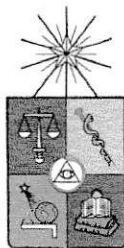


UCH-FC  
Q. Ambiental  
MS19  
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**"EVALUACIÓN DE EMISIONES Y DISPERSIÓN DE AEROSOL  
ATMOSFÉRICOS PROVENIENTES DE PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE  
ÁRIDOS: UN CASO DE ESTUDIO"**

Seminario de título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

**Químico Ambiental**

**Cristian Ignacio Meléndez Avila**

Director de Seminario: María Paz Sánchez Puccio  
Profesor Patrocinante: Dr. Manuel Leiva Guzmán

Diciembre 2016  
Santiago - Chile



**ESCUELA DE PREGRADO – FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE CHILE**



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato:

**CRISTIAN IGNACIO MELÉNDEZ AVILA**

"EVALUACIÓN DE EMISIONES Y DISPERSIÓN DE AEROSOLES  
ATMOSFÉRICOS PROVENIENTES DE PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE  
ÁRIDOS: UN CASO DE ESTUDIO"

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

*Mg. María Paz Sánchez Puccio*  
**Director Seminario de Título**

*Dr. Manuel Leiva Guzmán*  
**Profesor Patrocinante**

*Dr. Richard Toro Araya*  
**Presidente**

*Mg. Julio Hidalgo Carvajal*  
**Corrector**

Santiago de Chile, diciembre de 2016

## CRISTIAN IGNACIO MELÉNDEZ AVILA



Nació un 12 de junio de 1990 en Santiago de Chile. En el año 2002 ingresa al Instituto Nacional General José Miguel Carrera Verdugo en donde manifestó su interés por el estudio de temas medio ambientales y de la química.

Motivado por el interés de la problemática ambiental del país, y tomando en cuenta su gusto por la química, en el año 2010 ingresa a la carrera de Química Ambiental de la Universidad de Chile.

Entre diciembre de 2013 y noviembre de 2014 ingresó al Laboratorio de Química Analítica de la facultad de ciencias, para la realización de su unidad de investigación titulada “Desarrollo de un método analítico para la determinación de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  mediante Espectrofluorimetría en Fase Solida”.

En noviembre del año 2015 ingresa a Ingeniería Ecosam S.A. para realizar su seminario de título.

*“Si las Puertas de la percepción fueran depuradas, todo aparecería ante el hombre tal  
cual es: Infinito...”*

**William Blake**

*A mis Padres*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi Directora de Seminario de Título, María Paz Sánchez, que me dio la oportunidad de desarrollar mi seminario, y prestar su ayuda para la realización de éste y darme a conocer la industria de áridos en Chile.

A los chicos de Ingeniería Ecosam S.A, Federico y Patricia, por toda la ayuda prestada y la buena onda.

A mi profesor patrocinante Dr. Manuel Leiva Guzmán, por su apoyo en la realización de mi Seminario de Título, el cual siempre tuvo una excelente disposición para recibirme y contestar todas mis dudas en el desarrollo del presente seminario.

Al profesor Dr. Luis Morales por su tiempo en ayudarme a elaborar los mapas de iso-concentración con Qgis.

A Dr. Richard Toro y Mg. Julio Hidalgo, gracias por aceptar ser miembros de mi comisión, y por todos sus consejos y sugerencias con el fin de tener un buen trabajo. Espero que mi trabajo haya sido de su agrado.

A mi jefa de carrera, Dra. Cecilia Labbé, gracias por sus consejos y también por su preocupación para poder concretar este trabajo y terminarlo en un tiempo prudente.

A Marisol Aravena, por su excelente trabajo, dedicación y apoyo en el transcurso de este largo proceso como lo es el seminario de título, gracias por toda la ayuda prestada. La carrera de Química Ambiental no sería lo mismo sin ti.

A Niccole Olivares, mi compañera, mi mejor amiga y mi amor. Gracias por todo el apoyo prestado no solo en el transcurso de éste seminario, sino que en el transcurso de

todos estos años que nos conocemos. Te agradezco mucho el estar ahí siempre que lo necesite, agradezco la paciencia que tienes conmigo, especialmente en el último año. Siempre podrás contar conmigo, y yo sé que también podré contar contigo.

A mis padres. Muchas gracias por el apoyo y cariño incondicional que siempre me han brindado. Sin ustedes nada de esto sería posible. Este trabajo está dedicado a ustedes. Gracias por Todo.

## INDICE DE CONTENIDOS

|  |            |
|--|------------|
| <b>RESUMEN</b> .....   | <b>xii</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>xiv</b> |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>1</b>   |
| 1.1. Antecedentes Generales.....   | 1          |
| 1.1.1. Los Áridos .....  | 1          |
| 1.1.2. Granulometría .....   | 3          |
| 1.1.3. Extracción.....   | 4          |
| 1.1.4. Ciclo de Vida de la extracción de áridos .....  | 6          |
| 1.1.5. Los Áridos y el Medio Ambiente .....  | 11         |
| 1.2. Antecedentes Específicos. ....  | 17         |
| 1.2.1. Características de la comuna de San Fernando .....  | 17         |
| 1.2.2. Plan de Descontaminación Atmosférica .....  | 18         |
| 1.2.3. Propuesta de Seminario de Titulo.....   | 19         |
| 1.3. Objetivos.....  | 20         |
| 1.3.1. Objetivo General.....   | 20         |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....   | 20         |
| <b>II. METODOLOGÍA</b> .....   | <b>21</b>  |
| 2.1. Datos generales del proyecto.....   | 21         |
| 2.2. Tipología del proyecto .....  | 22         |
| 2.3. Estudio de Calidad de Aire y Variables Meteorológicas .....   | 23         |
| 2.4. Estimación de Emisiones de Material Particulado Fugitivo (MP10 y MP2,5) ..                                | 24         |
| 2.5. Medidas de Mitigación propuestas para MP10 y MP2,5 .....  | 27         |
| 2.6. Modelación Atmosférica .....  | 28         |
| <b>III. RESULTADOS</b> .....   | <b>32</b>  |
| 3.1. Caracterización de la calidad del aire y variables meteorológicas en la zona de estudio .....             | 32         |
| 3.1.1. Estación de Monitoreo de San Fernando.....  | 32         |
| 3.1.2. Calidad del Aire en San Fernando .....  | 33         |
| 3.2. Estimación de Emisiones de la planta de extracción de áridos producidas en la etapa de Construcción ..... | 37         |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2.1. Actividades .....  | 37        |
| 3.3. Estimación de Emisiones producidas en la Fase de Operación .....             | 40        |
| 3.3.1. Actividades .....  | 40        |
| 3.3.2. Funcionamiento Planta Procesadora .....                                    | 41        |
| 3.4. Estimación de Emisiones producidas en la etapa de Cierre y/o Abandono ....   | 47        |
| 3.4.1. Actividades Fase de Cierre.....  | 47        |
| 3.5. Emisiones Totales del Proyecto .....   | 50        |
| 3.6. Medidas de Mitigación propuestas .....                                       | 51        |
| 3.6.1. Medidas de Mitigación Fase de Construcción .....                           | 51        |
| 3.6.2. Medidas de Mitigación Propuestas Para Fase de Operación .....              | 53        |
| 3.6.3. Medidas de Mitigación propuestas para la Fase de Cierre .....              | 55        |
| 3.7. Compensación de Emisiones .....  | 57        |
| 3.8. Modelación .....   | 58        |
| 3.8.1. Datos de entrada al Modelo.....  | 58        |
| 3.8.2. Datos Meteorológicos .....   | 59        |
| 3.8.3. Dirección del Viento .....   | 60        |
| 3.8.4. Velocidad del Viento .....   | 61        |
| 3.8.5. Radiación Solar .....  | 61        |
| 3.9. Resultados de la Modelación .....  | 62        |
| 3.9.1. Caso 1: Peor Escenario .....   | 63        |
| 3.9.2. Caso 2: Aplicación de Condiciones meteorológicas de la zona .....          | 67        |
| 3.10. Receptores Discretos.....   | 70        |
| <b>IV. DISCUSIÓN.....</b>   | <b>75</b> |
| 4.1. Plan de Descontaminación Atmosférica del Valle Central de la VI Región ..... | 75        |
| 4.2. Estimación de Emisiones Atmosféricas .....                                   | 75        |
| 4.3. Medidas de Mitigación.....   | 76        |
| 4.4. Modelación Atmosférica .....   | 77        |
| 4.5. Receptores Discretos .....   | 79        |
| 4.6. Recomendaciones.....   | 80        |
| <b>V. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>81</b> |
| <b>VI. BIBLIOGRAFIA.....</b>  | <b>84</b> |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>VII. ANEXOS .....</b>                                   | <b>88</b> |
| a. Resultados de Modelación Atmosférica según caso 2. .... | 88        |
| b. Rosa de Viento Estacional, Comuna de San Fernando.....  | 91        |

### INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Ventajas y desventajas de un Proceso Seco. ....  | 9  |
| <b>Tabla 2.</b> Componentes medioambientales.....  | 13 |
| <b>Tabla 3.</b> Cronograma de Actividad del Proyecto.....  | 21 |
| <b>Tabla 4.</b> Datos Generales del proyecto .....   | 22 |
| <b>Tabla 5.</b> Maquinaria a utilizar.....   | 22 |
| <b>Tabla 6.</b> Actividades y sus correspondientes factores de emisión. ....                             | 25 |
| <b>Tabla 7.</b> Factores de Emisión Vehículos. ....  | 27 |
| <b>Tabla 8.</b> Clases de Estabilidad según Velocidad del Viento y Radiación solar incidente<br>.....    | 30 |
| <b>Tabla 9.</b> Categorías Pasquil-Gifford.....  | 30 |
| <b>Tabla 10.</b> Factores de Conversión de Concentraciones. ....   | 31 |
| <b>Tabla 11.</b> Emisión de MP10 y MP2,5 por actividad en la Fase de Construcción. ....                  | 38 |
| <b>Tabla 12.</b> Porcentaje de emisión de las actividades realizadas en la fase de<br>construcción ..... | 39 |
| <b>Tabla 13.</b> Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Construcción .....                                | 39 |
| <b>Tabla 14.</b> Tipo de material y Tamaño .....   | 41 |
| <b>Tabla 15.</b> Emisión de MP10 y MP2,5 por actividad en la Fase de Operación .....                     | 43 |
| <b>Tabla 16.</b> Emisión de MP10 y MP2,5 de la Planta Procesadora en la Fase de<br>Operación .....       | 44 |
| <b>Tabla 17.</b> Emisión Total de MP10 y MP2,5 de la Planta Procesadora de Áridos .....                  | 45 |
| <b>Tabla 18.</b> Porcentaje de emisión de las actividades realizadas en la Fase de Operación<br>.....    | 46 |
| <b>Tabla 19.</b> Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Operación. ....                                   | 46 |
| <b>Tabla 20.</b> Emisión de MP10 y MP2,5 por actividad en la Fase de Cierre.....                         | 48 |
| <b>Tabla 21.</b> Porcentaje de emisión de las actividades realizadas en la Fase de Cierre ..             | 49 |
| <b>Tabla 22.</b> Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Cierre. ....                                      | 49 |
| <b>Tabla 23.</b> Emisiones Totales de MP10 y MP2,5 .....   | 50 |
| <b>Tabla 24.</b> Propuestas de Mitigación Para la fase de Construcción .....                             | 53 |
| <b>Tabla 25.</b> Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Construcción .....                                | 53 |
| <b>Tabla 26.</b> Parámetros para el Cálculo de Humectación de Caminos .....                              | 54 |
| <b>Tabla 27.</b> Propuestas de Mitigación Para la fase de Operación.....                                 | 55 |
| <b>Tabla 28.</b> Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Operación .....                                   | 55 |
| <b>Tabla 29.</b> Propuestas de Mitigación Para la Fase de Cierre .....                                   | 56 |
| <b>Tabla 30.</b> Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Cierre. ....                                      | 56 |
| <b>Tabla 31.</b> Emisión Total de MP10 y MP2,5 .....   | 56 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 32.</b> Emisión Máxima de Contaminantes Establecida por PPDA VI Región .....         | 57 |
| <b>Tabla 33.</b> Emisiones a Compensar de MP10.....   | 57 |
| <b>Tabla 34.</b> Concentraciones de MP10 y MP2,5 en g/s/m <sup>2</sup> .....                  | 58 |
| <b>Tabla 35.</b> Datos de Entrada de SCREEN VIEW™ .....                                       | 59 |
| <b>Tabla 36.</b> Direcciones del Viento .....   | 61 |
| <b>Tabla 37.</b> Velocidad del Viento según estación del año.....                             | 61 |
| <b>Tabla 38.</b> Estabilidad Estacional.....  | 62 |
| <b>Tabla 39.</b> Altura Capa de Mezcla .....  | 62 |
| <b>Tabla 40.</b> Concentración de MP10 y MP2,5 en el peor escenario .....                     | 65 |
| <b>Tabla 41.</b> Comparación de Concentraciones con Normas Primarias de Calidad de Aire ..... | 66 |
| <b>Tabla 42.</b> Receptores Discretos cerca del área del Proyecto.....                        | 70 |
| <b>Tabla 43.</b> Modelación Caso 2 Fase de Construcción .....                                 | 88 |
| <b>Tabla 44.</b> Modelación Caso 2 Fase de Operación .....                                    | 89 |
| <b>Tabla 45.</b> Modelación Caso 2 Fase de Cierre.....  | 90 |

#### **INDICE DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Planta Procesadora de Áridos.....  | 1  |
| <b>Figura 2.</b> Distintos usos de los Áridos .....   | 2  |
| <b>Figura 3.</b> Bandas Granulométricas de Áridos Clasificados. ....  | 4  |
| <b>Figura 4.</b> Etapas del Ciclo de Vida del Árido.. .....   | 7  |
| <b>Figura 5.</b> Operaciones Típicas de un Proceso Seco. . .....  | 9  |
| <b>Figura 6.</b> Esquema de una Criba.....  | 10 |
| <b>Figura 7.</b> Almacenamiento en acopios (a) y en silos (b).....  | 11 |
| <b>Figura 8.</b> Zona de emplazamiento del Proyecto. ....   | 17 |
| <b>Figura 9.</b> VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins.....   | 19 |
| <b>Figura 10.</b> Ubicación del Proyecto. ....  | 21 |
| <b>Figura 11.</b> Representación gráfica Modelo Gaussianos. ....  | 28 |
| <b>Figura 12.</b> Ubicación Estación de Monitoreo de San Fernando. ....   | 32 |
| <b>Figura 13.</b> Estación de Monitoreo San Fernando. ....  | 33 |
| <b>Figura 14.</b> Evolución de la concentración 24h de MP10 en San Fernando, periodo 2007 – 2016.....               | 33 |
| <b>Figura 15.</b> Evolución de la concentración anual de MP10 en San Fernando, periodo 2007 – 2016.....             | 34 |
| <b>Figura 16.</b> Comportamiento del Material Particulado según estación del año, día de la semana, y por hora..... | 35 |
| <b>Figura 17.</b> Evolución de la concentración semanal de MP10. ....   | 36 |
| <b>Figura 18.</b> Emisión de Material Particulado por actividad, Fase de Construcción. ....                         | 39 |
| <b>Figura 19.</b> Emisión de Material particulado por actividad, fase de operación .....                            | 46 |
| <b>Figura 20.</b> Emisión de Material particulado por actividad, fase de cierre .....                               | 49 |
| <b>Figura 21.</b> Malla Rashel .....  | 51 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 22.</b> Camión Aljibe .....  | 52 |
| <b>Figura 23.</b> Rosa de Viento General .....   | 60 |
| <b>Figura 24.</b> Concentración MP10 y MP2,5 en 24h y Anual en las 3 Fases .....   | 64 |
| <b>Figura 25.</b> Comparación de Concentraciones con Normas Primarias de Calidad de Aire .....                                     | 66 |
| <b>Figura 26.</b> Concentración MP10 24h Fase de Operación, analizado estacionalmente, y con distintas direcciones de viento ..... | 68 |
| <b>Figura 27.</b> Mapa de Iso-Concentración para Caso 1 .....  | 71 |
| <b>Figura 28.</b> Mapa de Iso-Concentración MP10 24h para Caso 2, Otoño .....  | 73 |
| <b>Figura 29.</b> Mapa de Iso-Concentración MP10 24h para Caso 2, Invierno .....   | 73 |
| <b>Figura 30.</b> Rosa de Viento Estacional .....  | 91 |

## RESUMEN

Los áridos son partículas granulares de material pétreo, los cuales son extraídos generalmente en los lechos o riberas de los ríos. Este tipo de material al ser procesado según los requerimientos necesarios, servirá para diferentes productos, como es el caso de la fabricación de hormigón, bases estabilizadas, morteros, cemento asfáltico, entre otros. En el último tiempo debido al crecimiento de la industria de la construcción, la extracción y procesamiento de áridos ha tenido una mayor demanda para proveer de materia prima a la construcción. Es importante destacar que a modo de ejemplo, para la construcción de 1 Kilómetro de carretera se necesita alrededor de 25.000 toneladas de áridos.

En este contexto, las actividades y procesos que involucran la extracción y procesamiento de áridos trae consigo tanto impactos positivos como negativos al medio ambiente, los cuales son relevantes a la hora de poner en funcionamiento una actividad como ésta. Dentro de los componentes ambientales afectados, el medio físico, específicamente la calidad del aire es uno de los componentes más relevantes y con un impacto negativo a causa de la generación de material particulado fugitivo desde las obras.

En este trabajo se realiza la estimación de emisiones atmosféricas de material particulado generado por una planta extractora y procesadora de áridos ubicada en la comuna de San Fernando, en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Con éstos resultado se procedió a realizar una modelación atmosférica con el programa SCREEN VIEW™, analizando también las variables meteorológicas de la zona, e identificando los receptores discretos del material particulado generado en la actividad. Para ello, usando el programa de sistema de información geográfica Qgis 2.14.0 Essen, con el cual se realizó un mapa de iso-concentración de material particulado.

Esta zona al estar dentro del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) del valle central de la VI Región, fija un límite de emisión de 5 toneladas al año de MP10, con el fin de poder sacar a la zona del rango de "saturada".

Se logró determinar que el proyecto en su fase de construcción emitirá 0,798 toneladas de MP10 y 0,102 toneladas de MP2,5. La fase de operación emitirá 26,698 toneladas de MP10, y 3,084 toneladas de MP2,5 por cada año de funcionamiento. En tanto en la fase de cierre, serán 5,821 toneladas de MP10 y 0,615 toneladas de MP2,5.

Al proponer medidas de mitigación adecuadas para la reducción de emisiones, especialmente en la fase de mayor emisión, como es la fase de operación, se alcanzaría una reducción de un 75,3% en las emisiones de MP10 (6,604 toneladas al año), y de un 69,3% de MP2,5 (0,946 toneladas al año).

Para conocer el impacto que tendrá esta actividad en la calidad de aire, se realizó una modelación atmosférica con el software SCREEN VIEW™, se propusieron 2 casos de estudio. En el Caso 1, se estudió el peor escenario posible, obteniéndose la concentración máxima para MP10 como concentración diaria fue de 110,76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración anual fue de 22,15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ambas en las fases de operación y a un punto de máximo impacto de 1.000 m. lo cual, junto a un mapa de iso-concentración realizado con Qgis 2.14.0 Essen, e identificando a receptores discretos cercanos al área del proyecto, se corroboró un impacto a un colegio y conjuntos habitacionales. Si bien, en comparación a las normas primarias de calidad de aire para MP10 y MP2,5 no se vieron sobrepasados los límites establecidos por éstas, por lo cual no se necesitaría recurrir a un modelo más avanzado para determinar el impacto de la actividad, sabiendo que los resultados arrojados son los máximos posibles. En tanto en el Caso 2, se aplicaron las variables meteorológicas de la zona como dirección y velocidad del viento, y la radiación solar incidente en la zona se obtuvo también la estabilidad atmosférica de la zona gracias al método Pascal-Gifford. Los resultados en el Caso 2 se vieron notoriamente disminuidos, ya que en las zonas de máximo impacto (con viento S, es de 1.000 metros, Vientos SSO y SSE de 200 metros, mientras que con un viento OSO es de 100 metros) lo cual se vio corroborado con la elaboración de 2 mapas de iso-concentración para las estaciones frías del año (Otoño e Invierno) la concentración fue de aproximadamente de 1,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 0,23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de MP10 como concentración diaria y anual.

Fue posible obtener éstos resultados con el uso de software libre, lo cual reduce de forma significativa los costos asociados a este tipo de estudios, permitiendo realizar un análisis preliminar de la afectación de un proyecto a la calidad del aire.

## ABSTRACT

Aggregates are granular particles of stony material, which are generally extracted from the riverbed or riverbanks. This type of material, when processed according to the necessary requirements, will be used for various products, such as the manufacture of concrete, stabilized bases, mortars, asphaltic cement, among others. In recent times by the growth of the construction industry, the extraction and processing of aggregates has had a greater demand to test the raw material to the construction. It is important to dislodge, an example mode, for the construction of 1 kilometer of road needs about 25,000 tons of aggregates.

In this context, the different activities and processes that involve the extraction and processing of aggregates brings with it both positive and negative impacts to the environment, which are relevant when setting up an activity like this. Within the affected environmental components, specifically the air quality is one of the most relevant components and with a negative impact due to the operation of this type of activities, due to the generation of fugitive particulate material from the extracting and processing operations.

In this work the estimation of atmospheric emissions of particulate matter generated by an aggregate extraction and processing plant located in the Commune of San Fernando in VI Region of the General Liberator Bernardo O'Higgins is carried out. With these results an atmospheric modeling has been carried out with the SCREEN VIEW™ program, also analyzing the meteorological variables of the zone, and identifying the discrete receptors of the particulate material generated in the activity. To do this, using the geographic information program Qgis 2.14.0 Essen, with which a map of iso-concentration of particulate material has been made.

This zone, as part of the Atmospheric Prevention and Decontamination Plan (PPDA) of the central valley of the Region VI, sets an emission limit of 5 tons per year of MP10, in order to be able to remove the area from the "saturated" ".

It was determined that the project in its construction phase will emit 0.798 tons of MP10 and 0.102 tons of MP2.5. The operation phase will issue 26.698 tons of MP10, and 3.084 tons of MP2.5 for each year of operation. In the closing phase, there will be 5.821 tonnes of MP10 and 0.615 tonnes of MP2,5.

By proposing appropriate mitigation measures to reduce emissions, especially in the phase of increased emissions, such as the operation phase, a reduction of 75.3% in MP10 emissions (6.604 tons per year) would be achieved, and of 69.3% MP2.5 (0.946 tons per year).

In order to know the impact that this activity will have on air quality, an atmospheric modeling was performed with SCREEN VIEW™ software, 2 case studies were proposed. In Case 1, the worst possible scenario was studied, obtaining the maximum concentration for MP10 as a daily concentration was  $110.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , while the annual concentration was  $22.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , both in the phases of operation and to a point of maximum impact of 1,000 m. Which, together with a map of iso-concentration made with Qgis 2.14.0 Essen, and identifying discrete receptors near the project area, corroborated an impact on a school and housing complexes. Although, in comparison to the primary air quality standards for MP10 and MP2.5, the limits established by them were not exceeded, so a more advanced model would not be necessary to determine the impact of the activity, knowing That the results are the maximum possible. In case 2, the meteorological variables of the zone were applied as direction and speed of the wind, and the solar radiation incident in the zone also obtained the atmospheric stability of the zone thanks to the Pascal-Gifford method. The results in case 2 were notoriously diminished, since in the zones of maximum impact (with wind S, it is of 1,000 meters, Wind SSO and SSE of 200 meters, whereas with a wind OSO is of 100 meters) which It was corroborated with the preparation of 2 iso-concentration maps for the cold seasons of the year (autumn and winter) the concentration was approximately  $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $0.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of MP10 as the daily concentration and Year. It was possible to obtain these results with the use of free

software, which significantly reduces the costs associated with this type of studies, allowing a preliminary analysis of the impact of a project on air quality.



## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes Generales

#### 1.1.1. Los Áridos

**Descripción y usos.** Los áridos son partículas granulares de material pétreo de tamaño variable, el cual se origina a partir de la fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre (Industria del Árido en Chile, 2001). Este material es extraído generalmente en los lechos o las riberas de los ríos, siendo principalmente arena y grava, en tanto las rocas de mayor tamaño deben ser procesadas para que puedan ser incorporadas como agregados. En la Figura 1 se muestra una planta típica de procesamiento de áridos, en donde se puede observar el resultado final del proceso, los cuales se dividen en diferentes tamaños según el requerimiento específico que se necesite.

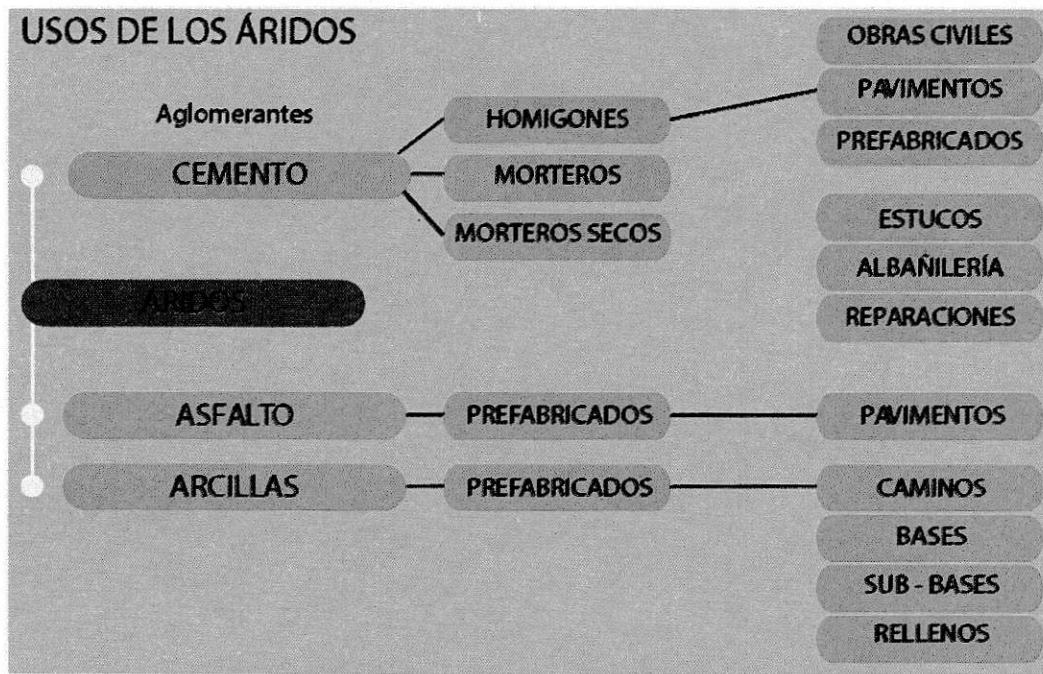


**Figura 1.** Planta Procesadora de Áridos. Fuente: Ingeniería Ecosam S.A.

El material procesado corresponde a minerales de caliza, granito, cuarzo, arcilla, entre otros que se utilizan en la fabricación de hormigón, bases estabilizadas, morteros,

cemento asfáltico, solo por mencionar algunos usos (Figura 2), configurando entonces una materia prima básica para la Industria de la Construcción.

Para hacerse una idea de la importancia que tiene el consumo de esta materia prima, basta decir que un kilómetro de autopista necesita 25.000 toneladas de áridos, un metro cúbico de hormigón 2 toneladas, o un kilómetro de doble vía de ferrocarril unas 10.000 toneladas (Explora Geología, 2010). Por ello estos materiales son el recurso mineral más utilizado por el ser humano, dejando al margen el agua. Una persona, en un país desarrollado, puede llegar a consumir, a lo largo de su vida, más de 500 toneladas de ésta materia prima (Explora Geología, 2010).



**Figura 2.** Distintos usos de los Áridos (Los Áridos y el Cemento, 2007)

En términos generales, los áridos se definen como un conjunto de fragmentos de materiales pétreos lo suficientemente duros, estables e inertes en los cementos y mezclas asfálticas, las cuales se emplean en la fabricación de morteros, hormigón y bases estabilizadas, y que según los requerimientos necesarios, tendrán diversas dimensiones, que tendrán que cumplir con las normas establecidas, tales como la NCh163/2013 “Áridos para morteros y hormigones – Requisitos Generales” , como

también la NCh165/2007 "Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y Determinación de la Granulometría".

**Clasificación.** La clasificación de los áridos se establece por su **origen**:

- Naturales (Procedentes de la corteza terrestre),
- Reciclados (Procedentes del tratamiento de residuos de construcción y demolición)
- Secundarios (Procedentes de escorias de otras industrias, generados en procesos térmicos).

Además de la clasificación que se les puede dar a éstos según el origen, también se puede hacer según las **características físicas** de los áridos. Este aspecto se hace relevante, ya que según la clasificación que se requiere se determinará el uso de éste recurso para un área específica, como por ejemplo el uso para hormigón. Dentro de las propiedades técnicas se mencionan las siguientes: distribución granulométrica, dureza, formas de grano, pureza, resistencia, elasticidad, solo por nombrar algunas.

Lo dicho anteriormente determina para que será apto el árido, especialmente en la construcción y en la industria, según los requerimientos técnicos para cada necesidad.

La clasificación de los áridos, está establecida en la norma chilena NCh 163-Of.79, en donde **según el tamaño**, se clasifican en arena y grava.

- **Arena:** Árido fino, que pasa por una abertura nominal de tamiz de 5 mm, y es retenido en el de 0,08 mm.
- **Grava:** Árido que pasa por una abertura nominal de 50 mm, pero es retenido en el de 5 mm.
- **Gravilla:** Es una grava más fina, cuyos granos están comprendidos entre 5 y 20 mm.

### **1.1.2. Granulometría**

La granulometría es la medición y graduación de los diferentes tamaños de granos que están en una muestra de áridos, lo cual permite conocer la proporción de los diferentes tamaños de granos que lo componen. La graduación se realiza de manera decreciente y se expresa en forma de porcentaje con respecto al total de una muestra que pasa por cada tamiz. La NCh 165. Of.77 "Áridos para morteros y hormigones –

Tamizado y determinación de la granulometría” específica que tamices se utilizan para este fin.

La representación gráfica de la granulometría es la “curva granulométrica” (Figura 3), la cual permite dar una visión objetiva de la distribución del tamaño de las partículas. Es utilizada para comparar visualmente diferentes materiales entre sí, y ver si se cumplen con los requisitos de la NCh 165.Of.77. Esto es indispensable para poder conocer la proporción que hay de cada material de acuerdo a lo que se requiere fabricar. De este modo por ejemplo permite determinar la proporción necesaria para la fabricación de morteros y hormigones.

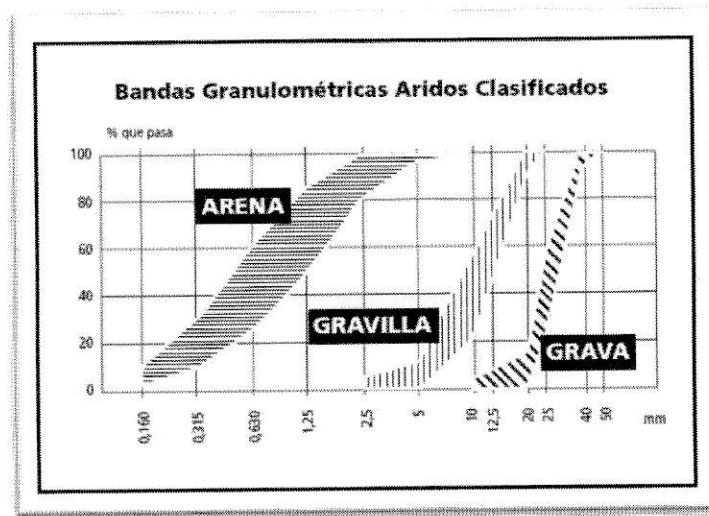


Figura 3. Bandas Granulométricas de Áridos Clasificados.

### 1.1.3. Extracción

La extracción de áridos conlleva una excavación que se realiza en la superficie del terreno con el fin de extraer un material pétreo de la corteza terrestre. Esta operación implica el uso de maquinaria para realizar la extracción, equipos de carguío y transporte. El diseño de la explotación dependerá del tipo de yacimiento, incidiendo principalmente los parámetros geométricos que lo definen, las características del material a extraer y las distancias en los puntos de acopio y/o procesamiento.



La extracción de áridos se puede clasificar en dos grandes grupos, los cuales son artesanal y mecanizada, en donde la diferencia está en el grado de tecnología que se emplea.

- **Extracción artesanal:** Se caracteriza por la nula utilización de tecnología en la extracción. Los artesanos solo realizan una clasificación del material pétreo en función de la granulometría. Éste tipo de actividad es desarrollada en sectores en donde su demanda es muy pequeña, y por lo tanto se suplente la necesidad de maquinaria pesada, por mano de obra. Este tipo de explotación se realiza principalmente en los cauces de los ríos. Generalmente es realizada por pequeños sindicatos de areneros artesanales, y en otras se realiza de forma ilegal.
- **Extracción Mecanizada:** Es la explotación industrial del material pétreo. Gracias al apoyo de maquinaria es posible una alta tasa de producción, en un tiempo menor. El uso de equipos y maquinaria permite que se puedan extraer áridos, sea de manera superficial, o bajo el agua.

También la extracción se puede clasificar según el tipo de yacimiento que se intervendrá, los cuales son:

- **Extracción en Cauce:** Corresponde a la explotación del material pétreo que se halla en las depresiones naturales del terreno, por lo que puede escurrir agua. Por dichos escurrimientos, existe un arrastre de material; es decir es una excavación de los lechos fluviales, tanto artesanal como mecanizada. Normalmente, la extracción en los cauces se utiliza para facilitar los escurrimientos de las aguas y evitar así los costosos trabajos de encauzamiento de un río
- **Extracción en Bancos Areneros:** También llamado banco decantador de sedimentación gravitacional, corresponde al retiro de material fino desde un río aprovechando la fuerza de arrastre de éste, para lo cual se construye un banco o canalón por donde se hace pasar el flujo de agua. En términos generales consiste en introducir un brazo de agua del cauce por el banco, y mediante la pérdida de velocidad de las aguas dentro de él se produce la decantación o sedimentación de las partículas de arena. Posteriormente se desvía el brazo de

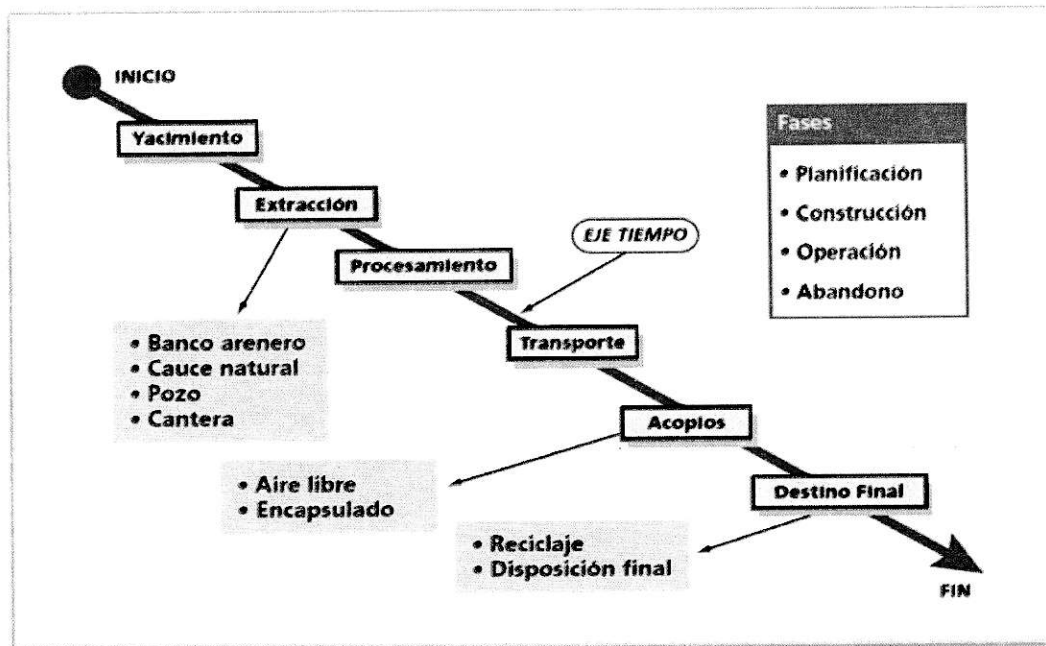
agua y por medio de un cargador frontal, o a mano (de ser artesanal), se procede a retirar la arena decantada.

- **Extracción en pozos:** Es aquella que se realiza en sectores de extracción fuera de los cauces, en donde los áridos se encuentran en forma natural como producto de un relleno aluvial en el valle (material sedimentario).
- **Extracción en canteras:** Se refiere a la explotación de los mantos rocosos o formaciones geológicas cementadas, donde los materiales se extraen usualmente desde cerros mediante tronaduras y perfilajes.

#### **1.1.4. Ciclo de Vida de la extracción de áridos**

##### **1.1.4.1. Etapas del Ciclo de Vida**

Para poder conocer de mejor manera la relación del proceso productivo del árido, desde la extracción a su destino final, con el medio ambiente, se requiere hacer un análisis del ciclo de vida de éste, en donde se identifican las fases clave en las que se centra el análisis ambiental de un proyecto determinado, de acuerdo a la normativa ambiental vigente (Ley de bases Generales del Medio Ambiente – Ley N° 19.300- y su reglamento). En la Figura 4 se muestra el esquema secuencial del recurso árido en sus distintas etapas del ciclo de vida.



**Figura 4.** Etapas del Ciclo de Vida del Árido. (Industria del Árido en Chile, 2001).

En la Figura 4 se pueden distinguir las 6 etapas del proceso de extracción de áridos: yacimiento, extracción, procesamiento, transporte, acopios, y destino final. Cada una de estas etapas se pueden caracterizar de la siguiente forma:

- i) Yacimiento. Corresponde al estudio y análisis del yacimiento, en donde los aspectos más relevantes se refieren al estudio de las características geológicas y potencialidades de las reservas.
- ii) Extracción. En esta etapa se diferencia el tipo de extracción que se realizara en el proyecto. Dentro de estos se puede mencionar las extracciones en banco arenoso, cauce natural, pozo y canteras.
- iii) Procesamiento. Está destinada a la obtención de productos de distintas granulometrías (tamaños). Para ello existen diversos tipos de procesos, desde una simple clasificación, hasta procesos mecanizados que incluyen trituración, ya sea en forma seca o húmeda, y el lavado de éste.
- iv) Transporte. Además del desplazamiento del recurso árido por vías de circulación de uso público, también se desplaza donde se ubica el terminal de

estacionamiento de camiones. Esta etapa vincula la extracción desde el yacimiento con el acopio y el destino final del árido.

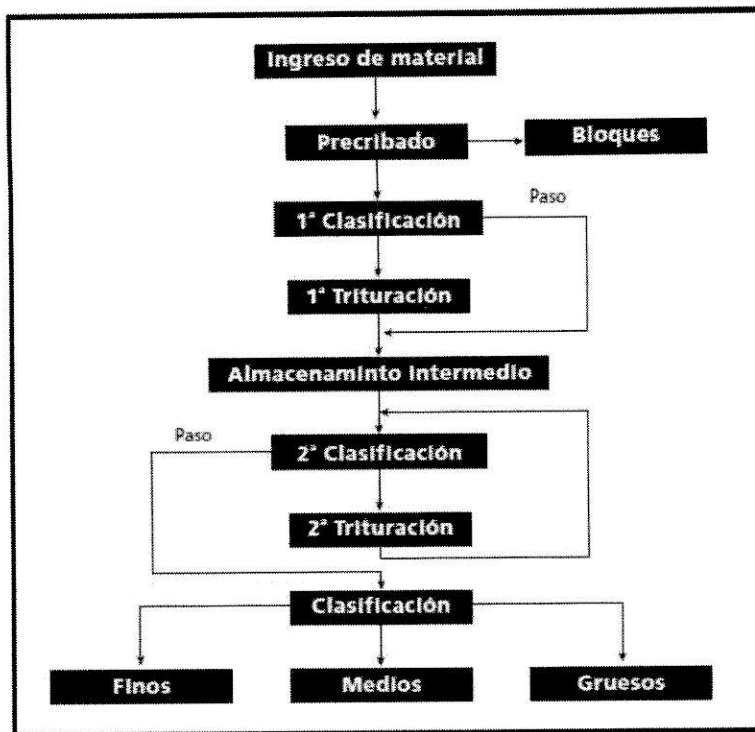
- v) Acopio. Es en donde se almacena el recurso árido en los centros de distribución. Estos pueden estar al aire libre, o encapsulados.
- vi) Destino Final. Esta etapa se subdivide en etapas de reciclaje según el lugar y condiciones en que se lleve a cabo la actividad, distinguiéndose el reciclaje en planta e in situ, y la sub-etapa de disposición final, correspondiente a la eliminación del árido como desecho o parte constituyente de los residuos de la construcción en un lugar de disposición de escombros o en zonas de recuperación de suelos.

#### 1.1.4.2. Procesamiento de los Áridos

El proceso productivo para la obtención de los distintos tipos de áridos se puede realizar de dos formas distintas: **proceso seco y proceso húmedo**. Estas modalidades de producción dan origen a la configuración de plantas distintas.

**Proceso Seco.** Cualquier planta de este tipo estará basada en tres procesos mecánicos básicos, como la trituración, clasificación y operaciones complementarias, y se puede construir sobre la base de alguna o de todas las siguientes operaciones unitarias como lo indica la Figura 5.





**Figura 5.** Operaciones Típicas de un Proceso Seco. (Industria del Árido en Chile, 2001).

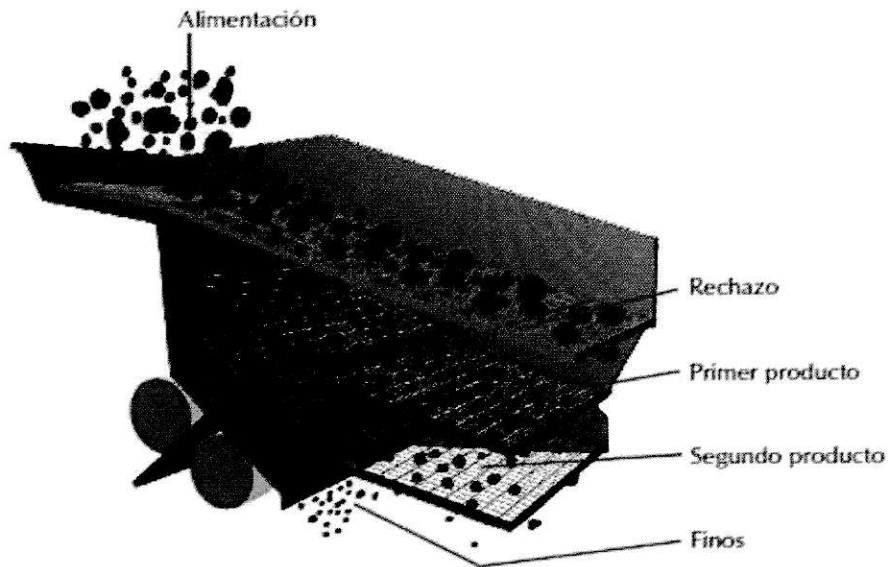
El proceso se inicia con la descarga del material extraído a un buzón receptor, dando lugar a un precibado que elimina el material de sobre tamaño. Luego pasa a diversas cintas según el tamaño que el material tenga, haciendo una selección a través de un harnero vibratorio, el cual los conduce, a trituración 1° y 2° según sea el caso, o directamente al almacenamiento en pilas siendo la clasificación en material fino, medio, o grueso. Las ventajas y desventajas que posee este tipo de proceso, se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas de un Proceso Seco.

| Ventajas                                 | Desventajas   |
|--|---|
| Sencillez y Flexibilidad                 | Incapacidad de producir granulometrías finas bien clasificadas      |
| Costos Bajos                             | Bajo grado de limpieza en tamaños finos                             |
| Alta tasa de Producción                  | Alto costo de los equipos de abatimiento de polvo o encapsulamiento |
| Fácil Ubicación y requieren poco espacio |   |

**Proceso Húmedo.** Para este tipo de planta, el esquema dependerá de los tipos de áridos que se requiera producir. Sin embargo, el número de procesos unitarios aquí utilizados es mucho mayor, en comparación al proceso en seco:

- Trituración y Molienda. Permiten disminuir en sucesivas fases, el tamaño de las partículas, empleando para ello equipos de trituración de diversas características. Se utilizan equipos de trituración primaria, secundaria o terciaria, para poder lograr el tamaño de partícula deseado. A Mayor cantidad de trituración, menor será el tamaño de la partícula.
- Clasificación. En las Etapas de Trituración, aparecen intercalados los equipos de clasificación, las cribas (Figura 6), que permiten seleccionar el tamaño de las partículas, separando entre las que pasan y las que no pasan por las mallas. De este modo se logran áridos de todos los tamaños posibles, en función de la demanda del mercado.

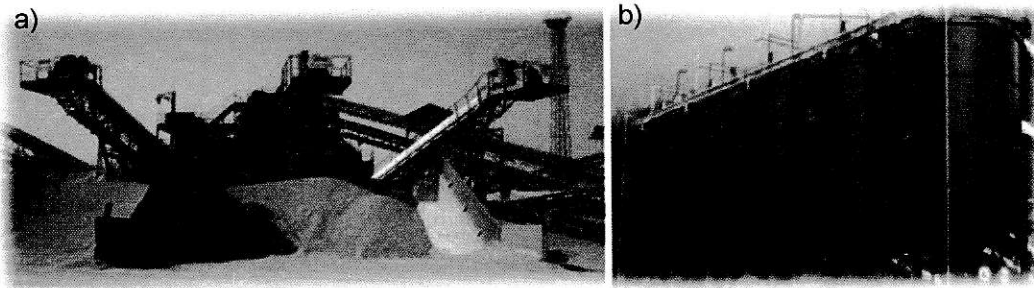


**Figura 6.** Esquema de una Criba. (Los Áridos y el Cemento, 2007).

- Lavado. Las operaciones de lavado del material se realizan cuando el material presenta lodos, u otras sustancias que afecten la calidad de los áridos, para así

obtener áridos limpios con el fin de responder a determinadas aplicaciones en la industria, evitando así la alteración de a adherencia con los ligantes.

- Almacenamiento. Se dispone de productos clasificados según su granulometría, que se almacenan en silos (si se destina a confección de hormigones) o en apilamientos a la intemperie o cubiertos, llamados acopios (Figura 7).



**Figura 7.** Almacenamiento en acopios (a) y en silos (b).

### **1.1.5. Los Áridos y el Medio Ambiente**

Las diferentes actividades y procesos que están involucrados en la industria del árido, desde la extracción al transporte de éstos como también la aplicación como producto final trae consigo impactos ambientales, los cuales son importantes de considerar al planificar la instalación de este tipo de industria. Al tener en consideración este tipo de impactos, juegan un rol importante las medidas de prevención y control ambiental al momento de diseñar un proyecto, lo cual conlleva también a tomar medidas de mitigación, restauración y/o compensación en el caso de que hubiese efectos ambientales significativos.

La metodología del análisis para determinar los impactos ambientales requiere de información y conocimiento detallado del proyecto que se implementará, como también del lugar y el entorno de éste que se intervendrá. Los impactos ambientales pueden estar relacionados con cualquier etapa del ciclo de vida del árido (Figura 4).

La determinación de la línea base es imprescindible para permitir prever las alteraciones que se puedan provocar al medio ambiente. Ésta permitirá cuantificar la magnitud de las alteraciones que se pudiesen provocar en el lugar de emplazamiento, lo

cual permite proponer las medidas correctoras al respecto. La línea base, en un sentido amplio considera los recursos naturales físicos y bióticos, medio socio económico, antropológico, construido, etc. Tal como la define la Ley 19.300 (Ley Sobre Bases del Medio Ambiente) en su artículo n°2, inciso l) Línea de Base es “La descripción detallada del área de influencia de un proyecto o actividad, en forma previa a su ejecución”.

La identificación de los impactos ambientales se realiza a través de un análisis causa – efecto, que consiste en establecer los efectos y alteraciones positivas o negativas que un proyecto o actividad produzca.

#### **1.1.5.1. Impactos Ambientales de la Industria del Árido**

Dentro de las materias primas a granel, los áridos son los que tienen los menores precios. En consecuencia, la instalación de proyectos de extracción y procesamiento, se realizan cerca de los puntos en los cuales se utilizarán, para así abaratar costos en transporte. En estas zonas se pueden generar conflictos principalmente por el uso de suelo, los planes reguladores comunales, y la oposición ciudadana. Lamentablemente el desarrollo de éste tipo de actividades no puede ser desarrollado sin causar algún impacto ambiental. Antiguamente, sin una conciencia ni legislación que regulara esto de forma efectiva, se tenía poca o nula visión de los impactos que se generaban al extraer sin ninguna restricción este tipo de recurso. Es por ello que es de suma importancia considerar la planificación integrada de un proyecto determinado para poder así identificar los posibles impactos que acarreará al medio. Y es en este sentido que cobra un rol fundamental las posibles medidas de prevención y control ambiental como parte del diseño de un proyecto, para así poder implementar medidas de mitigación, compensación y/o restauración. (Langer, 2002).

Es en éste sentido, que los distintos tipos de descargas al ambiente son generalmente la descarga de contaminantes a cuerpos de agua, excedentes industriales como parte de las operaciones de mantención de las instalaciones y maquinaria operativa, y principalmente un gran impacto debido a las emisiones fugitivas de material particulado debido a las diferentes actividades que se realizan en este tipo de proyectos.

Las medidas que se adopten en el diseño del proyecto, deben garantizar el cumplimiento de la normativa y exigencias impuestas por la autoridad.

Una forma de evaluar un impacto ambiental es la caracterización de la naturaleza de éste considerando el Área de Influencia, Tiempo de Duración de la actividad, predicción de impactos y la capacidad de controlar impactos, tal como lo menciona William Langer (Environmental Impacts of Mining Natural Aggregate).

#### 1.1.5.2. Componentes Ambientales Afectados en la extracción de áridos

En forma general las actividades de extracción y procesamiento de áridos afectan directamente a los ríos y/o predios ribereños, predios rurales y partes de zonas urbanas. Estos lugares son ocupados por ecosistemas singulares, cuyo funcionamiento está ligado estrechamente a la presencia y a la dinámica del agua. (Industria del Árido en Chile, 2001).

Para efecto de una evaluación ambiental más completa, los componentes medioambientales suelen agruparse en: Medio Físico, Medio Biótico, Socioeconómico Cultural y Medio Construido, tal como se puede observar en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Componentes medioambientales

| Medio Físico                         | Medio Biótico      | Medio Socioeconómico y Cultural  | Medio Ambiente Construido |
|--------------------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Clima y Meteorología                 | Flora y Vegetación | Paisaje y Estética               | Infraestructura           |
| Calidad de Aire                      | Fauna              | Asentamientos Humanos            | Sistema Territorial       |
| Ruido y Vibraciones                  | -                  | Patrimonio Arqueológico Cultural | -                         |
| Hidrología Superficial y Subterránea | -                  | -                                | -                         |
| Geología y Geomorfología             | -                  | -                                | -                         |
| Suelos                               | -                  | -                                | -                         |

En éste trabajo los componentes medioambientales que se analizarán serán la calidad de aire de la zona, centrándose en el material particulado fugitivo de una planta extractora y procesadora de áridos, como también el clima y meteorología, con el fin de poder caracterizar de mejor manera el impacto que tendrá la extracción de áridos en la zona. También se analizarán los asentamientos humanos próximos en la zona de estudio y observar si tendrán un impacto negativo por la acción de ésta actividad.

### **1.1.5.3. Emisiones fugitivas de Material Particulado producidas en las actividades.**

Las actividades asociadas a los proyectos en operación de extracción, procesamiento, transporte y acopio intermedio de áridos se caracterizan en un mayor grado por las emisiones atmosféricas de carácter fugitivo de material particulado, los cuales varían en intensidad según la fase del proyecto en la que se encuentren, ya sea fase de construcción, fase de operación y fase de cierre.

### **1.1.5.4. Distribución de Tamaño de Material Particulado.**

Las emisiones atmosféricas de carácter fugitivo de material particulado relacionado a la extracción y procesamiento de áridos, en su gran mayoría la constituyen partículas de un tamaño menor a 10 micras, MP10, y en menor medida, material particulado menor a 2,5 micras, MP2,5. Esto se debe, a que la formación de material más fino, como lo es el MP2,5 ésta mucho más relacionado a la quema de biomasa, ya sea combustión de leña, o quemas agrícolas. (Centro Mario Molina, 2013). En tanto, el MP10 se ve más relacionado al procesamiento de material pétreo, tal como el transporte, tamizado, trituración y operaciones de almacenamiento (US-EPA, Chapter 11.19.1: Sand And Gravel Processing, 1995).

Éstos tipos de material particulado están limitados por normas de calidad primaria (D.S. 20/2013 y D.S.12/2011 respectivamente), que rigen en todo el país.

### **Características del MP**

El material particulado, también nombrado como aerosol atmosférico referido a partículas líquidas y/o sólidas suspendidas en el aire, es uno de los componentes principales presentes en la atmósfera y tiene un origen natural o antropogénico.

Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (es decir como partículas primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (es decir partículas secundarias). Dichas reacciones químicas pueden consistir en la interacción entre gases precursores en la atmósfera para formar una nueva partícula por condensación, o entre un gas y una partícula atmosférica para dar lugar a un nuevo aerosol por adsorción o coagulación (Warneck, 1988).

Como resultado de esta variabilidad de fuentes y transformaciones, el material particulado atmosférico consiste en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y composición química (Kerminen, 1997), ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean.

La composición química de las partículas es muy heterogénea. Las partículas con diámetro inferior a 10  $\mu\text{m}$  (denominadas MP10) son dañinas para la salud humana, ya que pueden penetrar en las vías respiratorias. La fracción fina del MP10 (partículas con diámetro menor a 2,5  $\mu\text{m}$  denominadas MP2,5) es de mayor peligrosidad al ser 100% respirables, penetrar y permanecer mayor tiempo en los pulmones; además, en general su composición química es de mayor toxicidad (Préndez, 1993).

Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa o número de partículas por unidad de volumen de aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  o  $\text{n}/\text{cm}^3$ ).

#### **Efectos en la salud**

El material particulado, dependiendo del tamaño, puede ingresar al sistema respiratorio del ser humano. Diversos estudios epidemiológicos, han demostrado que existe una correlación entre las enfermedades pulmonares y cardiacas con este contaminante (Schwarze, 2006).

En el caso de MP10 se pudo observar que un aumento de éste en 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se traduce en un aumento del riesgo de hospitalización por infarto al miocardio, en tanto se ha demostrado que la exposición temporal, incluso a altas concentraciones de MP2,5 aumenta el riesgo de infarto de miocardio después de sólo unas pocas horas en una población de alto riesgo (Polichetti, 2009).

#### **Efectos en el ecosistema.**

Otro punto importante además del daño que puede ocasionar el material particulado a la salud de las personas, es el efecto negativo que tiene éste en el ecosistema, ya que también experimenta los efectos directos o indirectos de la exposición al material particulado atmosférico, tanto por deposición seca como por deposición húmeda. Estos

efectos adversos se producen bajo la acción de las partículas atmosféricas, pero también cuando éstas actúan como soporte para otros contaminantes atmosféricos.

Las partículas de mayor diámetro (modo grueso) tales como el polvo mineral, al depositarse sobre las hojas de las plantas pueden reducir la capacidad de intercambio gaseoso así como afectar a la fotosíntesis, lo cual limita el crecimiento (WBG, 1998). Cuando las partículas se depositan sobre la superficie terrestre, las concentraciones de metales presentes en el material particulado pueden afectar a las características edáficas e inhibir funciones como la toma de nutrientes por parte de las plantas.

Es por ello que es importante conocer la posible trayectoria que estos contaminantes atmosféricos puedan tomar, con el fin de apreciar si incidirán directamente sobre la población, o en zonas agrícolas que puedan ser perjudicadas. En este sentido la meteorología tiene un rol preponderante pues de ella dependerá si la concentración de contaminantes se quede estancada o tenga una correcta difusión, con lo que conllevaría a la menor concentración de contaminación en un punto específico.

### **Efecto de variables meteorológicas en la dispersión de MP**

Dentro de las variables meteorológicas que se deben considerar por tener directa relación sobre la calidad de aire son el transporte convectivo horizontal, el cual depende de la velocidad y dirección del viento.

Por lo general una mayor velocidad del viento reducirá las concentraciones de contaminantes pues provocará una mayor dilución y mezcla. Aunque también, dependiendo de la geografía del lugar puede provocar circulaciones cerradas, como es el caso de las brisas valle – cordillera, teniendo un efecto negativo en la dispersión, causando acumulación. También el transporte convectivo vertical, que depende de las variaciones verticales de temperatura en la atmósfera. Por último cabe agregar la importancia de las precipitaciones, las cuales tienen directa relación con la dilución de los contaminantes, provocando deposición húmeda de éstos, y con ello una disminución en la concentración en la atmósfera [Pielke, 1998].

Éstos antecedentes son vitales, para aplicar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, con el fin de obtener concentraciones a distancias establecidas. Para ello es fundamental contar con los datos de Rosas de vientos (la cual se confecciona con datos de dirección y velocidad del viento), como también la radiación



solar incidente en la zona, la que permite conocer la estabilidad atmosférica de la zona en cuestión gracias al método propuesto por Pasquill-Gifford, y así identificar los lugares en donde se concentre la mayor concentración de contaminantes.

## 1.2. Antecedentes Específicos.

En el presente seminario se evaluó la emisión y dispersión de aerosoles atmosféricos en una planta de extracción y procesamiento de áridos, para ello se analizará a una planta emplazada en el cauce del Río Tinguiririca, en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Provincia de Colchagua, Comuna de San Fernando, tal como se muestra en la Figura 8.

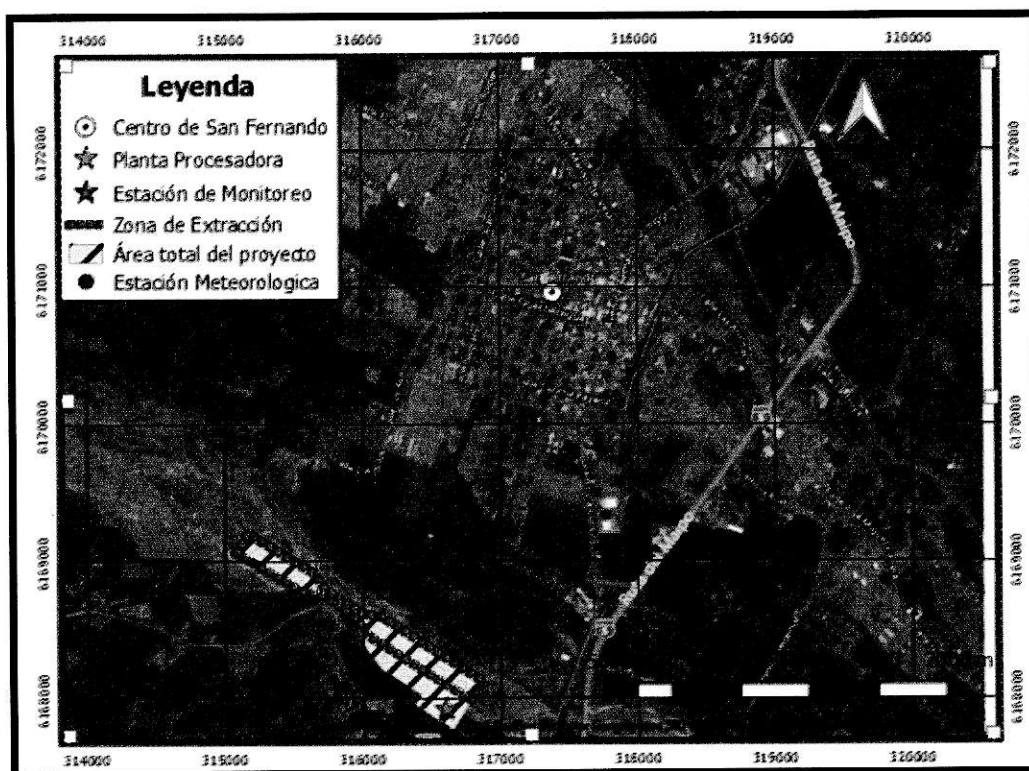


Figura 8. Zona de emplazamiento del Proyecto. Fuente: Ingeniería Ecosam S.A.

### 1.2.1. Características de la comuna de San Fernando

La comuna de San Fernando, capital de la provincia de Colchagua en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, está ubicada a 132 Km de Santiago y a 54 Km de Rancagua. Se encuentra a 349 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) y tiene una superficie de 2.458 Km<sup>2</sup>. Limita al Norte con las comunas de Malloa, Rengo y

Machalí; al Sur con Chimbarongo y Teno; al Oriente con la República de Argentina y al Poniente con las comunas de Placilla y Nancagua. Tiene una población de 73.994 habitantes (INE, Censo 2012), en donde la gran mayoría corresponde a población rural.

La actividad económica de la comuna es eminentemente agrícola, tales como viñedos, cultivo de remolacha, frutales, trigo, tabaco y cultivo tradicional. También cabe destacar el alza de la agroindustria (exportación de frutas, hierbas, empresas conserveras de lácteos). En el comercio y el turismo al ser capital de la provincia de Colchagua, se posiciona como el principal centro neurálgico de la zona, manteniendo de este modo el carácter de mayor proveedor de servicios para el sur de la región.

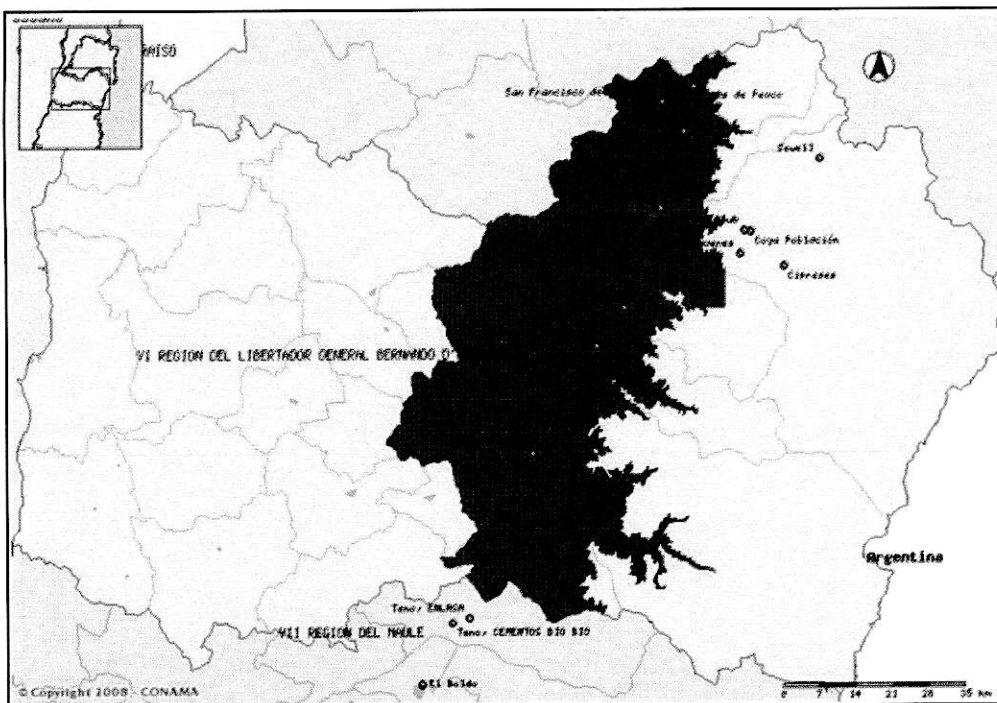
El clima de la comuna es preponderantemente templado cálido, con estación seca prolongada, la cual dura entre 5 a 6 meses aproximadamente. En los meses de mayo, junio y julio se presentan generalmente las precipitaciones en la zona, con un promedio anual de 790 mm. (INE, Censo 2012).

#### **1.2.2. Plan de Descontaminación Atmosférica**

Ésta región fue declarada como zona saturada por material particulado respirable MP10 (D.S. N°7/2009, Min. SEGPRES), como concentración anual y de 24 h. en todo el valle central en el año 2009 (Figura 9). Dicha declaración se fundamentó en los registros obtenidos mediante el monitoreo oficial de MP10 desde el año 2004 en adelante, según los cuales se constató la superación de la norma primaria de MP10, tanto en su métrica diaria como anual. Fundado en tales antecedentes, se estableció el año 2007 como año de referencia para la solicitud de declaración de zona saturada, y con ello la elaboración de un plan de descontaminación para la zona (D.S. N°7/2009).

En el año 2013 se estableció el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para el Valle Central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (D.S. N°15/2013), en el cual se limita la emisión máxima de MP10 hasta en 5 Ton/Año. Si este límite es sobrepasado, se deberán compensar estas emisiones en un 120%.

El PPDA establece como meta disminuir las concentraciones diarias y anuales de MP10 hasta un nivel inferior al estado de saturación, es decir, lograr un valor de percentil 98 para la norma de 24 horas y promedio trianual inferior al estado de saturación; 149  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 49  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.



**Figura 9.** VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins. El área demarcada en color indica la zona declarada como saturada por MP10. Fuente: Centro Mario Molina, 2013.

### 1.2.3. Propuesta de Seminario de Título

De acuerdo a los antecedentes presentados es una necesidad evaluar el efecto que tendrá la implementación de una planta extractora y procesadora de áridos en el Río Tinguiririca, Comuna de San Fernando, para la calidad del aire en la zona.

En éste seminario se evaluará la emisión de material particulado MP10 y MP2,5 producto de la instalación de la planta, y en todas sus fases, construcción, operación y cierre, además de plantear medidas de mitigación, en el caso de sobrepasar la norma de emisión que establece el PPDA de la región. Con ello, se realizará una modelación atmosférica con el programa SCREEN VIEW™, con los resultados obtenidos de la estimación de emisiones para obtener valores de concentración a diversas distancias con respecto al proyecto. Tanto la calidad del aire de la zona, como el análisis meteorológico, se realizará en base a los datos de la estación de monitoreo de San Fernando, a través del programa Microsoft Excel®, y con el paquete de datos de OpenAir para R Studio®. Éste último para la elaboración de Rosa de vientos, y evaluación de la calidad del aire de la zona. Por último, el programa de sistema de información geográfica

(SIG) Qgis 2.14.0 Essen, se hará un mapa de iso-concentración, con el fin de observar de manera gráfica el impacto que tendrá el desarrollo de la actividad con los receptores discretos aledaños a la zona.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Estimar la cantidad de Material Particulado que emite una planta extractora y procesadora de áridos y evaluar los efectos medioambientales que acarreará en las zonas aledañas, mediante una modelación atmosférica con el programa SCREEN VIEW™, obteniendo así la concentración de material particulado y el punto de máximo impacto, e identificando a los receptores discretos mediante la utilización de Qgis 2.14.0 Essen, para la elaboración de un mapa de iso-concentración.

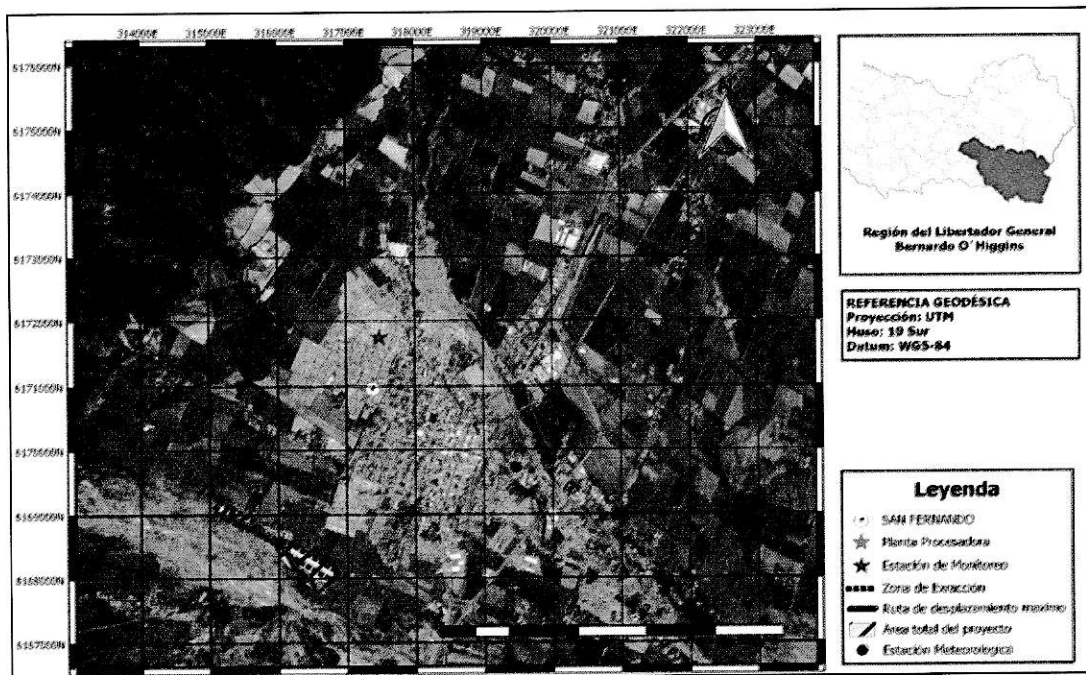
#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar la calidad del aire y las variables meteorológicas de la zona de estudio mediante el programa R Studio®, con el paquete de calidad de aire OpenAir.
- Estimar la emisión de material particulado fugitivo (MP10 y MP2,5) que se produce en la planta de extracción y procesamiento de Áridos.
- Proponer medidas de mitigación adecuadas, si fuera el caso, para MP10 y MP2,5.
- Modelar la dispersión de MP10 y MP2,5 mediante un programa de modelación atmosférica (SCREEN VIEW™) para identificar el punto de máximo impacto y conocer así la concentración máxima de material particulado generado por el proyecto.
- Identificación de los receptores discretos y elaboración de mapa de iso-concentración con el programa SIG, Qgis 2.14 Essen.

## II. METODOLOGÍA

### 2.1. Datos generales del proyecto

El proyecto se emplazará en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Provincia del Cachapoal, comuna de San Fernando. Tendrá una superficie total de 37,5 Ha. y está a 3 km. del centro de San Fernando (Figura 10).



En el sitio del proyecto se realizará la extracción y procesamiento de áridos, desde el cauce del Río Tinguiririca, por un periodo de 96 meses (8 años). A continuación, se presenta el cronograma de actividades del proyecto (Tabla 3).

**Tabla 3.** Cronograma de Actividad del Proyecto

| Fase         | Meses |
|--------------|-------|
| Construcción | 1     |
| Operación    | 96    |
| Cierre       | 2     |

Los datos generales de la planta fueron proporcionados por el titular del proyecto (Tablas 4 y 5)

**Tabla 4.** Datos Generales del proyecto

| <b>Dato</b>                 | <b>Valor</b>                |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Volumen de Extracción       | 108.000 m <sup>3</sup> /año |
| Tiempo de Trabajo           | 96 meses (8 años)           |
| Días a Trabajar             | 265 Días/año                |
| Superficie de emplazamiento | 37,5 Ha                     |
| Planta Procesadora          | Si                          |

**Tabla 5.** Maquinaria a utilizar

| <b>Maquinaria</b>       | <b>Capacidad</b>  |
|-------------------------|-------------------|
| 1 Excavadora Serie 220  | 1 m <sup>3</sup>  |
| 4 Camiones Tolva        | 15 m <sup>3</sup> |
| 1 Camioneta de Servicio | -                 |
| 1 Camión Aljibe         | 10 m <sup>3</sup> |

## 2.2. Tipología del proyecto

El proyecto consiste en la extracción mecanizada de áridos desde el río Tinguiririca, los cuales serán posteriormente procesados en planta. Éste debe ser sometido al sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA), según se establece en el artículo 10°, letra i) de la Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la cual menciona: “Proyectos de desarrollo minero, incluidos los de carbón, petróleo y gas, comprendiendo las prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos y estériles, así como la extracción industrial de áridos, turba o greda...”.

Por otra parte, el D.S. N°40/2012, Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, define en su artículo 3°, en los literales i.5), e i.5.2) lo siguiente: “i.5) Se entenderá que los proyectos o actividades de extracción de áridos o greda son de dimensión industrial cuando: ...”



“i.5.2) Tratándose de extracciones en un cuerpo o curso de agua, el volumen total de material a remover durante la vida útil del proyecto o actividad sea igual o superior a veinte mil metros cúbicos (20.000 m<sup>3</sup>) tratándose de las Regiones de Arica y Parinacota a Coquimbo, o cincuenta mil metros cúbicos (50.000 m<sup>3</sup>), tratándose de las Regiones de Valparaíso a Magallanes y Antártica Chilena, incluida la Región Metropolitana de Santiago”.

Ya que el proyecto pretende extraer 108.000 m<sup>3</sup> de material al año, en un periodo de 8 años dentro de la VI Región, comuna de San Fernando, debe hacer el ingreso al SEIA.

### **2.3. Estudio de Calidad de Aire y Variables Meteorológicas**

Las variables meteorológicas fue posibles obtenerlas a través de 2 fuentes, la Estación de Monitoreo de Calidad de Aire de la Comuna de San Fernando, de la cual es propietario el Ministerio del Medio Ambiente, en donde se analizó la velocidad y dirección del viento como también la radiación solar incidente en la zona; y la Estación Meteorológica de la Comuna de San Fernando, la cual es propiedad de la DGA (Dirección General de Aguas, dependiente del Ministerio de Obras Publicas), donde se obtuvieron la cantidad de precipitaciones diarias de la comuna.

Los datos de concentración de MP10, como también de las variables meteorológicas fueron analizados en función de las horas de trabajo que tendrá la planta, de 06:00 – 18:00 hrs. Esto se hizo con el fin de tener datos que se ajustaran a las horas de trabajo que tendrá el proyecto.

El estudio de éstas variables se realizó en un intervalo de 3 años, desde el año 2013 al año 2015.

Los análisis fueron realizados con Microsoft Excel®, y con el paquete de datos de OpenAir para R Studio®. Con ello fue posible caracterizar el comportamiento del viento en la zona, a través de la realización de Rosas de Viento, de modo general, y de modo estacional. La Radiación Global, además de la velocidad del viento, sirvió para obtener la estabilidad atmosférica de la zona a través del método Pasquill-Gifford, el cual utiliza esas dos variables en el caso que no se tengan datos de medición en altura para conocer la estabilidad atmosférica. Esto permitió definir qué tipo de estabilidad esta presenta en la zona según la estación del año.

#### 2.4. Estimación de Emisiones de Material Particulado Fugitivo (MP10 y MP2,5)

Para la estimación de emisiones de MP10 y MP2,5 fugitivo de la Planta Extractora y Procesadora de Áridos, se utilizó la "Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios" desarrollada por CONAMA RM en 2001 y actualizada por SEREMI Medio Ambiente RM en Enero 2012 y en base a documentos de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos, específicamente las secciones 11.19.1, "Sand and Gravel Processing" y 13.2.4 "Aggregate Handling And Storage Piles" del AP-42 "Compilation of Air Pollutant Emission Factors".

La ecuación general utilizada para el cálculo de la estimación de emisiones, corresponde a:

$$E = FE \cdot NA \cdot \left(1 - \frac{EA}{100}\right)$$

Dónde:

- E= Emisión (ton/año)
- FE= Factor de Emisión
- NA= Nivel de Actividad
- EA= Eficiencia de Abatimiento

Las actividades que se realizaran en este proyecto, como también su correspondiente factor de emisión, son detallados en la Tabla 6.



**Tabla 6.** Actividades y sus correspondientes factores de emisión.

| ACTIVIDAD   | FACTOR DE EMISIÓN   | UNIDAD | PARÁMETROS   |
|---|---|--------|--|
| Escarpe   | $FE_{MP10}=5,70$  | Kg/Km  | Sin Parámetros   |
|   | $FE_{MP2,5}=1,140$  |        |  |
| Excavaciones  | $FE=0,45 \cdot k \cdot (s^{1,5}/M^{1,4})$                                       | Kg/hr  | <p>s(%)=Porcentaje de finos en el suelo (8,5% valor por defecto)</p> <p>M(%): Porcentaje de Humedad en el Suelo (6,5% valor por defecto)</p> <p>k: Coeficiente de partícula (<math>k_{MP10}=0,75</math>, <math>k_{MP2,5}=0,105</math>)</p>                     |
| Transferencia de Material                                 | $FE=0,016 \cdot k \cdot (U/2,2)^{1,3}/(M/2)^{1,4}$                              | Kg/Ton | <p>U(Velocidad del Viento) = 1,76 m/s</p> <p>M(%): Porcentaje de Humedad en el Suelo (6,5% valor por defecto)</p> <p>k: Coeficiente de partícula (<math>k_{MP10}=0,35</math>, <math>k_{MP2,5}=0,053</math>)</p>  |
| Erosión de Material en pila, Acopios                      | $FE=1,9 \cdot k \cdot (s/1,5) \cdot (f/15)$                                     | Kg/Ha  | <p>s(%)=Porcentaje de finos en el suelo (8,5% valor por defecto)</p> <p>f(%)= tiempo en que el viento excede los 5,4 m/s = 0,104%</p> <p>k: Coeficiente de partícula (<math>k_{MP10}=1</math>, <math>k_{MP2,5}=0,15</math>)</p>                                |
| Tránsito de vehículos pesados por caminos no pavimentados | $FE= 281,9 \cdot k \cdot (s/12)^{0,9} \cdot ((W/3)^{0,45}) \cdot ((365-p)/365)$ | g/Km   | <p>s(%)=Porcentaje de finos en el suelo (8,5% valor por defecto)</p> <p>W= peso promedio de la flota (toneladas)</p> <p>p= días con lluvia superiores a 0,254 mm</p> <p>k: Coeficiente de partícula (<math>k_{MP10}=1</math>, <math>k_{MP2,5}=0,15</math>)</p> |

| ACTIVIDAD   | FACTOR DE EMISIÓN   | UNIDAD | PARÁMETROS   |
|---|---|--------|--|
| <b>Tránsito de vehículos livianos por caminos no pavimentados</b> | $Fe=281,9 \cdot k \cdot (s/12) \cdot (S/30)^{0,5} / (M/0,5)^{0,2} \cdot ((365-p)/365)$        |        | s(%)=Porcentaje de finos en el suelo (8,5% valor por defecto)<br>S= Velocidad media de desplazamiento (Km/h)<br>M(%): Porcentaje de Humedad en el Suelo (6,5% valor por defecto)<br>p= días con lluvia superiores a 0,254 mm<br>k: Coeficiente de partícula (k <sub>MP10</sub> =1, k <sub>MP2,5</sub> =0,15) |
| <b>Buzón Primario</b>   | $FE= k \cdot (0,0009) \cdot (s/5) \cdot (U/2,2) \cdot (H/1,5) / (M/2)^2 \cdot (Y/4,6)^{0,33}$ | Kg/Ton | s(%)=Porcentaje de finos en el suelo (8,5% valor por defecto)<br>U(Velocidad del Viento) = 1,76 m/s<br>H=Altura de caída del material 3 m<br>M(%): Porcentaje de Humedad en el Suelo (6,5% valor por defecto)  |
| <b>Criba de Selección</b>   | FE <sub>MP10</sub> =0,00037<br>FE <sub>MP2,5</sub> =0,000025                                  | Kg/Ton | Sin Parámetros   |
| <b>Chancador Primario</b>   | FE <sub>MP10</sub> =0,00027<br>FE <sub>MP2,5</sub> =0,00005                                   | Kg/Ton | Sin Parámetros   |
| <b>Cinta de Transporte</b>  | FE <sub>MP10</sub> =0,000023<br>FE <sub>MP2,5</sub> =0,000007                                 | Kg/Ton | Sin Parámetros   |
| <b>Harnero</b>  | FE <sub>MP10</sub> =0,00037<br>FE <sub>MP2,5</sub> =0,000025                                  | Kg/Ton | Sin Parámetros   |

Para la obtención de los días de lluvia sobre los 0,254 mm, se analizaron los datos de la estación meteorológica de la comuna de San Fernando, desde el año 2013 al año 2015. Los días de superación de 0,254 mm de lluvia caída fueron 42.

En cuanto al MP10 y MP2,5 emitido por los motores a combustión de los vehículos empleados en el proyecto, los factores de emisión son los siguientes (Tabla 7).

**Tabla 7. Factores de Emisión Vehículos.**

| TIPO DE VEHÍCULO         | FACTOR DE EMISIÓN   | UNIDAD | PARÁMETROS  |
|--------------------------|---|--------|---|
| Camiones Diésel Tipo III | $FE_{MP10} = 0,101 + 0,424 \cdot \text{EXP}(-0,042 \cdot V) + 0,864 \cdot \text{EXP}(-0,16 \cdot V)$                | gr/Km  | V (Velocidad) = 40Km/hr   |
|                          | $*FE_{MP2,5} = (0,101 + 0,424 \cdot \text{EXP}(-0,042 \cdot V) + 0,864 \cdot \text{EXP}(-0,16 \cdot V)) \cdot 0,92$ |        |   |
| Camioneta                | $FE_{MP10} = 0,000045 \cdot V^2 - 0,004885 \cdot V + 0,1932$  | gr/Km  | V (Velocidad) = 40Km/hr   |
|                          | $*FE_{MP2,5} = (0,000045 \cdot V^2 - 0,004885 \cdot V + 0,1932) \cdot 0,92$   |        |   |
| Excavadora               | $FE_{MP10} = (FP \cdot t \cdot C \cdot P)$  | gr/día | FP (Factor según Potencia) = 1,23g/kW-h<br>T (Tiempo de operación Anual)<br>C (Capacidad de Carga) = 60%<br>P (Potencia Nominal) = 90kW-h |
|                          | $*FE_{MP2,5} = (FP \cdot t \cdot C \cdot P) \cdot 0,92$   |        |   |
| Camión Aljibe            | $FE_{MP10} = 0,101 + 0,424 \cdot \text{EXP}(-0,042 \cdot V) + 0,864 \cdot \text{EXP}(-0,16 \cdot V)$                | gr/Km  | V (Velocidad) = 10Km/Hr   |
|                          | $*FE_{MP2,5} = (0,101 + 0,424 \cdot \text{EXP}(-0,042 \cdot V) + 0,864 \cdot \text{EXP}(-0,16 \cdot V)) \cdot 0,92$ |        |   |

\*US-EPA, 2008

## 2.5. Medidas de Mitigación propuestas para MP10 y MP2,5

Para proponer medidas de mitigación pertinentes para el caso de que se sobrepasara las 5 toneladas al año de material particulado, específicamente MP10, como se señala en el PPDA del valle central de la VI región, se hizo una revisión bibliográfica de proyectos similares que fueron ingresados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), como también investigaciones realizadas en Chile (Corfo, 2001). Además de ello, se realizó la búsqueda de medidas de mitigación que se utilizan en otras partes del mundo como España y Estados Unidos, y cuál es el grado de efectividad que estas poseen. Todo ello, con el fin de que las medidas fueran efectivamente aplicables y prácticas, en el sentido de que no dificultaran el trabajo en la planta misma, o fuera en deterioro de la calidad del material pétreo extraído.

## 2.6. Modelación Atmosférica

Para la evaluación del impacto que tendría el proyecto con la comunidad aledaña en la comuna de San Fernando, se realizó una modelación atmosférica con el fin de conocer cuál será la concentración de material particulado MP10 y MP2,5, y así comparar el resultado con las normas primarias de calidad de aire vigentes en el país.

El contaminante más crítico de este proyecto es el MP10, el cual según el PPDA de la VI Región debe ser compensado en un 120%, se evaluará también el MP2,5, que, si bien no está dentro del PPDA de la región, es un contaminante más peligroso para la salud de las personas, al ser considerado 100% respirable.

Los modelos existentes se pueden clasificar en Gaussianos, Eulerianos, Langrangeanos y tipo "puff" (Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA, 2012).

Los Modelos Gaussianos describen la distribución tridimensional (x,y,z) de una pluma bajo condiciones meteorológicas y de emisiones estacionarias a través de una fórmula simple

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Estos modelos suponen, básicamente, que el penacho de humos que emana de una chimenea presenta una distribución gaussiana de las concentraciones en torno a su eje de simetría definido por la dirección del viento, tal como se puede observar en la Figura 11.

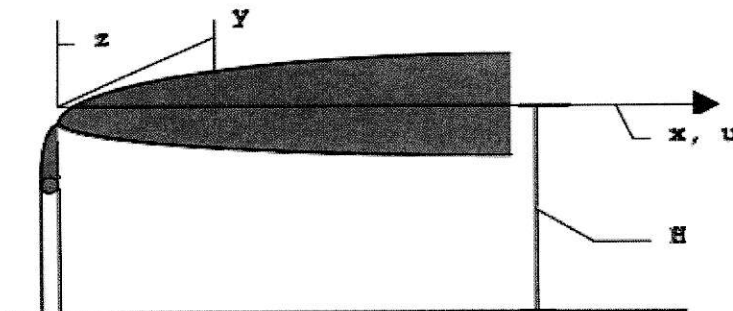


Figura 11. Representación gráfica Modelo Gaussianos. (Gallardo, 1997).

Donde los parámetros que definen la distribución son:

- Las **desviaciones estándar  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$** , variables tanto con la distancia a la fuente como según las condiciones meteorológicas existentes.
- **La altura efectiva de la chimenea (H)** determinada por la altura física de la misma y la elevación que alcanzan los humos a la salida de la chimenea según el empuje térmico y la velocidad de salida de ellos y las condiciones meteorológicas. El factor de proporcionalidad A se determina imponiendo que el flujo total a través del plano vertical contra el eje del penacho es igual a la cantidad emitida en la fuente Q:

$$A = \frac{Q}{u2\pi \sigma_y \sigma_z}$$

Donde u es la velocidad del viento. Nótese que este tipo de modelos no es aplicable a condiciones de baja ventilación (velocidades de viento nulas). Las desviaciones estándar, que definen la distribución, constituyen el problema real a determinar en estos modelos y se tratan según metodologías semi-empíricas. De acuerdo a condiciones de estabilidad atmosférica, dadas la velocidad del viento y la insolación, se establecen clases de estabilidad a cada una de las cuales corresponden valores medidos y tabulados de desviaciones estándar a distintas distancias de la fuente.

La estabilidad atmosférica es posible determinarla por las categorías de estabilidad de Pasquill – Gifford. Estas categorías son posible establecerlas con la radiación solar incidente y la velocidad del viento del lugar de estudio. En la Tabla 8 es posible determinar las clases de estabilidad existentes por este método.

**Tabla 8.** Clases de Estabilidad según Velocidad del Viento y Radiación solar incidente

| Velocidad del viento (m/s) a 10 m de altura | Día   |  |  | Noche (2)                            |                      |
|---|---|--|--|--------------------------------------|----------------------|
|   | Radiación solar incidente (1)                   |  |  | $4/8 \leq \text{Nubosidad} \leq 7/8$ | Nubosidad $\leq 3/8$ |
|   | Fuerte<br>mayor que<br>50 cal/cm <sup>2</sup> h | Moderada<br>entre 25 y<br>50 cal/cm <sup>2</sup> h | Débil<br>Menor que<br>25 cal/cm <sup>2</sup> h |                                      |                      |
| < 2   | A   | A - B  | B  | F                                    | F                    |
| 2-3   | A - B   | B  | C  | E                                    | F                    |
| 3-5   | B   | B - C  | C  | D                                    | E                    |
| 5-6   | C   | C - D  | D  | D                                    | D                    |
| > 6   | C   | D  | D  | D                                    | D                    |

Fuente: (Moragues, 2014)

Las categorías descritas en la tabla anterior, son descritas en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Categorías Pasquill-Gifford.

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>Día</b>       | A: Muy inestable<br>B: Inestable<br>C: Ligeramente inestable |
| <b>Día/Noche</b> | D: Neutra<br>E: Ligeramente estable                          |
| <b>Noche</b>     | F: Estable   |

Fuente: (Moragues, 2014)

El modelo utilizado en el presente seminario es el software SCREEN View™, Screening Air Dispersion Model (SCREEN 3) de la *United States Environmental Protection Agency (US-EPA)*. Este modelo permite determinar el aporte de las emisiones provenientes de fuentes emisoras, en localidades y sectores aledaños a las instalaciones del Proyecto, permitiendo de este modo asignar las cuotas de responsabilidad en los niveles de calidad del aire proyectados en su entorno.

SCREEN VIEW™ usa un modelo de pluma Gaussiana que incorpora factores relacionados a la fuente y factores meteorológicos para calcular la concentración de contaminantes de fuentes continuas. Se asume que el contaminante no experimenta

ninguna reacción química, y que ningún otro proceso de remoción (como deposición húmeda o seca) actúa sobre la pluma durante su transporte desde la fuente.

Es importante destacar que este es un modelo screening, que se utiliza con el objeto de determinar la necesidad de usar un modelo más refinado.

El modelo SCREEN VIEW™ siempre entrega como resultado concentraciones ambientales sobreestimadas, debido a que genera internamente la condición meteorológica más desfavorable, es decir, aquella con la que se obtiene la concentración ambiental más alta, considerando además que el diseño del modelo ubica al receptor recibiendo el viento directo de las fuentes y no considerando factores atenuadores como la topografía. Por lo anterior, la estimación con SCREEN VIEW™, establece un techo o valor máximo, que en la práctica nunca ocurre, por lo que las concentraciones reales en un punto determinado son siempre menores a las estimadas por este modelo.

Las concentraciones que entrega este modelo, son concentraciones en 1 hora. Para obtener las concentraciones diarias (24h) y anuales, se necesita utilizar los factores de conversión que entrega la US-EPA (Tabla 10)

**Tabla 10.** Factores de Conversión de Concentraciones.

| <b>Tiempo Promedio</b> | <b>Factor Multiplicador</b> |
|------------------------|-----------------------------|
| 3 Horas                | 0,9 ( $\pm 0,1$ )           |
| 8 Horas                | 0,7 ( $\pm 0,2$ )           |
| 24 Horas               | 0,4 ( $\pm 0,2$ )           |
| Anual                  | 0,08 ( $\pm 0,02$ )         |

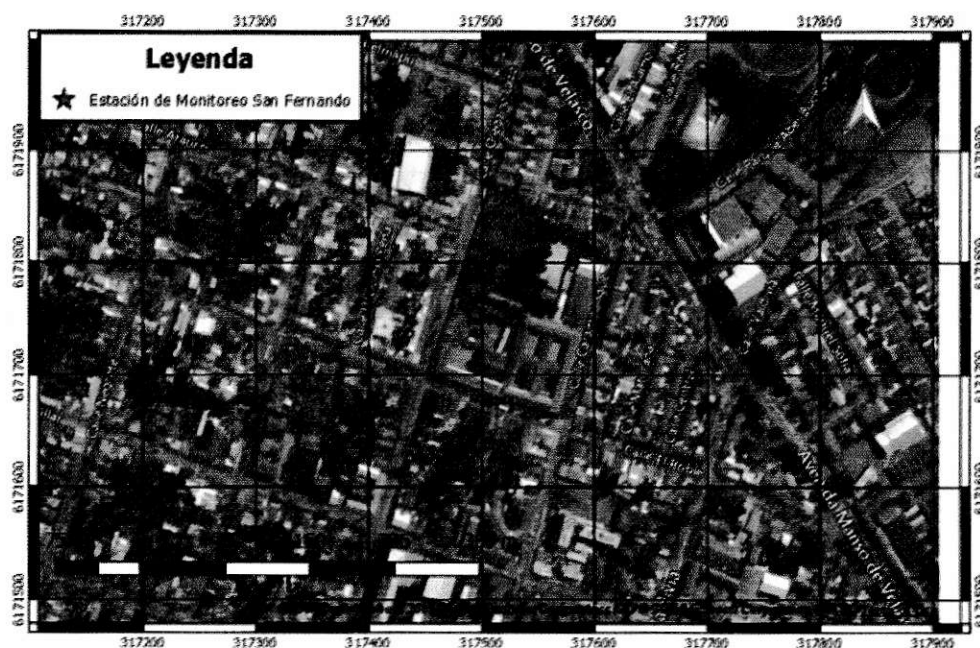
Fuente: US-EPA. Octubre de 1992. Pp 15.

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Caracterización de la calidad del aire y variables meteorológicas en la zona de estudio

##### 3.1.1. Estación de Monitoreo de San Fernando

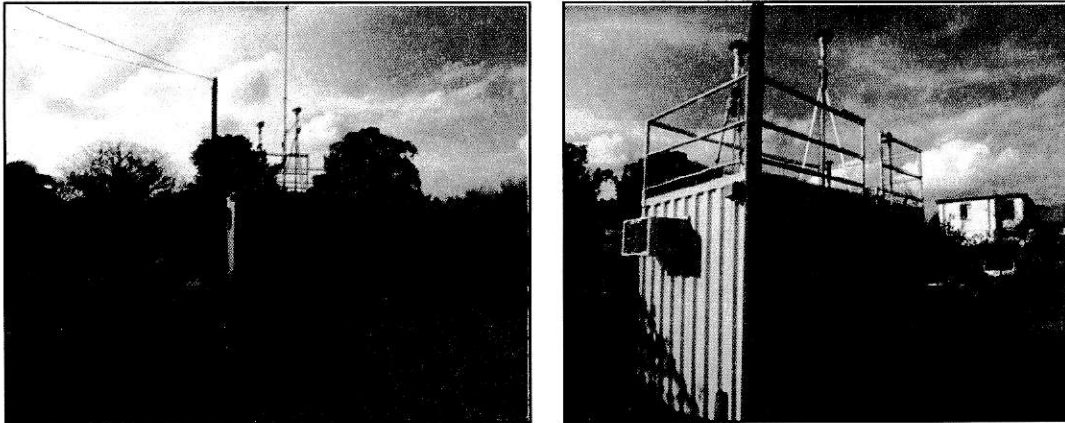
La estación de monitoreo de la comuna de San Fernando, se ubica al interior del estacionamiento del colegio Inmaculada Concepción de San Fernando (Figura 12).



**Figura 12.** Ubicación Estación de Monitoreo de San Fernando.

La ubicación de la estación de monitoreo (Figura 13), puede conllevar a un impacto directo de los gases de emisión de los tubos de escape de los automóviles allí presentes. Además de ello, esta cercano a árboles y a una población altamente poblada, la cual utiliza cocinas a leña, lo que también puede traer consigo un impacto directo de las emisiones de material particulado.



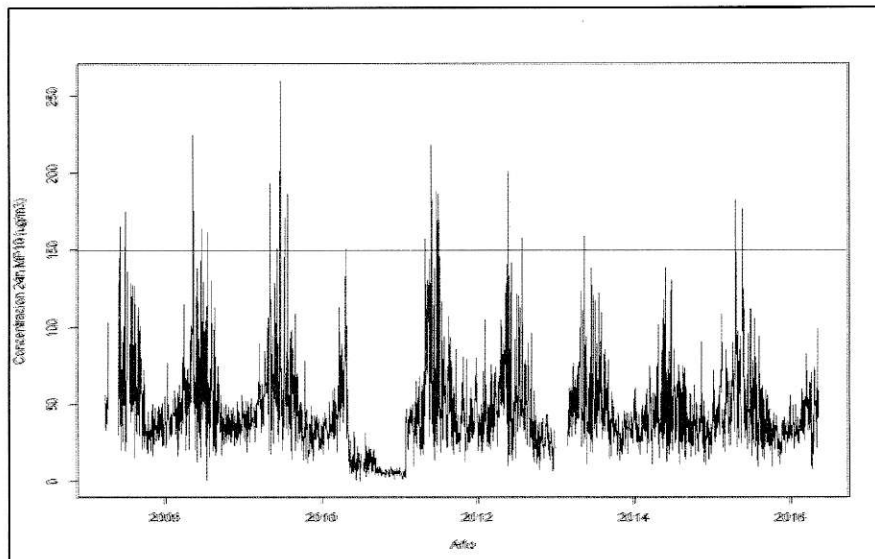


**Figura 13.** Estación de Monitoreo San Fernando.

### 3.1.2. Calidad del Aire en San Fernando

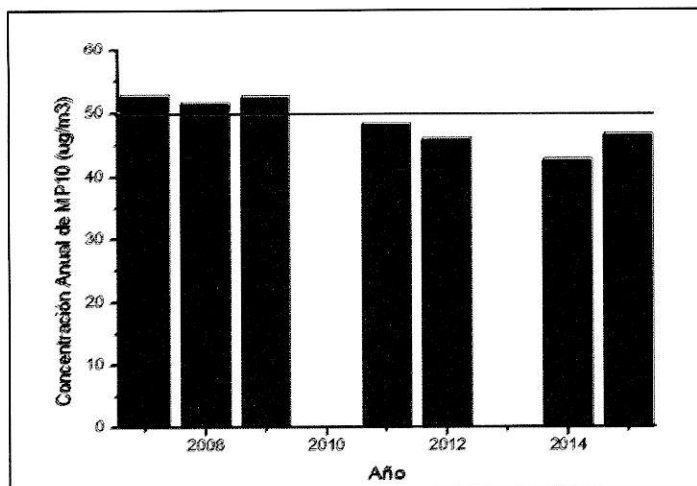
Con los datos de concentración de MP10 entregados por la estación de monitoreo de la comuna de San Fernando, desde el año 2007 a mayo de 2016, se realiza un análisis del comportamiento del material particulado en el transcurso del tiempo.

Se puede observar la evolución que ha tenido el MP10 como concentración de 24 horas, utilizando el paquete de datos de Open Air para el software R Studio®. (Figura 14).



**Figura 14.** Evolución de la concentración 24h de MP10 en San Fernando, periodo 2007 – 2016. Línea roja indica la norma de calidad primaria para éste contaminante,  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

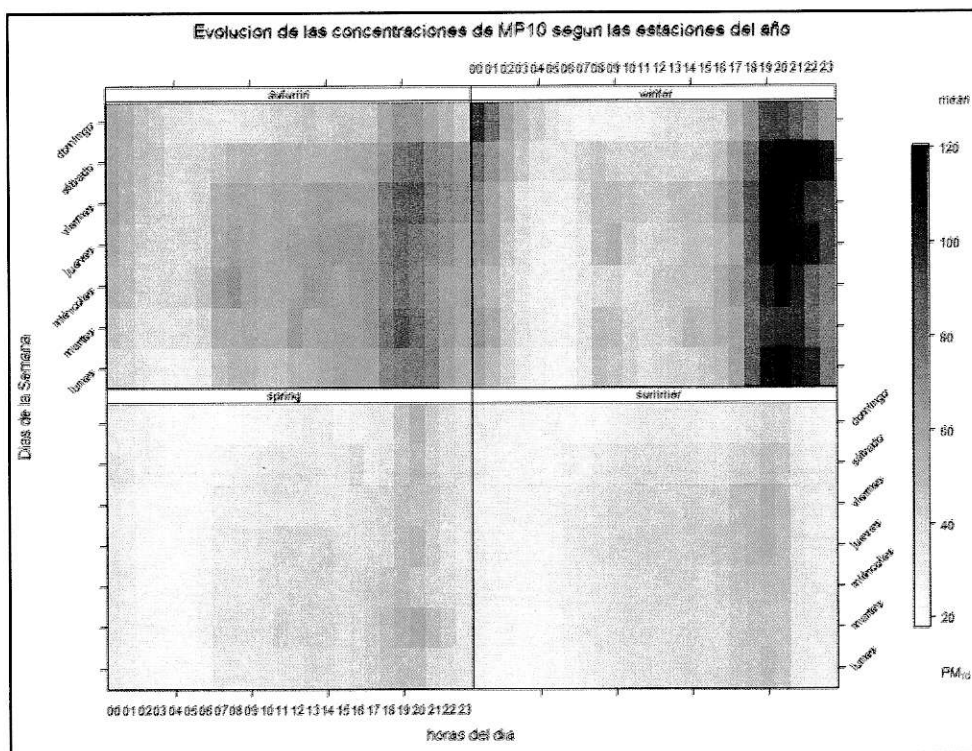
Además, se analizó el comportamiento que ha tenido MP10 como concentración anual (Figura 15).



**Figura 15.** Evolución de la concentración anual de MP10 en San Fernando, periodo 2007 – 2016. Línea roja indica la norma de calidad primaria para éste contaminante, 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . \*años 2010 y 2013 no tenían los datos suficientes.

Se puede ver en las Figuras 15 y 16 que del 2007 a abril del año 2016 se ha producido una disminución gradual del material particulado, en especial en las concentraciones anuales, en donde se aprecia que desde el año 2013 no se supera la norma primaria de calidad de aire.

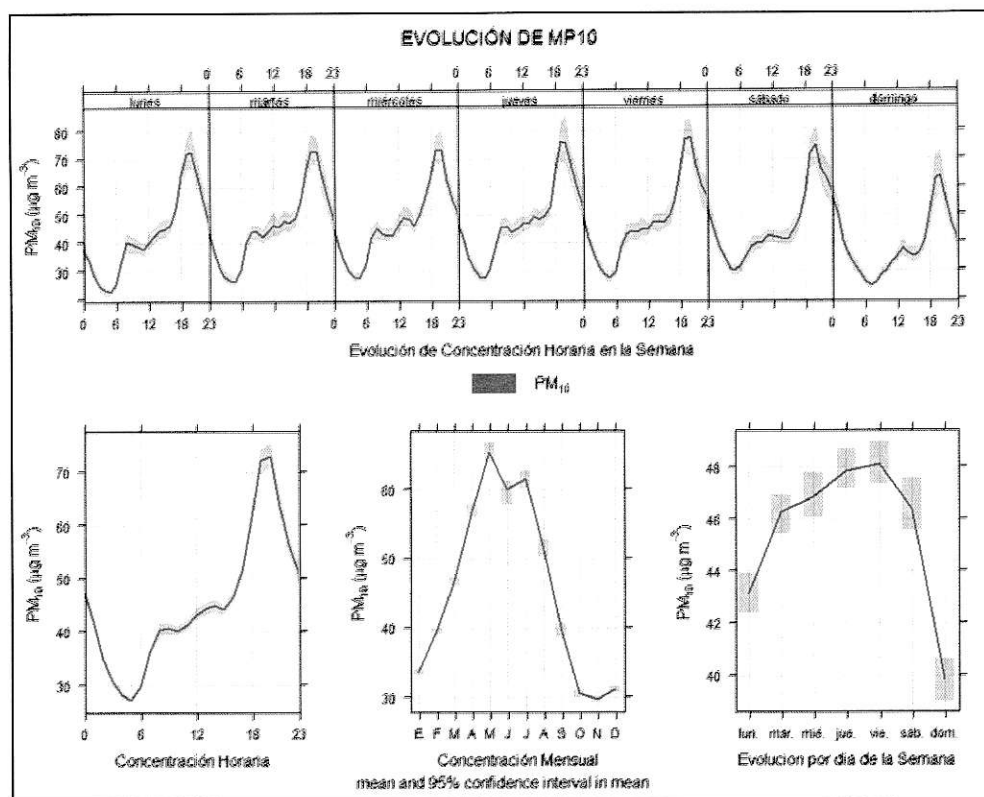
Al realizar un análisis más detallado del comportamiento del MP10 en la zona, la Figura 16 muestra el comportamiento estacional que este posee.



**Figura 16.** Comportamiento del Material Particulado según estación del año, día de la semana, y por hora.

Se aprecia en la Figura 16 que el máximo de concentración es alcanzado en la época más fría del año, específicamente en los meses de invierno, después de las 19 horas. Cerca de las 8 horas existe un leve incremento en la concentración de material particulado, lo cual puede atribuirse a un mayor tráfico vehicular (Centro Mario Molina, 2013). Por último, en los meses estivales una pequeña alza en la concentración puede atribuirse a la resuspensión de polvo.

Haciendo un análisis más detallado con respecto a los días de la semana, se presenta en la Figura 17.



**Figura 17.** Evolución de la concentración semanal de MP10.

Se observa en la Figura 17 un aumento de la concentración en las horas de la tarde, tal como se observó en la Figura 16. El máximo es alcanzado en los meses invernales, y se produce un descenso significativo el día domingo, debido a una menor actividad tanto vehicular como industrial.

Es importante conocer cuál es la evolución del MP10 en el tiempo, para así conocer cuál es el estado real de la calidad del aire en la zona, y si el PPDA ha sido efectivo en la disminución de éste contaminante. Con ello se puede establecer una línea base existente en la zona, y así conocer el impacto que pueda tener el establecimiento de una nueva actividad productiva que el mayor impacto que produce en cuanto a emisiones atmosféricas es el MP10.

Cabe aclarar que no se realizó una evaluación del MP2,5 ya que este parámetro se comenzó a registrar desde día 16 de marzo del presente año, por lo cual no hubiese resultado representativo haber evaluado su comportamiento y concentración.

### **3.2. Estimación de Emisiones de la planta de extracción de áridos producidas en la etapa de Construcción**

Para la estimación de emisiones atmosféricas de material particulado fugitivo producto de la construcción del proyecto, se identificaron las actividades a realizar en esta etapa para luego proceder a utilizar los factores de emisión correspondientes.

#### **3.2.1. Actividades**

- a) Escarpe: Tiene por objeto la preparación del terreno, realizando despeje de vegetación y capas de materia orgánica no utilizable como material de explotación (Industria de Áridos en Chile, tomo I, 2001). Se considerará para ésta actividad una superficie de 6,74 Ha, que corresponderá a la instalación de oficinas y maquinaria, como también a la preparación de caminos.
- b) Transferencia discreta de material: El volumen estimado de material es de 3,370 m<sup>3</sup>, y considerando una densidad de 1,8 Ton/m<sup>3</sup>, con lo cual el peso del material es de 6.066 Toneladas.
- c) Tránsito por caminos no pavimentados (Camiones): El proyecto tendrá 4 camiones tolva con una capacidad de 15 m<sup>3</sup>. Estos se desplazarán por un camino no pavimentado, el cual tiene una longitud máxima de 2 Km. Tal como se mencionó anteriormente, se necesita trasladar un total de 3.370 m<sup>3</sup> por lo que se requerirá un total de 225 viajes para poder retirarlos. Considerando una distancia conservadora de 4 Km (2 Km de ida y 2 Km de vuelta), recorrerán en total 900 Km.
- d) Tránsito por Caminos no Pavimentados (Camionetas): Se considerarán 2 viajes diarios para el traslado de los trabajadores, en 20 días, considerando una distancia conservadora de 4 Km (2 Km de ida y 2 Km de vuelta), recorrerán 160 Km.
- e) Combustión Camiones: Los camiones que estarán en el proyecto, son clasificados como camiones pesados diésel tipo 3, los cuales son de un año de fabricación posterior al año 2003, y poseen tecnología Euro III, tal como se identifica en el apartado de anexos de la guía de estimaciones atmosféricas para proyectos inmobiliarios R.M. Se establece que la velocidad máxima de

Se identifica que la actividad que produce mayor emisión de material particulado, es el tránsito por caminos no pavimentados de camiones, el cual produce el 77,82% del MP10 de la etapa de construcción, y un 60,78% del MP2,5.

### **3.3. Estimación de Emisiones producidas en la Fase de Operación**

#### **3.3.1. Actividades**

- a) Excavaciones: La excavación tiene como finalidad la extracción del material pétreo desde el lecho del río. Según la Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios R.M, para las excavaciones se considera un rendimiento de 30 m<sup>3</sup>/h para una excavadora con capacidad de palada de 1m<sup>3</sup>. Por lo tanto, para remover 108.000 m<sup>3</sup> de material, se utilizarán 3.600 horas al año.
- b) Transferencia discreta de material: Dado que se extraerán 108.000 m<sup>3</sup> al año de material de una densidad de 1,8 Ton/m<sup>3</sup>, el peso de éste será de 194.400 Toneladas al año.
- c) Tránsito por caminos no pavimentados (Camiones): Tal como se mencionó anteriormente en la fase de construcción, el proyecto tendrá 4 camiones tolva con 15 m<sup>3</sup> de capacidad, los cuales se desplazarán en un camino que tiene una longitud máxima de 2 km. Se necesitarán de 7.200 viajes para trasladar un total de 108.000 m<sup>3</sup>. Considerando un total de 4 km por cada viaje, se recorrerán 28.800 km al año.
- d) Tránsito por caminos no pavimentados (Camionetas): Se considerarán 2 viajes diarios para el traslado de los trabajadores, en 265 días considerados en un año de trabajo, con una distancia conservadora de 4 Km (2 Km de ida y 2 Km de vuelta), por lo cual se recorrerán 2.120 Km al año.
- e) Erosión de Material en Pila: Se estimó una superficie de acopio de 0,544 Ha, en donde los materiales ya procesados serán separados en diferentes pilas (5) de acopio, por granulometría, tal como se indica en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Tipo de material y Tamaño

| <b>Material</b> | <b>Tamaño</b> |
|-----------------|---------------|
| Áridos          | 0-8 mm        |
| Hormigón        | 8-20 mm       |
| Grueso          | 13-18 mm      |
| Intermedio      | 6-13 mm       |
| Fino            | 0-6 mm        |

- h) Combustión Camiones: Se establece que la velocidad máxima de desplazamiento es de 40 Km/h. En tanto que la velocidad del camión aljibe, será de 10 Km/h.
- f) Combustión Camionetas: Tendrán una velocidad máxima de 40 Km/h.
- g) Combustión Excavadora: Se consideró un tiempo de 12.120 horas de funcionamiento para el año.

### **3.3.2. Funcionamiento Planta Procesadora**

La operación de la planta de procesamiento se divide en 4 etapas fundamentales que son trituración, clasificación, lavado y operaciones auxiliares tales como alimentación, transporte y almacenamiento.

El proceso comienza con la descarga del material desde el camión tolva a un alimentador de placas o buzón, el cual elimina el material de sobre tamaño.

El material pasa a una cinta transportadora de alimentación llevándolo a un harnero vibratorio, sacando el material bajo las 4". El material que esta sobre este tamaño, pasa a un chancador de cono. De la segunda bandeja del harnero, el material se dirige a un segundo chancador, de manera de poder obtener un material de menor granulometría. El material que sale de ambos chancadores pasa a una cinta transportadora de retorno, donde vuelve a hacer ingreso al harnero vibratorio, para realizar el último proceso de chancado, para la separación del material más fino y pasar por todas las mallas respectivas para su clasificación, dependiendo de la abertura de éstas.

Para la estimación de emisiones de este proceso, se necesitó desglosar todos los equipos y procesos que integran la planta de procesamiento. Estos son descritos a continuación:

#### CHANCADO PRIMARIO

- Buzón Primario: Recepción de material integral y descarga directa al chancador primario
- Criba de selección: Clasifica ingreso a chancador primario
- Chancador Primario: Chancador primario para reducción de material integral
- Cinta 1: Correa transportadora desde Criba de selección a Harnero 1

#### CHANCADO SECUNDARIO

- Harnero 1: Clasifica material según tamaño a chancador secundario o Harnero 2
- Buzón Intermedio: Recepción de material desde Harnero 1 y envía a Cinta de Chancador de cono
- Cinta 2: Correa desde Buzón Intermedio a Chancador de cono
- Chancador de Cono: Chancador primario para reducción de material integral
- Cinta 3: Correa desde Chancador de cono a Harnero 3
- Harnero 2: Clasificación de material y sobrante pasa a etapa de chancado de impacto
- Cinta 7: Posterior al lavado se transporta a Stock Pile de Áridos (0-8 mm)
- Cinta 6: Posterior al lavado se transporta a Stock Pile de Hormigón (8-20 mm)
- Cinta 5: Transporta a Stock Pile 20-38 mm que va a Chancado de Impacto

#### CHANCADO TERCIARIO

- Cinta 8: Transporta material desde Alimentador 2 a Chancador de Impacto
- Chancador de Impacto: Alimenta desde el primer chancador al primer harnero terciario
- Cinta 9: Transporta el material chancado a Harnero 3
- Harnero 3: Clasifica Material fino (0-6 mm) intermedio (6-13 mm) y grueso (13-18 mm)



- Cinta 10: Correa de transporte de material fino a Stock Pile
- Cinta 11: Correa de transporte de material Intermedio a Stock Pile
- Cinta 12: Correa de transporte de material grueso a Stock Pile

Los resultados de la estimación de emisiones de MP10 y MP2,5 en la fase de operación se indican en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Emisión de MP10 y MP2,5 por actividad en la Fase de Operación

| Actividad   | Valor Factor de Emisión                           | Emisión MP10 (Ton/Año) | Emisión MP2,5 (Ton/Año) |
|---|---|------------------------|-------------------------|
| Excavaciones                                      | FE <sub>MP10</sub> =0,609 Kg/hora                 | 2,191                  | 0,307                   |
|   | FE <sub>MP2,5</sub> =0,085 Kg/hora                |                        |                         |
| Tránsito por Caminos No Pavimentados (Camiones)   | FE <sub>MP10</sub> =690,222 g/Km                  | 19,878                 | 1,99                    |
|   | FE <sub>MP2,5</sub> =69,022 g/Km                  |                        |                         |
| Tránsito por Caminos no Pavimentados (Camionetas) | FE <sub>MP10</sub> =154,616 g/Km                  | 0,164                  | 0,016                   |
|   | FE <sub>MP2,5</sub> =15,462 g/Km                  |                        |                         |
| Transferencia de Material, Carga de Camiones      | FE <sub>MP10</sub> =3,13·10 <sup>-4</sup> Kg/Ton  | 0,061                  | 0,009                   |
| Transferencia de Material, Descarga de Camiones   | FE <sub>MP2,5</sub> =4,73·10 <sup>-5</sup> Kg/Ton | 0,061                  | 0,009                   |
| Erosión de material en pila *                     | FE <sub>MP10</sub> =0,075 Kg/Ha                   | 0,0002                 | 0,00003                 |
|   | FE <sub>MP2,5</sub> = 0,011Kg/Ha                  |                        |                         |
| Combustión Camiones                               | FE <sub>MP10</sub> =0,181 gr/Km                   | 0,005                  | 0,0048                  |
|   | FE <sub>MP2,5</sub> = 0,167 gr/Km                 |                        |                         |
| Combustión Camionetas                             | FE <sub>MP10</sub> =0,0698 gr/Km                  | 0,000074               | 0,000068                |
|   | FE <sub>MP2,5</sub> =0,0642 gr/Km                 |                        |                         |
| Combustión Excavadora                             | FE <sub>MP10</sub> =140810 gr/Km                  | 0,141                  | 0,129                   |
|   | FE <sub>MP2,5</sub> =129545 gr/Km                 |                        |                         |
| Camión Aljbe                                      | FE <sub>MP10</sub> =0,554 gr/Km                   | 0,001                  | 0,001                   |
|   | FE <sub>MP2,5</sub> =0,509 gr/Km                  |                        |                         |

En cuanto al funcionamiento de la planta procesadora de áridos, los resultados se observan en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Emisión de MP10 y MP2,5 de la Planta Procesadora en la Fase de Operación

|                                | EQUIPOS            | FLUJO MASICO* (Ton/h)          | FACTOR DE EMISION                          | Emisión MP10 (Ton/Año) | Emisión MP2,5 (Ton/Año) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--|------------------------|-------------------------|
| CHANCADO PRIMARIO              | BUZON PRIMARIO     | 240                            | $FE_{MP10} = 5,64868 \cdot 10^{-5}$ Kg/Ton | 0,11876                | 0,04288                 |
|                                |                    |                                | $FE_{MP2,5} = 2,0398 \cdot 10^{-5}$ Kg/Ton |                        |                         |
|                                | CRIBA DE SELECCIÓN | 240                            | $FE_{MP10} = 0,00037$ Kg/Ton               | 0,77789                | 0,05256                 |
|                                |                    |                                | $FE_{MP2,5} = 0,000025$ Kg/Ton             |                        |                         |
|                                | CHANCADOR PRIMARIO | 168                            | $FE_{MP10} = 0,00027$ Kg/Ton               | 0,39735                | 0,07358                 |
| $FE_{MP2,5} = 0,00005$ Kg/Ton  |                    |                                |  |                        |                         |
| CINTA 1                        | 252,8              | $FE_{MP10} = 0,000023$ Kg/Ton  | 0,05093                                    | 0,01439                |                         |
|                                |                    | $FE_{MP2,5} = 0,000007$ Kg/Ton |  |                        |                         |
| CHANCADO SECUNDARIO            | HARNERO 1          | 240                            | $FE_{MP10} = 0,00037$ Kg/Ton               | 0,77789                | 0,05256                 |
|                                |                    |                                | $FE_{MP2,5} = 0,000025$ Kg/Ton             |                        |                         |
|                                | BUZON INTERMEDIO   | 194,4                          | $FE_{MP10} = 5,64868E-05$ Kg/Ton           | 0,09619                | 0,03474                 |
|                                |                    |                                | $FE_{MP2,5} = 2,0398E-05$ Kg/Ton           |                        |                         |
|                                | CINTA 2            | 194,4                          | $FE_{MP10} = 0,000023$ Kg/Ton              | 0,03917                | 0,01107                 |
|                                |                    |                                | $FE_{MP2,5} = 0,000007$ Kg/Ton             |                        |                         |
|                                | CHANCADOR DE CONO  | 194,4                          | $FE_{MP10} = 0,00027$ Kg/Ton               | 0,45979                | 0,08515                 |
|                                |                    |                                | $FE_{MP2,5} = 0,00005$ Kg/Ton              |                        |                         |
|                                | CINTA 3            | 194,4                          | $FE_{MP10} = 0,000023$                     | 0,03917                | 0,01107                 |
|                                |                    |                                | $FE_{MP2,5} = 0,000007$ Kg/Ton             |                        |                         |
|                                | HARNERO 2          | 252,8                          | $FE_{MP10} = 0,00037$ Kg/Ton               | 0,81938                | 0,05536                 |
|                                |                    |                                | $FE_{MP2,5} = 0,000025$ Kg/Ton             |                        |                         |
|                                | CINTA 7            | 73,3                           | $FE_{MP10} = 0,000023$ Kg/Ton              | 0,01477                | 0,00417                 |
| $FE_{MP2,5} = 0,000007$ Kg/Ton |                    |                                |  |                        |                         |
| CINTA 6                        | 86                 | $FE_{MP10} = 0,000023$ Kg/Ton  | 0,01733                                    | 0,00490                |                         |
|                                |                    | $FE_{MP2,5} = 0,000007$ Kg/Ton |  |                        |                         |

|                   | EQUIPOS              | FLUJO MASICO* (Ton/h)                | FACTOR DE EMISION                    | Emisión MP10 (Ton/Año) | Emisión MP2,5 (Ton/Año) |
|-------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| CHANCADO TERCARIO | CINTA 5              | 93,5                                 | FE <sub>MP10</sub> =0,000023 Kg/Ton  | 0,01884                | 0,00532                 |
|                   |                      |                                      | FE <sub>MP2,5</sub> =0,000065 Kg/Ton |                        |                         |
|                   | CINTA 8              | 93,5                                 | FE <sub>MP10</sub> =0,000023 Kg/Ton  | 0,018838               | 0,005324                |
|                   |                      |                                      | FE <sub>MP2,5</sub> =0,000065 Kg/Ton |                        |                         |
|                   | CHANCADOR DE IMPACTO | 93,5                                 | FE <sub>MP10</sub> =0,00027 Kg/Ton   | 0,221146               | 0,040953                |
|                   |                      |                                      | FE <sub>MP2,5</sub> =0,00005 Kg/Ton  |                        |                         |
|                   | CINTA 9              | 93,5                                 | FE <sub>MP10</sub> =0,000023 Kg/Ton  | 0,018838               | 0,005324                |
|                   |                      |                                      | FE <sub>MP2,5</sub> =0,000065 Kg/Ton |                        |                         |
|                   | HARNERO 3            | 93,5                                 | FE <sub>MP10</sub> =0,00037 Kg/Ton   | 0,303052               | 0,020477                |
|                   |                      |                                      | FE <sub>MP2,5</sub> =0,000025 Kg/Ton |                        |                         |
|                   | CINTA 10             | 15,9                                 | FE <sub>MP10</sub> =0,000023 Kg/Ton  | 0,003204               | 0,000905                |
|                   |                      |                                      | FE <sub>MP2,5</sub> =0,000065 Kg/Ton |                        |                         |
|                   | CINTA 11             | 11,2                                 | FE <sub>MP10</sub> =0,000023 Kg/Ton  | 0,002257               | 0,000638                |
|                   |                      |                                      | FE <sub>MP2,5</sub> =0,000065 Kg/Ton |                        |                         |
| CINTA 12          | 7,5                  | FE <sub>MP10</sub> =0,000023 Kg/Ton  | 0,001511                             | 0,000427               |                         |
|                   |                      | FE <sub>MP2,5</sub> =0,000065 Kg/Ton |                                      |                        |                         |

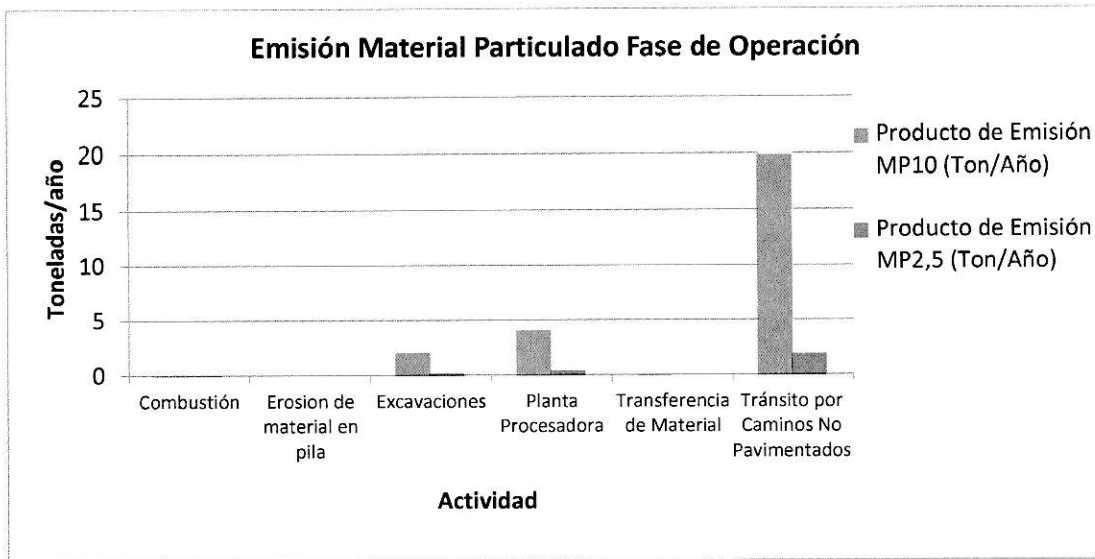
\*El valor de Flujo másico fue entregado por el titular del proyecto.

En la Tabla 17 se observa la emisión total de la planta procesadora de áridos:

**Tabla 17.** Emisión Total de MP10 y MP2,5 de la Planta Procesadora de Áridos

|   | MP10 (ton/año) | MP2,5 (ton/año) |
|---|----------------|-----------------|
| <b>EMISION TOTAL PLANTA PROCESADORA DE ARIDOS</b> | 4,196          | 0,618           |

En la Figura 19, se resumen los resultados obtenidos.



**Figura 19.** Emisión de Material particulado por actividad, fase de operación

En la Tabla 18, se observa el porcentaje de material particulado emitido, con respecto al total, por actividad en la fase de operación.

**Tabla 18.** Porcentaje de emisión de las actividades realizadas en la Fase de Operación

|  | MP10 (%) | MP2,5 (%) |
|--|----------|-----------|
| <b>Excavaciones</b>                                      | 8,21     | 9,95      |
| <b>Tránsito por Caminos No Pavimentados (Camiones)</b>   | 74,46    | 64,53     |
| <b>Tránsito por Caminos no Pavimentados (Camionetas)</b> | 0,61     | 0,52      |
| <b>Transferencia de Material</b>                         | 0,46     | 0,58      |
| <b>Erosión de material en pila</b>                       | 0,001    | 0,001     |
| <b>Combustión</b>  | 0,551    | 4,37      |
| <b>Planta Procesadora</b>                                | 15,72    | 20,04     |

La emisión total de MP10 y MP2,5 en la Fase de Operación es la que se indica en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Operación.

|                                       | Emisión (Ton/año) |
|---------------------------------------|-------------------|
| <b>Total, MP10 Fase Construcción</b>  | 26,698            |
| <b>Total, MP2,5 Fase Construcción</b> | 3,084             |

Se identifica que el tránsito por caminos no pavimentados, tanto para MP10 como MP2,5 es la actividad generadora más importante de material particulado, esto es debido al polvo en suspensión que genera el paso de los camiones. En tanto que la planta procesadora posee una emisión bastante importante de material particulado de ambos tamaños, siendo de un 15,72% y 20,04% de MP10 y MP2,5 respectivamente. Por lo tanto, es importante la identificación de las actividades que generan más emisiones con el fin de enfocar los esfuerzos en poder mitigarlas.

### **3.4. Estimación de Emisiones producidas en la etapa de Cierre y/o Abandono**

En la etapa de cierre, las actividades a realizar serán principalmente el desmontaje de instalaciones, nivelación de terrenos y preparación de los terrenos para favorecer la vegetación.

#### **3.4.1. Actividades Fase de Cierre**

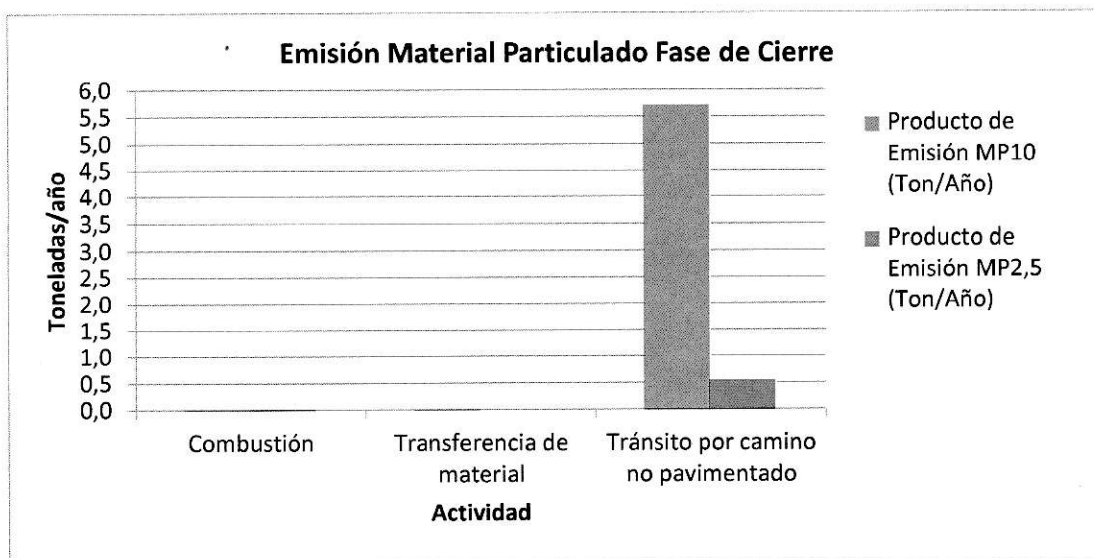
- a) Transferencia discreta de material: Se dispondrán de aproximadamente 30.845 m<sup>3</sup> de material de una densidad de 1,8 Ton/m<sup>3</sup>, equivalente a 55.521 Toneladas de material para la nivelación y preparación de terrenos.
- b) Tránsito por caminos no pavimentados (Camiones): Se necesitarán de 2.056 viajes para trasladar un total de 30.845 m<sup>3</sup>. Considerando un total de 4 km por cada viaje, recorrerán 8.224 km en los dos meses de duración de esta fase.
- c) Tránsito por caminos no pavimentados (Camionetas): Se considerarán 2 viajes diarios para el traslado de los trabajadores, en 40 días, con una distancia conservadora de 4 Km (2 Km de ida y 2 Km de vuelta), recorriendo 480 Km en 2 meses.
- d) Combustión Camiones: Tal como se mencionó en las fases de construcción y operación, la velocidad máxima será de 40 Km/h. En tanto que el camión aljibe, su velocidad de máxima será de 10 Km/h.
- e) Combustión Camionetas: Tendrán una velocidad máxima de 40 Km/h.
- f) Combustión Excavadora: se consideró un tiempo de 480 horas de funcionamiento para ésta fase.

La estimación de emisiones en la fase de cierre y/o abandono, se indican en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Emisión de MP10 y MP2,5 por actividad en la Fase de Cierre

| ACTIVIDAD                                      | FACTOR DE EMISION                                | Emisión MP10 (Ton/Año) | Emisión MP2,5 (Ton/Año) |
|--|--|------------------------|-------------------------|
| Tránsito por camino no pavimentado (camiones)  | $FE_{MP10} = 690,222 \text{ g/Km}$               | 5,676                  | 0,568                   |
|  | $FE_{MP2,5} = 69,022 \text{ g/Km}$               |                        |                         |
| Tránsito por camino no pavimentado (camioneta) | $FE_{MP10} = 154,616 \text{ g/Km}$               | 0,0742                 | 0,0074                  |
|  | $FE_{MP2,5} = 15,462 \text{ g/Km}$               |                        |                         |
| Transferencia de material, carga de camiones   | $FE_{MP10} = 3,13 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/Ton}$  | 0,017                  | 0,0026                  |
|  | $FE_{MP2,5} = 4,73 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/Ton}$ |                        |                         |
| Transferencia de material, volteo de camiones  | $FE_{MP10} = 3,13 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/Ton}$  | 0,017                  | 0,0026                  |
|  | $FE_{MP2,5} = 4,73 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/Ton}$ |                        |                         |
| Combustión Camiones                            | $FE_{MP10} = 0,181 \text{ gr/Km}$                | 0,005                  | 0,0048                  |
|  | $FE_{MP2,5} = 0,167 \text{ gr/Km}$               |                        |                         |
| Combustión Camionetas                          | $FE_{MP10} = 0,070 \text{ gr/Km}$                | 0,000022               | 0,000021                |
|  | $FE_{MP2,5} = 0,064 \text{ gr/Km}$               |                        |                         |
| Combustión Excavadora                          | $FE_{MP10} = 31.882 \text{ gr/Km}$               | 0,032                  | 0,029                   |
|  | $FE_{MP2,5} = 29.331 \text{ gr/Km}$              |                        |                         |
| Camión Aljibe                                  | $FE_{MP10} = 0,554 \text{ gr/Km}$                | 0,000089               | 0,000082                |
|  | $FE_{MP2,5} = 0,510 \text{ gr/Km}$               |                        |                         |

En la Figura 20, se resumen los resultados obtenidos.



**Figura 20.** Emisión de Material particulado por actividad, fase de cierre

En la Tabla 21, se observa el porcentaje de material particulado emitido, con respecto al total, por actividad en la fase de cierre.

**Tabla 21.** Porcentaje de emisión de las actividades realizadas en la Fase de Cierre

|  | MP10 (%) | MP2,5 (%) |
|--|----------|-----------|
| Tránsito por camino no pavimentado (camiones)  | 97,51    | 92,36     |
| Tránsito por camino no pavimentado (camioneta) | 1,27     | 1,20      |
| Transferencia de material, carga de camiones   | 0,29     | 0,42      |
| Transferencia de material, volteo de camiones  | 0,29     | 0,42      |
| Combustión                                     | 0,64     | 5,51      |

La emisión total de material particulado en la fase de cierre y/o abandono se indica en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Cierre.

|       | Emisión MP10 (Ton/Año) | Emisión MP2,5 (Ton/Año) |
|-------|------------------------|-------------------------|
| Total | 5,821                  | 0,615                   |

Tal como se pudo observar en las fases de construcción y operación, la mayor parte de emisión de material particulado es producto de la circulación de vehículos por

caminos no pavimentados, por lo cual es factible decir que es actividad más crítica del proyecto, por lo cual se hace necesario poner énfasis en ella, gestionándola de mejor manera con el objeto de reducir su impacto al mínimo.

### 3.5. Emisiones Totales del Proyecto

Realizada la estimación de emisiones de material particulado generado por el proyecto en cada una de sus fases, el resumen de las emisiones es el siguiente (Tabla 23):

**Tabla 23.** Emisiones Totales de MP10 y MP2,5

| ETAPA        | Emisión MP10 (Ton/Año) | Emisión MP2,5 (Ton/Año) |
|--------------|------------------------|-------------------------|
| CONSTRUCCION | 0,787                  | 0,093                   |
| OPERACIÓN    | 26,560                 | 2,956                   |
| CIERRE       | 5,785                  | 0,580                   |
| TOTAL        | 33,133                 | 3,629                   |

A partir de la estimación de emisiones atmosféricas generadas durante las etapas de construcción, operación y cierre y/o abandono del proyecto se puede concluir que el MP10 es el contaminante que se emite en mayores cantidades, y los valores máximos de emisión se ven en la etapa de operación debido al aumento de material extraído y procesado para la producción de áridos en trabajo continuo y en periodo de trabajo más extendido que en las otras fases. En esta etapa, el material particulado, se ve incrementado por la emisión directa emitida en el proceso de circulación por caminos no pavimentados de camiones, junto con el funcionamiento de la planta procesadora de áridos, y en un tercer lugar por la excavación que se realiza para la obtención del material. Cabe indicar que el proyecto no tendrá emisiones indirectas, debido a que todos los procesos se desarrollan dentro del predio. En cuanto al MP2,5 las mayores emisiones se producen, al igual que el MP10, en la circulación por caminos no pavimentados de los camiones, junto a la combustión de la maquinaria como es en el caso de la excavadora.



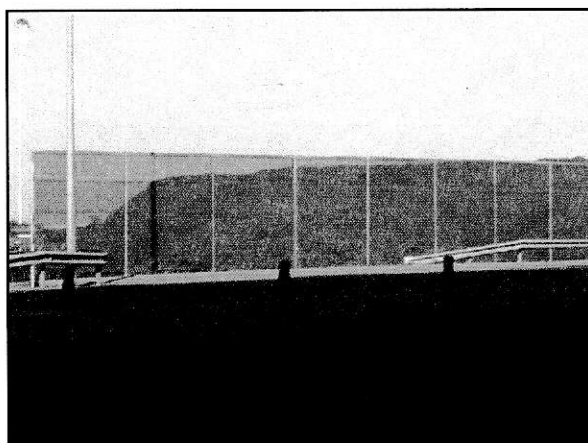
### 3.6. Medidas de Mitigación propuestas

Al tener la estimación de emisiones de cada una de las fases del proyecto, se pudo identificar cuáles eran las actividades que mayor emisión de MP10 y MP2,5 generaban. Con ello, se puede realizar una mejor gestión en ellas, incorporando medidas de mitigación pertinentes, con el fin de reducir al máximo sus emisiones.

#### 3.6.1. Medidas de Mitigación Fase de Construcción

Las medidas de mitigación propuestas para esta fase, son las siguientes:

Malla Rashel: La Malla Rashel es un tejido confeccionado a partir de HDPE (polietileno de alta densidad) el cual tiene por objetivo evitar la dispersión de material particulado (emisiones fugitivas de polvo). Se recomienda un cierre perimetral, con una altura aproximada de 2,5 metros (Figura 21).

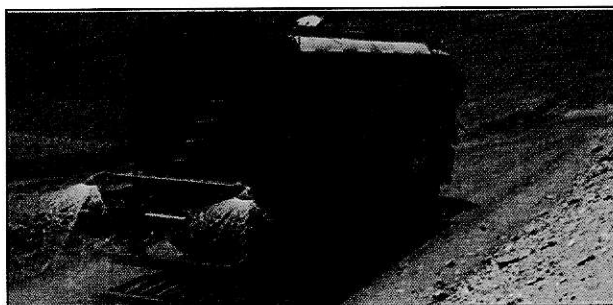


**Figura 21.** Malla Rashel

La efectividad de la malla, depende de si está ubicada antes o después de que el viento pase por el punto de emisión. Se considerará una eficiencia de aproximadamente un 52%, según diferentes estudios realizados en Chile (Tecnologías de Abatimiento, Corfo 2001) y España (Guía para la prevención de emisiones difusas de partículas, Gobierno Vasco 2012). Estas pantallas o mallas protectoras son efectivas si su altura sobrepasa entre 0,6 y 1,2 metros la altura del acopio, y localizadas 3 a 5 veces la altura de la pantalla en contra del sentido del viento (Tecnologías de abatimiento, Corfo 2001).

Humectación de Caminos: Consiste en el paso de un camión aljibe por el camino no pavimentado que posee el proyecto, el cual cuenta con un sistema de pulverización de

agua, logrando la humectación del camino y controlando así la dispersión del material particulado. Según la Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios de la Región Metropolitana, se considera una mitigación máxima de un 75%. El costo económico que tiene ésta medida es de \$2.000 pesos por kilómetro (Dirección de Vialidad, MOP 2006). Siendo 4 kilómetros los que se necesitan Humectar (ida y vuelta), el coste sería de \$8.000 pesos diarios. (precio considerando la propiedad del camión aljibe de parte del titular del proyecto).



**Figura 22.** Camión Aljibe

Estabilización de Camino con Bischofita: La Bischofita ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) es una sal de magnesio que tiene diversas propiedades físicas que permiten su uso potencial como estabilizador químico de caminos no pavimentados, dentro de las cuales, la más importante es la deliquesencia, la cual es la capacidad de absorber la humedad del aire y disolverse en esta humedad para formar una solución líquida (Thenoux, Guillermo; Vera, Sergio 2002). Según estudios realizados por el MOP (Ministerio de Obras Publicas), la efectividad de la aplicación de bischofita es de un 85%. El Costo económico que tiene la aplicación de ésta medida, es de \$1.750.000 pesos por kilómetro (Dirección de Vialidad, MOP 2006). Como se mencionó anteriormente, al ser 2 kilómetros los necesarios a estabilizar, el coste sería de \$3.500.000 de pesos como inversión inicial. Esta medida tiene una duración de largo plazo, debido a la estabilidad del producto, por lo que ésta sería la inversión inicial.

Se usará diferentes combinaciones para mitigar, tal como lo indica la Tabla 24.

**Tabla 24.** Propuestas de Mitigación Para la fase de Construcción

| <b>Tipo de Mitigación</b> | <b>Medidas</b>             |
|---------------------------|----------------------------|
| Mitigación 1              | Malla Rashel + Humectación |
| Mitigación 2              | Malla Rashel + Bischofita  |

Al aplicar las diferentes propuestas de mitigación, los resultados son los siguientes (Tabla 25).

**Tabla 25.** Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Construcción

|   | <b>Sin Mitigación<br/>(Ton/año)</b> | <b>Con Mitigación 1<br/>(Ton/año)</b> | <b>Con Mitigación 2<br/>(Ton/año)</b> |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Total, MP10 Fase<br/>Construcción</b>  | 0,798                               | 0,242                                 | 0,178                                 |
| <b>Total, MP2,5 Fase<br/>Construcción</b> | 0,102                               | 0,040                                 | 0,034                                 |

Con los datos obtenidos en la Tabla 25, se observa que aplicando Mitigación 1, las emisiones de MP10 se ven reducidas en un 69,7% en comparación a las emisiones sin mitigar. Mientras que, si se aplica la Mitigación 2, las emisiones alcanzan una reducción de un 77,7%. Asimismo, analizando los resultados de MP2,5, el porcentaje de reducción con respecto a la emisión sin mitigación, corresponde a un 60,8% para la Mitigación 1, y un 66,7% para la Mitigación 2. Estos resultados son esperables, debido a que la aplicación como estabilizador de caminos no pavimentados como la bischofita, tiene un porcentaje de mitigación mucho mayor que la humectación de caminos.

### **3.6.2. Medidas de Mitigación Propuestas Para Fase de Operación**

Las medidas de mitigación que se proponen para esta fase, son las siguientes:

#### Humectación de Caminos:

Para saber cuántas veces es necesario que el camión aljibe pase por el camino no pavimentado para alcanzar un 75% de mitigación, se realizó el cálculo según los parámetros de la Tabla 26.

**Tabla 26.** Parámetros para el Cálculo de Humectación de Caminos

| Profundidad a Humectar | Humedad inicial del suelo | Incremento en la Humedad | Longitud del camino | Ancho del camino | Volumen del camino | Capacidad del Camión Aljibe |
|------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|------------------|--------------------|-----------------------------|
| 0,025 metros*          | 6.5%                      | 100%**                   | 4.000 metros        | 3 metros         | 300 m <sup>3</sup> | 10 m <sup>3</sup>           |

\*: Establecido en el AP-42.

\*\*.: Valor necesario para lograr un 75% de abatimiento.

El procedimiento para calcular cuánta agua es necesario adicionar para lograr duplicar el contenido original de humedad, es el establecido en el AP-42 de US-EPA, el cual es el que se describe a continuación:

$$\text{Volumen inicial de agua en el suelo} = \text{Humedad Inicial} \cdot \text{Volumen Camino}$$

Ésta, da como resultado 19,5 m<sup>3</sup> de volumen inicial de agua en el suelo.

Se necesita alcanzar un aumento del 100% en la humedad, para lograr el objetivo de un 75% de abatimiento. Para ello el volumen de agua a añadir, debe ser igual al volumen de agua inicial en el suelo. Por lo tanto, los viajes necesarios del camión aljibe para lograr éste volumen, debe ser:

$$\begin{aligned} \text{Nº Viajes Camión Aljibe} &= \text{Volumen diario de Agua a añadir} \div \text{Capacidad del Camion} \\ &= 19,5 \text{ m}^3/\text{día} \div 10 \text{ m}^3/\text{camión} \\ &= 1,95 \text{ Viajes/día} \approx 2 \text{ Viajes al día} \end{aligned}$$

Se mantendrá un registro en terreno de la frecuencia del camión aljibe para la verificación de la medida por parte de la autoridad durante la etapa de operación.

Estabilización de Camino con Bischofita: La aplicación de Bischofita tiene una efectividad de un 85% de mitigación.

Encapsulamiento: Consiste en encapsular los equipos que son parte de la planta procesadora de áridos para así evitar la dispersión de material particulado fugitivo. Esta medida tiene un valor de mitigación de un 70% (Guía para la prevención de emisiones difusas de partículas, Gobierno Vasco 2012).

Sistemas de Riego: Consiste en la aplicación de aspersores sobre la pila de almacenamiento de áridos, los cuales rociarán agua de forma constante, con el fin de

que permanezca húmeda. Esta medida tiene un valor de mitigación del 70% (Guía para la prevención de emisiones difusas de partículas, Gobierno Vasco 2012).

Tal como se propuso en la fase de construcción, se usará diferentes combinaciones para mitigar, tal como lo indica la Tabla 27.

**Tabla 27.** Propuestas de Mitigación Para la fase de Operación

| Tipo de Mitigación | Medidas  |
|--------------------|--|
| Mitigación 1       | Sistema de Riego+ Humectación+ Encapsulamiento |
| Mitigación 2       | Sistema de Riego+ Bischofita+ Encapsulamiento  |

Al aplicar las diferentes propuestas de mitigación, los resultados son los siguientes (Tabla 28).

**Tabla 28.** Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Operación

|                                    | Sin Mitigación<br>(Ton/año) | Con Mitigación 1<br>(Ton/año) | Con Mitigación 2<br>(Ton/año) |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>Total, MP10 Fase Operación</b>  | 26,698                      | 8,729                         | 6,604                         |
| <b>Total, MP2,5 Fase Operación</b> | 3,084                       | 1,146                         | 0,946                         |

Con los datos obtenidos, se puede observar que aplicando la Mitigación 1, las emisiones de MP10 se ven reducidas en un 61,2% en comparación a las emisiones sin mitigar. Mientras que, si se aplica la Mitigación 2, las emisiones alcanzan una reducción de un 70,7%. Asimismo, analizando los resultados de MP2,5, el porcentaje de reducción con respecto a la emisión sin mitigación, corresponde a un 53,5% para la Mitigación 1, y un 61,6% para la Mitigación 2.

### 3.6.3. Medidas de Mitigación propuestas para la Fase de Cierre

Humectación de Caminos: Tal como se mencionó en las fases anteriores, se considera una mitigación máxima de un 75%.

Estabilización de Camino con Bischofita: La aplicación de Bischofita tiene una efectividad de un 85% de mitigación.

En este caso, se usarán las dos medidas de mitigación de forma independiente, tal como lo indica la Tabla 29.

**Tabla 29.** Propuestas de Mitigación Para la Fase de Cierre

| Tipo de Mitigación | Medidas     |
|--------------------|-------------|
| Mitigación 1       | Humectación |
| Mitigación 2       | Bischofita  |

Al aplicar las diferentes propuestas de mitigación, los resultados son los siguientes (Tabla 30).

**Tabla 30.** Emisión Total de MP10 y MP2,5 Fase de Cierre.

|              | Emisión<br>MP10<br>(Ton/Año) | Emisión<br>MP2,5<br>(Ton/Año) | Mitigación<br>1 MP10<br>(Ton/Año) | Mitigación<br>1 MP2,5<br>(Ton/Año) | Mitigación<br>2 MP10<br>(Ton/Año) | Mitigación<br>2 MP2,5<br>(Ton/Año) |
|--------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| <b>Total</b> | 5,821                        | 0,615                         | 1,509                             | 0,183                              | 0,933                             | 0,125                              |

Según los datos de la Tabla 30, la Mitigación 2 reduce las emisiones a un 25,83% y 29,77% del total de MP10 y MP2,5 respectivamente, mientras que la estabilización con bischofita es aún más eficiente, llegando a un 16,03% y 20,34% del total de MP10 y MP2,5 respectivamente.

Por lo tanto, las emisiones totales del proyecto son los siguientes (Tabla 31).

**Tabla 31.** Emisión Total de MP10 y MP2,5

| ETAPA               | Emisión<br>MP10<br>(Ton/Año) | Emisión<br>MP2,5<br>(Ton/Año) | Mitigación<br>1 MP10<br>(Ton/Año) | Mitigación<br>1 MP2,5<br>(Ton/Año) | Mitigación<br>2 MP10<br>(Ton/Año) | Mitigación<br>2 MP2,5<br>(Ton/Año) |
|---------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| <b>CONSTRUCCION</b> | 0,787                        | 0,093                         | 0,302                             | 0,044                              | 0,1103                            | 0,0122                             |
| <b>OPERACIÓN</b>    | 26,560                       | 2,956                         | 8,591                             | 1,020                              | 6,587                             | 0,820                              |
| <b>CIERRE</b>       | 5,785                        | 0,580                         | 1,472                             | 0,149                              | 0,897                             | 0,092                              |
| <b>TOTAL</b>        | 33,133                       | 3,629                         | 10,366                            | 1,213                              | 7,595                             | 0,923                              |

### 3.7. Compensación de Emisiones

Identificada la fase que produce mayor emisión, la cual es la de operación, y teniendo en cuenta que la zona (Valle central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins), fue declarada por material particulado MP10 como concentración anual y de 24h (D.S. 7/2009, Ministerio Secretaría General de la Presidencia), como también existe un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica, el D.S. 15/2013, elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente, indica en el Capítulo VI, artículo 33, inciso a), "Aquellos proyectos o actividades nuevas y sus modificaciones, en cualquiera de sus etapas, que tengan asociadas una emisión total anual que implique un aumento sobre la situación base, superior a los valores que se presentan en la siguiente tabla, deberán compensar sus emisiones en un 120%."

**Tabla 32.** Emisión Máxima de Contaminantes Establecida por PPDA VI Región

| Contaminante    | Emisión Máxima Ton/año |
|-----------------|------------------------|
| MP10            | 5                      |
| SO <sub>x</sub> | 30                     |
| NO <sub>x</sub> | 15                     |

Fuente: D.S. 7/2009, Ministerio Secretaría General de la Presidencia

Evaluando las emisiones de las diferentes fases del proyecto, es en la fase de operación en donde se sobrepasa el límite máximo de 5 Ton/año, aun cuando se apliquen las medidas de mitigación propuestas anteriormente. Debido a esto, es necesario realizar un plan de compensación de emisiones, compensando las emisiones generadas por el proyecto en la fase de operación en un 120%, tal como se observa en la Tabla 33.

**Tabla 33.** Emisiones a Compensar de MP10

| Sin Mitigación | Compensación 120% | Mitigación 1 | Compensación 120% | Mitigación 2 | Compensación 120% |
|----------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
| 26,560         | 31,872            | 8,591        | 10,309            | 6,587        | 7,904             |

### 3.8. Modelación

Se realizará la modelación de las emisiones de MP10 y MP2,5 en las 3 fases del proyecto, construcción, operación y cierre, considerando los 3 casos anteriormente planteados, emisión sin mitigación, emisión con Mitigación 1, y emisión con Mitigación 2, con el objeto de conocer la concentración que emitirá el proyecto en sus distintas fases, y con ello comparar los resultados con las normas primarias vigentes en Chile.

#### 3.8.1. Datos de entrada al Modelo

Los resultados obtenidos en la Tabla 31, se debieron convertir a  $\text{g}/\text{m}^2$  (Tabla 34), que es la unidad que requiere como dato de entrada el programa.

**Tabla 34.** Concentraciones de MP10 y MP2,5 en  $\text{g}/\text{s}/\text{m}^2$

| ETAPA        | CONTAMINANTE | SIN MITIGACIÓN ( $\text{g}/\text{s}/\text{m}^2$ ) | MITIGACIÓN 1 ( $\text{g}/\text{s}/\text{m}^2$ ) | MITIGACIÓN 2 ( $\text{g}/\text{s}/\text{m}^2$ ) |
|--------------|--------------|---|---|---|
| CONSTRUCCIÓN | MP10         | $3,701 \cdot 10^{-7}$                             | $1,423 \cdot 10^{-7}$                           | $5,188 \cdot 10^{-8}$                           |
|              | MP2,5        | $4,356 \cdot 10^{-8}$                             | $2,077 \cdot 10^{-8}$                           | $5,731 \cdot 10^{-9}$                           |
| OPERACIÓN    | MP10         | $1,695 \cdot 10^{-6}$                             | $5,481 \cdot 10^{-7}$                           | $4,203 \cdot 10^{-7}$                           |
|              | MP2,5        | $1,886 \cdot 10^{-7}$                             | $6,508 \cdot 10^{-8}$                           | $5,230 \cdot 10^{-8}$                           |
| CIERRE       | MP10         | $3,691 \cdot 10^{-7}$                             | $9,394 \cdot 10^{-8}$                           | $5,725 \cdot 10^{-8}$                           |
|              | MP2,5        | $3,702 \cdot 10^{-8}$                             | $9,508 \cdot 10^{-9}$                           | $5,839 \cdot 10^{-9}$                           |

La modelación de la dispersión de las emisiones de material particulado fue considerada como fuente de área, y se realizó estableciendo como datos de entrada las siguientes opciones que entrega SCREEN VIEW™ (Tabla 35).



**Tabla 35.** Datos de Entrada de SCREEN VIEW™

| Opciones de Entrada    | Datos de Entrada | Unidad |
|------------------------|------------------|--------|
| Tipo de Fuente         | Área             | -      |
| Altura de Liberación   | 1,5              | m      |
| Longitud de Lado Largo | 2.000            | m      |
| Longitud de Lado Corto | 200              | m      |
| Altura de Receptor     | 2                | m      |
| Opción urbana/rural    | Rural            | -      |
| Altura Anemométrica    | 10               | m      |
| Distancia Mínima       | 10               | m      |
| Distancia Máxima       | 5.000            | m      |

En tanto que la altura de mezcla, clase de estabilidad y velocidad eólica, variarán según el tipo de estabilidad que se le asigne como datos meteorológicos al modelo, los cuales serán especificados en los apartados posteriores. Además se realizó un análisis según las diferentes direcciones del viento que se presentan en la zona, por lo cual también se ingresaran datos de la dirección del viento en el modelo.

### **3.8.2. Datos Meteorológicos**

Dada la capacidad que tiene la atmósfera para dispersar compuestos que ingresan a ella, es que las condiciones meteorológicas cumplen un rol relevante en los modelos de dispersión influyendo en el comportamiento y tiempo de permanencia de estos contaminantes en la atmósfera. Dentro de las variables meteorológicas, la dirección y velocidad del viento son parámetros de importancia en la evaluación de dispersión, debido a que la dirección del viento indica el sentido en el cual se dirige la pluma dispersada y la velocidad influye en la cantidad de material dispersado, ya que mientras más altas sean las velocidades, mayor será el transporte y alcanzará una mayor distancia en su dispersión (Kesarkar et al., 2007).

Los datos meteorológicos se obtuvieron de la Estación de Monitoreo de San Fernando, la cual está distante unos 4 Km aproximadamente. Para efectos de la realización de la modelación, se analizaron los siguientes parámetros: Velocidad del

Viento (m/s), Dirección del Viento (grados), y Radiación Global ( $W/m^2$ ). De estos, se analizaron los datos de 3 años, desde abril del año 2013 hasta abril del año 2015. Se realizó un estudio estacional de los datos, verano (diciembre, enero, febrero), otoño (marzo, abril, mayo), invierno (junio, julio, agosto) y primavera (septiembre, octubre, noviembre).

### 3.8.3. Dirección del Viento

La dirección y velocidad del viento fueron analizadas mediante el uso del paquete de datos OpenAir del software R Studio®, con el cual se elaboró un rosa de viento general y una estacional. Este es un método gráfico que consiste en representar conjuntamente las distribuciones de frecuencias de la dirección y la velocidad del viento (Figura 23).

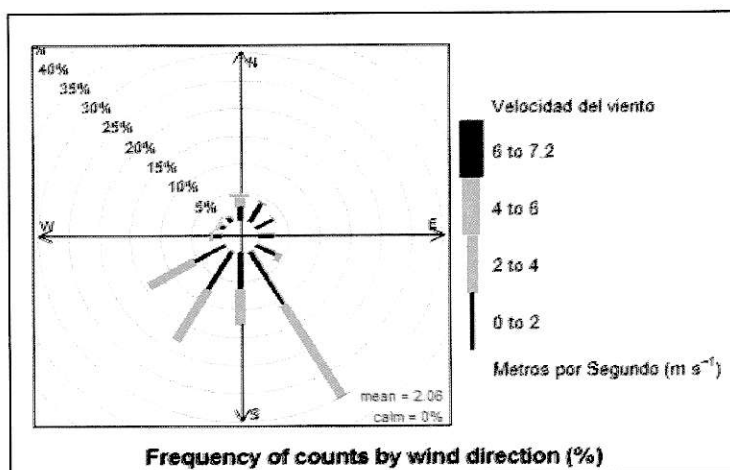


Figura 23. Rosa de Viento General

Al realizar el análisis estacional de la dirección y velocidad del viento en la comuna de San Fernando, no se observa una mayor variación en la dirección y frecuencia de los vientos. Se adjunta la rosa de vientos estacional en el Anexo II.

Cada segmento de color representa un rango específico de velocidad del viento en unidades de m/s. El tamaño o largo de cada segmento dentro de cada barra es proporcional a la frecuencia de los vientos que soplan en ese rango. La frecuencia se representa porcentualmente en los diferentes círculos concéntricos del gráfico.

Las direcciones de viento más frecuentes que se observan en la zona, se indican en la Tabla 36.

**Tabla 36.** Direcciones del Viento

| DIRECCION DEL VIENTO |
|----------------------|
| ESE (Este-Sudeste)   |
| SSE (Sud-Sudeste)    |
| S (Sur)              |
| SSO(Sudsudeste)      |
| OSO(Oeste-Sudoeste)  |

#### 3.8.4. Velocidad del Viento

Al igual que con la dirección del viento, la velocidad del viento fue analizada estacionalmente, con el fin de conocer el promedio que éste tiene en el transcurso de las estaciones del año.

**Tabla 37.** Velocidad del Viento según estación del año

| ESTACIÓN          | Velocidad del viento (m/s) |
|-------------------|----------------------------|
| Verano (D-E-F)    | 2,08                       |
| Otoño (M-A-M)     | 1,77                       |
| Invierno (J-J-A)  | 1,82                       |
| Primavera (S-O-N) | 2,12                       |

Se puede observar en la Tabla 37, que otoño presenta una velocidad un poco más baja que el invierno, aunque prácticamente se podría decir que es la misma. Lo mismo ocurre entre primavera y verano, en donde la diferencia es mínima. En las estaciones más frías es cuando ocurre una menor velocidad del viento, y por lo tanto la dispersión del material particulado sería mucho menor, en comparación a las estaciones más cálidas, en donde la velocidad del viento es mayor.

#### 3.8.5. Radiación Solar

El análisis de la radiación solar es necesario para calcular la estabilidad atmosférica según Pascal-Gifford. Al igual que con la velocidad y dirección del viento, se analizaron 3 años de datos, para así, según la Tabla 11, junto con la velocidad del viento es posible

obtener la estabilidad estacional de la zona de estudio. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 38.

**Tabla 38. Estabilidad Estacional**

| ESTACION          | Promedio Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> ) Años 2013-2015 | Radiación Solar cal/cm <sup>2</sup> | Velocidad del viento (m/s) | Clase de estabilidad |
|-------------------|---|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Verano (D-E-F)    | 610,95  | 52,53                               | 2,08                       | A-B                  |
| Otoño (M-A-M)     | 287,31  | 24,7                                | 1,77                       | B                    |
| Invierno (J-J-A)  | 190,34  | 16,37                               | 1,82                       | B                    |
| Primavera (S-O-N) | 447,17  | 38,45                               | 2,12                       | B                    |

Al especificar este parámetro en el programa, junto a las velocidades del viento según la estación del año, el programa entrega las siguientes alturas de la capa de mezcla (Tabla 39).

**Tabla 39. Altura Capa de Mezcla**

|           | Altura Capa de Mezcla |
|-----------|-----------------------|
| Verano    | 665,6 m               |
| Otoño     | 566,4 m               |
| Invierno  | 582,4 m               |
| Primavera | 678,4 m               |
| Full      | 10.000 m              |

Fuente: SCREEN VIEW™

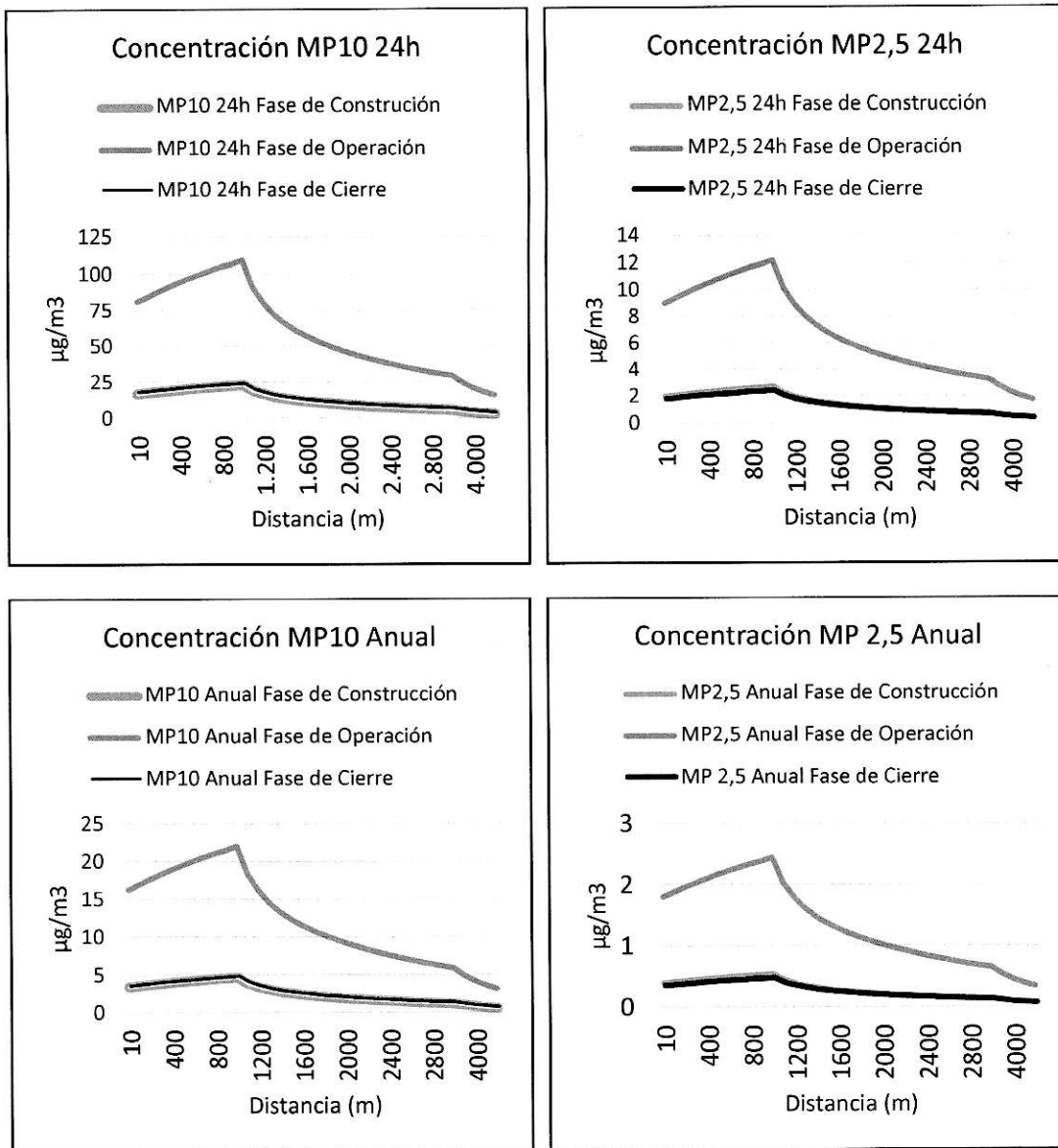
### 3.9. Resultados de la Modelación

Se obtuvieron diversos resultados en la modelación, considerando las variables meteorológicas antes señaladas. Se estudió la concentración de contaminantes en las 3 fases del proyecto, considerando las emisiones señaladas en la Tabla 34. Se consideraron distintos casos que pudiesen ocurrir.

### **3.9.1. Caso 1: Peor Escenario**

El programa de modelación SCREEN VIEW™, tal como se mencionó anteriormente, siempre entrega como resultado concentraciones ambientales sobreestimadas, debido a que genera internamente la condición meteorológica más desfavorable, es decir, aquella con la que se obtiene la concentración ambiental más alta, considerando además que el diseño del modelo ubica al receptor recibiendo el viento directo de las fuentes y no considerando factores atenuadores como la topografía.

La opción seleccionada es "Full Meteorology", en la cual supone una atmosfera muy estable, y la menor velocidad del viento considerada por el programa, la cual es de 1 m/s. Los Resultados se aprecian en la Figura 24, como gráficos de distancia versus concentración. La distancia fue fijada en 4.000 metros debido a la poca variación que presentan los resultados, hasta los 5.000 metros.



**Figura 24.** Concentración MP10 y MP2,5 en 24h y Anual en las 3 Fases

Se puede observar en la Figura 24 que las concentraciones máximas se alcanzan a una distancia de 1.000 m. Es en la fase de operación donde se alcanza la mayor concentración de MP10, con 110,76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 horas. En las fases de construcción y cierre, al tener una emisión de material particulado muy semejante, se puede observar que las líneas en el gráfico se superponen dada la poca diferencia en los resultados de la modelación. En la Fase de Construcción el máximo es de 24,18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que, en la fase de cierre es de 24,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como concentraciones en 24 horas.

En la Tabla 40, se resume los valores de máxima concentración arrojados por el modelo, los cuales son a 1.000 metros de distancia, incluyendo además las concentraciones de las emisiones con las medidas de mitigación sugeridas.

**Tabla 40.** Concentración de MP10 y MP2,5 en el peor escenario

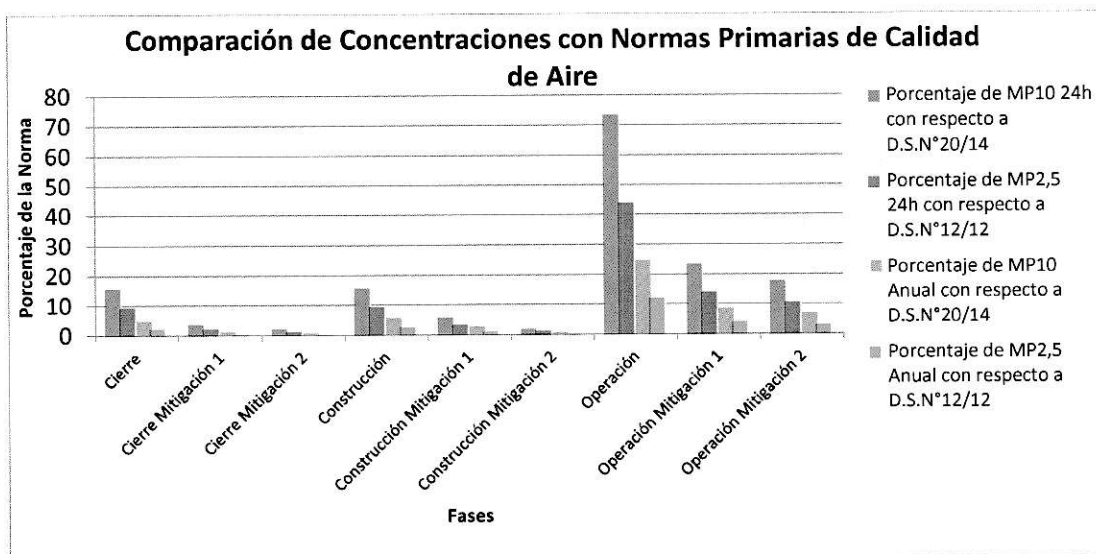
|                                  | MP10 24h<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | MP2,5 24h<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | MP10 Anual<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | MP2,5 Anual<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|----------------------------------|--|---|--|---|
| <b>Construcción</b>              | 24,18                                    | 2,85                                      | 4,84                                       | 0,57  |
| <b>Construcción Mitigación 1</b> | 9,30                                     | 1,36                                      | 1,86                                       | 0,27  |
| <b>Construcción Mitigación 2</b> | 9,30                                     | 1,36                                      | 1,86                                       | 0,27  |
| <b>Operación</b>                 | 110,76                                   | 12,32                                     | 22,15                                      | 2,46  |
| <b>Operación Mitigación 1</b>    | 35,82                                    | 4,25                                      | 7,16                                       | 0,85  |
| <b>Operación Mitigación 2</b>    | 27,46                                    | 3,42                                      | 5,49                                       | 0,68  |
| <b>Cierre</b>                    | 24,12                                    | 2,42                                      | 4,82                                       | 0,48  |
| <b>Cierre Mitigación 1</b>       | 6,14                                     | 0,62                                      | 1,23                                       | 0,12  |
| <b>Cierre Mitigación 2</b>       | 3,74                                     | 0,38                                      | 0,75                                       | 0,08  |

Tal como se indicó anteriormente, es la fase de operación, la que presenta las concentraciones más críticas. Si se realiza una comparación con las normas de calidad primaria que rigen en Chile, el porcentaje de las normas que representan los resultados de la modelación, son los indicados en la Tabla 41.

**Tabla 41.** Comparación de Concentraciones con Normas Primarias de Calidad de Aire

|                                  | MP10 24h (%)<br>D.S. 20/14 | MP2,5 24h (%)<br>D.S. 12/12 | MP10 Anual (%)<br>D.S. 20/14 | MP2,5 Anual (%)<br>D.S. 12/12 |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| <b>Construcción</b>              | 16,12                      | 9,68                        | 5,70                         | 2,85                          |
| <b>Construcción Mitigación 1</b> | 6,20                       | 3,72                        | 2,72                         | 1,35                          |
| <b>Construcción Mitigación 2</b> | 2,26                       | 1,36                        | 0,74                         | 0,35                          |
| <b>Operación</b>                 | 73,84                      | 44,30                       | 24,64                        | 12,30                         |
| <b>Operación Mitigación 1</b>    | 23,88                      | 14,32                       | 8,50                         | 4,25                          |
| <b>Operación Mitigación 2</b>    | 18,31                      | 10,98                       | 6,84                         | 3,40                          |
| <b>Cierre</b>                    | 16,08                      | 9,64                        | 4,84                         | 2,40                          |
| <b>Cierre Mitigación 1</b>       | 4,09                       | 2,46                        | 1,24                         | 0,60                          |
| <b>Cierre Mitigación 2</b>       | 2,49                       | 1,50                        | 0,76                         | 0,40                          |

En la Figura 25 se observan de manera gráfica estos resultados:



**Figura 25.** Comparación de Concentraciones con Normas Primarias de Calidad de Aire



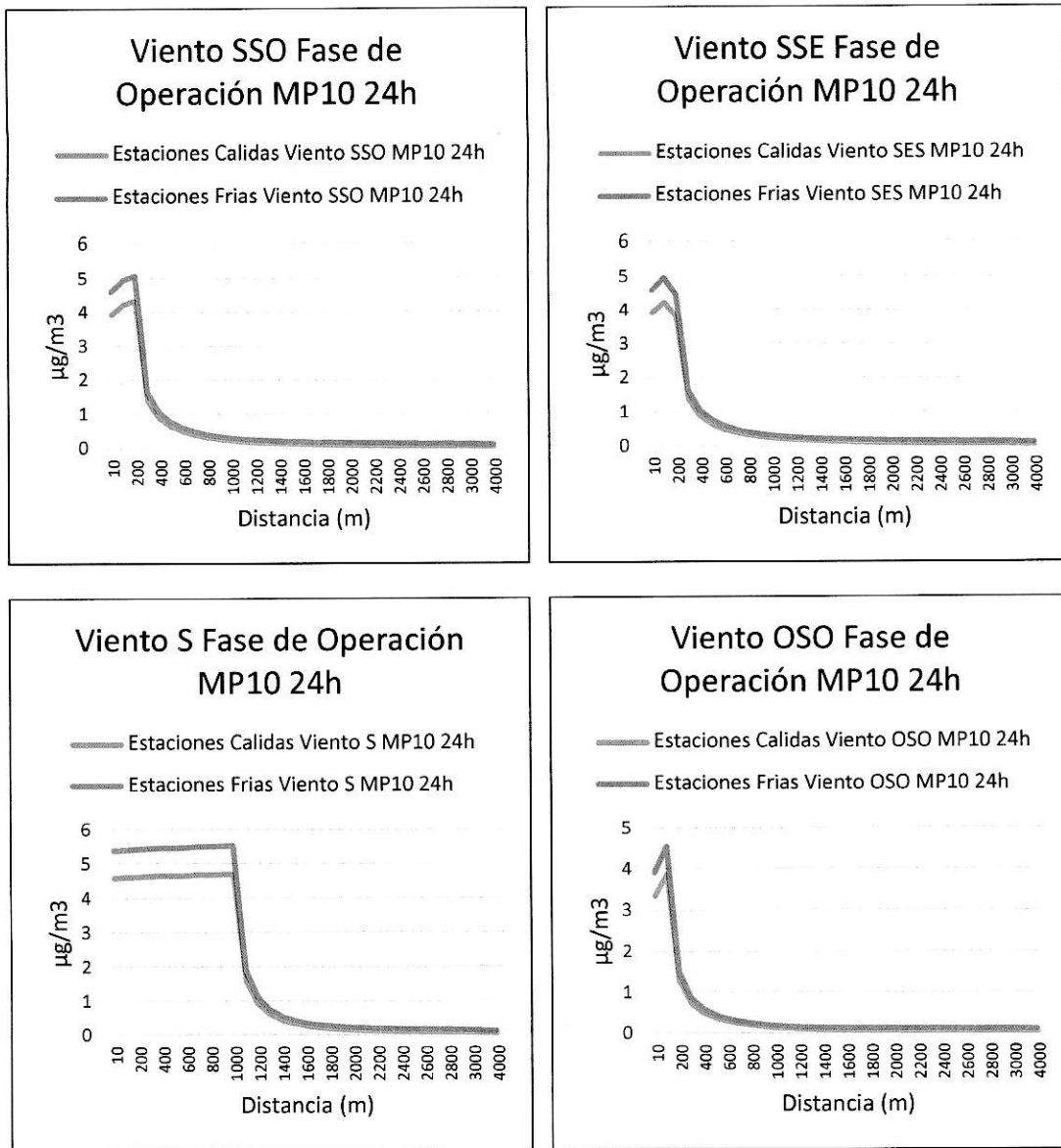
Si no se implementaran medidas de mitigación en la Fase de Operación, sus emisiones equivaldrían al 73,84% de la norma diaria de MP10, y un 44,30% de la norma diaria de MP2,5. En tanto que las normas anuales de MP10 y MP2,5 corresponderían a un 24,64% y a un 12,30% respectivamente.

### **3.9.2. Caso 2: Aplicación de Condiciones meteorológicas de la zona**

La dirección del viento en la zona se conoce gracias a la rosa de viento de la Figura 23. Según ésta, la mayor frecuencia la obtiene el viento Sud- Sudeste(SSE) con un 30%, seguido por Sud-sudeste con un 20%, luego el OSO (Oeste- Sudoeste) con un 17%, y por último el viento Sur, con un 13% de frecuencias, aproximadamente. Es por ello que, en este caso se estudió la concentración de los contaminantes con respecto a la distancia, aplicando las direcciones que el viento presenta en la zona, además de la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica estacional de la zona. Con este caso se intenta obtener datos de concentración más realistas al aplicar todas las condiciones meteorológicas que permite este modelo.

Se utilizaron los datos de la Tabla 38, para especificar en el modelo la estabilidad y velocidad del viento que tiene cada estación del año.

Se realizaron gráficos de distancia v/s concentración de MP10, como concentración diaria, debido a que, lo visto en el caso anteriormente visto, el porcentaje más alto como concentración es alcanzado en 24h, (Figura 26), debido a que éste contaminante es el más crítico en todas las fases del proyecto, específicamente en la fase de operación.



**Figura 26.** Concentración MP10 24h Fase de Operación, analizado en estaciones cálidas y frías, con distintas direcciones de viento

En la Figura 26, se observa que, como era de esperar, el comportamiento estacional es el esperado, pues en las estaciones frías existe un aumento en la concentración de MP10, tanto anual como en 24 horas, en comparación a las estaciones cálidas, en donde la concentración disminuye. Si se comparan los resultados obtenidos en el Caso 1, en el Caso 2 hay una disminución notoria con los datos de concentración, esto es debido a que, en el primer escenario se consideró una atmósfera muy estable y una velocidad de viento mínima, lo cual implica que el transporte de contaminantes sea deficiente. En tanto que, utilizando el método de Pasquill - Gifford para determinar la estabilidad atmosférica, como también los datos de la velocidad del viento entregados por la estación de monitoreo de San Fernando, el transporte del material particulado no es tan deficiente como lo mostrado en el Caso 1, además de definir que la estabilidad atmosférica de la zona varía entre inestable y muy inestable.

La fase de Operación para éste caso, de la emisión total que se obtiene (Tabla 34), se dividió ese resultado por 4, debido a que en este caso se está realizando un estudio estacional, y a diferencia de las otras fases estudiadas, será la fase con mayor duración (96 meses) y por lo tanto atravesará las 4 estaciones del año. Por lo tanto, este análisis se realiza para saber que concentración de material particulado arrojará al ambiente, en el supuesto que las emisiones sean iguales en verano, otoño, invierno y primavera.

Se optó por graficar el MP10, debido a que es el contaminante que mayor emisión posee y además es el contaminante por el cual el valle central de la VI Región posee un PPDA. Si bien está proyectado para el año 2017 actualizar el PPDA y considerar el MP2,5, se observó que en el Caso 1, corresponde a un porcentaje más bajo respecto de la norma de calidad primaria de aire, en relación al MP10. No obstante a ello, en la Tabla 42 se resumen las máximas concentraciones arrojadas por el modelo en concentraciones de 24 horas y anuales para ambos contaminantes en las diferentes fases del proyecto.

Cabe destacar que los vientos SSE y OSO alcanzan un máximo de concentración a los 100 metros de distancia, el viento SSO a los 200 metros, mientras que cuando sopla el viento Sur, el máximo de concentración es alcanzado a los 1.000 metros.

Ya que éste patrón es igual en las 3 fases y para ambos contaminantes, en el Anexo I se resumen los valores máximos entregados por la modelación realizada.

### 3.10. Receptores Discretos

Ya estudiados los casos anteriormente propuestos, es necesario identificar a los receptores discretos cercanos al proyecto, con el fin de poder identificar la concentración a la cual están expuestos.

Para ello se confeccionó un mapa de iso-concentraciones con el programa QGIS 2.14.0 Essen, el cual es una herramienta de sistema de información geográfica (SIG) de código abierto, basándose en las distancias en las cuales se producen las mayores concentraciones de material particulado.

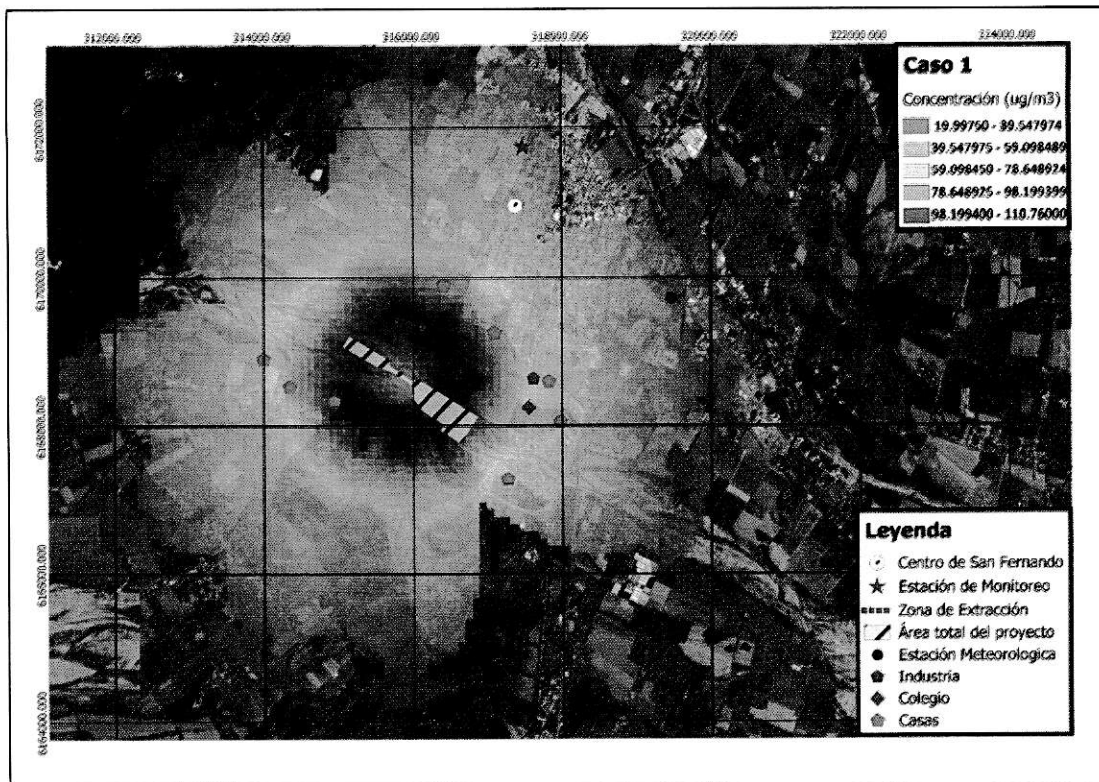
Los receptores son identificados en la Tabla 42.

**Tabla 42.** Receptores Discretos cerca del área del Proyecto.

| Receptor | Tipo                  | Coordenada Este | Coordenada Norte | Justificación de elección |
|----------|-----------------------|-----------------|------------------|---------------------------|
| R1       | Conjunto Habitacional | 316395.00 m E   | 6169707.00 m S   | 1,16 km                   |
| R2       | Conjunto Habitacional | 317051.00 m E   | 6169226.00 m S   | 1,12 km                   |
| R3       | Industria             | 317625.00 m E   | 6168645.00 m S   | 1 km                      |
| R4       | Conjunto Habitacional | 317834.00 m E   | 6168605.00 m S   | 1,19 km                   |
| R5       | Colegio               | 317566.00 m E   | 6168253.00 m S   | 810 m                     |
| R6       | Conjunto Habitacional | 317990.00 m E   | 6168058.00 m S   | 1,18 km                   |
| R7       | Conjunto Habitacional | 317282.00 m E   | 6167294.00 m S   | 770 m                     |
| R8       | Conjunto Habitacional | 314953.00 m E   | 6168334.00 m S   | 570 m                     |
| R9       | Conjunto Habitacional | 314354.00 m E   | 6168533.00 m S   | 980 m                     |
| R10      | Conjunto Habitacional | 314008.00 m E   | 6168912.00 m S   | 1,08 km                   |

Se consideraron 10 receptores, pues estos son los más cercanos al proyecto, y por lo tanto los que pueden sentir en mayor grado el impacto del funcionamiento del proyecto. Cabe destacar que el más lejano está a 1.190 metros del proyecto. La gran mayoría de los receptores identificados corresponden a conjuntos habitacionales (8), un colegio y una industria.

Al realizar un mapa de iso-concentración con los datos obtenidos en el Caso 1, el resultado es observado en la Figura 27.



**Figura 27.** Mapa de Iso-Concentración para Caso 1

En la Figura 27 se aprecia el área de estudio, la ubicación del proyecto, la estación de monitoreo, el centro de San Fernando, como los receptores anteriormente identificados.

Con el fin de poder emular un mapa de iso-concentración, con el programa Qgis Essen 2.14.0 se representa el impacto que tendrá el funcionamiento de la planta extractora y procesadora de áridos. Cabe decir que el modelo arroja las mismas distancias tanto para MP10 como para MP2,5 en el Caso 1 en concentraciones de 24 horas y anuales (1.000 m), por lo tanto, las curvas representadas en la figura anterior aplican para ambos contaminantes.

Se aprecia que el efecto que tendrá la ejecución del proyecto es local (Oke, 1987) ya que considerando la distancia en donde se produce la mayor concentración de material particulado, 1.000 metros, el área de mayor impacto es de aproximadamente 3,5 km<sup>2</sup> (Calculado con Google Earth Pro). Es en ésta área en donde afectaría a R2, R2, R7 y R8 (Conjuntos habitacionales), y en una menor medida, aunque no menos

importante R5 (colegio) y R7 (industria). Tal como se indicó en la Tabla 39, se puede apreciar una concentración de  $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de MP10 24h, el cual representa al 73,84% del valor máximo de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $12,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de MP2,5 24h, equivalente al 44,30% del valor máximo de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En tanto que, para los valores de concentración anual, el MP10 sería de  $22,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que equivale a un 24,64% del valor máximo de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por último, la concentración MP2,5, de  $2,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  equivale a un 12,30% respecto del valor máximo permitido por la norma primaria de calidad de aire de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Es importante destacar que los valores antes mencionados, son las concentraciones arrojadas por el modelo de la etapa de operación sin aplicar las medidas de mitigación sugeridas en este seminario, y considerando el peor escenario posible. También otro punto importante a destacar es que este mapa muestra el impacto que produce el material particulado si se estuviesen produciendo los vientos prácticamente en forma simultánea, según la rosa de vientos de la zona.

Ahora bien, aplicando los datos entregados por la estación de calidad de aire de San Fernando, dirección y velocidad del viento, tal como el Caso 2, y con los resultados de la Figura 26, en donde se identificó una leve alza en los resultados de concentración de MP10 en las estaciones frías del año, se procedió a confeccionar 2 mapas de isoconcentración, uno para otoño, y otro para invierno, tal como se puede observar en las Figuras 28 y 29.

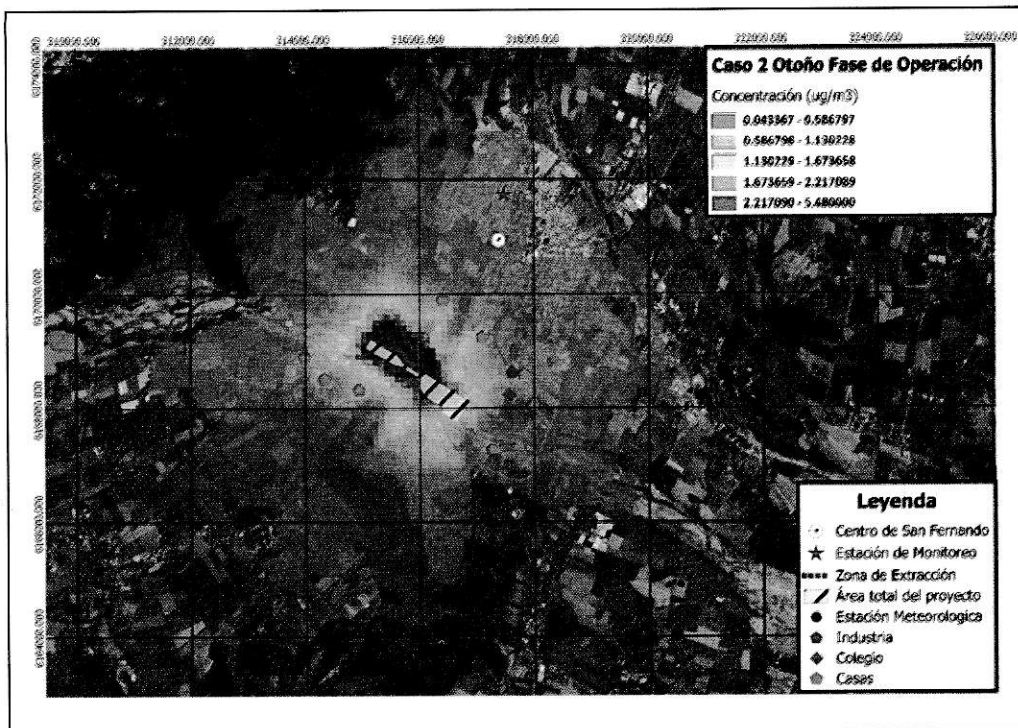


Figura 28. Mapa de Iso-Concentración MP10 24h para Caso 2, Otoño

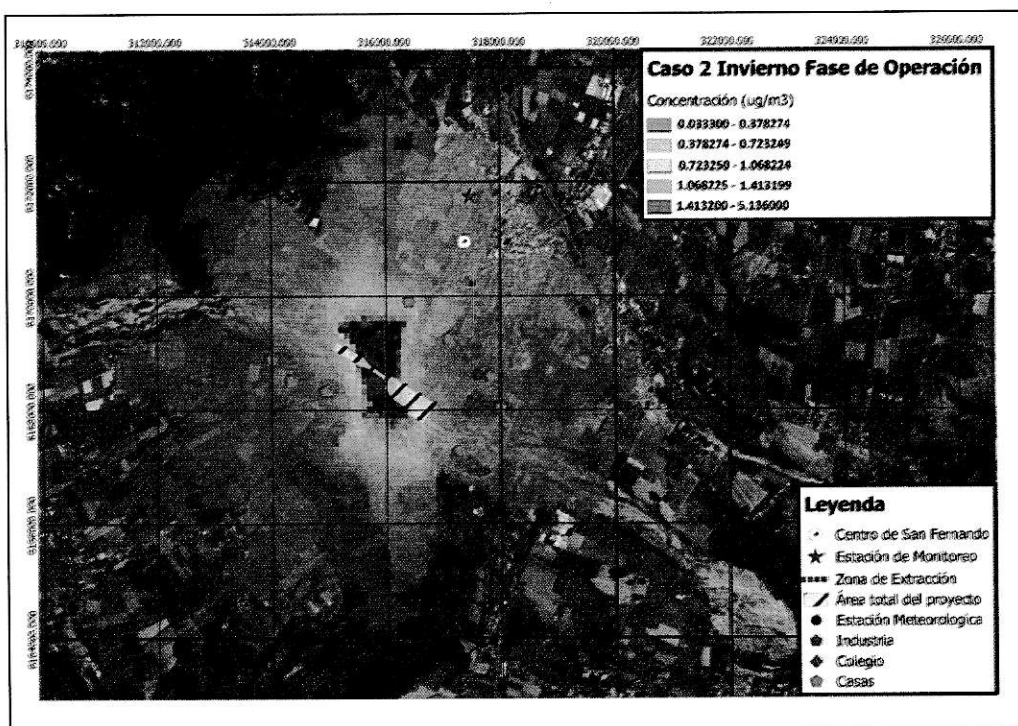


Figura 29. Mapa de Iso-Concentración MP10 24h para Caso 2, Invierno

Según las Figuras 28 y 29, y tal como se esperaba de los resultados del Caso 2, el mapa tiene un cambio significativo en comparación al obtenido a los resultados del Caso 1, pues aquí hay una disminución significativa del área de máximo impacto que tendría la concentración de MP10 24h, pues con los Vientos SSE y SSO la distancia es de 200 metros, en tanto para el viento OSO, es de 100 metros, por lo cual no existiría un impacto a los receptores discretos. Además, hay que considerar que, aplicando al modelo los datos meteorológicos de la zona, la concentración de dispersión de los contaminantes disminuye de manera significativa en comparación a los resultados de la modelación en el peor escenario posible (Caso 1).



## IV. DISCUSIÓN

Luego de haber realizado la estimación de emisiones de la planta extractora y procesadora de áridos, y posterior a ello hecho la modelación atmosférica para obtener la concentración que emitirá al proyecto al sector, es importante analizar los resultados obtenidos.

### 4.1. Plan de Descontaminación Atmosférica del Valle Central de la VI Región

El plan de descontaminación atmosférica que está vigente desde el año 2013 en el valle central de la VI Región en donde se encuentra ubicada la comuna de San Fernando ha permitido la reducción de los máximos de concentración de material particulado MP10 en 24 horas, pero es importante realizar una actualización de éste y poder cuantificar el material particulado fino MP2,5. Esto debido a que, al igual que en otras ciudades de Chile, los máximos invernales de MP10 se deben principalmente al aumento de la fracción fina (MP2,5), lo cual llega a representar entre un 70 a 90% de la concentración de MP10. (Centro Mario Molina, 2013). Por lo tanto, es necesario también tener un mayor control del material particulado fino, poniendo un mayor control en las emisiones de gases precursores de éste. ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , VOC). Se hace necesario incorporar a los parámetros de muestreo de la estación de monitoreo de San Fernando los parámetros antes señalados, excluyendo  $\text{O}_3$ , el cual ya está incorporado.

Otro punto importante es mejorar la ubicación de la estación de monitoreo de la comuna de San Fernando, ya que como se observa en la Figura 14, está emplazada dentro de un estacionamiento de un colegio, lo cual puede llevar a mediciones erróneas y no representativas debido a la emisión de gases producto de la combustión de los vehículos.

### 4.2. Estimación de Emisiones Atmosféricas

La estimación de emisiones atmosféricas generadas en el proceso, específicamente los contaminantes criterio MP10 y MP2,5 permitió conocer en qué fase del proyecto se emite una mayor cantidad de contaminantes y que actividad específica es la que lo produce. Se pudo observar que la fase de operación es la más crítica en cuanto a emisiones atmosféricas, del funcionamiento de este proyecto. La actividad que más produce emisiones, tanto MP10 como MP2,5, es el tránsito por caminos no

pavimentados el cual representa un 74,46% de las emisiones totales de MP10, y un 64,53% de MP2,5 por lo cual es la actividad que contribuye en mayor medida a la emisión de material particulado en la fase de operación, como además en las otras 2 fases analizadas, como lo son construcción (77,82 y 60,78% de MP10 y MP2,5 respectivamente), y en la fase de cierre, un 97,51 y 92,36% de MP10 y MP2,5. El polvo resuspendido debido a esta actividad es el mayor problema de la extracción de áridos, en cuanto a afectación de la calidad de aire se refiere, y por lo tanto es una actividad que hay que tener presente para así tomar las medidas pertinentes para mitigar las emisiones fugitivas.

Los factores de emisión presentes en la Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Proyectos Inmobiliarios para la Región Metropolitana son una herramienta útil para realizar los cálculos necesarios, pero se hace necesario actualizarla con el fin de estimar también el aporte que genera este tipo de actividades genera con respecto al MP2,5. Si bien es cierto que la guía se basa en los documentos publicados por la US-EPA, y ésta también tiene factores para la estimar el aporte de MP2,5 generado, sería útil tener toda esa información de manera oficial, al menos de las actividades que se señalan en la guía, los factores correspondientes para éste contaminante.

#### **4.3. Medidas de Mitigación**

Las medidas planteadas en éste seminario de título para poder mitigar las emisiones de material particulado se enmarcan en una búsqueda realizada en proyectos similares aprobados en el SEA (Servicio de Evaluación Ambiental). Generalmente solo se considera una humectación de caminos mediante un camión aljibe, y nada más. Aunque la aplicación de bischofita como estabilizador de caminos es más eficiente que el simple riego con agua mediante camiones aljibes, además de tener a largo plazo una disminución de los costos de hasta un 49% (DICTUC, 2005) debido a que necesita una menor mantención en el tiempo, pues el riego con el camión aljibe se debe realizar prácticamente todos los días, lo cual implica costos asociados al camión en sí mismo, y al llenado del estanque con agua, mientras que caminos estabilizados mediante esta sal, su mantención es cada 15 o 30 días (DICTUC, 2005).

En cuanto a los costos económicos que tienen estas dos medidas, las diferencias son abismales. Según un estudio realizado por la Dirección de Vialidad de la Región del Maule, MOP en el año 2006, el costo por kilómetro de la humectación de caminos con agua, es de \$2.000 pesos, en cambio la aplicación de bischofita, es de \$1.750.000. Si bien es cierto, que la aplicación de bischofita como estabilizador de suelos necesita una menor mantención a lo largo del tiempo, en un proyecto con una duración no mayor a los 8 años no se justificaría, debido al alto costo. Éste tipo de medidas serían más justificables y rentables en proyectos con una mayor duración en sus obras.

Las medidas como encapsulamiento y aplicación de mallas raschel si bien tiene un alto grado de mitigación, no causan un impacto tan relevante en comparación al grado de emisión que tienen las actividades a las cuales se les aplica. En cuanto al encapsulamiento poco a poco está siendo exigido por la autoridad sanitaria, especialmente en plantas de gran envergadura, y que fabrican hormigón. En tanto en plantas pequeñas no es una medida que se utilice usualmente en este tipo de actividades, debido a la alta demanda que poseen los materiales pétreos, más aún si este tipo de actividades está cerca de un proyecto de construcción, ya sea de edificaciones o de caminos, en donde constantemente se requiere acceso al material, y permanece poco tiempo almacenado en pilas.

No obstante, es necesario aplicar todas las medidas de mitigación pertinentes para así tener un grado de afectación mínimo a la zona en donde se desarrolla el proyecto en cuestión.

#### **4.4. Modelación Atmosférica**

El uso del software SCREEN VIEW™ para conocer la concentración que emitirá la actividad, sirve para conocer cuál será el grado de afectación con respecto a las normas primarias de calidad del aire vigentes en Chile. Si bien lo positivo que tiene la utilización de este programa es que es gratuito, y con el cual se obtiene un diagnóstico general del aporte de contaminantes, no logra estimar de manera real la concentración de contaminantes evaluados. Esto es debido a que simula una condición sin obstáculos geográficos ni tampoco considera el índice de remoción que puede tener con el tiempo, en este caso, del MP10 y MP2,5 en donde el tiempo de vida media del MP2,5 es mayor que el MP10.

No obstante, es útil como un método de screening, ya que este modelo sobreestima las concentraciones, generando la peor condición climática en donde la dispersión debido al viento es prácticamente nula. Si en este tipo de condiciones los valores son muy elevados, es necesario realizar un estudio con programas computacionales mucho más avanzados, tales como Calpuff View™ o Aermol View™, los cuales consideran todas las variables meteorológicas y geográficas para la modelación atmosférica.

En el Caso 1, la concentración máxima arrojada para MP10 como concentración diaria fue de 110,76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración anual fue de 22,15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ambos a una distancia de 1.000 m. Si bien, en comparación a las normas primarias de calidad de aire para MP10 y MP2,5 en este caso no se vieron sobrepasados los límites establecidos por éstas, por lo cual no se necesitaría recurrir a un modelo más avanzado para determinar el impacto de la actividad, sabiendo que los resultados arrojados son los máximos posibles.

En cuanto al Casos 2 propuesto en el presente seminario, se observa una clara disminución en los valores entregados por el programa, ya que se consideró la velocidad y dirección promedio de los vientos presentes en la zona, según estación del año como también la radiación solar incidente para así poder estimar la estabilidad atmosférica de la zona. Además, la distancia en donde se produce el mayor impacto de concentraciones variable, dependiendo de la dirección del viento, mostrando que cuando existe viento SSO y SSE se produce a los 200 metros, Con viento OSO a los 100 metros, y cuando hay viento S, a los 1.000 metros.

Al especificar la estabilidad atmosférica, se puede observar las variaciones en la altura de la capa de mezcla. En los meses cálidos es posible observar que el programa, según las clases de estabilidad de la zona obtenidas según el método de Pasquill-Gifford, entrega una altura de la capa de mezcla mayor que en los meses fríos, lo cual se condice y acerca con la realidad, ya que la altura de ésta en la zona central de Chile alcanza en promedio los 400 m durante otoño-invierno (Pérez y Reyes, 2002; Undurraga, 2010) y los 700 m durante primavera-verano (Undurraga, 2010).

Según los datos del Anexo I, se aprecia que las concentraciones del Caso 2 aumentan al asignar la dirección del viento, aunque sin superar las concentraciones arrojadas en el Caso 1. El objetivo de plantear este caso, es realizar un análisis más

cercano a la realidad de la zona, con la estabilidad atmosférica, velocidad y dirección del viento presentes en las cuatro estaciones del año, según los datos arrojados por la estación de monitoreo de calidad de aire de San Fernando.

Con los resultados del Caso 2, se observa que no hay una variación estacional marcada, sino más bien se nota una diferencia leve en las estaciones cálidas y en las estaciones frías. Aun así, es recomendable elegir las estaciones cálidas para realizar las actividades de construcción y cierre del proyecto, con el fin de emitir la menor concentración de material particulado al aire, como también en la fase de operación del proyecto, si bien se trabajara de forma continuada los 8 años del proyecto, permite prestar mayor atención a las épocas del año en la cual se emitirá una mayor concentración de material particulado, la cual es en las estaciones más frías, lo que también calza con los episodios críticos que se presentan en la zona (Figura 18).

Es por ello que en la época de Primavera – Verano desde el punto de vista ambiental, es la mejor para la realización de las fases de construcción y cierre del proyecto. En cuanto a la fase de operación, si bien atravesara las 4 estaciones del año, se sugiere como una medida adicional de mitigación, es la instalación de una estación meteorológica en la zona de emplazamiento del proyecto, con lo cual los operarios cuando detecten altas velocidades en el viento, y con una dirección que pueda afectar a los receptores discretos aledaños a la zona, detener o disminuir el trabajo en la obra.

Se tiene que tener en cuenta eso sí, que los resultados obtenidos en el Caso 2, sirven solamente para tener una idea de cuál sería la concentración que resultaría del caso en que la dirección del viento sea una sola, es decir, con un 100% de frecuencia durante las estaciones del año, lo cual en la práctica no es así. Teniendo eso presente, y tal como se indicó anteriormente, los resultados obtenidos disminuyen significativamente.

#### **4.5. Receptores Discretos**

Al realizar una evaluación de los sitios o sectores aledaños se identificó diversos conjuntos habitacionales (8), una industria y un colegio. Para poder graficar si la actividad realizada por el proyecto en evaluación en el presente seminario se realizaron 3 mapas de iso-concentración, uno para el Caso 1, y 2 para el Caso 2 (Otoño e Invierno) con los datos de la modelación atmosférica, y con el programa Qgis 2.14.0 Essen, en los cuales

para el Caso 1 cual se observa que varios receptores están dentro de la distancia de concentración máxima arrojada por el modelo según el Caso 1, el cual es de 1.000 metros, dentro de los cuales está el colegio. En tanto que, aplicando las condiciones establecidas en el Caso 2, el cual da como resultado que, si existe viento SSO y SSE el punto de máximo impacto de concentración se presenta a los 200 metros, y con viento OSO, 100 metros, ningún receptor discreto se ve afectado con la concentración mayor. Mientras que, con el viento S, se podría ver afectado el receptor R1, que es un conjunto habitacional, ya que esta 160 metros alejado de los 1.000 metros de la zona de mayor impacto. Por lo tanto, es importante aplicar las condiciones meteorológicas que permite el modelo, con el fin de poder acercarse a la condición más real posible, aun teniendo en cuenta que no es posible considerar variables geográficas. Es por ello que es fundamental poder aplicar las medidas de mitigación pertinentes para poder disminuir de manera eficaz el material particulado emitido en la zona.

#### **4.6. Recomendaciones**

Si bien el PPDA del Valle Central de la VI Región ha sido parte de una política de estado para salvaguardar a la población de los efectos que tiene para la salud el material particulado, es importante y necesario para poder reducir y fijar los límites máximos de emisión de una actividad productiva en la zona, lo cual, para proyectos de gran envergadura, como es el caso del proyecto analizado, estarán en la obligación de implementar medidas de mitigación con el fin de reducir al máximo sus emisiones. Pero también se hace necesario actualizar el PPDA y evaluar la situación del MP<sub>2,5</sub> fijando también los límites máximos de emisión de éste, y controlando además los precursores que este posee. La comuna de San Fernando posee problemas de MP<sub>2,5</sub> debido a la quema de biomasa (Centro Mario Molina, 2013) por lo que también es importante hacer énfasis en la reducción y/o mitigación de ésta en la zona. Si bien dentro de las medidas de mitigación propuestas, está la estabilización de caminos con bischofita, la cual es la que mitiga en un mayor porcentaje las emisiones en comparación al resto, su alto costo impide pensar en la aplicación de ésta medida en un proyecto que no tendrá una extracción u actividad mayor, en comparación a la gran minería chilena, como lo es el cobre, en donde sí se justificaría el alto costo de inversión debido al alto flujo de camiones de gran envergadura. En tanto que el resto de las medidas, son más factibles económicamente en su aplicación.

## V. CONCLUSIONES

El proyecto de Explotación Mecanizada de Áridos desde el Río Tinguiririca sobrepasa las 5 Toneladas de emisión máxima por año de MP10 permitido en el Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) del Valle Central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, lo que conllevará a la implementación de medidas pertinentes para la compensación de un 120% exigido por éste a través de la implementación de un plan de compensación de emisiones.

Se observa que la actividad que aporta en un mayor porcentaje a la emisión de material particulado, tanto MP10 como MP2,5 es el tránsito por caminos no pavimentados de vehículos livianos y camiones, en las emisiones por fase (construcción, operación y cierre) del proyecto. Por lo cual es a esa actividad a la cual se le debe prestar mayor atención, con el fin de disminuir de la mejor manera posible sus emisiones.

La implementación de medidas de mitigación es fundamental para poder reducir de manera significativa las emisiones de material particulado, lo cual puede implicar una reducción de más de un 70% de éstas. Esto depende del tipo de medida que se adopte para reducir las emisiones, como lo es el sistema de riego, encapsulamiento de las cintas transportadoras, humectación de caminos no pavimentados con agua, y la estabilización de los caminos con bischofita. Estas últimas dos medidas son las más relevantes, debido a que se identificó como actividad más contaminante el tránsito de vehículos por caminos no pavimentados, el cual llega a representar cerca del 75% de las emisiones en cada fase del proyecto. La elección de una de las dos medidas de mitigación depende de gran medida al costo económico que ésta acarrea. Si bien es cierto que la estabilización de caminos con bischofita es más efectiva en el porcentaje de mitigación en comparación a la humectación, y también necesita una menor mantención, también es cierto que el alto costo hace decidir aplicar la humectación de caminos con agua, la cual es sustancialmente más barato, y su correcta aplicación tiene un alto porcentaje de mitigación de emisiones (75%).

La modelación realizada con el programa Screen View™ es una manera de poder conocer la concentración de contaminantes atmosféricos a distancias discretas que son emitidos por un proyecto, de manera gratuita. Es un método efectivo para la realización

de un screening y así saber si es necesario o no recurrir a programas de modelación más avanzados los cuales implican grandes costos económicos. Si bien el programa es básico, es posible incorporar variables que hacen que el programa entregue resultados que se acerquen un poco a la realidad local, tales como las variables meteorológicas de dirección y velocidad del viento, además de la estabilidad atmosférica definida por la radiación solar incidente, lo cual es útil si no se tienen datos de altura para la determinación de la altura de la capa de mezcla. En este seminario se plantearon dos casos, el Caso 1 el cual simula el peor escenario posible, con una atmosfera muy estable y viento de baja intensidad, con lo cual se logra tener un resultado muy conservador de las concentraciones de material particulado emitido por el proyecto. Si se hubiesen observado resultados que fuesen muy altos, o que sobrepasaran la norma primaria de calidad de aire, se recomendaría utilizar programas de modelación más avanzados, los cuales dan concentraciones más verídicas, al incorporar elementos como el relieve de la zona. En éste caso no fue necesario sugerir el uso de programas más avanzados, pues la concentración resultante no sobrepasaba la norma primaria de calidad de aire. El Caso 2 se trató de llevar a la realidad, incorporando datos meteorológicos al programa, dando como resultado concentraciones menores en comparación al Caso 1, pudiendo así, llevar los resultados a un caso más realista, en el cual, según las diversas direcciones del viento se supo a qué distancia se producía el punto de máximo impacto, siendo el viento Sur el que desplaza más a los contaminantes, 1.000 metros, en comparación a los otros vientos preponderantes en la zona, los cuales son a 100 o a 200 metros. Gracias a la elaboración de mapas de iso-concentración con el programa de sistemas de información geográfica (SIG) Qgis 2.14.0 Essen, es posible identificar la afectación a los receptores discretos identificados en la zona, siendo en el mapa del Caso 1, el cual es el peor escenario posible, la gran mayoría de los receptores está dentro de la zona de máximo impacto o de mayor concentración de material particulado. En tanto que, al aplicar condiciones meteorológicas de la zona de estudio es posible observar que la zona de máximo impacto disminuye notoriamente, y prácticamente ningún receptor discreto se ve afectado, además de que las concentraciones son menores a las del Caso 1. Esto también se debe que al aplicar los vientos preponderantes o de mayor frecuencia en la zona, las distancias de máximo impacto disminuyen siendo 100 metros (Viento OSO), o 200 metros (Vientos SSO y SSE).



Los softwares de acceso gratuitos utilizados en el presente seminario de título permitieron caracterizar la calidad de aire de la zona de estudio, como también el impacto de las emisiones atmosféricas de la planta extractora y procesadora de áridos, en los receptores discretos cercanos al proyecto, elaborando mapas de iso-concentración, aplicando las condiciones meteorológicas de la comuna de San Fernando. Todo esto sin implicancias económicas, permitiendo así una idea preliminar del impacto que puede generar la instalación de un proyecto en una zona de estudio determinada.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- **Alvarado G.**, 2010. Estudio integrado de factores que influyen sobre la contaminación atmosférica por material particulado respirable de Pudahuel. Tesis Magister en Gestión y Planificación Ambiental. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 117p.
- **Ambiosis S.A.** 2011. Guía Metodológica Inventario de emisiones atmosféricas. Metodología Sinca 2011.
- **Biblioteca del Congreso Nacional.** 2016. [En línea] Reportes estadísticos comunales San Fernando. <http://reportescomunales.bcn.cl>.
- **Chile. Ministerio Secretaría General de la Presidencia.** 2009. Decreto N° 7 Declara zona saturada por material particulado respirable MP10, como concentración anual y de 24 horas el valle central de la VI Región. 27 marzo 2009.
- **Chile. Ministerio del Medio Ambiente.** 2011. Decreto N° 12. Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable MP2,5. 09 mayo 2011.
- **Chile. Ministerio del Medio Ambiente.** 2013. Decreto N° 15. Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para el Valle Central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. 05 agosto 2013.
- **Chile. Ministerio del Medio Ambiente.** 2013. Decreto N° 20. Establece Norma de Calidad Primaria Para Material Particulado Respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia y deroga Decreto N°59, de 1998, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 16 diciembre 2013
- **Chile. Ministerio del Medio Ambiente.** 2013. Decreto N°40. Aprueba Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. 12 agosto 2013.
- **Chile. Ministerio Secretaría General de la Presidencia.** 1994. Ley 19.300. Aprueba Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente. 09 marzo 1994.
- **Chile. Ministerio de Obras Públicas.** 2001. Industria del Árido en Chile (Tomo I), Sistematización de antecedentes técnicos y ambientales. 354p.
- **Chile. Ministerio de Obras Públicas.** 2001. Industria del Árido en Chile (Tomo II), Régimen Legal. 240p.
- **Chile. Seremi Medio Ambiente RM.** 2012. Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios para la Región Metropolitana.
- **Chile. Ministerio del Medio Ambiente.** 2012. Anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférica para el Valle Central de la Región del Libertador general Bernardo O'Higgins. 38p.

- **Chile. Ministerio del Medio Ambiente.** 2012. Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA. 112p.
- **Environmental Protection Agency (EPA).** 2009. [En Línea] Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Chapter 11, United States.
- **Environmental Protection Agency (EPA).** 2009. [En Línea] Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Chapter 13, United States.
- **Environmental Protection Agency (EPA).** 2008. [En Línea]. Average in-Use Emissions from Heavy-Duty Trucks. United States. 6p.
- **Environmental Protection Agency (EPA).** 2008. [En Línea]. Idling Vehicle Emissions for Passenger Cars, Light-Duty Trucks, and Heavy-Duty Trucks. United States. 6p.
- **Gallardo L.,** 1997. Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos. CONAMA. Santiago. Chile. 34p
- **Informe.** Estudio Especiación de Material Particulado para Rancagua, Rengo y San Fernando. Centro Mario Molina Chile. 2013. 139p
- **Informe.** Proyecto Evaluación de la Bischofita como Riego Supresor de Polvo. Ingeniería Dictuc. 2005. 41p.
- **Informe.** 2010. Estudio sobre áridos: geología, legislación, medio ambiente, normativa, explotación y tratamiento. Explora Geología. 112p.
- **Informe.** 2007. Los áridos y el cemento, el recorrido de los minerales. Energía y Minas, Consejería de Economía, Comunidad de Madrid. 27p.
- **Informe.** 2005. Clasificación de Estabilidad, capas de mezcla. Dr. Jaime Moraguez. 10p.
- **Informe.** 2006. Análisis comparativo de la eficiencia de supresores de polvo mediante el uso del equipo dustmate y el efecto económico para la conservación rutinaria y periódica de carpetas granulares. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. 17p.
- **Informe.** 2012. Guía para la prevención de emisiones difusas de partículas. Departamento de Medio Ambiente, Planificación territorial, Agricultura y Pesca, Gobierno Vasco, España. 59p.
- **Informe.** 2006. Emisiones difusas por manipulación y almacenamiento de materiales pulverulentos: Ejemplos de metodologías de medidas. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Ministerio de Educación y Ciencia. España. 40p.
- **Informe.** 2001. Tecnologías de Abatimiento de la contaminación atmosférica en obras de construcción. Fontec-Corfo. 156p.

- **Korkmaz, H., Çetin, B., Ege İ., Karataş, A., Boma, A., Özşahina, E.** 2011. Environmental effects of stone pits in Hatay (Turkey). *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Rev.19: 504–510
- **Kerminen, V.M.** 1997. The effects of particle chemical character and atmospheric processes on particle hygroscopic properties. *Journal of Aerosol Science* 28, pp 121-132
- **Langer W., Arbogast B.,** 2002. Environmental impacts of mining natural aggregate. *Deposit and Geoenvironmental Models/or Resource Exploitation and Environmental Security*, p151-169.
- **Oke, T. R.** (1987). *Boundary Layer Climates*, chapter 8, Routledge, 2nd edition. pp. 262–303
- **Pielke R.A y UliaszM.** 1998. Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models – limitations and strengths. *Atmospheric Environment* Vol. 32, No. 8, pp. 1455 -1466
- **P.K. Tai, Amos, Mickley J. Loretta y Jacob J. Daniel.** 2010. Correlations between fine particulate matter (PM2.5) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM2.5 to climate change. *Atmospheric Environment* Vol44, pp 3976-3984.
- **Polichetti, G “et al”.** 2009. Effects of particulate matter (PM10, PM2.5 and PM1) on the cardiovascular system. *Toxicology*, Vol. 261 pp 1–8.
- **Perez, P. & Reyes, J.** 2002. Prediction of maximum of 24-h average of PM10 concentrations 30h in advance in Santiago, Chile. *Atmos. Environ.* 36: 4555-4561.
- **Pinto N.,** 2015. Mejoras en el manejo de recursos hídricos y de lodos en las plantas procesadoras de áridos. Seminario de Título Química Ambiental. Santiago. Chile. Universidad de Chile. 108p.
- **Préndez M., Calderón V.,** 2013. Análisis de Contaminantes en la Cuenca del Río Aconcagua en Chile. Evaluación de Riesgo Humano y Ambiental. *Información Tecnológica* Vol. 24 N° 1, 12p.
- **Schwarze, PE, “et al”.** 2006. Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies. *Human & Experimental Toxicology*. Vol.25, pp 559 – 579.
- **Thenoux g., Vera s.,** 2002. Evaluación de la efectividad del cloruro de magnesio hexahidratado (Bischofita) como estabilizador químico de capas de rodadura granulares. *Materiales de Construcción*, Vol. 52, n°2. pp 5-22.
- **Undurraga P., Angella Antonella.** 2010. Desarrollo de capa de mezcla en Santiago: análisis observacional y comparación con modelo de mesoescala. Tesis Magister en

Meteorología y Climatología. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 89p.

- **Uribe P., 2011.** Explotación y venta de áridos en la comuna de Puerto Montt. Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor. Valdivia. Chile. Universidad Austral de Chile. 181p.

## VII. ANEXOS

### a. Resultados de Modelación Atmosférica según caso 2.

Tabla 43. Modelación Caso 2 Fase de Construcción

|           |            | MP10 24h<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | MP2,5 24h<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | MP10 Anual<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | MP2,5 Anual<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|-----------|------------|--|---|--|---|
| Verano    | Viento SSE | 0,941                                    | 0,111                                     | 0,188                                      | 0,022                                       |
|           | Viento S   | 1,045                                    | 0,123                                     | 0,209                                      | 0,025                                       |
|           | Viento SSO | 0,966                                    | 0,114                                     | 0,193                                      | 0,023                                       |
|           | Viento OSO | 0,860                                    | 0,101                                     | 0,172                                      | 0,021                                       |
| Primavera | Viento SSE | 0,923                                    | 0,109                                     | 0,185                                      | 0,022                                       |
|           | Viento S   | 1,025                                    | 0,121                                     | 0,205                                      | 0,024                                       |
|           | Viento SSO | 0,948                                    | 0,112                                     | 0,190                                      | 0,022                                       |
|           | Viento OSO | 0,844                                    | 0,099                                     | 0,169                                      | 0,020                                       |
| Otoño     | Viento SSE | 1,105                                    | 0,130                                     | 0,221                                      | 0,026                                       |
|           | Viento S   | 1,231                                    | 0,145                                     | 0,246                                      | 0,029                                       |
|           | Viento SSO | 1,136                                    | 0,134                                     | 0,227                                      | 0,027                                       |
|           | Viento OSO | 1,011                                    | 0,119                                     | 0,202                                      | 0,024                                       |
| Invierno  | Viento SSE | 1,075                                    | 0,127                                     | 0,215                                      | 0,025                                       |
|           | Viento S   | 1,196                                    | 0,141                                     | 0,239                                      | 0,028                                       |
|           | Viento SSO | 1,104                                    | 0,130                                     | 0,221                                      | 0,026                                       |
|           | Viento OSO | 0,983                                    | 0,116                                     | 0,197                                      | 0,023                                       |

**Tabla 44. Modelación Caso 2 Fase de Operación**

|                  |                   | <b>MP10 24h<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>MP2,5 24h<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>MP10 Anual<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>MP2,5 Anual<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |
|------------------|-------------------|---|--|---|--|
| <b>Verano</b>    | <b>Viento SSE</b> | 4,308   | 0,479  | 0,8616  | 0,096  |
|                  | <b>Viento S</b>   | 4,784   | 0,532  | 0,957   | 0,107  |
|                  | <b>Viento SSO</b> | 4,428   | 0,492  | 0,886   | 0,098  |
|                  | <b>Viento OSO</b> | 3,941   | 0,438  | 0,788   | 0,088  |
| <b>Primavera</b> | <b>Viento SSE</b> | 4,228   | 0,47   | 0,846   | 0,094  |
|                  | <b>Viento S</b>   | 4,692   | 0,522  | 0,938   | 0,104  |
|                  | <b>Viento SSO</b> | 4,344   | 0,483  | 0,869   | 0,097  |
|                  | <b>Viento OSO</b> | 3,867   | 0,43   | 0,773   | 0,086  |
| <b>Otoño</b>     | <b>Viento SSE</b> | 5,064   | 0,563  | 1,013   | 0,113  |
|                  | <b>Viento S</b>   | 5,636   | 0,627  | 1,127   | 0,125  |
|                  | <b>Viento SSO</b> | 5,2   | 0,579  | 1,04  | 0,116  |
|                  | <b>Viento OSO</b> | 4,632   | 0,515  | 0,926   | 0,103  |
| <b>Invierno</b>  | <b>Viento SSE</b> | 4,924   | 0,548  | 0,985   | 0,11   |
|                  | <b>Viento S</b>   | 5,48  | 0,61   | 1,096   | 0,122  |
|                  | <b>Viento SSO</b> | 5,06  | 0,563  | 1,012   | 0,113  |
|                  | <b>Viento OSO</b> | 4,632   | 0,501  | 0,926   | 0,1  |

**Tabla 45.** Modelación Caso 2 Fase de Cierre

|                  |                   | <b>MP10 24h</b><br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | <b>MP2,5 24h</b><br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | <b>MP10 Anual</b><br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | <b>MP2,5 Anual</b><br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|------------------|-------------------|---|--|---|--|
| <b>Verano</b>    | <b>Viento SSE</b> | 0,938   | 9,408E-2   | 0,188   | 1,882E-2   |
|                  | <b>Viento S</b>   | 1,042   | 1,045E-1   | 0,208   | 2,090E-2   |
|                  | <b>Viento SSO</b> | 0,964   | 9,668E-2   | 0,193   | 1,934E-2   |
|                  | <b>Viento OSO</b> | 0,858   | 8,608E-2   | 0,172   | 1,722E-2   |
| <b>Primavera</b> | <b>Viento SSE</b> | 0,920   | 9,232E-2   | 0,184   | 1,846E-2   |
|                  | <b>Viento S</b>   | 1,022   | 1,025E-1   | 0,204   | 2,050E-2   |
|                  | <b>Viento SSO</b> | 0,946   | 9,484E-2   | 0,189   | 1,897E-2   |
|                  | <b>Viento OSO</b> | 0,842   | 8,444E-2   | 0,168   | 1,689E-2   |
| <b>Otoño</b>     | <b>Viento SSE</b> | 1,102   | 1,106E-1   | 0,221   | 2,211E-2   |
|                  | <b>Viento S</b>   | 1,227   | 1,231E-1   | 0,245   | 2,462E-2   |
|                  | <b>Viento SSO</b> | 1,133   | 1,136E-1   | 0,227   | 2,272E-2   |
|                  | <b>Viento OSO</b> | 1,001   | 1,011E-1   | 0,202   | 2,022E-2   |
| <b>Invierno</b>  | <b>Viento SSE</b> | 1,072   | 1,075E-1   | 0,214   | 2,150E-2   |
|                  | <b>Viento S</b>   | 1,193   | 1,197E-1   | 0,239   | 2,394E-2   |
|                  | <b>Viento SSO</b> | 1,102   | 1,105E-1   | 0,220   | 2,210E-2   |
|                  | <b>Viento OSO</b> | 0,981   | 9,836E-2   | 0,196   | 1,967E-2   |