.30	201	70
	20	123	69	0.57	367	64
As	0-5	10	5	0.53	27	4
	20	14	18	1.30	81	4
Pb	0-5	17	8	0.44	35	6
	20	23	16	0.69	60	8

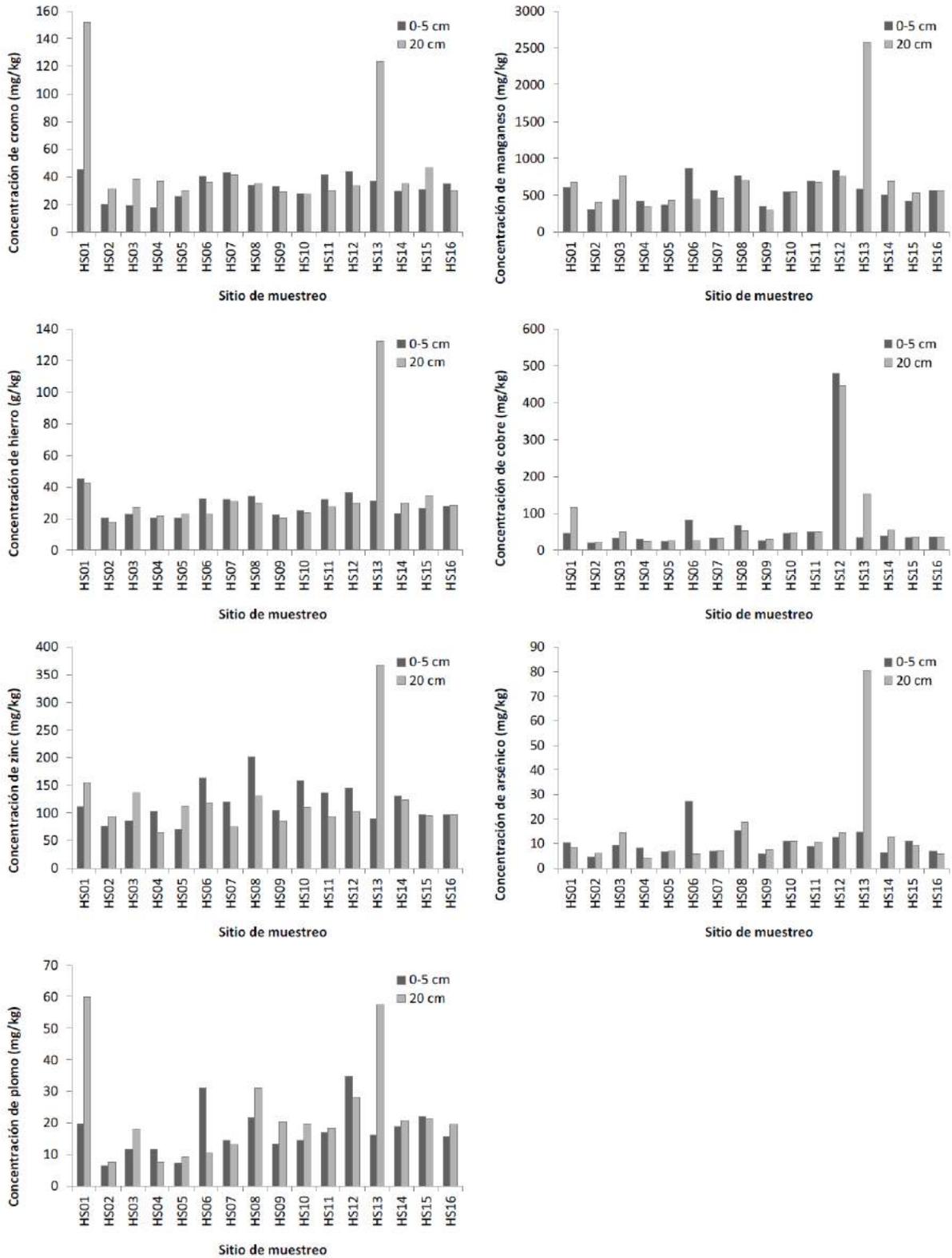


Figura 144. Concentración de metales medidos en los suelos muestreados. El gráfico muestra los valores medidos en superficie (0-5 cm) y en profundidad (20 cm).

iii) Cromo

En el caso del elemento cromo, la concentración promedio medida en los suelos fue de 33 mg/kg en la superficie del suelo (0-5 cm) y de 47 mg/kg en profundidad (20 cm). El rango de valores medidos fue de 17 mg/kg (sitio HS04, 0-5 cm) a 151 mg/kg (sitio HS01, 20 cm). Tal como se observa en la Figura 144, la mayoría de los suelos presentó concentraciones de cromo en el rango de 20 a 40 mg/kg. La excepción a esta tendencia está marcada por los niveles registrados en los sitios HS01 (20 cm) y HS13 (20 cm), con concentraciones de 151 y 124 mg/kg, respectivamente. Dentro de los puntos muestreados, el sitio HS01 es el punto más cercano a las fuentes de emisión en la costa, y el sitio HS13 es uno de los más alejados.

Al analizar las concentraciones medidas en los puntos ubicados en el área de influencia (sitios HS01 a HS14) y compararla con los puntos control (HS15 y HS16), no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los valores registrados en ambas áreas. La proporción entre los valores promedio medidos en el área de influencia y en los puntos control fue de 0,99 para el caso del suelo superficial y de 1,27 para las muestras en profundidad (Figura 145). La concentración promedio en la superficie del suelo fue de 33 mg/kg, tanto en los sitios del área de influencia como en los puntos control. En el caso de las mediciones en profundidad (20 cm), los valores promedio medidos fueron de 49 y 38 mg/kg en el área de influencia y en los puntos control, respectivamente.

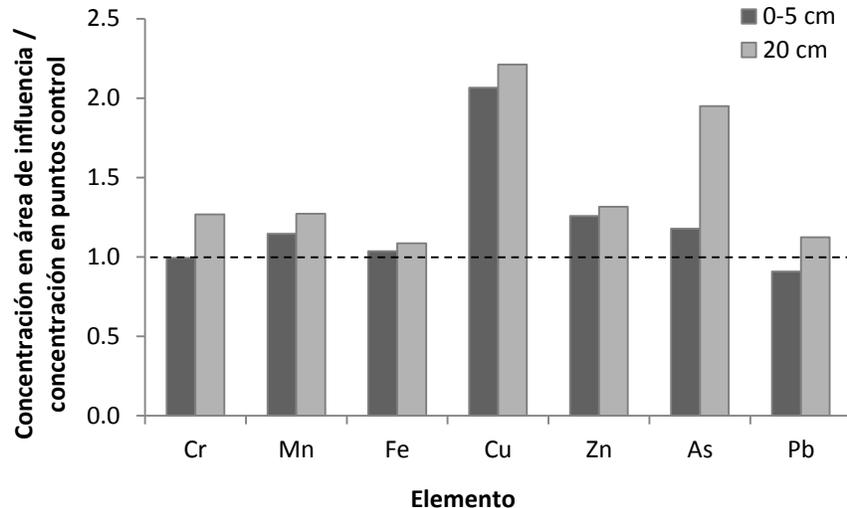


Figura 145. Proporción entre la concentración promedio medida en los sitios del área de influencia (HS01 al HS14) y los puntos control (HS15 y HS16) según elemento analizado. El gráfico muestra las proporciones calculadas considerando los valores medidos en superficie (0-5 cm) y en profundidad (20 cm).

De acuerdo a la literatura, el rango de concentración en el cual se encuentra el cromo en los suelos va de 1 a 1500 mg/kg (Lindsay, 1979; Alloway, 1990). El valor común de concentración en suelos está en el rango de 70-100 mg/kg (Alloway, 1990) y la media en

suelos es de 100 mg/kg (Lindsay, 1979). En el caso de los suelos muestreados, tanto la media (33 mg/kg y 47 mg/kg), como el rango (17 a 151 mg/kg) se encuentran entre los valores esperados para suelos cultivados.

iv) Manganeso

La concentración promedio del elemento manganeso medida en los suelos fue de 553 mg/kg en la superficie del suelo (0-5 cm) y de 680 mg/kg en profundidad (20 cm). El rango de valores medidos fue de 303 mg/kg (sitio HS09, 20 cm) a 2581 mg/kg (sitio HS13, 20 cm). Como se observa en la Figura 144, la mayoría de los suelos presentó concentraciones de manganeso en el rango de 400 a 600 mg/kg. La excepción la constituye el nivel registrado en el sitio HS13 (20 cm), con una concentración de 2581 mg/kg. Dentro de los sitios muestreados en el área de influencia de las fuentes de emisión en la costa, el sitio HS13 es uno de los más alejados.

Al analizar las concentraciones medidas en los puntos ubicados en el área de influencia y compararla con los puntos control, no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los valores registrados en ambas áreas. La proporción entre los valores promedio medidos en el área de influencia y en los puntos control fue de 1,15 para el caso del suelo superficial y de 1,27 para las muestras en profundidad (Figura 145). La concentración promedio en la superficie del suelo fue de 562 y 490 mg/kg, para los sitios del área de influencia y en los puntos control, respectivamente. En el caso de las mediciones en profundidad (20 cm), los valores promedio medidos fueron de 699 y 550 mg/kg en el área de influencia y en los puntos control, respectivamente.

De acuerdo a la literatura, el rango de concentración en el cual se encuentra el manganeso en los suelos va de 20 a 10000 mg/kg (Lindsay, 1979; Alloway, 1990). El valor común de concentración en suelos es de 1000 mg/kg (Alloway, 1990) y la media en suelos es de 600 mg/kg (Lindsay, 1979). El nivel de toxicidad en suelo para plantas cultivadas es de 3000 mg/kg (Mendez y Maier, 2008). En el caso de los suelos muestreados, tanto la media (553 o 680 mg/kg), como el rango (303-2581 mg/kg) se encuentran entre los valores esperados para suelos cultivados. Ninguna de las muestras de suelo superó el umbral de toxicidad.

v) Hierro

La concentración promedio del elemento hierro medida en los suelos fue de 28 g/kg en la superficie del suelo (0-5 cm) y de 34 g/kg en profundidad (20 cm). El rango de valores medidos fue de 18 g/kg (sitio HS02, 20 cm) a 132 g/kg (sitio HS13, 20 cm). En la Figura 144, la mayoría de los suelos presentó concentraciones de hierro en el rango de 20 a 30 g/kg. La excepción a este rango está dada por el nivel registrado en el sitio HS13 (20 cm), con una concentración de 132 g/kg. Dentro de los sitios muestreados en el área de influencia de las fuentes de emisión en la costa, el sitio HS13 es uno de los más alejados.

El análisis de las concentraciones medidas en los puntos ubicados en el área de influencia y su comparación con los puntos control indica que no existe diferencia estadísticamente

significativa entre los valores registrados en ambas áreas. La proporción entre los valores promedio medidos en el área de influencia y en los puntos control fue de 1,04 para el caso del suelo superficial y de 1,09 para las muestras en profundidad (Figura 145). La concentración promedio en la superficie del suelo fue de 28 g/kg en los sitios del área de influencia y de 27 g/kg en los puntos de control. En el caso de las mediciones en profundidad (20 cm), los valores promedio medidos fueron de 34 y 31 mg/kg en el área de influencia y en los puntos de control, respectivamente.

De acuerdo a la literatura, el rango de concentración en el cual se encuentra el hierro en los suelos va de 7 a 550 g/kg (Lindsay, 1979). La media en suelos es de 38 g/kg (Lindsay, 1979). En el caso de los suelos muestreados, tanto la media (28 o 34 g/kg), como el rango (18 a 132 g/kg) se encuentran entre los valores esperados para suelos de este tipo.

vi) Cobre

En los suelos de los sitios muestreados, el elemento cobre presentó una concentración promedio de 67 mg/kg en la superficie del suelo (0-5 cm) y de 75 mg/kg en profundidad (20 cm). El rango de valores medidos fue de 19 mg/kg (sitio HS02, 0-5 cm) a 480 mg/kg (sitio HS12, 0-5 cm). Tal como se observa en la Figura 144, la mayoría de los suelos presentó concentraciones de cobre en el rango de 20 a 50 mg/kg. La excepción a esta tendencia está marcada por el nivel registrado en el sitio HS12 (0-5 cm), con una concentración de 480 mg/kg. Dentro de los sitios muestreados, el punto HS12 corresponde a uno de los sitios más distante dentro del área de influencia de las fuentes de emisión en la costa.

Al comparar las concentraciones medidas en los puntos ubicados en el área de influencia y con las registradas en los puntos control no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los valores registrados en ambas áreas. La proporción entre los valores promedio medidos en el área de influencia y en los puntos control fue de 2,07 para el caso del suelo superficial y de 2,21 para las muestras en profundidad (Figura 145). La concentración promedio en la superficie del suelo fue de 71 mg/kg en los sitios del área de influencia, y de 35 mg/kg en los puntos control. En el caso de las mediciones en profundidad (20 cm), los valores promedio medidos fueron de 80 y 36 mg/kg en el área de influencia y en los puntos control, respectivamente.

De acuerdo a la literatura, el rango de concentración en el cual se encuentra el cobre en los suelos va de 2 a 250 mg/kg (Lindsay, 1979; Alloway, 1990; Mortvedt, 2000). El valor común de concentración en suelos está en el rango de 20-30 mg/kg (Alloway, 1990) y la media en suelos es de 30 mg/kg (Lindsay, 1979; Mortvedt, 2000). En diversos estudios se han documentado síntomas de toxicidad en plantas cultivadas con concentraciones cercanas o superiores a los 200 mg de cobre total por kilogramo de suelo (Alva, 1993; Perderson et al., 2000; McBride, 2001). Este umbral de toxicidad coincide con las concentraciones máximas de cobre total establecidas en varios países europeos y de Norteamérica para suelos agrícolas (Harrison et al., 1999; Kabata-Pendias y Pendias, 2000). En el caso de los suelos muestreados, la media (67 y 75 mg/kg) se encuentra entre

los valores esperados para suelos cultivados. Sin embargo, en el sitio HS12 se supera el umbral de concentraciones máximas, tanto en superficie (480 mg/kg) como en profundidad (446 mg/kg).

vii) Zinc

En el caso del elemento zinc, la concentración promedio medida en los suelos fue de 118 mg/kg en la superficie del suelo (0-5 cm) y de 123 mg/kg en profundidad (20 cm). El rango de valores medidos fue de 64 mg/kg (sitio HS04, 20 cm) a 367 mg/kg (sitio HS13, 20 cm). Como se observa en la Figura 144, la mayoría de los suelos presentó concentraciones de zinc en el rango de 70 a 150 mg/kg. La excepción está marcada por los niveles registrados en el sitio HS13 (20 cm), con una concentración de 367 mg/kg. Dentro de los sitios muestreados, el sitio HS13 es uno de los más alejados en el área de influencia de las fuentes de emisión en la costa.

Al analizar las concentraciones medidas en los puntos ubicados en el área de influencia y compararla con los puntos control, se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los valores registrados en ambas áreas. La proporción entre los valores promedio medidos en el área de influencia y en los puntos control fue de 1,26 para el caso del suelo superficial y de 1,32 para las muestras en profundidad (Figura 145). La concentración promedio en la superficie del suelo fue de 121 mg/kg en los sitios del área de influencia y de 96 mg/kg en los sitios control. En el caso de las mediciones en profundidad (20 cm), los valores promedio medidos fueron de 126 y 96 mg/kg en el área de influencia y en los sitios control, respectivamente.

De acuerdo a la literatura, el rango de concentración en el cual se encuentra el zinc en los suelos va de 10 a 300 mg/kg (Lindsay, 1979; Alloway, 1990). El valor común y de concentración media en suelos es de 50 mg/kg (Alloway, 1990; Lindsay, 1979). El nivel de toxicidad en suelo para plantas cultivadas es de 400 mg/kg (Mendez y Maier, 2008). En el caso de los suelos muestreados, la concentración media (118 y 123 mg/kg) se encuentra en el valor esperado para suelos cultivados. En el caso del rango de concentraciones medidas, sólo una muestra supera el rango típico esperado en suelos, específicamente en el sitio HS13, con una concentración de 367 mg/kg. No obstante lo anterior, ninguna muestra superó el umbral de toxicidad.

viii) Arsénico

La concentración promedio de arsénico medida en los suelos fue de 10 mg/kg en la superficie del suelo (0-5 cm) y de 14 mg/kg en profundidad (20 cm). El rango de valores medidos fue de 4 mg/kg (sitio HS02, 0-5 cm y sitio HS04, 20 cm) a 81 mg/kg (sitio HS13, 20 cm). Tal como se observa en la Figura 144, la mayoría de los suelos presentó concentraciones de arsénico en el rango de 5 a 15 mg/kg. La excepción a esta tendencia está dada por los niveles registrados en el sitio HS13 (20 cm), con concentraciones de 81 mg/kg. Dentro de los sitios muestreados en el área de influencia de las fuentes de emisión en la costa, el sitio HS13 es uno de los más alejados.

La comparación entre las concentraciones medidas en los puntos ubicados en el área de influencia y la registrada en los puntos control no mostró diferencia estadísticamente significativa entre los valores registrados en ambas áreas. La proporción entre los valores promedio medidos en el área de influencia y en los puntos control fue de 1,18 para el caso del suelo superficial y de 1,95 para las muestras en profundidad (Figura 145). La concentración promedio en la superficie del suelo fue de 11 mg/kg en los sitios del área de influencia y de 9 mg/kg en los sitios control. En el caso de las mediciones en profundidad (20 cm), los valores promedio medidos fueron de 15 y 8 mg/kg en el área de influencia y en los sitios control, respectivamente.

De acuerdo a la literatura, el rango de concentración en el cual se encuentra el arsénico en los suelos va de 0,1 a 50 mg/kg (Lindsay, 1979; Alloway, 1990). El valor común de concentración en suelos está en el rango de 1-20 mg/kg (Alloway, 1990) y la media en suelos es de 5 mg/kg (Lindsay, 1979). El nivel de toxicidad en suelo para plantas cultivadas es de 15 mg/kg (Mendez y Maier, 2008). En el caso de los suelos muestreados, la concentración media (10 y 14 mg/kg) está en el rango esperado para suelos cultivados. Sin embargo, debido a la concentración registrada en el sitio HS13, el rango de concentraciones medidas (4 a 81 mg/kg) supera los valores típicos. Por otra parte, en las muestras HS06 0-5 cm, HS08 0-5 cm, HS08 20 cm y HS13 0-5 cm se observan valores de concentración levemente superiores al umbral de toxicidad para plantas cultivadas, y sólo la muestra HS13 20 cm supera significativamente este umbral.

ix) Plomo

La concentración promedio de plomo medida en los suelos fue de 17 mg/kg en la superficie del suelo (0-5 cm) y de 23 mg/kg en profundidad (20 cm). El rango de valores medidos fue de 6 mg/kg (sitio HS02, 0-5 cm) a 60 mg/kg (sitio HS01, 20 cm). Como se observa en la Figura 144, la mayoría de los suelos presenta concentraciones de plomo en el rango de 10 a 30 mg/kg. La excepción a esta tendencia está marcada por los niveles registrados en los sitios HS01 (20 cm) y HS13 (20 cm), con concentraciones de 60 y 58 mg/kg, respectivamente. Dentro de los sitios muestreados, el sitio HS01 es el punto más cercano a las fuentes de emisión en la costa, y el sitio HS13 es uno de los más alejados.

Al analizar las concentraciones medidas en los puntos ubicados en el área de influencia y compararla con los puntos control, no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los valores registrados en ambas áreas. La proporción entre los valores promedio medidos en el área de influencia y en los puntos control fue de 0,91 para el caso del suelo superficial y de 1,12 para las muestras en profundidad (Figura 145). La concentración promedio en la superficie del suelo fue de 17 y 19 mg/kg, en los sitios del área de influencia y en los puntos control respectivamente. En el caso de las mediciones en profundidad (20 cm), los valores promedio medidos fueron de 23 y 20 mg/kg en el área de influencia y en los puntos control, respectivamente.

Según la literatura especializada, el rango de concentración en el cual se encuentra el plomo en los suelos va de 2 a 300 mg/kg (Lindsay, 1979; Alloway, 1990). El valor común de

concentración en suelos está en el rango de 10-30 mg/kg (Alloway, 1990) y la media en suelos es de 10 mg/kg (Lindsay, 1979). El nivel de toxicidad en suelo para plantas cultivadas está en el rango de 100 a 500 mg/kg (Mendez y Maier, 2008). En el caso de los suelos muestreados, tanto la media (17 y 23 mg/kg), como el rango (6 a 60 mg/kg) se encuentran entre los valores esperados para suelos cultivados. Ninguna de las muestras superó el umbral de toxicidad.

x) Efecto de la distancia a las fuentes de emisión en la costa

La relación entre la concentración de metales medidos en el suelo y la distancia a las fuentes de emisión en la costa se presenta en la Figura 146. Los sitios muestreados en el área de influencia de las fuentes de emisión se encuentran en un radio de 15 km, y los puntos de control, HS15 y HS16, se encuentran a 31 y 43 km de las fuentes de emisión, respectivamente.

Como se observa en los gráficos de la Figura 146, no se observó correlación entre la variable distancia y la concentración medida para los siete elementos estudiados. Dependiendo del elemento y profundidad de suelo, los valores de correlación van de -0,189 (zinc) a 0,124 (hierro). De acuerdo a lo anterior, no se manifiesta un gradiente de concentración de metales en el suelo en la dirección de las fuentes de emisión en la costa. Esto indica que de existir un gradiente de concentraciones en la atmósfera, éste no se refleja en una acumulación estadísticamente significativa de metales en el suelo.

xi) Efecto de la línea del tren

La Figura 147 muestra la localización de los sitios de muestreo de suelo en relación al trazado de la línea del tren. Los sitios muestreados se distribuyen al norte y al sur del eje de la línea, ubicándose a 60 m del eje el punto más cercano (HS15) y a 1200 m el más distante (HS04).

La Figura 148 presenta la relación entre la concentración de metales medidos en el suelo y la distancia al eje de la línea del tren. No se observó correlación significativa entre la variable distancia y la concentración medida para los siete elementos estudiados, ya sea en las muestras tomadas en la superficie (0-5 cm) o en las tomadas en profundidad (20 cm). Dependiendo del elemento y profundidad de suelo, los valores de correlación van de -0,380 (hierro) a 0,323 (zinc).

Con el fin de evaluar el posible efecto del viento en la dirección norte-sur, se realizó un análisis de grupos. Para ello se comparó el promedio de las concentraciones medidas en los sitios ubicados al norte de la línea (HS03, HS04, HS06, HS08, HS09, HS10, HS11, HS12, HS14, HS15 y HS16) con aquellos ubicados al sur de la misma (HS01, HS02, HS05, HS07 y HS13). El resultado de este análisis se resume en la Figura 149. El gráfico muestra la razón entre las concentraciones promedio medidas en los sitios del sector norte y las registradas en el sector sur. El análisis se hizo para las mediciones en el suelo en superficie y en profundidad. Salvo para el caso del elemento zinc, no se encontró diferencia

estadísticamente significativa entre las concentraciones medidas a ambos costados de la línea del tren.

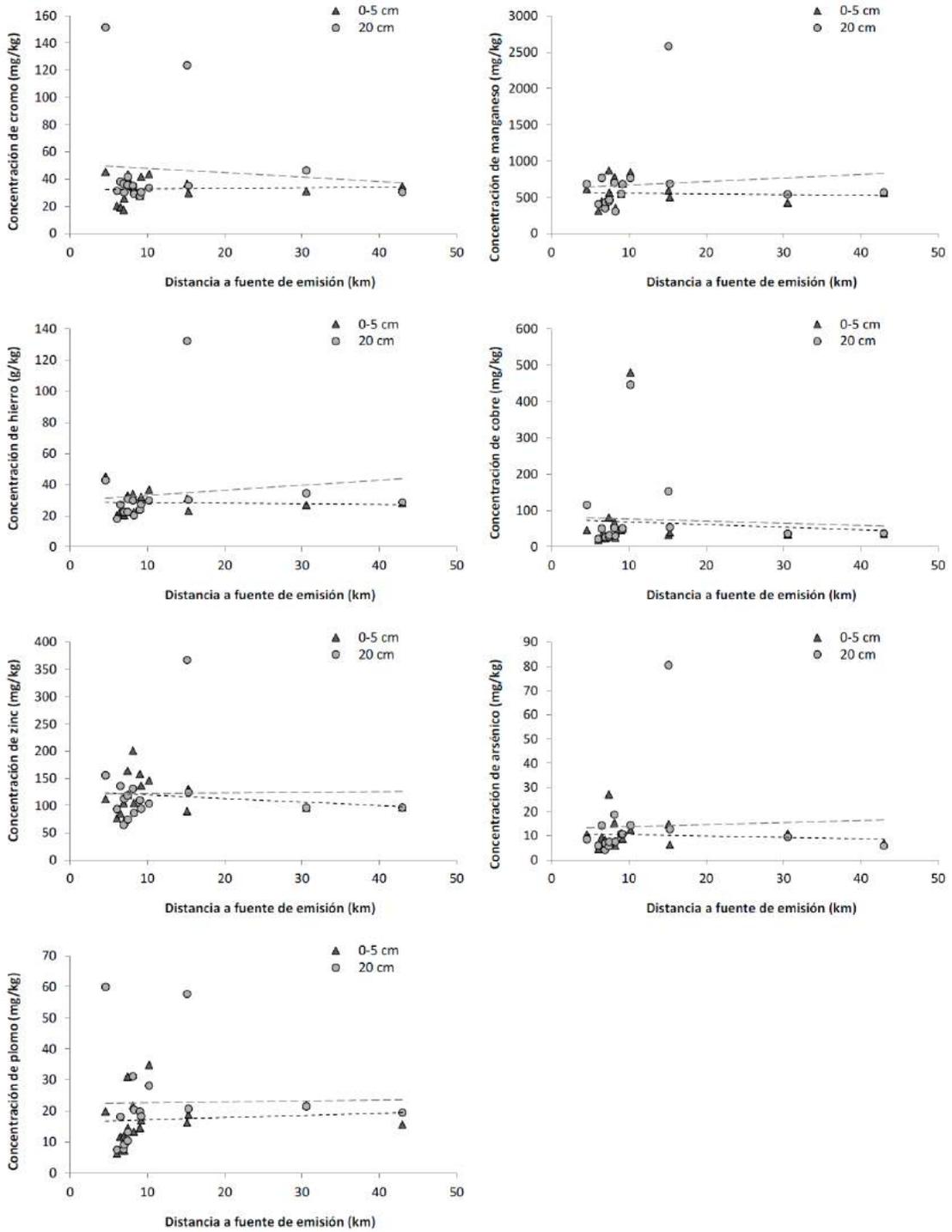


Figura 146. Relación entre la concentración de metales medidos en el suelo y la distancia a las fuentes de emisión en la costa. El gráfico muestra las concentraciones medidas en superficie (0-5 cm) y en profundidad (20 cm). Las líneas segmentadas muestran las regresiones lineales calculadas para las concentraciones en superficie (- - -) y en profundidad (—).

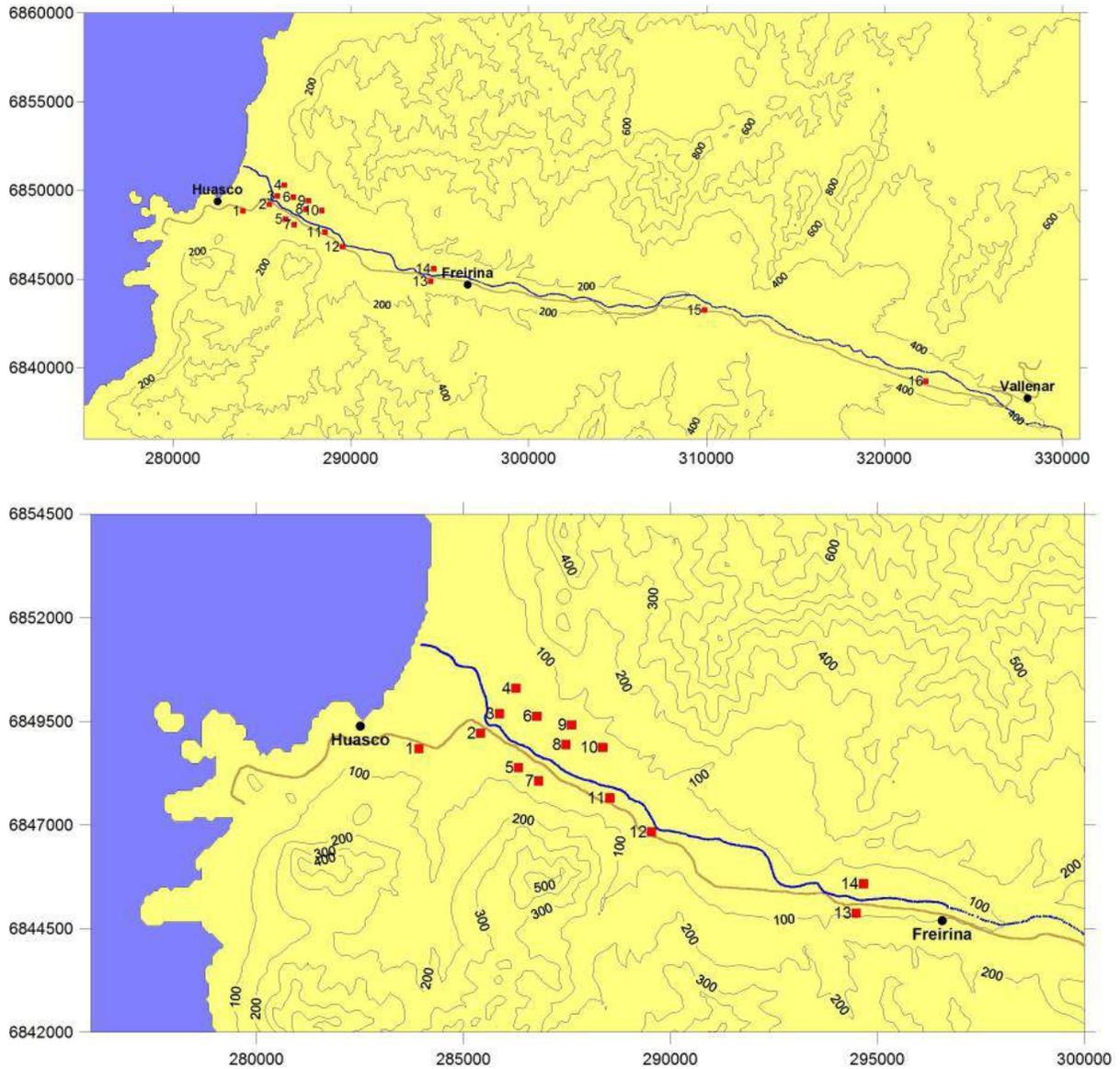


Figura 147. Distribución de los sitios de muestreo de suelo y ubicación de la línea del tren (línea negra). Con la línea azul se muestra la ubicación del eje central del río. El sitio más cercano a la línea del tren se ubica 60 m del eje y el más lejano a 1200 m.

De acuerdo a lo anterior, no se manifiesta un gradiente de concentración preferencial en alguno de los costados de la línea del tren, no existiendo pruebas en el suelo de un posible efecto de arrastre de material debido al viento en la orientación norte-sur.

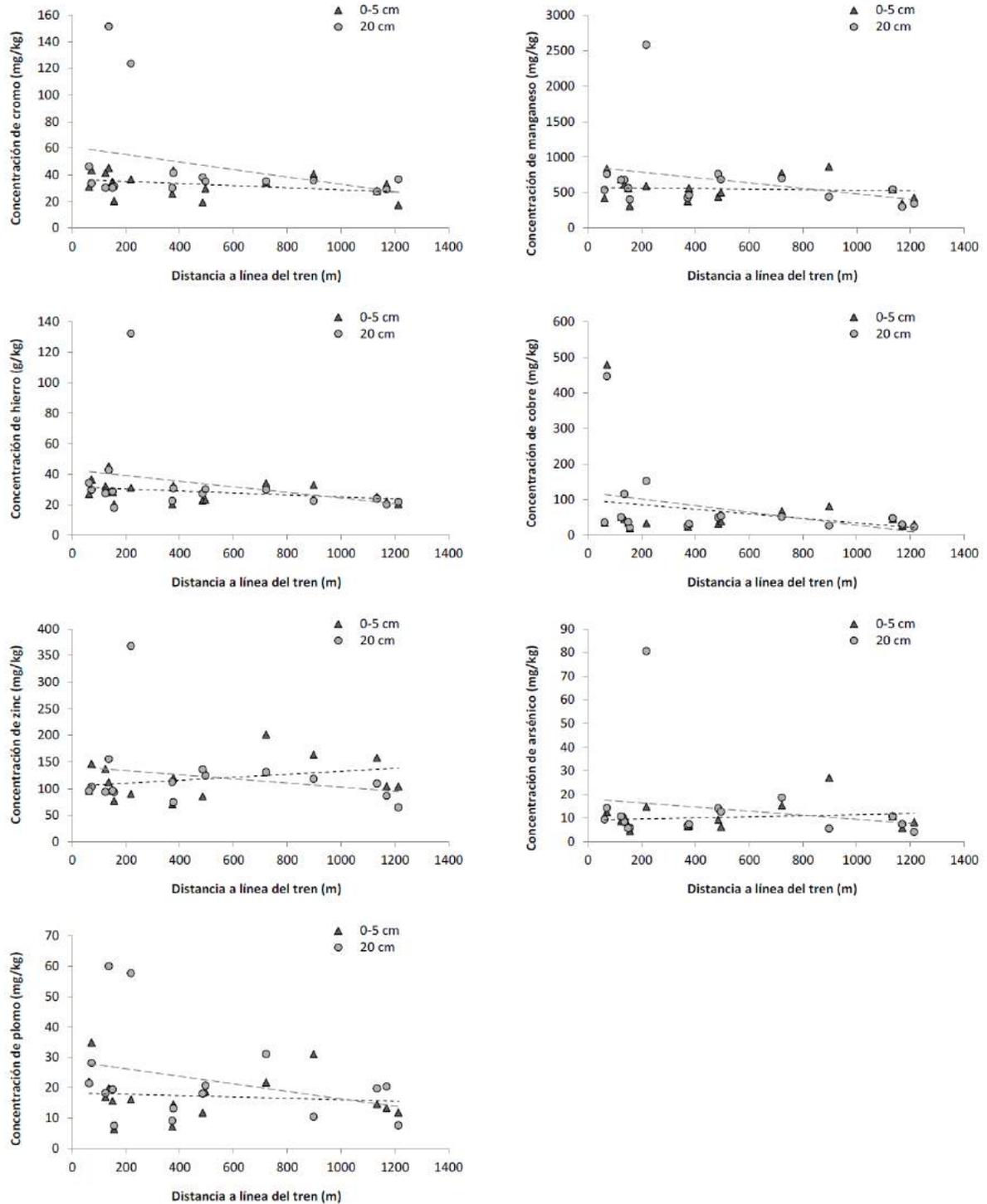


Figura 148. Relación entre la concentración de metales medidos en el suelo y la distancia a la línea del tren. El gráfico muestra los valores medidos en superficie (0-5 cm) y en profundidad (20 cm). Las líneas segmentadas muestran las regresiones lineales calculadas para las concentraciones en superficie (- - -) y en profundidad (—). Los sitios muestreados se distribuyen al norte y al sur del eje de la línea, ubicándose a 60 m del eje el punto más cercano y a 1200 m el más distante.

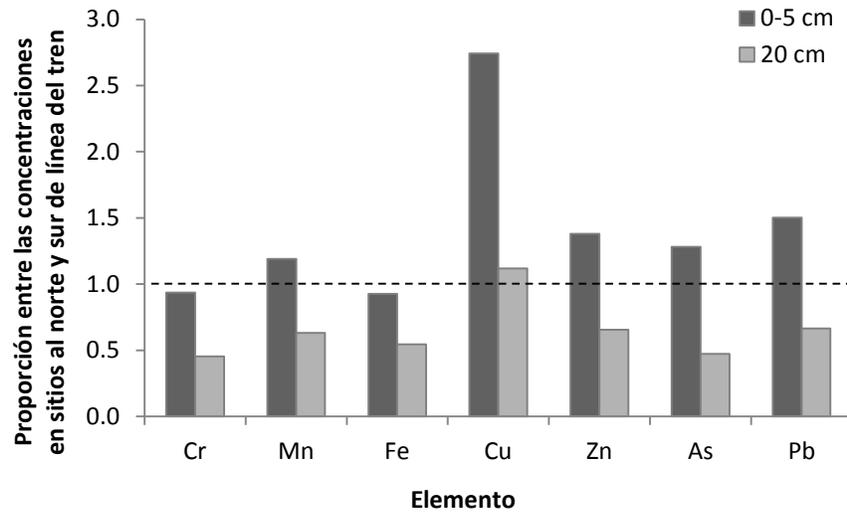


Figura 149. Proporción entre la concentración promedio de metales medidos en sitios ubicados al norte y al sur de la línea del tren. El gráfico muestra los valores medidos en el suelo en superficie (0-5 cm) y en profundidad (20 cm).

f) Conclusiones

A partir del análisis de las muestras de suelo tomadas en 16 sitios espacialmente distribuidos en el tramo del valle comprendido entre Huasco y Vallenar, es posible obtener las siguientes conclusiones en relación a la presencia y concentración de estos elementos en los sitios muestreados.

En el caso de los elementos cromo, manganeso, hierro y plomo, las concentraciones promedio medidas en los suelos se encuentran en el rango de valores esperados para suelos cultivados. En el caso de los elementos cobre, arsénico y zinc, las concentraciones medias en los suelos corresponden a los valores esperados para suelos cultivados, pero los rangos de concentración superan los valores típicos. En el caso del cobre, la concentración supera el máximo de toxicidad en el sitio HS12, tanto en superficie como en profundidad. En el caso de arsénico, el rango se supera debido a la concentración registrada en el sitio HS13, y cinco muestras superan el umbral de toxicidad para plantas cultivadas. En el caso del elemento zinc, sólo una muestra supera el rango de concentraciones típico (sitio HS13), sin alcanzar este valor el umbral de toxicidad.

El análisis de la relación entre la concentración de metales medidos en el suelo y la distancia a las fuentes de emisión en la costa indica que no existe correlación entre la variable distancia y la concentración medida para los siete elementos estudiados. De acuerdo a lo anterior, no se manifiesta un gradiente de concentración de metales en el suelo desde la costa hacia el interior del valle.

En lo relativo a la relación entre las concentraciones medidas en los sitios de muestreo y la distancia del sitio al eje del trazado de la línea del tren, no se observó correlación significativa entre la variable distancia y la concentración medida para los siete elementos estudiados. Esta situación se registró tanto en las muestras tomadas en la superficie del suelo como para aquellas muestras tomadas en profundidad. Además, salvo para el caso del elemento zinc, no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones medias medidas a ambos costados de la línea del tren. De acuerdo a esto, no se manifiesta un gradiente de concentración preferencial en alguno de los costados de la línea del tren, no existiendo pruebas en el suelo de un posible efecto de arrastre de material debido al viento en la orientación norte-sur.

g) Referencias

- AGRIMED. 1999. Estimación de la participación de las fuentes emisoras en el material particulado de la cuenca de Huasco. Centro de Agricultura y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.
- Alva, A.K. 1993. Copper contamination of sandy soils and effect on young Hamlin orange trees. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 51: 857-864.
- Alloway, B.J. 1990. Heavy metals in soils. Blackie and Son, London.
- Brigden, K., Santillo, D. 2002. Heavy metal and metalloid content of fly ash collected from Sual, Mauban and Masinloc coal-fired power plants in the Philippines. Department of Biological Sciences, University of Exeter, UK.
- CENMA. 2006. Estudio de calidad del aire en la comuna de Huasco. Informe Final, versión 1. Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA. Santiago, Chile.
- DGA. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del Río Huasco. CADE-IDEPE. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. Gobierno de Chile.
- EEA. 2009. EMEP CORINAIR emission inventory guidebook. Technical report No. 9/2009.
- EPA. 1995. AP 42 Compilation of air pollutant emission factors. Office of Air Quality Planning and Standards. Emission Factor and Inventory Group.
- EPA. 2007. Environmental Protection Agency: EPA Method 3051, Microwave assisted acid digestion of sediment, sludges, soils, and oils. www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/3051.pdf.
- Fundación Chile. 2010. Indicadores de coexistencia minería y agricultura.
- González, S., Ite, R. 1992. Acumulación metálica en suelos del área bajo influencia de las chimeneas industriales de Ventanas (Provincia Valparaíso, V Región). *Agricultura Técnica (Chile)*, 50(2): 214-219.

- Harrison, E.Z., M.B. McBride, D.R. Bouldin. 1999. Land application of sewage sludges: an appraisal of the US regulations. *International Journal of Environment and Pollution* 11(1): 1-36.
- Hernández, L., Probst, A., Probst, J. L., Ulrich, E. 2003. Heavy metals distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. *Science of the Total Environment*, 312: 195-219.
- INIA. 1991. Tipificación de elementos particulados en el Valle del Río Huasco, III Región.
- INIA. 2007. Estudio para determinar los niveles de hierro y níquel en aceitunas de mesa en el Valle de Huasco, Región de Atacama.
- INIA. 2008. Caracterización química de los suelos del Valle del Río Huasco bajo el Embalse Santa Juana.
- Jorquera, H. 1998. Particulate Matter Dispersion in the Huasco Valley, Chile, paper 387, AWMA 93rd Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, 18-22 Julio, 2000.
- Kabata-Pendias, A., H. Pendias. 2000. Trace elements in soils and plants. 3ª ed. CRC Press, Boca Raton, FL. 331 p.
- Kröppl, M., Lahoz Muñoz, I., Zeiner, M. 2011. Trace elemental characterization of fly ash. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 93(5): 886-894.
- Li, X., Thornton, I. 2001. Chemical partitioning of trace and major elements in soils contaminated by mining and smelting activities. *Applied Geochemistry*, 16: 1693-1706.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibria in soils. Wiley and Sons. New York.
- Luzio, W., Alcayaga, S. 1992. Mapa de asociaciones de grandes grupos de suelos de Chile. *Agricultura Técnica (Chile)*. 52(4): 337-353.
- Machado, A., Sepede, G., García, N., Colina, G., García, C., Alaña, J., Granadill, V. 2010. Influencia de una planta termoeléctrica en la concentración de V y Ni en sedimentos de la ciudad de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia*, 35(3): 217-222.
- McBride, M.B. 2001. Cupric ion activity in peat soil as toxicity indicator of maize. *Journal of Environmental Quality* 30: 78-84.
- McLean, J. E., Bledsoe, B. E. 1992. Behavior of metals in soils. EPA Ground water issue, 540/S-92/018.
- Mendez, O.M., Maier, R.M. 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments – An emerging remediation Technology. *Environmental Health Perspectives*, 116 (3): 278-282.
- Mortvedt, J.J. 2000. Bioavailability of micronutrients. In: *Handbook of Soil Science*, ed. M. E. Sumner, D71–D88. Boca Raton, Fl.: CRC Press.
- Osorio A., Tapia F., Salinas R. 1995. Suelos y climas del Valle de Huasco y sus alternativas de cultivo. INIA. Proyecto: Validación de tecnologías de riego en el Valle de Huasco, Cartilla Divulgativa No. 1.

- Pedersen, M.B., Kjær, C., Elmegaard, N. 2000. Toxicity and bioaccumulation of copper to black bindweed (*Fallopia convolvulus*) in relation to bioavailability and the age of soil contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 39: 431–439.
- Romero-Aravena, H. 1985. *Geografía de Chile. Tomo XI Geografía de los Climas*. Instituto Geográfico Militar. 243 p.
- Rovira-Pinto, A. 1984. *Geografía de Chile. Tomo V Geografía de los suelos*. Instituto Geográfico Militar. 180 p.
- Sánchez, A., Morales, R. 2002. *Las regiones de Chile: espacio físico humano y económico*. Editorial Universitaria. 4ª ed. p. 59-71.
- Singh, R., Singh, D. P., Kumar, N., Bhargava, S. K., Barman, S. C. 2010. Accumulation and translocation of heavy metals in soil and plants from fly ash contaminated area. *Journal of Environmental Biology*, 31: 421-430.
- Sushil, S. y Batra, V. S. 2006. Analysis of fly ash heavy metal content and disposal in three thermal power plants in India. *Fuel*. 85(17-18): 2676-2679.
- USDA-NRCS. 2000. Heavy metal soil contamination. Soil quality-urban technical note. No. 3.

III. Actividades asociadas al objetivo N° 3

3.a) Determinar los índices máximos de emisión a los distintos contaminantes, sin afectar el desarrollo de la especie y la agroindustria asociada.

Se debe determinar si existe contaminación dentro del valle, así como el o los contaminantes presentes que estén causando el daño, e identificar la magnitud del daño para poder estimar, en base a los rendimientos promedios de dos años consecutivos, el perjuicio económico, producto de la baja productividad de los olivos, en caso de que existiese.

Para lo anterior, es necesario obtener conclusiones contundentes respecto de la contaminación ambiental del valle y su efecto en la industria olivícola.

A la fecha de este Informe Final no se han reunido antecedentes suficientes como para poder determinar la carga máxima de emisiones de contaminantes en el valle.

3.b) Proponer ajustes a las normativas (concentraciones máximas) o la creación de nuevas normas en caso de que no existiesen. Considerar el efecto agudo y crónico (Ej.: acumulación por años de sedimentación de MP).

La situación de esta actividad es la misma que la actividad anterior: A la fecha de este Informe Final no se han reunido antecedentes suficientes como para poder proponer ajustes normativos o nuevas regulaciones ambientales.

3.c) Proponer metodologías para la remoción de los elementos encontrados, en caso de que existan y afecten, en el árbol o en el proceso de elaboración.

Una vez que se determine la existencia, procedencia y tipo de contaminación, se va a evaluar las posibles alternativas de remoción o mitigación.

Actividades asociadas al objetivo N° 4

a) Objetivo General

Proponer un sistema de levantamiento permanente de información para alimentar el modelo predictivo, mediante un sistema de monitoreo de las emisiones asociado a los resultados del modelo.

b) Productos esperados

- 1) Proponer la ampliación o adecuación de sistema de monitoreo de calidad del aire y los elementos a monitorear, su temporalidad, frecuencia, metodología y tecnología (en línea). Definición de inversiones y recursos necesarios para dar sustentabilidad y seguimiento al monitoreo.
- 2) Determinar las necesidades de información meteorológica que requiere el sistema de monitoreo para correlacionar las variables de tiempo-calidad del aire.
- 3) El sistema de monitoreo debe considerar un sistema envío automático de los resultados de monitoreos y especialmente de alerta ante el incumplimiento de la normativas.
- 4) Proponer un sistema de administración institucional del modelo que garantice la difusión oportuna de los resultados.

4.a) Proponer la ampliación o adecuación de sistema de monitoreo de calidad del aire

La red actual de monitoreo de calidad del aire en el valle del Huasco está compuesta por dos tipos de redes: monitoreo continuo y monitoreo discontinuo.

Todas las estaciones que se muestran en la Figura 150 corresponden a estaciones continuas que miden SO_2 ; la estación EME ME además mide meteorología, y la estación EME E, además del SO_2 mide NO , NO_2 y MP_{10} . Estas estaciones funcionan como seguimiento de los impactos de la central termoeléctrica Guacolda de AES GENER S.A. en las concentraciones ambientales de SO_2 y son administradas por CESMEC S.A.³².

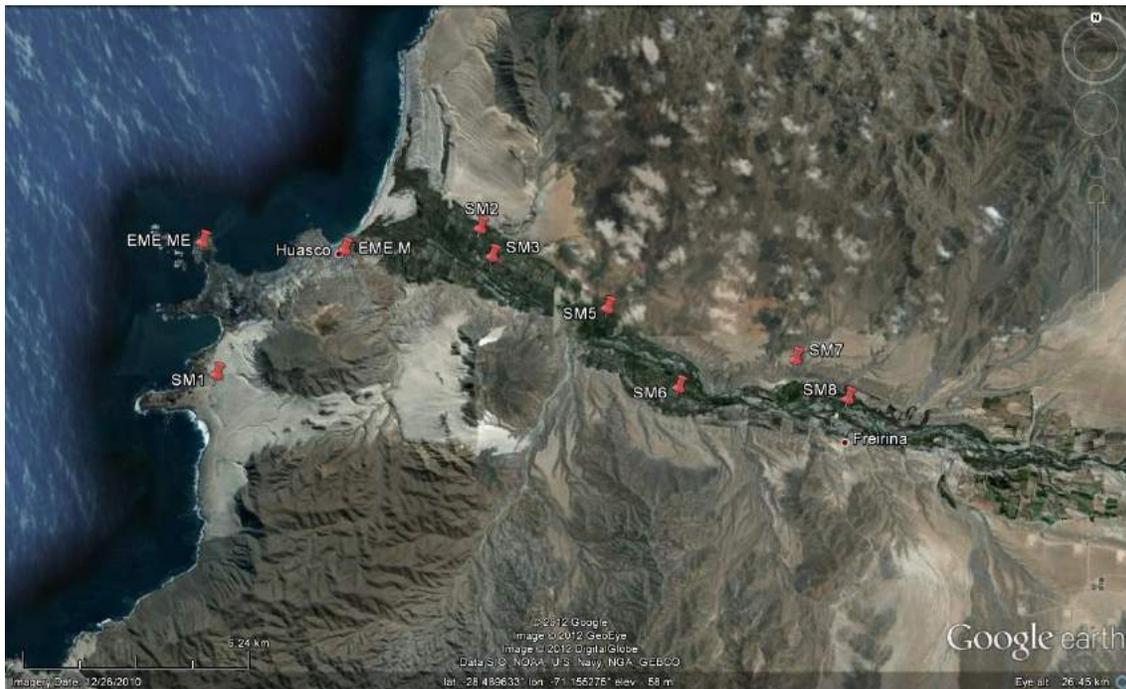


Figura 150. Ubicación de estaciones continuas de monitoreo de calidad del aire existentes en la zona.

Con respecto al monitoreo de MPS mensual, el Servicio Agrícola y Ganadero de Atacama aprobó el Proyecto de la Red de Monitoreo de Material Particulado Sedimentable (MPS), asociada a la Planta de Pellets de Huasco, presentado por la Compañía Minera del Pacífico S.A., mediante Resolución N° 099 de julio de 1993; esta red inicialmente tenía 15 estaciones de monitoreo ubicadas entre Huasco y Freirina. Mediante Resolución N° 138 del 14 de agosto de 1998, se modifica la red de monitoreo quedando compuesta de seis colectores de MPS ubicados en los puntos estimados de máximo impacto. La Figura 151 muestra la ubicación de la red actual de monitoreo del SAG. Por otra parte, las figuras 58 y 59 muestran las ubicaciones donde se realizaron los muestreos complementarios de MPS en el presente proyecto.

³² Fuente: SINCA (<http://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/III>).

Además de las estaciones de monitoreo de MPS, hay monitoreo diario de MP_{10} en Huasco mediante tecnología de muestreadores de alto volumen (Hi-Vol); los monitores existentes corresponden a las estaciones EME F, EME M, Huasco II y 21 de Mayo, las que se muestran en la Figura 73.



Figura 151. Red de monitoreo de MPS del SAG, situación año 2011.

a) Propuesta de modificación y ampliación del monitoreo de calidad del aire.

La red de monitoreo de MPS existente tiene la desventaja de que está sujeta a interferencias con material biológico (aportes de aves, insectos y restos vegetales) y a intervenciones humanas cercanas al monitor (trabajos agrícolas, circulación de vehículos por caminos sin pavimentar, etc.) que no están asociadas a la actividad del complejo industrial del Huasco pero que constituyen aportes relevantes al MPS. Esto ha quedado corroborado con la gran variabilidad espacial de los resultados obtenidos tanto para el MPS como para los elementos analizados en él (ver reporte de resultados de la actividad 1.g).

Debido a esta deficiencia de la red actual de MPS, se propone cambiar la tecnología del sistema de monitoreo, utilizando muestreadores que capten el material particulado suspendido en el aire en un filtro; además se propone ubicar los monitores de manera de minimizar aportes locales (ponerlos alejados de los caminos por ejemplo). De esta forma es posible medir las partículas totales en suspensión en el aire (TSP), que son todas las que pueden sedimentar en el valle, pero que no incluyen interferencias biológicas; esto permitirá tener resultados con una menor variabilidad entre sitios.

Además, se propone medir también el material particulado fino (MP_{2.5}) puesto que es un claro indicador de la actividad industrial y el análisis elemental de estas partículas finas será un claro indicador de hasta donde llega el impacto de las emisiones industriales dentro del valle³³.

Como propuesta de mejoría del sistema de monitoreo de material particulado en el valle, se propone adquirir dos muestreadores Hi-Vol con cabezal de PTS y dos muestreadores Hi-Vol con cabezal de MP_{2.5}. La ubicación de estas estaciones puede cambiarse cada mes (por ejemplo) para abarcar toda la zona del valle, incluyendo puntos de control entre Freirina y Vallenar, por ejemplo. En general se espera que operando con un muestreador de Hi-Vol se puede recolectar suficiente masa de partículas en cada filtro en un periodo de 24 horas, con lo cual se puede conseguir entre 10 y 30 muestras mensuales en cada sitio de medición (para PTS y MP_{2.5}) dependiendo de la frecuencia de muestreo (todos los días o cada tres días); los sitios se irían rotando a lo largo del valle. A cada filtro se le puede hacer análisis de elementos aplicando la técnica de fluorescencia de rayos X. El costo de cada análisis es de \$ 75.000 pesos + IVA, y no se recomienda analizar todos los filtros recolectados, solamente algunos de ellos, guardando los restantes para chequeos de datos en caso que sea necesario.

Tabla 42. Costos estimados de equipos de monitoreo de material particulado.

Equipo	Costo Unitario	cantidad	Subtotal
Hi-Vol para PTS	7,000,000	2	14,000,000
Hi-Vol para MP2.5	7,300,000	2	14,600,000
Calibrador de flujo	1,900,000	1	1,900,000
Total (sin IVA)			30,500,000
Total Neto			36,295,000

b) Actividades en la segunda etapa del proyecto

Como una primera actividad de la segunda etapa de este proyecto, se propone medir MP_{2.5} en distintos predios del valle, de manera de verificar que se consiguen medir elementos indicadores de la actividad industrial de manera robusta, con menor variabilidad que en el caso del monitoreo histórico de MPS. Para esto se planea medir en tres sitios simultáneamente, recolectando el MP_{2.5} en filtros para que estos sean analizados en laboratorio y se pueda determinar su composición química.

³³ Por ejemplo, permite obtener el sulfato producido por las emisiones de las plantas termoeléctricas, el que es distinto al sulfato naturalmente presente en los suelos del valle; esta especie es representativa de la lluvia ácida que se deposita en el valle, y por ende permite discriminar hasta donde llega el impacto de la industria.

Una segunda actividad de monitoreo consiste en medir la neblina ácida en el valle, para lo cual se proponer poner equipos atrapa-niebla en distintos puntos del valle, con el objetivo de recolectar la humedad y analizar su pH y contenido de iones. De esta forma se pretende cuantificar el efecto de las emisiones del complejo industrial en la formación de lluvia ácida, y así poder evaluar este aspecto de la contaminación atmosférica y su potencial efecto en los olivos.

4.b) Determinar las necesidades de información meteorológica que requiere el sistema de monitoreo para correlacionar las variables de tiempo-calidad del aire.

Los resultados de la evaluación del modelo de dispersión CALPUFF aplicados al año 2009 indican que hay una subestimación importante del SO₂ por parte del modelo. Esto se puede explicar en parte porque no se estaría estimando adecuadamente la altura de la capa de inversión térmica sobre el valle olivícola. Además en el pueblo de Huasco no se está encontrando una distribución espacial del MP10 concordante con lo observado, lo que puede deberse en parte a la ausencia de monitoreo de meteorología en el pueblo mismo. Para mejorar estos aspectos en futuras aplicaciones del modelo de dispersión, se propone mejorar la cobertura de la red de meteorología en el valle, lo que se presenta a continuación.

La Figura 152 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio, las cuales se muestran con cruces rojas; todas estas estaciones están ubicadas en la parte baja del valle, por lo que no aportan información con respecto a las condiciones a mayor altura en el valle por sus laderas sur y norte. Para mejorar la cobertura de información meteorológica en sitios a mayor altura con respecto al nivel del mar alrededor del valle (por sobre los 200 msnm), se propone la instalación de cuatro nuevas estaciones de monitoreo en las áreas marcadas con círculos, al norte y al sur del valle³⁴. Además se puede apreciar un tramo más largo sin estación meteorológica justamente en los alrededores de la ciudad de Vallenar, se recomienda agregar una estación al oeste de esta ciudad, dentro del valle y en el área también señalada con un círculo. Finalmente, a la entrada del valle, en el mismo pueblo de Huasco y al sur de él se recomienda agregar monitoreo meteorológico.

De esta forma, al tener monitoreo meteorológico en sectores con mayor elevación de terreno se va a poder mejorar la estimación de estabilidad atmosférica en las simulaciones meteorológicas y además mejorar la representación de los vientos al considerar los efectos de brisas montaña – valle. Y al incluir estaciones en el pueblo de Huasco y al sur de él se va a poder representar mejor la circulación del aire que ingresa al valle.

³⁴ Las zonas marcadas en la figura son de carácter referencial, ya que se deben cumplir requisitos adicionales para la localización de las estaciones, lo que se señala más abajo en el texto del Informe Final.

Se recomienda la adquisición de siete estaciones meteorológicas adicionales. Las estaciones deben medir velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad del aire; además, la estación que se ubique en la ciudad de Huasco debería medir radiación solar y precipitación, al igual que la que se instale al oeste de Vallenar.

La ubicación de las estaciones estará sujeta a condiciones de seguridad y accesibilidad, además de los criterios que se les pide a esta tipo de instalaciones (cercanía a obstáculos que puedan obstruir la circulación del viento). El costo referencial de este tipo de estaciones va desde los \$1.500.000 a \$2.800.000 (más IVA) de pesos más costos de instalación y operación. En el caso de los costos de operación será relevante considerar cuanto tiempo puede operar una estación midiendo en forma autónoma con baterías solares (típicamente un mes continuado), para estimar el costo de recursos humanos en la administración de la red.

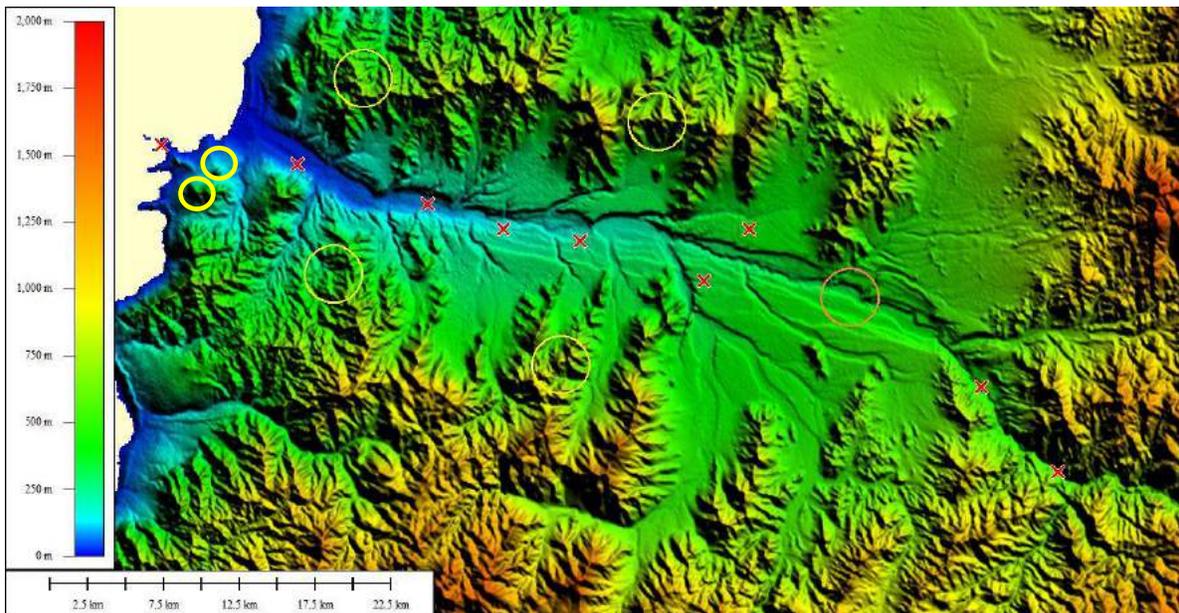


Figura 152 Ubicación de estaciones meteorológicas disponibles en el valle, utilizadas en el presente estudio y áreas propuestas para la instalación de nuevas estaciones meteorológicas.

4.c) El sistema de monitoreo debe considerar un sistema envío automático de los resultados de monitoreos y especialmente de alerta ante el incumplimiento de la normativas.

En esta actividad se presenta el sistema de administración de información meteorológica y de calidad del aire recomendado por el consultor para utilizar en la zona de Huasco. Se propone conectar todo los monitores continuos al sistema de información I-Airviro en tiempo real, incluyendo el monitoreo realizado por las empresas y un futuro monitoreo meteorológico en el valle (Figura 152). Además se propone ingresar al sistema I-Airviro las campañas de monitoreo adicionales (PTS y $MP_{2.5}$ y su composición química) que se han recomendado en este Informe, así como el monitoreo complementario de Material Particulado Sedimentable (MPS) y caracterización química del MPS, que actualmente realiza el SAG. Al tener toda la información disponible en un mismo ambiente computacional, es más simple analizar y comparar la información que se va recolectando.

Para administrar la información de monitoreo y considerar la posibilidad de conectar estaciones de monitoreo en tiempo real, incluyendo un sistema automático de envío de alerta en caso de incumplimiento de las normativas, se sugiere la utilización del sistema de administración de información de calidad del I-Airviro, sistema desarrollado en Suecia y que es ampliamente utilizado tanto en Chile como en otros lugares del mundo.

El sistema Airviro es una herramienta SIG (sistema de información geográfico) que posee un ambiente web de herramientas de administración y gestión de información ambiental. Esto hace que Airviro sea efectivamente una aplicación que sirve tanto para estudios de calidad del aire a nivel regional como para aplicaciones en áreas geográfica más pequeñas como por ejemplo las estimaciones de impacto de las emisiones de una industria en sus alrededores.

Hoy en día existen más de 80 clientes de Airviro alrededor del mundo, y autoridades e industrias usan este sistema para mejorar la estructura y estrategia de la gestión ambiental que incumbe a sus respectivas áreas de trabajo.

Los sitios web Airviro van desde sistemas regionales en Internet con cientos de usuarios hasta sistema Intranet con unos pocos usuarios. Airviro es un sistema modular, y los principales módulos disponibles en I-Airviro son:

- Indico Presentation: Recolección de datos y análisis de series de tiempo de parámetros meteorológicos y de calidad del aire, incluyendo herramientas de análisis gráfico e información en tiempo real, con despliegue de datos minuto a minuto.
- Indico Validación: Validación de la información obtenida del monitoreo ambiental.
- EDB: Administración de Base de Datos de Emisiones.
- Dispersion: Módulo para correr simulaciones de dispersión de contaminantes que permite analizar los resultados temporal y espacialmente. Soporta diferentes modelos los cuales incluyen el modelo Airviro de grilla, un modelo Gaussiano, un modelo Street Canyon, los modelos AERMOD y CALPUFF de la US EPA, entre otros.

El módulo “Indico Presentation” es el que se recomienda en este caso para la administración y seguimiento de datos de monitoreo en la zona de Huasco.

En Chile I-Airviro es utilizado por el Ministerio de Medio Ambiente para administrar redes de monitoreo a nivel nacional y regional, como por ejemplo el sistema SINCA (sinca.mma.gob.cl). También es utilizado por empresas como por ejemplo ENAP, Con-Con, Codelco División Norte, AES GENER y Gerdau Aza entre otras. A nivel internacional I-Airviro es utilizado por el DEFRA UK para administrar una red de monitoreo de calidad del aire a nivel nacional, en la ciudad de Leicester UK para administrar la calidad del aire y tráfico locales y por la *Environmental Health Authority of Stockholm*, por mencionar algunos ejemplos.

A continuación se presenta una breve descripción del módulo Indico.

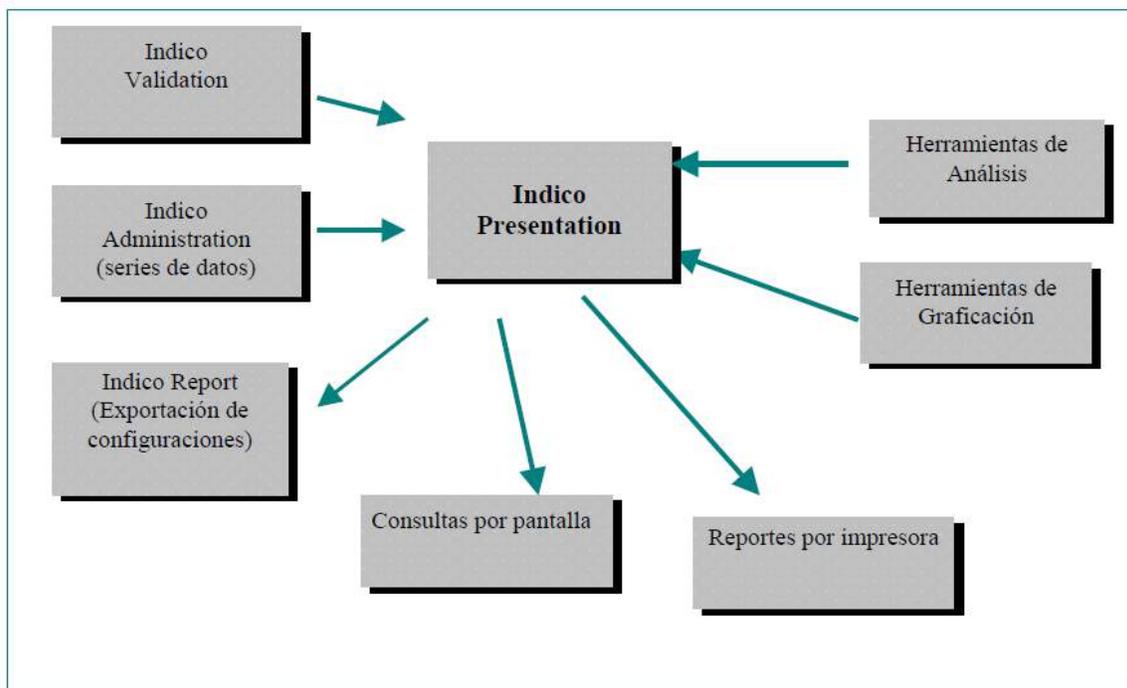


Figura 153 Estructura del módulo “Indico Presentation”

Estación (Stations): Son aquellos puntos geográficos donde se realizan mediciones. Generalmente están asociados a estaciones de monitoreo.

Parámetros (Parameters): Son las variables que se miden en las estaciones. Pueden ser magnitudes meteorológicas (Velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación, etc.) o parámetros relacionados con sustancias contaminantes, generalmente en el aire (NO_x, SO₂, MP₁₀, etc).

Serie de tiempo (Time series): Son las distintas series de los valores de un parámetro medido a lo largo del tiempo con la frecuencia o frecuencias configuradas en el sistema.

Estas series son almacenadas en la base de datos y son accedidas por el usuario a través del módulo “Indico Presentation” para realizar análisis y presentaciones gráficas.

A continuación se muestran algunos ejemplos de imágenes generadas por el módulo Indico del sistema I-Airviro.

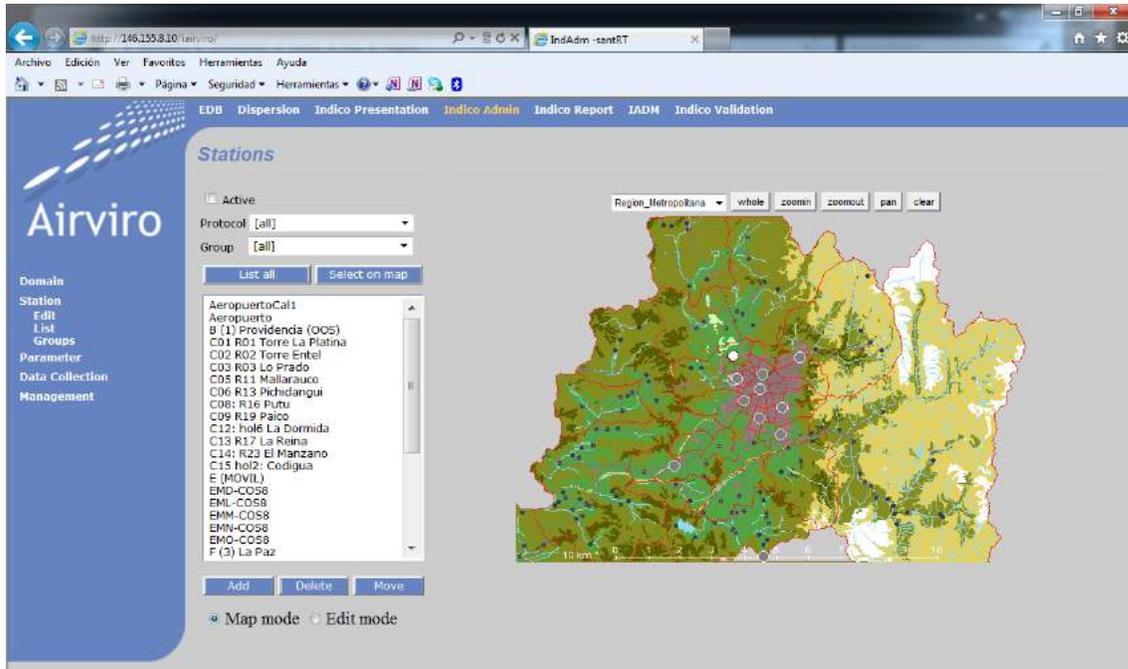


Figura 154 Despliegue de ubicación geográfica estaciones de monitoreo en Región Metropolitana en módulo “Indico Administration”.

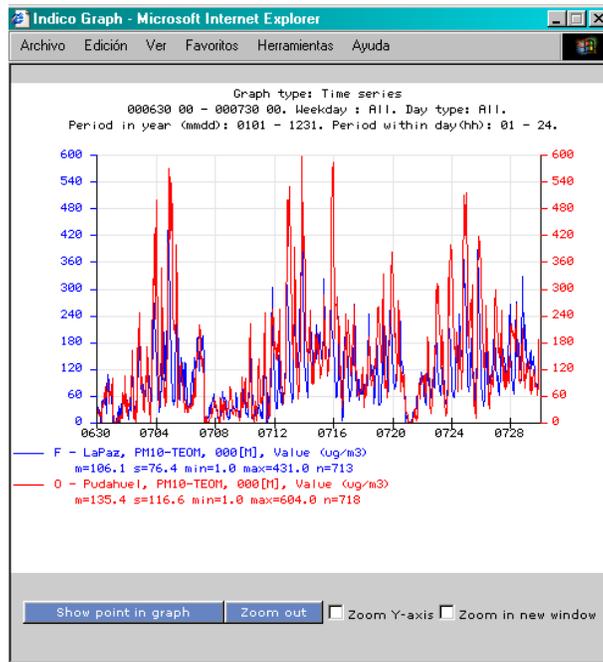


Figura 155 Despliegue de información de monitoreo de calidad del aire.

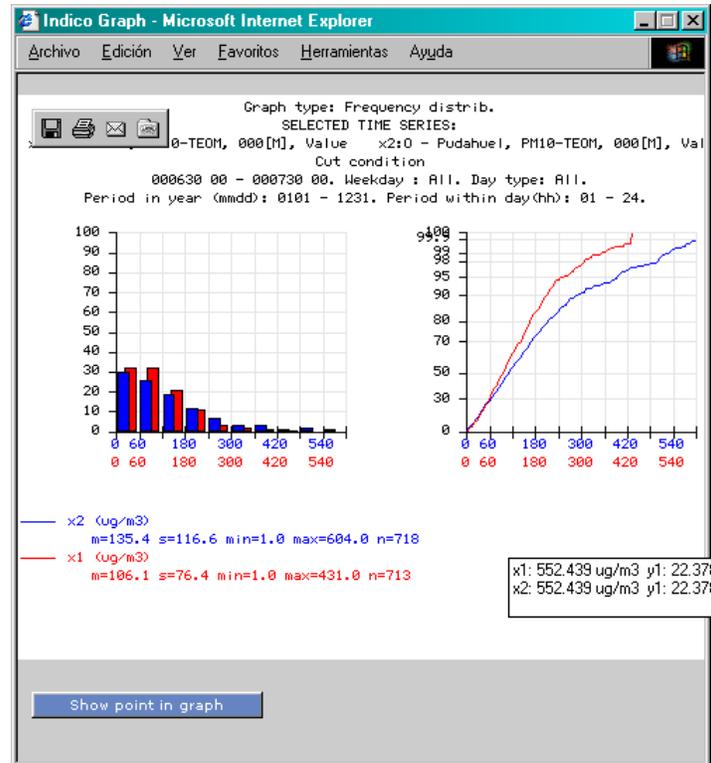


Figura 156 Pantalla de gráficos de distribución de frecuencia y frecuencia acumulada, en este caso para comparar concentraciones de MP_{10} en dos estaciones distintas.

La siguiente tabla muestra valores referenciales de instalación y licencias del sistema (sujetos a confirmación). No se incluye ningún tipo de hardware y/o equipo en estos valores.

Tabla 43 Valores instalación módulo Indico sistema I-Airviro (sin incluir IVA)

Valores referenciales	Precio US\$
Integración Módulo Indico	10,000
15 Licencias módulo de Indico	12,000
Configuración Linux e instalación Airviro	2,000
Configuración envío de datos 1 estación monitora	600
Asuntos de seguridad sistema	500

4.d) Proponer un sistema de administración institucional del modelo que garantice la difusión oportuna de los resultados.

Esta actividad no se ha podido completar, ya que no están claras cuales van a ser las variables de decisión que hay que incluir en un sistema de administración de información agronómica, climática y de calidad del aire. Esta actividad se va a realizar en la segunda etapa de ejecución del proyecto.

Conclusiones del primer año del Estudio.

A continuación se resumen las principales conclusiones obtenidas en el primer año de desarrollo del Estudio, ordenadas por las actividades que se habían planteado originalmente en los Términos de Referencia del Estudio.

Actividades asociadas al Objetivo N°1.

1.a) Caracterizar todas las fuentes y la magnitud de sus emisiones a la atmósfera.

Se analizó la información disponible de los distintos estudios aprobados por la autoridad ambiental (EIA, DIA) para las fuentes emisoras en el complejo industrial de Huasco. Además se analizaron las mediciones isocinéticas disponibles para las mayores fuentes (CMP, Guacolda), encontrándose que ellas poseen mucha variabilidad en el tiempo (Tabla 10 a Tabla 12). Esto indica que la operación de las mayores fuentes emisoras no es estable en el tiempo sino que cambia (o bien los muestreos son deficientes), lo que añade incertidumbre a las modelaciones de la dispersión de dichas emisiones, las que normalmente se realizan asumiendo emisiones constantes en las chimeneas. Para fines de trabajar con un inventario de referencia, se tomó la decisión de usar las mayores emisiones (medidas o aprobadas ambientalmente) para cada una de las mayores fuentes emisoras (Tabla 13).

También se compiló las emisiones del puerto asociadas al tráfico de barcos en él. Puesto que no se contaba con información respecto a la cantidad y tipo de barcos circulando, se hizo una extrapolación a partir de datos disponibles para el puerto de Ventanas, asumiendo tamaño y tecnología similar en los barcos. Las emisiones del puerto son muy inferiores a las de las industrias (Tabla 14), pero tampoco son emisiones pequeñas (especialmente en el caso del SO₂) y se debe considerar que se emiten a baja altura, por debajo de las chimeneas industriales, por lo que su impacto unitario en las concentraciones ambientales es mayor que en el caso de las chimeneas, especialmente en la misma ciudad de Huasco.

Es necesario también aclarar que la modelación de la dispersión de las emisiones se realizó para el año 2009 (con mayor cantidad de información meteorológica disponible), por lo que hubo que trabajar con la información que había para ese periodo.

1.b) Caracterización física y química de las emisiones atmosféricas.

Para todas las fuentes emisoras se identificaron los contaminantes que ellas emiten y, en el caso del material particulado, se estimó la distribución de tamaños emitidas en cada una de las chimeneas principales. Para esto se usó la información de los procesos industriales en cada caso y se compiló información existente de la literatura técnica.

Acá nuevamente hay que aclarar que la distribución de los tamaños de las partículas emitidas por las chimeneas depende de la estabilidad del proceso productivo, así como de la continuidad de los equipos de control de emisiones de partículas que se emplean en las

distintas chimeneas (principalmente precipitadores electrostáticos y un lavador de gases en el caso de una de las chimeneas de CMP). Lo ideal habría sido contar con mediciones continuas de la distribución de tamaño de las partículas, y de esos resultados obtener una distribución de tamaños observados. Sin embargo, esta tecnología no está disponible, al menos no para el año 2009 modelado. Por lo tanto, se hizo un supuesto utilizando mediciones realizadas en un estudio previo de 1999, también analizando datos de campañas con muestreos puntuales.

1.c) Descripción del procesamiento ambiental de los contaminantes emitidos

Las emisiones del complejo industrial de Huasco están sometidas a los siguientes procesos en la atmósfera:

- a) Las partículas son transportadas por el viento pero también van sedimentando y depositándose en la cuenca.
- b) Los gases tales como NO_x (óxidos de nitrógeno) y SO_x (óxidos de azufre) se van oxidando a ácido nítrico y sulfúrico (respectivamente) dando origen a lluvia ácida, la que normalmente puede llegar a impactar a decenas de kilómetros de las fuentes emisoras. Cuando llueve, las gotas de agua solubilizan rápidamente esos productos, con lo cual contienen sulfato, nitrato y pH ácido, como ha sido medido en el agua lluvia en este Estudio (Tabla 36) que correspondió a un evento registrado en Octubre de 2011.
- c) A medida que aumenta la distancia al complejo industrial, las partículas más gruesas sedimentan y solo quedan siendo transportadas las partículas más pequeñas (bajo 10 μm de tamaño), las que pueden viajar por kilómetros antes de caer al suelo del valle.
- d) Las partículas que sedimentan en el suelo del valle posteriormente son suspendidas nuevamente por acción del viento y siguen transportándose hacia el interior del valle debido a la persistencia de los vientos a lo largo del año (ver Figura 29 a Figura 32).
- e) Este proceso es acumulativo y explica que se encuentren valores elevados de hierro (con respecto a la abundancia natural de ese metal en el suelo) en puntos ubicados al este de Freirina. Por ejemplo, en tres de los seis meses de muestreo, el hierro depositado en el punto MPS8 (ver ubicación en Figura 59) promedió el 12% del total del MPS allí medido, un porcentaje que duplica el contenido natural del hierro en el suelo (5.8%).

Todos estos procesos están fuertemente influidos por las condiciones ambientales:

- i) La temperatura, la que siempre aumenta la velocidad de las reacciones de oxidación,
- ii) La humedad ambiental (neblina, nubosidad, camanchaca, etc.) que es muy eficaz en acelerar la oxidación de gases como SO₂ y NO_x y por ende la producción de lluvia ácida.

Estas condiciones son simuladas por el modelo de dispersión (CALPUFF) utilizado para representar la dispersión de las emisiones del complejo industrial y como ellas penetran hacia el valle ingresando sobre la zona olivícola.

1.d) Caracterización de la topografía del Valle de Huasco.

Se ha caracterizado la topografía y el uso de suelos en el valle y sus alrededores, empleando información de alta resolución satelital (Figura 2) así como información local de uso de suelos (Figura 3).

1.e) Mapa de las concentraciones de contaminantes en la cuenca.

Con el inventario base construido en la actividad 1.a) más información meteorológica recolectada y modelada (actividad 1.h) se procedió a generar mapas de distribución de los impactos asociados al complejo industrial Huasco, como depositación de partículas (MPS), y concentraciones y depositaciones de SO₂ y NO₂ a lo largo del valle (Figura 4 a Figura 27). La evaluación de estos resultados se presenta en la actividad 1.g), cuyas conclusiones se presentan más abajo en este Informe Final.

1.f) Catastro de la información meteorológica disponible.

Se compiló la información proveniente de diez estaciones de monitoreo superficial con información disponible para el año 2009 (Figura 28, Tabla 22). Esta información se resumió visualmente para las distintas estaciones del año (Figura 29 a Figura 40), constatándose las características especiales del valle, con una nubosidad permanente en la costa³⁵, la que se va progresivamente reduciendo hacia el Este en el valle. Además se constata que la mayor parte del año hay un claro flujo de masas de aire desde el puerto de Huasco hacia el interior del valle, mientras que solo en invierno esa circulación se reduce y actúa solamente desde el mediodía hasta el atardecer (ver Figura 29 a Figura 32).

Para la generación de información meteorológica en altura se aplicó el modelo meteorológico WRF, obteniéndose campos de vientos y alturas de mezclado sobre el valle (Figura 41 a Figura 55), ambos parámetros críticos para modelar las concentraciones de contaminantes en el valle.

1.g) Monitoreo complementario de MPS y hierro en el MPS, estimación de línea base.

Se realizó un monitoreo de MPS y de su composición química (Tabla 25 a Tabla 30), en nueve sitios de monitoreo en el valle (Figura 58 y Figura 59) entre los meses de Agosto y Diciembre 2011. Los resultados obtenidos indican que:

- a) Los niveles de MPS medidos en este Estudio son similares a los medidos en la red del SAG (Figura 60), al igual que el caso del contenido de hierro en el MPS (Figura 61). Sin embargo, los valores varían mucho entre un sitio y otro cercano (pese a tratarse de promedios mensuales), lo que indica que este tipo de mediciones de partículas sedimentables están afectadas por actividades locales (manejo de suelos agrícolas,

³⁵ La presencia de nubosidad a baja altura en la costa implica que existe una inversión térmica sobre el valle, la que queda definida por la altura del tope de las nubes.

tránsito de vehículos por caminos sin pavimentar, etc.) que no están asociadas a las actividades del complejo industrial. Luego, el monitoreo actual no entrega una señal clara de hasta donde llegan los impactos de dicho complejo en el valle.

- b) Los resultados de a) se repiten en el caso de los elementos analizados que se encuentran en mayor cantidad (Figura 62 a Figura 64). Si bien se pueden analizar tendencias en forma cualitativa (el cloro disminuye a medida que se adentra en el valle el monitoreo), no se puede estimar con precisión hasta donde llega la influencia del complejo industrial en el valle.
- c) Se propone por lo tanto, cambiar la metodología de medición y emplear muestreadores de alto volumen (por ejemplo) para capturar material particulado en el filtro y a través del análisis elemental de las partículas muestreadas obtener una variabilidad espacial más repetible en el valle. Se propone muestrear dos tamaños de partículas: i) partículas totales en suspensión (PTS) ya que todas ellas pueden sedimentar sobre el valle, ii) partículas finas ($MP_{2.5}$) ya que ellas son producidas casi exclusivamente por actividades antropogénicas intensivas (como las emisiones del complejo industrial del Huasco) y por ende se pueden usar como marcadores de impactos, especialmente en elementos como Fe (CMP), sulfato (termoeléctricas), Cu, Mn, Pb (transporte), etc.

1.h) Relación entre condiciones meteorológicas e impactos en calidad del aire.

Se evaluó el desempeño del modelo de dispersión CALPUFF para las tres estaciones del año 2009, y para los contaminantes SO_2 (Figura 68 a Figura 70), óxidos de nitrógeno (Figura 71 y Figura 72), MP_{10} (Figura 74) y $MP_{2.5}$ (Figura 75).

Se encontró que el modelo no es capaz de reproducir la estacionalidad observada en el monitoreo ambiental del SO_2 (Figura 66), lo que se atribuye a una sobrestimación de la altura de inversión térmica sobre el valle en otoño e invierno, especialmente en condiciones diurnas. Para corregir esto a futuro se proponen dos opciones: i) incrementar el número de estaciones de monitoreo de meteorología superficial, ii) usar información satelital de la nubosidad en el valle.

Con respecto al MP_{10} , al evaluar el modelo en el pueblo de Huasco, hay una concordancia aceptable entre los valores observados y los monitoreados, cuando se considera que hay un aporte natural que es el aerosol marino y que fácilmente puede llegar a 10-15 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] o incluso más en algunos días con vientos intensos. Notar que en las simulaciones no se han incluido fuentes naturales como la erosión de zonas áridas cercanas a Huasco (como las dunas) y que pueden a su vez contribuir al MP_{10} en el pueblo, nuevamente en días con altas velocidades del viento.

Los valores de $MP_{2.5}$ que calcula el modelo CALPUFF corresponden a la suma del $MP_{2.5}$ primario (directamente emitido) y del $MP_{2.5}$ secundario que se forma por oxidación de gases emitidos en la zona. En las simulaciones hemos hallado que la mayor parte del $MP_{2.5}$ secundario corresponde a nitratos, los que en algunos días superan los 10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], pero en promedios trimestrales las concentraciones estimadas para Huasco no superan los 10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], siendo menores en invierno por el sesgo ya mencionado en la altura de la

inversión térmica. Por contraste las concentraciones de sulfatos son menores a las de nitratos en todo el año, lo que implica que el modelo está estimando alta producción de nitratos pero baja producción de sulfatos; esta situación se va a reanalizar en la segunda etapa del Estudio, una vez que se haya mejorado la información meteorológica de entrada al modelo CALPUFF.

Complementando el párrafo anterior, sería deseable medir los niveles de ozono en el valle, toda vez que no existen registro histórico de ese contaminante, el cual tiene una incidencia directa en la oxidación de las emisiones de SO₂ y de NO_x. Luego, mejorando esta información de entrada al modelo de dispersión CALPUFF, se podría mejorar también las concentraciones allí simuladas.

1.i) Descripción de la información de entrada al modelo de dispersión.

Se ha descrito en detalle la información que se debe ingresar al modelo de dispersión, tanto la meteorológica como la de topografía, uso de suelos y el inventario de emisiones.

En el caso de las emisiones, un aspecto crítico es la continuidad de las emisiones en el tiempo. Normalmente se asume que las grandes fuentes emisoras emiten en forma constante en el tiempo, ya que se trata de procesos estables. Sin embargo, hemos visto en los datos de las mediciones isocinéticas que hay bastante variabilidad en las emisiones, por lo que sería deseable contar con un monitoreo continuo de ellas, así como de la información acerca de las fechas en que hubo detenciones por mantención y/o expansión de la planta (lo que ha sido el caso de CMP y Guacolda).

Por lo tanto, el monitoreo continuo de las emisiones debería ser exigible a las empresas y debería ser parte de un futuro sistema de monitoreo de calidad del aire en el valle, lo que se detalla en la actividad 4.a).

1.j) Análisis de sensibilidad del modelo de dispersión.

Como se ha visto anteriormente en esta sección del Informe Final, el modelo CALPUFF presenta subestimaciones de las concentraciones observadas, especialmente en meses de otoño e invierno. Para entender el origen de esa subestimación se procedió a realizar los siguientes cambios de información de entrada al modelo para establecer su sensibilidad:

- 1) Se redujo la dimensión de las celdas de la grilla de modelación de un tamaño horizontal de 1 x 1 km a 250 x 250 m.
- 2) Se redujo la cantidad de ozono de background³⁶ en el mecanismo de reacciones químicas que producen MP_{2.5} secundario, para estimar si se estaba sobrestimando la oxidación del SO₂ a sulfato.

³⁶ Cabe hacer notar que el ozono no se ha medido en el valle, aunque debería tener valores menores que en zonas como la Región Metropolitana, por ejemplo.

- 3) Se incluyó el algoritmo que considera la fumigación de una pluma de chimenea en una zona costera (Figura 67), para mejorar el desempeño del modelo en aquellas estaciones de monitoreo más cercanas a la costa.
- 4) Se redujo la altura de la inversión térmica sobre el valle en meses de otoño e invierno, de manera que no superara los 500 m de elevación sobre el valle.

Los resultados de estos análisis no mostraron grandes cambios en las concentraciones simuladas de SO₂, específicamente persisten las subestimaciones de otoño e invierno. Esto nos lleva a concluir que es necesario incluir más información de meteorología en el modelo actual, de manera de mejorar su desempeño para que pueda representar adecuadamente la variabilidad de las concentraciones a lo largo del valle.

En la segunda etapa del proyecto se va a compilar la información satelital existente para realizar una nueva modelación de la dispersión de las emisiones atmosféricas con información de mejor calidad, y así poder mejorar las estimaciones de las concentraciones de contaminantes a lo largo del valle.

Actividades asociadas al Objetivo N°2

Respecto a la contaminación por material particulado (MP), se puede concluir que, si bien en algunos casos hay una respuesta de los contenidos de hierro disponible presentes en el suelo, respecto de la fuente contaminante, esto no se evidencia en la absorción de este elemento por las plantas.

La nutrición de los olivos, por su parte, tampoco presenta una respuesta a la distancia respecto de la fuente de contaminación, pudiendo ser explicada, en buena medida, por los suministros del suelo, ya sea por fertilidad natural de éstos, o por manejos de la fertilización.

Sin embargo, se pudo observar que las hojas y frutos presentan material particulado en sus superficies, lo cual responde a su ubicación respecto de la línea férrea, lo que será estudiado en mayor detalle durante la segunda etapa del proyecto. Adicionalmente, cabe destacar, que no se observó una diferencia en cuanto al contenido superficial de material particulado, si se considera la contaminación de MP fino, desde mar a cordillera.

Respecto al daño evaluado mediante estudio anatómicos, se pudo demostrar que las hojas del olivo, presentan estructuras de protección naturales de la especie, las que impedirían la entrada de partículas a través de los estomas, al interior de los tejidos. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos tanto en suelo como en los tejidos foliares, en los cuales se demuestra que no existe diferencias nutricionales atribuibles a la contaminación por MP.

El material particulado podría afectar la fotosíntesis de las plantas por impedir la intercepción de luz por parte de las hojas. En este contexto, se pudo observar que los niveles de fotosíntesis del valle de Huasco son, en general, bajos. Sin embargo, se pueden

atribuir a distintos factores, sin poder descartar, dentro de éstos, la contaminación por material particulado. Por este motivo, en la segunda etapa del proyecto, se evaluará la fotosíntesis en condiciones controladas y estudios dirigidos.

Uno de los indicadores de la productividad, corresponde al índice de cuaja. En el estudio, se observó gran variabilidad respecto a los índices de cuaja de los huertos, impidiendo esto, aislar los efectos de la contaminación sobre éste índice. Se pudo observar, sin embargo, que, a pesar de que no existió un efecto del material particulado emanado desde la línea del tren, sí se observó una menor cuaja en el huerto cercano a la planta de pellets, aunque el número de flores producidas, fue similar en los huertos evaluados. Esto indica, que puede existir un efecto de contacto del material contaminante en la productividad, que debe ser evaluado en la segunda etapa del proyecto.

Respecto a la contaminación ambiental ácida por las emanaciones de SO_2 y NO_2 , no se observa un efecto en el contenido de estos elementos en el suelo y se puede concluir, que el efecto que pueda tener la depositación de SO_2 y NO_3 es poco significativo, considerando los niveles de origen natural y antrópico de éstos elementos en los suelos del valle de Huasco. Del mismo modo, no se observó un efecto en la nutrición de las plantas producto de la contaminación ambiental ácida.

De acuerdo a la literatura, la lluvia ácida puede causar daños en los tejidos, tanto de hojas como de flores, siendo éste, un daño que se produce por contacto, que puede tener distinta magnitud dependiendo de la concentración y humedad presentes. Este daño, se vería reflejado tanto en hojas, flores y productividad de las plantas.

En este estudio, no se evidenciaron efectos sobre las hojas, sin embargo, no se puede descartar que exista daño a nivel de tejido floral lo que afectará directamente la cuaja y con ello, la productividad de los olivos. Por este motivo, se continuará estudiando mediante técnicas dirigidas y controladas, el efecto de la lluvia ácida sobre los tejidos.

Es importante destacar que, en general, las condiciones de los huertos del valle de Huasco se observan deterioradas en cuanto a sus condiciones de suelo, hídricas, productividad y manejo, por lo que dificulta determinar con certeza, el efecto real de la contaminación en los olivos.

A partir del análisis de elementos totales en las muestras de suelo tomadas en 16 sitios espacialmente distribuidos en el tramo del valle comprendido entre Huasco y Vallenar, es posible concluir lo siguiente. En el caso de los elementos cromo, manganeso, hierro y plomo, las concentraciones promedio medidas en los suelos se encuentran en el rango de valores esperados para suelos cultivados.

En relación a la presencia de cobre, la media (67 y 75 mg/kg) se encuentra entre los valores esperados para suelos cultivados. Sin embargo, en el sitio HS12 se supera el umbral de concentraciones máximas, tanto en superficie (480 mg/kg) como en profundidad (446 mg/kg).

En el caso del arsénico, la concentración media (10 y 14 mg/kg) está en el rango esperado para suelos cultivados. Sin embargo, debido a la concentración registrada en el sitio HS13, el rango de concentraciones medidas (4 a 81 mg/kg) supera los valores típicos. Por otra parte, en las muestras HS06 0-5 cm, HS08 0-5 cm, HS08 20 cm y HS13 0-5 cm se observan valores de concentración levemente superiores al umbral de toxicidad para plantas cultivadas, y sólo la muestra HS13 20 cm supera significativamente este umbral.

En el caso del elemento zinc, la concentración media (118 y 123 mg/kg) está en el rango esperado para suelos cultivados. En relación al rango de concentraciones medidas (64 a 367 mg/kg), sólo una muestra supera el rango típico esperado en suelos. Esto ocurre en el sitio HS13 (367 mg/kg). No obstante lo anterior, ninguna muestra superó el umbral de toxicidad. El sitio HS13 es uno de los más alejados en el área de influencia de las fuentes de emisión en la costa, por lo que las concentraciones de zinc y de arsénico (ver párrafo anterior) en el suelo podrían deberse a un efecto local.

El análisis de la relación entre la concentración total de metales medidos en el suelo y la distancia a las fuentes de emisión en la costa indica que no existe correlación entre la variable distancia y la concentración medida para los siete elementos estudiados. De acuerdo a lo anterior, no se manifiesta un gradiente de concentración de metales en el suelo desde la costa hacia el interior del valle.

Finalmente, en lo referente a la relación entre las concentraciones de metales en el suelo de los sitios de muestreo y la distancia a la línea del tren, no se observó correlación significativa entre ambas variables en los siete elementos estudiados (esto es para sitios ubicados entre 60 y 1200 m de distancia a la línea del tren). Esta situación se registró tanto en las muestras tomadas en la superficie del suelo como para aquellas muestras tomadas en profundidad. Además, salvo para el caso del elemento zinc, no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones medias medidas a ambos costados de la línea del tren.

Actividades asociadas al Objetivo N°4.

4.a) Proponer la ampliación o adecuación de sistema de monitoreo de calidad del aire y los elementos a monitorear, su temporalidad, frecuencia, metodología y tecnología (en línea). Definición de inversiones y recursos necesarios para dar sustentabilidad y seguimiento al monitoreo.

Se propone ampliar la cobertura de un sistema de monitoreo de calidad del aire en el valle, el cual debería incluir:

- a) Monitoreo en línea de meteorología superficial en más puntos de medición en el valle.
- b) Monitoreo en línea de las emisiones de NO_x, SO_x y MP₁₀ de las chimeneas de CMP, Endesa y Guacolda.
- c) Monitoreo en línea de las concentraciones ambientales de SO₂, NO₂, NO, MP₁₀ y MP_{2.5} como ya ocurre en varias zonas del país (Santiago, Ventanas, Tocopilla, etc.).

d) Monitoreo discontinuo (cada tres días por ejemplo) de PTS y MP_{2.5} en filtros y la composición química de ellos. En la Tabla 42 se indican valores referenciales de los costos de adquisición de este equipamiento adicional.

4.b) Determinar las necesidades de información meteorológica que requiere el sistema de monitoreo para correlacionar las variables de tiempo-calidad del aire.

Se ha propuesto extender la cobertura de estaciones de monitoreo superficial de meteorología (Figura 152) agregando más estaciones de superficie a la entrada del valle y agregar estaciones en la parte alta del valle, con el objeto de caracterizar mejor la ubicación de la inversión térmica.

4.c) El sistema de monitoreo debe considerar un sistema envío automático de los resultados del monitoreo y especialmente de alerta ante el incumplimiento de la normativas.

Se propone el uso de un sistema I-Airviro para la administración de la información recolectada, el cual permite conectar en tiempo real las estaciones de monitoreo continuas, desplegar la información a través de Internet, hacer análisis de la información recopilada (actual e histórica) y eventualmente tener un modelo de dispersión como CALPUFF instalado en dicho sistema para poder analizar en forma conjunta la entrada de nuevas fuentes de emisión a la zona (caso de central Punta Alcalde, expansiones de producción de las fuentes existentes, etc.). Los costos estimados se entregan en la Tabla 43.

4.d) Proponer un sistema de administración institucional del modelo que garantice la difusión oportuna de los resultados.

Esta actividad no se ha podido completar, ya que no están claras cuales van a ser las variables de decisión que hay que incluir en un sistema de administración de información agronómica, climática y de calidad del aire. Esta actividad se va a realizar en la segunda etapa de ejecución del proyecto.