

ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Contenido

Informe 3.....	1
Informe 2.....	82
Informe 1.....	162



ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Informe 3

Adquisición 608897-35-LP20

Octubre 2021

Universidad de Santiago de Chile
Departamento de Física, Facultad de Ciencia
Avda. Ecuador 3493, Santiago, Chile

PRESENTACIÓN

La Universidad de Santiago de Chile presenta a continuación el Tercer Informe de avance, en su versión corregida, referente a la licitación ID 608897-35-LP20, solicitado por el Ministerio del Medio Ambiente, enmarcado bajo el título “ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES”. La necesidad de realizar este estudio está en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (PPDA CQP), el cual compromete la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire, referida a contaminantes clasificados como Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's).

El objetivo general de este estudio es generar y recopilar antecedentes técnicos que permitan elaborar una norma primaria de calidad del aire de uno o más compuestos orgánicos volátiles (COV's) que presenten impactos negativos en la salud.

De acuerdo con las bases técnicas, en el presente informe se presenta el reporte y resultado de las actividades correspondientes al Objetivo específico c): Plantear criterios de seguimiento y evaluación de la norma a implementar, que consiste en las siguientes.

1. c.2. El consultor dará inicio a la campaña de monitoreo una vez llegado al consenso de la metodología a utilizar con la contraparte técnica.
2. c.3. A partir de los resultados de la campaña de monitoreo de COVs el consultor realizará una recomendación del tipo de monitoreo a realizar (continuo o discreto), entregando opciones de equipos de medición.
3. c.4. Se propondrán los criterios de evaluación de la norma, los años de implementación antes de su revisión y se entregarán recomendaciones de proyección

INDICE

PRESENTACIÓN	2
1 EL CONSULTOR REALIZARÁ UNA CAMPAÑA DE MONITOREO DE COV'S, LA CUAL UTILIZARÁ DIFERENTES METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN (TANTO CONTINUAS COMO DISCRETAS), CON UNA DURACIÓN MÍNIMA DE 2 MESES. LA METODOLOGÍA Y EL(LOS) LUGAR(ES) A MONITOREAR SERÁN ESTABLECIDOS PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA CONTRAPARTE TÉCNICA DEL MMA.....	5
1.1 ALCANCE NORMATIVO INTERNACIONAL.....	5
1.2 METODOLOGÍA 1: METODOLOGÍA DE MONITOREO DISCRETA: MUESTREADORES POR DIFUSIÓN (TUBOS PASIVOS). IVL	8
1.3 METODOLOGÍA 2: DOAS OPSIS PARA BENCENO (BETX)	10
1.4 COMPARACIÓN ENTRE AMBOS TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN (OPEN-PATH VS MONITOREO EN PUNTOS)	13
1.5 DESCRIPCIÓN DE CAMPAÑA DE MONITOREO.....	14
1.5.1 DOAS.....	14
1.5.2 Tubos pasivos.....	20
1.5.3 Sensores COVs.....	22
1.6 CARACTERIZACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE SITIOS DE MONITOREO.....	27
2 C.2. EL CONSULTOR DARÁ INICIO A LA CAMPAÑA DE MONITOREO UNA VEZ LLEGADO AL CONSENSO DE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR CON LA CONTRAPARTE TÉCNICA.	32
3 C.3. A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE MONITOREO DE COVS EL CONSULTOR REALIZARÁ UNA RECOMENDACIÓN DEL TIPO DE MONITOREO A REALIZAR (CONTINUO O DISCRETO), ENTREGANDO OPCIONES DE EQUIPOS DE MEDICIÓN.	33
3.1 RESULTADOS DE LA CAMPAÑA	33
3.1.1 Tubos pasivos.....	33
3.1.2 DOAS.....	37
3.1.3 Sensores de bajo costo	46
3.2 RECOMENDACIÓN DEL TIPO DE MONITOREO A REALIZAR (CONTINUO O DISCRETO), ENTREGANDO OPCIONES DE EQUIPOS DE MEDICIÓN	52
4 C.4. SE PROPONDRÁN LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA NORMA, LOS AÑOS DE IMPLEMENTACIÓN ANTES DE SU REVISIÓN Y SE ENTREGARÁN RECOMENDACIONES DE PROYECCIÓN	61
4.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA NORMA.....	61
4.2 AÑOS DE IMPLEMENTACIÓN Y RECOMENDACIONES DE PROYECCIÓN	62
5 C.5. A PARTIR DE LA RECOMENDACIÓN INICIAL DE QUE COVS SE DEBEN NORMAR, EL CONSULTOR REALIZARÁ UNA PROYECCIÓN DE CUÁLES COMPUESTOS PUEDEN SER MONITOREADOS Y/O NORMADOS EN EL MEDIANO Y LARGO PLAZO.	63
5.1 PROPUESTA DE COVs A SER MONITOREADOS Y NORMADOS	63
6 CONCLUSIONES	66
7 REFERENCIAS	68
ANEXO I: CERTIFICACIÓN DOAS PARA BENCENO	69
ANEXO II: GUÍA DE USO CORRECTO DE SENSORES PARA EL MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE.....	72

ANEXO III: “PROTOCOLOS DE PRUEBA DE RENDIMIENTO, MÉTRICAS Y VALORES OBJETIVO PARA SENSORES DE AIRE: USO EN APLICACIONES DE MONITOREO INFORMATIVO, COMPLEMENTARIAS Y NO REGLAMENTARIAS, EN EXTERIORES Y EN SITIOS FIJOS” 78

- 1 El consultor realizará una campaña de monitoreo de COV's, la cual utilizará diferentes metodologías de medición (tanto continuas como discretas), con una duración mínima de 2 meses. La metodología y el(los) lugar(es) a monitorear serán establecidos previa autorización de la contraparte técnica del MMA.

1.1 Alcance normativo internacional

Para todos los contaminantes establecidos en la Directiva 2008/50/EC (excepto Ozono) se definen dos “umbrales de evaluación” (superior¹ e inferior²), que son determinados porcentajes del valor límite definido que se deben alcanzar para luego no superarse. En el caso del Benceno, los umbrales de evaluación corresponden a un 70% (3.5 µg/m³) y 40% (2.0 µg/m³) del valor límite³ (5 µg/m³).

En este sentido la directiva identifica cuatro niveles de ambición para evaluar las concentraciones ambientales. Como mínimo, las concentraciones deben ser determinadas usando “técnicas de estimación objetivas”, típicamente basado en la comparación con otras áreas similares. En un segundo nivel, se pueden hacer mediante el uso de modelos de calidad del aire (bases de datos de emisiones de fuentes emisoras con información topográfica y meteorológica). En otras palabras, para propósitos de evaluación de cumplimiento normativo se considera suficiente realizar modelaciones u otras estimaciones objetivas de la concentración de un determinado contaminante si su concentración real está por debajo del umbral inferior de evaluación respectivo.

En un nivel de ambición más alto, las concentraciones de contaminantes deben ser determinadas utilizando “mediciones indicativas”, es decir monitorear efectivamente, pero bajo un marco relativamente “relajado” de objetivos de calidad de datos y/o mediante cobertura temporal de medición más reducida. Es la mayoría de los casos se considera suficiente para un parámetro específico si la concentración real está por debajo del umbral superior de evaluación.

Ya sobre este último umbral, se deben implementar monitoreo activo mediante el establecimiento de “mediciones fijas”, o bien estaciones de monitoreo. Esto significa que las mediciones deben realizarse en sitios fijos con procedimientos QA/QC estrictos. Así, el

¹ **Umbral superior de evaluación:** nivel por debajo del cual puede utilizarse una combinación de mediciones fijas y técnicas de modelización y/o mediciones indicativas para evaluar la calidad del aire ambiente.

[L 2008152ES.01000101.xml \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/eli/L/2008/2008152ES.01000101.xml)

² **Umbral inferior de evaluación:** nivel por debajo del cual bastan las técnicas de modelización o de estimación objetiva para evaluar la calidad del aire ambiente. [L 2008152ES.01000101.xml \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/eli/L/2008/2008152ES.01000101.xml)

³ **Valor límite:** nivel fijado con arreglo a conocimientos científicos con el fin de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente, que debe alcanzarse en un período determinado y no superarse una vez alcanzado. [L 2008152ES.01000101.xml \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/eli/L/2008/2008152ES.01000101.xml)

equipamiento de monitoreo debe cumplir con especificaciones dictadas por la UE respecto a métodos de referencia o basados en métodos aprobados como equivalentes de los métodos de referencia⁴.

Lo escrito en los párrafos anteriores se resume en la Figura 1.1.

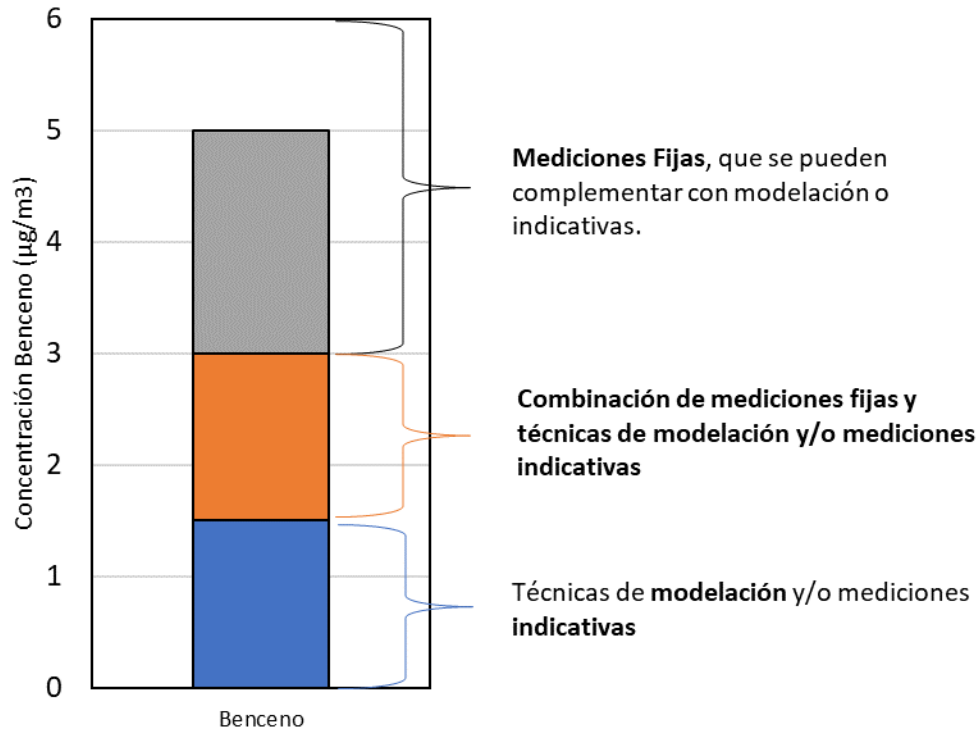


Figura 1.1: Umbrales inferior y superior de evaluación para Benceno y desagregación respecto de forma de evaluación de su nivel de concentración.

Los criterios para definir los “niveles de ambición” están en el anexo I de la Directiva 2008/50/EC, que establece objetivos de la calidad de los datos según contaminante y tipo de evaluación. Para el caso de Benceno se establecen los siguientes requerimientos.

⁴ En la UE el método de referencia para la medición del benceno es el que se describe en la norma EN 14662:2005, partes 1, 2 y 3 «Calidad del aire ambiente — Método normalizado para la medida de la concentración de benceno». Este corresponde a un monitoreo difusivo seguido de desorción por disolventes y cromatografía de gases.

Tabla 1.1: Objetivos de calidad de los datos para la evaluación de la calidad del aire por Benceno.

Nivel de evaluación	Mediciones Fijas	Mediciones indicativas	Modelación	Estimación objetiva
Incertidumbre ⁵	25%	30%	50% (media anual) ⁶	100% ⁷
Captura mínima de datos	90%	90%	-	-
Cobertura temporal ⁸	35% (Fondo urbano y de tráfico) 90% (Emplazamientos industriales)	14%	-	-

Por otro lado, la Directiva 2008/50/EC, en su anexo V, también establece requerimientos mínimos respecto del número de “puntos indicativos” o “mediciones fijas” que deben existir según el número de habitantes o nivel de aglomeración de una zona determinada.

⁵ La incertidumbre (expresada con un nivel de confianza del 95 %) de los métodos de evaluación se determinará con arreglo a los principios de la Guía del CEN para la expresión de la incertidumbre de medida (ENV 13005-1999), la metodología recogida en la norma ISO 5725:1994 y las directrices del informe del CEN titulado «Air Quality — Approach to Uncertainty Estimation for Ambient Air Reference Measurement Methods» (CR 14377:2002E). Los porcentajes de incertidumbre del cuadro anterior se refieren a mediciones individuales tomadas durante el período considerado por el valor límite para un intervalo de confianza del 95 %. La incertidumbre para las mediciones fijas debe interpretarse como aplicable en el rango del valor límite apropiado.

⁶ Para el uso de modelos, la incertidumbre se define como la desviación máxima entre los niveles de concentración medidos y calculados para el 90 % de los puntos de control individuales, a lo largo del período considerado, respecto del valor límite, sin tener en cuenta la cronología de los acontecimientos. Para los modelos de calidad del aire, la incertidumbre se interpretará como aplicable en el rango del valor límite adecuado. Las mediciones fijas que se seleccionen para comparar con los resultados del modelo serán representativas de la escala considerada por el modelo.

⁷ Para la estimación objetiva, la incertidumbre se define como la desviación máxima entre los niveles de concentración medidos y calculados, a lo largo del período considerado, respecto del valor límite, sin tener en cuenta la cronología de los acontecimientos.

⁸ Los requisitos de recogida mínima de datos y cobertura mínima temporal no incluyen las pérdidas de datos debido a la calibración regular o el mantenimiento normal de los instrumentos.

1.2 Metodología 1: Metodología de monitoreo discreta: Muestreadores por difusión (tubos pasivos). IVL⁹

Esta metodología es utilizada en la UE para la vigilancia de la norma de calidad de Benceno, como **mediciones indicativas**. En caso de que se utilice un monitoreo semanal, para un año (52 semanas aproximadamente) debe haber al menos 8 semanas de monitoreo (14% de cobertura anual) repartidas equitativamente entre todas las estaciones del año. Estos son los requerimientos mínimos a cumplir, sin embargo, las organizaciones pueden incrementar el monitoreo en caso que lo estimen conveniente. Por ejemplo, en Suecia, IVL utiliza 20 mediciones semanales al año, de manera tal de estar seguros de cumplir con los requerimientos mínimos de la norma en caso de pérdida de datos.

Los tubos pasivos tienen la capacidad de medir un abanico amplio de COVs (volátiles y semi-volátiles) tanto en atmósferas intra como extradomiciliarias. La característica principal y clave del buen funcionamiento es la apropiada calibración de la velocidad de difusión. En este proyecto, y para certificar resultados se optó por utilizar muestreadores y análisis en el IVL, institución dedicada y certificada internacionalmente para el manejo de este tipo de muestras.

Los tubos pasivos entregan resultados confiables respecto del tiempo de exposición a la cual ha estado la muestra durante el monitoreo (usualmente una semana de exposición). Entrega resultados estadísticamente comparables con métodos convencionales utilizados en EEUU (Método TO-15A¹⁰, Método TO-17¹¹). Esta metodología está incluida en la normativa europea EN 14662¹² y también en ISO 16017-2: 2003¹³.

Se destacan las siguientes ventajas de la utilización de tubos pasivos:

- pequeño, silencioso y ligero no necesitan de suministro eléctrico en el sitio de monitoreo.
- las muestras se pueden almacenar a temperatura ambiente.
- no se necesita personal calificado en el sitio de muestreo, las muestras se envían al laboratorio por medios convencionales.

Existen distintos tipos de adsorbentes utilizados para la retención de los analitos a cuantificar en el laboratorio posterior a su exposición a aire ambiente. La elección de cada uno de ellos también depende de las condiciones ambientales a las que está expuesta la muestra. En general se pueden encontrar dos tipos de categorías de adsorbentes: i) Muy fuertes que requieren una extracción con solventes y ii) adsorbentes débiles que requieren una extracción con solventes convencionales o térmica.

⁹ <https://diffusivesampling.ivl.se/oursamplers.4.75d7780712240e747ea80004619.html>

¹⁰ [TO-15A VOCs final September 2019 \(epa.gov\)](#)

¹¹ [to-17r.pdf \(epa.gov\)](#)

¹² Calidad del aire ambiente. Método estándar para medir las concentraciones de benceno. EN 14662-4: Muestreo difusivo seguido de desorción térmica y cromatografía de gases.

¹³ ISO 16017-2: 2003 Aire interior, ambiente y lugar de trabajo - Muestreo y análisis de compuestos orgánicos volátiles por tubo sorbente / desorción térmica / cromatografía de gases capilares - Parte 2: Muestreo difusivo

En este caso, y amparados en recomendaciones del mismo IVL¹⁴, se seleccionaron tubos pasivos de Carbopack como adsorbente (Figura 1.2), con exposición de dos semanas (14 días). El adsorbente Carbopack corresponde a un tipo de material grafitado que opera por desorción térmica durante el análisis.



Figura 1.2: Imagen de tubo pasivo de monitoreo de COV's (IVL).

Cabe mencionar que los límites de detección de los tubos pasivos son dinámicos y dependen del tiempo de exposición de cada tubo al aire ambiente. En la Figura 1.3 se entregan los rangos de medición de los tubos pasivos en función de 1-14 días de monitoreo de exposición. Basados en los resultados previos de Chile y otras ciudades internacionales (detallados en los informes de avance anteriores) es posible afirmar que este tipo de medición funciona bien para las condiciones actuales de la zona de estudio donde se implementó la campaña. Los tubos de Carbopack utilizados pueden incluso estar expuestos hasta un mes.

¹⁴ “Ahora el análisis de VOC Carbopack B se realizan por GC-MS por lo que los rangos de las medidas han variado. En la mayoría de los casos IVL aconseja la exposición de los tubos Carbopack B, 2 semanas, aunque 1 semana y 4 semanas es también posible”. Además, este laboratorio trabajó anterior y directamente con el MMA en campañas anteriores analizando muestras de tubos pasivos de Carbopack B con una exposición de 2 semanas.

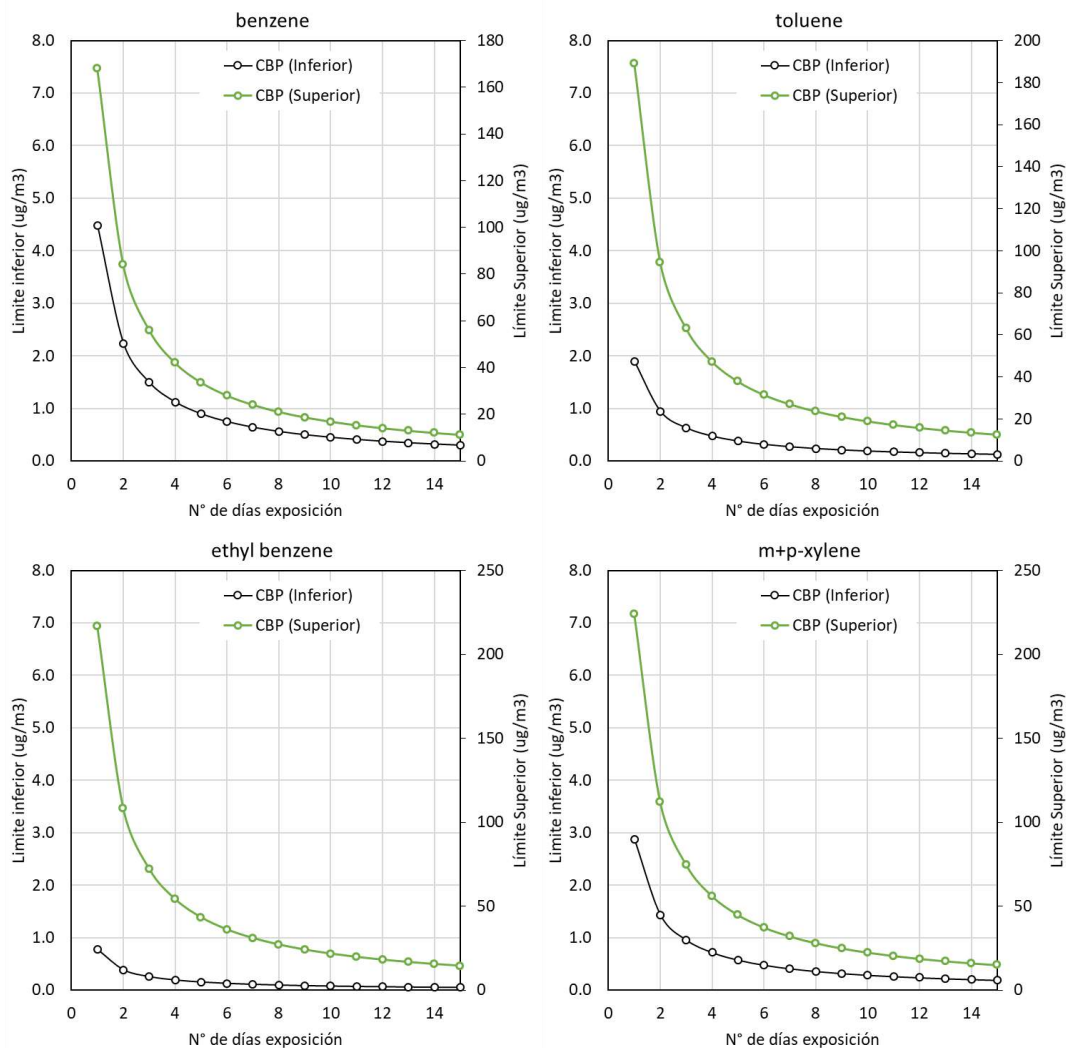


Figura 1.3: Rangos de medición de tubos pasivos de COV's para tiempo de exposición semanal. CBP indica Carbopack. Cada serie muestra los límites de detección superior e inferior de cada COV's que puede ser determinado usando el sustrato carbopack.

1.3 Metodología 2: DOAS OPSIS para Benceno (BETX)¹⁵

Differential optical absorption spectroscopy (DOAS¹⁶) utiliza la absorción única a longitudes de onda de energía electromagnética específicas por parte de sustancias químicas atmosféricas en el espectro ultravioleta (UV), visible (V) e infrarrojo cercano (NIR) para identificar y cuantificar sustancias químicas individuales. Cada molécula (y por ende, cada gas) tiene sus

¹⁵ <https://www.opsis.se/en/Applications/Ambient-Air-Quality-Monitoring/Urban-Background-Monitoring>

¹⁶ El acrónimo DOAS indica todas las propiedades que están detrás de la técnica de monitoreo. D: Método matemático que se aplica al espectro determinado (Diferencial); O: Óptica, referido a la longitud de onda que utiliza en la medición, en este caso desde el infrarrojo (IR) al ultravioleta (UV); A: Absorción, tipo de efecto óptico utilizado; S: Espectroscopia, estudio de la interacción entre la material y la luz (radiación electromagnética).

propias propiedades espectrales (huella dactilar), lo que es la base identificar y determinar la concentración de diferentes gases al mismo tiempo.

El principio de operación DOAS se basa en una modificación de la ley de Lambert-Beer, el que relaciona la intensidad de la luz transmitida con la intensidad de la luz recibida después que ha viajado por una distancia predefinida (paso óptico o “path óptico”). Sin embargo, en aplicaciones atmosféricas la ley de Lambert-Beer no se puede aplicar directamente, debido a

- Además de la absorción de luz por los gases trazas también existe extinción debido a la dispersión (scattering) de las moléculas y aerosoles.
- En la atmósfera, las absorciones de varias especies siempre se suman a la absorción total. Por tanto, en la mayoría de los casos no es posible medir directamente una sola especie específica.
- Por lo general, la intensidad inicial (I_0) no se puede medir en absoluto o con suficiente precisión.

Estas limitaciones las resuelve la tecnología DOAS mediante un algoritmo matemático interno del software y una base de datos de espectros de absorción. En sentido estricto, la técnica DOAS se basa en la medición de los espectros de absorción en lugar de la medición de la intensidad de la luz a una determinada longitud de onda. Así, mediante un algoritmo matemático complejo que ocurre en el instrumento, se buscan separar estructuras de absorción de cada una de las especies atmosféricas y también estima la extinción debida al scattering de la radiación que ocurre en moléculas y los aerosoles. El principio clave del DOAS es la separación de la absorción en una parte que representa características espectrales amplias y en otra parte que representa características espectrales determinadas.

A diferencia de los tubos pasivos, el sistema OPSIS DOAS proporciona monitoreo rápido, en tiempo real, con una alta disponibilidad de datos con un bajo costo de mantención. En secciones posteriores de este informe se ilustra el proceso de alineación del haz de luz durante el funcionamiento regular en la campaña.

El esquema de funcionamiento del DOAS se entrega en la Figura 1.4. Como ya fue mencionado, la medición se realiza a lo largo de un “camino óptico” (monitoring path). La luz se transfiere por medio de un cable de fibra óptica al analizador donde se realiza la medición espectral.

System Overview

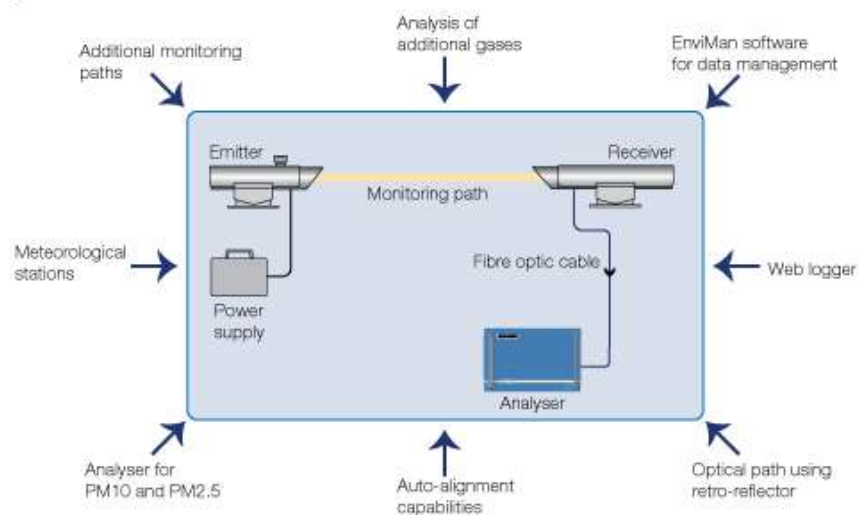


Figura 1.4: Resumen del sistema OPSIS.



Figura 1.5: Vista exterior del receptor con sistema FC 150 integrado.

Cabe mencionar que el mismo camino óptico puede ser utilizado para medir varios componentes gaseosos al mismo tiempo, incluyendo todos los gases criterios permitiendo el seguimiento de normas de calidad. Se incluye también la capacidad de determinar el Benceno, Tolueno y Xilenos. A su vez la medición óptica permite disponer de datos continuos estableciendo la capacidad de analizar perfiles temporales, diarios etc, y así identificar fuentes de emisión importantes.

El sistema de monitoreo DOAS (OPSIS AB) utilizado en este estudio dispone de varias aprobaciones internacionales¹⁷. En el caso de Benceno para calidad del aire es una tecnología

¹⁷ <https://www.opsis.se/en/Products/Approvals>

testeada por el programa ETV de la USEPA¹⁸ y también acreditado por “Accredited Test and Inspection Institute DAR - German Accreditation Council DAP-P-02.544-04 (ANEXO I: Certificación DOAS para Benceno).

Otras aplicaciones en donde ha sido utilizado este tipo de tecnología es la calibración y verificación de modelos Eulerianos que se usan en la gestión de calidad del aire. La concentración promedio de una variedad de especies atmosféricas que puede medir a lo largo del camino óptico entrega una aproximación mejor que la condición que puede entregar un número de fuentes puntuales. Además, para Benceno y otros compuestos que son difíciles de medir con resolución temporal de 24 horas o menor son apropiados para determinadas condiciones en que se requiera, ya que otras tecnologías con tal resolución suelen ser mucho más costosas.

1.4 Comparación entre ambos tipos de tecnologías de medición (Open-path vs Monitoreo en puntos)

De forma adicional a la naturaleza de la disposición de los datos (semanal vs continua), la principal diferencia entre ambas tecnologías de medición incluidas en este proyecto radica en la forma en cómo se toma la muestra de calidad del aire para realizar la medición del contaminante de interés. En el caso de los tubos pasivos, existe una “sonda” o abertura por donde ingresa la muestra de aire por diferencias en gradientes de concentración, o bien por difusión (ley de Fick); en tanto que en el DOAS existe un paso óptico (“open-path”) de luz en donde están los contaminantes atmosféricos que se determinan mediante espectroscopia de absorción UV. Es decir, existe un monitoreo puntual y un monitoreo de tipo open-path. En regiones con regulaciones ambientales avanzadas (EEUU, UE) ambos tipos de tecnología tienen requerimientos de instalación y operación que están establecidos para permitir comparabilidad y uso para propósitos de gestión ambiental y toma de decisiones, y en la mayoría de los casos son equivalentes en términos de los procedimientos de control de la incertidumbre en la medición.

Los monitoreos puntuales suelen entregar una representatividad de un área determinada en donde la distribución de concentración espacial resulta ser más bien homogénea (la regulación actual de representatividad indica un radio de 2 kms). Sin embargo, hay determinadas circunstancias en donde las condiciones topográficas, cercanía de fuentes emisoras, condiciones meteorológicas y otras similares hacen que no exista una mezcla homogénea de gases traza en la atmósfera, y ocurren frecuentemente en áreas urbanas y zonas industriales donde usualmente hay asentamientos urbanos. En estos escenarios es en donde las técnicas “open-path” resultan dar mediciones espacialmente más representativas

Ahora bien, en términos comparativos, ambos tipos de monitoreo bien operados y equipados debiesen dar los mismos resultados de niveles de concentración de gases traza en la atmósfera. En un escenario ideal, el valor de concentración determinado a lo largo del camino

¹⁸ https://archive.epa.gov/nrmrl/archive-etv/web/pdf/01_vs_opsis.pdf

óptico representa un valor promedio a lo largo del haz de luz utilizado en la medición. Por lo tanto, este valor debiese ser estadísticamente equivalente a si imaginariamente posicionamos varios muestreos puntuales a lo largo del mismo camino óptico. Esta característica es utilizada por los proveedores de esta tecnología para promocionar el monitoreo de tipo Fence-Line¹⁹. Este tipo de comparación fue realizado hace tiempo atrás y fueron estudiadas tanto en UE como en EEUU. Ver por ejemplo (Mavroidis and Griffiths, 2002).

1.5 Descripción de campaña de monitoreo

1.5.1 DOAS

La campaña de monitoreo con el equipo DOAS, contempla su instalación y seguimiento periódico, como se detalla a continuación.

1.5.1.1 Instalación emisores

La azotea del Departamento de Matemática y Ciencia de la Computación cuenta con una plataforma para la medición de radiación y otras variables meteorológicas, se utilizó esta misma para la fijación de los equipos. En la Figura 1.6 se muestra que la plataforma cuenta con una superficie de malla metálica. Se aprovecha la misma estructura para el anclaje de los instrumentos, asegurando el emisor con pernos, tuerca y golillas.



Figura 1.6: Plataforma del Departamento de Matemática y Ciencia de la Computación

¹⁹ [Fenceline Monitoring | US EPA](#)



Figura 1.7: Fijación del equipo emisor con golillas a la plataforma

1.5.1.2 Instalación receptores

Para la instalación en el Edificio de Investigación Rector Eduardo Morales Santos fue necesario realizar una adecuación al lugar. Para este caso se armó una plataforma de concreto compuesta de nichos de cemento, pegamento industrial y pernos de anclaje para su elevación y rigidez. Junto con esto se construyó una caseta de madera para resguardar los componentes electrónicos de la plataforma DOAS, los analizadores y un computador, dentro de esta se armó un rack para la ubicación de estos. Además, se utilizó un tubo de plástico resistente para los trayectos en donde la fibra óptica quedaba expuesta en lugares de posible tránsito de personas.

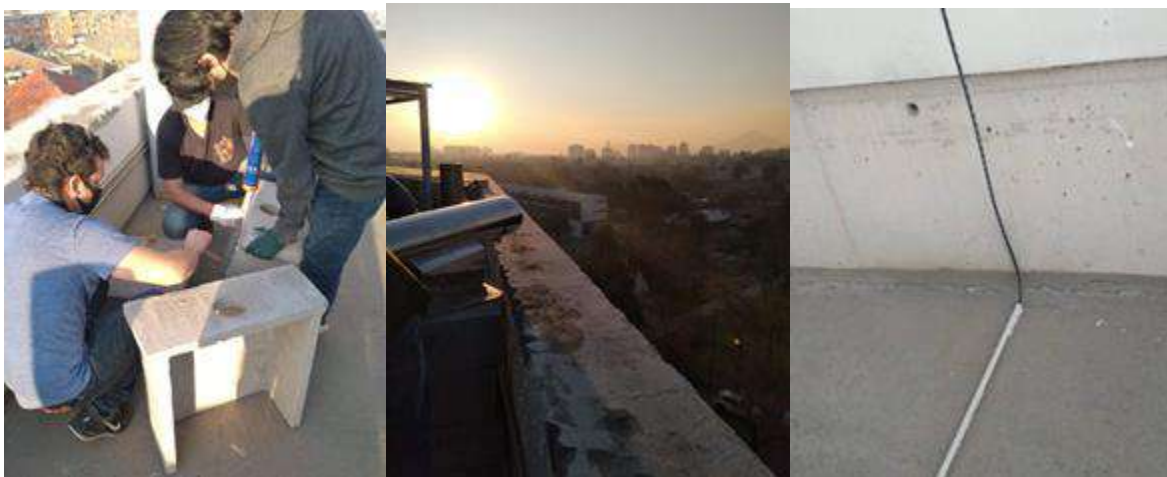


Figura 1.8: Construcción de la plataforma y protección de la fibra óptica.



Figura 1.9: Caseta en la azotea del edificio de investigación.



Figura 1.10: Rack con computadores y componentes electrónicos en el interior de la caseta.

1.5.1.3 Enfoque de emisor receptor

Este proceso se realizó en el atardecer para que la oscuridad del ambiente facilitara la visibilidad de luz del emisor. Durante esta fase todo el equipo llevo puesto gafas de seguridad con filtro UV. Para la alineación gruesa del par Emisor-Receptor se sueltan los pernos de la base para su movimiento horizontal y los pernos de los costados para su movimiento vertical.

16



Figura 1.11: Pernos de movimiento vertical a izquierda y pernos de movimiento horizontal a la derecha.



Figura 1.12: Calibración al atardecer, emisor apuntando al edificio de investigación.

Para la alineación fina se procede a sacar la pantalla delantera del cañón y mediante el uso de los pernos la lámpara de xenón o la fibra se desplaza. El perno inferior para el movimiento vertical, el lateral para el movimiento izquierda derecha y el delantero para el desplazamiento a lo largo del cañón. Este proceso se repite tanto para el emisor como para el receptor.

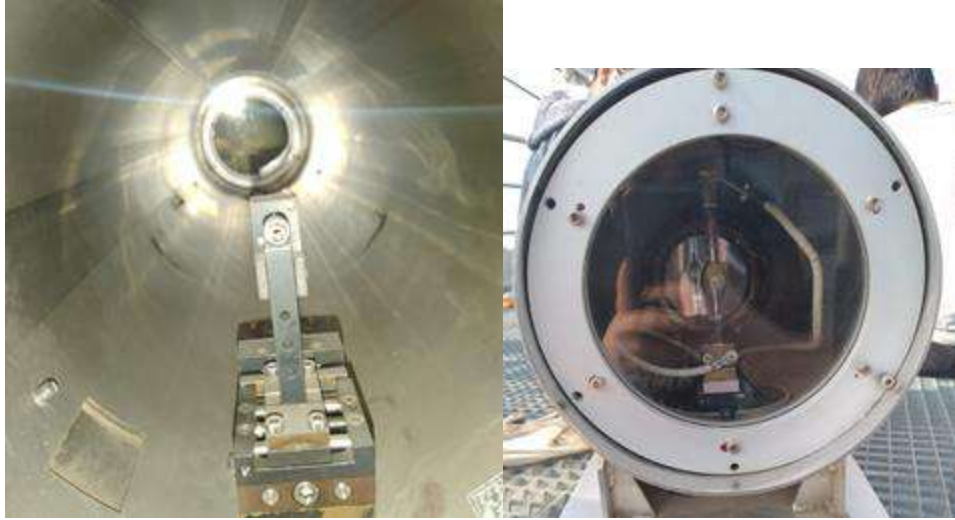


Figura 1.13: Partes delanteras del receptor y del emisor. En la parte inferior se observa los pernos de desplazamiento.

Para asegurar el máximo de luz en el receptor mediante el uso de un luxómetro se buscó el pico de intensidad, realizando ajustes con los pernos que fuesen necesarios.



Figura 1.14: Búsqueda del máximo de luz.

Posteriormente se inicializa el analizador a utilizar, se observan los datos como se presenta en la Figura 1.15.

#610 v7.21		24914; 2492	
Measuring: NH3, 1	00:20	Disk : 303.5 MB	RAM : 168 kB
Time : 17:28			
Path 1	400.0 m	21 °C	101.3 kPa
1	NH3	O3	SO2
Conc	-15.3 µg/m3	21.9 µg/m3	1.1 µg/m3
Dev	2.8 µg/m3	1.3 µg/m3	0.4 µg/m3
Lght	33.2 %	67.2 %	60.4 %
1	NO2	BEN	TOL
Conc	132.6 µg/m3	6.7 µg/m3	19.9 µg/m3
Dev	8.5 µg/m3	1.9 µg/m3	1.5 µg/m3
Lght	73.8 %	27.3 %	37.1 %
1	PM1	PM2.5	
Conc	7.4 µg/m3	8.2 µg/m3	
Dev	1.0 µg/m3	7.1 µg/m3	
Lght	37.1 %	37.1 %	

Figura 1.15: Pantalla con datos inmediatos de DOAS.

1.5.1.4 Régimen de operación

El funcionamiento del equipo DOAS tiene una dependencia según la hora del día, ya que luz del sol y la temperatura, además de otras variables meteorológicas tienden a afectar su eficiencia de operación. Para minimizar la pérdida de datos debido a estos factores, se realizaron ajustes periódicos durante las semanas de la campaña y en caso de eventos con pérdida de enfoque.

Este ajuste consiste en conectar el luxómetro al receptor del DOAS y nuevamente buscar el máximo de intensidad mediante el uso de los pernos que controlan el movimiento de la fibra óptica.

Junto con el reajuste de la luz, también se limpian las pantallas de los equipos para minimizar las pérdidas por la acumulación de polvo en estas.

Para seguimiento de los datos, el analizador del DOAS queda conectado a un computador con señal de internet, donde mediante el uso de software OPSIS EnviMan, es posible guardar los datos y conocer el estado del equipo.

La instalación de los equipos se realizó durante los días 15 y 16 de julio, para posteriormente empezar la medición el lunes 20 con una frecuencia de muestreo de 1 minuto.

Tabla 1.2: Calendario de los hitos durante la medición.

Evento	Fecha
Instalación (inicio)	15-07-2021
Instalación (fin)	16-07-2021
Inicio medición	20-07-2021
Visita control	30-07-2021
Visita control	08-08-2021
Visita control	16-08-2021
Visita control	20-08-2021

1.5.2 Tubos pasivos

Se definieron 11 puntos para ubicar los tubos pasivos, todas estas dentro de la ciudad de Santiago, pero en distintas comunas, todo con el fin de realizar un muestreo en torno al equipo DOAS ubicado en la Universidad de Santiago de Chile (Usach), comuna de Estación Central.

En la Tabla 1.3 se entrega la ubicación georreferenciada de los puntos de monitoreo escogidos junto con el nombre que se le adjudicó a cada uno. Las ubicaciones de los tubos pasivos se pueden ver en la Figura 1.16.

Tabla 1.3: Ubicación con coordenadas Geográficas.

Posición	Nombre	Longitud	Latitud
1	Cedenna	-70,6813640	-33,4498477
2	USACH: Departamento de matemáticas	-70,6827444	-33,4466817
3	Frontis Usach	-70,6801312	-33,4506310
4	AV. Portales con Las Sophoras	-70,6836108	-33,4441989
5	Calle Matucana con Agustinas	-70,6791812	-33,4437630
6	Gruta de Lourdes	-70,6866926	-33,4389084
7	El Belloto con Las Encinas	-70,6884245	-33,4494632
8	Exposición con Blanco Encalada	-70,6767323	-33,4584868
9	Estación SINCA Independencia	-70,6511586	-33,4221799
10	Estación SINCA Cerro Navia	-70,7320674	-33,4331515
11	Estación SINCA Parque O'Higgins	-70,6607660	-33,4641307

Los tres primeros puntos están ubicados en el campus de la Usach en Estación Central, como se describe a continuación.

1. **CEDENNA:** El primero se encuentra en la azotea (sexto piso) del edificio de investigación, también conocido como CEDENNA, que corresponde a las siglas del Centro para el Desarrollo de la Nanociencia y la Nanotecnología. Este se ubicó a 2,5 metros del piso de la azotea y aproximadamente a 5 metros de los receptores del equipo DOAS.
2. **Departamento de Matemáticas:** El segundo tubo pasivo se encontraba en la azotea del departamento de matemática, también correspondiente al sexto piso. Este estaba junto a los emisores del DOAS.
3. **Frontis Usach:** El tercer punto estaba ubicado en el Frontis de la universidad. El tubo fue instalado en un poste de luminaria a 3,5 metros de altura. Es importante destacar que esta ubicación se encuentra a unos 20 metros de una de las calles más concurridas de la capital, la avenida Libertador Bernardo O'Higgins, también conocida como la Alameda.

El resto de los otros puntos se ubicaron fuera del campus de la Universidad, con la finalidad de dar una imagen de lo que ocurre en los alrededores del sitio de medición DOAS.

4. **Portales con las Sophoras:** El punto número 4 corresponde a la intersección sur-poniente de la Av. Portales con calle Las Sophoras. El tubo se encontraba a unos 3,5 metros del suelo. Cabe destacar que la Av. Portales es una calle de alto flujo vehicular. También es importante nombrar la existencia del parque Quinta Normal a escasos metros de la ubicación, este es uno de los pulmones verdes de la ciudad.
5. **Matucana con Agustinas:** La ubicación número 5 es la intersección oriente entre Av. Matucana y calle Agustinas, una intersección de alto flujo vehicular. El tubo fue instalado en un poste de luminaria a unos 3,5 metros de altura, en el parque del bandejón central de la calle Agustinas.
6. **Gruta de Lourdes:** El tubo número 6, nombrado Gruta de Lourdes, corresponde a la intersección sur de la calle Santo Domingo con Calle Gruta de Lourdes. El tubo fue instalado en un poste de cableado eléctrico a unos 3,5 metros del suelo, a las afueras del parque Quinta Normal. Cabe destacar que la calle Santo Domingo es una arteria de flujo automovilístico medio-alto.
7. **El Belloto con Las Encinas:** La coordenada 7 corresponde a la intersección sur de la calle El Belloto con Las Encinas, a las afueras del departamento de ingeniería industrial de la Usach. El tubo se encontraba a unos 3 metros del suelo en un poste de cableado eléctrico. El flujo vehicular de la intersección es medio. A unos 350 metros se encuentra la autopista General Velásquez, de gran flujo.
8. **Exposición con Blanco Encalada:** El punto número 8 se encuentra en una plazoleta ubicada sobre el paso bajo nivel de Av. Blanco Encalada con Exposición. El tubo fue colocado en un poste de una luminaria a 3 metros sobre el suelo. Se destaca que esta ubicación es de alto flujo vehicular.

Los últimos tres puntos se encuentran en estaciones de monitoreo de calidad del aire a cargo del Ministerio de Medio Ambiente, con la siguiente descripción:

9. **Independencia:** El punto 9 corresponde a la Estación Independencia, ubicada a metros de la Av. La Paz, de alto flujo vehicular. El tubo se encontraba a 2 metros del suelo, escondido en la parte posterior de la estación, ya que esta había sido víctima de numerosos robos, esto dejaba al tubo a unos 25 metros de la arteria principal de la comuna.

- 10. Cerro Navia:** La ubicación 10 se encontraba en la Estación Cerro Navia, al interior del CESFAM Dr. Arturo Albertz. Este estaba a 1,6 metros del suelo. Una pared de material rígido separaba el tubo de la intersección de las calles Paula Jaraquemada con Las Siemprevivas, calles de bajo flujo vehicular. La arteria más transitada, se encontraba en el frontis del CESFAM, a unos 100 metros, la Av. Las Torres.
- 11. Parque O'Higgins:** Finalmente, la última ubicación, se encontraba en la Estación de Parque O'Higgins, al costado sur de la cúpula del Movistar Arena, frente a la explanada donde se realiza la parada militar. El tubo se encontraba a unos 3 metros del suelo. Cabe destacar que la estación se encuentra dentro de uno de los parques más grandes de Santiago y a unos 350 metros de la Ruta 5, autopista de altísimo flujo vehicular.

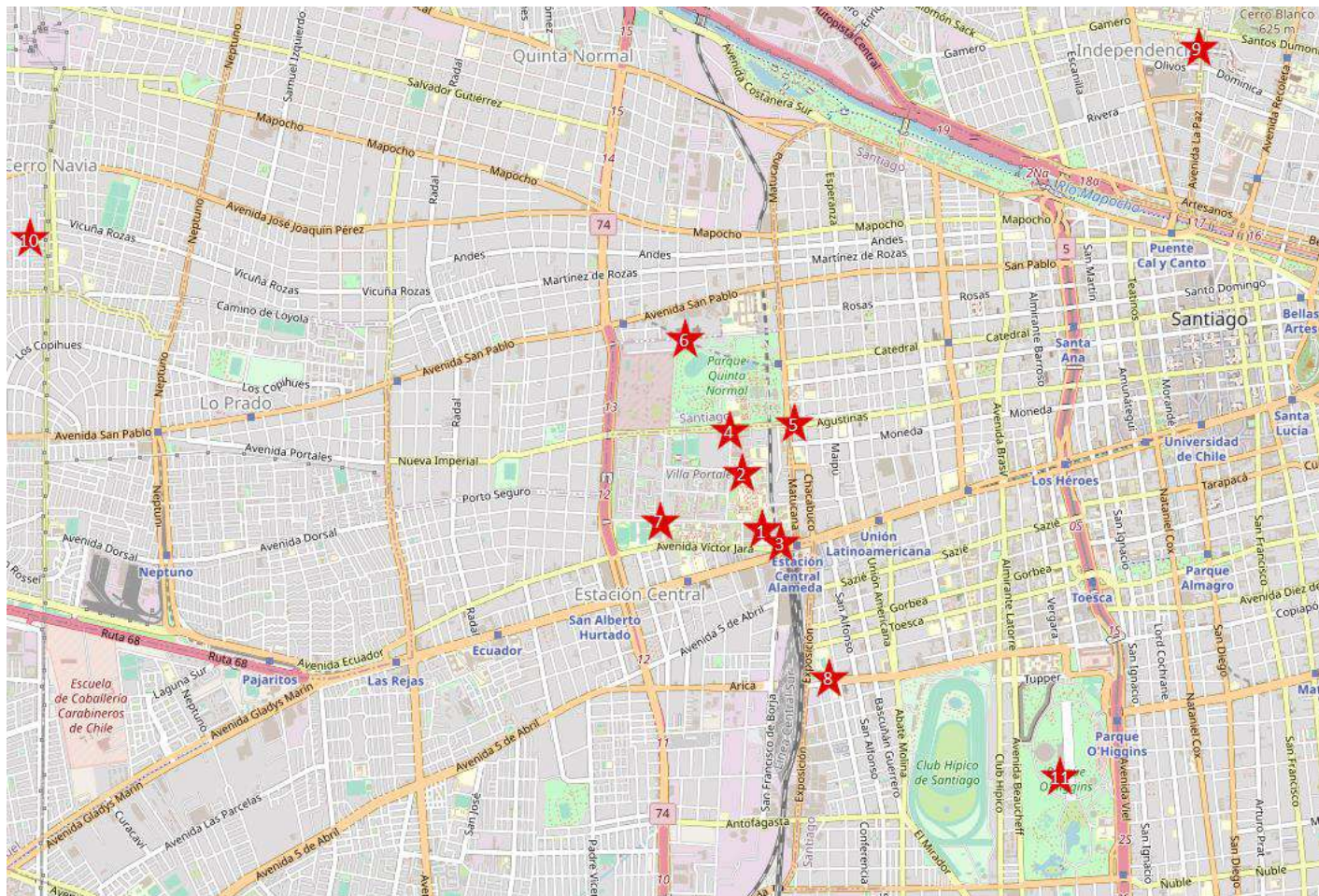


Figura 1.16: Distribución de los tubos pasivos en la ciudad de Santiago.

1.5.3 Sensores COVs

Cinco sensores Alphasense modelo PIH-AH2 son instalados en el Campus de la USACH. Se presenta en las siguientes tablas la información básica sobre el sitio de monitoreo e información de los nodos sensores instalados.

Tabla 1.4. Información de sitios, organización a cargo del monitoreo y nodos sensores instalados.

INFORMACIÓN DEL SITIO Y ORGANIZACIÓN A CARGO DEL MONITOREO	
Organización a cargo del monitoreo (Nombre, Tipo de organización, sitio web, numero de teléfono, email)	AIRFLUX, start up tecnológico Sistemas de Monitoreo Ambiental Inteligente www.airflux.cl contacto@airflux.cl Antonio Bellet 292 oficina 602 Providencia, Región Metropolitana, Chile
Sitio de monitoreo (Comuna, Ciudad, Latitud y Longitud)	Universidad Santiago de Chile (USACH) Estación Central, Región Metropolitana, Chile -33.44963759787314, -70.679780761376
Identificación del sitio	Departamento de Matemática
Marco de tiempo del monitoreo	3 de agosto - Actualidad

INFORMACIÓN DE SENSOR					
Fabricante y Modelo	Modelo sensor COV: Alphasense PID AH-2 (Model 000-0U22-AH2 Regulator Enabled (3.6-10/18V) STANDARD Krypton lamp).				
Versión de firmware del dispositivo	Nodo Airflux Modelo 2109				
Intervalo de tiempo de monitoreo	2 meses (1 mes los 5 sensores en el mismo lugar, posterior al mes se dispondrán separados en distintos puntos de Santiago Norponiente)				
Número de serie del sensor	AH2_COV20	AH2_COV21	AH2_COV22	AH2_COV23	AH2_COV24
¿Se encontraron problema durante la implementación?	Si		Breve resumen Problemas con el sensor de meteorología y desconexión en intervalo del Boron (2G-3G)		

Previo a la instalación de los nodos sensores fue necesario tomar algunas precauciones en torno a los componentes electrónicos. Enchufe múltiple y los transformadores fueron colocadas

dentro de una caja de protección eléctrica para exteriores (IP65), con el fin de protegerlos de la intemperie.

Los sistemas de medición (nodos sensores) se instalaron en la azotea del Departamento de Matemática y Ciencia de la Computación de la Universidad de Santiago de Chile, junto a los emisores del sistema DOAS.



Figura 1.17: Plataforma azotea del Departamento de Matemática y Ciencia de la Computación, donde se observa instalado el emisor del DOAS.

Fijación de la alimentación: Las cajas con la alimentación eléctrica fueron colocadas bajo la malla del suelo con el fin de que no estuvieran en una superficie continua y evitar la posible acumulación de agua en días de lluvia o mucha humedad, además de alejarla de los espacios transitados.



Figura 1.18: Cajas de protección eléctrica, vista desde arriba.

Fijación de nodos: Para los nodos se escogió la barandilla de seguridad a los lados de la plataforma, teniendo la precaución de que el sensor de COV estuviera en dirección hacia el

24

suelo para asegurar su protección frente a posibles lluvias. Los nodos fueron colgados con amarras plásticas, procedimiento habitual en la colocación de sistemas de medición de bajo costo.



Figura 1.19: Ubicación de los nodos en barandas de la plataforma en el Departamento de Matemática y Ciencia de la Computación.



Figura 1.20: Nodo sensor suspendido, donde se observa en el agujero inferior el sensor de COVs.



Figura 1.21: Posición final de los nodos, contiguos a los emisores del sistema DOAS.

Una vez encendido el nodo se habilita el seguimiento en línea, por lo que la actividad presencial no es requerida. En la Figura 1.22 se presenta los gráficos generados en tiempo real en la plataforma de visualización, con los datos detectados por los nodos. Los nodos se encuentran conectados a internet mediante red de celular.



Figura 1.22: Dashboard con datos entregados por los sensores.

1.6 Caracterización y justificación de sitios de monitoreo

Este apartado tiene como objetivo dar a conocer los criterios utilizados para la selección de los sitios de monitoreo con las metodologías de: “estaciones fijas” (DOAS), “indicativas” (tubos pasivos) y mediciones objetivas o bien exploratorias (Low cost sensor). Dado que se busca medir calidad del aire para exposición de la población, se buscaron lugares representativos que cumplan con las condiciones de la normativa de la Unión Europea.

Se buscaron sitios de monitoreo para la realización de las mediciones de forma tal que se ajuste a la definición de sitio con caracterización del tipo “calidad del aire” en base a la guía de la Directiva 2008/50 / EC *"sobre la calidad del aire ambiente y un aire más limpio para Europa"*. Específicamente se consideraron los criterios fijados en los apartados 2, 3 y 4 que tiene como objetivo proteger la salud de la población.

La Directiva 2005/50 establece requerimientos para la definición de áreas geográficas²⁰. Se destacan los siguientes criterios de evaluación y designación de zonas, las que responden la pregunta cómo y dónde medir.

- En todas las zonas donde el nivel de contaminantes rebasa el umbral superior de evaluación establecido para el contaminante, la evaluación de la calidad del aire ambiente se efectuará mediante mediciones fijas. Esas mediciones fijas podrán complementarse con técnicas de modelización y/o mediciones indicativas con el fin de aportar información adecuada sobre la distribución espacial de la calidad del aire ambiente. Los umbrales de evaluación para benceno fueron señalados en la Figura 1.1. *Las superaciones de los umbrales superior e inferior de evaluación se determinarán en relación con las concentraciones medidas durante los cinco años anteriores, cuando se disponga de datos suficientes. Un umbral de evaluación se considerará superado si se ha superado durante al menos tres de esos cinco años anteriores.*
- En todas las zonas donde el nivel de contaminantes se encuentre por debajo del umbral superior de evaluación establecido para esos contaminantes, la evaluación de la calidad del medio ambiente podrá efectuarse mediante una combinación de mediciones fijas y técnicas de modelización y/o mediciones indicativas.
- En todas las zonas donde el nivel de contaminante se encuentre por debajo del umbral inferior de evaluación establecido para este contaminante, será suficiente con utilizar técnicas de modelización o de estimación objetiva, o ambas, para la evaluación de la calidad del aire ambiente.

Puntos de muestreo

La ubicación de los puntos de muestreo para la medición de benceno se determinó empleando los criterios recogidos en el anexo III de la Directiva 2005/50, con el siguiente detalle

²⁰ Áreas geográficas con densidad de población que requieren ser evaluados los niveles de concentración de los contaminantes criterios.

1. La ubicación de los puntos de muestreo destinados a la protección de la salud humana deberá determinarse de manera que proporcione datos sobre:
 - Las áreas situadas dentro de zonas donde se registren las concentraciones más altas a las que la población puede hallarse directa o indirectamente expuesta durante un período significativo en relación con el período considerado para el cálculo del valor o valores límite.
 - Los niveles de contaminación en otras áreas situadas dentro de zonas y aglomeraciones que sean representativas de la exposición de la población en general.
2. En general, la ubicación de los puntos de muestreo deberá ser tal que evite que se midan los microambientes muy pequeños en sus proximidades, lo que significa que los puntos de muestreo deberán estar ubicados de manera que sean, en la medida de lo posible, representativos de la calidad del aire de un segmento de calle no inferior a 100 m de longitud en los emplazamientos de tráfico y de al menos 250 m x 250 m en los emplazamientos industriales;
3. Las estaciones de fondo urbano (Background Urbano) deberán ubicarse de forma que su nivel de contaminación refleje la contribución procedente de todas las fuentes situadas a barlovento de la estación. El nivel de contaminación no debe estar dominado por una sola fuente salvo en el caso de que tal situación sea característica de una zona urbana más amplia. Por regla general, esos puntos de muestreo deberán ser representativos de varios kilómetros cuadrados;
4. Cuando el objetivo sea evaluar los niveles rurales de fondo, los puntos de muestreo no deberán estar influidos por las aglomeraciones o los emplazamientos industriales de los alrededores, es decir los situados a menos de cinco kilómetros;
5. Cuando se desee evaluar las aportaciones de fuentes industriales, al menos un punto de muestreo se instalará a sotavento de la fuente en la zona residencial más cercana. Cuando no se conozca la concentración de fondo, se situará un punto de muestreo suplementario en la dirección dominante del viento;
6. En la medida de lo posible, los puntos de muestreo serán también representativos de ubicaciones similares que no estén situadas en su proximidad inmediata;
7. Se tendrá en cuenta la necesidad de ubicar puntos de muestreo en islas cuando la protección de la salud humana así lo exija (Exista asentamientos urbanos).

Dependiendo del número de habitantes dentro de una determinada zona, la directiva establece requisitos mínimos sobre el número de puntos de seguimiento indicativos o fijos que deben existir dentro del área. Sin embargo, nada impide que se aplique un esquema de evaluación más ambicioso, incluso si las concentraciones reales de contaminantes están por debajo de los umbrales relevantes: la directiva de la UE solo establece requisitos mínimos y los estados miembros pueden optar por aplicar un enfoque de monitoreo más estricto.

Se consideró la selección del sitio de monitoreo USACH bajo el concepto de “estación fija” que acuña la regulación europea debido a las siguientes razones:

- Representa un adecuado sitio de monitoreo para tener mediciones representativas de la exposición poblacional a las concentraciones de COV's (BTEX).
- Cumple con la característica de condición de Background Urbano.

- En base a información de calidad del aire por BTEX previamente recolectada y entregada en informes anteriores, y dado que las principales fuentes emisoras corresponde a tráfico vehicular, se consideró más apropiado realizar la campaña de en el centro Santiago (megaciudad) donde se espera un impacto relevante de las fuentes de emisión y por ende mayor nivel de concentración.
- Se privilegió la implementación de la campaña durante los meses en donde se espera el máximo nivel de concentración (Basado en información previa recolectada).

Adicionalmente el sitio de monitoreo USACH cumple con las condiciones de seguridad y accesibilidad para la realización de la campaña.

La ubicación de los tubos pasivos se realizó siguiendo los requerimientos de la regulación Europea, con los siguientes propósitos

- Comparar resultados entre distintos tipos de tecnologías utilizadas internacionalmente (DOAS y tubos pasivos)
- Complementar la información generada por el sitio de monitoreo fijo (DOAS), especialmente dando una imagen de lo que ocurre en los alrededores de la estación.
- Tener valores representativos en estaciones de la Red Macam (3) y así ampliar la información de exposición poblacional.

Con respecto a la instalación de los sensores o Low Cost Sensors de COV, cabe mencionar que es una tecnología exploratoria que está en evolución constante. Para propósitos del presente estudio se consideró apropiado incluir esta tecnología en la comparación con las otras dos metodologías ya mencionadas con la finalidad de entregar una guía de los pasos a seguir para su correcto uso, ilustrando sus ventajas e ilustrar y delimitar sus márgenes de aplicación.

En este proyecto se realizaron todas las etapas detalladas en el ANEXO II: Guía de uso correcto de sensores para el monitoreo de calidad del aire, (AQMD, 2021) y los sensores elegidos fueron validados en paralelo a la tecnología DOAS considerada en sus siglas en inglés como; federal reference or federal equivalent instruments (FRM, FEM), para determinar y evaluar su rendimiento como tecnología de monitoreo exploratoria o alternativa en aquellos sitios que según los resultados obtenidos lo permitan, siguiendo rigurosamente las consideraciones metodológicas que la autoridad ambiental de Estados Unidos sugiere (AQMD y US-EPA).

El protocolo a seguir para reportar los resultados de sensores fue el “Protocolos de prueba de rendimiento, métricas y valores objetivo para sensores de aire: uso en aplicaciones de monitoreo informativo, complementarias y no reglamentarias, en exteriores y en sitios fijos”,²¹ de la US-EPA, a modo de tener una metodología validada por la autoridad ambiental de Estados Unidos para evaluar el rendimiento de los sensores utilizados.

²¹ https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?dirEntryId=350785&Lab=CEMM

Un extracto del template o protocolo utilizado se presenta en la siguiente figura. Considerar que este ejemplo está desarrollado para el contaminante MP2,5, pero es válido como protocolo para cualquier contaminante a evaluar. El template completo se presenta en el ANEXO III: “Protocolos de prueba de rendimiento, métricas y valores objetivo para sensores de aire: uso en aplicaciones de monitoreo informativo, complementarias y no reglamentarias, en exteriores y en sitios fijos”

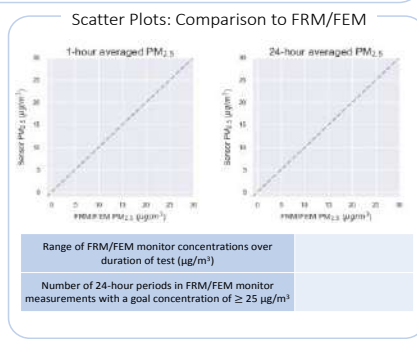
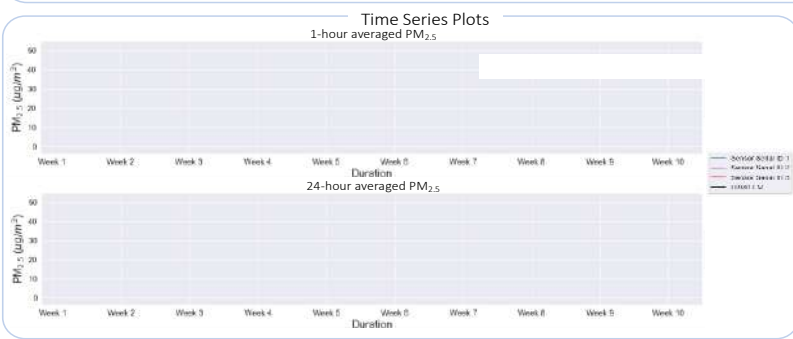
Testing Report – Base Testing
 Manufacturer & Air Sensor Name

Deployment Number
 Testing Organization
 Contact Email / Phone Number
 Date

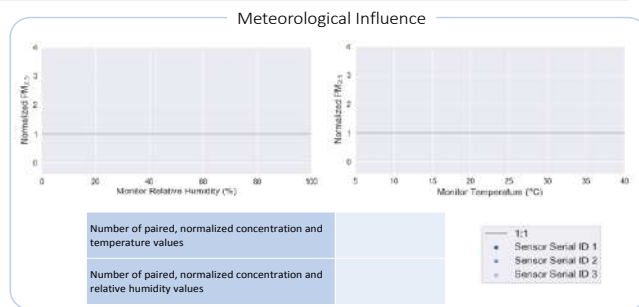
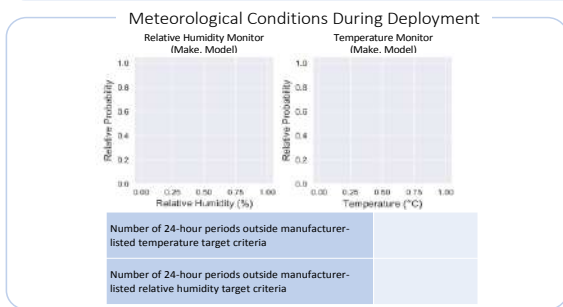
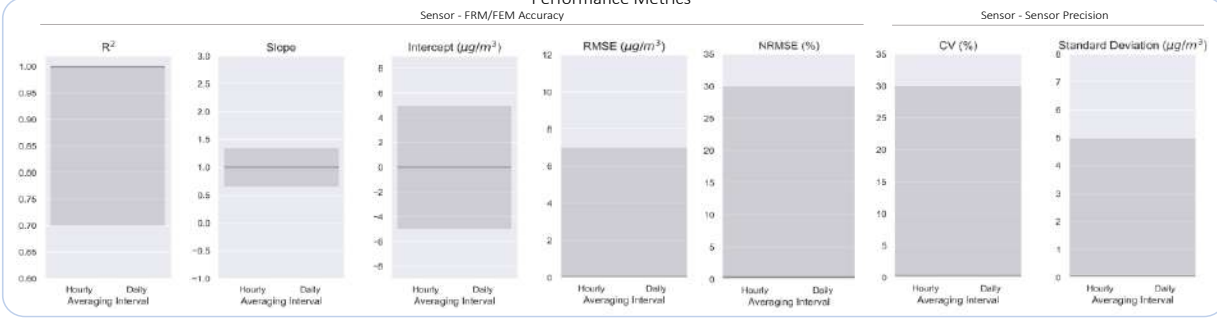


Deployment Details

Testing Organization and Site Information		Sensor Information			FRM/FEM Monitor Information	
Testing organization (Name, Organization Type, Contact website / phone number / email)		Manufacturer, model			Manufacturer, model	
Testing location (City, State, Latitude & Longitude)		Device firmware version			Sampling time interval	
AQS site ID		Sampling time interval			Date of calibration	
Sampling timeframe		Sensor serial numbers	#1	#2	#3	Date of flowrate verification check
		Issues encountered during deployment?	<input type="checkbox"/> Brief summary of issues			Description, date(s) of maintenance activities



Performance Metrics*



*For evaluations with greater than three sensors, grouping individual sensor metrics into boxplots is recommended for displaying results. Note that this recommendation does not apply to metrics computed as a single value for all sensors over the whole evaluation group, such as RMSE, NRMSE, CV, and standard deviation.

Figura 1.23: Plantilla tipo de reporte de prueba - base de $PM_{2.5}$. Fabricante y nombre del sensor de aire y métricas de calibración de dispositivos.

2 c.2. El consultor dará inicio a la campaña de monitoreo una vez llegado al consenso de la metodología a utilizar con la contraparte técnica.

Inicialmente la campaña de monitoreo estaba programada para realizarse durante el mes de enero y febrero del año 2021, sin embargo, debido a restricciones de movilidad y acceso por pandemia COVID 19, se retrasaron las actividades de terreno.

De común acuerdo con la contraparte técnica del estudio se escogió la Universidad de Santiago como sitio de instalación para el desarrollo de la campaña de monitoreo. La configuración de monitoreo de la campaña se entrega en la Figura 2.1. Dos puntos de monitoreo con tubos pasivos se instalaron a lo largo del camino óptico del DOAS para permitir comparación entre ambas tecnologías, mientras que 6 puntos adicionales fueron utilizados en los alrededores para evaluar gradientes de concentración en los alrededores del sitio de monitoreo. Finalmente, tres puntos de monitoreo fueron instalados en las estaciones MACAM oficiales de Independencia, Parque O'Higgins y Cerro Navia.

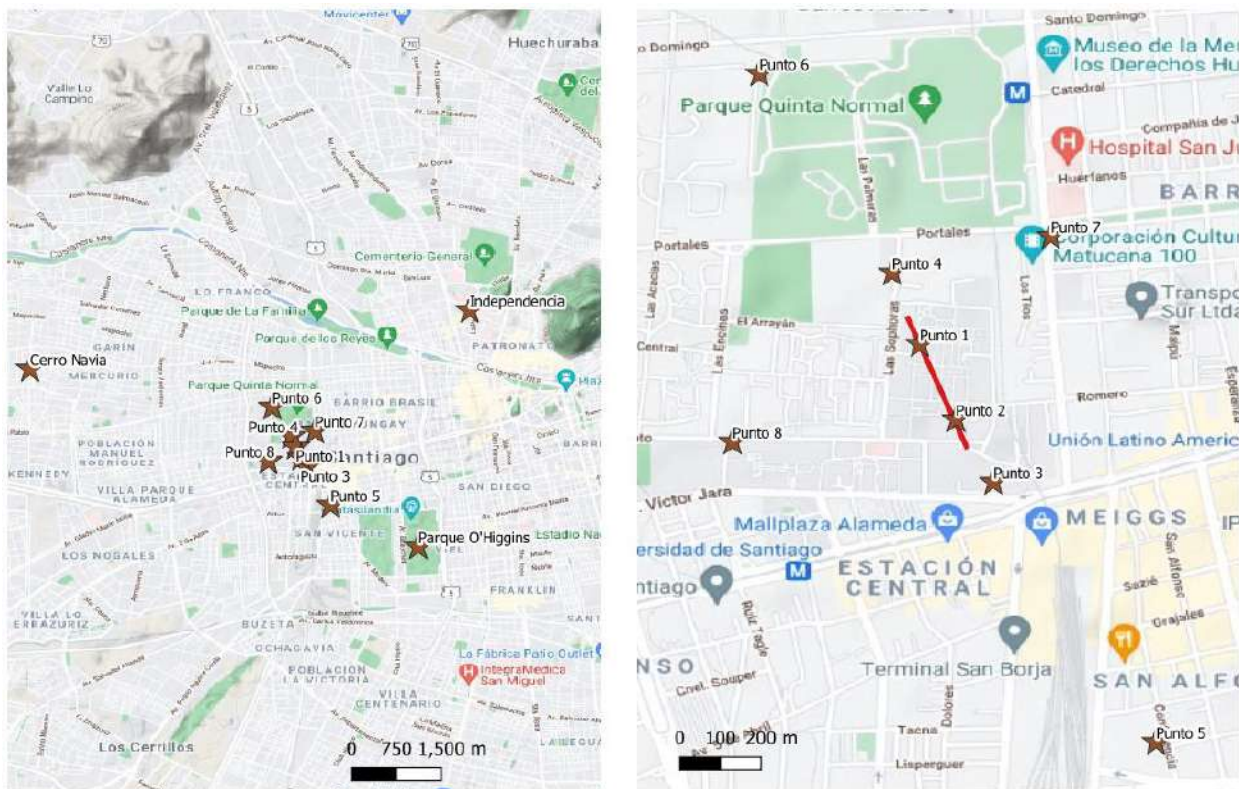


Figura 2.1: Configuración campaña de monitoreo. Estrellas corresponden a puntos de monitoreo con tubos pasivos. Línea roja indica path óptico asociado a la medición con equipo DOAS.

3 c.3. A partir de los resultados de la campaña de monitoreo de COVs el consultor realizará una recomendación del tipo de monitoreo a realizar (continuo o discreto), entregando opciones de equipos de medición.

3.1 Resultados de la campaña

3.1.1 Tubos pasivos

La campaña de instalación comenzó el día 21 de Julio del 2021, con la exposición de los primeros 11 tubos pasivos (uno en cada ubicación seleccionada). Tras 14 días y tal como lo recomendó el fabricante (IVL), los tubos fueron retirados y cambiados por otra tanda de tubos, tomando toda la rigurosidad y precauciones del informadas por el fabricante.

Los resultados a disposición en este informe corresponden a las dos primeras tandas de un total de cuatro. En la Tabla 3.1 se entrega la concentración promedio de ambas tandas, medidas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para distintos compuestos volátiles. Cabe destacar que todas las medidas se encuentran sobre el límite de cuantificación por lo que son medidas confiables. Los resultados de la campaña señalan que existen concentraciones altas de Benceno, cercanas al valor de la normativa europea, especialmente en la estación de Cerro Navia. En la Figura 3.1-Figura 3.2 se entregan las isolíneas de concentración de Benceno y Tolueno respectivamente²². Al mirar en perspectiva con los mapas se percibe la influencia de la altura de medición en los tubos muestreadores ubicados en las azoteas de los edificios de Cedenna y Matemática (bajas concentraciones), en tanto que el resto de los otros tubos alrededor de ellos muestran mayores o iguales concentraciones.

Tabla 3.1: Concentración promedio en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

N°	Nombre	Benceno	Tolueno	n-octano	Etilbenceno	m,p-xileno	o-xileno	n-nonano
1	Cedenna	2,55	14,00	0,80	5,75	21,00	7,00	2,15
2	Departamento de matemáticas	2,60	17,50	0,99	5,00	18,50	6,20	1,80
3	Frontis Usach	3,75	22,50	1,07	7,75	27,00	9,30	3,25
4	Portales con Las Sophoras	3,75	18,50	0,80	6,15	22,00	8,05	2,60
5	Matucana con Agustinas	3,95	19,00	1,24	6,10	22,50	7,75	2,30
6	Gruta de Lourdes	3,35	15,00	0,88	6,40	23,00	8,05	2,50
7	El Belloto con Las Encinas	3,45	20,00	1,00	6,20	23,50	7,85	2,30
8	Exposición con Blanco Encalada	3,90	26,00	1,45	9,10	34,00	11,25	3,10
9	Estación Independencia	3,70	28,50	0,92	6,10	21,50	7,55	2,65
10	Estación Cerro Navia	5,00	25,00	1,28	8,85	33,00	11,15	4,35
11	Estación Parque O'Higgins	2,75	17,50	0,87	5,75	22,00	7,20	1,75

²² Se realiza una interpolación de isolíneas mediante un algoritmo que calcula cada punto promediando los datos ponderándolos por la inversa de la distancia a cada uno.

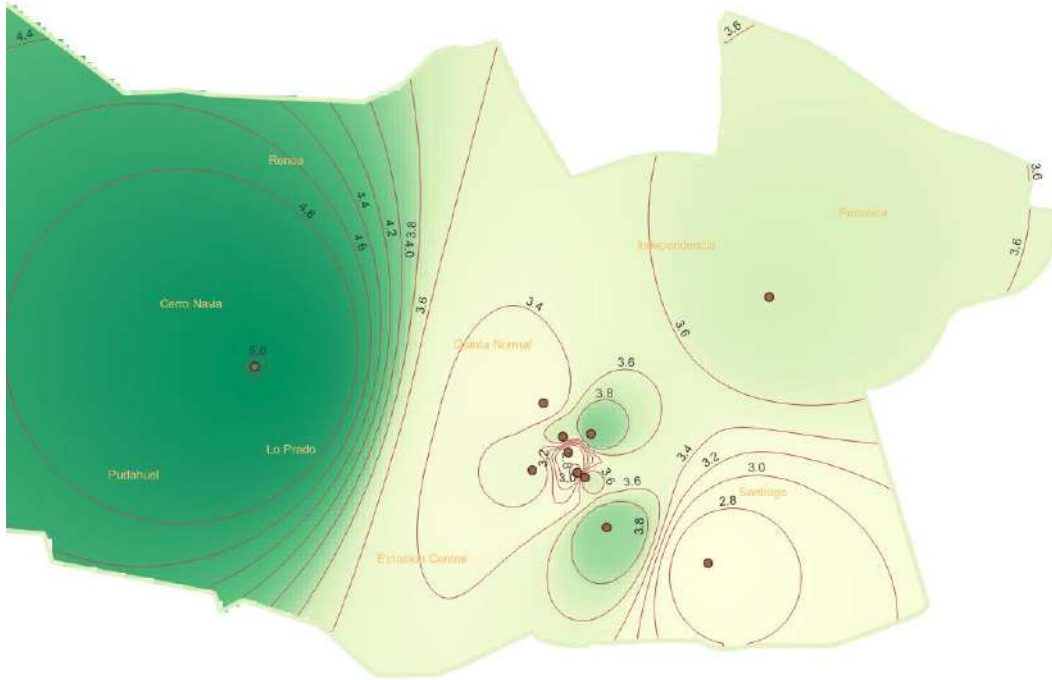


Figura 3.1: Benceno

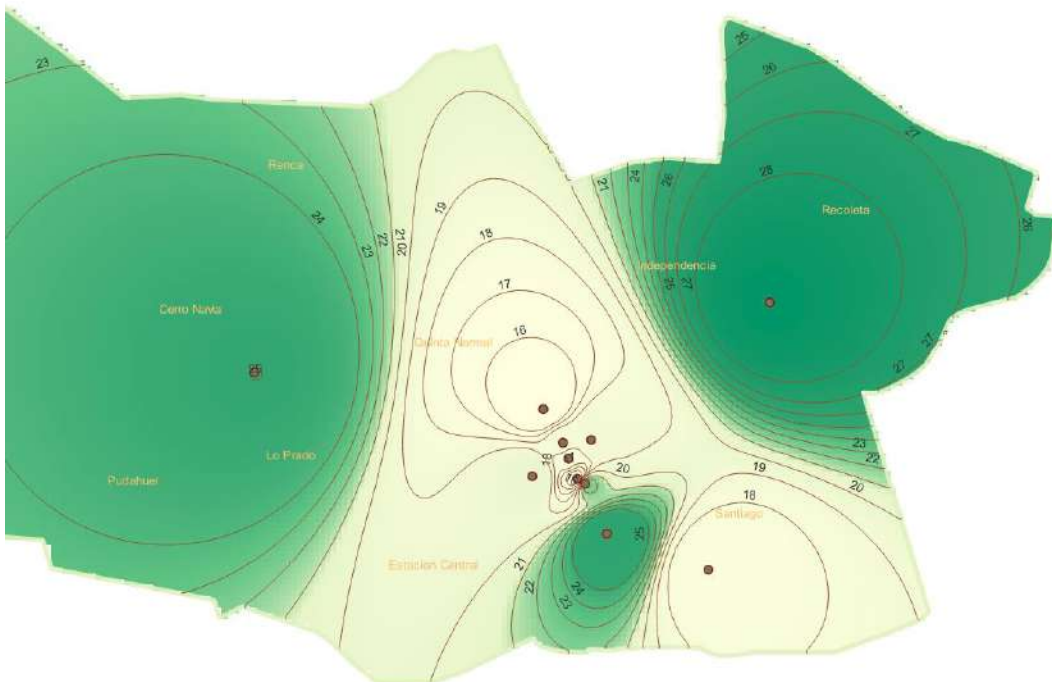


Figura 3.2: Tolueno

Para ilustrar mejor el predominio de cada fuente emisora en cada tubo, se ha graficado la composición relativa de Benceno/Tolueno/Etil-Benceno en un gráfico ternario. En la Figura 3.3

34

se entrega un modelo presentado por ZHANG ET AL. 2016 donde se agrupan tres categorías de fuentes: 1) combustión de biomasa/biocombustibles/carbón, que están caracterizados por una fracción significativamente mayor de benceno; 2) emisiones de tráfico vehicular, el cual muestra fracciones mayores de tolueno debido a emisiones de escape de vehículos a gasolina y evaporación de gasolina; y 3) procesos industriales y aplicación de solventes, los cuales están caracterizados por altas fracciones de tolueno y etilbenceno. Se construyeron gráficos ternarios para la campaña de monitoreo, y se ilustran en la Figura 3.4-Figura 3.5. Se logra observar que casi todos los puntos de monitoreo tienden a converger a una misma posición en el gráfico ilustrando que prácticamente todos están respondiendo al mismo tipo de fuente(s) emisora(s). La posición en el gráfico y la comparación con niveles de referencia Figura 3.3 señala el predominio de emisiones de tráfico vehicular. Estos resultados son congruentes con los encontrados en campañas de monitoreo anteriores realizados en Santiago (Figura 3.6).

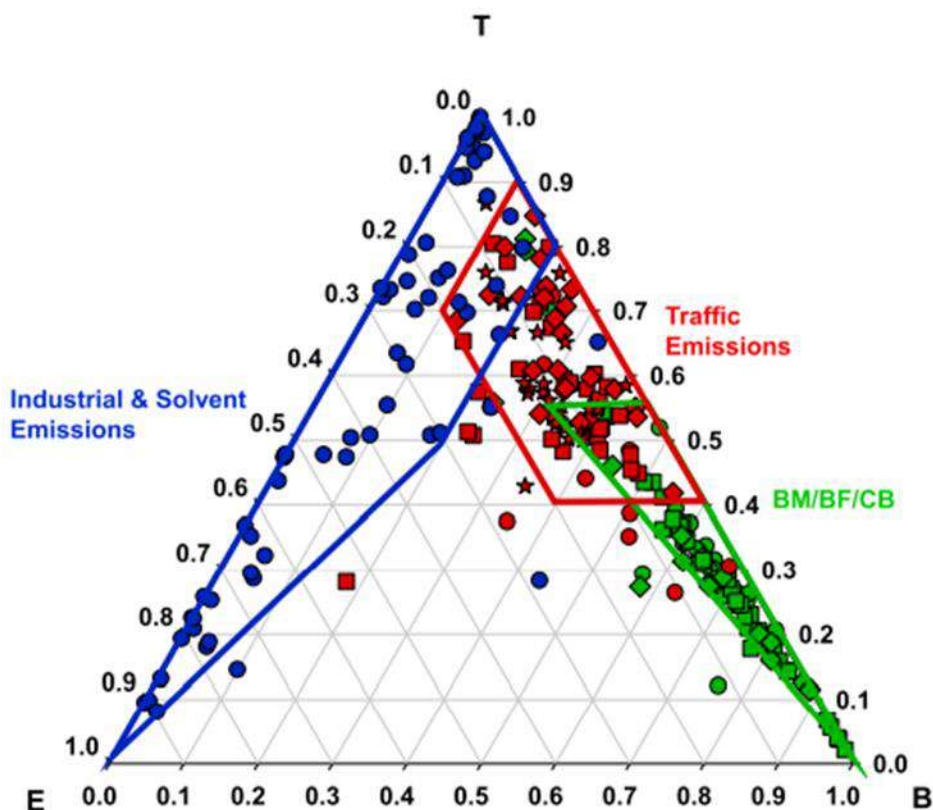


Figura 3.3: Proporción ilustrativa relativa de Benceno (B), Tolueno (T) y Etilbenceno (E) para diferentes tipos de fuentes emisoras. "BM/BF/CF" indica combustión de biomasa/biocombustible/carbón. Fuente: (Zhang et al., 2016)

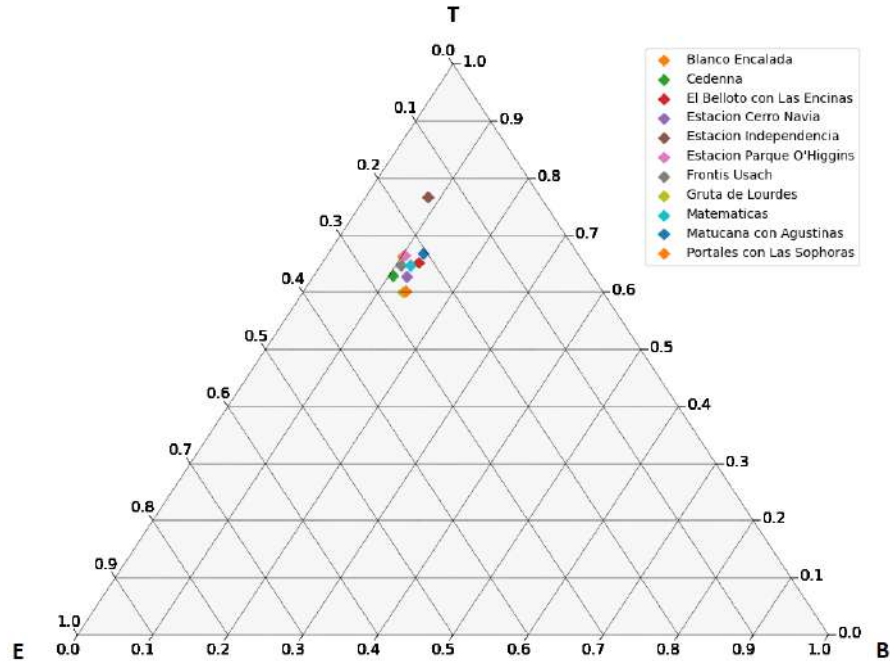


Figura 3.4: Gráfico ternario para la concentración de Tolueno, Benceno y Etilbenceno de la primera tanda de mediciones

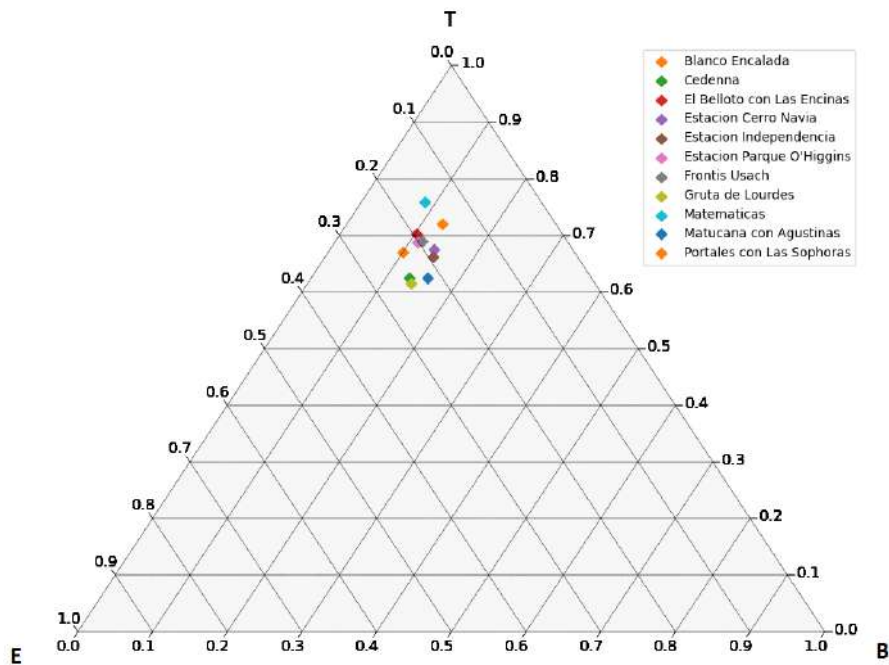


Figura 3.5: Gráfico ternario para la concentración de Tolueno, Benceno y Etilbenceno de la segunda tanda de mediciones.

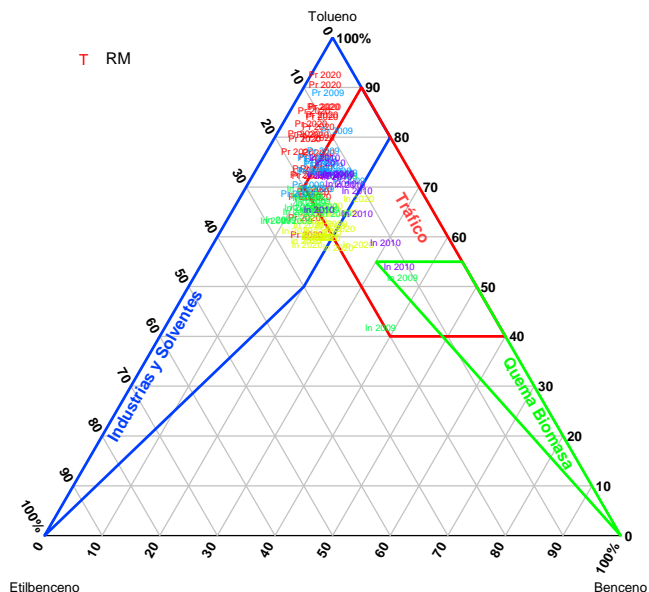


Figura 3.6: Gráficos ternarios B/T/E para la RM campañas antiguas de BTEX. Ve: indica Campaña de Verano, Pr indica campaña Primavera.

3.1.2 DOAS

El sistema DOAS OPSIS AB utilizado en la campaña de monitoreo estuvo configurado para entregar resultados de concentración de gases según el siguiente esquema.

Tabla 3.2: Resumen de variables detectables por el equipo DOAS.

Contaminante	Variable medible	Certificado
Amoniaco (NH ₃)	Concentración Desviación estándar Porcentaje de Luz	×
Ozono (O ₃)	Concentración Desviación estándar Porcentaje de Luz	✓
Dióxido de azufre (SO ₂)	Concentración Desviación estándar Porcentaje de Luz	✓
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Concentración Desviación estándar Porcentaje de Luz	✓
Benceno (BEN)	Concentración Desviación estándar	✓

Contaminante	Variable medible	Certificado
	Porcentaje de Luz	
Tolueno (TOL)	Concentración Desviación estándar Porcentaje de Luz	✓
Paraxileno (PXY)	Concentración Desviación estándar Porcentaje de Luz	✓
Etilbenceno (ETB)	Concentración Desviación estándar Porcentaje de Luz	✓

Posterior a la detección de luz, el analizador del DOAS realiza una conversión desde la intensidad de la luz a la concentración. Sin embargo, la intensidad de la luz se ve alterada por la longitud del camino óptico más la pérdida de luz debida a las variables meteorológicas. Es por esto que además de la luz y la concentración, se obtiene una variable de desviación estándar que ayuda a conocer la certeza de la medición dependiendo de la cantidad de luz detectada.

Para asegurar la calidad en los datos se procede a graficar el porcentaje de luz versus la desviación estándar, este procedimiento es el recomendado en las guías de uso del fabricante. Al presentar los datos de esta forma se observa una curva, en donde la parte superior presenta una inclinación hacia la derecha continua y en el extremo inferior una dispersión asociada al ruido. Partiendo de la zona donde predomina el ruido se procede a subir entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{3}$ de la curva para encontrar el porcentaje de luz mínimo recomendado. Estos gráficos se presentan en la Figura 3.7-Figura 3.10. Observando los gráficos se determina que el ruido se torna predominante bajo el 5% de luz, se procede a subir un tercio de la curva y se obtiene que superior al 15% de luz los datos son confiables. En ocasiones el equipo entregará concentraciones negativas, esto se debe a que las concentraciones que se trabajan están por debajo del umbral de detección del equipo.

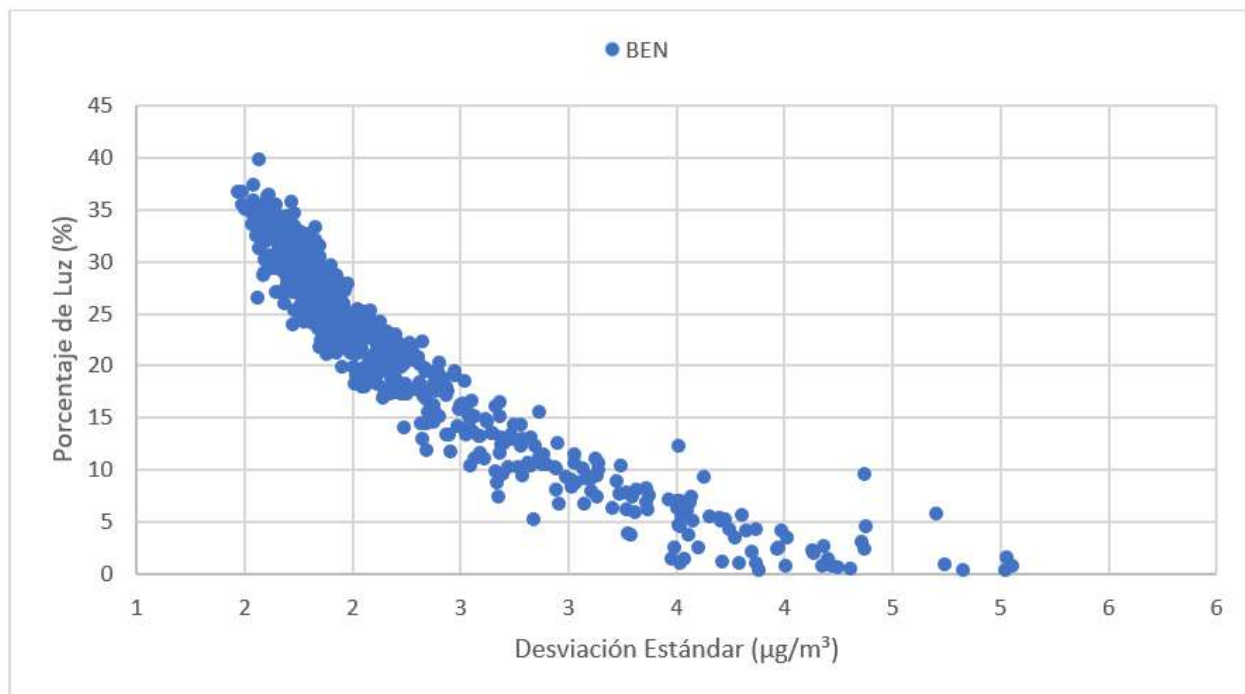


Figura 3.7: Gráfico de luz versus desviación estándar para benceno.

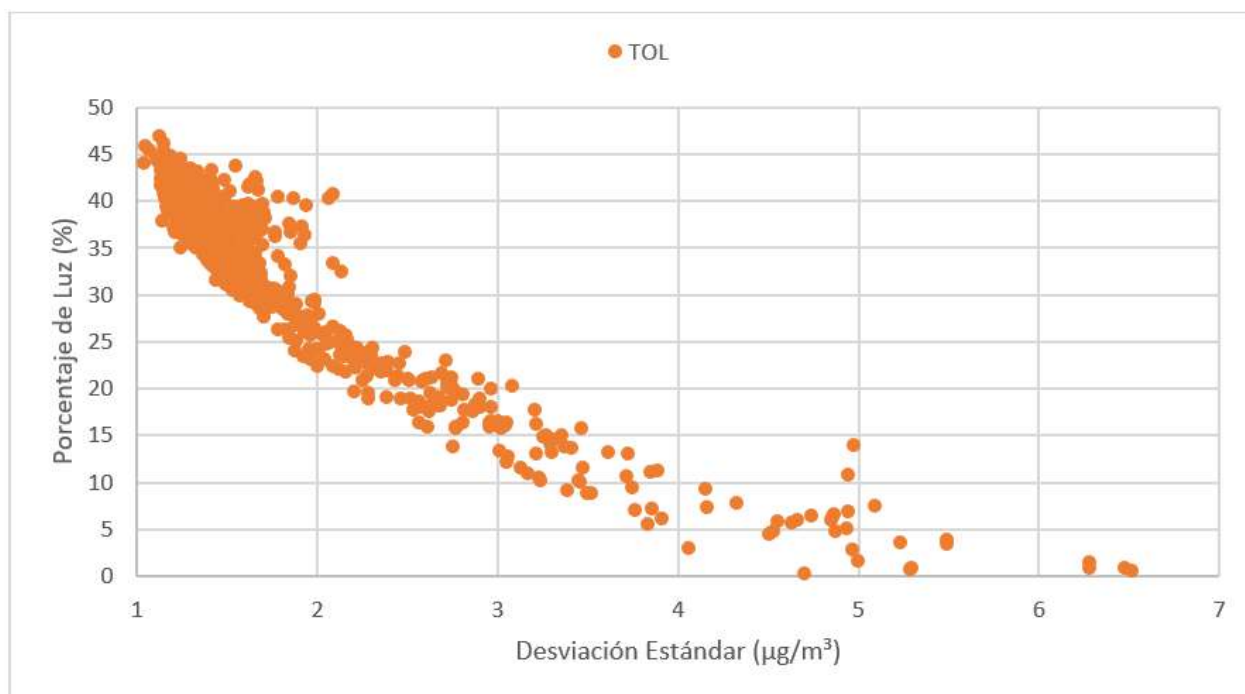


Figura 3.8: Gráfico de luz versus desviación estándar para tolueno.

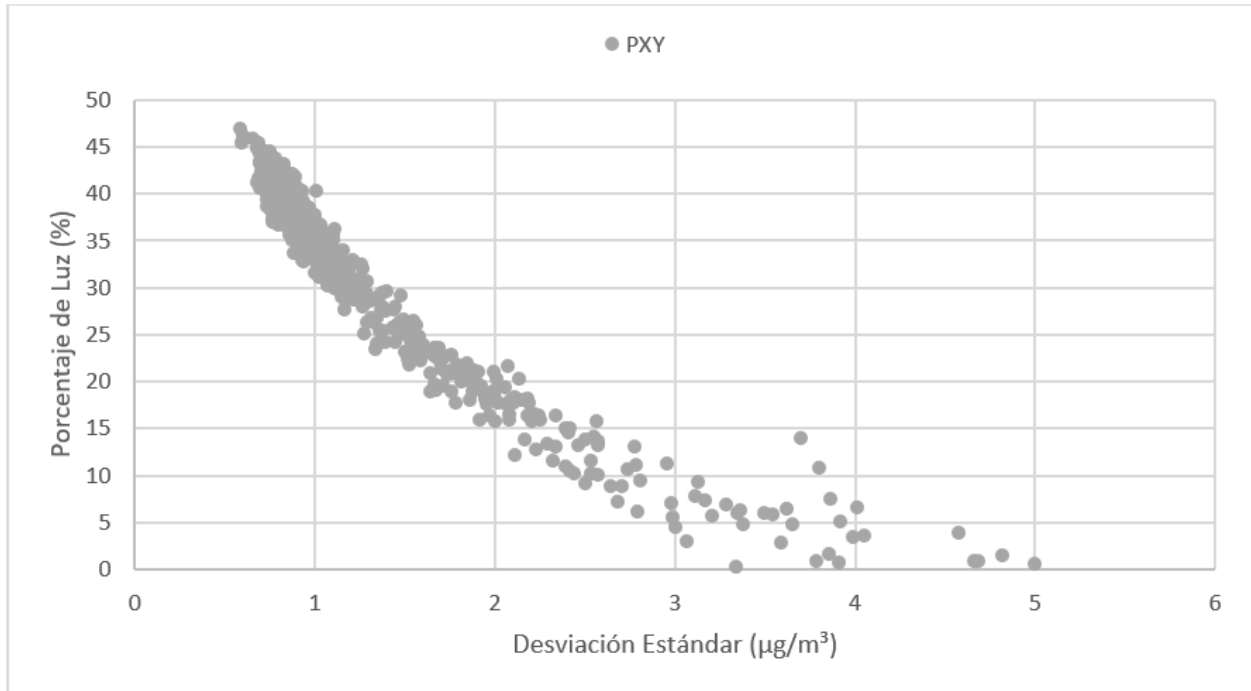


Figura 3.9: Gráfico de luz versus desviación estándar para paraxileno.

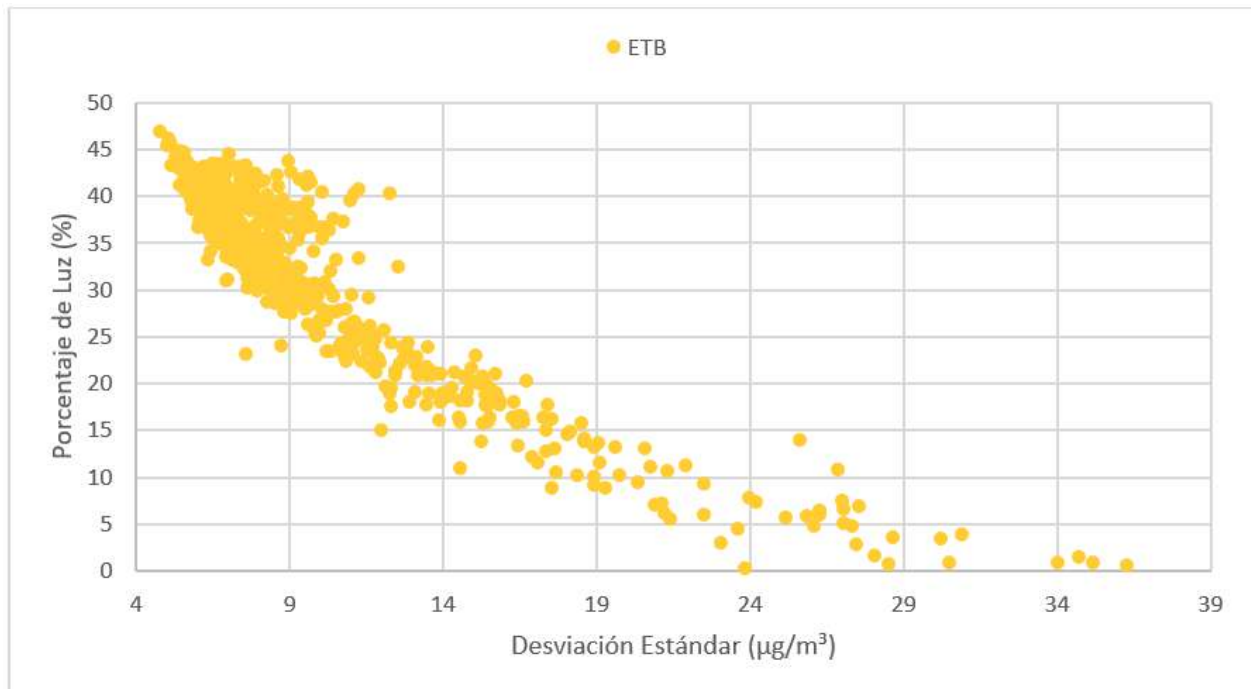


Figura 3.10: Gráfico de luz versus desviación estándar para etilbenceno.

En los siguientes gráficos se presentan las series temporales de los distintos contaminantes luego de haber realizado el filtro de porcentaje de luz indicado.

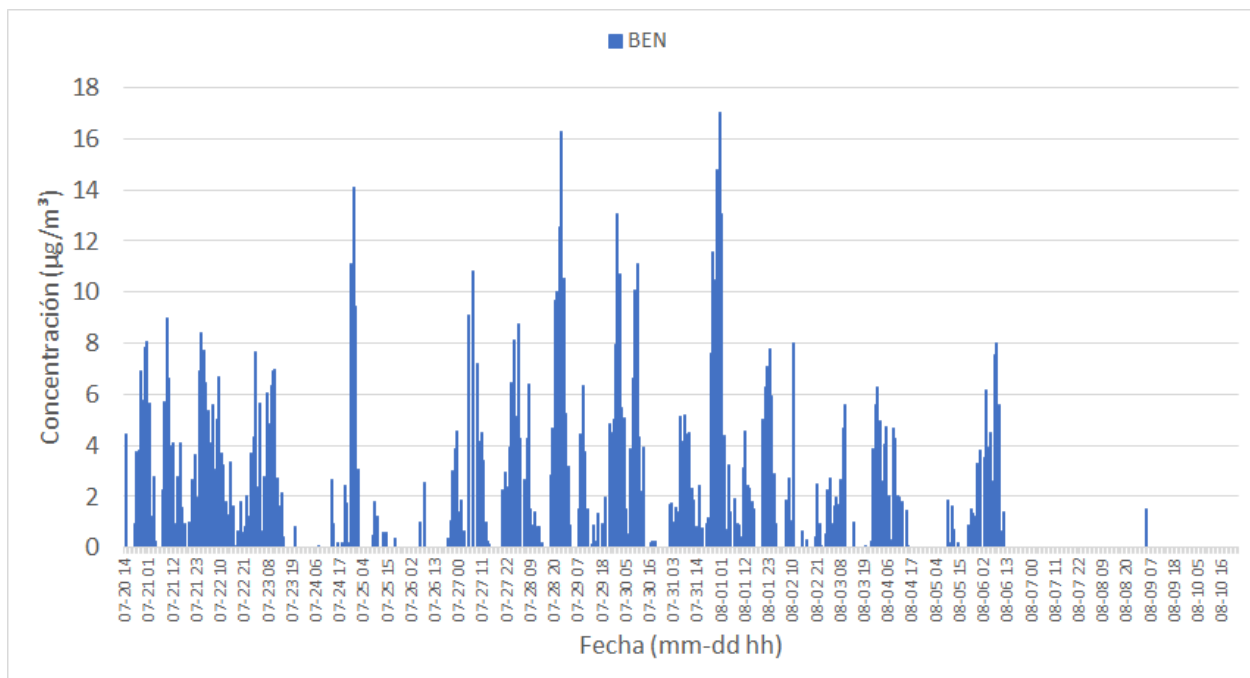


Figura 3.11: Serie temporal del benceno en promedio horario.

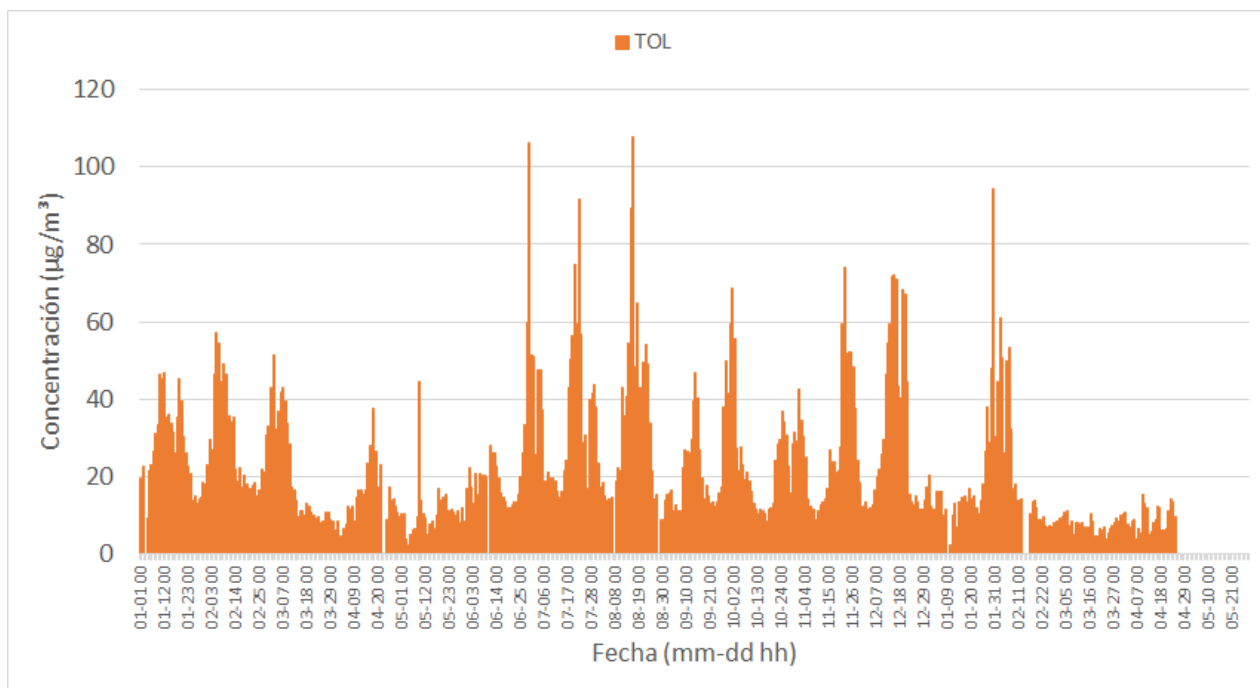


Figura 3.12: Serie temporal del tolueno en promedio horario.

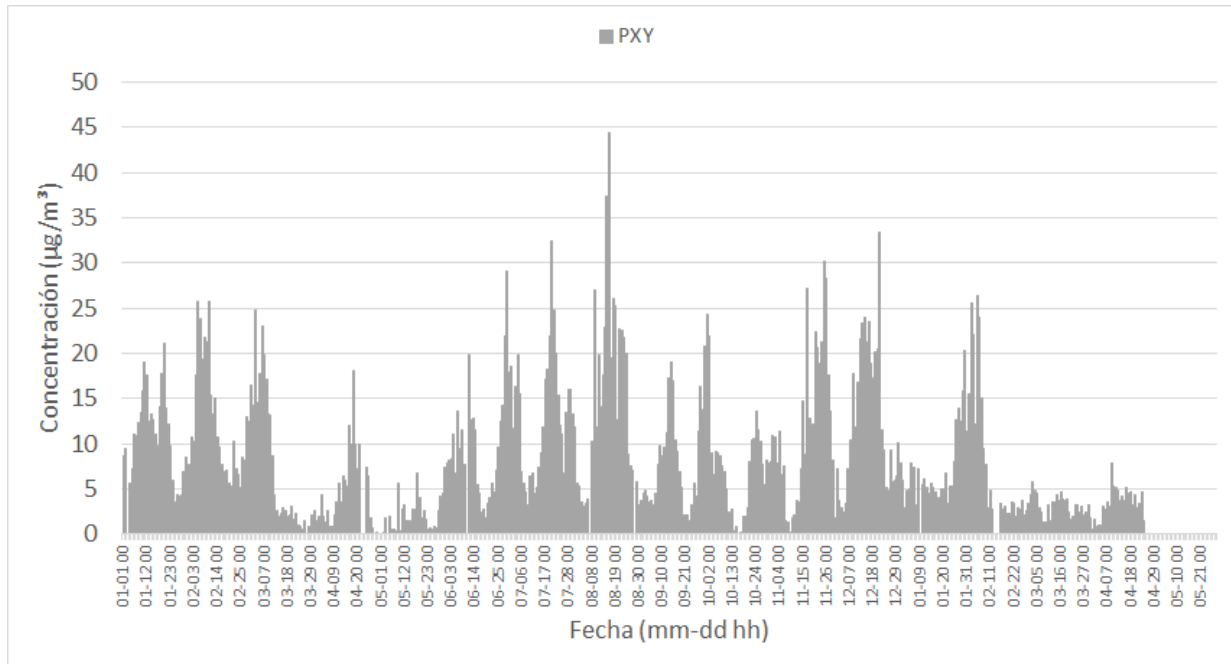


Figura 3.13: Serie temporal del paraxileno en promedio horario.

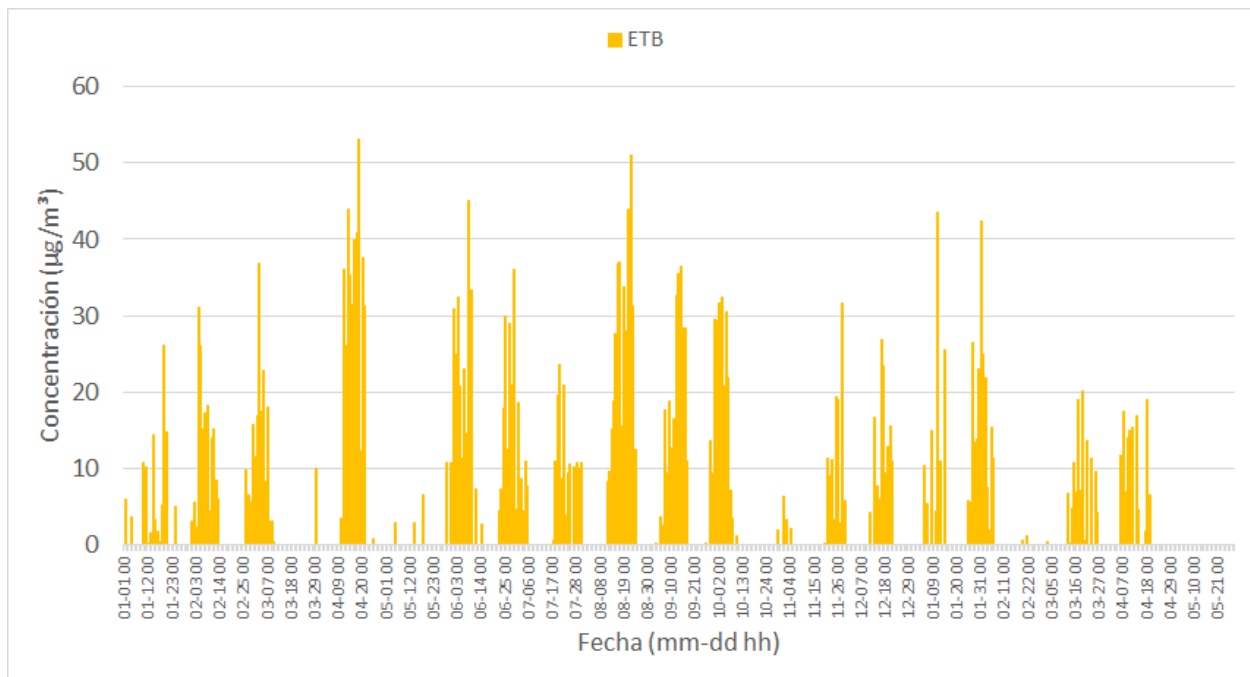


Figura 3.14: Serie temporal del etilbenceno en promedio horario.

Una mejor alternativa es presentar los datos en promedio horario, para reducir el ruido y suavizar las curvas. A continuación, se presentan los datos de concentración en promedio horario y semanal. En los gráficos se observan picos de concentraciones en las horas

42

anteriores al mediodía y, en algunos casos, concentraciones inferiores a cero. Esto no representa en sí mismo concentraciones de valor negativo, sino concentraciones inferiores al límite de detección del equipo, el cual varía dependiendo del gas. El procedimiento sugerido por el fabricante es no descartar estas mediciones, ya que al hacerlo se aumenta el promedio y los valores de las concentraciones se sobreestiman.

Sin embargo, en algunos casos se consideran las concentraciones negativas como parte del corrimiento general de la medición. Es decir, todos los datos arrojados por el equipo poseen un sesgo para infravalorar las concentraciones. Este proceso viene detallado en el manual de aseguramiento y control de la calidad de OPSIS, en donde se indica que para encontrar una línea base en la medición se busca una concentración que englobe la mayoría de la curva de la o las concentraciones, donde luego se procede a sumar este valor a todos los datos correspondientes del gas en cuestión.²³ Los perfiles temporales de las series de tiempo se entregan a continuación.

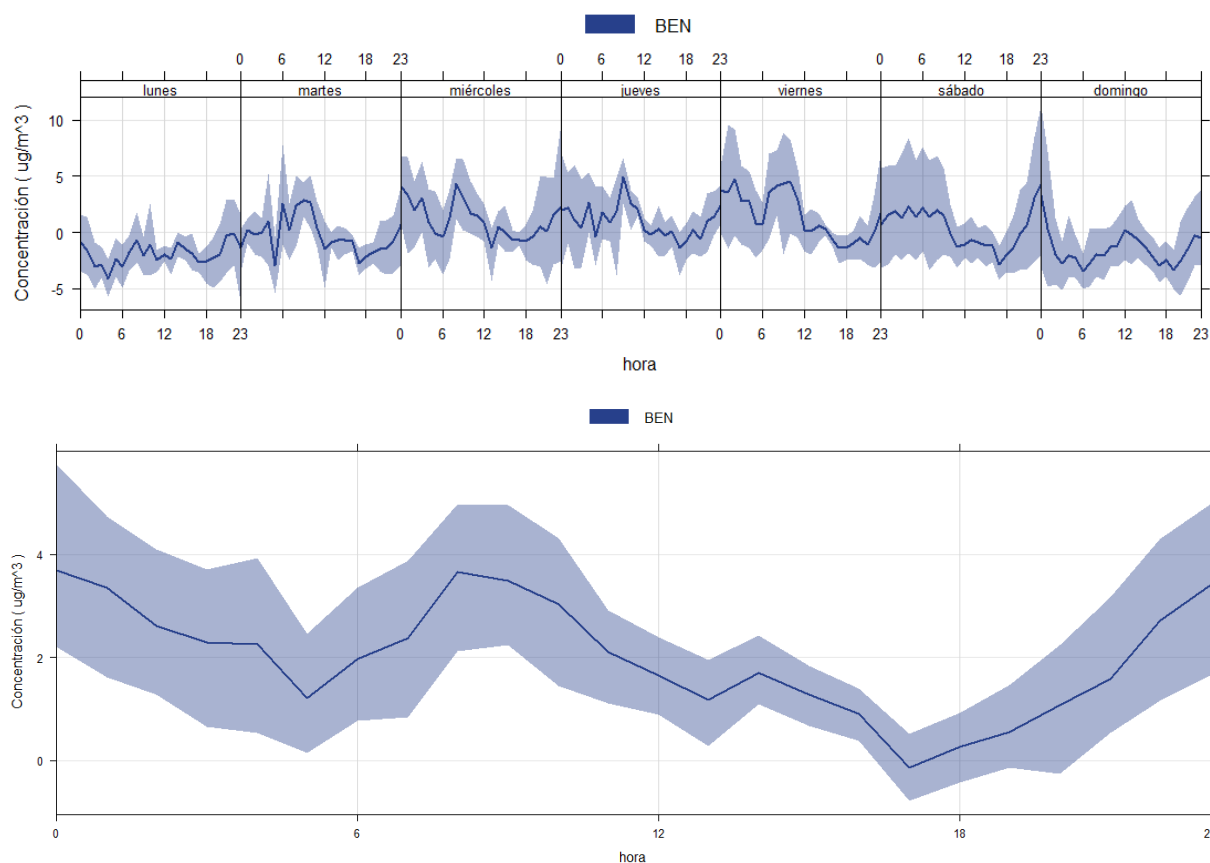


Figura 3.15: Perfil semanal y diario para benceno.

23 Quality Assurance and Quality Control using Opsi analysers for Air Quality Monitoring; Version 1.4

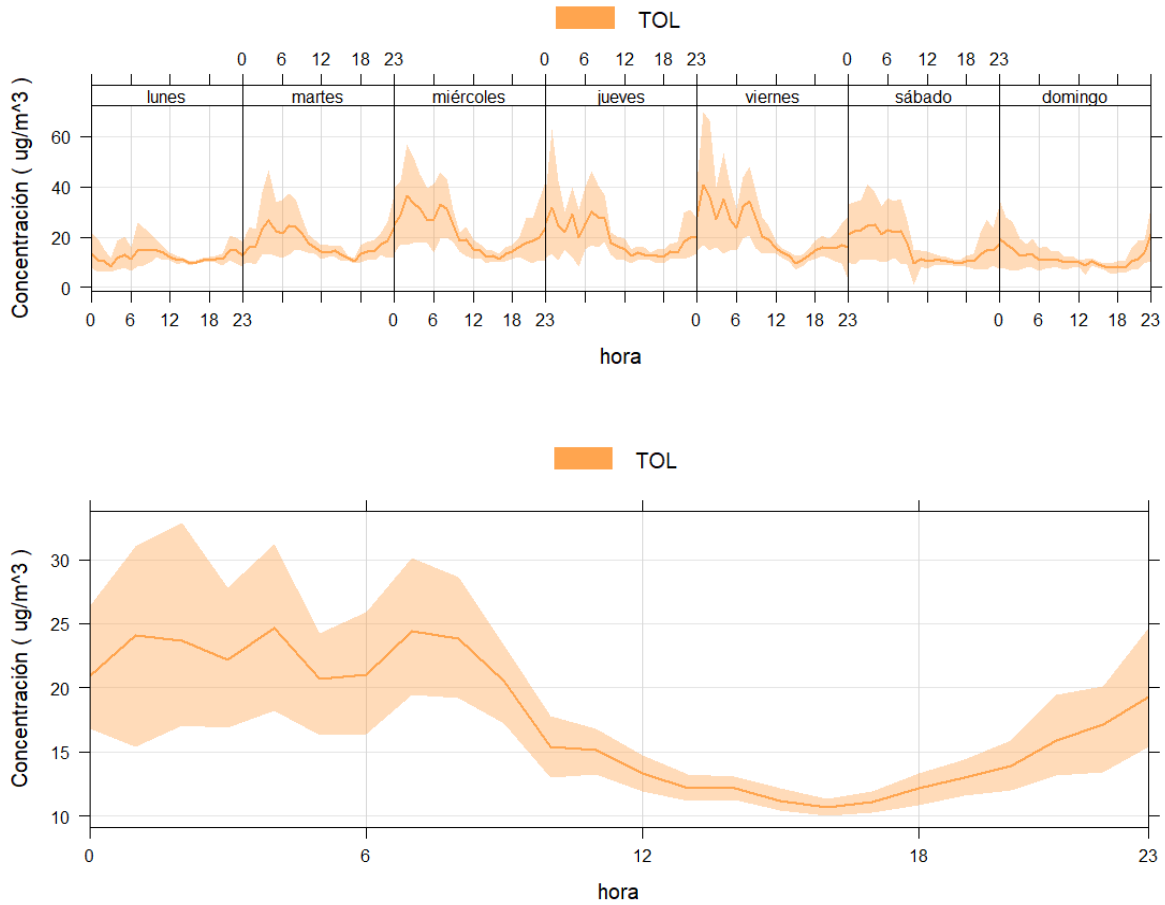


Figura 3.16: Perfil semanal y diario para tolueno.

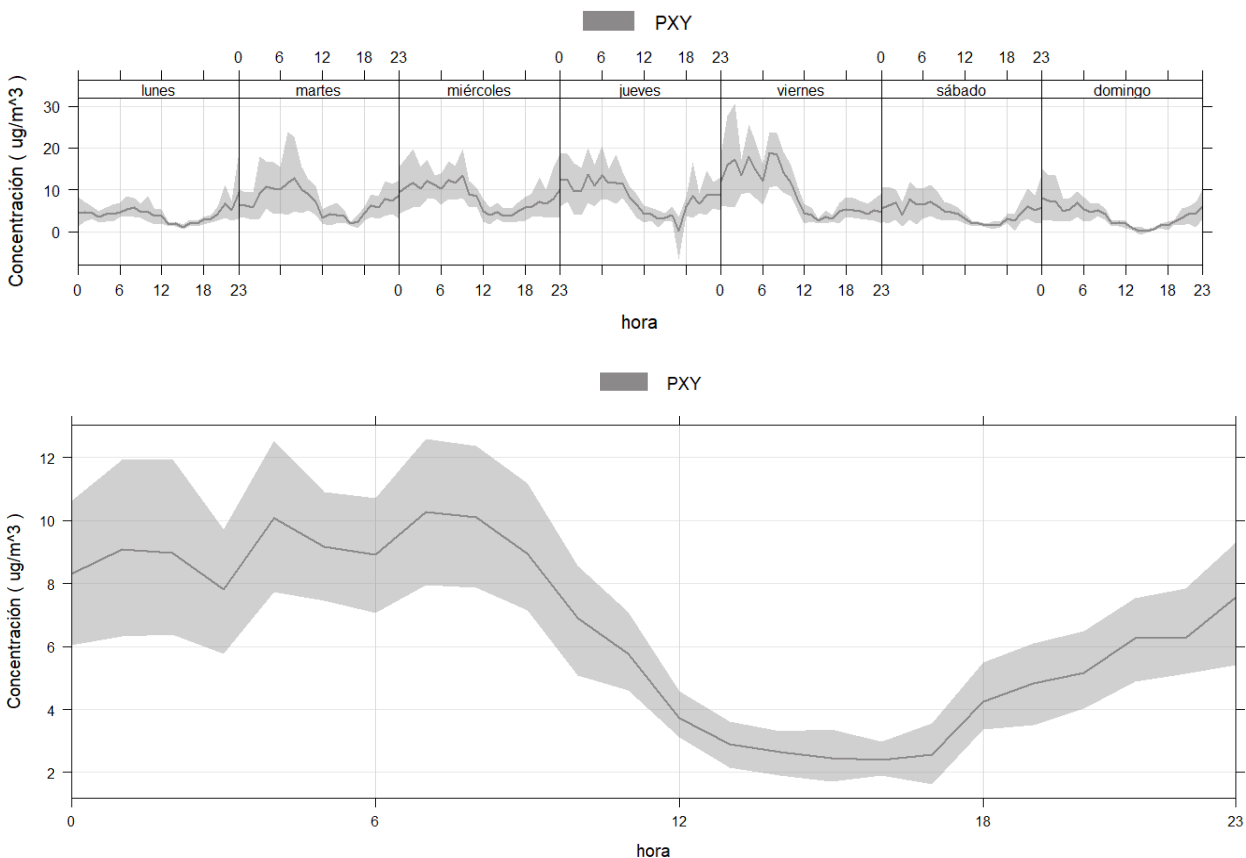


Figura 3.17: Perfil semanal y diario para paraxileno.

A pesar de que los tubos pasivos realizan una medición puntual y el equipo DOAS una unidimensional, ambos promedios son comparables debido a que se encuentran en las mismas dimensiones. Como fue mencionado en la sección Comparación entre ambos tipos de tecnologías de medición (Open-path vs Monitoreo en puntos), la diferencia viene establecida de que el DOAS detecta el promedio a lo largo del camino óptico. Esta aseveración es comprobable con las mediciones en la Tabla 3.3, donde los promedios a los extremos del camino son iguales al promedio de éste.

Tabla 3.3: Sumario de la medición con DOAS y tubos pasivos.

Locación	Período de medición		Completi tud DOAS	Benceno Promedio		Tolueno Promedio		Paraxileno Promedio		Etilbenceno Promedio	
	Inicio	Fin		Tubo pasiv o	DOAS	Tubo pasiv o	DOAS	Tubo pasiv o	DOAS	Tubo pasiv o	DOAS
API - USACH	2021-07- 21 13:17	2021-08- 21 13:13	66%>	2.55	3>	14.0	21.0	21.0	8.2	5.75	>10
Matemática - USACH	2021-07- 21 13:59	2021-08- 24 14:31	66%>	2.75	3>	17.5	20.0	22.0	7.6	5.75	>10
Frontis - USACH	2021-07- 21 13:40	2021-08- 21 13:27	-	3.75	-	16.0	-	27.0	-	7.75	-
Portales con las Sophoras	2021-07- 21 14:12	2021-08- 21 13:50	-	3.75	-	18.5	-	22.0	-	6.15	-
Gruta de Lourdes	2021-07- 21 14:47	2021-08- 21 14:10	-	3.35	-	15.0	-	23.0	-	6.40	-
El Belloto con Las Encinas	2021-07- 21 15:05	2021-08- 21 12:53	-	3.45	-	20.0	-	23.5	-	6.20	-
Matucana con Agustinas	2021-07- 21 14:27	2021-08- 21 13:58	-	3.95	-	19.0	-	22.5	-	6.10	-
Almirante Blanco	2021-07- 21 15:33	2021-08- 21 12:36	-	3.90	-	31.0	-	34.0	-	9.10	-
Estación Cerro Navia	2021-07- 26 13:22	2021-08- 21 12:03	-	5.00	-	17.0	-	33.0	-	8.85	-
Estación Independenci a	2021-07- 26 12:26	2021-08- 21 11:27	-	3.70	-	11.0	-	21.5	-	6.10	-
Estación Parque O'Higgins	2021-07- 21 13:17	2021-08- 21 13:13	-	2.60	-	17.5	-	18.5	-	5.00	-

3.1.3 Sensores de bajo costo

El sistema de operación de los sensores Alphasense de fotoionización (PID-AH2) se basa en la exposición de la muestra gaseosa a una luz ultravioleta de alta energía con el objeto de ionizar positivamente las moléculas rompiendo sus enlaces. El gas adquiere una carga eléctrica la que produce una corriente eléctrica que es detectada por la electrónica del sensor PID. Cuanto mayor sea la concentración del componente, más iones se producirán y mayor será la corriente eléctrica generada. El detector traduce la señal en unidades de corriente (A) a una señal de salida en unidades de voltaje, la que se escala a partir de los 50 mV.

La señal de salida del sensor es una y contiene la información de una serie de compuestos orgánicos volátiles, por lo tanto, esta debe ser ajustada individualmente a los diferentes gases en estudio, es este caso, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno. La conversión de la señal de sensor a unidades de concentración para cada uno de los gases se realiza aplicando un modelo de regresión lineal simple. El modelo relaciona la concentración real del gas dada por el instrumento de referencia DOAS a una señal en unidades de voltaje.

Se decide la utilización del modelo de regresión lineal debido que, es uno de los métodos más simples y comúnmente utilizado para conversión de la señal cruda del sensor, además tiene la capacidad de extrapolar valores, es decir, estimar más allá del intervalo de observación original, en contraste con los modelos de aprendizaje automáticos, los que no tienen esa capacidad (Hagan et al., 2018).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

En primer lugar, se procede a comparar las respuestas de los sensores respecto al dato referencial, en este caso, las concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno entregadas por el instrumento DOAS. Para esto, se relaciona linealmente la señal de salida del sensor con la concentración de referencia a través de la correlación de Pearson, los resultados se presentan en la Tabla 3.4. Los datos se promedian horariamente previo a este análisis. Se instalan cinco sensores de compuestos orgánicos volátiles y se identifican de la siguiente manera: COV20, COV21, COV22, COV23 y COV24.

Las relaciones lineales entre las señales de salida (mV) los sensores y las respectivas concentraciones de BTEX tienen un grado de asociación bajo ($R^2 < 0,6$) (Martinez, et al., 2009; Akoglu, 2018). También es posible observar en la Tabla 3.4. que el sensor que mejor se relaciona con las concentraciones de referencia es sensor COV20. Por otra parte, las señales de salida de los sensores se ajustan mejor a las concentraciones de los gases etilbenceno y xileno.

Tabla 3.4. Coeficientes de correlación (Pearson) de señal de salida de sensor con concentraciones de referencia.

	COV20	COV21	COV22	COV23	COV24
Benceno	0,43	0,20	-0,11	0,10	0,23
Tolueno	0,58	0,51	0,014	0,11	0,31
Etilbenceno	0,42	0,49	0,30	0,11	0,24
Xileno	0,63	0,65	0,23	0,11	0,30

Luego de este análisis se procede a graficar las señales de salida de los sensores con objeto de realizar una comparación cualitativa del comportamiento de los sensores. Es posible observar en la Figura 3.18 que los sensores COV21 y COV22 dejan de funcionar el día 12 de septiembre, debido a las lluvias caídas durante ese día y la desconexión energética de los sensores. Por otra parte, los sensores COV24 y COV23 tienen un funcionamiento similar, ambos están energizados a través de un jammer. En cambio, el sensor COV20 conectado directamente al transformador tiene un comportamiento relativamente diferente. Debido a la naturaleza de la señal de respuesta del instrumento (corriente eléctrica) la fuente de energía que permite el funcionamiento del sensor es relevante.

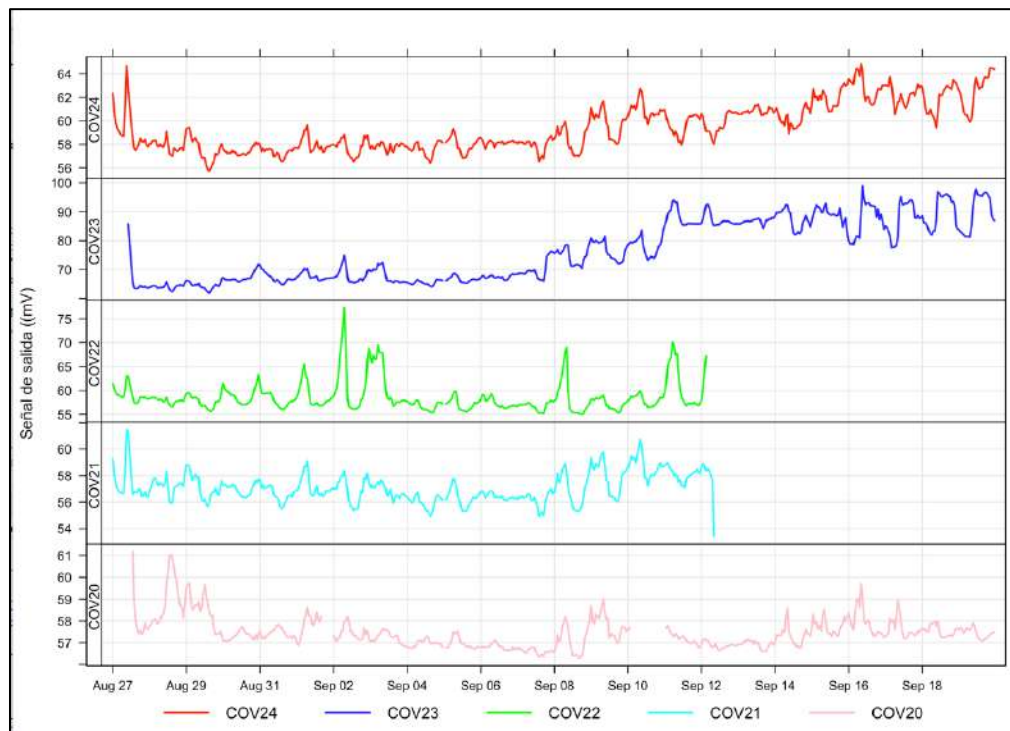


Figura 3.18: Señales de salida de los sensores COV20, COV21, COV22, COV23 y COV24 entre los días 28 de agosto y 21 de septiembre del año 2021.

Finalmente, se procede a aplicar el modelo de regresión lineal a las señales de los sensores para convertir la señal en unidades de voltaje a unidades de concentración. Se aplica para la misma señal de salida de sensores distintos modelos correspondientes a cada una de las concentraciones de los gases BTEX, lo anterior se ejemplifica en las siguientes ecuaciones identificando la señal de salida de los sensores como COV (mV).

$$\text{Benceno} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \beta_{\text{COV}} * \text{COV} (\text{mV}) + \beta_0$$

$$\text{Tolueno} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \beta_{\text{COV}} * \text{COV} (\text{mV}) + \beta_0$$

$$\text{Etilbenceno} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \beta_{\text{COV}} * \text{COV} (\text{mV}) + \beta_0$$

$$\text{Xileno} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \beta_{\text{COV}} * \text{COV} (\text{mV}) + \beta_0$$

En todas las ecuaciones planteadas, β_{COV} representa la pendiente de la relación lineal, COV (mV) la señal del sensor y β_0 es la intersección con el eje Y.

Se selecciona un sensor para presentar las salidas de los modelos, los resultados se presentan a continuación.

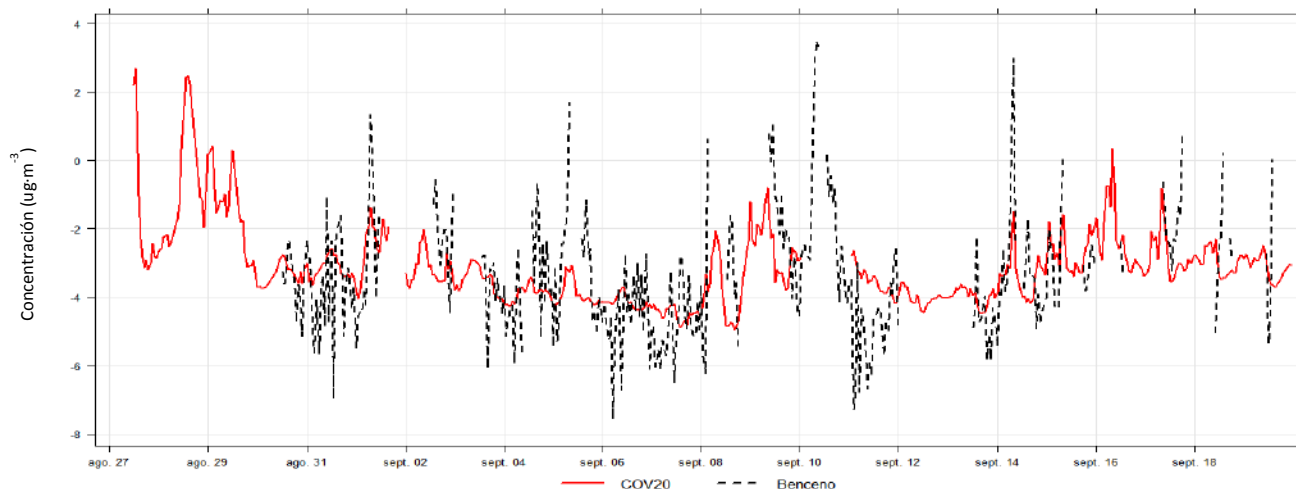


Figura 3.19. Serie temporal de salida de modelo para sensor COV_20 en unidades de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, junto con concentración dada por el instrumento DOAS para el gas benceno.

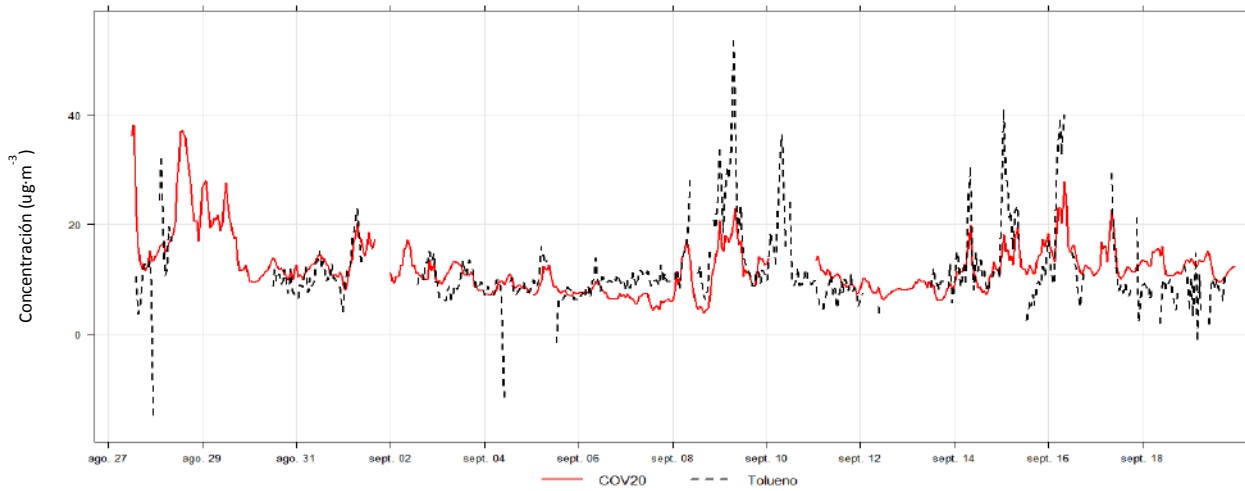


Figura 3.20. Serie temporal de salida de modelo para sensor COV_20 en unidades de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, junto con concentración dada por el instrumento DOAS para el gas tolueno.

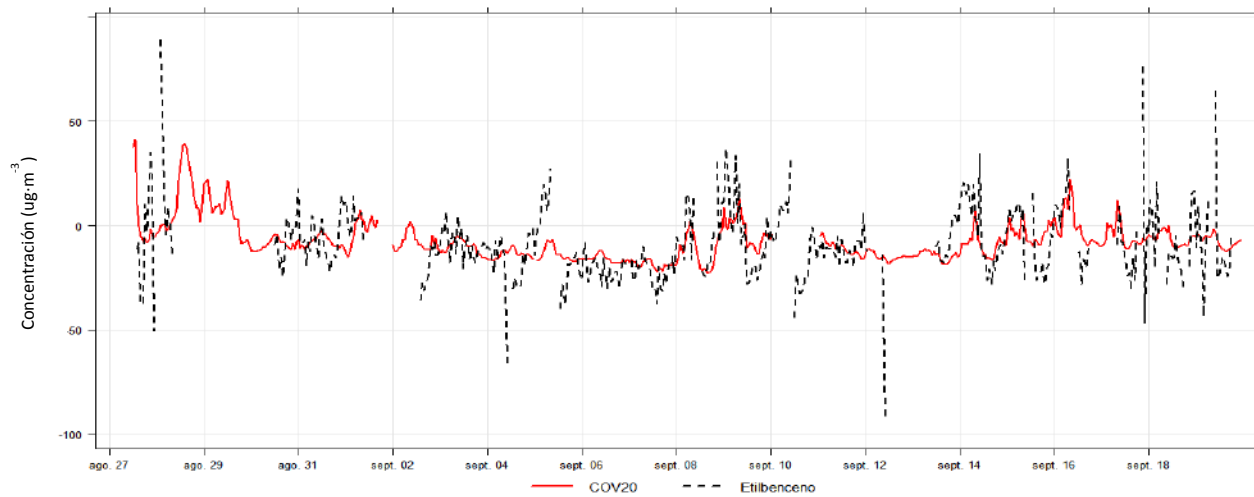


Figura 3.21. Serie temporal de salida de modelo para sensor COV_20 en unidades de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, junto con concentración dada por el instrumento DOAS para el gas etilbenceno.

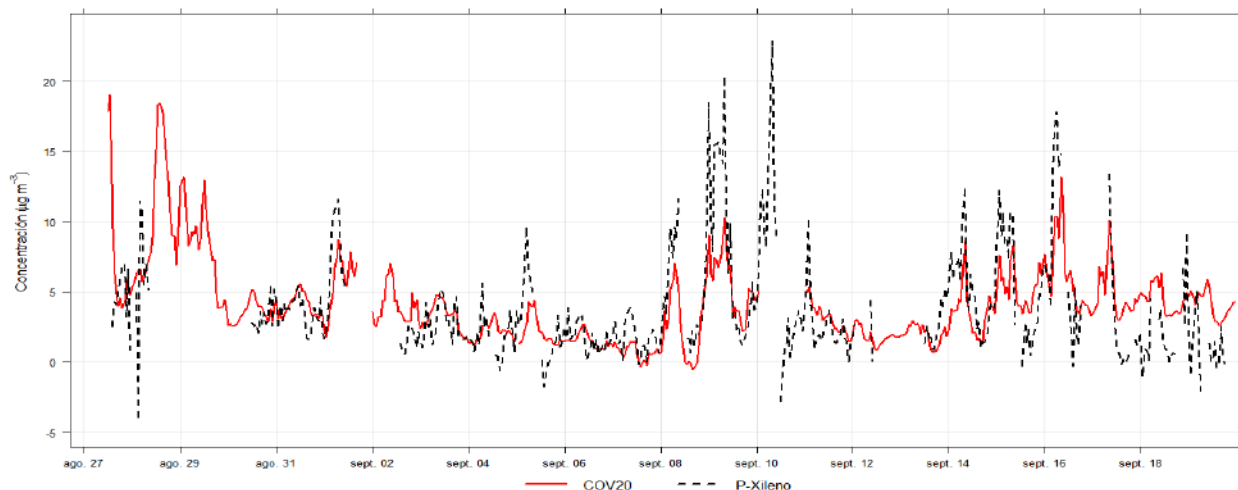


Figura 3.22. Serie temporal de salida de modelo para sensor COV_20 en unidades de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, junto con concentración dada por el instrumento DOAS para el gas p-xileno.

Se evalúa el desempeño del sensor COV_20 a través de la aplicación de las métricas estadísticas R^2 y error cuadrático medio (RMSE).

Tabla 3.5: Métricas de evaluación de rendimiento de las salidas de los modelos para el sensor COV_20, resultantes de la comparación con las mediciones de referencia (DOAS).

Benceno	
$R^2 = 0.40$	RMSE = 5.71
Tolueno	
$R^2 = 0.47$	RMSE = 14.95
P-xileno	
$R^2 = 0.57$	RMSE = 3.2
Etilbenceno	
$R^2 = 0.43$	RMSE = 6.34

Ya convertidas las señales de los sensores a unidades de concentración se procede a comparar los promedios de concentración para cada gas entre instrumentos, se considera el DOAS, tubos pasivos y las salidas de los modelos para cada sensor. Es importante considerar que las señales de los sensores son ajustadas a los datos de concentración entregadas por el DOAS, por ello la similitud de su respuesta. Por otra parte, las concentraciones de tubo pasivo presentadas en la tabla 3.5 corresponden a las obtenidas en el punto de monitoreo Matemáticas USACH.

Tabla 3.6. Comparación de concentraciones para los gases benceno, tolueno, etilbenceno y xileno entregadas por los instrumentos DOAS, tubos pasivos y los sensores COV20, COV23 y COV24.

	DOAS	Tubo pasivo	Sensor		
			COV20	COV23	COV24
Benceno	>3	2,75	3,12	3,40	3,34
Tolueno	20,0	17,5	12,12	11,4	11,44
Etilbenceno	>10	5,75	4,14	3,79	3,77
Xileno	22	7,6	7,37	9,04	9,09

Para una próxima etapa de monitoreo sería interesante el despliegue de los sensores a puntos de monitoreos lejanos al DOAS, de modo, de ampliar la cantidad de información espacial obtenida sobre los niveles de COVs. Además, debido al uso de un modelo de regresión lineal y las características intrínsecas del sensor de detectar concentraciones de COV pequeñas, eventualmente sería posible evaluar los niveles de COV bajo el límite de detección definido por el instrumento DOAS.

3.2 Recomendación del tipo de monitoreo a realizar (continuo o discreto), entregando opciones de equipos de medición

Antes de comenzar con las recomendaciones, es conveniente retomar las cualidades generales respecto de los objetivos de monitoreo que deben tener las redes de monitoreo. La USEPA requiere que las redes de monitoreo tengan un diseño tal que cumpla los siguientes objetivos²⁴:

- Entregar datos de contaminación del aire al público en general de manera oportuna
- Apoyar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire ambiente (primarios y secundarios) y el desarrollo de estrategias de emisiones
- Apoyar el desarrollo de estudios de investigación en contaminación atmosférica.

Algunos objetivos complementarios a los anteriores son los siguientes

- Activar procedimientos y protocolos de control ante situaciones de emergencia (por ejemplo, en situaciones episodios)
- Dar un registro de la tendencia de los niveles de contaminación de una región determinada.

En sentido estricto, la autoridad ambiental toma los datos de las redes de monitoreo y toma decisiones respecto de estas mismas, y por lo tanto este usuario último debe sentirse confiado en que la calidad de los datos es tal que sirva para tomar decisiones importantes. Sobre este mismo punto, es importante considerar que las mediciones de calidad del aire mediante cualquier técnica nunca están libres de errores. Este es un aspecto clave para la USEPA, por lo que define los “Objetivos de Calidad de los Datos de calidad del aire” que son enunciados cualitativos y cuantitativos definidos que aclaran el propósito de las mediciones, definen el tipo de información más apropiado a recopilar, determinar las condiciones más apropiadas para

²⁴ 40 CFR Part 58, Appendix D

recopilar esa información y especificar niveles tolerables de posibles errores en las decisiones que se tomen a raíz de la información que se genere a partir de las mediciones.

Ya que las mediciones nunca están libres de error, la USEPA usa la incertidumbre para controlar la suma de todas las fuentes de error que pueden existir, y que se definen como:

$$S_{Total}^2 = S_{población (espacial y temporal)}^2 + S_{medición (data)}^2$$

Incertidumbre en la población: Está relacionado con la incertidumbre en las concentraciones de calidad del aire que emergen respecto de la representatividad²⁵ espacial y temporal. Estas fuentes de error se controlan a través de la adecuada selección de condiciones de borde del sistema (tamaño o área de monitoreo y frecuencia/período de monitoreo), sobre la cual la toma de decisiones aplica (delimitación de una Zona Saturada, por ejemplo). También se suele controlar mediante la aplicación de diseños estadísticos de monitoreo adecuados. Un indicador clásico para controlar la incertidumbre en la población corresponde al nivel de completitud.

Incertidumbre en la medición: Son errores asociados a la manipulación de los datos medidos, que ocurren ya sea durante las actividades de campo, preparación, laboratorio (fases de la medición). Cada fase es vulnerable a alguna fuente de error, los que en la gran mayoría de los casos son aditivos. Los indicadores más importantes de la incertidumbre en la medición corresponden a: precisión²⁶, sesgo (entendido como “*bias*”), límite de detección y exactitud.

Este es un aspecto relevante de considerar en la elaboración de la normativa de calidad. Esto significa que ambos tipos de incertidumbre deben ser considerados a la hora de elección de un determinado tipo de monitoreo a escoger, ya que una decisión basada en datos con sesgos puede tener consecuencias importantes como se ilustra en la Figura 3.23. De nada sirve tener un tipo de medición adecuado y certero si está mal ubicado y no representa bien la representatividad poblacional, o viceversa.

²⁵ Representatividad es un indicador de la calidad de los datos de cualquier red de monitoreo que se refiere al grado en el cual los datos representan exacta y precisamente la frecuencia de distribución de una variable específica en la población (por ejemplo, concentración de un contaminante para una escala espacial de interés).

²⁶ La correspondencia o acuerdo entre distintas mediciones repetidas de la misma propiedad bajo condiciones idénticas, o significativamente equivalentes.

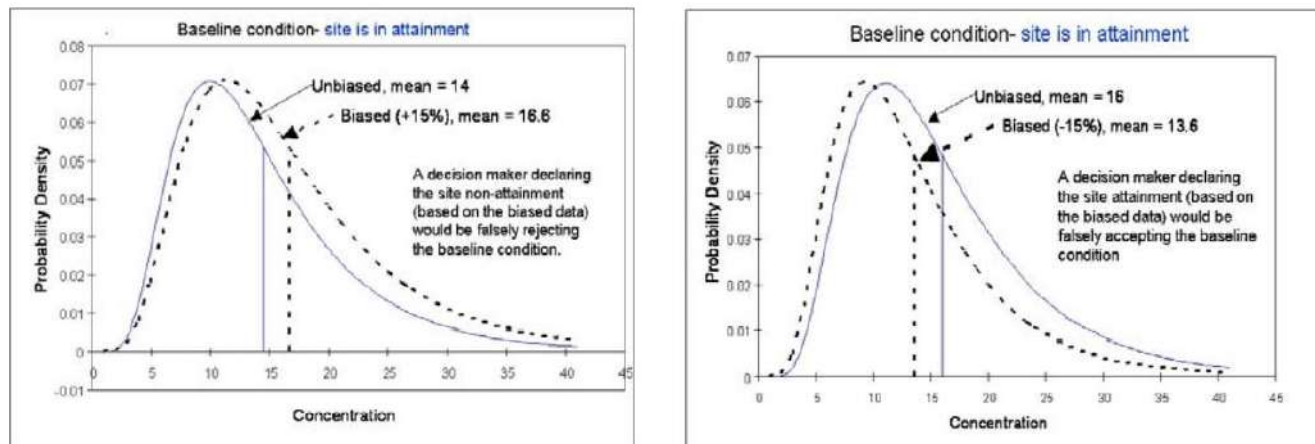


Figura 3.23: Distribución de probabilidad de concentración de un contaminante en base a escenarios con sesgos. Tomado de USEPA.

Cabe mencionar también que la regulación de la UE es la que más se acerca a la necesidad chilena, en términos del establecimiento de una norma de calidad²⁷ por COVs. La principal recomendación es incorporar los criterios de seguimiento de la Directiva 2008/50/CE como situación base o mínima. Es especialmente recomendable la incorporación de los términos “mediciones indicativas” y “mediciones fijas” en la normativa a implementar, ya que la disponibilidad en el mercado de instrumentos/tecnologías de monitoreo que midan Benceno son más reducidas que en el caso de los otros contaminantes criterios (MP_{10} , $MP_{2,5}$, O_3 , etc). La incorporación de esta terminología a la regulación chilena amplía el espectro de posibilidades que se puede dar, desde un punto de vista costo efectivo.

Por lo tanto, al implementarse una norma de calidad de Benceno homólogo al de la UE ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se encontrarían los escenarios expuestos en la Tabla 3.7. En una condición de Saturación (concentración por sobre los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y en una condición de latencia (por sobre los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) el tipo de monitoreo debiese ser con procedimientos rigurosos de QAQC utilizando estaciones de monitoreo fijas con equipamiento de referencia o equivalente (en base las metodologías recomendadas por la UE y por la USEPA). En ambos casos, este nivel de concentración, acorde con la Ley de Bases del Medio Ambiente, corresponde la implementación de planes de descontaminación o planes de prevención, que involucran en un esfuerzo en recursos relevantes. Para disminuir el riesgo a equivocarse en la toma de decisiones, entonces las mediciones deben ser confiables (en términos de incertidumbre). Al adoptar las definiciones de umbral superior e inferior de evaluación observamos tanto para declarar saturada o latente una zona se necesitará entonces de estaciones de monitoreo fijas. En el caso que las concentraciones reales de Benceno en un área determinada estén por

²⁷ Ley de Bases del medio Ambiente. Norma Primaria de Calidad Ambiental: aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.

debajo del umbral de evaluación superior (70% del nivel de la norma, es decir bajo los 3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se pueden utilizar otros tipos de tecnologías de monitoreo, con un nivel de incertidumbre más bajo. La implementación de estos tipos de conceptos en la normativa chilena involucra la definición de estaciones fijas, Mediciones indicativas y Estimación objetiva, y por lo tanto es obligatorio incluir la definición de los objetivos de calidad de los datos de la misma Directiva (Tabla 1.1), especialmente respecto de los criterios de incertidumbre y completitud.

Tabla 3.7: Criterios de evaluación de norma de Benceno.

Nivel de concentración (media anual)	Condición según Ley de Bases del Medio Ambiente ²⁸	Metodologías de monitoreo
>5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Saturación	Estaciones Fijas
$\geq 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, <5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Latencia	Estaciones Fijas
$\geq 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, <3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango superior de evaluación	Mediciones indicativas
<3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango inferior de evaluación.	Estimación objetiva

Cabe mencionar el escenario más probable en Chile es que el seguimiento se deba realizar mayormente por mediciones indicativas, en función de los resultados de la campaña de monitoreo implementada, en los resultados históricos disponibles e información internacional consultada. Por ejemplo, las concentraciones anuales de Benceno disponibles en la UE y en USA entregan dos miradas diferentes para un mismo año (2019). En términos generales, se encuentra que los niveles de concentración reportados en Estados Unidos suelen ser más altos que los que se encuentran en Europa (Figura 3.24). Esto es consecuencia del distinto tipo de regulación que existe en cada región. Cabe recordar que en los EEUU no existe norma de calidad de Benceno (como sí lo tienen los países de la UE), sin embargo, sí es regulado mediante otro tipo de herramientas como de exposición personal, salud ocupacional, normas de emisión, etc²⁹. Por ejemplo, desde el año 2015 que el gobierno federal mandata a las refinerías de petróleo el monitoreo de tipo cercado (“Fence-line”) de benceno en los bordes de sus instalaciones con la finalidad de identificar/controlar las emisiones que puedan liberarse de las instalaciones e impactar sectores aledaños poblados³⁰. Por lo tanto, los lugares o sitios de medición de los Estados Unidos suelen estar ubicados en aquellas zonas donde se ubiquen fuentes emisoras de benceno relevantes y reguladas, en tanto que en los sitios de la Unión Europea los sitios obedecen más bien a una regulación de tipo “norma de calidad”.

²⁸ Zona Latente: aquella en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo se sitúa entre el 80% y el 100% del valor de la respectiva norma de calidad ambiental.

Zona Saturada: aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas.

²⁹ [benzene.pdf \(epa.gov\)](#)

³⁰ En aquellos casos en donde el promedio de concentración anual benceno esté por sobre los 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (excluyendo los valores de benceno background, ajenos al sitio, o asociados a otras fuentes fuera de la refinería), se debe adoptar medidas para investigar y abatir emisiones. [Petroleum Refinery Sector Rule \(Risk and Technology Review and New Source Performance Standards\) | US EPA.](#)

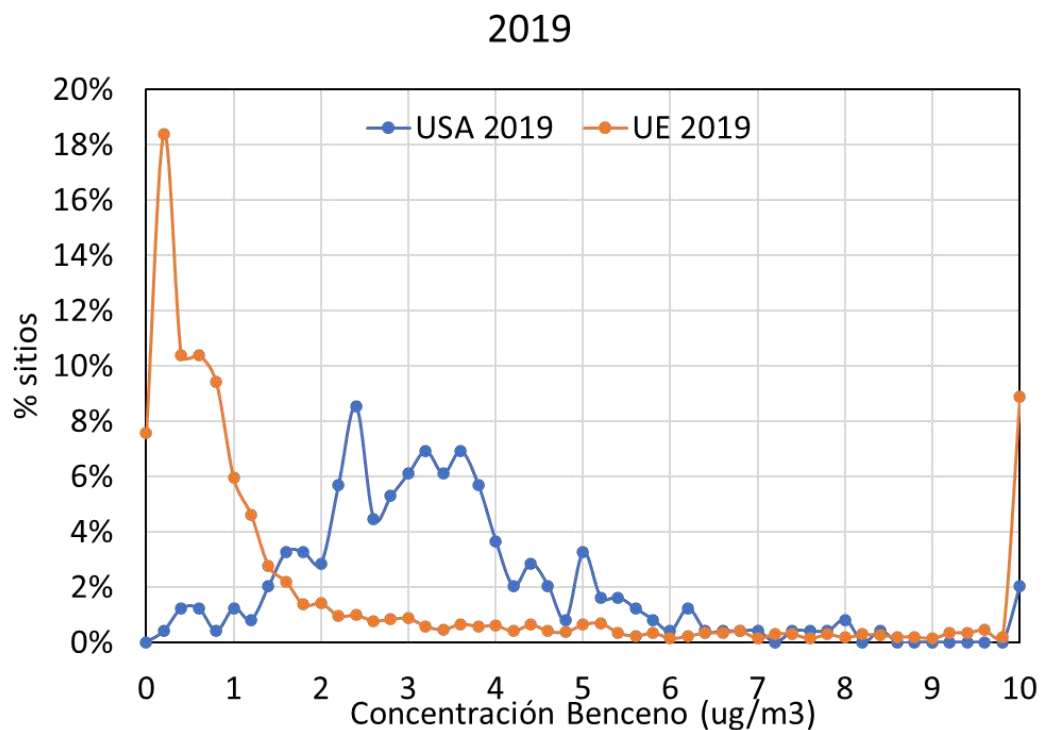


Figura 3.24: Distribución de sitios de monitoreo en función del nivel de concentración de Benceno en Europa y Estados Unidos, año 2019. Información proveniente de 3191 sitios de monitoreo en la UE y 246 sitios en USA.

Tecnologías disponibles de monitoreo

En general el monitoreo de Benceno se puede clasificar según su principio:

- 1) Recolección del aire en recipientes especiales (jeringas herméticas, bombillas de vidrio, bolsas de plástico o recipientes metálicos)
- 2) Colección en tubos con distintos tubos de sorbentes: Muestreo activo o muestreo pasivo
- 3) Monitoreo continuo
- 4) Monitoreo online

El muestreo más común utilizado en el mundo corresponde al uso de tubos con sorbentes, seguido de del uso de Canister.

En la UE los métodos de referencia para la medición de Benceno son aquellos activos, (Artículo 8 de la DIRECTIVA 2008/50/CE)³¹:

“Método de referencia para la toma de muestras y la medición del benceno: El método de referencia para la medición del benceno es el que se describe en la norma EN 14662:2005, partes 1, 2 y 3 «Calidad del aire ambiente — Método normalizado para la medida de la concentración de benceno»”.

Estos métodos son los siguientes:

1. **UNE-EN 14662-1:2006:** Calidad del aire ambiente. Método normalizado de medida de las concentraciones de benceno. Parte 1: Muestreo por aspiración seguido de desorción térmica y cromatografía de gases.
2. **UNE-EN 14662-2:2006:** Calidad del aire ambiente. Método normalizado de medida de las concentraciones de benceno. Parte 2: Muestreo por aspiración seguido de desorción por disolvente y cromatografía de gases.
3. **UNE-EN 14662-3:2016:** Calidad del aire ambiente. Método normalizado para la medición de las concentraciones de benceno. Parte 3: Muestreo automático por aspiración con cromatografía de gases in situ.

Asimismo, la normativa europea también indica que se pueden utilizar otros métodos de medición en las condiciones que se exponen en la sección B del anexo VI de la DIRECTIVA 2008/50/CE, el cual consiste que deben **“demostrar la equivalencia”** con los métodos indicados en el párrafo anterior.

Se pueden identificar otros métodos para Benceno que no son activos, pero que sin embargo sí pueden ser utilizados para verificación de norma de Benceno.

4. **UNE-EN 14662-4:2006:** Calidad del aire ambiente. Método normalizado para la medida de la concentración de benceno. Parte 4: Muestreo difusivo seguido de desorción térmica y cromatografía de gases.
5. **UNE-EN 14662-5:2006:** Calidad del aire ambiente. Método normalizado de medida de las concentraciones de benceno. Parte 5: Muestreo difusivo seguido de desorción por disolventes y cromatografía de gases.

Por otro lado, en EEUU la USEPA agrupa el monitoreo de Benceno (junto con otros COVs) en un programa de monitoreo denominado Contaminantes orgánicos tóxicos atmosféricos (Toxic Organics Compounds in Ambient Air). Los asociados al monitoreo de BETX son los siguientes.

³¹ Los Estados miembros aplicarán los métodos de medición de referencia y los criterios especificados en la sección A y en la sección C del anexo VI.

- Method TO-1 (April, 1984) Method for the Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Ambient Air Using Tenax® Adsorption and Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)
- Method TO-2 (April, 1984) Method for the Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Ambient Air by Carbon Molecular Sieve Adsorption and Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)
- Method TO-3 (April, 1984) Method for the Determination of Volatile Organic Compounds in Ambient Air Using Cryogenic Preconcentration Techniques and Gas Chromatography with Flame Ionization and Electron Capture Detection
- Method TO-14A (January 1999) Determination Of Volatile Organic Compounds (VOCs) In Ambient Air Using Specially Prepared Canisters With Subsequent Analysis By Gas Chromatography
- Method TO-15 (January 1999) Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) In Air Collected In Specially-Prepared Canisters And Analyzed By Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC/MS)
- Method TO-15A (September, 2019) Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Air Collected in Specially Prepared Canisters and Analyzed by Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)
- Method TO-16 (January 1999) Long-Path Open-Path Fourier Transform Infrared Monitoring Of Atmospheric Gases
- Method TO-17 (pdf) Determination of Volatile Organic Compounds in Ambient Air Using Active Sampling Onto Sorbent Tubes

Un resumen se entrega en la Tabla 3.8. En Europa se suele utilizar más bien los tubos pasivos para el seguimiento de norma, y en determinados casos el uso de equipamiento más elaborado como el DOAS.

Tabla 3.8: Métodos usados en EEUU para la determinación de Benceno en el aire.

Métodos

3 L SS Canister Subamb press, passive coll - GC/Mass Spectro
 6 L SS Canister Subamb press, passive coll - GC/Mass Spectro
 6L AMBIENT CANISTER - DUAL FID - PAMS
 6L PRESSURIZED CANISTER - CAPILLARY GC-ECD/PID
 6L PRESSURIZED CANISTER - DUAL FID - PAMS
 6L PRESSURIZED CANISTER - ENTECH PRECON - HP GC/FTIR/MS
 6L PRESSURIZED CANISTER - ENTECH PRECON - SATURN II GC/FID
 6L PRESSURIZED CANISTER - PACKED COLUMN GC - ECD/PID
 6L PRESSURIZED CANISTER - PE8700;AUTO GC;SUBAMBIENT-DUAL FID
 6L Pressurized Canister - Precon HP GC/MS
 6L Pressurized Canister - Precon Saturn GC/MS
 6L SUBAMBIENT SS-CANISTER - INCOS 50XL GC/MS
 6L SUBAMBIENT SS-CANISTER - VARIAN SATURN-2 GC/MS
 6L SUBATM CANISTER - Entech Precon- GC/FID/MSD
 6L SUBATM SS CANISTER - ENTECH PRECONCENTRATOR GC/MS
 CANISTER SUBAMBIENT PRESSURE - MULTI DETECTOR GC
 Instrumental - AIRCO-VOC C6/C12 GC/FID
 INSTRUMENTAL - ENTECH 2000 W/ MS/FID
 INSTRUMENTAL - ENTECH CRYFOCUS/VARIAN GC/FINN DTMS
 Instrumental Open Path - UV OPSIS Model AR 500
 MIXED SORBENT CARTRIDGE - GC/MS
 Passivated Canister - Cryogenic Preconcentration GC/MS
 PERSONAL PUMP MOLECULAR SIEVE - GC/MS
 Preconcen trap/Thermal Desorber - Auto GC (PE Clarus 500 dual col)
 PRECONCENTRATION TRAP - CHROMPACK AUTOMATED GC- SUBAMB FID
 PRECONCENTRATION TRAP - PE 8700;AUTO GC;SUBAMBIENT-DUAL FID
 preconcentrator trap/thermal desorber - electronic drier - Markes CIA TD/Agilent GC dual FID - carbon response
 preconcentrator trap/thermal desorber - electronic drier - Markes Unity TD/Agilent GC dual FID - carbon response
 Preconcentrator trap/thermal desorber - no drier - CAS AirmOzone - benzene response - factor adjusted
 Pressurized Canister - Capiullary GC-PID Multi Point CAL
 Pressurized Canister - GC with Multiple Detectors
 Semi-Continuous Analyzer - GC/PID
 SKC Pump Charcoal Tube - GC/MS REAC SOP 1816
 SORBANT TUBE-CARBOSIEVE-C-TRAP - GAS CHROMATOGRAPH W/FLAME; GC FID
 SS 6L Pressurized Canister - Cryogenic Precon GC/MS
 SS 6L- PRESSURIZED CANISTER - CRYOGENIC PRECON GC/MS
 SS CANISTER PRESSURIZED - CRYOGENIC PRECONCENTRATION GC/FID
 SS Canister Pressurized - Preconcentrator GC/FID/MSD
 SS Canister Subambient Pressure - Gas Chromatograph Mass Spectro
 SS-Canister_Pressurized - Capillary GC ITD Mass Spectro
 SS-CANISTER-AMBIENT - PRECONCENTRATOR GC/FID

SS-CANISTER-PRESSURIZED - CAPILLARY GC ITD MASS SPECTRO
SS-CANISTER-PRESSURIZED - GAS CHROMATOGRAPH MASS SPECTRO
SS-CANISTER-SUBAMBIENT-PRESURE - GAS CHROMATOGRAPH MASS SELECTIV DET
TEDLAR BAG - PACKED COLUMN GC - ECD/PID
Tenax GR/Trap - Thermal Desorber GC/PID
TENAX TRAP AC PUMP - HEAT DESORPTION GC MASS SPEC

4 c.4. Se propondrán los criterios de evaluación de la norma, los años de implementación antes de su revisión y se entregarán recomendaciones de proyección

4.1 Criterios de evaluación de la norma

Los resultados del monitoreo de calidad del aire para Benceno como norma de calidad se usan para decretar zonas en donde se deben implementar medidas de descontaminación en caso que sean necesario. Estas decisiones tienen importantes repercusiones socioeconómicas y por lo tanto la calidad de los datos es uno de los aspectos más importantes a tener en consideración en la definición de normativas.

Dado que la normativa europea por Benceno es la que se recomienda en este informe, es obligatorio adoptar los criterios de evaluación ilustrados en el artículo 6 de la directiva de calidad del aire Europea, muchos de ellos expuestos en la sección anterior de este documento y en la Tabla 3.7. Referido a la evaluación de los límites de evaluación de los niveles de Benceno en el aire se deberá definir las zonas o aglomeraciones a ser consideradas de evaluación en función del tamaño de ellas. Un cálculo directo de los sitios necesarios en cada región, en función del tamaño se entrega en la Tabla 4.1. En un escenario complejo como lo significa la Región Metropolitana (megaciudad) en el escenario actual (considerando que las concentraciones promedias anuales están bajo el umbral superior) se debiese necesitar cerca de cuatro estaciones de monitoreo constantemente monitoreadas. En caso que los niveles de concentración incrementen la RM necesitaría de 10 estaciones de monitoreo, lo que corresponde a aproximadamente un monitoreo por cada estación MACAM.

Tabla 4.1: Número de estaciones de monitoreo necesarios para la vigilancia de monitoreo de Benceno, en función del tamaño de la población.

Región	Población	Superior	Conservador
Metropolitana de Santiago	8,242,459	10	4
Valparaíso	1,979,373	5	2
Biobío	1,670,590	5	2
Maule	1,143,012	4	2
La Araucanía	1,019,548	4	2
O'Higgins	1,000,959	4	2
Los Lagos	897,708	3	1
Coquimbo	848,079	3	1
Antofagasta	703,534	2	1
Ñuble	514,609	2	1
Los Ríos	407,837	2	1
Tarapacá	391,558	2	1
Atacama	316,168	2	1
Arica y Parinacota	255,068	2	1
Magallanes y Antártica Chilena	179,533	1	1

Aysén	107,158	1	1
Total	19,678,363	52	24

En la mayoría de los sitios de monitoreo se recomienda el seguimiento mediante la utilización de tubos pasivos o alguna otra técnica similar. Sin embargo, es recomendable encarecidamente que en zonas industriales emplazadas cerca de asentamientos urbanos, y en donde existan fuentes industriales que emitan COVs por su naturaleza (refinerías, industria Celulosa, por ejemplo) exista un monitoreo de tipo de cercado “Fence line” como el que exige la regulación de EEUU.

4.2 Años de implementación y recomendaciones de proyección

Atendidos los antecedentes revisados en este estudio, y considerando los resultados de monitoreo de esta campaña, se recomienda la implementación gradual del monitoreo partiendo por aquellas zonas más pobladas y especialmente tomando en consideración aquellas zonas en donde existan fuentes emisoras relevantes (industriales, tráfico, quema de leña, etc). Se recomienda partir seleccionando un número de estaciones que cuadre con la Tabla 4.1 considerando un escenario conservador (suponiendo niveles de concentración de Benceno bajo el umbral inferior de evaluación). Se recomienda partir utilizando monitoreo indicativo (por ejemplo, tubos pasivos) para conseguir un primer valor de concentración anual de Benceno, usando la configuración que utiliza el IVL en Suecia, esto es monitoreo semanal (20 semanas) repartidos homogéneamente en todas las estaciones del año. Obtenido el primer valor representativo de concentración anual. Al término del primer año se deberá entonces realizar una evaluación de los resultados para realizar ajustes al programa de monitoreo (incremento del número de puntos, incremento del % de cobertura temporal), etc.

Se recomienda la revisión de la norma cada 5 años en función de lo señalado por la directiva de la UE: *“Las superaciones de los umbrales superior e inferior de evaluación se determinarán en relación con las concentraciones medidas durante los cinco años anteriores, cuando se disponga de datos suficientes. Un umbral de evaluación se considerará superado si se ha superado durante al menos tres de esos cinco años anteriores”*.

“Cuando se disponga de datos relativos a un período inferior a cinco años, los Estados miembros podrán combinar, con el fin de determinar las superaciones de los umbrales superior e inferior de evaluación, los datos de las campañas de medición de corta duración durante el período del año y en lugares en los que la probabilidad de obtener los niveles más elevados de contaminación sea mayor con los resultados de los inventarios de emisiones y las modelizaciones.”

5 c.5. A partir de la recomendación inicial de que COVs se deben normar, el consultor realizará una proyección de cuáles compuestos pueden ser monitoreados y/o normados en el mediano y largo plazo.

5.1 Propuesta de COVs a ser monitoreados y normados

Una norma de calidad busca proteger la salud de población, por lo tanto, la norma de COVs a implementar debe tener tal característica. Como marco de referencia internacional, en la UE existía un límite máximo anual de COVs de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, debido a la falta de estudios sobre efectos en la salud, ese límite se reemplazó y se estableció un valor límite anual para benceno de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Directiva UE 2008/50/CE)³².

Así, el benceno se ha considerado y se ha normado como contaminante criterio en varios países, adoptado diferentes valores límites³³. Desde el punto de vista económico, el establecimiento de normas de calidad y los planes de descontaminación que de su incumplimiento se deriven, redundarán en mayores costos, tanto para los agentes emisores como para el Estado.

Tabla 5.1: Normas ambientales y estándares de calidad del aire para benceno en diversos países. Tabla obtenida y modificada desde Sekar et al. 2009

Continente	País	Límite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Intervalo promedio	Definiciones y estándares
Asia	India	5	Anual	Estándar de calidad del aire
	Iraq	3	Anual	Estándar de calidad del aire
	.	3	Anual	Estándar de calidad del aire
	El Líbano	5	Anual	Valor Límite
		100	24 hrs	
	Rusia	300	20 min	Concentración Máxima Permissible
		5	Anual	
	Corea del Sur	5	Anual	Estándar de calidad del aire
	Siria	20	Anual	Estándar de calidad del aire
	Vietnam	22	1 hr	Regulación de sustancias peligrosas en el aire ambiental
		10	Anual	
	Israel	3.9	24 hrs	Estándar de calidad del aire
	1.3	Anual		
Oceanía	Nueva Zelanda	5 (2002) 3.6 (2010)	Anual	Estándar de calidad del aire
África	Botsuana	5	Anual	Estándar de calidad del aire
	Marruecos	10	Anual	Estándar de calidad del aire

³² http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=57d9d4c2-2aaa-4611-877b-c6ed65d35ca7&fname=Informe%20final%20NILU%20JUN_2019.pdf&access=public

³³ Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment, 2019. Heliyon 5, e02918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02918>

	Sudáfrica	10	Anual	Estándar de calidad del aire
	Unión Europea	5	Anual	Valor límite para la protección de la salud humana
	Francia	2	Anual	Objetivo de largo plazo
	Albania	5	8 hrs	Estándares primarios y secundarios
	Bielorrusia	40	24 hrs	Concentración máxima permisible
		10	Anual	
Europa	Suecia	Umbral Superior 3.5	Anual	Estándar de calidad del aire
		Umbral inferior 2		
	Malta	Umbral Superior 3.5	Anual	Regulaciones de la calidad del aire ambiental
		Umbral inferior 2		
	Escocia	3.25	Anual	Valor objetivo
	Irlanda del Norte	3.25	Anual	Valor objetivo
América	Colombia	5	Anual	Concentración máxima permisible
	Perú	4	Anual	Estándar de calidad del aire
	Cuba	1000	20 min	Concentración máxima permisible

Por otro lado, de todos los COVs que hay en la atmósfera, la familia BTEX es la que se encuentra en mayor abundancia. Generalmente, en la atmósfera la correlación en los niveles de BTEX entre si es estrecha (Shuai et al., 2018) ya que provienen de las mismas fuentes emisoras, predominantemente antropogénicas. La misma tendencia se observó tanto en los resultados de la campaña de monitoreo como en la información previamente recolectada en Chile.

Como se ha documentado ampliamente, dentro de los BTEX, el único compuesto con evidencia científica de efectos corroborados sobre la salud pública es el Benceno. Está clasificado como cancerígeno por múltiples agencias internacionales. Para el resto de los TEX no existe información científica consensuada de efectos como ocurre en el Benceno. La tabla de a continuación resume este contexto.

Tabla 5.2: Niveles de concentración de referencia (RfC) y conclusiones respecto al peso de la evidencia para la evaluación del potencial carcinogénico de los BTEX. Elaboración propia con datos obtenidos desde <https://www.epa.gov/iris>

		Benceno		Tolueno		Etilbenceno		Xilenos	
RfC	30 ug/m ³	Disminución del conteo de leucocitos	5000 ug/m ³	Efectos neurológicos en la exposición ocupacional de trabajadores.	1000 ug/m ³	Toxicidad en el desarrollo	100 ug/m ³	Daño en la coordinación motora	
Cáncer	Peso de la evidencia (Woe, weight of evidence)	Carcinógeno humano conocido / probable. (known/likely human carcinogen)		Información inadecuada para evaluar el potencial carcinogénico (Inadequate information to assess)		D (no clasificable como un cancerígeno humano) [D (Not classifiable as to human carcinogenicity)]		Datos son inadecuados para la evaluación del potencial carcinogénico en humanos (Data are inadequate for an assessment of human carcinogenic potential)	
Evaluación	Caracterización	Estimado cuantitativo del riesgo de cáncer por la exposición inhalatoria. Riesgo unitario inhalatorio: 2.2×10^{-6} por cada $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Método de extrapolación: linealidad a bajas dosis usando estimados de máxima probabilidad. Sitio del tumor: Hematológico. Tipo de tumor: Leucemia (Rinsky et al., 1981, 1987 Paustenbach et al., 1993 Crump and Allen, 1984 Crump, 1992, 1994 U.S. EPA, 1998)		Información inadecuada para evaluar el potencial carcinogénico del tolueno debido a que los estudios en humanos expuesto crónicamente a tolueno no son concluyentes. El tolueno no fue carcinogénico en bioensayos inhalatorios de ratas y ratones expuestos de por vida (CIT, 1980 NTP, 1990 Huff, 2003),		No clasificable debido a la falta de bioensayos en animales y estudios en humanos.		Datos adecuados en humanos respecto a la carcinogenicidad de los xilenos no están disponibles. Los datos disponibles en animales no son concluyentes así como la habilidad de los xilenos como para causar una respuesta carcinogénica. Las evaluaciones respecto a las respuestas genotóxicas de los xilenos han entregado respuestas negativas de forma consistente.	
Marco de referencia para la caracterización del (Woe) peso de la evidencia		Proposed Guidelines for Carcinogen Risk Assessment (U.S. EPA, 1996)		Guidelines for Carcinogen Risk Assessment (U.S. EPA, 2005)		Guidelines for Carcinogen Risk Assessment (U.S. EPA, 1986)		Revised Draft Guidelines for Carcinogen Risk Assessment (U.S. EPA, 1999)	

A la luz de estos antecedentes, se recomienda normar obligatoriamente el Benceno. No existe la necesidad de monitorear por norma de calidad otro compuesto, debido a la falta de antecedentes de efectos en salud pública. Por otra parte, dada la estrecha correlación que existe entre los BTEX es posible señalar que al normar Benceno se controlan también los otros COVs antropogénicos.

Sin embargo, si se recomienda la revisión de otros COVs pero no como forma de norma de calidad sino más bien como una regulación más similar a como la realiza la USEPA, es decir considerarlo como contaminantes peligrosos atmosféricos y por lo tanto controlarlos mediante sectoriales como por ejemplo normas de emisión.

6 Conclusiones

El Ministerio del Medio Ambiente tiene la necesidad de formular una norma de calidad para Compuestos Orgánicos Volátiles - COVs. Sin embargo, dado los antecedentes internacionalmente revisados, no es recomendable establecer una norma de calidad para todos los COV's como un conjunto, sino más bien seguir la estrategia de cómo han sido regulados en países más desarrollados que Chile, como lo son los países miembros de la Unión Europea. En este sentido, la mayoría de los países disponen de estándar de calidad solo para el Benceno, debido a que es el único que ha sido catalogado como cancerígeno.

La regulación de la UE es la que más se acerca a la necesidad chilena, ya que en EEUU, por ejemplo, el control de los COV's se realiza en base a otro cuerpo regulatorio (contaminantes peligrosos atmosféricos) y no como National Ambient Air Quality - NAAQs. En este sentido se recomienda, en una primera etapa de evaluación de 5 años adoptar el límite de la UE (5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración promedio anual). Al término de este período se recomienda evaluar su actualización.

Respecto de Benceno, y dado que el único con efecto documentado científicamente asociado a cáncer (leucemia), no se justifica, al menos por ahora, establecer otro criterio de evaluación adicional al estándar anual de la UE.

La campaña de monitoreo implementada en invierno en Santiago (Universidad de Santiago) indica que los niveles de concentración se encuentran bajo o cerca de la normativa europea en (casi) todos los puntos. Las concentraciones de Benceno están determinadas fuertemente por el impacto del tráfico vehicular, y se espera que reflejen situación de máximo nivel de concentración durante el año debido condiciones meteorológicas (época de invierno con ventilación reducida). De esta forma es posible postular que la concentración anual promedio estarán bajo el nivel de la norma europea.

Para propósitos de seguimiento normativo, se recomienda la adopción de las definiciones que incorpora la normativa europea respecto de la c Ello implica, incorporar definiciones de mediciones indicativas, mediciones con estaciones fijas, estimación objetiva, de manera tal que la metodología de monitoreo para dar seguimiento a la normativa de Benceno permita el uso de diferentes tecnologías, según su nivel de incertidumbre.

Las tecnologías aquí utilizadas en la campaña de monitoreo (DOAS, tubos pasivos, sensores) mostraron su capacidad de entregar datos confiables de medición, sin embargo, la adopción/selección de ellos deberá evaluarse caso a caso según el nivel de concentración real que exista en la zona a ser considerada, y en función de la predominancia de alguna fuente emisora de COVs relevante, que pueda estar impactando un área poblada. En todo caso, en situaciones en donde exista una condición de Saturación o Latencia por Benceno, las mediciones siempre deberán ser realizadas por metodologías clasificadas como "estaciones fijas", complementadas con monitoreo que permita verificar si es un punto de máximo impacto o si representa una zona poblacional

7 Referencias

- Mavroidis, I., Griffiths, R.F., 2002. Comparison of Open-Path and Point Measurements of a Gaseous Pollutant in the Vicinity of a Model Building. *Water Air Soil Pollut. Focus* 2, 655–667. <https://doi.org/10.1023/A:1021361501983>
- Shuai, J., Kim, S., Ryu, H., Park, J., Lee, C.K., Kim, G.B., Ultra, V.U., Yang, W., 2018. Health risk assessment of volatile organic compounds exposure near Daegu dyeing industrial complex in South Korea. *BMC Public Health* 18. <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5454-1>
- Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, X., Lü, S., Huang, Z., Huang, X., Yang, W., Wang, Y., Zhang, Q., 2016. Spatiotemporal patterns and source implications of aromatic hydrocarbons at six rural sites across China's developed coastal regions. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 121, 6669–6687. <https://doi.org/10.1002/2016JD025115>

ANEXO I: Certificación DOAS para Benceno



PRODUCT CONFORMITY CERTIFICATE

This is to certify that the

AR500 Open Path Monitor

Manufactured by:

Opsis AB
PO Box 244
5-244 02 Furulund
Sweden

has been assessed by Sira Certification Service
And for the conditions stated on this certificate complies with:

**MCERTS Performance Standards for Open Path Ambient Air Quality Monitoring
Systems using Differential Optical Absorption Spectrometry (DOAS)
Version 3, August 2017**

Certification Ranges :

CaH₆ (Benzene) 0 to 10 µg/m³ at 300m equivalent to 0 to 1 ppm metres

Project No.: 6740422 & 80025781
Certificate No.: Sira MC040048/03
Initial Certification: 05 November 2004
This Certificate issued: 20 November 2019
Renewal Date: 04 November 2024

Emily Alexander
Environmental Project Engineer

MCERTS is operated on behalf of the Environment Agency by

Sira Certification Service

Unit 6, Hawarden Industrial Park
Hawarden, Deeside, CH5 3US
Tel: +44 (0)1244 670 900



*The MCERTS certificate consists of this document in its entirety.
For conditions of use, please consider all the information within.
This certificate may only be reproduced in its entirety and without change.
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/mcerts*

Page 1 of 5

Form 1305
Issue 0

70

Universidad de Santiago de Chile
Departamento de Física, Facultad de Ciencia
Avda. Ecuador 3493, Santiago, Chile

ANEXO II: Guía de uso correcto de sensores para el monitoreo de calidad del aire

Definición de la estrategia de monitoreo

Dado que es una tecnología innovadora aún en desarrollo, es crucial la definición de una estrategia de monitoreo y diseño de seguimiento tal que responda al problema que se va a estudiar, con los siguientes aspectos:

- identificar los contaminantes de interés,
- determinar dónde y cuándo realizar las mediciones,
- evaluar sus recursos
- Selección de un sistema de sensores que se encuentre validado previamente bajo metodología científica, es decir bajo la evaluación de un set de parámetros estadísticos. Cabe mencionar que este proceso de evaluación ya está definido en guías de evaluación de rendimiento de sensores por la autoridad ambiental de los Estados Unidos (US-AQMD y US-EPA), detallados en ANEXO III: “Protocolos de prueba de rendimiento, métricas y valores objetivo para sensores de aire: uso en aplicaciones de monitoreo informativo, complementarias y no reglamentarias, en exteriores y en sitios fijos”

La planificación de una estrategia de monitoreo es a menudo un proceso iterativo. Una vez que tenga los objetivos iniciales, deberá evaluarlos en términos de lo que se puede lograr dadas las realidades del proyecto (especialmente los recursos).

Para diseñar y desarrollar una estrategia de monitoreo, deberá enmarcar el problema que se va a estudiar, identificar los contaminantes de interés, determinar dónde y cuándo realizar las mediciones, evaluar sus recursos y luego seleccionar un sistema de sensores.

Se debe desarrollar una estrategia de seguimiento de acuerdo con los objetivos del proyecto, el tamaño del área a evaluar, número y distribución de fuentes de emisión, presencia / ausencia de monitoreo existente de la calidad del aire, número y tipos de contaminantes de interés, especificidad y sensibilidad de un sistema de sensores, frecuencia y duración del monitoreo, magnitud de las concentraciones esperadas y recursos disponibles, incluidos fondos, mano de obra y horarios. También considerar cómo planea usar los datos y las posibles acciones de seguimiento basadas en resultados particulares.

La Ilustración 1 enfatiza la naturaleza iterativa de la planificación. Esta sección lo guiará para abordar las preguntas por qué, qué, dónde, cuándo y cómo que darán forma a un plan ideal, este ciclo debe repetirse para responder a realidades como las limitaciones presupuestarias.



Ilustración 1: Planificación del proyecto es un proceso que puede necesariamente repetirse con la finalidad de ajustarse a las realidades

Al evaluar dónde y cuándo realizar las mediciones, se debe considerar:

- El entorno geofísico (por ejemplo, el terreno),
- La meteorología (por ejemplo, vientos predominantes),
- Los tipos y características de las fuentes (por ejemplo, el horario de funcionamiento) y
- La disponibilidad de los datos de monitoreo existentes.
- Límites de la comunidad
- Fuentes de emisión, los sitios de los monitores existentes y otros detalles.

El número de sitios en su red dependerá de los recursos (fondos disponibles y personal / voluntarios); el tamaño del área que se evaluará, incluida la distancia entre la (s) fuente (s) y la (s) ubicación (es) de interés; la necesidad (o no) de mediciones de fondo; y gradientes esperados en concentraciones desde la (s) fuente (s) a la (s) ubicación (es) de preocupación (debido a la dirección del viento, velocidad del viento, geografía, etc.). El proceso de planificación suele ser iterativo.

Cómo se selecciona un sensor

Para que las mediciones proporcionen información significativa y potencialmente procesable, es importante comprender métricas de medición como precisión, exactitud y sesgo para los sensores que planea usar. La exactitud es el acuerdo general de la medición de un sensor a la concentración real, generalmente medida por un monitor de referencia. Estas métricas pueden cambiar con el tiempo y bajo diferentes condiciones meteorológicas. Para esto se recomienda seguir las guías elaboradas por la US-EPA, con la información mínima requerida para informar su rendimiento, ANEXO III: “Protocolos de prueba de rendimiento, métricas y valores objetivo para sensores de aire: uso en aplicaciones de monitoreo informativo, complementarias y no reglamentarias, en exteriores y en sitios fijos”

Luego de haber elegido el tipo de sensor, o mejor dicho el modelo de Raw sensor a utilizar, es necesario considerar las siguientes alternativas disponibles, que se detallan en la Ilustración 2. Los pasos clave incluyen elegir un sensor que pueda medir de manera confiable sus contaminantes de interés, al nivel de concentraciones que espera ver, con el nivel de exactitud y precisión necesarios para abordar la pregunta de investigación, seleccionando las características lo que necesita para la comunicación / procesamiento / visualización de datos, y ajustarse a su presupuesto y recursos disponibles.

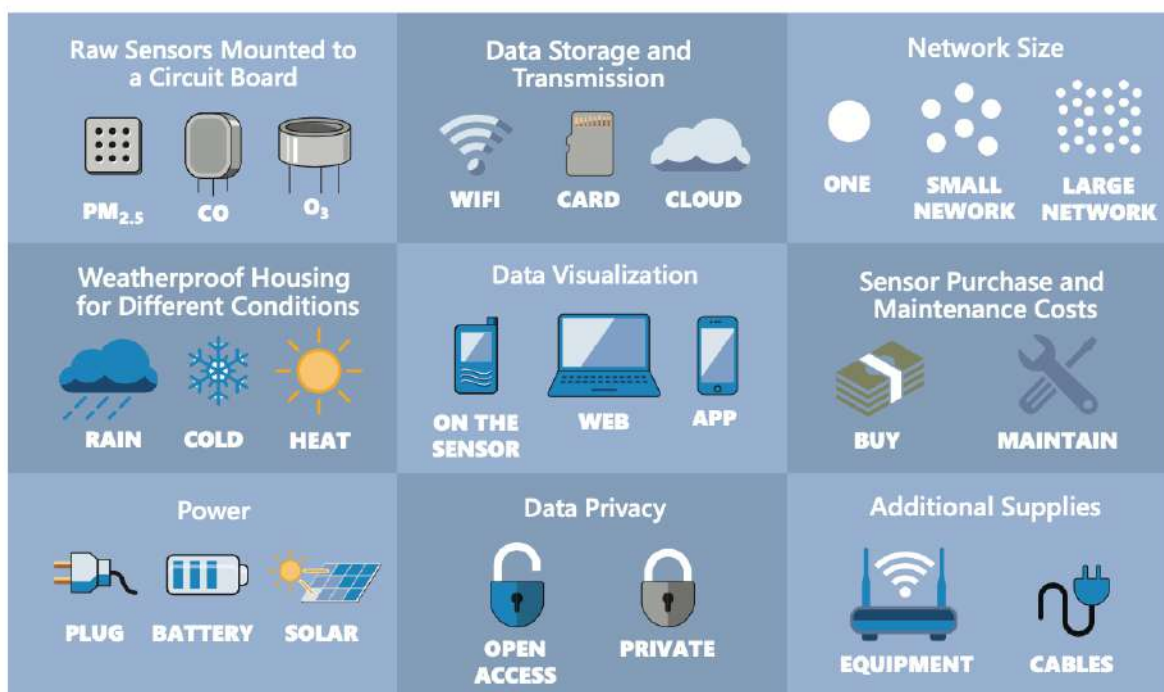


Ilustración 2

Por otro lado, es importante acotar que los low cost sensors han sido incorporados en 2 Normas estatales y locales en Estados Unidos a cargo del SC-AQMD, como técnicas de monitoreo complementarias a las tradicionales.

Estas normas y sus objetivos de monitoreo son las siguientes.

Rule 1180 - Refinery Community and Fenceline Air Monitoring-

Monitoreo del aire cercanos a refinería y del tipo fenceline

- Implementar una red de monitoreo del aire comunitario, en tiempo real cerca de todas las refinerías de la Cuenca;
- Proporcionar información sobre la calidad del aire en tiempo real a través de un sitio web dedicado para informar al público sobre las condiciones actuales de la calidad del aire en su comunidad;
- Notificar al público en caso de superación de umbrales predeterminados.
- Proporcionar datos actualizados sobre la calidad del aire de la comunidad;
- Promover la conciencia sobre el impacto potencial de las emisiones de las refinerías en la calidad del aire a través de la educación pública;
- Seguimiento del progreso en la mejora de la calidad del aire de la comunidad

AB 617 Community Air Monitoring –

Plan de Monitoreo del Aire de la Comunidad (CAMP)

- Mejorar la calidad del aire y la salud pública en las comunidades de justicia ambiental.
- Proporcionar nueva información sobre la contaminación del aire a nivel comunitario.
- El monitoreo se realizará en áreas de interés identificadas por las comunidades seleccionadas.
- Las áreas de monitoreo reflejan las prioridades de calidad del aire en las comunidades AB 617
- Se utilizarán muchos tipos de equipos de monitoreo, desde técnicas avanzadas hasta sensores de bajo costo.

Además, los low cost sensor pueden ser utilizados para "llenar los vacíos" en una red de monitoreo del aire, y comprender mejor cómo varían las concentraciones de contaminantes a nivel local. Un ejemplo de esto se presenta en la siguiente Ilustración 3.



Ilustración 3: Sensores (■ ■ ■) y estaciones de monitoreo tradicionales (○, ○)

Finalmente, es importante tener en cuenta que, si bien los sensores de calidad del aire de bajo costo son más simples de operar que los equipos de monitoreo convencionales, siguen siendo una tecnología nueva, por lo que requieren otro tipo de recursos, entre estos, habilidades técnicas, de conocimiento y la habilidad de todos los involucrados en el proyecto, un ejemplo de esto se presenta en la siguiente Ilustración 4, que ejemplifica la variedad de recursos profesionales a disponer ante el uso de una tecnología de bajo costo en insumos instrumental, pero de alto costo profesional.

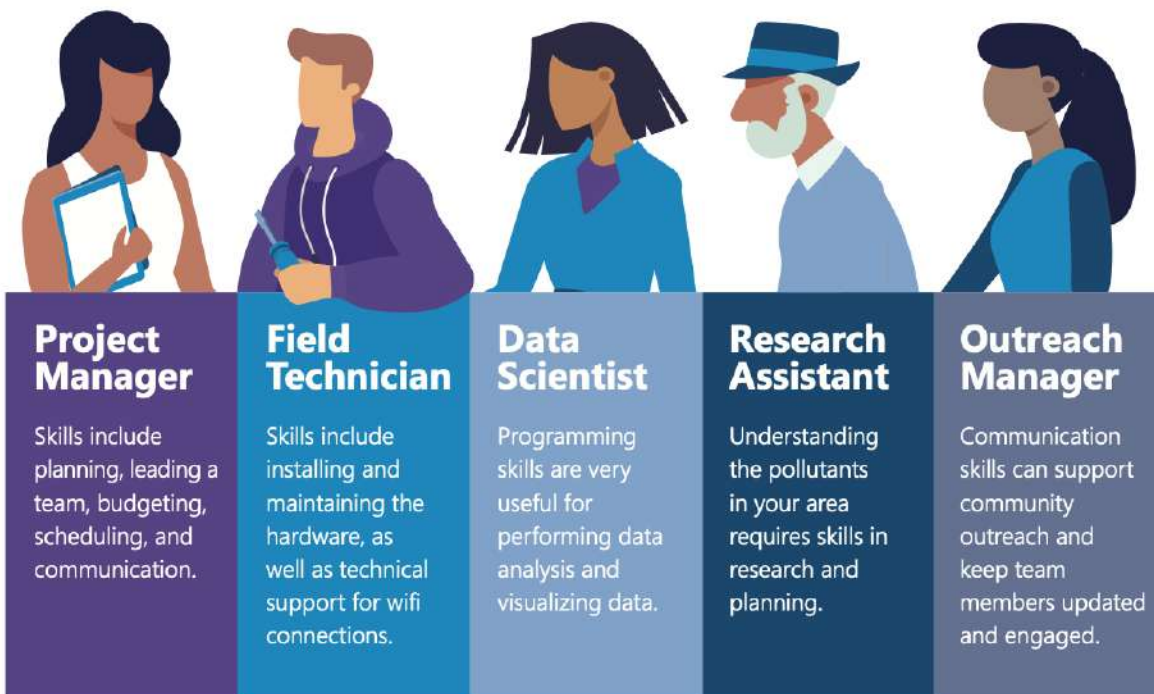
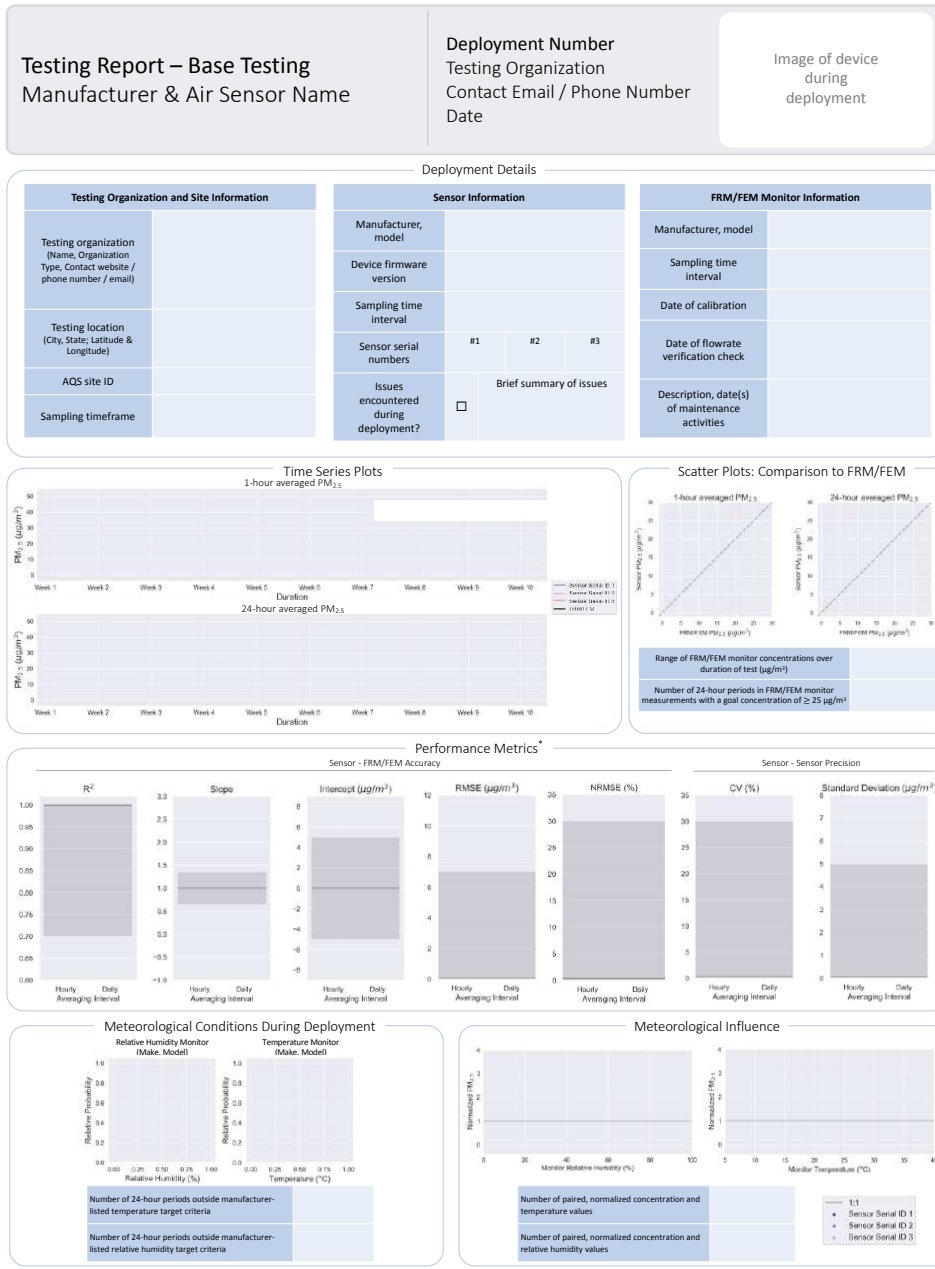


Ilustración 4

ANEXO III: “Protocolos de prueba de rendimiento, métricas y valores objetivo para sensores de aire: uso en aplicaciones de monitoreo informativo, complementarias y no reglamentarias, en exteriores y en sitios fijos”

Considerar que este ejemplo está desarrollado para el contaminante MP2,5, pero es válido como protocolo para cualquier contaminante a evaluar.



*For evaluations with greater than three sensors, grouping individual sensor metrics into boxplots is recommended for displaying results. Note that this recommendation does not apply to metrics computed as a single value for all sensors over the whole evaluation group, such as RMSE, NRMSE, CV, and standard deviation.

Testing Report – PM_{2.5} Base Testing
 Manufacturer & Air Sensor Name

Deployment Number
 Testing Organization
 Contact Email / Phone Number
 Date

Image of device during deployment

Tabular Statistics

- Sensor – FRM/FEM Correlation

	Bias and Linearity						Data Quality			
	R ²		Slope		Intercept (b) (µg/m ³)		Uptime (%)		Number of paired sensor and FRM/FEM concentration values	
	1-Hour ○○○	24-Hour ○○○	1-Hour ○○○	24-Hour ○○○	1-Hour ○○○	24-Hour ○○○	1-Hour ○○○	24-Hour ○○○	1-Hour	24-Hour
Metric Target Range	≥ 0.70	≥ 0.70	1.0 ± 0.35	1.0 ± 0.35	-5 ≤ b ≤ 5	-5 ≤ b ≤ 5	90%*	90%*		
Sensor Serial #1										
Sensor Serial #2										
Sensor Serial #3										
Mean										

	Error			
	RMSE (µg/m ³)		NRMSE (%)	
	1-Hour ○	24-Hour ○	1-Hour ○	24-Hour ○
Metric Target Range	≤ 7	≤ 7	≤ 30	≤ 30
Deployment Value				

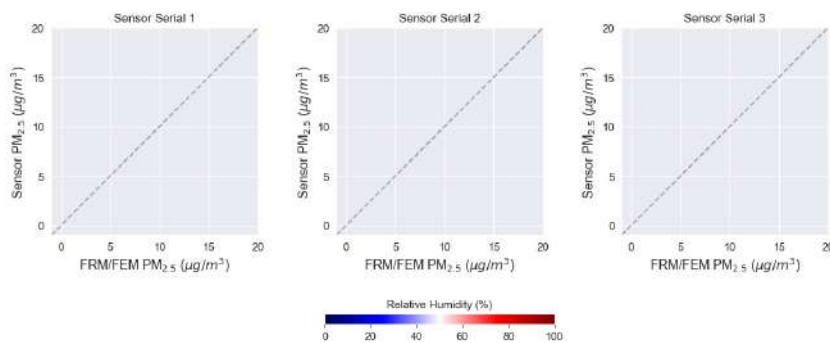
Device-specific metrics (computed for each sensor in evaluation)
 ○○○ Metric value for none of devices tested falls within the target range
 ●○○ Metric value for one of devices tested falls within the target range
 ●●○ Metric value for two of devices tested falls within the target range
 ●●● Metric value for three of devices tested falls within the target range

Single-valued metrics (computed via entire evaluation dataset)
 ○ Indicates that the metric value is not within the target range
 ● Indicates that the metric value is within the target range

- Sensor – Sensor Precision

	Precision (between collocated sensors)				Data Quality			
	CV (%)		SD (µg/m ³)		Uptime (%)		Number of concurrently reported sensor concentration values	
	1-Hour ○	24-Hour ○	1-Hour ○	24-Hour ○	1-Hour ○	24-Hour ○	1-Hour	24-Hour
Metric Target Range	≤ 30	≤ 30	≤ 5	≤ 5	90%*	90%*		
Deployment Value								

Individual Sensor – FRM/FEM Scatter Plots



*This value is only a recommendation for ensuring data quality and is not included in the list of target values discussed in Section 4 of the Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors document.

Testing Report – PM_{2.5} Base Testing
 Manufacturer & Air Sensor Name

Deployment Number
 Testing Organization
 Contact Email / Phone Number
 Date

Image of device
 during
 deployment

Supplemental Information

Additional documentation may be attached or linked to digital versions alongside this report. Such documentation may include field reports and observations during the testing period, maintenance logs for sensors and FRM/FEM monitors, standard operating procedures, and other documentation relevant to this testing report (see below for examples).

Supplemental Documentation	Attached	Description & URL or file path to documentation
Field observations	<input type="checkbox"/>	
Maintenance logs	<input type="checkbox"/>	
Standard operating procedure(s)	<input type="checkbox"/>	
Photos of equipment setup and testing	<input type="checkbox"/>	
Product specification sheet(s)	<input type="checkbox"/>	
Product manual(s)	<input type="checkbox"/>	
Deployment issues	<input type="checkbox"/>	
Data storage and transmission method	<input type="checkbox"/>	
Data correction approach	<input type="checkbox"/>	
Data analysis/correction scripts and version	<input type="checkbox"/>	
Air Monitoring Station QAPP	<input type="checkbox"/>	
Summary of FRM/FEM monitor QC checks	<input type="checkbox"/>	
Other documents	<input type="checkbox"/>	



ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Informe de avance 2

Adquisición 608897-35-LP20

PRESENTACIÓN	3
1 COV'S VIABLES A NORMATAR	4
1.1 DEFINICIÓN DE COV'S.....	4
1.2 PRINCIPALES EFECTOS EN SALUD.....	5
1.3 RESUMEN DE REVISIÓN DE EMISIONES	6
2 PROPUESTA DE COV'S QUE SON POSIBLES DE ESTABLECER UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE.14	
2.1 METODOLOGÍAS DE MONITOREO PARA COV'S	19
2.2 RECOMENDACIÓN DE ESTRATEGIA DE MONITOREO	20
2.3 RESUMEN DE REVISIÓN DE CALIDAD DEL AIRE.....	22
3 EVALUACIÓN DE NIVELES DE EXCEDENCIA DE LOS COV'S A NORMATAR.	42
4 METODOLOGÍA CONSENSUADA DE LA CAMPAÑA DE MONITOREO A REALIZAR.	44
4.1 METODOLOGÍAS DE MONITOREO	44
4.1.1 Metodología continua: DOAS OPSIS para Benceno	44
4.1.2 Muestreadores por difusión (tubos pasivos). IVL.....	47
4.1.3 Metodología de monitoreo innovador: Low Cost Sensors para COV (LCS)	51
4.2 LUGARES DE MEDICIÓN	55
4.2.1 Instalación DOAS.....	55
4.2.2 Tubos pasivos	57
4.2.3 Sensores	58
5 BIBLIOGRAFÍA.....	59
ANEXO I: REPORTE JOAN O. GRIMALT. ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE CON RESPECTO A LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES CON REFERENCIA A LAS NORMATIVAS LEGALES Y EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN EUROPEAS	60

PRESENTACIÓN

La Universidad de Santiago de Chile presenta a continuación el segundo informe de avance, referente a la licitación ID 608897-35-LP20, solicitado por el Ministerio del Medio Ambiente, enmarcado bajo el título “ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES”. La necesidad de realizar este estudio está en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (PPDA CQP), el cual compromete la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire, referida a contaminantes clasificados como Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's).

El objetivo general de este estudio es generar y recopilar antecedentes técnicos que permitan elaborar una norma primaria de calidad del aire de uno o más compuestos orgánicos volátiles (COV's) que presenten impactos negativos en la salud.

De acuerdo con las bases técnicas, en el presente informe se presenta el reporte y resultado de las siguientes actividades:

1. Cumplimiento del numeral 3.1, de las Bases Técnicas, correspondiente al objetivo específico a) *“Determinar que COVs son viables de normar”*.
2. Cumplimiento del numeral 3.2 de las Bases Técnicas, correspondiente al objetivo específico b). *“Evaluar niveles de excedencia de los COVs a normar”*
3. Metodología consensuada de la campaña de monitoreo a realizar. Correspondiente al numeral 3.3.ii de las Bases Técnicas.

1 COV'S VIABLES A NORMAR

1.1 Definición de COV's

En la literatura científica se pueden encontrar diferentes definiciones de COVs. La Tabla 1 entrega algunas de ellas. Los COVs emitidos a la atmósfera incluyen un número indeterminado de especies orgánicas con diferente estructura molecular destacándose hidrocarburos saturados e insaturados, alcoholes orgánicos, aromáticos, compuestos orgánicos halogenados y sulfurados.

Tabla 1. Diferentes definiciones de COV's

Institución	Definición de COV's
Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM)	Enfocada en la presión de vapor. "COVs son compuestos orgánicos que tienen una presión de vapor mayor que 0.0133kPa a 298 K"
Unión Europea (EU)	Enfocada en la presión de vapor. "COVs deben tener una presión de vapor mínima de 0.01 kPa a 293 K".
Organización Mundial de la Salud (WHO)	Enfocada en el punto de ebullición. "COV's muy volátiles tienen puntos de ebullición en el rango de <0 a 50-100°C. COVs semivolátiles tienen puntos de ebullición en el rango de 240-260°C a 380-400°C, y COVs tienen puntos de ebullición en el rango de 50-100°C a 240-260°C.
Plan de Descontaminación Puchuncaví-Quintero-Concón	Toda sustancia química que, a excepción del Metano, contenga átomos de carbono e hidrógeno (que puedan ser sustituidos por otros átomos como halógenos, oxígeno, azufre, nitrógeno o fósforo) y que a 20°C tenga una presión de vapor mayor o igual a 0,01 kPa, o que tenga una volatilidad equivalente según condiciones particulares de uso, manipulación y/o almacenamiento.

Institución	Definición de COV's
	Se incluye en esta definición la fracción de creosota que sobrepase este valor de presión de vapor a la temperatura indicada de 20°C.

En el primer informe de Avance incorporó un análisis que justifica la complejidad que significa el levantamiento de una regulación ambiental de COV's, ya que este término se refiere a un grupo de sustancias (con un número indeterminado) y no a una sustancia en particular. Esta complejidad se transfiere a diversos ámbitos de la elaboración de una regulación de calidad del aire, en especial la definición para propósitos legales, efectos en salud, y metodologías de seguimiento y verificación (monitoreo). Por ejemplo, la Unión Europea (UE) disponía de un límite máximo de COV's de 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, ese límite se eliminó debido a la falta de documentación robusta que indique efectos adversos en la salud. Al mismo tiempo, la USEPA tiene definiciones diferentes de COV's si la regulación es hacia concentraciones intradomiciliarias (indoor) o extradomiciliarias (outdoor): la regulación indoor está enfocada en efectos específicos en la salud, mientras que la regulación outdoor está más enfocada en el rol en la formación de contaminantes fotoquímicos (O_3 y Aerosoles Orgánicos Secundarios (SOA)).

1.2 Principales efectos en salud

Es evidencia científica que, de todos los COV's disponibles en la atmósfera (independiente de su definición), los más abundantes en ambientes urbanos corresponden a Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos (denominados BTEX). Si bien, los BTEX tienen un impacto nocivo en la salud de las personas debido a que son tóxicos¹, el Benceno ha recibido especial atención ya que está clasificado como un compuesto cancerígeno para los humanos por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC). Afecta al sistema hematopoyético. Hay asociaciones entre exposición al benceno y algunos tipos de leucemias. Determinados grupos de la población son especialmente vulnerables (embarazadas y niños).

Los efectos nocivos del Tolueno se relacionan como un agente depresor del sistema nervioso central y como irritantes de la piel y membranas mucosas. No hay suficiente información que indique que es cancerígeno como el caso del Benceno.

Se ha relacionado la exposición aguda a Etilbenceno en el aire con irritación de ojos, vías respiratorias, narcosis dolor de cabeza y somnolencia. Las exposiciones crónicas y de largo

¹ Ver recopilación de informes USEPA de matrices de valores de referencia para manganeso, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno. disponibles en [Mn And Btex Reference Value Arrays \(Final Reports\) | Risk Assessment Portal | US EPA](#)

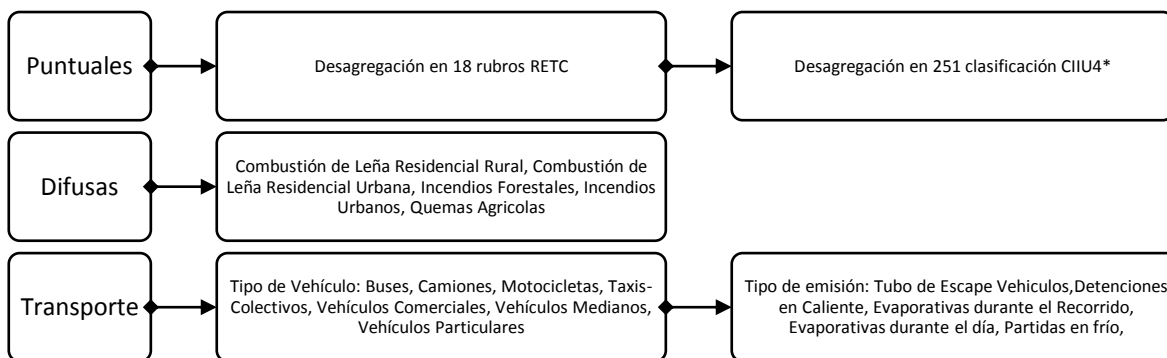
plazo pueden provocar ototoxicidad (efectos sobre la audición), toxicidad general del desarrollo, alteraciones celulares y necrosis en el hígado, toxicidad testicular y nefrotoxicidad. La exposición a niveles más altos puede producir mareo. La IARC lo ha catalogado como un compuesto posiblemente carcinogénico en humanos.

Xilenos agrupa a los isómeros meta-xileno, orto-xileno y para-xileno. La exposición a niveles altos de xilenos durante períodos breves o prolongados puede producir dolores de cabeza, falta de coordinación muscular, mareo, confusión y alteraciones del equilibrio; en tanto que la exposición breve a niveles altos de xileno también puede causar irritación de la piel, los ojos, la nariz y la garganta; dificultad para respirar; problemas pulmonares; retardo del tiempo de reacción a estímulos; alteraciones de la memoria; malestar estomacal; y posiblemente alteraciones del hígado y los riñones. La exposición a niveles muy altos de xileno puede causar pérdida del conocimiento y la muerte. No hay información suficiente que señale que ellos son cancerígenos (IARC).

1.3 Resumen de revisión de emisiones

El primer informe de avance incluyó la revisión de la información proporcionada de datos de calidad del aire y emisiones. En esta sección se ilustran los principales resultados y se realiza una interpretación respecto de los resultados disponibles de calidad de aire.

El Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) es el sistema de acumula más información de emisiones de COV's, que agrupa Fuentes Puntuales, Difusas y Transporte en el siguiente esquema.



*Figura 1: Las emisiones de fuentes puntuales son enviadas al RETC por el Ministerio de Salud por medio del Sistema de Declaración de Emisiones de Fuentes Fijas o Formulario 138 (F138), según lo requerido en el D.S. N° 138/2005 del MINSAL. Esta información se complementa con las emisiones enviadas por la Superintendencia del Medio Ambiente obtenida de los reportes del D.S. N° 13/2011 del MMA y D.S. N° 28/2013 del MMA (norma de emisión para centrales termoeléctricas y fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, respectivamente). En el contexto de las fuentes puntuales, cada año en el RETC se estiman las emisiones de transporte en ruta para 22 ciudades, con modelo de transporte¹³ y cinco sin modelo de transporte. Además de las emisiones de transporte en ruta, también se estiman las emisiones al aire asociadas a la combustión de leña residencial, incendios forestales, incendios urbanos y quemadas agrícolas. *CIU corresponde a Clasificación Internacional Industrial Uniforme.*

Esta fuente de información señala que las fuentes difusas tienen a emitir aproximadamente 1,04 a 2,03 Mton/año (período 2005-2018), el que representa más del 97% de las emisiones de COV's. El hecho que las fuentes difusas sea significativamente superior a otras categorías de fuentes emisoras también ha sido reportado en otros inventarios de emisiones (SISTAM Ingeniería, 2019). La quema de leña residencial urbana es la principal fuente emisora del tipo difusas que usualmente concentra más de la mitad de las emisiones difusas de COV's reportadas por RETC, y en segundo lugar le sigue la quema de leña rural con aproximadamente un 15-38% a lo largo de los años de evaluación. Entre los años 2014-2018 las emisiones de ambos tipos de fuentes muestran un descenso significativo respecto del año anterior, bajando a más de la mitad de lo que se venía reportando en años anteriores (Figura 2-Figura 3).

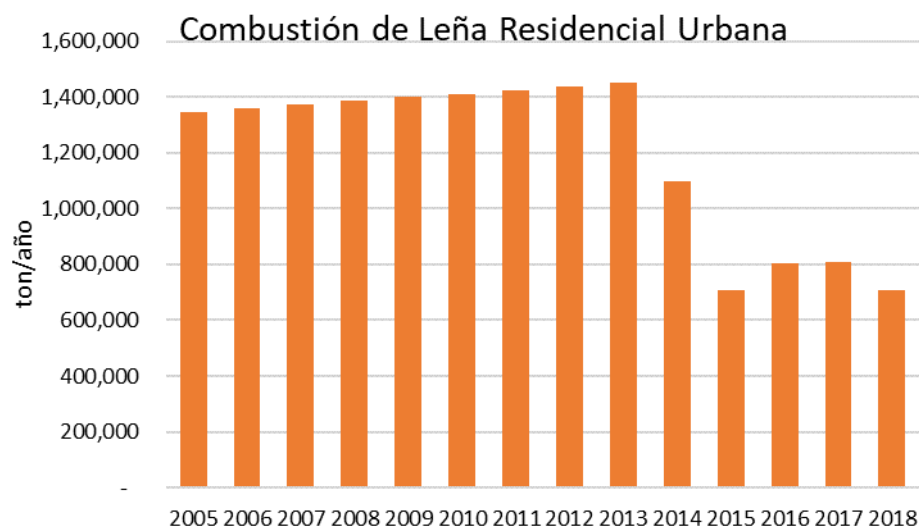


Figura 2: Emisiones de COV's combustión de Leña Residencial Urbana. Fuente: RETC.

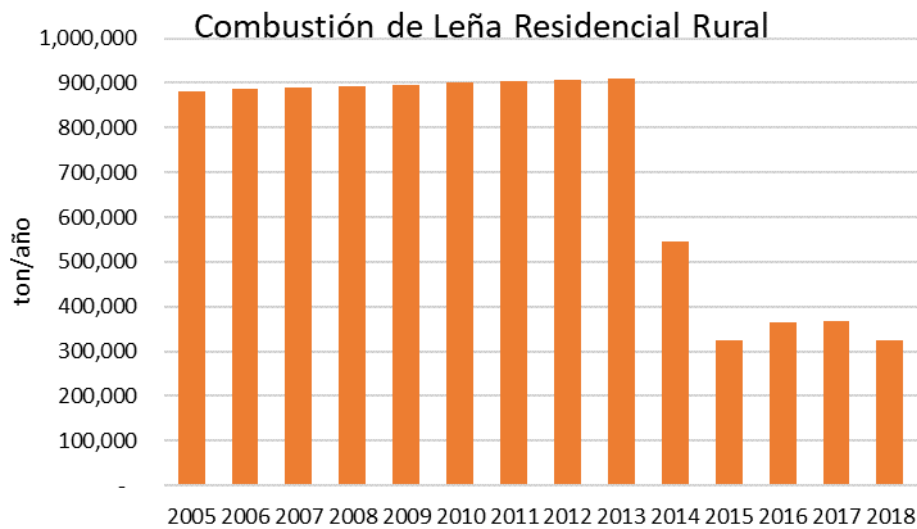


Figura 3: Emisiones de COV's combustión de Leña Residencial Rural. Fuente: RETC.

Las mayores emisiones de fuentes difusas se concentran en centros poblados del sector centro y sur del país. Entre la región de Arica y Parinacota y la región de Coquimbo (sector norte) presentan emisiones de COVs bajas, en tanto que a contar de la región de Valparaíso hasta la región de los Lagos hay las mayores emisiones como se observa en la **Figura 4** (se entrega la visualización del año 2018).

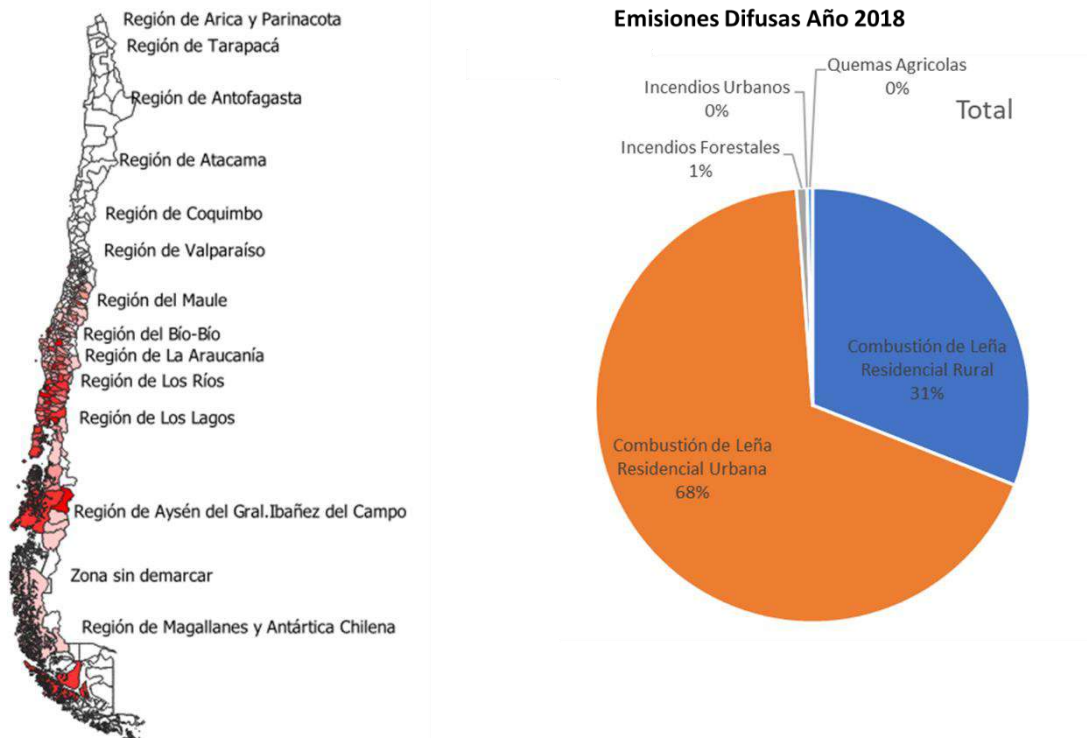


Figura 4: Distribución de fuentes difusas año 2018. Fuente: Datos RETC.

Las fuentes emisoras de tipo “Transporte” muestran niveles estables durante casi todos los años, sin embargo, en los últimos años muestra una disminución de aproximadamente 9 mil ton/año. En este caso, los centros urbanos más grandes, esto es la Región de Valparaíso, la RM y Región del Bío-Bío son las que mayor nivel de emisiones presentan. Al año 2018, estas tres regiones acumulaban el 71% de las emisiones totales de COVs. La emisión proveniente de vehículos particulares es la que domina más del 55% de las emisiones totales nacionales, seguid de Buses y vehículos comerciales (Figura 5)

Sin embargo, a nivel comunal se encuentran diferencias importantes hay algunas regiones que destacan en contribución. En la **Tabla 2** se entrega la emisión a nivel comunal de COVs para el año 2018, encontrándose que Quilicura y Santiago presentan los niveles más altos, sin embargo, en tercer y cuarto lugar aparecen las comunas de Viña del Mar (Valparaíso) y La Serena (Coquimbo).

Tabla 2; Emisión a nivel comunal de fuentes de Transporte de COVs, año 2018 (75% de las emisiones totales). Fuente: Datos RETC.

Región	Comuna	Emisión año 2018 (Toneladas)	Contribución Agregada (%)
RM	Quilicura	1,077	4.4%
RM	Santiago	1,028	8.5%
Valparaíso	Viña del Mar	784	11.7%

<i>Región</i>	<i>Comuna</i>	Emisión año 2018 (Toneladas)	Contribución Agregada (%)
<i>Coquimbo</i>	La Serena	698	14.6%
<i>RM</i>	Maipú	603	17.0%
<i>Valparaíso</i>	Valparaíso	599	19.4%
<i>Ñuble</i>	Chillán	585	21.8%
<i>Biobío</i>	San Pedro de la Paz	548	24.0%
<i>RM</i>	La Florida	546	26.2%
<i>RM</i>	Las Condes	518	28.3%
<i>Antofagasta</i>	Antofagasta	511	30.4%
<i>Valparaíso</i>	San Antonio	505	32.5%
<i>Valparaíso</i>	Los Andes	499	34.5%
<i>Coquimbo</i>	Coquimbo	461	36.4%
<i>Maule</i>	Talca	454	38.2%
<i>Arica y Parinacota</i>	Arica	452	40.0%
<i>Libertador General Bernardo O'Higgins</i>	Rancagua	442	41.8%
<i>Valparaíso</i>	San Felipe	441	43.6%
<i>RM</i>	San Bernardo	427	45.3%
<i>Tarapacá</i>	Iquique	423	47.1%
<i>RM</i>	Puente Alto	415	48.7%
<i>Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo</i>	Coyhaique	415	50.4%
<i>RM</i>	Providencia	413	52.1%
<i>Biobío</i>	Concepción	404	53.7%
<i>RM</i>	El Bosque	401	55.4%
<i>RM</i>	La Cisterna	386	56.9%
<i>RM</i>	Independencia	385	58.5%
<i>Biobío</i>	Los Angeles	385	60.1%
<i>RM</i>	San Miguel	365	61.5%
<i>RM</i>	Ñuñoa	357	63.0%
<i>Libertador General Bernardo O'Higgins</i>	San Fernando	353	64.4%
<i>Biobío</i>	Talcahuano	342	65.8%
<i>RM</i>	Renca	327	67.1%
<i>La Araucanía</i>	Temuco	326	68.5%
<i>Valparaíso</i>	Quilpué	319	69.8%
<i>Los Lagos</i>	Puerto Montt	309	71.0%
<i>Biobío</i>	Coronel	307	72.2%
<i>RM</i>	Vitacura	295	73.4%
<i>RM</i>	Colina	256	74.5%

Región	Comuna	Emisión año 2018 (Toneladas)	Contribución Agregada (%)
Atacama	Copiapó	256	75.5%

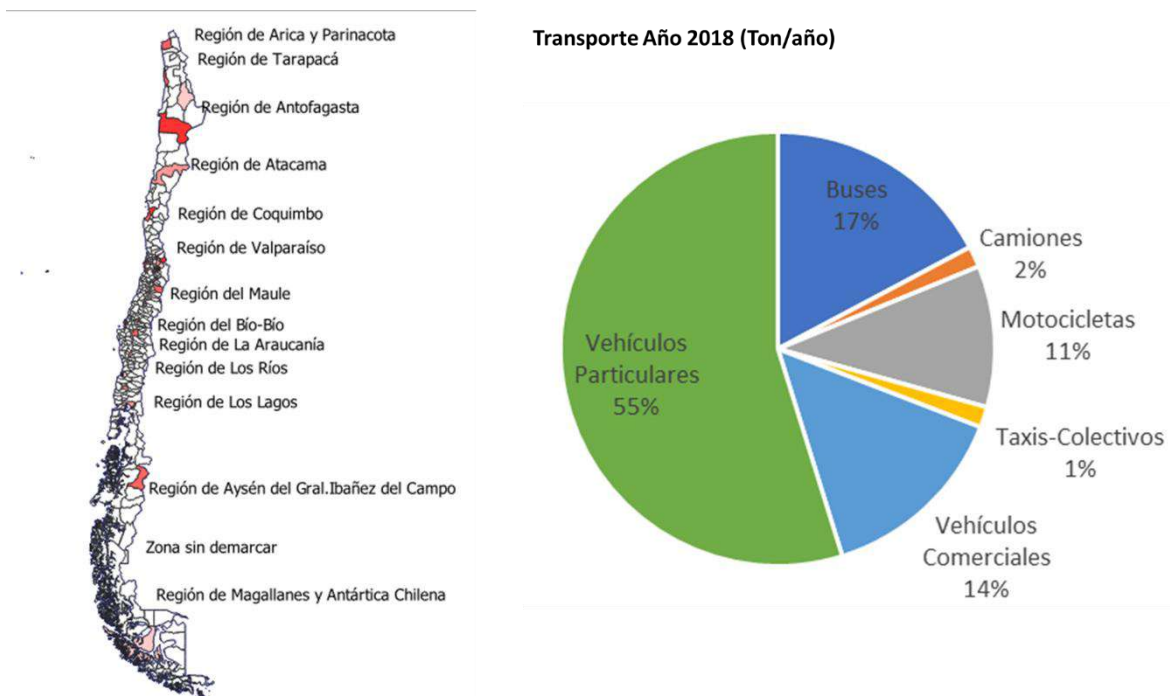


Figura 5: Distribución de fuentes móviles año 2018. Fuente: Datos RETC.

Las fuentes "Puntuales" representan el 0,4% del total nacional. es la que mayor nivel de variabilidad presenta entre los diferentes años, siendo el 2014 y 2015 los que mayor emisión presentaron. A pesar de la baja contribución de este tipo de fuentes en las emisiones de COVs, es posible encontrar lugares específicos donde la contribución de estas fuentes es significativa, mostrando una heterogeneidad en la distribución geográfica.

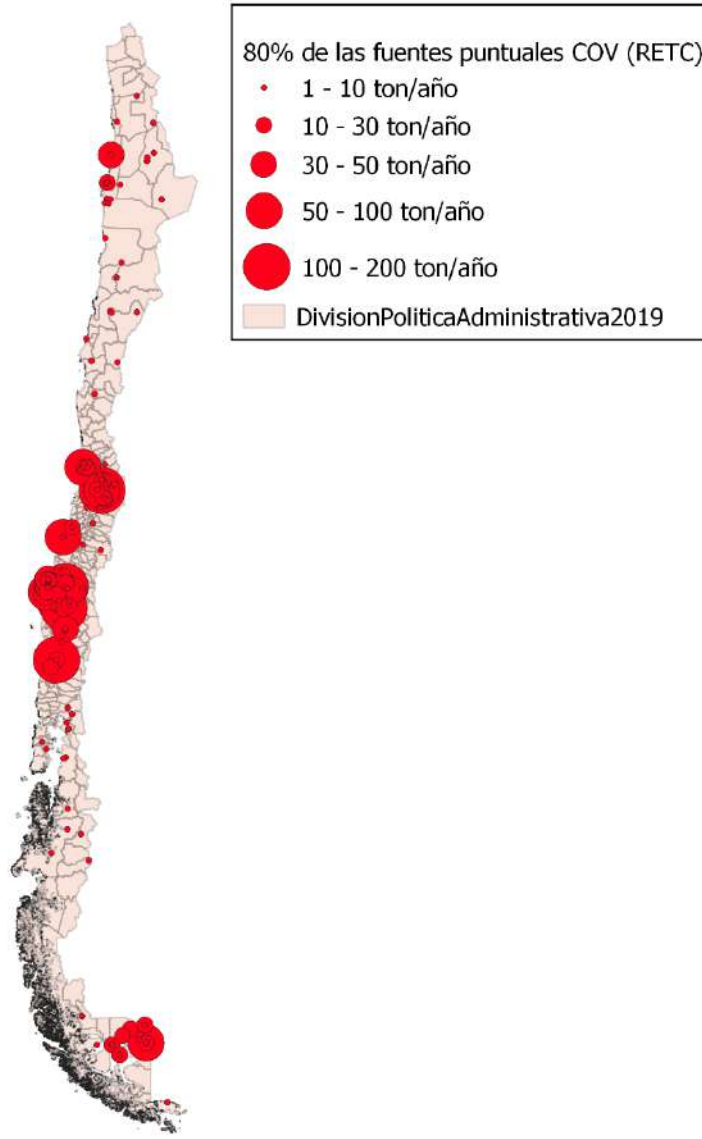


Figura 6: Distribución de fuentes puntuales año 2018. Fuente: Datos RETC

El grueso de las emisiones de COVs provenientes de fuentes puntuales se concentra en un número limitado de establecimientos, de modo que el 80% de las liberaciones se originan en 75 de los 7.412 establecimientos registrados en el RETC (Figura 3 y Tabla 2). En términos de gestión ambiental eficiente de fuentes emisoras, este escenario permitiría concentrar el esfuerzo de control de emisiones en dichas fuentes, y/o en un número limitado de ellas.

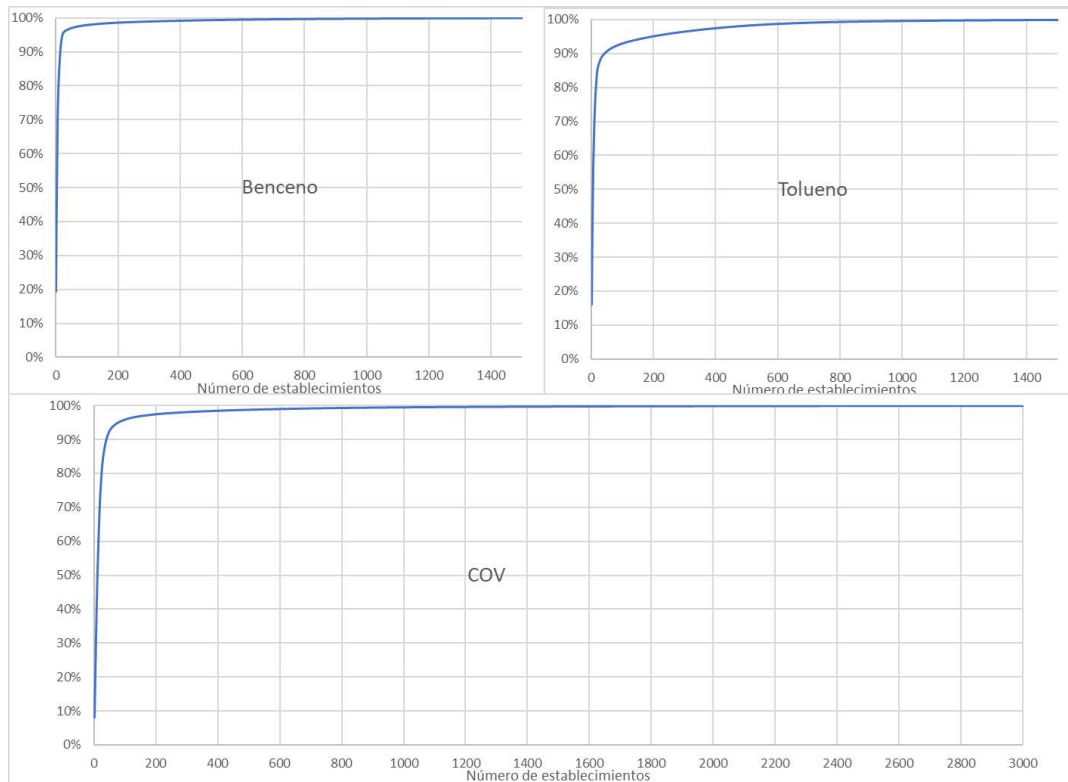


Figura 7. Emisión Porcentual Agregada 2018 (en los 3 gráficos se han excluido miles de establecimientos con las menores emisiones para observar mejor la curva)

Tabla 3. Número de establecimientos y Emisiones año 2018: Fuente: RETC (fuentes puntuales)

Contaminante	Total, Emisiones (toneladas)	Número de establecimientos	Núm. establecimientos que suman 80% de emisiones
Benceno	296.83	7,036	9
Tolueno	81.85	7,036	15
COV	4018.47	7,412	75

2 PROPUESTA DE COV'S QUE SON POSIBLES DE ESTABLECER UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE.

El principal requerimiento que establece el Plan de Descontaminación de Puchuncaví-Quintero-Concón es la elaboración de una norma de calidad del aire por COVs². Este tipo de instrumento de gestión ambiental busca proteger la salud de la población y rigen en todo el territorio de la República (MMA, 2013). Estas normas permiten dar un diagnóstico de la calidad del aire de una zona poblada. Se dice que existe una **condición de Saturación** cuando el nivel de concentración del contaminante criterio está por sobre el límite establecido por la regulación respectiva, mientras que hay **condición de Latencia** cuando el nivel de concentración se encuentra entre el 80 y el 100% del nivel de la norma. Cuando existe incumplimiento de ellas la autoridad ambiental debe establecer medidas que busquen recuperar la calidad del aire (en condición de Saturación) o bien evitar que se superen (en condición de Latencia), conocidos como Planes de Prevención y Descontaminación.

Tomando en consideración los propósitos regulatorios chilenos de una norma de calidad, el primer paso consiste en identificar y definir los contaminantes criterios a ser evaluados. Actualmente, en Chile hay 7 contaminantes criterios y que por lo tanto poseen norma de calidad (MP_{2,5}, MP₁₀, SO₂, NO₂, CO, Pb, O₃). Sin embargo, en base a la información recopilada previamente y tomando la experiencia de la Unión Europea, no es recomendable bajo ningún punto de vista definir como contaminante criterio directamente a los "COVs" así como lo establece literalmente el PDA PQC. Cabe recordar que en la UE la norma de COV's que inicialmente tenía fue derogada debido a falta de información científica respecto de efectos en salud y también a complejidades respecto a las técnicas de monitoreo que se deban utilizar. Además, hasta el día de hoy, no existe en el mundo una norma de calidad ambiental o estándar de calidad del aire que tome a los COV's como un contaminante criterio. Así, el levantamiento de una regulación nacional que defina a los COV's como un contaminante criterio, involucraría de muchas complejidades no solo instrumentales, sino también definitorias, de procesos legales, que terminarían en leyes que sería prácticamente imposible de aplicar el día de hoy.

A nivel internacional, los COV's muestran dos cuerpos legales diferentes que dependen del objetivo regulatorio que se quiera establecer, o bien del problema que se busque normar:

Las regulaciones extradomiciliarias (outdoor) buscan preferentemente controlar la generación de contaminantes secundarios atmosféricos (ozono y partículas secundarias). Desde este punto

² La regulación ambiental nacional define a las normas primarias de calidad del aire como instrumentos de gestión ambiental que establecen los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos, permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos, o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o salud de la población, definiendo los niveles que originan situaciones de emergencia

de vista, solo aquellos COVs reconocidos como “reactivos” son los que tienen regulaciones específicas. La USEPA regula solamente a los COV’s reactivos estableciendo una definición específica para ellos, y actualmente dispone de un listado específico de especies orgánicas que entran en esta definición, la que es actualizada periódicamente en función de los nuevos hallazgos científicos. Incluso, algunos estados tienen su propias definiciones y listados. La Unión Europea también dispone de regulaciones de COVs tomadas como precursores de ozono (directiva 2008/50/EC) y también dispone de un listado de compuestos orgánicos que se deben monitorear para propósitos regulatorios. Éstos se incluyen en el

- ANEXO I: Reporte Joan O. Grimalt. ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE CON RESPECTO A LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES CON REFERENCIA A LAS NORMATIVAS LEGALES Y EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN EUROPEAS.
- La regulación intradomiciliaria (indoor) buscan más bien proteger la salud de las personas a concentraciones altas. De hecho, en general los niveles de concentración de COV's en ambientes intradomiciliarios son significativamente mayores a los de concentraciones outdoor. En este sentido, la USEPA busca clasificar a los COVs en tres grupos: i) COVs muy volátiles (los más peligrosos), COVs normales y COVs semivolátiles.

En concreto, cuando se buscan normas de calidad del aire (similares al requerimiento del PDA PQC), se encuentra que la USEPA no dispone de un estándar de calidad del aire ni para COV's ni tampoco para alguno de ellos. No obstante, la Unión Europea sí dispone de un estándar de calidad del aire para Benceno, el cual ha sido adoptado por varios países. 53 países tienen un estándar de calidad del aire ambiente para el Benceno, que varían entre sí en más de un orden de magnitud (Sekar et al., 2019). Entre los valores anuales más estrictos (menores que el de la UE) se destacan en Irak, Japón ($3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Israel ($1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Nueva Zelanda ($3,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Francia ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$); mientras que los valores más altos se identifican en Siria ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Marruecos, Vietnam, Sudáfrica y Bielorrusia ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En el caso de Francia³ (el estándar más estricto), se pueden distinguir tres niveles de estándares que están superpuestos (europeo, nacional y local). El valor límite⁴ es de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en tanto que el objetivo de calidad⁵ es de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Detalles de la regulación Europea se ilustran en el

³ <https://www.airparif.asso.fr/en/reglementation/normes-francaises>

⁴ Valor límite: nivel fijado sobre la base de los conocimientos científicos con el objetivo de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana y / o el medio ambiente en su conjunto, que debe alcanzarse en un período determinado y no superarse una vez alcanzado.

⁵ Objetivos de calidad: nivel a largo plazo que se debe alcanzar y mantener, excepto cuando no se pueda lograr mediante medidas proporcionadas para garantizar una protección eficaz de la salud humana y el medio ambiente en su conjunto.

ANEXO I: Reporte Joan O. Grimalt. ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE CON RESPECTO A LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES CON REFERENCIA A LAS NORMATIVAS LEGALES Y EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN EUROPEAS.

Tabla 4: Estándares mundiales de calidad del aire ambiental para benceno. Los estándares de calidad del aire de Kenia especifican los límites para los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (máximo instantáneo 700 ppb) y los compuestos orgánicos volátiles totales ($600 \mu\text{g} / \text{m}^3\text{-}24 \text{ h}$), pero no explícitamente para el benceno. Fuente: Sekar et al., 2019.

Continente	País	Valor Límite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Intervalo de evaluación	Estándar/Definición	Referencia
Asia	India	5	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Central Pollution Control Board, 2009)
Asia	Irak	3	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Ministry of Oil, 2018)
Asia	Japón	3	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Ministry of Environment, 2009)
Asia	Líbano	5	Anual	Valor límite	(European Union, 2016)
Asia	Rusia, Armenia, Azerbaiyán y Tayikistán	100	24 h	Concentración máxima permitida	(ENVIRON, 2014)
		300	20 min		
		5	Anual	GN 2.1.6.1338-03 para zona de protección sanitaria	
Asia	Corea del Sur	5	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Ministry for the Environment South Korea, 2010)
Asia	Siria	20	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Official Gazette, 2003)
Asia	Vietnam	22	1 h	Reglamento técnico nacional sobre sustancias peligrosas en el aire ambiente (QCVN 06:2009/BTNMT)	(Clean Air Initiative for Asian Cities (CAI-Asia) Center, 2010)
		10	Anual		
Asia	Israel	3.9	24 h	Estándar de calidad del Aire	(Department of Environmental health, 2017)
		1.3	Anual		
Australia	Nueva Zelanda	5 (2002) 3.6 (2010)	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Ministry for the Environment and the Ministry of Health, 2002)
África	Botsuana	5	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Modupe O. Akinola, 2017)
África	Marruecos	10	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Chirmata et al., 2017)
África	Sud África	10	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Department of Environmental Affairs South Africa, 2009)
Europa	28 miembros	5	Anual	Valor límite para la protección de la salud humana	(European Union, 2008)

Continente	País	Valor Límite (µg/m ³)	Intervalo de evaluación	Estándar/Definición	Referencia
	de la Unión Europea, Corea del Norte y Turquía				
Europa	Francia	2	Anual	Objetivo de Largo Plazo	(Air quality observatory in the Paris region, 2018)
Europa	Albania	5	8 h	Estándar Primario y Secundario	(Environmental center for Administration and Technology, 2008)
Europa	Bielorrusia	40 10	24 h Anual	Concentración máxima permitida	(European Union, 2012)
Europa	Suecia	Umbral Superior: 3.5 Umbral Inferior: 2	Anual	Estándar de calidad Ambiental	(Swedish Code of Statutes, 2010)
Europa	Malta	Umbral Superior: 3.5 Umbral Inferior: 2	Anual	Regulación Ambiental de Calidad del Aire	(Ambient air quality Standards Malta, 2010)
Europa	Escocia	3.25	Anual	Valor Objetivo	(Air Pollution Information System, 2016)
Europa	Irlanda del Norte	3.25	Anual	Valor Objetivo	(Air Pollution Information System, 2016)
S. América	Colombia	5	Anual	Concentración máxima permitida	(Airlex worldwide Air quality legislation, 2013)
S. América	Perú	4	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Decreto Supremo N 074, 2001-Pcm, 2007)
N. América	Cuba	1000	20 min	Concentración máxima permitida	(Airlex worldwide Air quality legislation, 2013)

Es de opinión de este equipo consultor presentar una propuesta de regulación de COVs nacional enfocándose en aquellos compuestos que presentan mayor nivel de concentración (siguiendo la tendencia internacional), esto es los BTEX. A su vez, y dado que el Benceno es el único BTEX que internacionalmente tiene un estándar de calidad del aire como el que requiere el PDA PQC, se recomienda que Chile empiece a adoptar esta normativa de la misma forma como lo han adoptado los otros países de la Unión Europea.

Se recomienda también incluir marcos regulatorios complementarios (como normas de emisión) que también involucre el seguimiento de los otros BTEX, de forma tal que el seguimiento de su concentración (mediante monitoreo o técnicas indicativas) en el aire ambiente se adopte dentro de las rutinas de monitoreo al igual que los otros contaminantes.

2.1 Metodologías de monitoreo para COV's

En el pasado, los COV's solía medirse como hidrocarburos no metánicos (HCNM), es decir todos excepto el Metano (CH₄) ya que éste se oxida muy lento en la atmósfera y por lo tanto en una escala temporal de horas o días no contribuye a la formación de ozono comparado con otros compuestos orgánicos. Sin embargo, la experiencia internacional señala que para propósitos regulatorios y seguimiento de fuentes emisoras es más eficiente enfocar la regulación de COVs en los principales compuestos que se encuentran en mayor concentración en la atmósfera, esto es los BTEX. A pesar de que su monitoreo no es una obligación regulatoria hoy en día en Chile, existe información histórica que permiten evaluar los niveles de concentración que hay algunas regiones, y entonces ayudan a visualizar un escenario eventual regulatorio. Esta información fue procesada y entregada en el informe N°1 de avance y se entrega un resumen en la sección **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..**

En general se pueden identificar dos principios generales monitoreo se pueden implementar en calidad del aire para Benceno (y con alguna extensión a BTEX):

- i) monitoreo en una línea (open path): el más común consiste en utilizar DOAS, el cual es una técnica basada en el diferencial de la absorción de luz UV o visible.
- ii) monitoreo puntual: Monitoreo puntual de Benceno es generalmente basado en utilizar cromatografía gaseosa (GC) con diferentes detectores (FID, PID y/o espectrometría de masas). Las muestras se colectan en un punto de monitoreo determinado para ser determinado ya sea directamente en un GC automatizado (en el mismo sitio de medición) o bien se lleva a un laboratorio en donde se realiza el análisis con posterioridad.
 - a. **Cromatógrafos o espectrómetros de masas automatizados**: Existen varios instrumentos automáticos de tipo GC/MS que pueden determinar BTEX in situ. Algunos pueden medir inclusive algunos hidrocarburos adicionales. El tiempo de respuesta usualmente va de 15 a 30 minutos, permitiendo relacionar los datos con series de tiempo meteorológicas y con otros contaminantes que tengan

monitoreo continuo. Sin embargo, requieren de una operación de mantenimiento constante y más elaborado que los contaminantes criterios convencionales (partículas, CO, etc), y requieren de personal más especializado para su operación y calibración. Así este tipo de técnica de monitoreo resulta ser significativamente más cara que monitores tradicionales.

- b. Técnicas manuales:** En el mercado históricamente han existido las siguientes técnicas:
- i. Canister:** Fueron creados inicialmente para el monitoreo de hidrocarburos gaseosos, y es útil para las especies más volátiles reactivas (propano, butano, etc). Pueden actuar bajo monitoreo pasivo (diferencia de presión) o activo (bombeo) dependiendo de la cantidad de muestra que se requiera coleccionar. Después del monitoreo, el canister se lleva al laboratorio para su análisis respectivo usualmente mediante GC o GMS. Antiguamente los canister no se recomendaban para monitorear Benceno debido y se utilizaban para caracterizar hidrocarburos más livianos.
 - ii. Tubos sorbentes activos:** el principio de monitoreo es prácticamente el mismo que utilizan los GC automatizados. Se hace pasar flujo de aire por un sustrato adsorbente (carbón activado era el más utilizado). El tubo se lleva después al laboratorio, donde se extrae la muestra y es analizado por GC o similar. La principal desventaja es que esta técnica requiere de tiempos de colección mayores para contener suficiente muestra de ser analizada.
 - iii. Tubos sorbentes por difusión (tubos pasivos):** Funcionan en base a ley de difusión de Fick. En principio los mismos tipos de adsorbentes usados en los tubos activos se pueden utilizar para tubos pasivos. Esta técnica requiere de tiempos de colección aún mayores que el caso anterior y por lo tanto son menos útiles para identificar procesos atmosféricos diarios. Sin embargo, dada su simpleza y no requieren electricidad para funcionar, son muy utilizados para determinar gradientes de distribución geográfica de exposición. Además, son significativamente menos caros que las técnicas continuas/Activas.

2.2 Recomendación de estrategia de monitoreo

La elección de una técnica de monitoreo dependerá del tipo de investigación o propósito que se buscando.

Por ejemplo, debido a los efectos en salud que tiene el Benceno en la población, períodos de concentración elevados en pequeña cantidad de tiempo (minutos/horas) no son tan importantes, ya que los efectos son de largo plazo o crónicos. Así un monitoreo enfocado en el largo plazo resulta ser más costo-efectivo. En este caso, los muestreadores por difusión representan una de alternativas más convenientes.

Sin embargo, si lo que se busca es controlar los procesos de emisión de benceno de alguna fuente en particular, entonces se requiere de monitoreo con mayor capacidad de resolución temporal, ya sea utilizando monitores manuales o automatizados de BTEX. También pueden utilizarse en monitoreo de tipo Street Canyon para determinar factores de emisión vehicular. Esto es particularmente para propósitos regulatorios.

Por otra parte, la selección de sitios de monitoreo es fundamental. Al interior de un área urbana (ciudad), la concentración puede variar significativamente, dependiendo si se encuentra en un Street canyon o bien en áreas background, y por lo tanto es relevante tener una descripción precisa de cada sitio de medición.

2.3 Resumen de revisión de Calidad del Aire

Si bien los BTEX se emiten por fuentes naturales (erupciones de volcanes e incendios forestales), son más importantes las de tipo antropogénicas (combustión de carbón, emisiones vehiculares, volatilización de combustibles/solventes). Estos compuestos están en fase gaseosa y se degradan principalmente por fotólisis y/o reacciones químicas con especies fotoactivas atmosféricas (destacándose el radical OH en el día y el radical nitrato en la noche). Estas reacciones generan intermediarios orgánicos radicales peróxidos (RO_2) e hidroperóxidos (OH_2) que contribuyen al incremento del ozono troposférico. Así, los BTEX tienen una influencia relevante en la química atmosférica, ya que son considerados precursores importantes de la formación de especies oxidantes y oxidadas (como el Ozono, PeroxiAcetil Nitrato y los Aerosoles Orgánicos Secundarios).

Aunque los BTEX comparten una estructura molecular basal similar, se identifican diferencias significativas en las propiedades fisicoquímicas. Por ejemplo, en la tabla siguiente se ilustra el tiempo de vida medio ($t_{1/2}$) frente a la fotooxidación en el aire y el tiempo total de descomposición (τ) frente a la reacción con radical OH.

Tabla 5: tiempo de vida medio ($t_{1/2}$) frente a la fotooxidación en el aire y el tiempo total de descomposición (τ) frente a la reacción con radical OH. Fuente: M. Słominska et al. 2012

Compuesto	tiempo de vida medio ($t_{1/2}$)	tiempo total de descomposición (τ)
Benceno	50.1–501 hr	9.1 días
Tolueno	10–104 hr	2.2 días
Etil Benceno	8.56–85.6 hr	20 hr
m-Xileno	2.6–26 hr	0.51 día
o-Xileno	4.4–44 hr	0.8 día
p-Xileno	4.2–42 hr	0.84 día

El mecanismo de descomposición en la atmósfera de los BTEX involucra preferentemente la reacción frente al radical OH, vía a) descomposición sustitución de un átomo de H del enlace C-H del grupo alquilo enlazado al anillo aromático, o b) sustitución de uno de los átomos de H del anillo (especialmente en el caso del Benceno), como se muestra en la Figura 8. El radical bencilo generado sigue el mismo mecanismo de reacciones atmosféricas que un radical alquilo simple. Los radicales hidroxiciclohexadienilo (intermediarios aromáticos con OH) reaccionan reversiblemente con oxígeno molecular (O_2) o bien con óxidos de nitrógeno (NO_2) para formar aldehídos aromáticos o derivados nitrogenados aromáticos.

La reacción entre los radicales bencilos y el O_2 produce radicales intermediarios peróxidos orgánicos (RO_2^-), los que frente a los óxidos de nitrógeno forman radicales orgánicos alcoxi ($RO-$

) (Figura 9). Tales reacciones dan lugar a dióxido de nitrógeno el que se somete a fotólisis frente a radiación solar. Así, la oxidación atmosférica de los VOC juega un rol clave en el smog fotoquímico ya que la fotólisis del NO₂ es una fuente de ozono (O₃). Por lo tanto, la oxidación de COV's (y BTEX) en presencia de NO es una causa directa de la formación de ozono y smog fotoquímico.

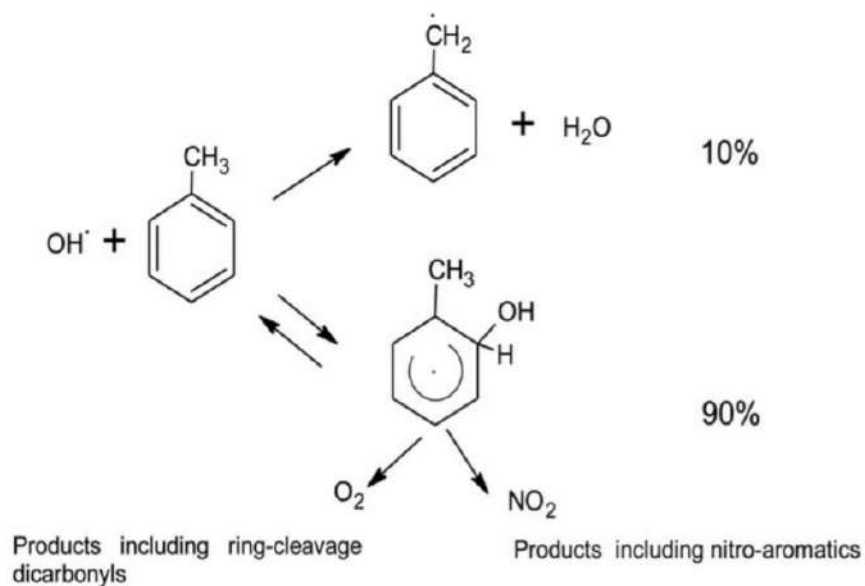


Figura 8: Vías de descomposición inicial del tolueno en la reacción con radicales hidroxilo.

MZC Primavera 2014	Centro Mario Molina Chile
Valparaíso Primavera 2016	Centro Mario Molina Chile
Antofagasta Verano 2020	MMA
Bío-bío Verano 2020	MMA
Valparaíso Verano 2020	MMA
Temuco Verano 2020	MMA
Valparaíso Primavera 2020	MMA
Antofagasta Primavera 2020	MMA
Temuco Primavera 2020	MMA
Bío-bío Primavera 2020	MMA
Valparaíso Invierno 2020	MMA
RM Primavera 2020	MMA
RM Invierno 2020	MMA
Año 2012 CENMA*	CENMA
Quintero-Puchuncaví 2018	NILU

Se construyó una base de datos con todos los resultados. En la Figura 10 se entrega un gráfico resumen de concentración de Benceno recopilada. En general casi todos los niveles de concentración se encuentran bajo el nivel de la norma de la UE (5 ug/m³) a excepción de determinados puntos de monitoreo ubicados en la región del Bío-Bío y en la RM. La identificación de estos puntos determinados corresponde preferentemente a Centros impactados por emisiones industriales (en la Región del Bío-Bío) y por emisiones vehiculares (en la RM).

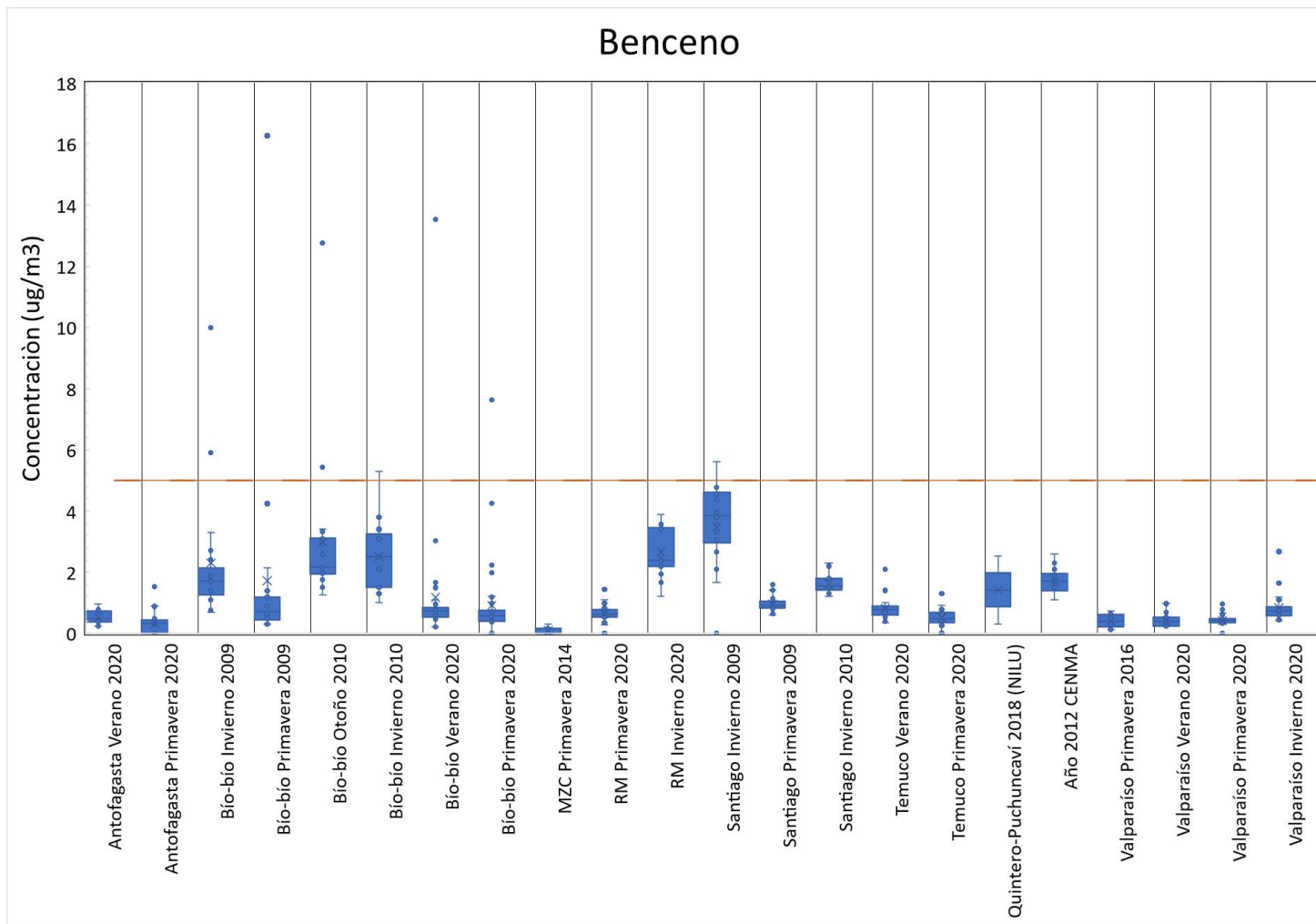


Figura 10: Concentración de Benceno en distintas campañas de monitoreo recopiladas.

Relaciones y Correlaciones BTEX

La evaluación de relaciones entre los diferentes tipos de BTEX medidos en la atmósfera se ha utilizado para estimar las fuentes emisoras y la reactividad fotoquímica, ya que se asume que los BTEX tienen diferentes velocidades de degradación en el aire (Kerchich and Kerbachi, 2012).

Tabla 7: Relación T/B (Tolueno/Benceno) para diferentes tipos de fuentes emisoras.

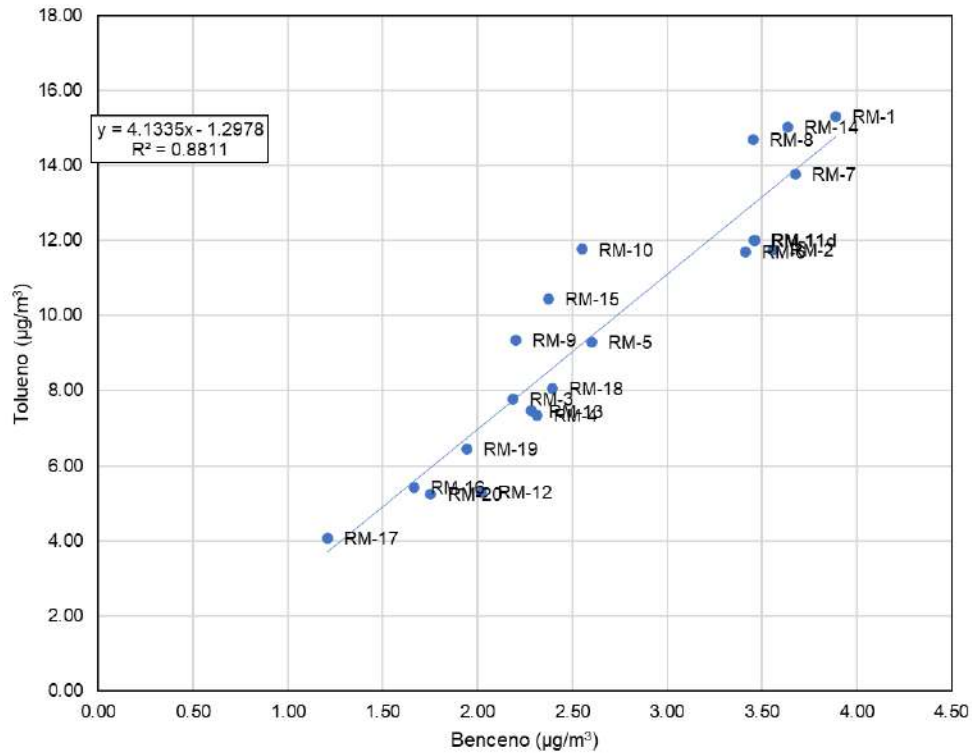
Fuente emisora predominante	Relación T/B	Referencia
Quema de biomasa / biocombustible / carbón	$T/B < 1$	(Zhang et al., 2016)
Emisiones vehiculares	$T/B = 1-10$	(Zhang et al., 2016)
Procesos industriales y aplicaciones de disolventes	$T/B \geq 1$	(Zhang et al., 2016)
Impacto fuerte de emisiones industriales	$T/B \geq 4.2$	(Barletta et al., 2008)

La relación Tolueno/Benceno (T/B) ha sido utilizada frecuentemente para diagnosticar el tipo de fuente involucrado en la emisión. Valores de $T/B < 1$ han sido atribuidos a emisiones provenientes de combustión de biomasa/biocombustibles/carbón; $T/B = 1-10$ pueden ser atribuibles a emisiones vehiculares y valores $T/B > 1$ también pueden provenir de procesos industriales y aplicación de solventes. En algunos casos han propuesto que la relación $T/B > 4.24$ puede ser un indicador inequívoco de emisiones industriales. Una aproximación conservadora involucra utilizar valores $T/B < 2$ para demostrar predominio de emisiones vehiculares, mientras que relaciones más altas involucran una mezcla de diferentes emisiones (solapamiento entre emisiones vehiculares, de uso de solventes e industriales). La relación T/B tiende a presentar valores mayores que 2 en prácticamente todas las campañas de monitoreo. Los valores altos se dan particularmente en las campañas RM durante primavera. Los valores más bajos de la relación T/B en la Región del Bío-bío en invierno, Temuco y en la V Región, evidenciando un impacto diferente del tipo de fuente (probablemente debido a la influencia de la quema de leña). Estos resultados se muestran en la Figura 11.

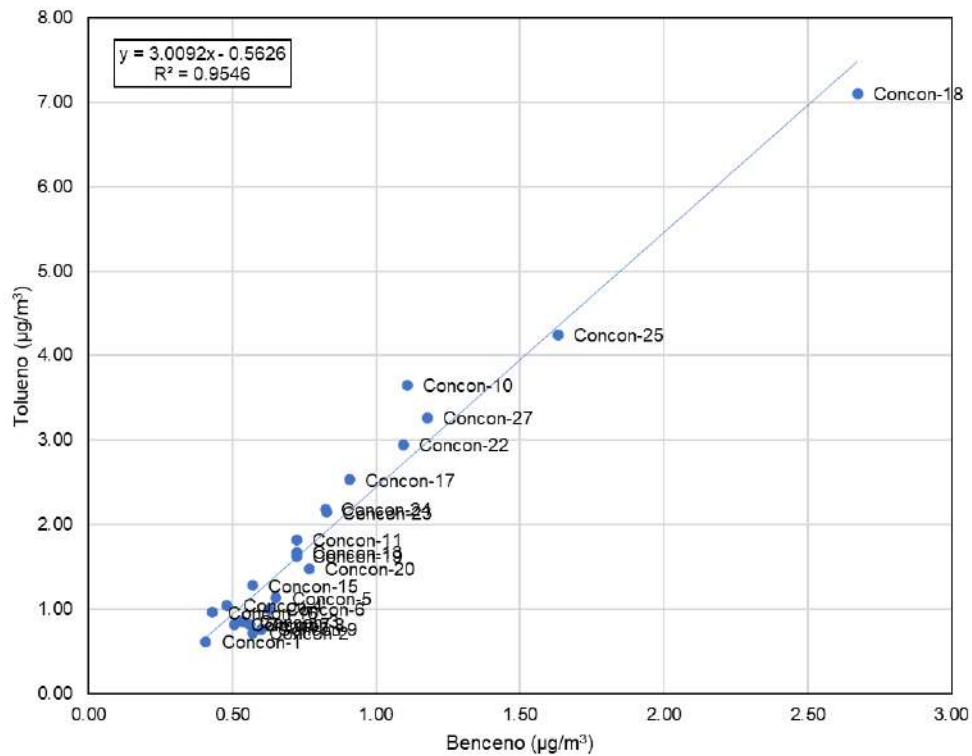
Tabla 8: Relación Tolueno/Benceno (T/B) promedio para las distintas campañas de monitoreo.

Campaña	T/B (Promedio \pm Desviación estándar)
Antofagasta Verano 2020	5.02 \pm 4.45
Antofagasta Primavera 2020	3.06 \pm 1.8
Bío-bío Invierno 2009	1.59 \pm 0.72
Bío-bío Primavera 2009	4.3 \pm 2.56
Bío-bío Otoño 2010	1.8 \pm 0.74
Bío-bío Invierno 2010	1.5 \pm 0.71
Bío-bío Verano 2020	2.08 \pm 1.09
Bío-bío Primavera 2020	1.91 \pm 1.09
MZC Primavera 2014	3.12 \pm 3.23
RM Primavera 2020	11.91 \pm 6.44
RM Invierno 2020	3.6 \pm 0.5
Santiago Invierno 2009	5.27 \pm 1.25
Santiago Primavera 2009	6.87 \pm 3.42
Santiago Invierno 2010	5.1 \pm 1.37
Temuco Verano 2020	2.86 \pm 1.25
Temuco Primavera 2020	2.34 \pm 0.98
Quintero-Puchuncaví 2018 (NILU)	3.36 \pm 0.36
Año 2012 CENMA	4.94 \pm 1.03
Valparaíso Primavera 2016	7.56 \pm 5.48
Valparaíso Verano 2020	2.66 \pm 1.68
Valparaíso Primavera 2020	3.63 \pm 3.92
Valparaíso Invierno 2020	2.5 \pm 1.84

RM Invierno 2020



Valparaiso Invierno 2020



Para ilustrar mejor el predominio de cada fuente emisora en las diferentes campañas, se ha empezado a graficar la composición relativa de Benceno/Tolueno/Etil-Benceno en un gráfico ternario. En la Figura 12 se entrega un modelo presentado por (Zhang et al., 2016) en donde se agrupan tres categorías de fuentes: 1) combustión de biomasa/biocombustibles/carbón, que están caracterizados por una fracción significativamente mayor de benceno; 2) emisiones de tráfico vehicular, el cual muestra fracciones mayores de tolueno debido a emisiones de escape de vehículos a gasolina y evaporación de gasolina; y 3) procesos industriales y aplicación de solventes, los cuales están caracterizados por altas fracciones de tolueno y etilbenceno. Se graficaron gráficos ternarios para cada región de Chile, y se ilustran en la Figura 13:

La región de Antofagasta tiende a presentar los puntos en la parte alta del triángulo, donde generalmente se mezclan emisiones industriales con emisiones de tráfico vehicular. No es posible identificar una diferencia clara entre las diferentes campañas de monitoreo señaladas.

La Región del Bío-Bío muestra una distribución de puntos desplazada preferentemente hacia el eje de Tolueno, con una alta variabilidad, donde se mezclan preferentemente las emisiones de quema de biomasa con las emisiones de tráfico vehicular. Es posible identificar una concentración de puntos asociados a la campaña de Primavera 2009 en la parte alta del triángulo (similar al caso de Antofagasta) ilustrando un impacto de emisiones industriales.

Las campañas implementadas en la RM y en la MZC presenta una acumulación de puntos similar al de Antofagasta, donde preferentemente se acoplan las emisiones vehiculares con las emisiones industriales.

En Temuco, se observa más bien una distribución de impactos de emisiones vehiculares preferentemente. No es posible identificar emisiones de leña debido a que ninguna campaña fue realizada en época invernal donde se consume leña.

Finalmente, la región de Valparaíso tiende a mostrar resultados más bien relacionados con emisiones vehiculares y de emisiones de quema de leña, similar al caso de Bío-Bío.

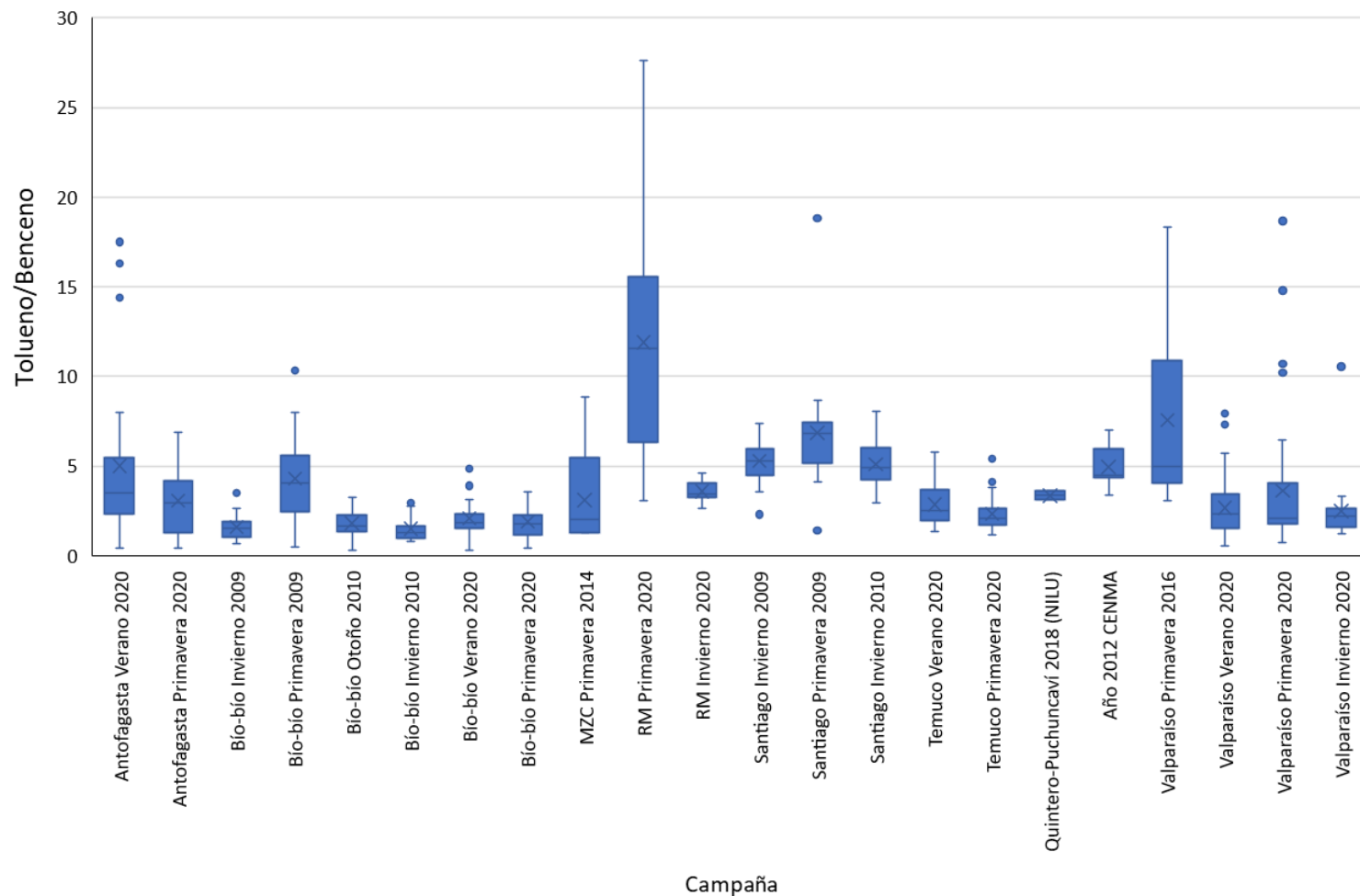


Figura 11: Relación Tolueno Benceno para diferentes campañas de monitoreo de COVs.

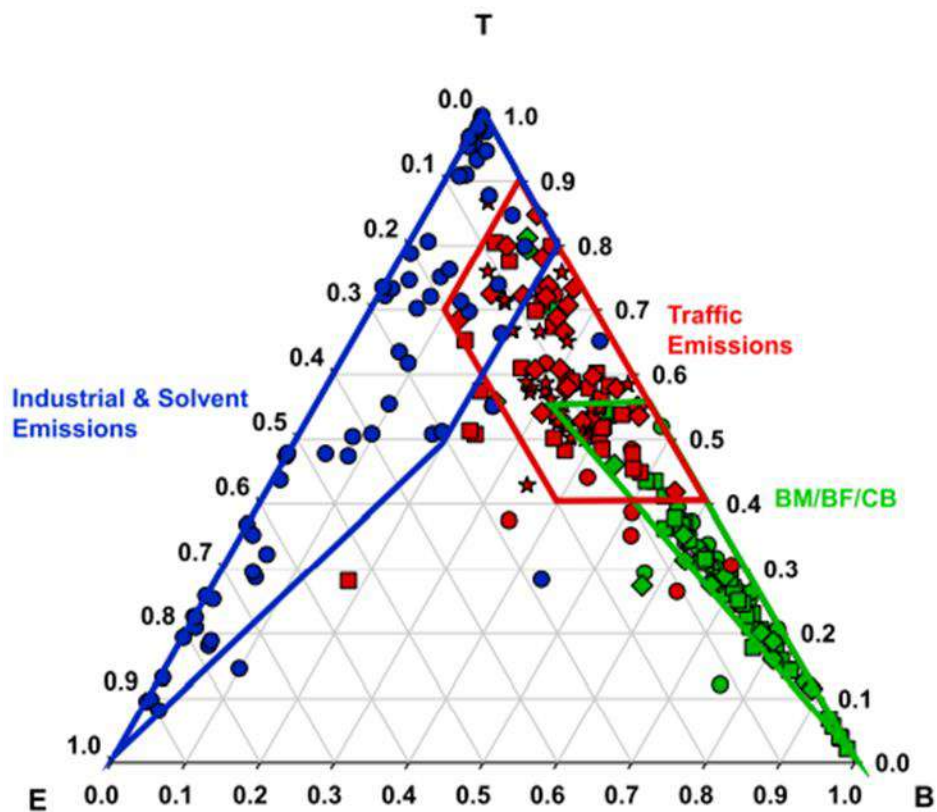


Figura 12: Proporción relativa de Benceno (B), Tolueno (T) y Etilbenceno (E) para diferentes tipos de fuentes emisoras. "BM/BF/CF" indica combustión de biomasa/biocombustible/carbón. Fuente: (Zhang et al., 2016)

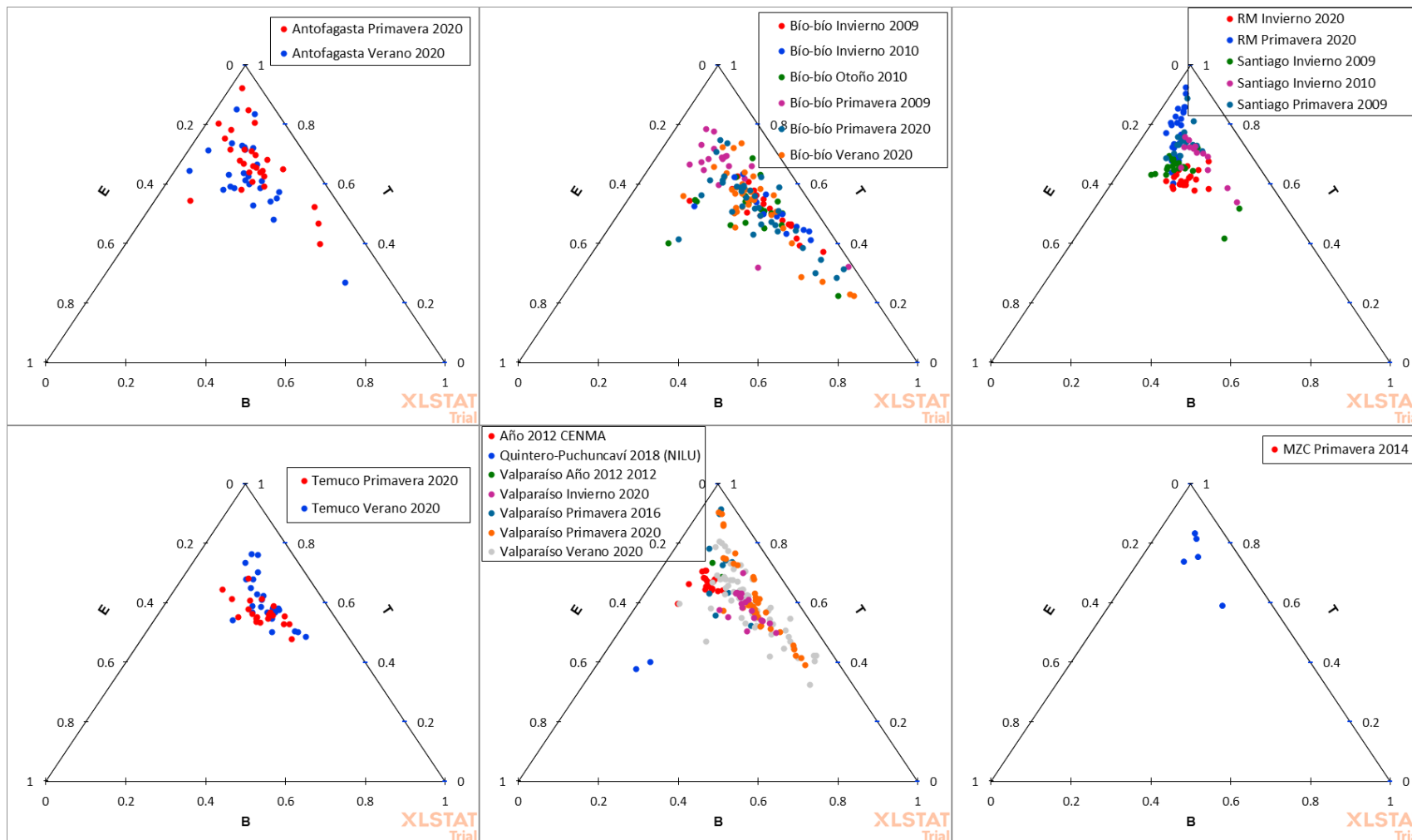


Figura 13: Gráficos ternarios B/T/E para diferentes campañas de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.

La contraparte técnica del estudio solicitó incluir un análisis con más detalle de los resultados de las campañas de monitoreo realizadas en el año 2020 por el MMA para la región de Valparaíso (Tabla 9). Esta sección extiende el detalle de estos análisis. En la Figura 14 y Figura 15 se entrega la ubicación de los puntos de monitoreo asociados a las campañas de monitoreo para las comunas de Puchuncaví-Quintero y Concón, respectivamente.

Tabla 9: Campaña de monitoreo realizadas en el año 2020 por el MMA.

Campaña	Inicio	Término	Comunas
Valparaíso Verano 2020	3-Jan	23-Jan	Concón
Valparaíso Primavera 2020	8-Oct	23-Oct	Concón Quintero-Puchuncaví
Valparaíso Invierno 2020	20-Aug	22-Sep	Quintero-Puchuncaví

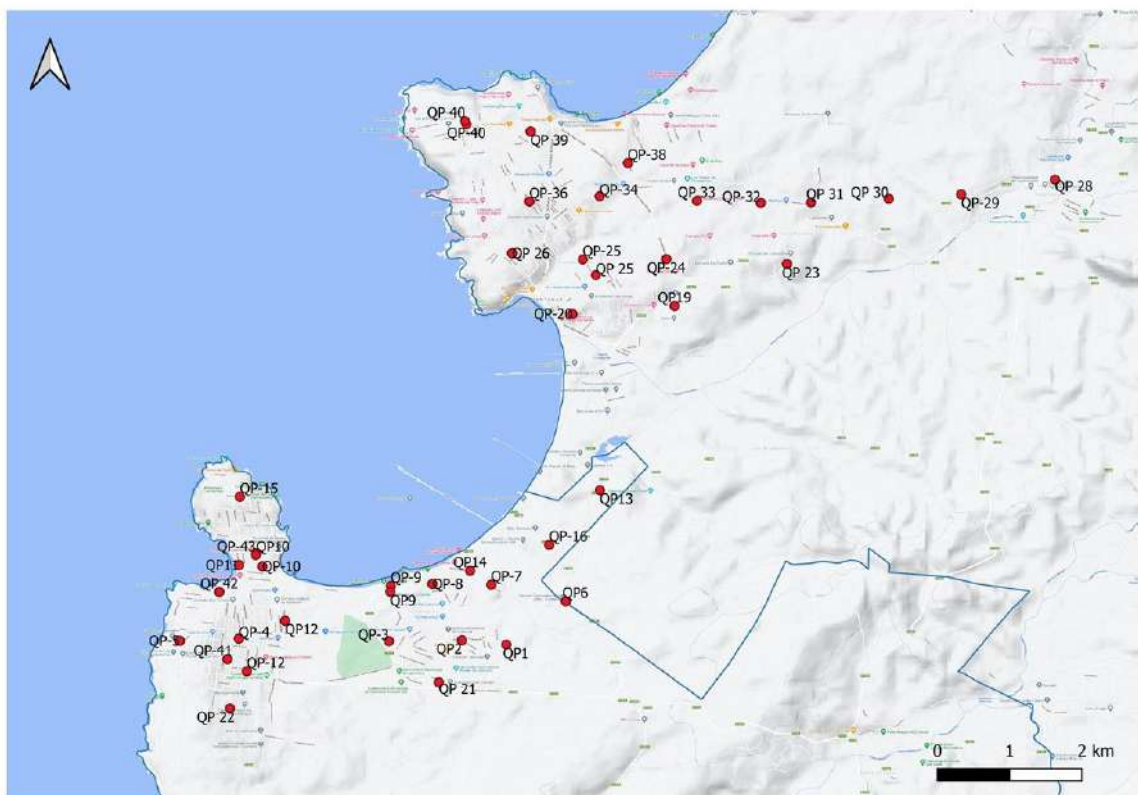


Figura 14: Mapa de ubicación de puntos de monitoreo de tubos pasivos en las comunas de Puchuncaví-Quintero, campaña 2020.



Figura 15: Mapa de ubicación de puntos de monitoreo de tubos pasivos en la comuna de Concón, campaña 2020.

Respecto de la campaña de invierno 2020 se puede observar que solamente se monitoreó preferentemente en la zona urbana de la comuna de Concón. En la Figura 16 se muestra el análisis de regresión lineal simple entre B vs T y el gráfico ternario de la relación B/T/E para esta campaña. La regresión B vs T muestra que los puntos de monitoreo tienden a agruparse linealmente ($R^2=0.955$) por lo que es posible señalar que prácticamente todos los puntos están respondiendo por igual manera y misma magnitud a la(s) fuente(s) emisor(as). Conforme con la ubicación en el espacio del gráfico ternario B/T/E indica que existe un predominio de emisiones vehiculares en todos los puntos. Algunos de ellos parecen mezclarse tenuemente con emisiones de quema de leña.

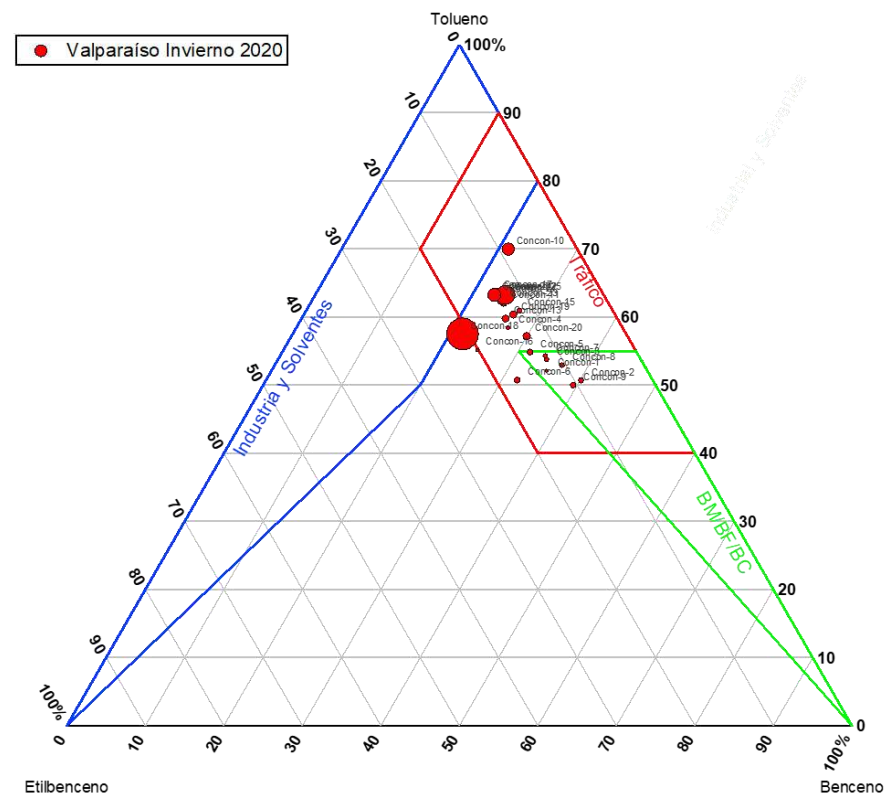
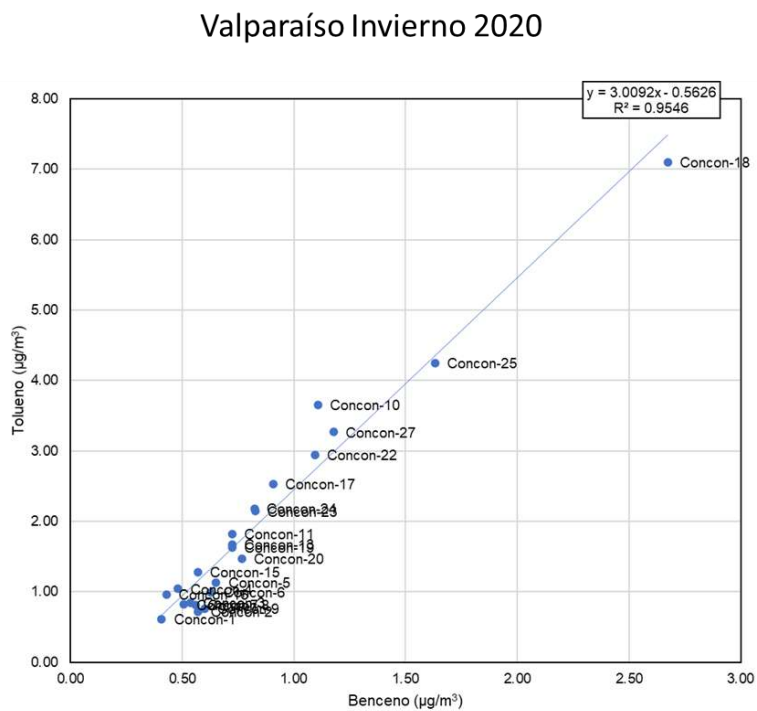


Figura 16: Correlación entre Tolueno y Benceno y gráfico ternario para relación B/T/E, campaña Valparaíso Invierno 2020. En el gráfico ternario el tamaño de los puntos es proporcional al valor de concentración de Benceno.

Respecto de la campaña de Primavera 2020 y Verano 2020 (Figura 17 y Figura 18, respectivamente) se encuentra una mayor dispersión de datos, indicando que no todos los puntos responden a la misma fuente emisora. Este mismo resultado se encuentra al observar el gráfico ternario, donde preferentemente los puntos se mezclan con emisiones vehiculares, industriales y de quema de biomasa. En general la mayoría de los puntos muestran relación T/B ~1 a 2.8 sin embargo algunos muestran relaciones claramente superiores (mayor a 4). QP1, QP11, QP13, QP14, QP 20, QP 21, QP 23, QP 28, QP 43. Estos puntos están ubicados en la gran mayoría en las zonas de Quintero y Loncura, a excepción de algunos ubicados en la zona de Ventanas y en la estación de Puchuncaví. En la campaña de Verano se encontraron concentraciones bajas de Benceno preferentemente en la comuna de Concón.

Valparaíso Primavera 2020

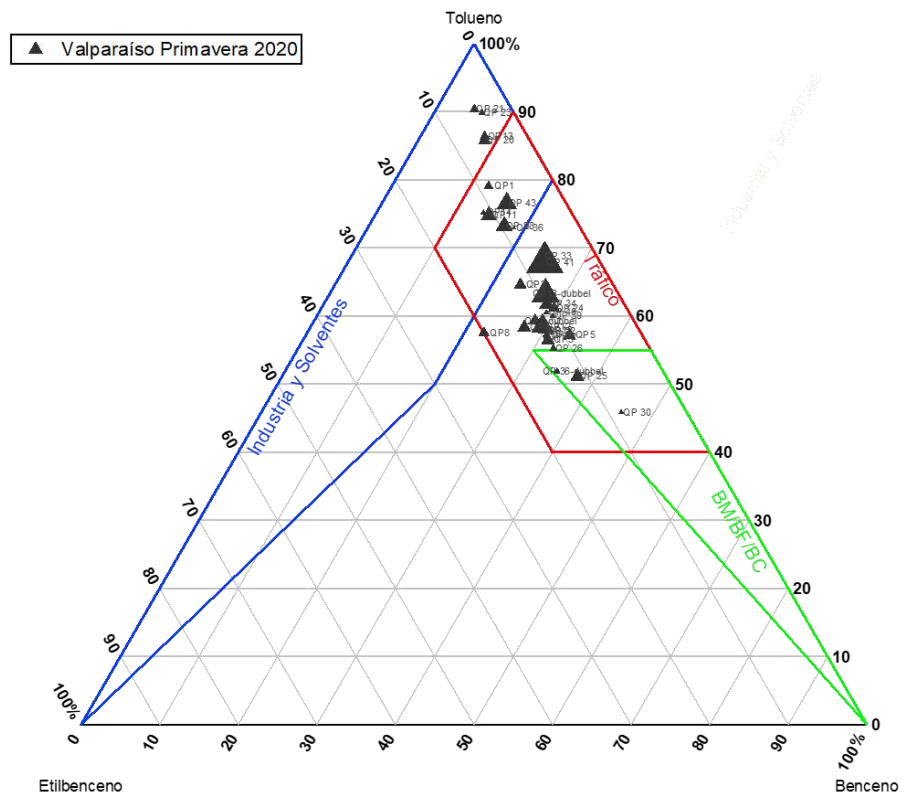
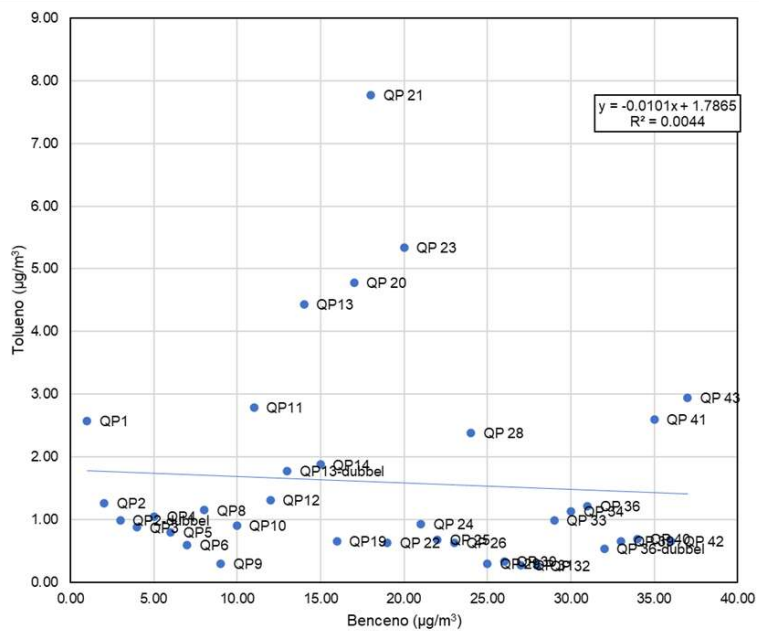


Figura 17: Correlación entre Tolueno y Benceno y gráfico ternario para relación B/T/E, campaña Valparaíso Primavera 2020. En el gráfico ternario el tamaño de los puntos es proporcional al valor de concentración de Benceno.

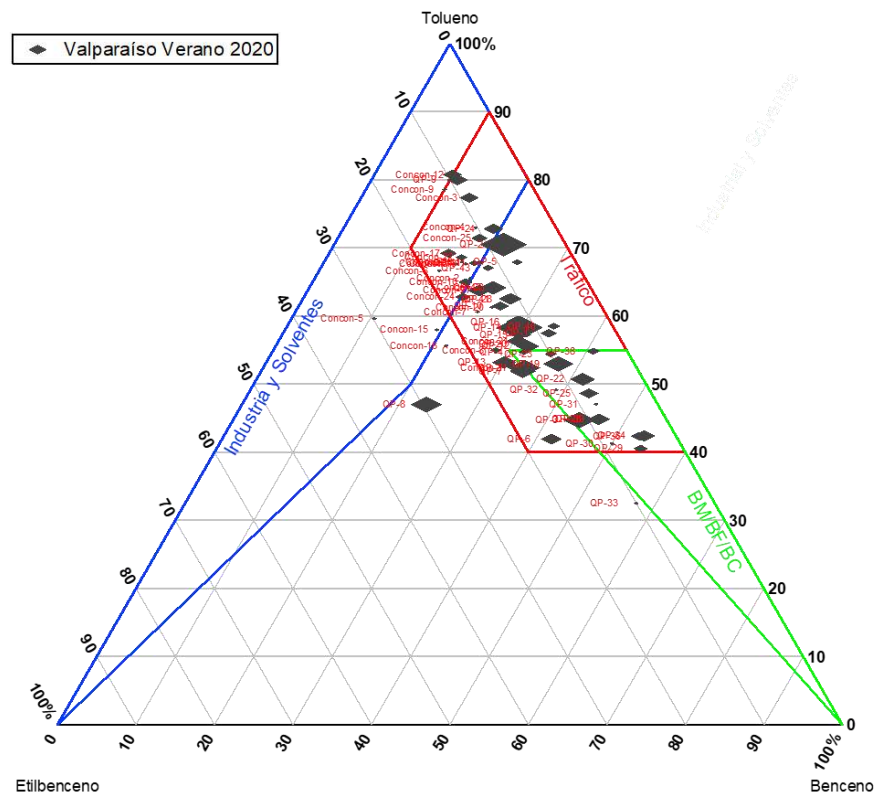
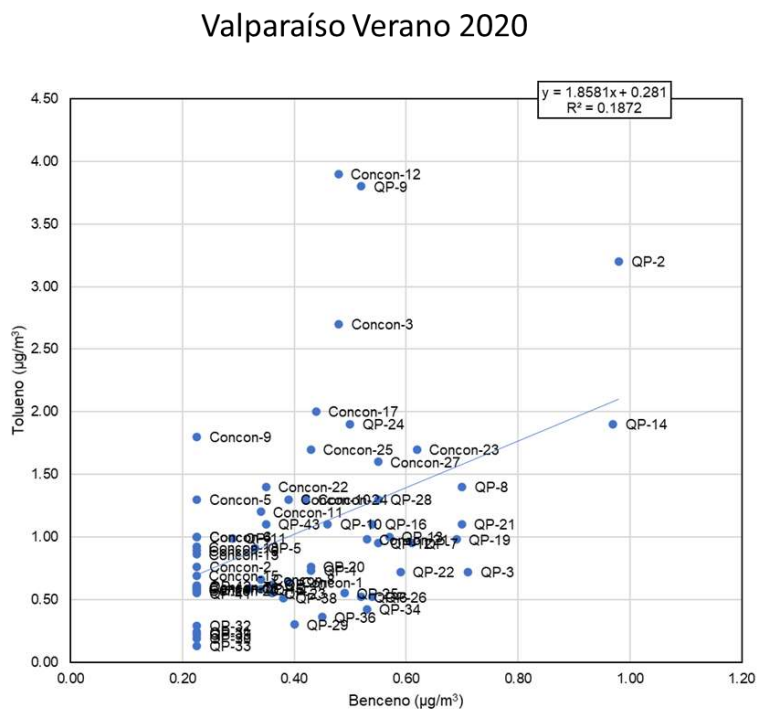


Figura 18: Correlación entre Tolueno y Benceno y gráfico ternario para relación B/T/E, campaña Valparaíso Verano 2020. En el gráfico ternario el tamaño de los puntos es proporcional al valor de concentración de Benceno.

La relación Xilenos/Etilbenceno (X/E) también ha sido utilizada como un indicador del envejecimiento fotoquímico (que tan oxidado está la atmósfera durante las diferentes campañas de monitoreo). Un valor $X/E > 3$ indica una atmósfera atmosféricamente “envejecida” y por lo tanto puede corresponder a parcelas de aire que han sido transportadas desde distancias relativamente lejanas. Los valores en concentrados para Chile indican relaciones X/E levemente superiores 3, especialmente en períodos de primavera y verano donde es posible obtener mayores intercambios de masas de aire interregionales. Aquellos valores cercanos a 3 indican un predominio de presencia de emisiones locales.

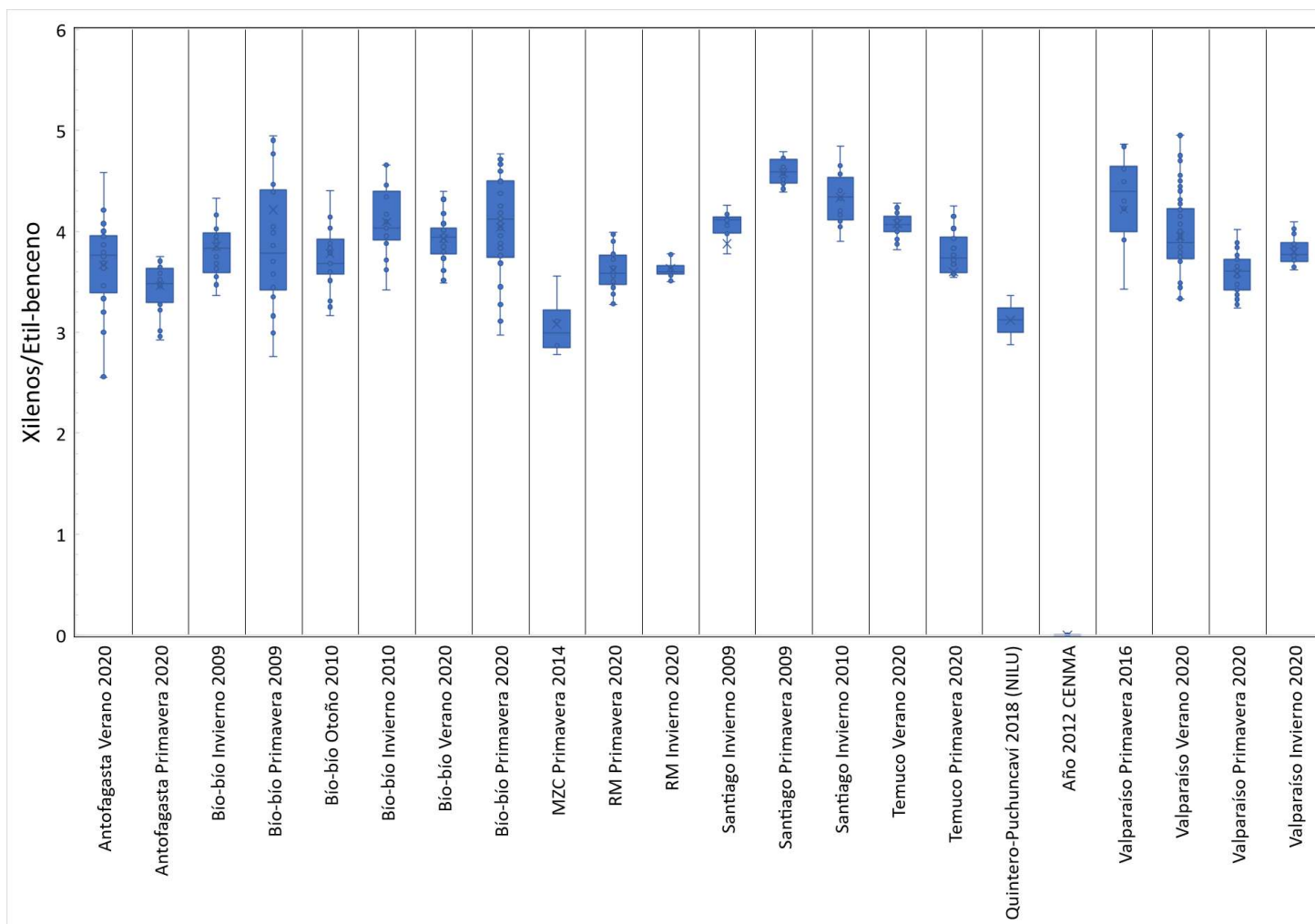


Figura 19: Relación Xilenos/Etil-Benceno para diferentes campañas de monitoreo de COVs.

3 EVALUACIÓN DE NIVELES DE EXCEDENCIA DE LOS COV'S A NORMAR.

En la directiva de calidad del aire (2008/EC/50) de la Unión Europea, señala que el valor medio anual no puede exceder los 5 microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se exige el monitoreo con representatividad anual. Sin embargo, a partir de la revisión de información indicada en la sección Resumen de revisión de Calidad del Aire se concluye que la información disponible es escasa, ya que corresponde solamente a campañas de medición de 7-30 días. Por lo tanto, no es posible evaluar cumplimientos de norma siguiendo los requerimientos.

Aun así, de los datos recopilados se calculó el promedio de benceno por año en cada comuna de las tres regiones. Los resultados se muestran en las en las tablas Tabla 10-Tabla 12. Es posible señalar que en ningún lugar se supera la Norma Europea. La única excepción es la medición de 1995 en Santiago. Esta medición se realizó con periodos de una semana, utilizando una bolsa de muestreo con equipo de muestreo portátil en una amplia variedad de sitios al aire libre dentro. Las ubicaciones fueron cercanas a carreteras con mucho tráfico, así como ubicaciones más alejadas. El muestreo se realizó durante un período de aproximadamente 2 horas y el Sistema de medición fue con desorción térmica/cromatografía de gases capilar, utilizando un Perkin-Elmer ATD400 y un cromatógrafo de gases (GC) 8320.

Tabla 10 Promedio de benceno por año en las comunas de la RM.

Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por año en comunas de RM y O'Higgins				
Comuna	2009	2010	2015	2019
Cerrillos	2.65	1.8		
Huechuraba	2.80			
La Cisterna	3.24	2.2		
La Florida	2.98	1.6		
La Granja	2.93			
La Pintana	2.08	1.8		
Las Condes	2.13	1.8		
Lo Barnechea	1.67	1.2		
Maipú	2.08	1.4		
Peñalolén	2.44	1.6	0.3	
Pudahuel	2.20			
Puente Alto	1.55	1.5		
Quilicura	2.99	2.3		
Renca	2.38	1.5		
San Joaquín	1.1			
Santiago	2.50	1.45		2.80
Peñaflor	1.77	1.3		
Talagante			0.32	
Melipilla			0.3	

Tiltil			0.27	
Coya			0.16	
Provincia de Santiago (1995)			14.8	

Tabla 11: Promedio de benceno por año en las comunas de la Región de Valparaíso.

Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por año en Comunas de Región Valparaíso						
Comuna	2012	2015	2016	2017	2018	2019
Casa Blanca		0.25				
Concón	1.98		0.55	0.50	2.1	2.70
Puchuncaví	1.66		0.29	0.48	0.47	0.72
Quintero	1.59		0.24	0.47	0.52	0.55

Tabla 12: Promedio de benceno por año en las comunas de la Región del Biobío.

Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por año en comunas de Región Biobío		
Comuna	2009	2010
Chiguayante	1.88	2.85
Concepción	1.58	2.23
Coronel	1.33	1.93
Hualpen	3.30	4.28
Hualqui	0.91	2
Penco	1.25	2
San Pedro de la Paz	1.35	1.63
Talcahuano	5.77	4.92
Tomé	1.49	2.08

4 METODOLOGÍA CONSENSUADA DE LA CAMPAÑA DE MONITOREO A REALIZAR.

4.1 Metodologías de monitoreo

Conforme con la propuesta de monitoreo aprobada por la contraparte técnica, la campaña de monitoreo está pensada en utilizar dos tipos de tecnologías de monitoreo. De forma adicional se ha incluido en la propuesta una tercera metodología exploratoria, e innovadora en base a sensores exploratorios. El detalle se entrega a continuación.

4.1.1 Metodología continua: DOAS OPSIS para Benceno⁶

La espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS) utiliza la absorción de energía electromagnética a longitudes de onda específicas que muestran determinados gases atmosféricos en el espectro ultravioleta (UV), visible (V) e infrarrojo cercano (NIR) para identificar y cuantificar concentración de sustancias químicas individuales.

Esta tecnología es una derivada de la ley de Lambert-Beer, el cual relaciona la intensidad de la luz transmitida con la intensidad de la luz recibida después de haber viajado por una distancia determinada. La tecnología DOAS se fundamenta en la medición de los espectros de absorción en lugar de la medición de la intensidad de la luz a una determinada longitud de onda. Este tipo de tecnología ha mostrado se útil para la medición de gases y vapores inorgánicos (SO_x, NO_x, NH₃, H₂S, HF), monoaromáticos (BTEX) y aldehídos (HCHO).

A diferencia del monitoreo tradicional en estaciones o puntos de monitoreos “fijos”, esta tecnología entrega un valor promedio de concentración a lo largo de un camino (path) óptico de un contaminante determinado. Se espera que esta forma de monitoreo entregue una mejor cobertura espacial y temporal de monitoreo que las estaciones fijas. Diversos programas de la USEPA y en Europa han evaluado sus aplicaciones de monitoreo. Ambos permiten su utilización para monitoreo con fines regulatorios y han establecido recomendaciones y requerimientos para el correcto uso⁷.

El sistema DOAS entrega un monitoreo rápido que provee de una alta disponibilidad de datos a con bajos costo de mantenimiento, lo que es una ventaja cuando la medición es con propósitos regulatorios, como la de una norma de calidad. A su vez la medición óptica permite disponer de datos continuos estableciendo la capacidad de analizar perfiles temporales, diarios etc., y así identificar fuentes de emisión importantes.

Debido a que cada tipo de molécula, cada gas, tiene sus propias propiedades de espectro de absorción únicas, o “huella digital”, es posible identificar y determinar las concentraciones de varios gases diferentes en el camino de luz al mismo tiempo. El sistema DOAS transfiera el haz de luz de

⁶ <https://www.opsis.se/en/Applications/Ambient-Air-Quality-Monitoring/Urban-Background-Monitoring>

⁷ https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-E_to_part_58

una fuente de luz (una lámpara de xenón de alta presión), sobre un camino elegido y luego utiliza algoritmos de cálculos avanzados automatizados para evaluar y analizar las pérdidas de luz por absorción molecular a lo largo del path óptico. La luz de la lámpara de xenón proporciona energía que va desde el UV hasta el IR cercano. La luz proveniente del emisor se receptiona por el receptor, el cual es enviada al analizador por medio de una fibra óptica.

El analizador contiene un espectrómetro de alta calidad, una PC y circuitos integrados. El espectrómetro divide la luz en bandas estrechas de longitud de onda utilizando una rejilla óptica, ajustado a operar en un rango óptimo de longitudes de onda según sea el propósito de monitoreo. La luz se transforma en pulsos eléctricos, los que son utilizados para registrar a alta velocidad, espectros de absorción. Éstos son comparados con otro calculado por el PC, que consiste en una suma equilibrada de los espectros de referencia para el análisis en cuestión. El PC procede variando los factores de tamaño para cada espectro de referencia hasta que alcanza la mejor coincidencia posible. A partir de esto, las diferentes concentraciones de gas se pueden calcular con alta precisión. A continuación, se ilustra el mecanismo de funcionamiento.

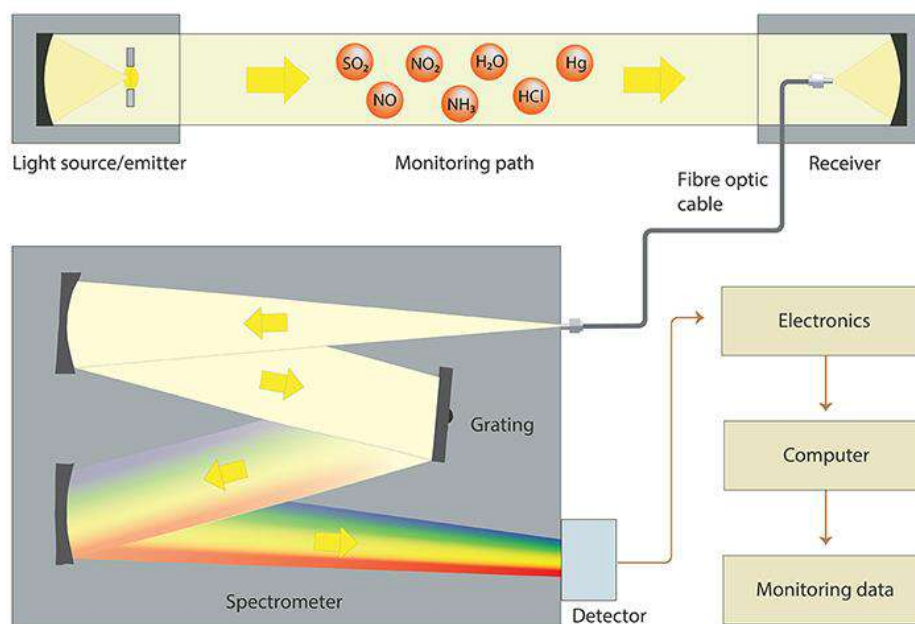


Figura 20: Resumen del sistema DOAS (OPSIS AB).



Figura 21: Vista exterior del receptor con sistema FC 150 integrado.

Existen algunas diferencias que pueden presentarse con los tipos de monitoreo tradicionales (en un punto específico). Dado que el valor que entrega el DOAS es una concentración ponderada a lo largo de todo el path de medición puede haber alguna subestimación de altas concentraciones.

El sistema de monitoreo DOAS dispone de varias aprobaciones internacionales⁸. En el caso de Benceno para calidad del aire es una tecnología testada por el programa ETV de la USEPA⁹ y también acreditado por Accredited Test and Inspection Institute DAR - German Accreditation Council DAP-P-02.544-04, como se muestra a continuación.

⁸ <https://www.opsis.se/en/Products/Approvals>

⁹ https://archive.epa.gov/nrmrl/archive-etv/web/pdf/01_vs_opsis.pdf



PRODUCT CONFORMITY CERTIFICATE

This is to certify that the
AR500 Open Path Monitor

Manufactured by:
Opsis AB
PO Box 244
S-244 02 Furulund
Sweden

has been assessed by Sira Certification Service
And for the conditions stated on this certificate complies with:

**MCERTS Performance Standards for Open Path Ambient Air Quality Monitoring
Systems using Differential Optical Absorption Spectrometry (DOAS)
Version 3, August 2017**

Certification Ranges :

CO₂ (Benzene) 0 to 10 µg/m³ at 300m equivalent to 0 to 1 ppm metres

Project No.:	674/0422 & 80025781	<i>EM Alexander</i>
Certificate No.:	Sira MC040048/03	
Initial Certification:	05 November 2004	
This Certificate issued:	20 November 2010	
Renewal Date:	04 November 2024	Emily Alexander Environmental Project Engineer

MCERTS is operated on behalf of the Environment Agency by



Sira Certification Service

Unit 6, Hawarden Industrial Park
Hawarden, Deeside, CH5 3US
Tel: +44 (0)1244 670 900



The MCERTS certificate consists of this document in its entirety.
For conditions of use, please consider all the information within.
This certificate may only be reproduced in its entirety and without change.
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/certs

Form 1336
Issue 6
Page 1 of 5

4.1.2 Muestreadores por difusión (tubos pasivos). IVL¹⁰

Se ha seleccionado esta metodología debido a que tienen varias ventajas entre las que destaca.

- pequeño, silencioso y ligero no necesitan de suministro eléctrico en el sitio de monitoreo.
- las muestras se pueden almacenar a temperatura ambiente.
- no se necesita personal calificado en el sitio de muestreo, las muestras se envían al laboratorio por medios convencionales.

¹⁰ <https://diffusivesampling.ivl.se/oursamplers.4.75d7780712240e747ea80004619.html>

Se proponen utilizar tubos pasivos de Carbopack y de TENAX como absorbente, con exposición semanal (7 días). Acorde con los plazos señalados en las bases técnicas, se espera que la campaña de monitoreo sea a realizar en época de primavera Verano, donde se pueden obtener mayores temperaturas y utilizando esta configuración de muestreadores tendremos la capacidad de medir diferentes COV's en los siguientes límites de concentración,

Tenax		Carbopack B	
gas	$\mu\text{g m}^{-3}$	gas	$\mu\text{g m}^{-3}$
benzene	0.18-100	benzene	1.30-150
toluene	0.20-90	toluene	0.9-90
n-octane	0.13-100	n-octane	0.16-240
ethyl benzene	0.09-70	ethyl benzene	0.06-230
m+p-xylene	0.32-150	m+p-xylene	0.23-240
o-xylene	0.12-70	o-xylene	0.06-270
butyl acetate	0.50-70	n-nonane	0.3-220
n-nonane	0.12-120		

Figura 22: Rangos de medición de tubos pasivos de COV's para tiempo de exposición semanal.



Figura 23: Imagen de tubo pasivo de monitoreo de COV's (IVL).

Esta metodología está incluida en la normativa europea EN 14662¹¹ y también en ISO 16017-2: 2003¹². En Suecia y otras partes de la UE, se puede utilizar para la verificación y seguimiento del estándar de Benceno, bajo mediciones indicativas. Las mediciones deben ser al menos el 15% del año repartidas en todas las estaciones.

En esta propuesta estamos considerando utilizar muestreadores pasivos del IVL. En Suecia se suelen utilizar 20 semanas de medición distribuidas de manera uniforme durante el año para estar seguro en caso de pérdida de datos y cumplir con la regulación respectiva.

¹¹ Calidad del aire ambiente. Método estándar para medir las concentraciones de benceno. EN 14662-4: Muestreo difusivo seguido de desorción térmica y cromatografía de gases.

¹² ISO 16017-2: 2003 Aire interior, ambiente y lugar de trabajo - Muestreo y análisis de compuestos orgánicos volátiles por tubo sorbente / desorción térmica / cromatografía de gases capilares - Parte 2: Muestreo difusivo

Cabe mencionar, el rango de medición (límite de detección inferior y superior) de los tubos pasivos no es un intervalo de concentración fijo, sino que un intervalo de cantidad de contaminante en la muestra. Así, la concentración correspondiente depende del tiempo de exposición de la muestra.

Los límites de concentración son inversamente proporcionales al tiempo de exposición. Respecto de los tubos pasivos de VOC (BTEX), el laboratorio IVL utiliza dos tipos de sustratos: Tenax y Carbopack. Los sustratos de TENAX solamente duran hasta 7 días de exposición, y en lo posible la temperatura ambiental no debe superar los 25 °C. En tanto, el sustrato Carbopack B pueden estar a mayor temperatura y pueden estar hasta dos semanas de exposición, y si la temperatura no supera los 25 °C pueden llegar inclusive hasta el mes de exposición.

Así, el rango de cuantificación de los sustratos es dependiente del tiempo. Abajo está la simulación de rangos de cuantificación para benceno usando diferentes tipos de sustratos. Los tubos de TENAX ofrecen la posibilidad de llegar a límites de detección más bajos que los de Carbopack, lo que es una ventaja cuando se encuentran en concentraciones bajas. Sin embargo, se debe tener en consideración que son más sensibles a la temperatura y tienen menor tiempo de exposición que los Carbopack.

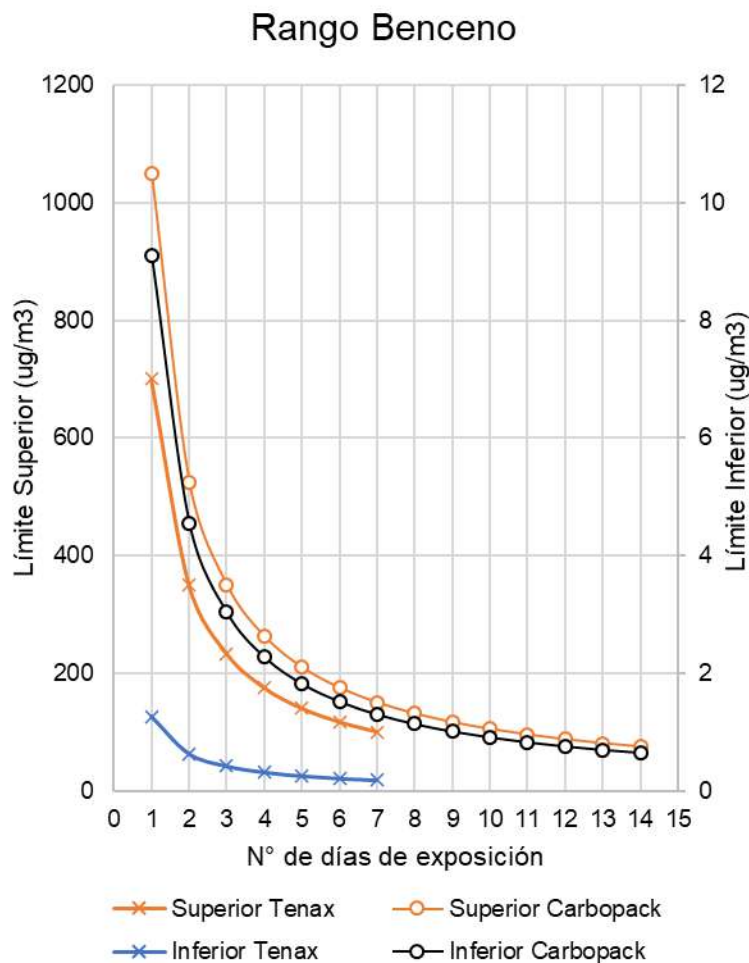


Figura 24: Simulación de los límites de detección de los tubos pasivos para Benceno para 1-14 días de exposición.

Analizando los datos de temperatura registrados en la estación Central Quintero y Loncura, se encuentra que los valores horarios en verano superan levemente los 25 °C, por lo que los tubos de TENAX pueden ser perfectamente usables.

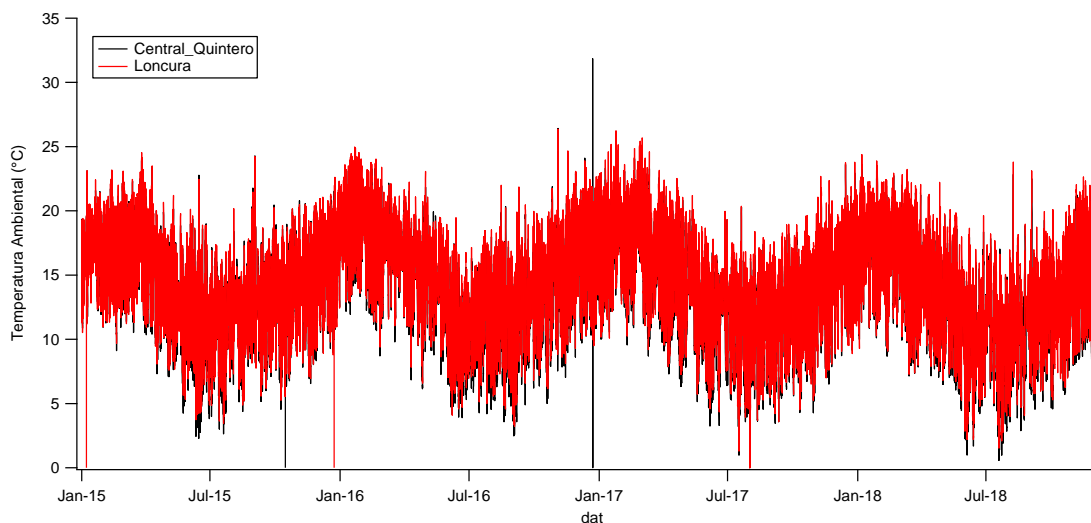


Figura 25: Valores horarios de temperatura ambiental de estaciones en la V región, 2015-2019.

4.1.3 Metodología de monitoreo innovador: Low Cost Sensors para COV (LCS)

Se presenta la campaña de monitoreo complementaria con Low Cost Sensor, con el objetivo de entregar la mayor evidencia de las tecnologías costo/efectivas disponibles en el mercado para el monitoreo de compuestos orgánicos volátiles.

Un grupo diverso de usuarios está utilizando sensores de calidad del aire de bajo costo para satisfacer una amplia variedad de necesidades de medición y de democratización de la información a los ciudadanos, concepto denominado como ciencia de la ciudadanía.

La definición “Low-cost-bajo costo” generalmente representa dispositivos que cuestan menos de \$ 2,500 USD, aunque no existe una definición de costo formalmente reconocida para dicha nomenclatura. La calidad de los datos de estos sensores a menudo está mal caracterizada y hay confusión entre los diversos usuarios de sobre cómo utilizar eficazmente los datos resultantes (Lewis et al., 2018). Por otro lado, está la necesidad de garantizar que los sensores proporcionen datos de calidad que cumplan con los criterios básicos de rendimiento (Lewis y Edwards, 2016). Actualmente, no existe un medio estandarizado de abordar el desempeño para el uso final específico (Woodall et al., 2017). Como tales, los sensores aún no son apropiados para uso reglamentario en el que se requieren criterios específicos de funcionamiento y rendimiento, sin embargo, se han reportado aplicaciones no reglamentarias que incluyen:

- Mapeo de alta resolución en tiempo real de la calidad del aire (entornos espacio-temporales),

- Monitoreo de vallas para detectar emisiones atmosféricas de fuentes industriales,
- Monitoreo comunitario para evaluar los puntos calientes,
- Monitoreo microambiental personal, interior u otro para evaluar exposiciones humanas,
- Recolección de datos en lugares remotos o en ubicaciones que no son rutinarias cuidadosamente monitoreado,
- Monitoreo de eventos extremos (por ejemplo, incendios forestales) y
- Actividades de sensibilización ambiental y ciencia ciudadana.

Como se ve en la lista anterior, los requisitos de calidad de los datos pueden variar según el uso final previsto, y es fundamental realizar un análisis de datos que responda a las necesidades. Dada la rápida adopción y los avances tecnológicos de las nuevas tecnologías de sensores de aire, existen numerosas preguntas sobre qué tan bien funcionan y cómo se pueden utilizar tecnologías de menor costo para ciertas aplicaciones reglamentarias y no reglamentarias.

Para facilitar la discusión sobre estos temas, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) y otras agencias de autoridad ambiental (AQMD-SC) han definido las comparaciones requeridas con las metodologías referenciales y equivalentes, Reference Method and Federal Equivalent Method Program (FRM/FEM), para la evaluación de rendimiento de sensores, los parámetros sugeridos para la evaluación del desempeño y posterior clasificación por uso de los sensores son: sesgo, precisión y completitud. En la siguiente tabla se presenta la clasificación de uso de los sensores según los parámetros recién nombrados.

Tabla 13 Objetivos de rendimiento sugeridos para la clasificación de uso de sensor por la EPA, en comparación con los requisitos del monitoreo regulatorio. Fuente: (Williams , et al., 2014).

Tipificación del uso	Área de aplicación	Contaminantes	% sesgo / precisión	% Completitud
I	Educación y información	Todos	< 50	≥ 50
II	Identificación y caracterización de puntos calientes	Todos	< 30	≥ 75
III	Monitoreo complementario	Contaminantes criterios	< 20	≥ 80
IV	Exposición personal	Todos	< 30	≥ 80
V	Monitoreo regulatorio	Contaminantes criterios	< 10% < 15%	≥ 75

Para el monitoreo de COV, los sensores a utilizar consisten en detectores de tipo PID, que quiere decir, que su método de detección es la fotoionización. Para esto, el gas muestra se expone a luz ultravioleta profunda, la luz emitida ioniza los gases objetivo y luego son detectados por el detector y reportados como una concentración (ppb o ppm). Los sensores PID pueden medir COV a concentraciones muy bajas. La mayoría de los COV pueden detectarse mediante sensores de PID, las excepciones notables son los hidrocarburos de bajo peso molecular, además son prácticamente insensibles a los cambios de humedad, lo que proporciona un rendimiento incomparable en zonas de gran amplitud térmica.

La detección que realizan los sensores PID tiene su principio en el fenómeno de ionización. Cuando una muestra de gas absorbe energía de una lámpara, el gas se estimula y su contenido molecular se altera. El compuesto pierde un electrón y se convierte en un ion con carga positiva. Una vez que ocurre este proceso, se dice que la sustancia está ionizada.

Para generar la radiación, utilizan un tubo de descarga que contiene una mezcla de gases a baja presión, estos son excitados por medio de una diferencia de potencial elevada que se mantiene entre dos electrodos. La variación en las proporciones de la mezcla de gases de la lámpara permite obtener radiación ultravioleta de diferentes energías. La corriente resultante, es proporcional a la concentración de COV.

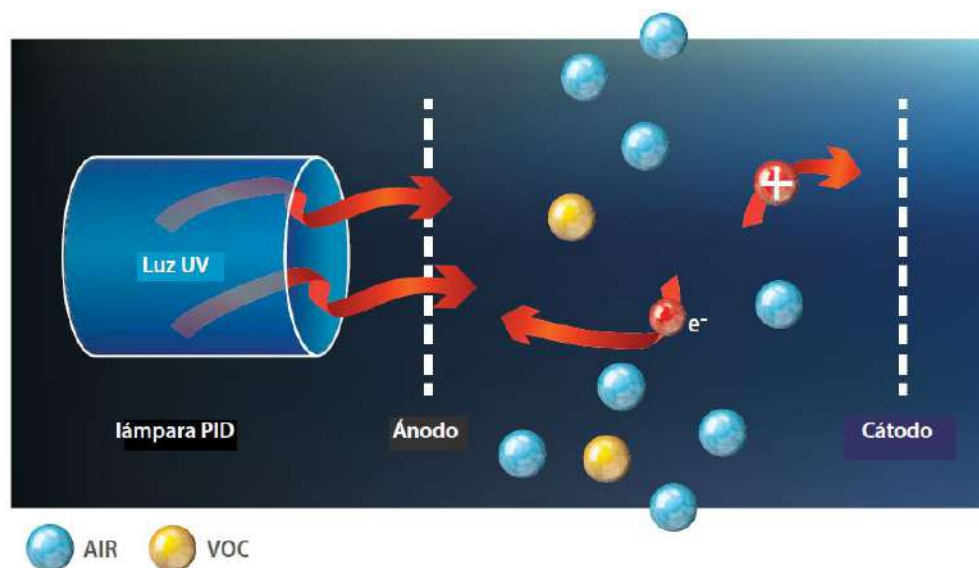


Figura 26: Diagrama del funcionamiento del detector de fotoionización

La mayoría de las sustancias pueden ser ionizadas, algunas más fácilmente que otras. La capacidad de una sustancia de ionizarse se mide a través del potencial de ionización (PI), utilizando una escala de energía en electronvoltios (eV). Por lo general, esta escala va de un valor de 7 a 16 eV. Las sustancias con un valor de PI de 7 eV son muy fáciles de ionizar, mientras que las sustancias con un valor entre 12 y 16 eV son extremadamente difíciles de ionizar. Los potenciales de ionización de algunos COV se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14: Tabla de potenciales de ionización específico para distintos COV

Sustancia	PI
BENCENO	9.25
HEXANO	10.13
TOLUENO	8.82
ESTIRENO	8.47
METILETILCETONA (MEK)	9.51
XILENO	8.56
FOSFANO	9.87

Una lámpara de 10.6 eV irradia suficiente energía para ionizar cualquier compuesto con un PI de menos de 10.6 eV (MSA, 2015) incluyendo todos los compuestos que se pueden ionizar con una lámpara de 9.8 eV. Aunque hay algunos compuestos que requieren una lámpara de 11.7 eV, las lámparas disponibles con esa energía son inestables, lo cual resulta en una vida útil muy corta.

Los sensores a utilizar para esta campaña de monitoreo serán 5 nodo-sensor, que corresponderán al sensor Alphasense PID modelos A12 o AH2, ver siguiente figura.



Figura 27: Sensor Alphasense PID

Los sensores incluyen un detector con controlador de lámpara, circuito amplificador y pila de electrodos reemplazables por el usuario, lámpara de 10,6 eV y filtro de partículas a energía máxima de fotones generada en un detector depende de la lámpara PID utilizada: xenón = 9,6 eV, deuterio = 10,2 eV, criptón = 10,6 eV y Argón = 11,7 eV. Por lo tanto, el uso de una lámpara de argón conduce a la detección de la mayor variedad de compuestos volátiles (Alphasense, 2010), mientras que el uso de una lámpara de xenón puede aumentar la selectividad, por lo tanto, se deja en manifiesto discutir con la contraparte técnica del proyecto, la elección de la lámpara de los sensores PID a utilizar.

4.2 Lugares de medición

LA USEPA ha definido requerimientos de lugares de monitoreo en términos de escala de medición. Dicho de otra manera, cada estación de monitoreo debe estar localizada de forma tal que represente adecuadamente una parcela de aire o volumen determinado. Así, se han definido seis escalas de representatividad para describir el tamaño de estas parcelas de aire. Se asume que, a lo largo de cada escala definida, el contaminante de interés está homogéneamente distribuido.

Tabla 15: Características de diferentes escalas espaciales definidas por la USEPA.

Escala	Tamaño (aprox)
Microescala	Varios metros a 100 metros
Escala media	100 a 500 metros
Vecindad	500 metros a 4 kms
Urbana	4 a 5 kms
Regional	Decenas a cientos de kms

4.2.1 Instalación DOAS

Según la clasificación indicada en la sección 4.1.3 cada estación de monitoreo debe estar localizada de forma tal que represente adecuadamente una parcela de aire o volumen determinado.

Dado que el origen de este proyecto nace en el Plan de Descontaminación de Puchuncaví Quintero Concón, se considera apropiado realizar la campaña de medición en la zona de Quintero. Mediante reuniones con la contraparte técnica y a conversaciones avanzadas que dispone se considera utilizar la siguiente configuración para la instalación del DOAS. A continuación, se entrega el detalle de la configuración propuesta.

- Lugar de instalación: Comuna de Quintero
- Largo del Path Óptico: 800 mts aproximadamente.
- Contaminantes a Medir: Benceno, Tolueno, Etilbenceno (BTE)

El receptor estará instalado en la [Capitanía Puerto Quintero](#), en tanto que el [Emisor DOAS](#) cerca del Centro de Buceo Desafío Submarino.



Figura 28: Sitios de monitoreo de DOAS.



Figura 29: Ubicación receptor DOAS.



Figura 30: Ubicación emisor DOAS.

4.2.2 Tubos pasivos

Los tubos pasivos se instalarán en tres puntos de la actual red de monitoreo en condiciones de background (condiciones de fondo), urbano y rural, con la finalidad de tener mediciones representativas de la exposición poblacional a las concentraciones de COV's (BTEX).

Tabla 16: ubicación potencial de tubos pasivos.

Estación	Potencial Clasificación
Puchuncaví	Urbano
Ventanas	Industrial
La Greda	Industrial
Los Maitenes	Urbano
Valle Alegre	Rural
Quintero	Urbano
Quintero Centro	Urbano
Sur	Rural
Concón	Urbano

4.2.3 Sensores

Se contempla utilizar los sensores low-cost PID de forma complementaria al path óptico del DOAS. Se considera la instalación de un sensor en el path óptico con la finalidad de comparar mediciones entre ambas tecnologías. 4 sensores restantes 3 estarán ubicados en las estaciones de referencia de calidad del aire Ventanas, Concón, y los Maitenes, y el quinto sensor será utilizado en duplicado en cada una de las estaciones por un periodo de 2 semanas aproximadamente, con el objetivo de comparar en duplicado el rendimiento de los sensores PID.

Tabla 17: Potencial ubicación de sensores de monitoreo.

Sensor	Estación	Potencial Clasificación
1	Path óptico	Urbano
2	Ventanas	Industrial
3	Concón	Urbano-Industrial
4	Los Maitenes	Urbano
5	Ventanas, Concón y Los Maitenes	Sensor en duplicado para control de QA/QC

5 BIBLIOGRAFÍA

- Barletta, B., Meinardi, S., Simpson, I.J., Zou, S., Sherwood Rowland, F., Blake, D.R., 2008. Ambient mixing ratios of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in two major urban centers of the Pearl River Delta (PRD) region: Guangzhou and Dongguan. *Atmospheric Environment* 42, 4393–4408. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.028>
- Kerchich, Y., Kerbachi, R., 2012. Measurement of BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) levels at urban and semirural areas of Algiers City using passive air samplers. *J Air Waste Manag Assoc* 62, 1370–1379. <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.712606>
- MMA, 2013. DECRETO 38. APRUEBA REGLAMENTO PARA LA DICTACIÓN DE NORMAS DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE EMISIÓN.
- Sekar, A., Varghese, G.K., Ravi Varma, M.K., 2019. Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment. *Heliyon* 5, e02918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02918>
- SISTAM Ingeniería, 2019. INVENTARIO DE EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS, DESDE LA REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O ´ HIGGINS HASTA LA REGIÓN DE LOS LAGOS” (Informe Final). SUBSECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE.
- Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, X., Lü, S., Huang, Z., Huang, X., Yang, W., Wang, Y., Zhang, Q., 2016. Spatiotemporal patterns and source implications of aromatic hydrocarbons at six rural sites across China’s developed coastal regions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, 6669–6687. <https://doi.org/10.1002/2016JD025115>

**ANEXO I: Reporte Joan O. Grimalt. ANTECEDENTES PARA CREAR UNA
NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE CON RESPECTO A LOS
COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES CON REFERENCIA A LAS
NORMATIVAS LEGALES Y EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN EUROPEAS**

**INFORME ACERCA DE LOS ANTECEDENTES PARA
CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE
CON RESPECTO A LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS
VOLÁTILES CON REFERENCIA A LAS NORMATIVAS
LEGALES Y EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN EUROPEAS**

Joan O. Grimalt

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Barcelona, 4 de noviembre 2020

ÍNDICE

1. Normativa Europea sobre la contaminación por benceno	3
2. Precursores de ozono según la normativa europea	9
3. Compuestos orgánicos volátiles prioritarios	10
4. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles provenientes del almacenamiento y distribución de petróleo a las estaciones de servicio	11
5. Inventario de emisiones de compuestos orgánicos volátiles no metánicas	12
6. Inventario de emisiones de compuestos orgánicos volátiles provenientes de disolventes	14
7. Estudio de emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles	16
8. Uso de la Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) para el estudio de la contaminación atmosférica	19

1. Normativa Europea sobre la contaminación por benceno

La única normativa para la concentración de un compuesto orgánico volátil en el aire se refiere al benceno.

APÉNDICE A: DIRECTIVE 2000/69/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 November 2000 relating to limit values for benzene and carbon monoxide in ambient air. 2000L0069/1-16.

En dicha normativa se establece que el valor límite para la protección de la salud humana debe corresponder a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un promedio en el tiempo de un año completo (calendario).

Además, se indican los objetivos siguientes para el intervalo de tolerancia: $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (100 %) a 13 de Diciembre de 2000, reduciendo a partir del 1 de Enero de 2006 y cada 12 meses posteriormente en $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para llegar a 0 % el 1 de Enero de 2010

También se establecen unos valores superiores e inferiores de referencia:

(a) ‘upper assessment threshold’ quiere decir el 70% de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Por debajo de este valor, se puede utilizar una combinación de medidas y técnicas de modelado para evaluar la calidad del aire ambiente.

(b) ‘lower assessment threshold’ quiere decir 40 % de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Por debajo de este valor, se pueden utilizar técnicas de modelado o estimación objetiva sin necesidad de más medidas para evaluar la calidad del aire ambiente.

Detección de las superaciones de los umbrales de evaluación superiores e inferiores

Las superaciones de los umbrales de evaluación superiores e inferiores deben calcularse sobre la base de los datos de las concentraciones de los cinco años anteriores cuando se disponga de datos suficientes. Se considerará que se ha superado un umbral de evaluación si se ha superado durante al menos tres años distintos de los cinco años anteriores.

Cuando se disponga de datos de menos de cinco años, para determinar superaciones de los umbrales de evaluación superior e inferior los Estados miembros podrán combinar campañas de medición de corta duración durante el período del año y en lugares que probablemente sean los típicos de los niveles más altos de contaminación, de acuerdo con resultados previos obtenidos a partir de inventarios de emisiones y modelos.

UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO PARA LA MEDICIÓN DE LAS CONCENTRACIONES EN EL AIRE AMBIENTE

Se aplicarán las consideraciones siguientes a la medición fija.

I. Localización de macroescala

Los puntos de muestreo destinados a la protección de la salud humana deberían estar seleccionados de acuerdo con los criterios siguientes:

i) proporcionar datos sobre las áreas dentro de las zonas y aglomeraciones donde se producen las concentraciones más altas a las que es probable que la población esté expuesta directa o indirectamente durante un período que sea significativo en relación con el período medio del valor o valores límite;

(ii) proporcionar datos sobre niveles en otras áreas dentro de las zonas y aglomeraciones que sean representativos de la exposición de la población en general. Usualmente, los puntos de muestreo se deben colocar en lugares que eviten medir microambientes muy pequeños que únicamente sean representativos de sus inmediaciones. Como pauta, se debe ubicar un punto de muestreo que sea representativo de la calidad del aire en un área circundante de no menos de 200 m² en sitios orientados al tráfico y de varios kilómetros cuadrados en sitios urbanos.

Los puntos de muestreo también deberían, cuando sea posible, ser representativos de lugares similares que no se encuentren en sus inmediaciones.

Debe tenerse en cuenta la necesidad de ubicar puntos de muestreo en islas, cuando sea necesario para la protección de la salud humana.

II. Localización de microescala

Se deben cumplir las siguientes pautas en la medida de lo posible:

- el flujo alrededor de la sonda de muestreo de entrada debe ser ilimitado, sin obstrucciones que afecten a la aspiración de aire en las proximidades del muestreador (normalmente a algunos metros de edificios, balcones, árboles y otros obstáculos y al menos a 0.5 m del edificio más cercano en el caso de los puntos de muestreo que representan la calidad del aire en la línea del edificio);

- en general, el punto de muestreo de entrada debería estar entre 1.5 m (la zona de respiración) y 4 m por encima del suelo. En algunas circunstancias, pueden ser necesarias posiciones más altas (hasta 8 m). Una ubicación más alta también puede ser apropiada si la estación es representativa de un área grande;

- la sonda de entrada no debería colocarse en las inmediaciones de fuentes de contaminación para evitar la entrada directa de emisiones no mezcladas con el aire ambiente;
- la salida de descarga de aire del muestreador debe colocarse de manera que se evite la recirculación del aire expulsado a la entrada de la muestra;
- ubicación de muestreadores orientados al tráfico:
- para todos los contaminantes, dichos puntos de muestreo deberían estar al menos a 25 metros del borde de los cruces principales y al menos a 4 m del centro del carril de tráfico más cercano;
- las entradas deben ubicarse de manera que sean representativas de la calidad del aire cerca de la línea de construcción.

También se pueden tener en cuenta los siguientes factores:

- fuentes de interferencia;
- seguridad;
- acceso;
- disponibilidad de energía eléctrica y comunicaciones telefónicas;
- visibilidad del sitio en relación con su entorno;
- seguridad del público y los operadores;
- la conveniencia de la ubicación conjunta de puntos de muestreo para diferentes contaminantes;
- requisitos de planificación.

III. Registro y revisión de los lugares seleccionados

Los procedimientos de selección de las localizaciones deben estar completamente documentados en la etapa de clasificación por medios tales como fotografías de la zona circundante a punto de brújula y un mapa detallado. Los sitios deben revisarse a intervalos regulares con documentación repetida para garantizar que los criterios de selección sigan siendo válidos a lo largo del tiempo.

CRITERIOS PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE PUNTOS DE MUESTREO PARA LA MEDICIÓN FIJA DE LAS CONCENTRACIONES

El número mínimo de puntos de muestreo para mediciones fijas para evaluar el cumplimiento de los valores límite para la protección de la salud humana en zonas y aglomeraciones donde la medición fija es la única fuente de información tiene que ser:

(a) Para fuentes difusas

Población (miles)	Si las concentraciones exceden el upper assessment threshold (1)	Si las concentraciones máximas están entre los upper and lower assessment thresholds
0-249	1	1
250-499	2	1
500-749	2	1
750-999	3	1
1000-1499	4	2
1500-1999	5	2
2000-2749	6	3
2750-3749	7	3
3750-4749	8	4
4750-5999	9	4
≥6 000	10	5

(1) Incluir al menos una estación de fondo urbano y una estación orientada al tráfico siempre que esto no aumente el número de puntos de muestreo.

(b) Para fuentes puntuales

Para la evaluación de la contaminación en las proximidades de fuentes puntuales, el número de puntos de muestreo para la medición fija debe calcularse teniendo en cuenta las densidades de emisión, los patrones de distribución probables de la contaminación del aire ambiente y la exposición potencial de la población.

OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS Y COMPILACIÓN DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Objetivos de calidad de datos

A continuación se indican los siguientes objetivos de calidad de los datos para asegurar la calidad de los resultados. Se tiene en cuenta la incertidumbre permitida de los métodos de evaluación, de la cobertura de tiempo mínima y de la captura de datos de la medición.

	Benceno
Localizaciones fijas (1)	
Incertidumbre	25 %
Recogida mínima de datos	90 %
Tiempo mínimo cubierto	35 % antecedentes urbanos y sitios de tráfico (distribuidos a lo largo del año para ser representativos de las diversas condiciones de clima y tráfico) 90 % sitios industriales
Medidas indicativas	
Incertidumbre	30 %
Recogida mínima de datos	90 %
Tiempo mínimo cubierto	14 % (medición de un día a la semana al azar, distribuida uniformemente a lo largo del año u 8 semanas distribuidas uniformemente a lo largo del año)
Modelización	
Incertidumbre:	
Medias de ocho horas	—
Medias anuales	50 %
Estimación objetiva	
Incertidumbre	100 %

(1) Los Estados miembros pueden aplicar mediciones aleatorias en lugar de mediciones continuas si pueden demostrar a la Comisión que la incertidumbre, incluida la incertidumbre debida al muestreo aleatorio, cumple el objetivo de calidad del 25%. El muestreo aleatorio debe distribuirse uniformemente a lo largo del año para evitar sesgos en los resultados.

La incertidumbre (en un intervalo de confianza del 95%) de los métodos de evaluación se evaluará de acuerdo con los principios de la Guía ISO para la expresión de la incertidumbre en la medición (1993) o la metodología de ISO 5725:1994 o equivalente. Los porcentajes de incertidumbre en la tabla anterior se dan para mediciones individuales promediadas durante el período considerado por el valor límite, para un intervalo de confianza del 95%. La incertidumbre de las mediciones fijas debe interpretarse como aplicable en la región del valor límite apropiado. La incertidumbre para el modelado y la estimación objetiva se define como la desviación máxima de los niveles de concentración medidos y calculados, durante el período considerado, por el valor límite, sin tener en cuenta el momento de los eventos.

Los requisitos de recogida de datos mínimos y cobertura de tiempo no incluyen pérdidas de datos debido a la calibración regular o al mantenimiento normal de la instrumentación.

Resultados de la evaluación de la calidad del aire

Se debe recopilar la información siguiente para las zonas o aglomeraciones en las que se emplean datos distintos a la medición para complementar la información de ésta o como único medio de evaluación de la calidad del aire:

- una descripción de las actividades de evaluación realizadas;
- los métodos específicos utilizados, con referencias a descripciones del método;
- los orígenes de los datos e información;
- una descripción de los resultados, incluidas las incertidumbres y, en particular, la extensión de cualquier área o, si procede, la longitud de la carretera dentro de la zona o aglomeración en la que las concentraciones superan el valor o valores límite o, en su caso, el/los valor/es límite/s más los márgenes de tolerancia aplicables y de cualquier área dentro de la cual las concentraciones excedan el umbral de evaluación superior o el umbral de evaluación inferior;
- para valores límite cuyo objeto sea la protección de la salud humana, la población potencialmente expuesta a concentraciones superiores al valor límite.

Siempre que sea posible, los Estados miembros deberían compilar mapas que muestren las distribuciones de concentración dentro de cada zona y aglomeración.

Estandarización

El resultado de la medición debe estandarizarse a una temperatura de 293 K y una presión de 101,3 kPa.

MÉTODOS DE REFERENCIA PARA LA EVALUACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DEL MUESTREO /ANÁLISIS

El método de referencia para la medición de benceno consistirá en muestreo por bombeo en un cartucho absorbente seguido de la determinación por cromatografía de gases. En ausencia de un método estandarizado a nivel europeo, los Estados miembros pueden utilizar métodos estándar nacionales basados en el mismo método de medición.

Un Estado miembro también puede utilizar cualquier otro método que pueda demostrar que da resultados equivalentes al método anterior.

2. Precursores de ozono según la normativa europea

La directiva 2008/50/EC de la calidad del aire ambiente y aire limpio en Europa indica los compuestos orgánicos volátiles que hay que controlar como posibles precursores de la generación de ozono.

APÉNDICE B: DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. L152/1-44.

Además de los óxidos NO y NO₂ se tienen que analizar los siguientes compuestos orgánicos volátiles:

	1-Buteno	Isopreno	Etilbenceno
Etano	trans-2-Buteno	n-Hexano	m + p-Xilenos
Etileno	cis-2-Buteno	i-Hexano	o-Xileno
Acetileno	1,3-Butadieno	n-Heptano	1,2,4-Trimetilebenceno
Propano	n-Pentano	n-Octano	1,2,3-Trimetilebenceno
Propeno	i-Pentano	i-Octano	1,3,5-Trimetilebenceno
n-Butano	1-Penteno	Benceno	Formaldehido
i-Butano	2-Penteno	Tolueno	Hidrocarburos totales no metánicos

3. Compuestos orgánicos volátiles prioritarios

Excepto en el caso del benceno, la normativa europea no establece ninguna lista prioritaria para el análisis de compuestos orgánicos volátiles en relación a su toxicidad.

Sin embargo, existen informes de la Organización Mundial de la Salud que establecen los objetivos de calidad del aire para Europa:

APÉNDICE C: Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition. World Health Organization 2000. WHO Regional Publications, European Series, No. 91. ISBN 92 890 1358 3. 274 p.

Los compuestos mencionados en dicho informe se encuentran en la Tabla siguiente:

Compuesto	Actividad cancerígena según la IARC ^a	Concentraciones máximas recomendadas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y efectos cancerígenos
Acrilonitrilo	2B		1 ($2 \cdot 10^{-5}$) ^b
Benceno	1	5; media anual	0.17 (10^{-6}); 1.7 (10^{-5}); 17 (10^{-4})
1,3-Butadieno	1		
Cloruro de vinilo	1		1 (10^{-6})
Disulfuro de carbono		100 media 24 h 20 media 30 min (umbral olfativo)	
1,2-Dicloroetano	2B	700 media 24 h	
Diclorometano	2A	3000 media 24 h 450 media semanal	
Estireno	2B	260 media semanal 70 media 30 min (umbral olfativo)	
Formaldehido	1	100 media 30 min	
Tetracloroetileno	2A	250 media anual	4 (10^{-6}); 40 (10^{-5}); 400 (10^{-4})
Tricloroetileno	1		2.3 (10^{-6}); 23 (10^{-5}); 230 (10^{-4})
Tolueno	3	260 media semanal 1000 media 30 min (umbral olfativo)	

^aIARC: Agencia Internacional de investigación sobre el cáncer. Clasifica los compuestos de acuerdo con su actividad cancerígena. 1: cancerígeno; 2A: probable cancerígeno. 2B: posible cancerígeno. 3: no hay datos que demuestren que es cancerígeno.

^bindica que a la exposición de esta concentración se producen 5 cánceres por millón de habitantes en 70 años

4. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles provenientes del almacenamiento y distribución de petróleo a las estaciones de servicio

La directiva 94/63/EC realizó una normativa para las emisiones de compuestos orgánicos volátiles provenientes del almacenamiento y distribución de petróleo a las estaciones de servicio

Las concentraciones durante la carga no pueden superar 35 g/Nm^3 como media de una hora durante cualquier hora

La normativa establece unos criterios de medida:

Las mediciones deben realizarse en el transcurso de un día laboral completo de rendimiento normal (siete horas mínimo).

Las mediciones pueden ser continuas o discontinuas. Si se emplean mediciones discontinuas, se deben realizar al menos cuatro mediciones por hora.

El error de medición global debido al equipo utilizado, el gas de calibración y el procedimiento utilizado no debe exceder el 10% del valor medido.

El equipo utilizado debe ser capaz de medir concentraciones al menos tan bajas como 3 g/m^3 .

La precisión debe ser al menos el 95% del valor medido.

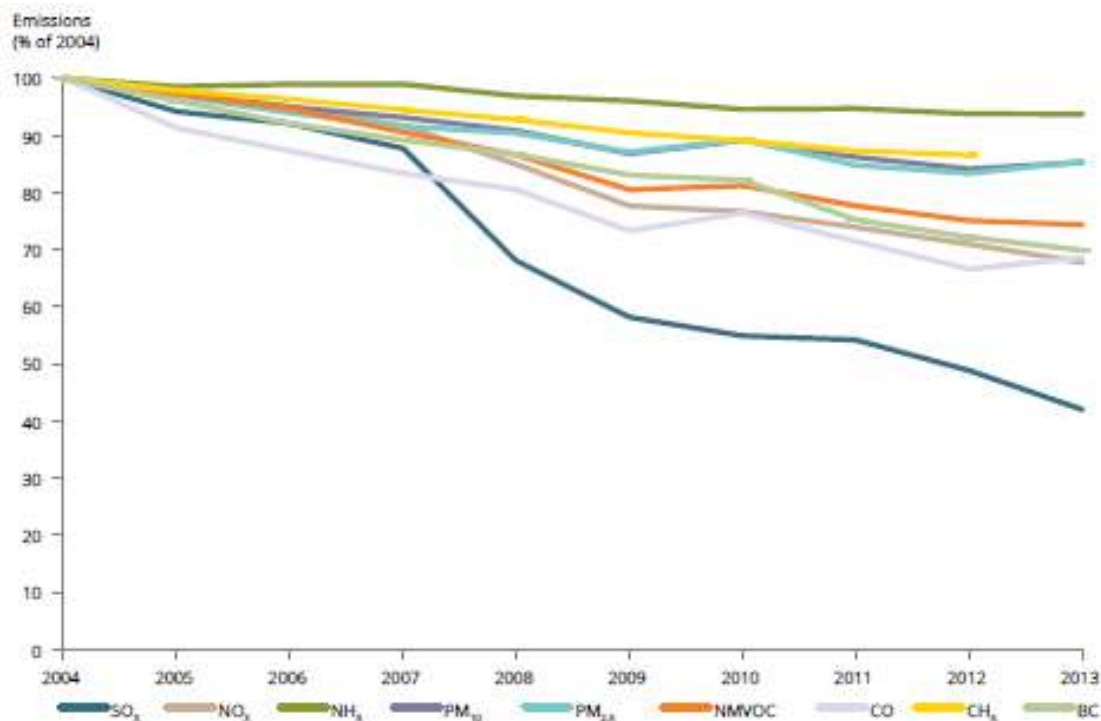
APÉNDICE D: EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL DIRECTIVE 94/63/EC of 20 December 1994 on the control of volatile organic compound (VOC) emissions resulting from the storage of petrol and its distribution from terminals to service stations. L365/24-33 (1994)

5. Inventario de emisiones de compuestos orgánicos volátiles no metánicos

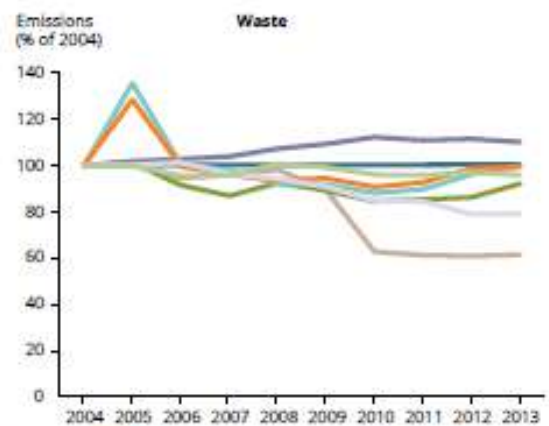
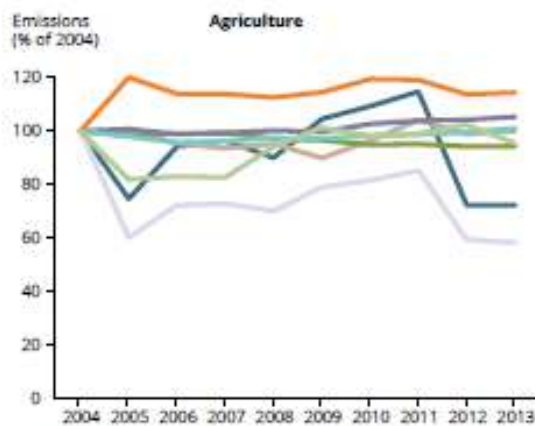
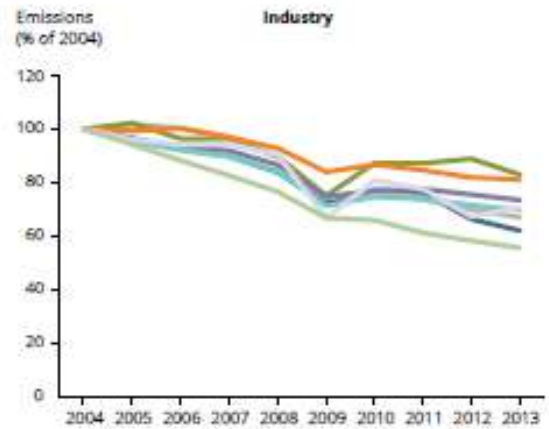
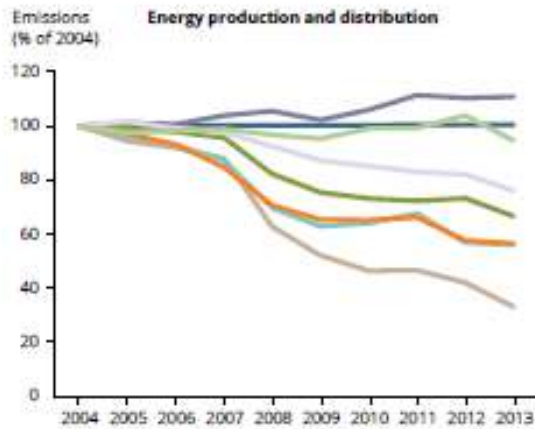
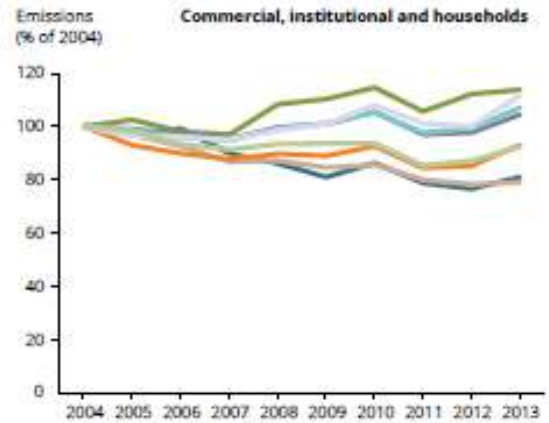
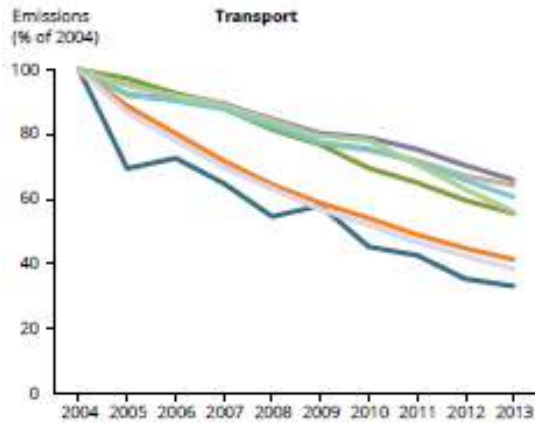
La Agencia Europea del Medio Ambiente ha realizado inventarios de las emisiones de diferentes contaminantes atmosféricos en Europa, entre ellos los compuestos orgánicos volátiles no metánicos

APÉNDICE E: Air quality in Europe — 2015 report. European Environment Agency. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. doi:10.2800/62459

APÉNDICE F: European Union emission inventory report 1990-2016 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). European Environment Agency. Report. No. 6/2018. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018. doi:10.2800/ 571876



Emisiones compuestos orgánicos volátiles no metánicos (EEA Report, 2015)



— SO₂ — NO_x — NH₃ — PM₁₀ — PM_{2.5} — NMVOC — CO — BC

Emisiones de diversos contaminantes atmosféricos, entre ellos los compuestos orgánicos volátiles no metánicos relacionadas con diversas actividades

6. Inventario de emisiones de compuestos orgánicos volátiles provenientes de disolventes

El European Solvents Industry Group (ESIG) ha realizado inventarios de las emisiones compuestos orgánicos volátiles provenientes del uso de disolventes en Europa.

APÉNDICE G: European solvent VOC emission inventories based on industry-wide information. J.K. Pearson. Atmospheric Environment 204, 118-124 (2019)

Emisiones totales europeas calculadas a partir de las estadísticas de las ventas industriales comparadas con las emisiones acordadas internacionalmente por la Unión Europea.

Year	ESIG total solvent emissions, thousand tonnes year ⁻¹	Internationally-agreed total solvent emissions, thousand tonnes year ⁻¹
2008	2159	3335
2009	1917	3050
2013	1978	2928
2015	1981	2694

Comparación de las estimaciones de emisiones de VOCs por uso de disolventes en 2015 realizadas por ESIG y las acordadas internacionalmente en miles de toneladas al año.

Country	European Solvents Industry Group					EEA
	HC + OXY	CHLOR	TOTAL before I/E	Import/(Export)	Grand TOTAL	TOTAL
Austria + Slovenia + Croatia	40.5	3.2	43.7	34.4	78.1	90.0
Belgium + Luxemburg	149.0	8.6	157.6	(104.5)	53.1	42.0
Bulgaria + Romania	4.7	0.5	5.2	43.7	48.9	88.0
Cyprus + Greece ^a	27.5	2.5	30	19.3	49.3	2
Czech Republic + Slovakia	17.3	1.3	18.6	51.7	70.3	113.0
Denmark	11.3	1.2	12.5	7.5	20.0	27
Baltic States + Finland	20.9	1.9	22.8	31.5	54.3	49.0
France	200.9	17.4	218.3	0	218.3	289
Germany	568.5	40.5	609	(284)	325.0	541
Hungary	6.1	0.5	6.6	17.2	23.8	41
Ireland	16.4	1.4	17.8	0.0	17.8	19
Italy	190.5	14.7	205.2	136.3	341.5	353
Netherlands	169.4	11.9	181.3	(121)	60.3	56.0
Poland	38.2	3.8	42	69.5	111.5	219
Portugal + Spain ^b	195.7	14.3	210	82.1	292.1	360
Sweden	24.3	2.9	27.2	16.3	43.5	57
United Kingdom	160.6	12.6	173.2	0.0	173.2	350
Total	1840.8	139.2	1981	0	1981	2694

HC + OXY: hidrocarburos y compuestos oxigenados. Chlor: compuestos clorados

^aNo hay datos de Grecia

^bEspaña y Portugal tienen emisiones de 272.3 y 19.8 miles de toneladas

En otro estudio se han comparado estas emisiones con las comunicadas por los países miembros (EEA)

year	ESIG VOC emissions	EEA inventories*	EEA vs ESIG difference
2008	2159	3322	35%
2009	1917	3010	37%
2013	1978	2652	25%
2015	1981	2598	24%
2016	1626	2586	37%
2017	1613	2638	39%
2018	1813	2621	31%

APÉNDICE H: Comparison of the global calculated emission inventories of VOCs in Europe (ktones) from the European Solvents Industry Group (ESIG) and the reported country values (EEA)

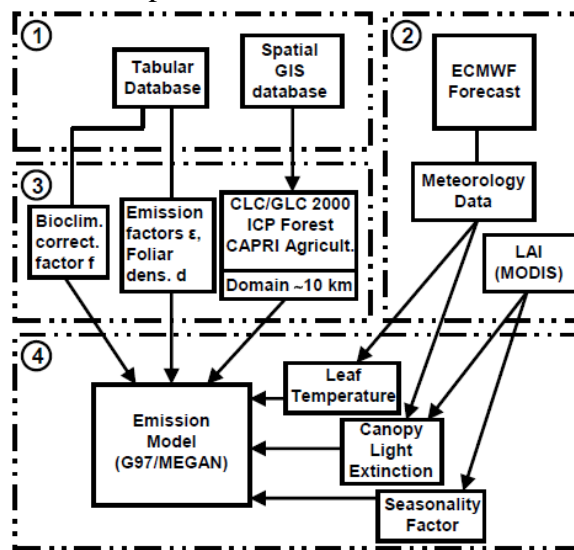
<i>Summary of results for aggregated country groups applied by ESIG 2018</i>			
Countries	TOTAL PRODUCTION Hydrocarbon+Oxygenated solvents	IMPORT/EXPORT Corrections	Emissions NMVOC in ktonne/country
Austria + Slovenia + Croatia	40.15	39.16	79.31
Belgium + Luxembourg	189.05	-150.46	38.59
Bulgaria + Romania	5.94	49.05	54.99
Cyprus + Greece	10.09	22.11	32.19
Czech Republic + Slovakia	16.83	55.67	72.50
Denmark	7.23	9.25	16.49
Baltic States + Finland	18.30	35.88	54.18
France	192.49	-3.48	189.01
Germany	490.97	-307.23	183.74
Hungary	6.25	19.77	26.02
Ireland	9.14	2.28	11.41
Italy	204.27	154.87	359.14
Malta	3.07	0.03	3.10
Netherlands	197.17	-149.08	48.08
Poland	50.52	79.71	130.23
Portugal + Spain	187.94	104.12	292.06
Sweden	25.28	16.95	42.23
United Kingdom	158.50	21.40	179.90
Total EU-28	1813.18	0	1813.18

Valores de emision de VOCs en diferentes países provenientes del uso de disolventes en 2018 (datos de ESIG)

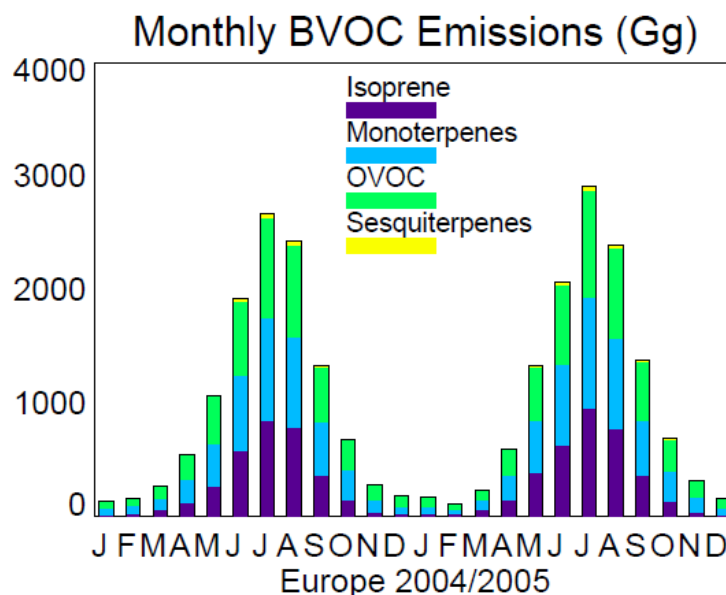
7. Estudio de emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles

No existe un método oficial de la Unión Europea para el cálculo de las emisiones biogénicas de Compuestos Orgánicos Volátiles.

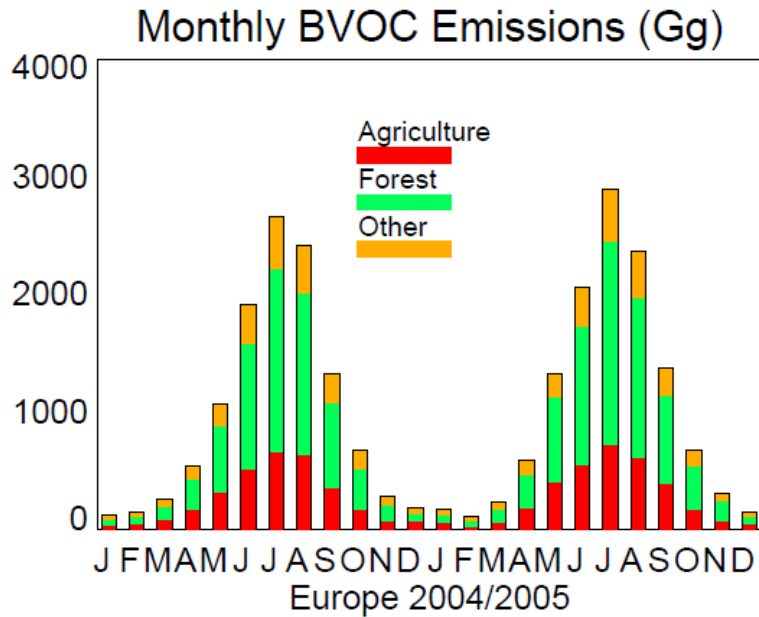
En el artículo, A new European plant-specific emission inventory of biogenic volatile organic compounds for use in atmospheric transport models por M. Karl, A. Guenther, R. Köble, A. Leip, and G. Seufert (Biogeosciences, 6, 1059–1087, 2009; **APÉNDICE I**) se describe un modelo calculado a partir de la cuantificación de la cubierta vegetal en Europa:



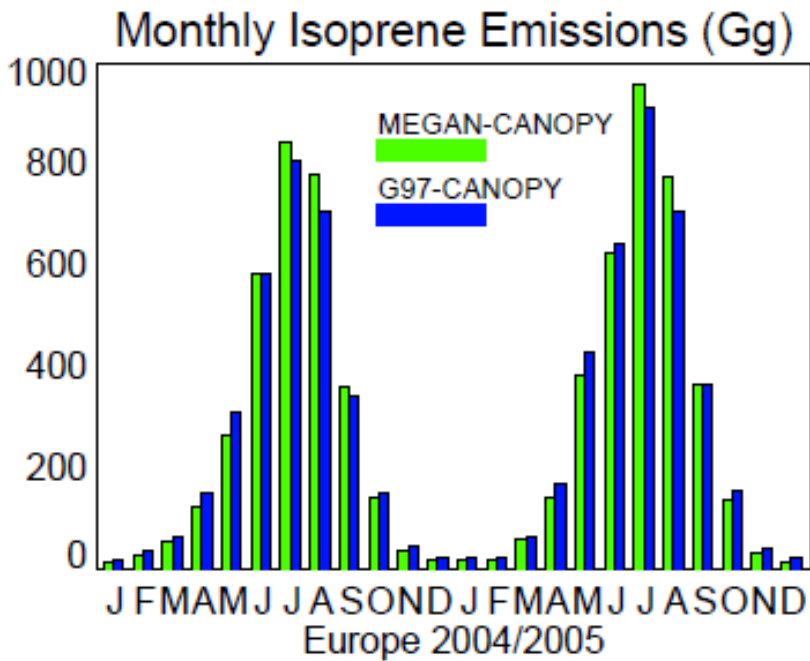
Los resultados se resumen en las figuras siguientes.



Variación estacional de emisiones de VOCs biogénicas (Karl et al., 2009)



Variaciones estacionales de las emisiones biogénicas de VOCs en Europa agrupadas por contribuciones de usos diferentes de la tierra (Karl et al., 2009)



Variaciones estacionales de las emisiones de isopreno en Europa

Otro estudio que evalúa las emisiones biogénicas utilizando inventarios de la vegetación presente en Europa es el publicado en:

A comprehensive emission inventory of biogenic volatile organic compounds in Europe: improved seasonality and land-cover. D.C. Oderbolz, S. Aksoyoglu, J. Keller, I. Barmpadimos, R. Steinbrecher, C.A. Skjøth, C. Plaß-Dülmer and A.S.H. Prévôt. Atmospheric Chemistry and Physics 13, 1689-1712 (2013) (**APÉNDICE J**)

Emisiones anuales totales de VOCs biogénicos (Gg yr⁻¹) en diversas regiones europeas en 2006

	S1				S2				S3			
	ISOP	MT	SQT	OVOC	ISOP	MT	SQT	OVOC	ISOP	MT	SQT	OVOC
Central Europe ¹	474	711	35	1211	355	673	29	1039	435	770	40	1207
Iberian Peninsula ²	364	741	15	528	171	445	10	402	432	795	16	440
Balkan Peninsula ³	281	327	13	651	262	349	12	452	261	213	10	387
Scandinavian Peninsula ⁴	61	268	54	360	21	385	30	463	44	578	55	815
Italian Peninsula	201	150	6	254	104	201	5	204	131	127	5	193
British Isles ⁵	22	175	6	160	20	183	4	157	25	122	2	142
Baltic States ⁶	27	67	17	90	17	140	12	127	11	106	8	131
Benelux countries ⁷	23	19	1	37	6	35	1	36	20	22	1	43

¹ Austria, Czech Republic, Germany, France, Hungary, Poland, Slovakia, Switzerland

² Spain, Portugal

³ Bulgaria, Croatia, Greece, Romania, Slovenia

⁴ Sweden, Norway, Finland, Denmark

⁵ United Kingdom and the Republic of Ireland

⁶ Estonia, Latvia, and Lithuania

⁷ Belgium, Netherlands, Luxembourg

ISOP: isopreno

MT: Monoterpenos

SQT: sesquiterpenos

OVOC: VOCs oxigenados

8. Uso de la Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) para el estudio de la contaminación atmosférica

La Unión Europea no tiene una regulación acerca del uso de la Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) para el estudio de la contaminación atmosférica.

Se han descrito ejemplos de aplicaciones de esta tecnología en el contexto de la Directiva Europea 2008/50/EC para el estudio de SO₂, NO₂ y O₃ en la atmósfera de Atenas (Kalabokas et al., 2012), de NO₂, O₃ y benceno en la zona de Milán (Italia) y Lausana (Suiza) (Jimenez et al., 1999; 2000) y de O₃ en Dublín (Morales et al., 2004).

(APÉNDICE K) A study on the atmospheric concentrations of primary and secondary air pollutants in the Athens basin performed by DOAS and DIAL measuring techniques. P.D. Kalabokas, A.D. Papayannis, G. Tsaknakis and I. Ziomas. *Science of the Total Environment* 414, 556-563 (2012)

(APÉNDICE L) DOAS as an Analytical Tool for Effective Air Pollution Management. R. Jiménez, H. van den Bergh and B. Calpini. *Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition 92nd* (1999)

(APÉNDICE M) Investigation of the Emission of Monocyclic Aromatic Hydrocarbons from a Wastewater Treatment Plant at Lausanne (Switzerland) by Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). R. Jiménez, T. Iannone, H. van den Bergh, B. Calpini and D. Kita. *Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition 93rd* (2000)

(APÉNDICE N) Urban ozone measurements using differential optical absorption spectroscopy. J.A. Morales, J. Treacy and S. Coffey. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 379, 51-55 (2004)

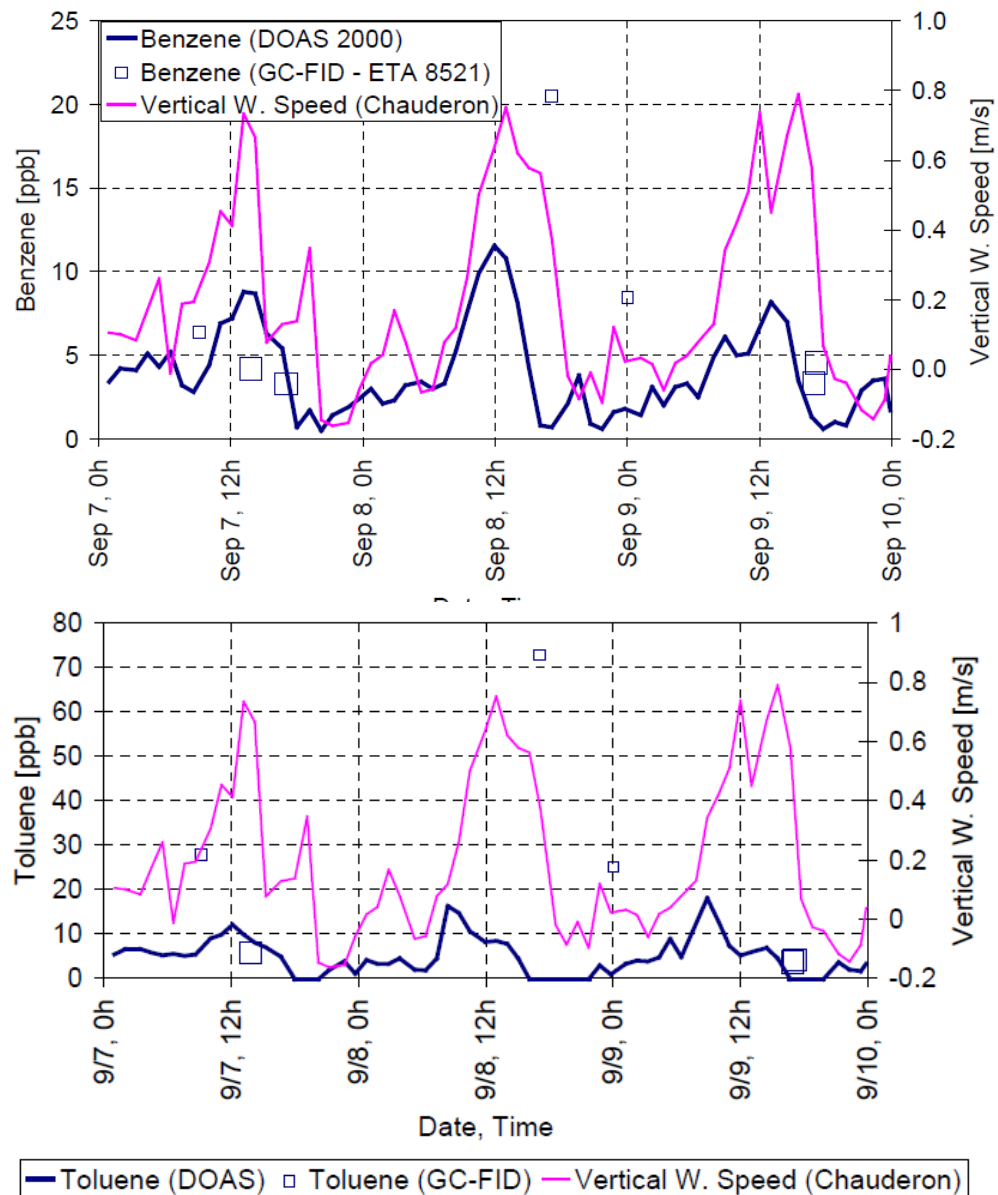
Por otro lado, a nivel práctico hay que tener en cuenta el estudio de Donner et al (2020) sobre la comparación del error en el uso de DOAS con diferente grado de inclinación.

(APÉNDICE O) Evaluating different methods for elevation calibration of MAX-DOAS (Multi AXis Differential Optical Absorption Spectroscopy) instruments during the CINDI-2 campaign. S. Donner, J. Kuhn, M. Van Roozendaal, A. Bais, S. Beirle, T. Bösch, K. Bognar, I. Bruchkouski, Ka Lok Chan, S. Dörner, T. Drosoglou, C. Fayt, U. Frieß, F. Hendrick, C. Hermans, J. Jin, Ang Li, Jianzhong Ma, E. Peters, G. Pinardi, A. Richter, S.F. Schreier, A. Seyler, K. Strong, J.-L. Tirpitz, Yang Wang, Pinhua Xie, Jin Xu, Xiaoyi Zhao and T. Wagner. *Atmospheric Measurement Technology* 13, 685-712 (2020)

Así como otros factores como tipo y perfiles de aerosoles presentes en el aire, ángulo solar zenital y azimutal, entre otros:

(APÉNDICE P) Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS). G. Hönninger, C. von Friedeburg and U. Platt. Atmospheric Chemistry and Physics 4, 231-254 (2004)

En los trabajos de Jimenez et al (1999; 2000) se han hecho comparaciones entre los resultados de los análisis de algunos VOCs por DOAS y el sistema de absorción en columna y análisis cromatográfico. En las Figuras siguientes se comparan los datos para el benceno y tolueno. Se indica que hay una mayor coincidencia cuando el nivel de viento es elevado.





ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Informe de avance 1

Adquisición 608897-35-LP20

Octubre 2020

PRESENTACIÓN

La Universidad de Santiago de Chile presenta a continuación el primer informe de avance en su versión corregida, referente a la licitación ID 608897-35-LP20, solicitado por el Ministerio del Medio Ambiente, enmarcado bajo el título “ESTUDIO DE ANTECEDENTES PARA CREAR UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES”. La necesidad de realizar este estudio está en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (PPDA CQP), el cual compromete la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire, referida a contaminantes clasificados como Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's).

El objetivo general de este estudio es generar y recopilar antecedentes técnicos que permitan elaborar una norma primaria de calidad del aire de uno o más compuestos orgánicos volátiles (COV's) que presenten impactos negativos en la salud.

De acuerdo con las bases técnicas, en el presente informe se presenta el reporte y resultado de las siguientes actividades:

- Presentación de las principales fuentes de COV's del País
- Revisión de la normativa internacional
- Propuesta de monitoreo de COV's

PRESENTACIÓN	2
1 PRINCIPALES FUENTES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES DEL PAÍS	4
1.1 Análisis de emisiones	4
1.1.1 Emisiones difusas	7
1.1.2 Emisiones Transporte	14
1.1.3 Emisiones puntuales	20
2 ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AIRE	33
2.1 Niveles de benceno en Chile	33
2.2 Niveles de benceno en otros países	36
3 REGULACIÓN INTERNACIONAL	39
4 CAMPAÑA DE MONITOREO	47
4.1 Metodologías de monitoreo	47
4.1.1 Metodología continua: DOAS OPSIS para Benceno	47
4.1.2 Muestreadores por difusión (tubos pasivos). IVL	50
4.1.3 Metodología de monitoreo innovador: Low Cost Sensors para COV (LCS)	54
4.2 Lugares de medición	59
4.2.1 Instalación DOAS	59
4.2.2 Tubos pasivos	61
4.2.3 Sensores	62
5 BIBLIOGRAFÍA	63
6 ANEXOS	64

1 PRINCIPALES FUENTES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES DEL PAÍS

Los compuestos orgánicos volátiles (COV's) son un grupo grande de especies gaseosas orgánicas que incluyen cualquier compuesto de carbono (excluyendo al monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbónico, carburos metálicos y carbonato de amonio)¹. El PDA CQP define a los COV's como toda sustancia química que, a excepción del Metano, contenga átomos de carbono e hidrógeno (que puedan ser sustituidos por otros átomos como halógenos, oxígeno, azufre, nitrógeno o fósforo) y que a 20°C tenga una presión de vapor mayor o igual a 0,01 kPa, o que tenga una volatilidad equivalente según condiciones particulares de uso, manipulación y/o almacenamiento. Se incluye en esta definición la fracción de creosota que sobrepase este valor de presión de vapor a la temperatura indicada de 20°C.

Los COV's son de especial interés debido a que participan en las reacciones fotoquímicas atmosféricas que contribuyen a la formación de ozono y aerosol orgánico secundario (SOA), el cual se encuentra en proporciones significativas en el material particulado (Carbone et al., 2013; Gramsch et al., 2016; Seinfeld and Pandis, 2016; Tagle et al., 2018). Finalmente, los COV's también son de interés debido a que determinadas especies individuales han resultado ser reconocidas por presentar efectos adversos en la salud humana. El tipo y el grado de efecto en la salud varían en función de cada contaminante. Se emiten a partir de una gran variedad de fuentes emisoras, incluyendo motores de vehículos de combustión interna, fuentes de combustión externa, instalaciones de manufactura química, refinerías, fábricas productos comerciales y domésticos, fuentes biogénicas (naturales), los que son principalmente la vegetación.

1.1 Análisis de emisiones

En el sitio web de Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) está disponible la información de [Emisiones al Aire](#), en formato de planillas de cálculo y de texto. Dispone de recursos de diferentes contaminantes declarados por las empresas/entidades instaladas en territorio nacional. Considerando que este estudio está enfocado en fuentes emisoras de COV's, solo se analizaron los siguientes contaminantes declarados:

- *Compuestos Orgánicos Volátiles (Disponible para fuentes Puntuales, Difusas y Transporte).*
- *Benceno (Disponible solo para fuentes Puntuales).*
- *Tolueno² / metil benceno / Toluol / Fenilmetano (Disponible solo para fuentes Puntuales).*
- *Hidrocarburos Totales (disponible solo para fuentes Transporte).*

De todos estos contaminantes, las que mayor nivel de emisión concentran son las asociadas a "Compuestos Orgánicos Volátiles". Existe información disponible para el período 2005-2018, y

¹ USEPA

² Tiene nombres alternativos de Toluol y Fenilmetano

desagregada por tres categorías: Fuentes Puntuales³, Fuentes Difusas⁴, y Fuentes de Transporte. A continuación, se entrega el esquema de organización de los datos recopilados.

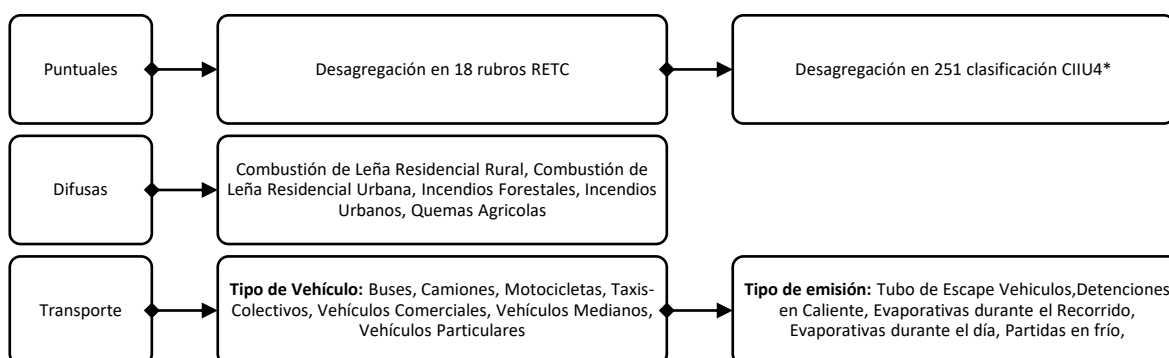


Figura 1: Las emisiones de fuentes puntuales son enviadas al RETC por el Ministerio de Salud por medio del Sistema de Declaración de Emisiones de Fuentes Fijas o Formulario 138 (F138), según lo requerido en el D.S. N° 138/2005 del MINSAL. Esta información se complementa con las emisiones enviadas por la Superintendencia del Medio Ambiente obtenida de los reportes del D.S. N° 13/2011 del MMA y D.S. N° 28/2013 del MMA (norma de emisión para centrales termoeléctricas y fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, respectivamente). En el contexto de las fuentes no puntuales, cada año en el RETC se estiman las emisiones de transporte en ruta para 22 ciudades, con modelo de transporte¹³ y cinco sin modelo de transporte. Además de las emisiones de transporte en ruta, también se estiman las emisiones al aire asociadas a la combustión de leña residencial, incendios forestales, incendios urbanos y quemadas agrícolas. *CIU corresponde a Clasificación Internacional Industrial Uniforme.

La información recopilada se encuentra desagregada para cada región del país, y en algunos casos a nivel de ciudad y comuna. Conforme con esta fuente de información, se encuentra que la categoría “Fuentes difusas” es la que mayor nivel de emisión acumulan, que ha presentado un nivel relativamente estable entre 2,3 a 2,5 millones de ton/año. Los años 2015, 2016 y 2018 presentan niveles significativamente más bajos que la serie total. Después le sigue la categoría “Transporte” con emisiones relativamente estables durante casi todos los años, sin embargo, en los últimos años muestra una disminución de aproximadamente 9 mil ton/año. La categoría “Puntuales” es la que mayor nivel de variabilidad presenta entre los diferentes años, siendo el 2014 y 2015 los que mayor emisión presentaron.

³ Según indica página web, son reportadas al RETC por el Ministerio de Salud a través del Sistema de Declaración de Emisiones de Fuentes Fijas o Formulario 138 (F138) que se sustenta normativamente en el D.S. N° 138/2005 del MINSAL y por el D.S. N° 13/2011 del Ministerio del Medio Ambiente el que establece una norma de emisión para centrales termoeléctricas.

⁴ Según indica página web, a partir de distintos medios de estimación son reportadas al RETC, las emisiones al aire asociadas a la combustión de leña residencial, incendios forestales, incendios urbanos y quemadas agrícolas; como también, las emisiones de transporte en ruta para 22 ciudades, con modelo de transporte y cinco sin modelo de transporte.

Tabla 1: Emisiones totales de COV por año según datos RETC a nivel nacional. Barras de color son proporcionales al valor de emisión por cada categoría.

Año	Emisión (ton/año)		
	Transporte	Puntuales	Difusas
2005	37,801	2,491	2,335,477
2006	46,773	3,304	2,272,147
2007	40,827	3,986	2,327,097
2008	42,382	8,671	2,407,709
2009	40,093	9,347	2,499,991
2010	42,758	10,702	2,471,228
2011	41,498	11,685	2,435,174
2012	38,709	10,409	2,496,391
2013	40,429	7,155	2,428,362
2014	38,654	9,527	1,927,135
2015	34,246	19,339	1,457,645
2016	30,063	24,769	1,408,984
2017	31,795	4,103	2,481,384
2018	24,652	4,018	1,044,666

El hecho que las emisiones de fuentes difusas sean significativamente superiores a otras categorías de fuentes emisoras también ha sido reportado en otros inventarios de emisiones. Por ejemplo, en (SISTAM Ingeniería, 2019) se realizaron inventarios de emisiones para las siguientes regiones

- Libertador Gral. Bernardo O'Higgins
- Maule
- Ñuble
- Biobío
- Araucanía
- Los Ríos
- Los Lagos

encontrándose que las fuentes areales son las que mayor cantidad de COV's emiten por sobre otras categorías principales (fuentes móviles y fuentes fijas), acumulando más del 90% de las emisiones totales.

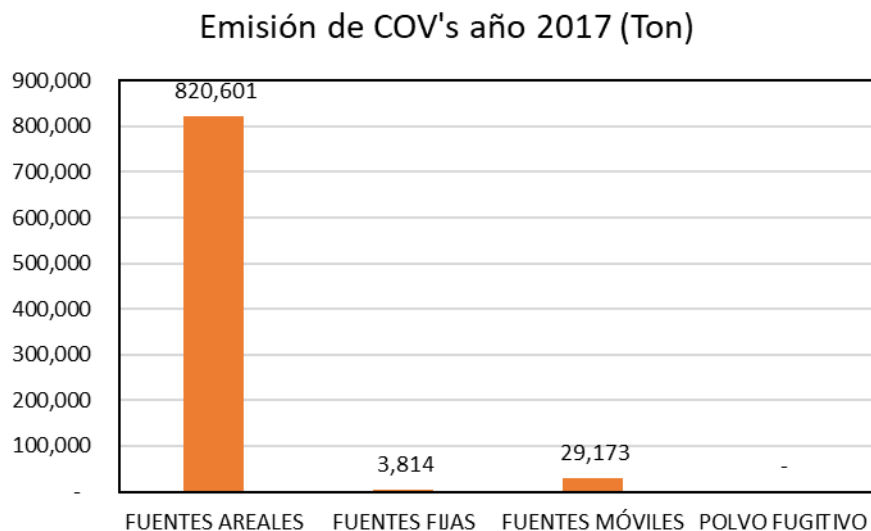


Figura 2: Distribución de las emisiones de COV's según grupo de fuentes (SISTAM Ingeniería, 2019).

1.1.1 Emisiones difusas

RETC indica que las mayores emisiones difusas se encuentran en la región de la Araucanía, Bío-Bío y Los Lagos, y concentran el 60%-70% de las emisiones totales. Se encuentran diferencias respecto de lo presentado por (SISTAM Ingeniería, 2019), en donde la Región de Los Lagos y Los Ríos siguen presentando emisiones mayores, pero con valores significativamente menores a lo reportado por RETC. Cabe mencionar que las emisiones difusas de RETC considera solamente procesos de combustión, mientras que las Fuentes Aerales reportadas por (SISTAM Ingeniería, 2019) incorpora además fuentes Aerales de diferente naturaleza (por ejemplo evaporativas y biogénicas).

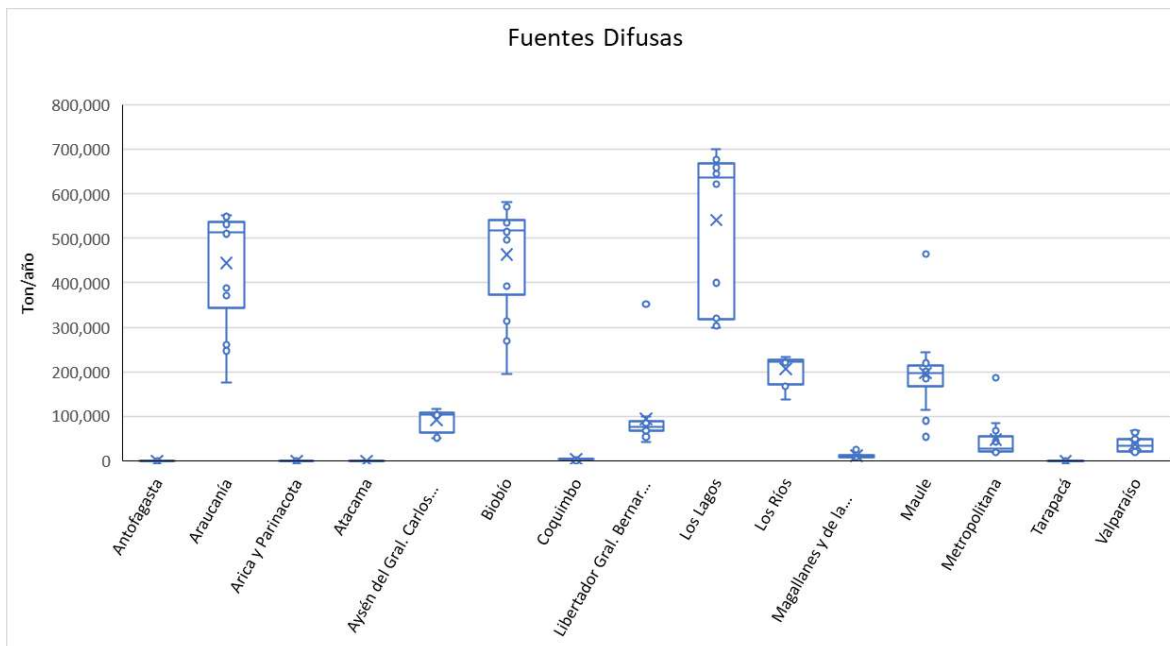


Figura 3: Emisiones totales de COV's por región (Ton/año) para el período 2005-2018, Fuentes Difusas, según datos de RETC.

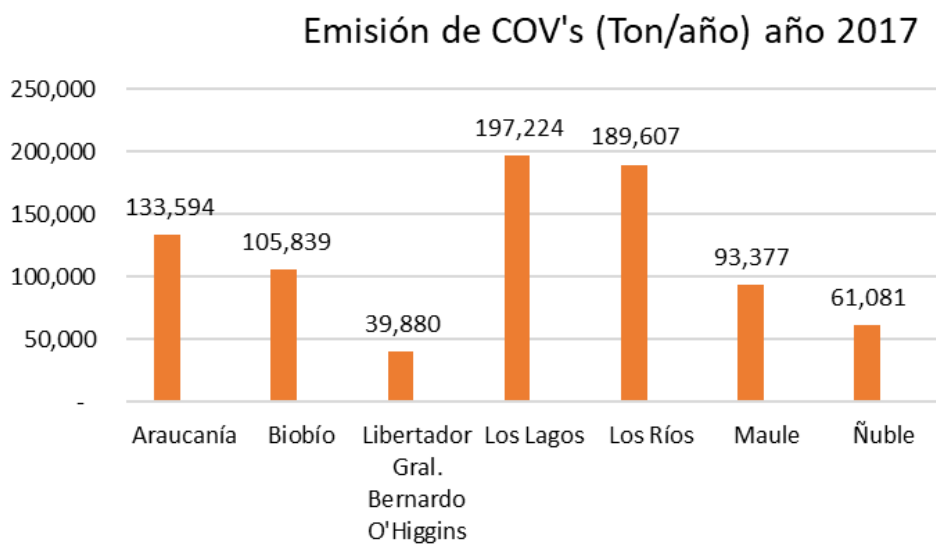


Figura 4: Emisiones totales de COV's por región (Ton/año) para el año 2017, Fuentes areales, (SISTAM Ingeniería, 2019).

Emisiones Difusas de COV's Ton/año (2018)

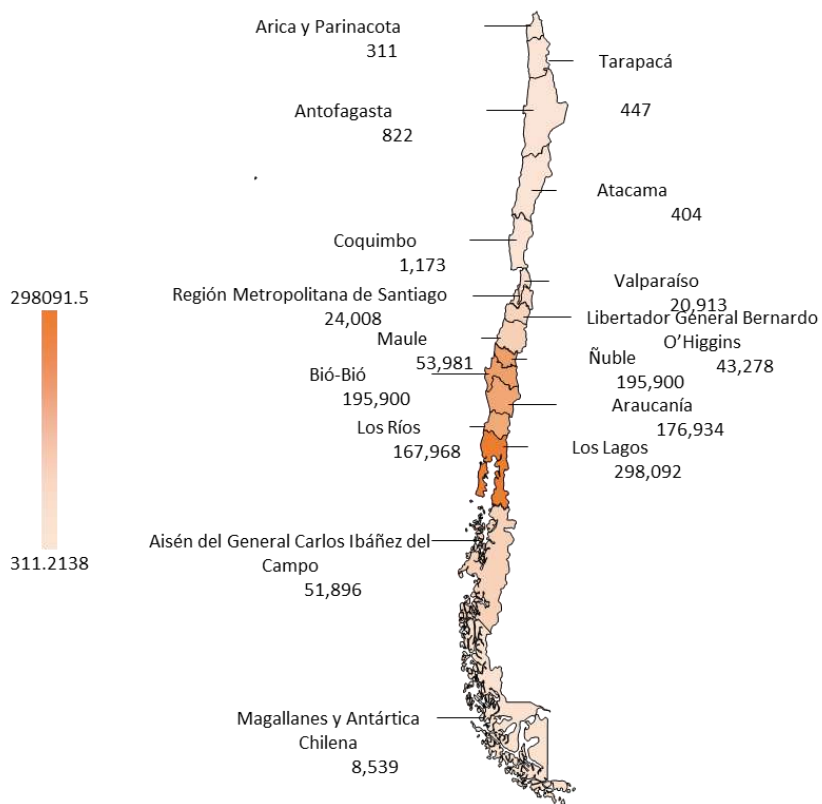


Figura 5: Mapa con emisiones difusas por región año 2018, según datos RETC.

Dentro de las emisiones difusas de RETC, se encuentra que el tipo de fuente que más contribuye son las categorizadas como “Combustión de Leña Residencial Urbana”, “Combustión de Leña Rural” e “Incendios Forestales”, que acumulan más del 99% de las emisiones. Los datos RETC del año 2017 presentan una excepción al comportamiento general del resto de los años, en donde la Región del Maule presentó un incremento significativo de emisiones, ocasionado por una mayor contribución de emisiones provenientes de “incendios forestales”. Las emisiones reportadas por (SISTAM Ingeniería, 2019) son más bajas que las obtenidas a partir de RETC. La Tabla 2 y Tabla 3 entregan el detalle de las fuentes consideradas solo para las regiones Libertador Gral. Bernardo O'Higgins, Maule, Ñuble, Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos; considerando ambas fuentes de información. Aunque en (SISTAM Ingeniería, 2019) no se contabilizan los incendios forestales, igual sigue existiendo una estimación más baja respecto de RETC. Sin embargo, en ambos casos, siguen siendo predominante las emisiones provenientes de la combustión de leña. Excluyendo los incendios forestales, la combustión de leña contribuye con más del 90% de las emisiones totales de COV's atribuibles a fuentes areales o fuentes difusas.

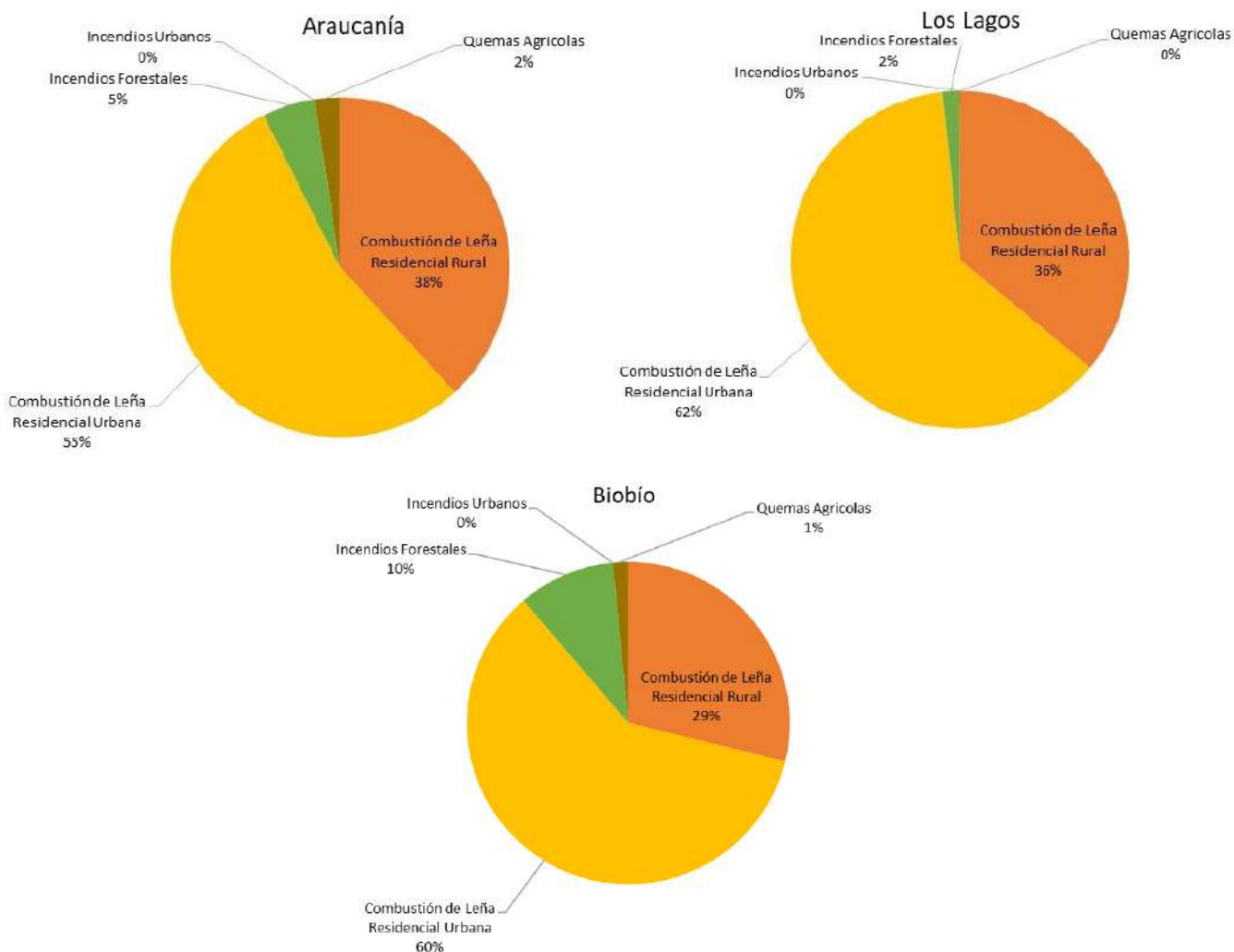


Figura 6: Contribución de emisiones de COV's (en %) de "Emisiones Difusas" en la Región de Los Lagos, Bío-Bío y la Araucanía, período 2005-2018, según datos RETC.

Tabla 2: Emisión de COV's asociada a fuentes de combustión año 2017, solo para las regiones Libertador Gral. Bernardo O'Higgins, Maule, Ñuble, Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, según datos RETC.

FUENTE EMISORA	Emisión (Ton/año)	Contribución (%)
Combustión de Leña Residencial Rural	330.901	15,43%
Combustión de Leña Residencial Urbana	701.232	32,70%
Incendios Forestales	1.050.363	48,98%
Incendios Urbanos	31	0,00%
Quemas Agrícolas	62.161	2,90%
Total	2.144.687	100,00%

Tabla 3: Emisión de COV's asociada a fuentes de combustión año 2017 (SISTAM Ingeniería, 2019).

FUENTE EMISORA	Emisión (Ton/año)	Contribución (%)
Combustión de Gas Licuado	69	0,01%
Incendios forestales		0,00%
Incendios urbanos		0,00%
Combustión de Kerosene	15	0,00%
Combustión de Leña	595.449	99,14%
Quemas agrícolas	5.074	0,84%
Total	600,608	100,00%

Centrando el análisis de datos en los años más recientes (2017-2018) es posible observar que el impacto de los incendios forestales afectó mayormente a las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, y Bío-Bío, y disminuyó significativamente en el año 2018 (Figura 7 - Figura 8).

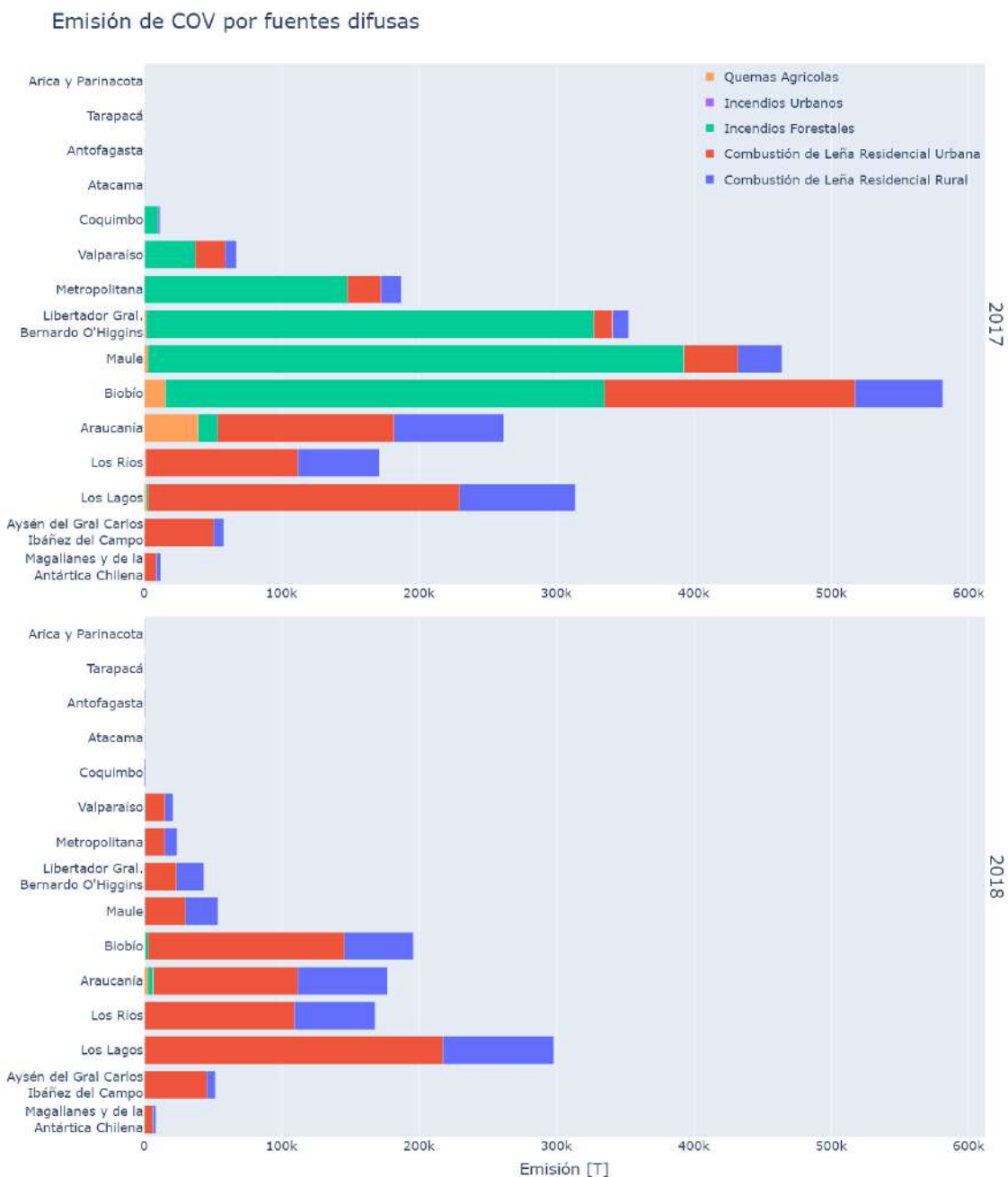


Figura 7: Nivel de emisión de COV's año 2017-2018, fuentes difusas. Datos RETC.

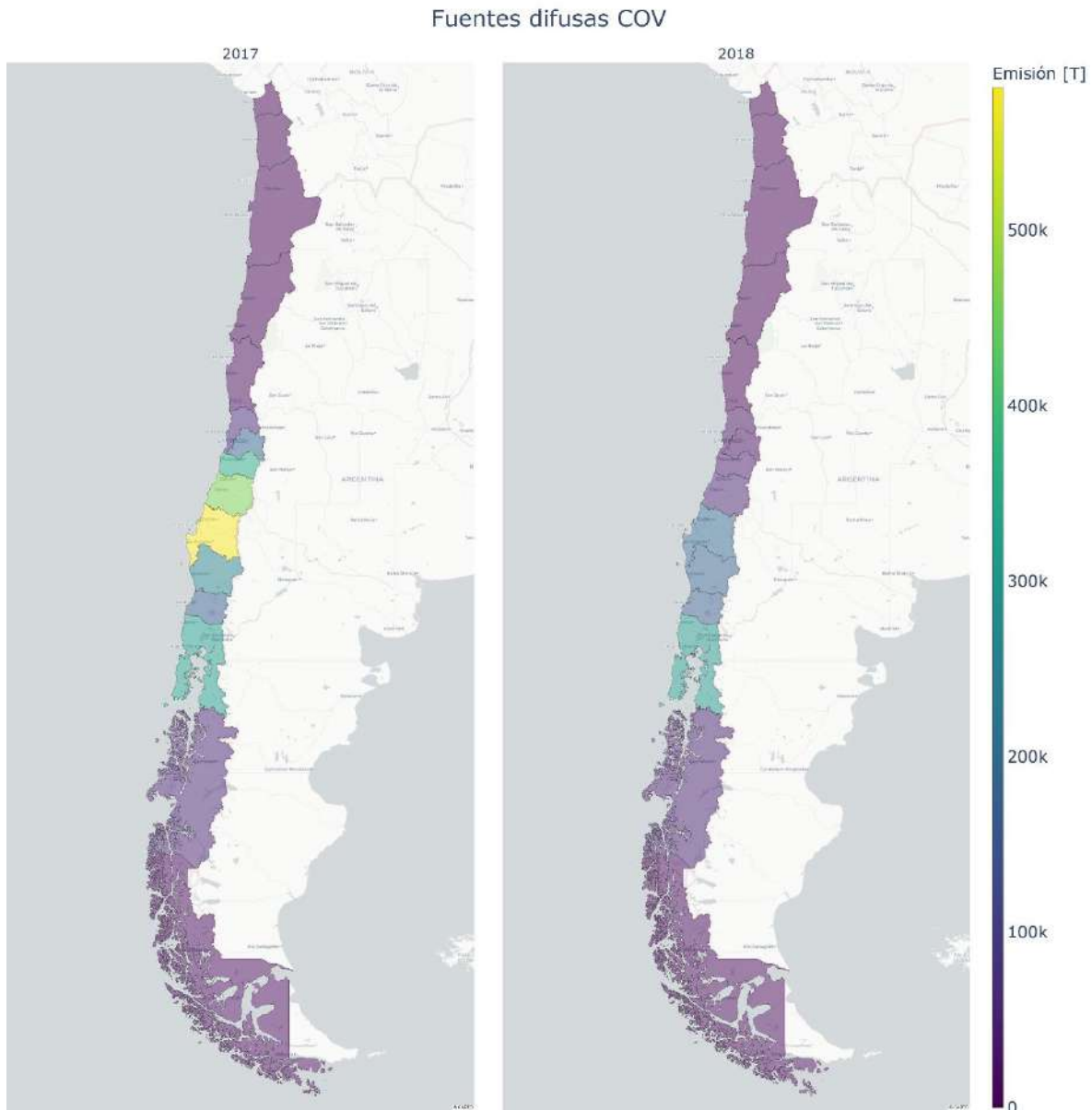


Figura 8: Emisiones difusas de COV's año 2017 y 2018. Datos según RETC.

1.1.2 Emisiones Transporte

Conforme con RETC, el sector Transporte es la segunda categoría de fuentes que más acumula emisiones de COV's. Adicionalmente, este sector también dispone de emisiones de Hidrocarburos Totales (HCT). La comparación de tendencia de emisiones en el período 2005-2018 se entrega en la Tabla 4, mostrando diferencias importantes en la tendencia, especialmente en el caso de HCT. El año 2018, las emisiones HCT mostraron un incremento significativo respecto de los años anteriores.

Tabla 4: Emisiones del sector Transporte según datos RETC.

AÑO	COV (Ton/año)	HCT (Ton/año)	CH4 (Ton/año)
2005	37,801	8,689	1,121
2006	46,773	12,889	1,251
2007	40,827	9,908	1,289
2008	42,382	10,688	1,345
2009	40,093	9,784	1,352
2010	42,758	9,374	1,420
2011	41,498	9,639	1,405
2012	38,709	13,508	1,226
2013	40,429	16,132	1,356
2014	38,654	16,773	1,220
2015	34,246	12,311	933
2016	30,063	11,584	897
2017	31,795	12,318	907
2018	24,652	27,051	2,199

Tanto para COV's como para HCT, se encuentra que las regiones con centros urbanos más grandes son las que mayor nivel de emisiones presentan, esto es la Región Metropolitana y la Región del Bío-Bío. En conjunto ambas concentran entre 51-60% de las emisiones totales nacionales.

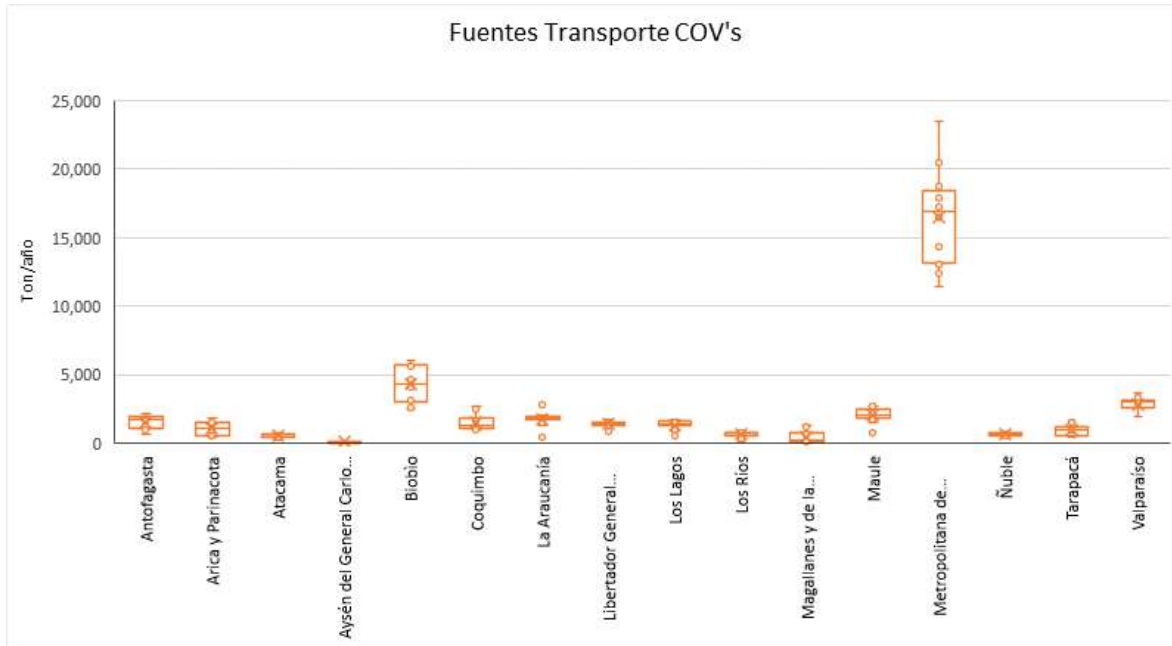


Figura 9: Emisiones totales de COV's por región (Ton/año) para el período 2005-2018, Fuentes Transporte, según datos de RETC.

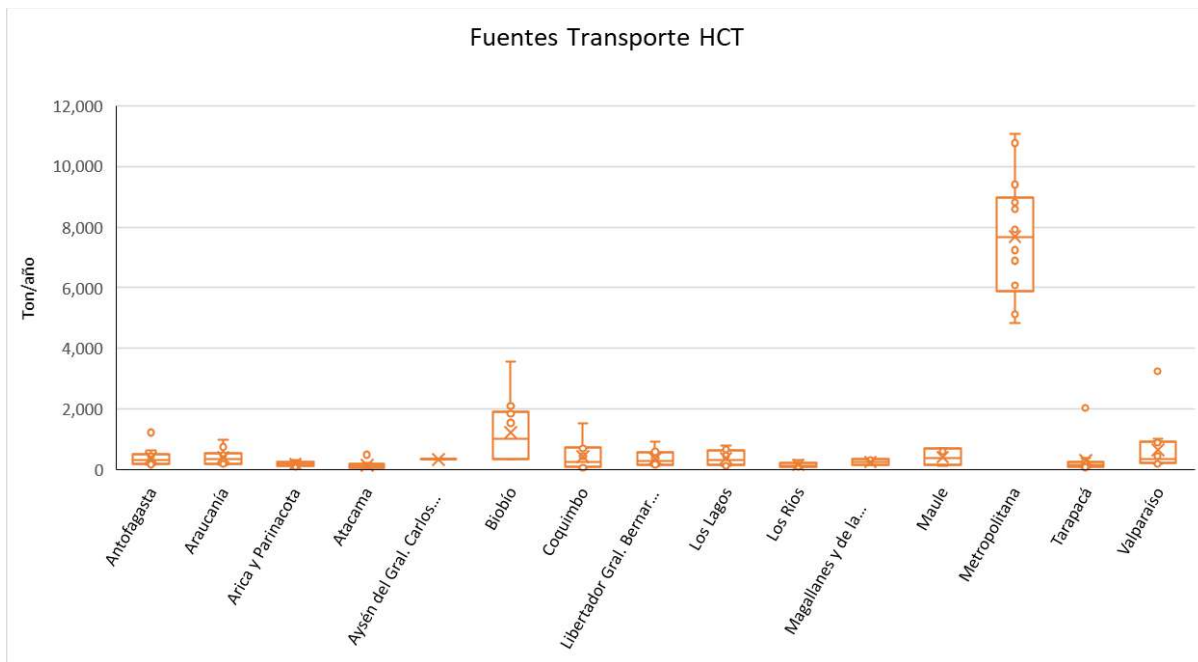


Figura 10: Emisiones totales de HCT por región (Ton/año) para el período 2005-2018, Fuentes Transporte, según datos de RETC.

Emisiones COV transporte en ruta 2018

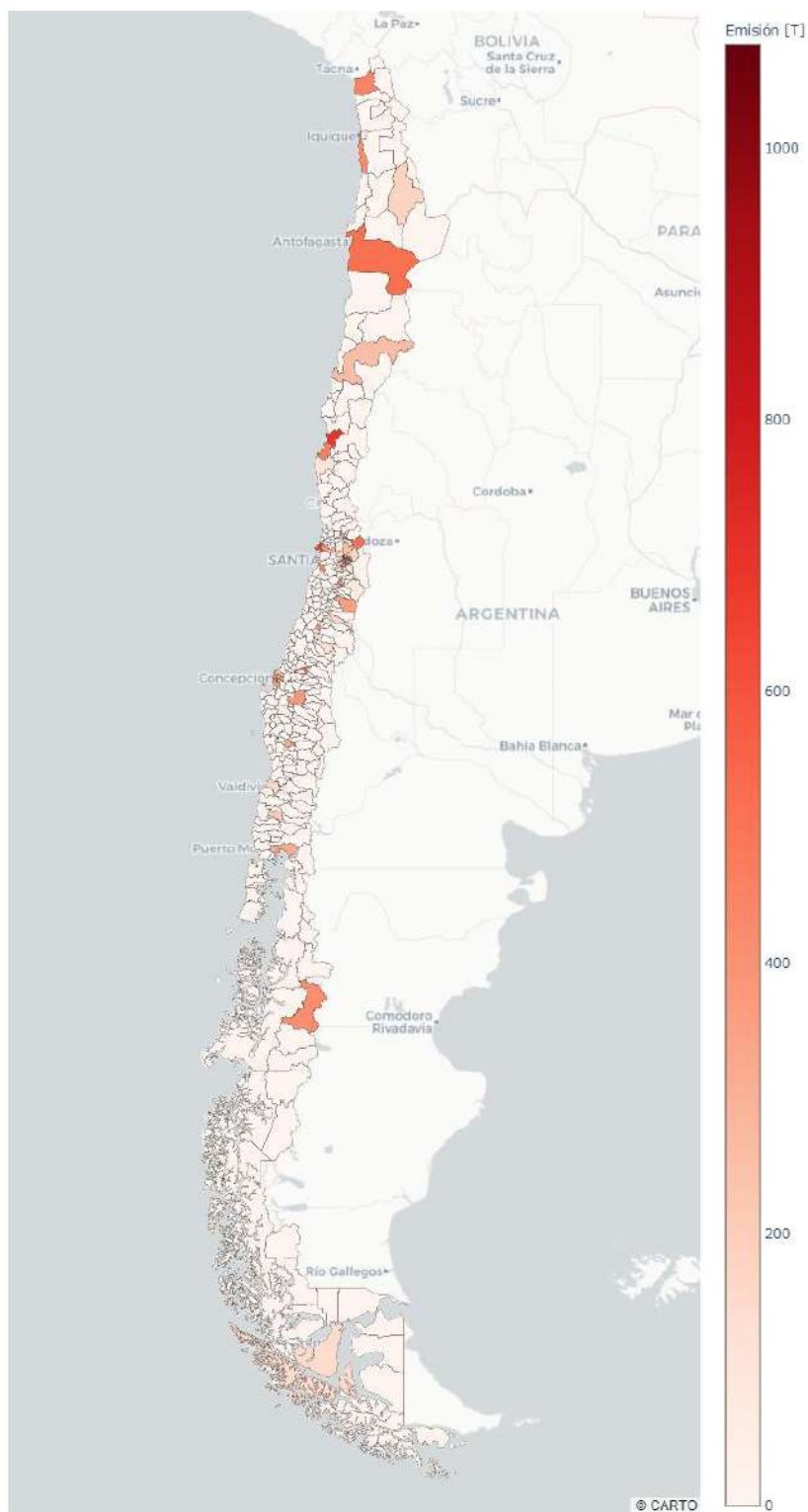


Figura 11: Emisiones de COV's año 2018. Datos RETC.

Universidad de Santiago de Chile
 Departamento de Física, Facultad de Ciencia
 Avda. Ecuador 3493, Santiago, Chile

Comparando los datos COV's de RETC con el inventario de las ciudades del sur, se encuentra que en el año 2018 las regiones VI a IX contabilizan 5.166 Ton/año, el cual es menor al reportado por (SISTAM Ingeniería, 2019), que es de 29.173 Ton/año. El detalle de desagregación por región comparativa se entrega en la Tabla 5.

Tabla 5: Emisiones de COV's por Región según fuente de información, año 2018. En RETC, la Región del Biobío contiene a las comunas de Ñuble, mientras que en SISTAM 2019 se encuentran por separado.

Región	RETC (Transporte) (Ton/año)	SISTAM 2019 (Móviles) (Ton/año)
Araucanía	404	5.809
(Biobío+Ñuble)*	2.458	5.398+2.321
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	875	4.313
Los Lagos	524	3.791
Los Ríos	161	1.883
Maule	744	5.658
Total	5.166	29.173

Los vehículos particulares y vehículos comerciales contribuyen con 84%-88% del total de las emisiones sector Transporte. Están contabilizadas principalmente por las emisiones de tubos de escape y de partidas en frío.

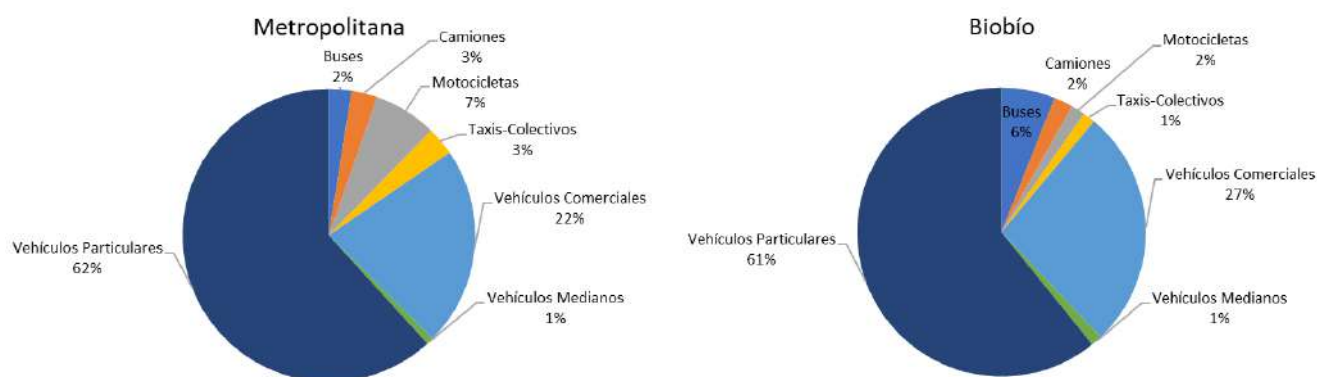


Figura 12: Distribución porcentual de las emisiones de COV's sector Transporte, según datos RETC, período 2005-2017.

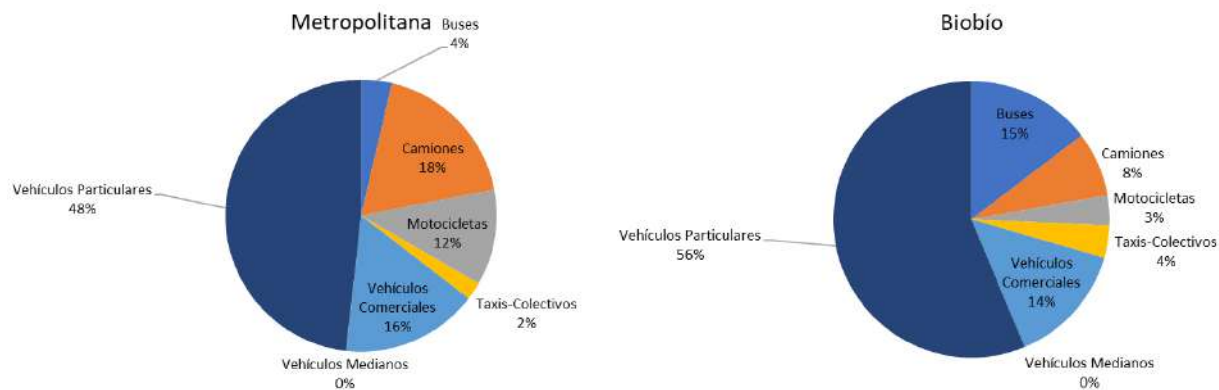


Figura 13: Distribución porcentual de las emisiones de HCT sector Transporte, según datos RETC, período 2005-2017.

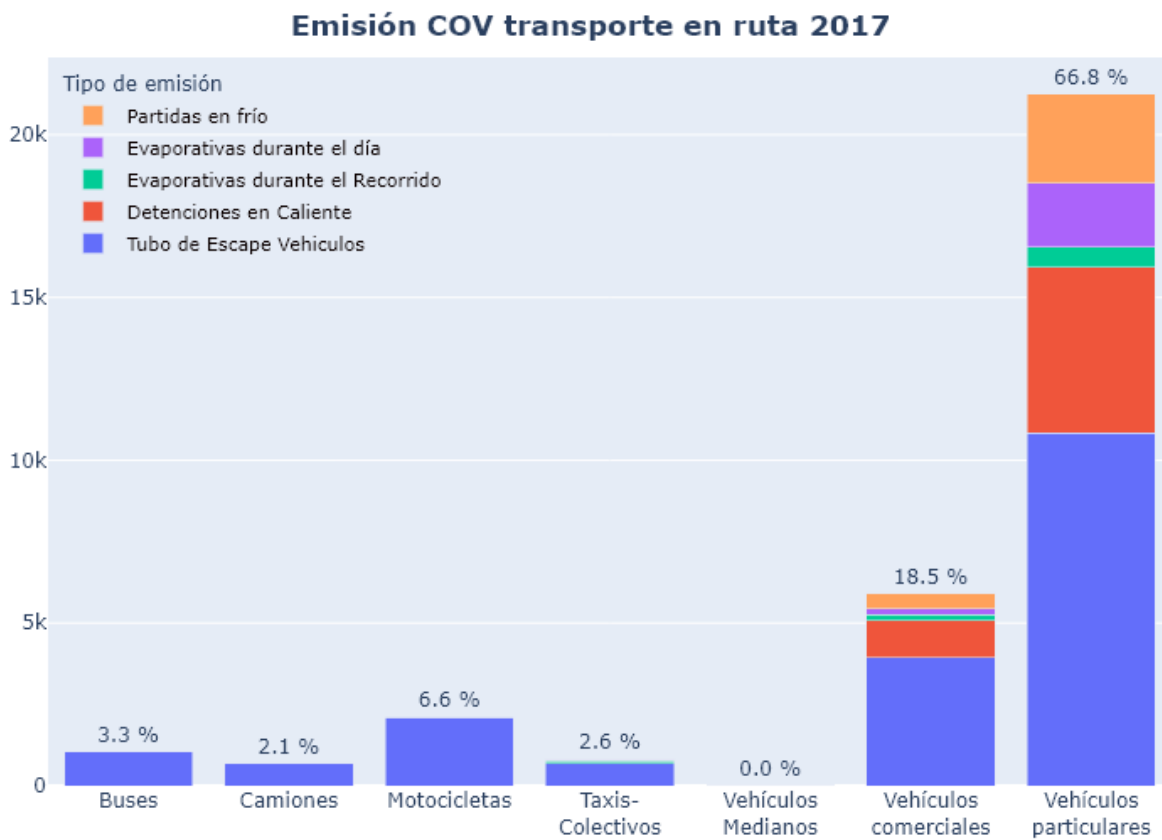


Figura 14: Emisión COV's, por subcategoría, año 2017. Datos RETC.

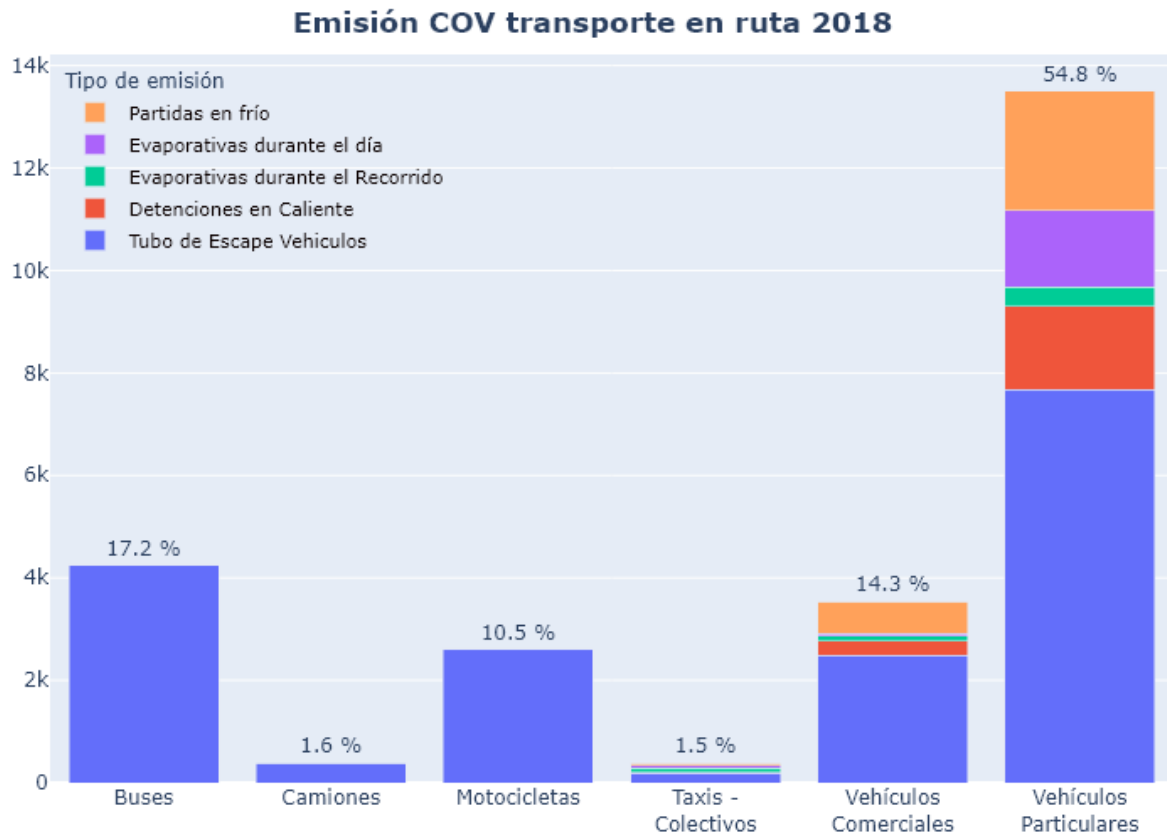


Figura 15: Emisión COV's, por subcategoría, año 2018. Datos RETC.

1.1.3 Emisiones puntuales

Respecto de las emisiones puntuales se encuentra que el Rubro RETC una significativa variabilidad en el período 2005-2018. Especialmente, el año 2015-2016 presentaron años con mayor nivel de emisiones. Existen algunos años con muy altas emisiones, que se escapan significativamente del comportamiento usual, en la Región de Valparaíso (2016, sobre las 14 mil Ton/año), la región del Bío-Bío (2016, casi 4 mil Ton/año), y Antofagasta (2016, casi 2 mil Ton/año). Sin considerar estos años, la Región de Valparaíso es la que acumula mayores emisiones, y le sigue la Región del Bío-Bío, Los Lagos, Maule, Tarapacá y la Araucanía. Cabe mencionar que la categoría Rubro RETC tiene muchos valores sin información y que acumulan una contribución significativa de emisiones en cada una de estas regiones (superior al 30%).

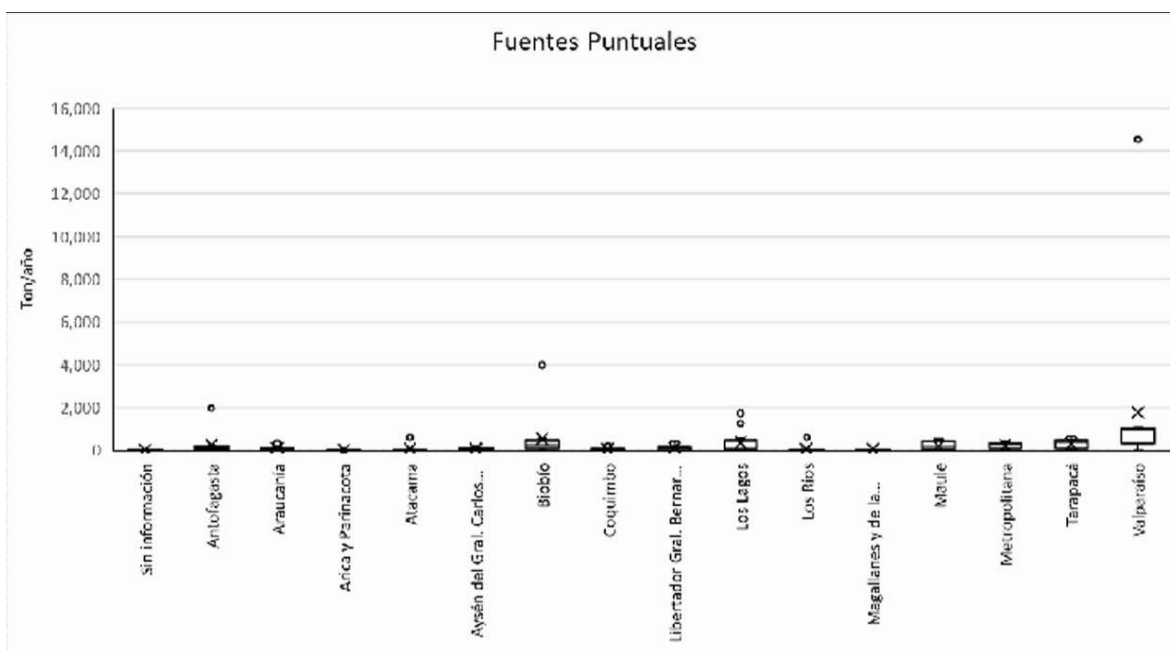


Figura 16: Emisiones totales de COV's por región (Ton/año) para el período 2005-2018, Fuentes Puntuales, según datos de RETC. Imagen GIF que ajusta la escala del eje "y" para ver los puntos con mayores emisiones.

Tabla 6: Emisión agregada fuentes puntuales 2005-2018 (Toneladas), principales regiones con mayores emisiones de COV's. Fuente: RETC (fuentes puntuales)

Rubro RETC	Biobío	Maule	Metropolitana	Tarapacá	Valparaíso
Combustibles	148,2	0,1	221,6	0,1	173,8
Comercio	122,6	18,0	371,0	0,7	163,2
Construcción e inmobiliarias	54,4	5,9	113,2	4,9	32,7
Extracción de minerales	0,3	10,8	65,0	2.145,5	136,7
Generación de energía	1.491,5	651,2	495,5	332,0	21.178,4
Gestor de residuos	43,2	13,2	336,7	0,5	130,5
Industria agropecuaria y silvicultura	2.286,9	215,7	1.037,0		189,7
Industria del papel y celulosa	1.670,3	512,2	297,7		0,0
Industria manufacturera	871,7	245,6	927,3	1,4	3.388,0
Municipio		0,0	2,4		
Otras actividades	534,4	199,4	1.722,8	36,2	167,5
Pesca	182,6	0,6	0,0	131,0	0,4
Producción de alimentos	67,2	134,4	558,9	13,8	138,6
Producción de metal	531,9	0,0	14,0	0,0	8,3
Producción química	22,1		251,5		95,5
Suministro y tratamiento de aguas	2,7	5,5	23,0	4,4	11,8
Transmisión y distribución de energía eléctrica	55,8	0,1	0,7	5,2	0,2
Transporte	1,7		27,8	0,0	149,5
Sin información RETC	2.537,0	1.990,5	2.729,4	3.947,4	8.436,1
Total	10.624,5	4.003,1	9.195,6	6.623,2	34.401,0

Centrando el análisis en los dos años más recientes (2017-2018), se observa que a nivel nacional un número reducido de establecimientos emiten la gran parte del total de emisiones (80%) incluidas en el sistema RETC, tanto para benceno, tolueno y COV. Se observa que el 80% de las emisiones totales anuales las emiten aproximadamente un 1,3%, 0,33% y 0,61% de los establecimientos para COV, benceno y tolueno, respectivamente.

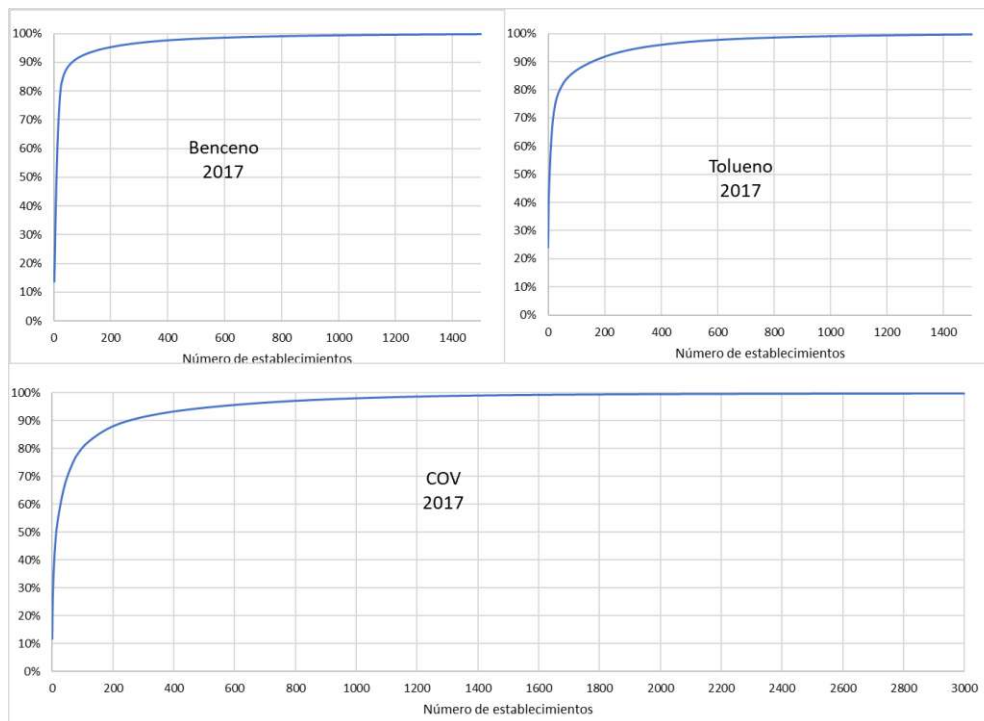


Figura 17. Emisión Porcentual Agregada 2017 (en los 3 gráficos se han excluido miles de establecimientos con las menores emisiones para observar mejor la curva)

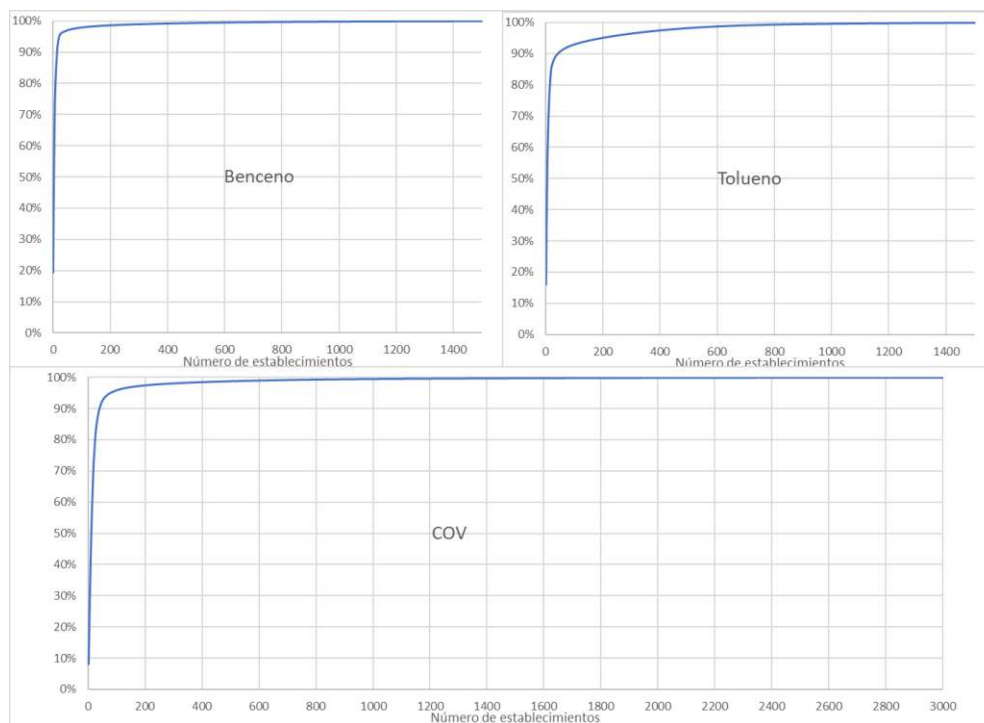


Figura 18. Emisión Porcentual Agregada 2018 (en los 3 gráficos se han excluido miles de establecimientos con las menores emisiones para observar mejor la curva)

Las siguientes tablas muestran el total de emisiones anuales por fuentes puntuales de benceno, tolueno, y COV's, el número de establecimientos que las emitieron, y luego, el número de establecimientos que, al ordenar descendientemente sus emisiones, suman de forma acumulativa sobre el 80% del total anual respectivo, es decir, el número de establecimientos que en los gráficos anteriores generan las curvas bajo el 80% de las emisiones.

Tabla 7. Número de establecimientos y Emisiones año 2017. Fuente: RETC (fuentes puntuales)

Contaminante	Total, Emisiones (toneladas)	Número de establecimientos	Núm. establecimientos que suman 80% de emisiones
Benceno	90,32	7.082	23
Tolueno	33,44	7.083	43
COV	4103,33	7.576	98

Tabla 8. Número de establecimientos y Emisiones año 2018: Fuente: RETC (fuentes puntuales)

Contaminante	Total, Emisiones (toneladas)	Número de establecimientos	Núm. establecimientos que suman 80% de emisiones
Benceno	296,83	7.036	9
Tolueno	81,85	7.036	15
COV	4018,47	7.412	75

Al considerar los establecimientos con las mayores emisiones, se observa que éstos se ubican a lo largo del país de tal manera que afectan mayormente a ciertas regiones. Entre ellas destaca la región del Biobío, donde se encuentran emisiones importantes de los tres contaminantes. Solo en el caso de las emisiones de COV durante 2017, destacan junto a la región del Biobío, las emisiones de las regiones de Antofagasta, Valparaíso y Magallanes. El detalle de la distribución de estos establecimientos y la suma de sus emisiones a nivel regional se puede ver a continuación.

Tabla 9. Distribución por región del 80% de emisiones Año 2017. Fuente: RETC (fuentes puntuales)

	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV
	Emisión (toneladas)			% del total de emisiones			Número de establecimientos			Número de fuentes		
Total	72,7	26,8	3285,6	80,5	80,2	80,1	23	43	98	133	469	1651
Arica y Parinacota												
Tarapacá			57,8			1,4			5			151
Antofagasta	1,5	0,8	538,8	1,6	2,4	13,1	1	5	14	8	174	469
Atacama			33,9			0,8			5			47
Coquimbo			14,4			0,4			1			59
Valparaíso	5,5	3,2	745,5	6,1	9,5	18,2	2	3	13	11	29	160
Metropolitana	4,7	0,7	131,0	5,2	2,2	3,2	1	6	6	1	56	183
Libertador Gral.	2,8	1,3	60,4	3,1	3,9	1,5	1	4	6	2	51	51

	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV
	Emisión (toneladas)			% del total de emisiones			Número de establecimientos			Número de fuentes		
Bernardo O'Higgins												
Maule	10,9	2,3	153,0	12,1	6,8	3,7	5	5	8	16	30	110
Biobío	41,0	16,4	552,1	45,4	49,0	13,5	10	14	18	76	99	148
Araucanía	1,3	0,3	74,7	1,4	0,9	1,8	1	1	2	6	6	22
Los Ríos	5,0	1,1	25,0	5,6	3,4	0,6	2	2	1	13	13	11
Los Lagos		0,1	64,6		0,2	1,6		1	5		5	99
Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo			56,5			1,4			4			38
Magallanes y de la Antártica Chilena		0,6	777,8		1,8	19,0		2	10		6	103

Tabla 10. Distribución por región del 80% de emisiones Año 2018. RETC (fuentes puntuales)

	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV
	Emisión (toneladas)			% del total de emisiones			Número de establecimientos			Número de fuentes		
Total	238,3	66,2	3220,5	80,3	80,9	80,1	9	15	75	111	141	1134
Arica y Parinacota												
Tarapacá			24,8			0,6			2			84
Antofagasta			202,5			5,0			10			381
Atacama			58,5			1,5			4			50
Coquimbo			7,8			0,2			1			59
Valparaíso	24,6	3,1	172,4	8,3	3,8	4,3	1	2	4	19	19	54
Metropolitana			400,3			10,0			6			72
Libertador Gral, Bernardo O'Higgins		1,8	64,3		2,1	1,6		1	5		1	42
Maule	10,3	5,4	171,1	3,5	6,6	4,3	1	2	5	7	13	62
Biobío	146,5	42,1	1211,0	49,4	51,5	30,1	4	7	17	46	69	148
Araucanía	33,2	8,8	172,6	11,2	10,8	4,3	2	2	3	13	13	22
Los Ríos	23,8	5,0	159,8	8,0	6,1	4,0	1	1	2	26	26	33
Los Lagos			32,2			0,8			3			18
Aysén del Gral, Carlos Ibáñez del Campo			58,4			1,5			3			21
Magallanes y de la Antártica Chilena			485,0			12,1			10			88

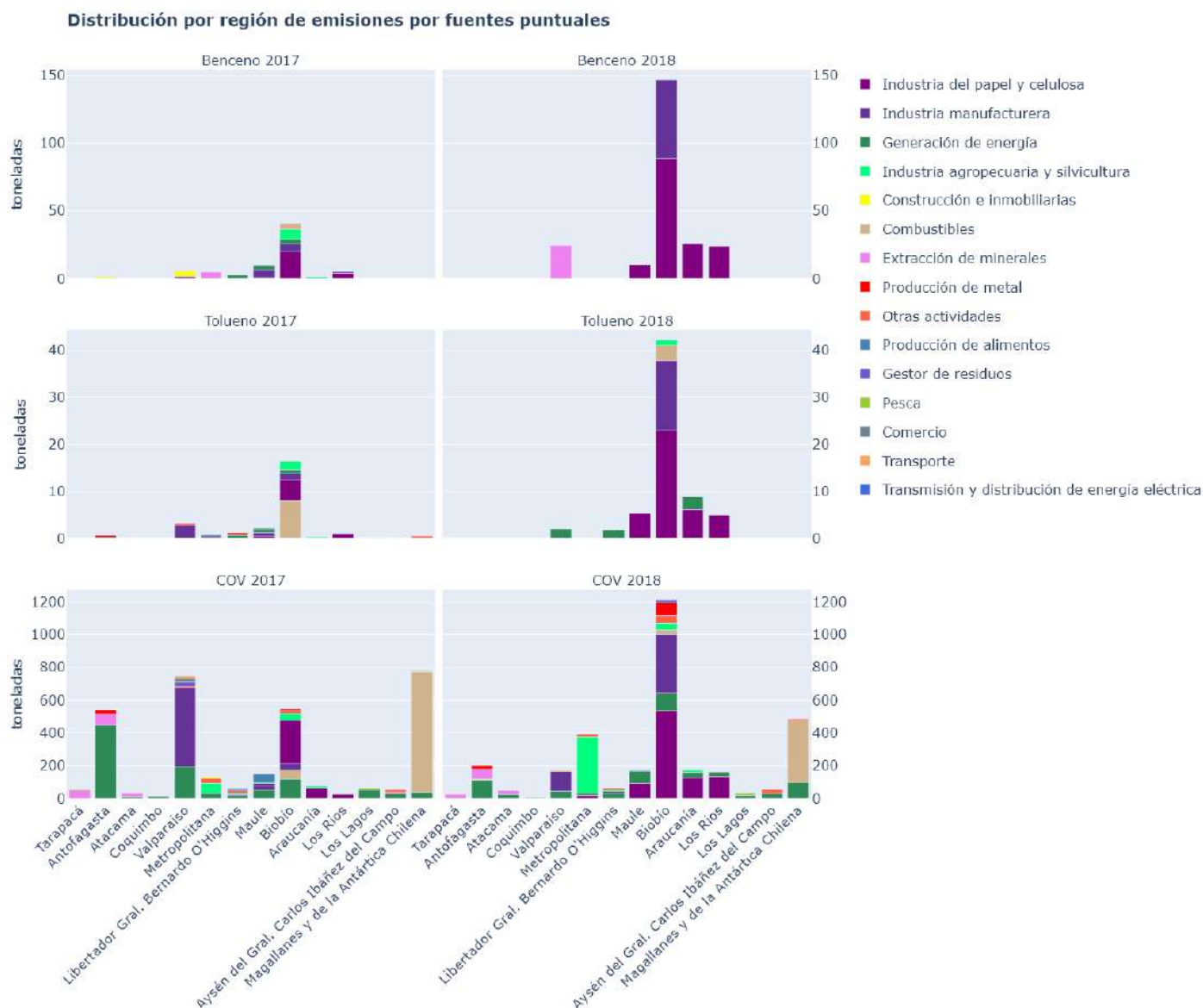


Figura 19: Distribución por región de emisiones por fuentes puntuales año 2017 y 2018.

Al clasificar las emisiones por rubro destaca en primer lugar una mayor contribución a las emisiones la industria del papel y la celulosa. La emisión de benceno, tolueno y COV acumuló un 28,7%, 18% y 9%, respectivamente para 2017, y un 50,1%, 48,2% y 22,6% en el año 2018, Cabe mencionar que en 2017 fueron predominantes los rubros de combustibles en la emisión de tolueno (24%) y COV (19,2%), el rubro de generación de energía en la emisión de COV (24,6%) y el rubro de industria manufacturera en la emisión de COV (13,6%),

Considerando que son 18 los rubros clasificados, cabe destacar también que son solo estos cuatro rubros mencionados anteriormente (combustibles, generación de energía, industria del papel y celulosa e industria manufacturera) los que mantienen durante ambos años emisiones de alguno de

los contaminantes sobre el 10% del total, barrera superada únicamente por la industria agropecuaria y silvicultura durante el 2018 en la emisión de COV (10.1%).

El detalle del número de los establecimientos considerados y sus emisiones, agrupados según su rubro, se encuentran en las **Tabla 11** para el año 2017 y en la **Tabla 12** para el 2018, en cuyas filas se muestran únicamente los rubros correspondientes a los establecimientos considerados.

Tabla 11. Distribución por rubro del 80% de emisiones año 2017. Fuente: RETC (fuentes puntuales)

	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV
	Emisión (toneladas/año)			% del total de emisiones			Número de establecimientos			Número de fuentes		
Total	72,7	26,8	3285,6	80,5	80,2	80,1	23	43	98	133	469	1651
Combustibles	5,0	8,0	789,3	5,5	24,0	19,2	1	1	7	10	10	88
Construcción e inmobiliarias	5,2		10,7	5,8		0,3	2		1	9		23
Extracción de minerales	4,7	0,2	152,9	5,2	0,5	3,7	1	1	13	1	61	511
Generación de energía	9,3	2,6	1008,6	10,3	7,8	24,6	3	7	34	8	27	354
Industria agropecuaria y silvicultura	8,6	2,0	130,0	9,5	5,9	3,2	3	4	6	17	22	49
Industria del papel y celulosa	25,9	6,0	368,1	28,7	18,0	9,0	6	8	10	54	63	110
Industria manufacturera	14,0	5,4	559,9	15,5	16,2	13,6	7	8	8	34	47	131
Otras actividades		0,8	81,6		2,4	2,0		4	6		38	178
Producción de alimentos		0,7	60,3		2,1	1,5		6	2		59	23
Producción de metal		1,1	37,0		3,3	0,9		4	2		142	121
Comercio			20,7			0,5			3			4
Gestor de residuos			26,5			0,6			1			4
Pesca			20,7			0,5			3			30
Transmisión y distribución de energía eléctrica			7,2			0,2			1			2
Transporte			11,9			0,3			1			23

Tabla 12. Distribución por rubro del 80% de emisiones 2018. Fuente: RETC (fuentes puntuales)

	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV	Benceno	Tolueno	COV
	Emisión (toneladas/año)			% del total de emisiones			Número de establecimientos			Número de fuentes		
Total	238,3	66,2	3210,1	80,3	80,9	79,9	9	15	74	111	141	1126
Extracción de minerales	24,6		105,3	8,3		2,6	1		8	19		402
Generación de energía	7,5	6,4	632,8	2,5	7,8	15,7	1	3	26	2	12	220
Industria del papel y celulosa	148,8	39,4	909,0	50,1	48,2	22,6	6	7	9	80	86	114
Industria manufacturera	57,5	16,1	483,7	19,4	19,6	12,0	1	3	5	10	28	40
Combustibles		3,2	413,5		3,9	10,3		1	8		10	75
Industria agropecuaria y silvicultura		1,1	404,2		1,4	10,1		1	5		5	44
Gestor de residuos			17,8			0,4			1			3
Otras actividades			115,1			2,9			7			79
Pesca			12,7			0,3			1			11
Producción de alimentos			7,6			0,2			1			14
Producción de metal			99,2			2,5			2			101
Transporte			9,1			0,2			1			23

Establecimientos de mayor emisión que superan el 80% nacional de fuentes puntuales 2017

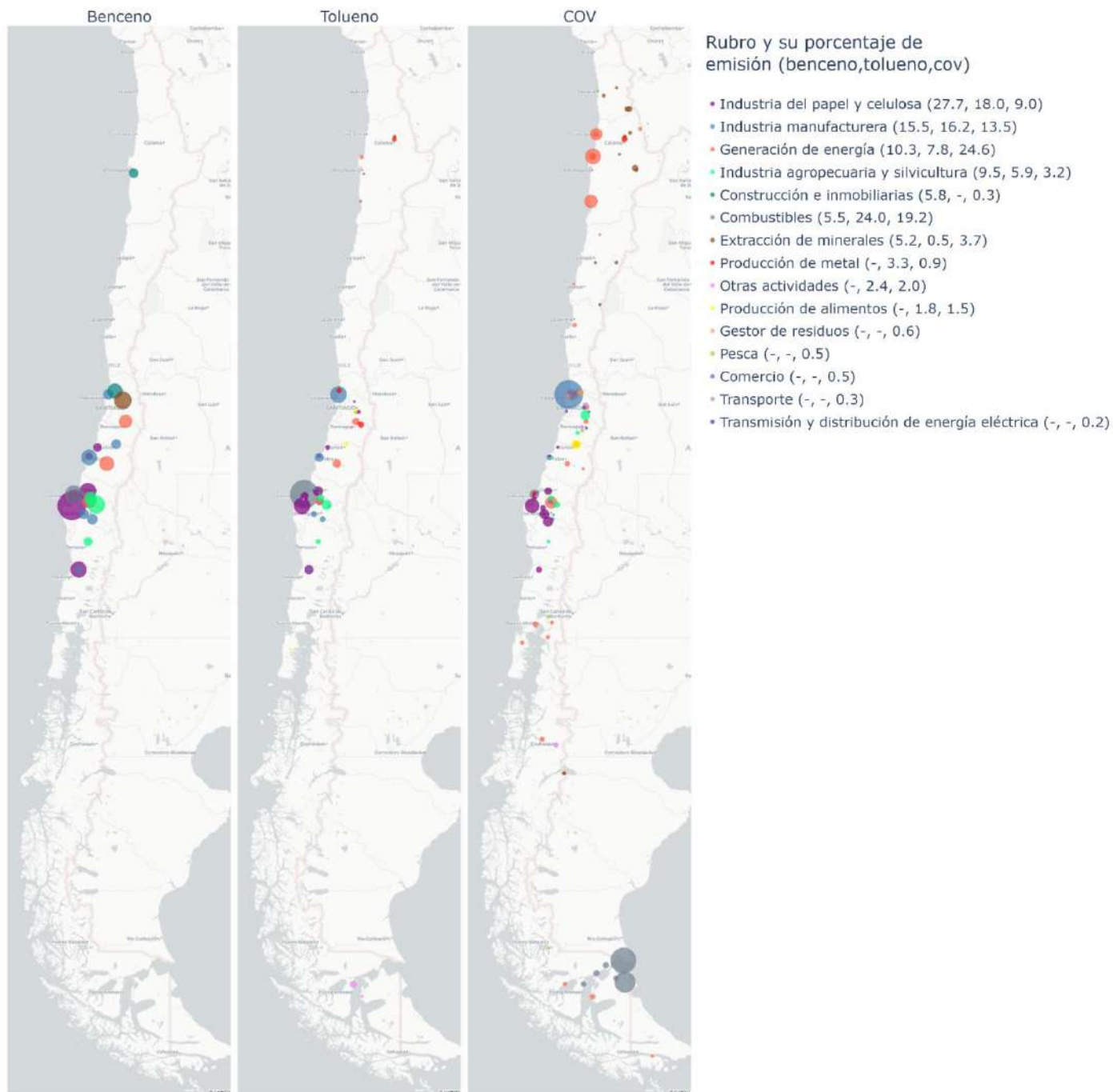


Figura 20: Establecimientos de mayor emisión que concentran el 80% de las emisiones puntuales año 2017.

Establecimientos de mayor emisión que superan el 80% nacional de fuentes puntuales 2018

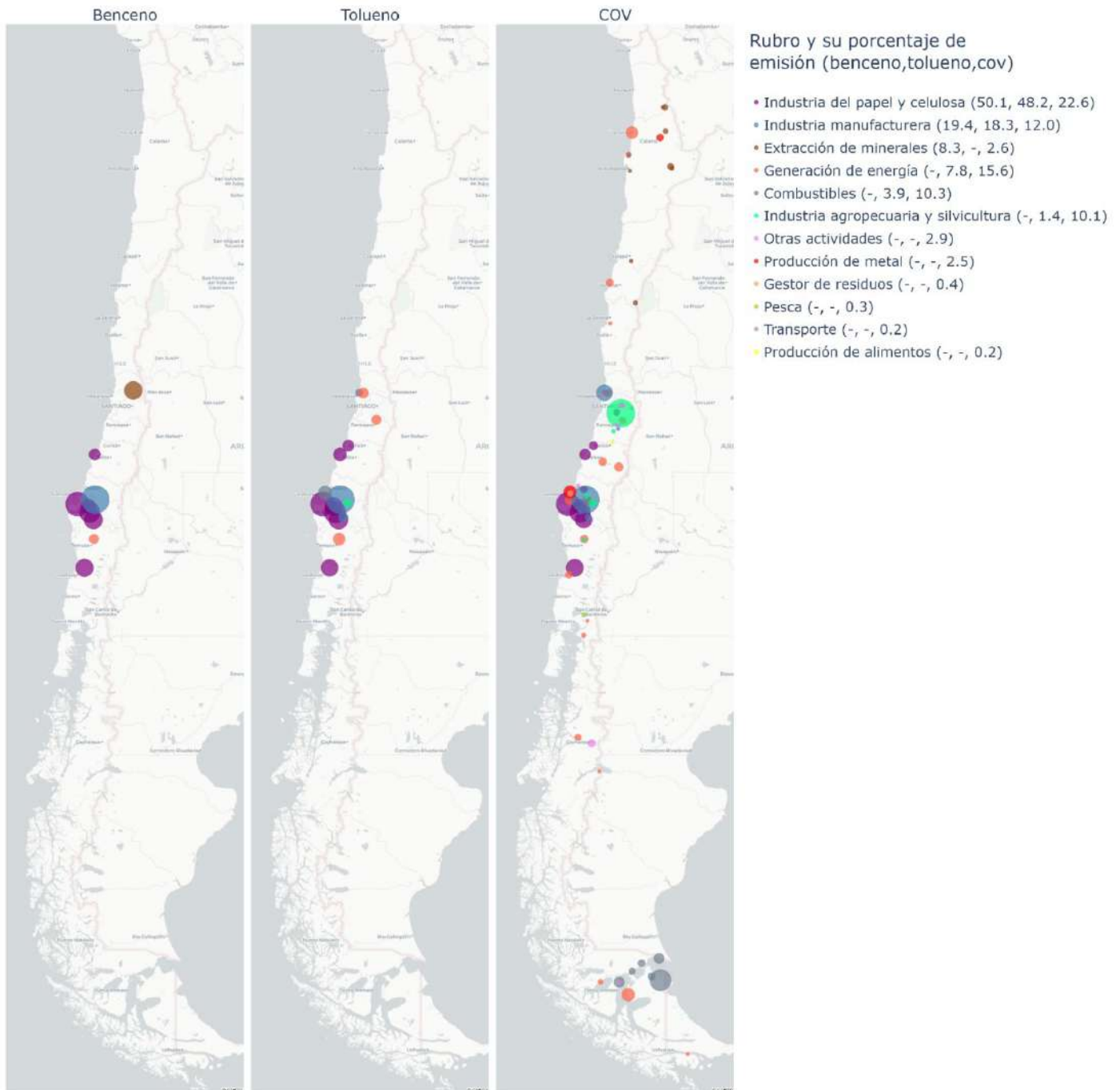


Figura 21 : Establecimientos de mayor emisión que concentran el 80% de las emisiones puntuales año 2018.

Declaraciones de emisiones realizadas por industrias en el marco del PDA PQC

El PDA PQC señala que los establecimientos que contemplen instalaciones de almacenamiento, carga, descarga y transferencia de hidrocarburos y sus derivados, en volúmenes totales, iguales o superiores a 50 toneladas o 75 m³ al año, y que por la naturaleza de sus procesos emitan compuestos orgánicos volátiles (COVs) deberán declarar anualmente, antes del 1° de mayo de cada año, las emisiones COV's correspondientes al año anterior, mediante el D.S. N°138/2005, o el que lo reemplace. También existen fuentes emisoras que deben declarar emisiones de Benceno, Tolueno, Etil Benceno y Xileno (BTEX) de forma individualizada.

Para cumplir con este requerimiento, la autoridad sanitaria dispuso un ordinario N°1267 a las fuentes emisoras aludidas, que contiene el detalle de cómo realizar. La contraparte técnica del estudio facilitó las declaraciones de emisiones realizadas por las distintas empresas del sector durante el año 2019, las cuales corresponden a:

- AES GENER
- BASF Chile S.A.
- COPEC (instalaciones en Quintero y Concón)
- ENAP (Quintero y Concón)
- Linde
- PESQUERA QUINTERO S.A
- GNL Quintero
- Lipigas
- Oxiquim
- Puerto Ventanas
- STYOPEK
- Abastible
- Gasmar
- ENEX

Conforme con la información revisada, no todas las empresas declararon el detalle de los COVs (BTEX), sin embargo, todas reportaron emisión de COV's (a excepción de la empresa STYOPEK que realiza declaraciones solo de Estireno y Pentano). La metodología de estimaciones de emisiones es variada, entre las que se incluyen: Balance de Masa, mediciones en terreno (CEMS o similar), Factor de Emisión EPA, Métodos Estadísticos, Software Tanks⁵ (USEPA)⁶.

⁵ <https://www3.epa.gov/ttn/chief/software/tanks/index.html>

⁶ Cabe mencionar que la USEPA dejó de dar soporte al software Tanks USEPA desde el año 2006. Aunque está disponible su descarga, se deja en manifiesto que las empresas pueden seguir utilizándolo a su propio criterio y riesgo. TANKS 4.09 finalmente se vio sobrepasado porque no se podía seguir actualizando según la incorporación de diferentes tecnologías de los tipos de tanques y procesos de tanques, lo que subraya la complejidad de los cálculos de emisiones de tanques para el negocio promedio. Recomienda seguir utilizando los factores AP-42.

En total todas las empresas contabilizan 1089,9 Ton/año de emisiones de COV's al año 2019. Este valor es significativamente superior al que se obtiene para las fuentes puntuales del sistema RETC para el año 2018, el cual, para el caso de las comunas de Puchuncaví, Quintero y Concón considera una emisión total de 146,5 ton/año. Esta diferencia ha sido alertada por las mismas empresas⁷. El inventario de emisiones año base 2008⁸ muestra que las fuentes puntuales de toda la V región tienen una emisión acumulada de COV's de 1342,85 Ton/año, señalando que la producción y el almacenamiento de combustible es la categoría con mayor aporte de emisiones, especialmente atribuible a la refinería de Petróleo de Concón. En específico las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví aportaron con el 90% de las emisiones industriales de la V Región (1208 Ton/año). Esta estimación del año 2008 está mucho más cerca del valor que se obtiene por las declaraciones del año 2019, por lo que es posible señalar que la información del sistema RETC está significativamente subdimensionado.

Al analizar comparativamente las emisiones reportadas por las diferentes empresas se encuentra que la refinería Aconcagua (ENAP Concón) es la que mayores emisiones de COV's reportó, concentrando un 70% de las emisiones totales.

La estimación de emisiones proveniente de los Estanques de almacenamiento es la mayor fuente de COV's, aportando con 617 ton/año (más del 50% de las emisiones de COV's). En ENAP (tanto instalaciones de Concón como de Quintero), las emisiones provenientes de los Estanques de almacenamiento y de las Antorchas (en la refinería) corresponden a más del 88% de las emisiones de la empresa.

Tabla 13: Emisiones declaradas año 2019. Según la información entregada por la contraparte técnica, la empresa Styropek realiza declaraciones de emisiones de estireno (0.78 ton/año) y pentano (2.27 ton/año). Fuente: Declaración de empresas según requerimiento PDA PQC.

Empresa	Emisión (Ton/año)				
	Benceno	Etil Benceno	Tolueno	Xileno	COVs
Abastible	S/I	S/I	S/I	S/I	19,0
BASF Chile S.A.	0,0	S/I	S/I	S/I	8,7
COPEC Panta de Combustibles Concón	0,1	0,1	0,3	0,2	17,0
COPEC Panta de Lubricantes Quintero (PLUB)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
COPEC Terminal de Productos Importados Quintero	0,1	0,1	0,5	0,5	19,1
ENAP Concón	3,3	0,4	4,4	2,6	761,6
ENAP Quintero	0,4	0,1	0,7	0,4	85,5

⁷ Carta enviada por ERSA al subsecretario del Medio Ambiente, 30 abril del 2020 asociado a reporte de fallas de la Nueva Ventanilla Única RETC.

⁸ <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/InformeFinalEstudioDiagnosticoAtmosfericoValpo.pdf>

Empresa	Emisión (Ton/año)				
	Benceno	Etil Benceno	Tolueno	Xileno	COVs
ENEX	0,0	0,0	0,1	0,0	16,0
Gasmar	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9
GENER	S/I	S/I	S/I	S/I	1,0
GNL Quintero	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Linde	0,0	S/I	0,0	S/I	1,1
Lipigas	S/I	S/I	S/I	S/I	154,8
Oxiquim	S/I	S/I	S/I	S/I	0,1
PESQUERA QUINTERO S.A	0,0	S/I	0,0	0,0	0,3
Puerto Ventanas	0,0000225	0,0000267	0,0000435	0,00004	S/I
STYOPEK*	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Total Empresas	3,9	0,7	6,0	3,7	1090,0

Interesantemente, la segunda instalación que más emisión de COV's reportó es la de Lipigas (14% de las emisiones totales). Conforme con la información que la empresa señala en su REPORTE f-138 (Archivo Excel), se encuentra que sus fuentes se encuentran instaladas en la comuna de Concón donde la principal fuente emisora corresponde a la "Isla de Carga" (143.8 Ton/año), donde los camiones Tanque y Graneleros son surtidos por Gas Licuado de Petróleo.

Tabla 14: Emisiones de COVs declaradas por empresa Lipigas, año 2019, acorde con formulario 138.

N° de Registro	Uso	Emisión COV's (Ton/año)
PS005246M01-9	Planta de tratamiento Aguas Servidas	0
PS005250M01-7	Planta de tratamiento RILes	0
PS005249M01-3	Mantenimiento mayores y limpieza de estanques de almacenamiento	0,00023
PS005275M01-2	Laboratorio de calidad GLP en cilindros	1,74
PS005276M01-0	Carga de GLP camiones (Isla de carga)	143,81
PS005316M01-3	Almacenamiento GLP en estaques presurizados	0
PS005317M01-1	Muestreo diario de Materia Prima	0,156
PS005318M01-K	Envasado de GLP cilindros	9,08006
PS005319M01-8	Carga de Materias Primas	0
Total		154,8

2 ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AIRE

2.1 Niveles de benceno en Chile

En general las áreas urbanas tienden a mostrar concentraciones más altas que otro tipo de áreas. Se han utilizado mediciones simples de monitoreo

- -Tubo absorbentes pasivos
- -Cánisters de acero, analizados tras etapa de pre-concentración, en una unidad de enfoque criogénico Medusa acoplada a GC-MS en modo SIM.
- -Desorción térmica
- -Cromatografía de gases capilar

A continuación, se entregan un detalle de la información de concentración de Benceno disponible.

- **Región Metropolitana**

Se recopilaron datos de benceno medidos en Chile de las Campañas 2009 y 2010 realizadas por el Centro Mario Molina (CMM), el Instituto Noruego de Investigación del Aire (NILU) y el Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA). Los datos recopilados son principalmente de las Provincias de Santiago, Concepción y algunas comunas de la región de Valparaíso. En la Figura 22 se observan los niveles promedio de benceno por época del año diferenciadas por las zonas Norte, Oeste, Centro, Este, Sur y Afueras de la Provincia de Santiago. En el ANEXO de este informe se entregan las tablas con los respectivos valores. Las mayores concentraciones se observan durante las campañas de invierno. Las concentraciones más altas se encontraron en el año 2009, en un rango de 4,5 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y 2,2 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ aproximadamente. Las concentraciones de los años más recientes tienden a ser significativamente menores.

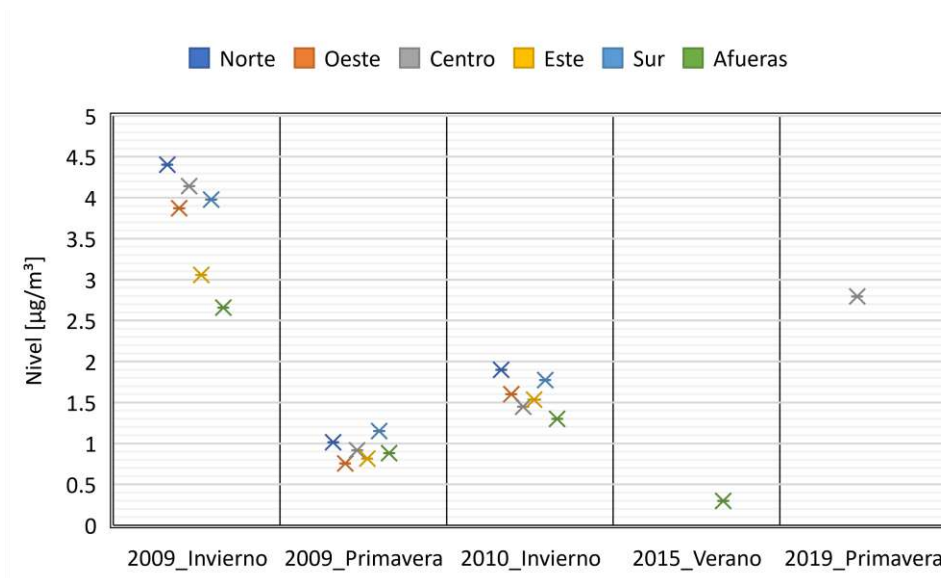


Figura 22: Gráfica Nivel de benceno en función de las Estaciones del año, identificando zona Norte, Oeste, Centro, Este, Sur y Afuera de la Provincia de Santiago.

Universidad de Santiago de Chile
Departamento de Física, Facultad de Ciencia
Avda. Ecuador 3493, Santiago, Chile

- **Región de Valparaíso**

La información recopilada permitió identificar nivel de benceno, en función del tipo de sector (respecto a la industria), época y año de medición, entre otros detalles. Se encontró información para las comunas Concón, Quintero y Puchuncaví. En la Figura 23 se observa que en los años 2012, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2010 ninguna comuna muestra niveles por sobre la norma europea. La comuna de Concón es la que históricamente siempre ha presentado las concentraciones más altas.

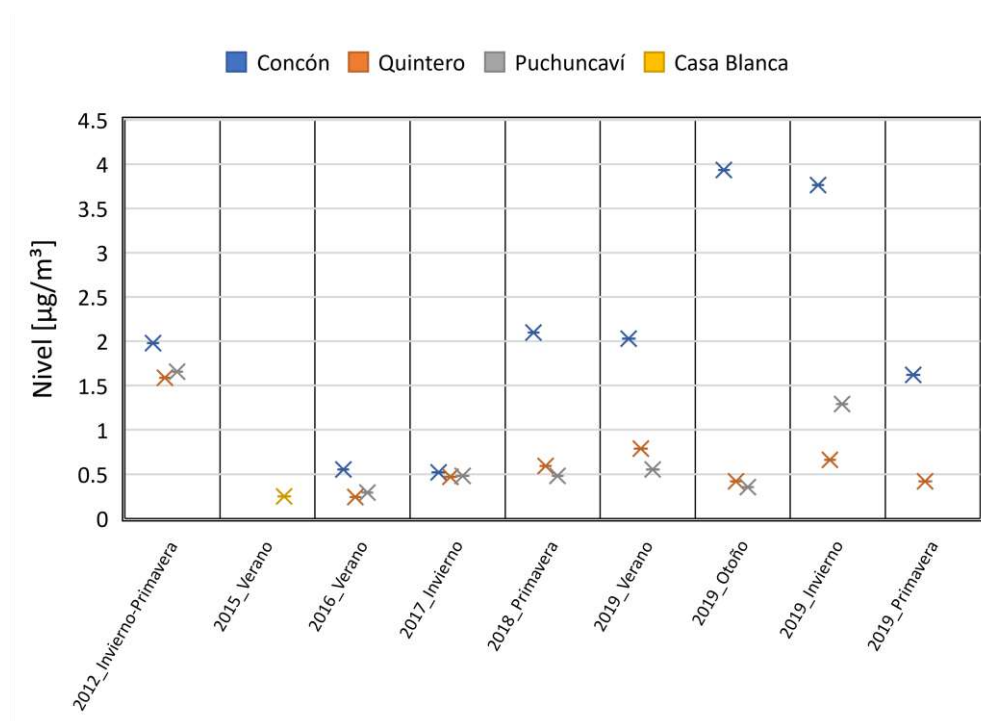


Figura 23: Gráfica Nivel de benceno en función de las Estaciones del año, identificando zona Norte, Oeste, Centro, Este, Sur y Afuera de la Provincia de Santiago.

- **Región del Biobío**

En la Figura 24 se observa los niveles promedio de benceno en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por época del año de las zonas Norte, Oeste, Centro y Sur de la Provincia de Concepción. En el 2009 y 2010, ninguna zona de la Provincia supera los $4,5 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ de benceno por año. Además, se puede observar que existe mayor nivel de benceno en la zona Oeste, especialmente por el sector de Talcahuano y Hualpén.

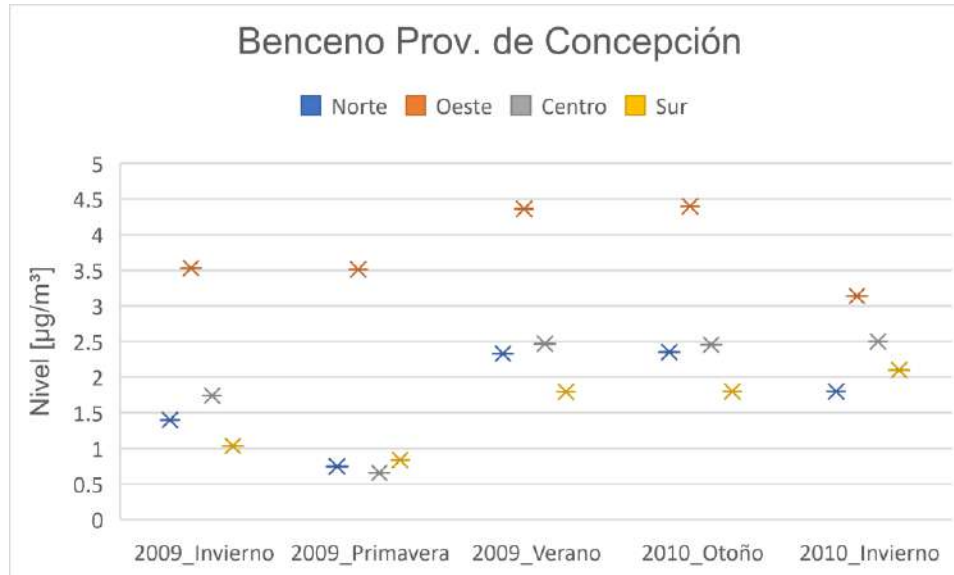


Figura 24: Nivel de benceno en función de las Estaciones del año, identificando zona Norte, Oeste, Centro y Sur de la Provincia de Concepción. Fuente: Tablas 6 y 7.

En la Figura 25 se observa los niveles de benceno por época del año, según sector industrial. Las concentraciones mayores se encuentran generalmente en las zonas industriales y no supera los 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

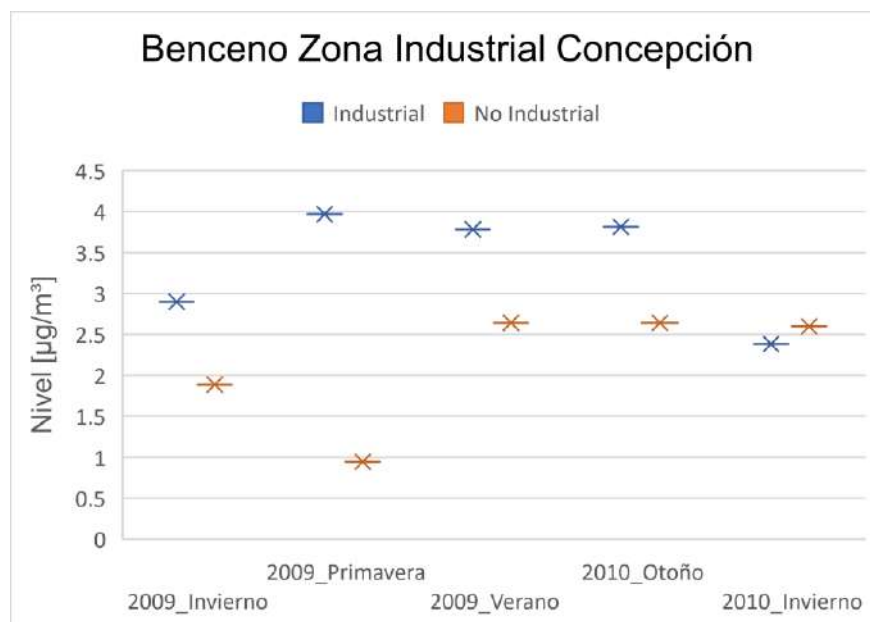


Figura 25: Gráfica Nivel de benceno en función de las Estaciones del año, identificando si es zona industrial. Fuente: Tablas 6 y 7.

2.2 Niveles de benceno en otros países

Se recopiló información de niveles de benceno en otros lugares del mundo, estos datos se muestran las Figura 26- Figura 28. El detalle se entrega en tablas del ANEXO (Tabla 31-Tabla 32). Diversas son las metodologías de monitoreo que se han utilizado, entre las que se destaca.

- Recolección de aire completo en recipientes especiales (jeringas herméticas a gases, bombillas de vidrio, bolsas de plástico o recipientes de metal)
- Recolección en tubos absorbentes (muestreo activo y muestreo pasivo en tubos)
- Muestreo continuo
- Muestreo en línea

El método de muestreo de monitores en línea se utilizó con Cromatógrafos ya sea por desorción térmica, extracción por solvente o por muestreo de “espacio de cabeza”. La desorción térmica se utilizó en el 69% de los casos. Entre la espectrometría de masas (MS) y el detector de ionización de llama (FID), la MS se usa ampliamente en los estudios de caracterización. También se utilizó espectroscopia de absorción óptica para los muestreos en línea.

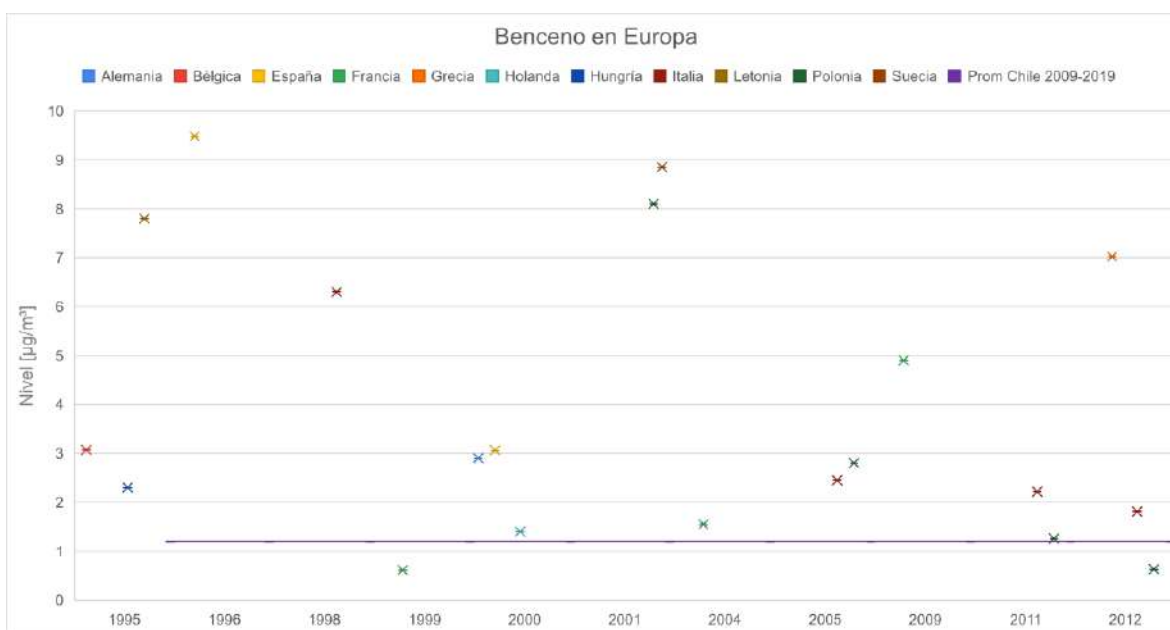


Figura 26: Gráfica del nivel de benceno por año en países de Europa.

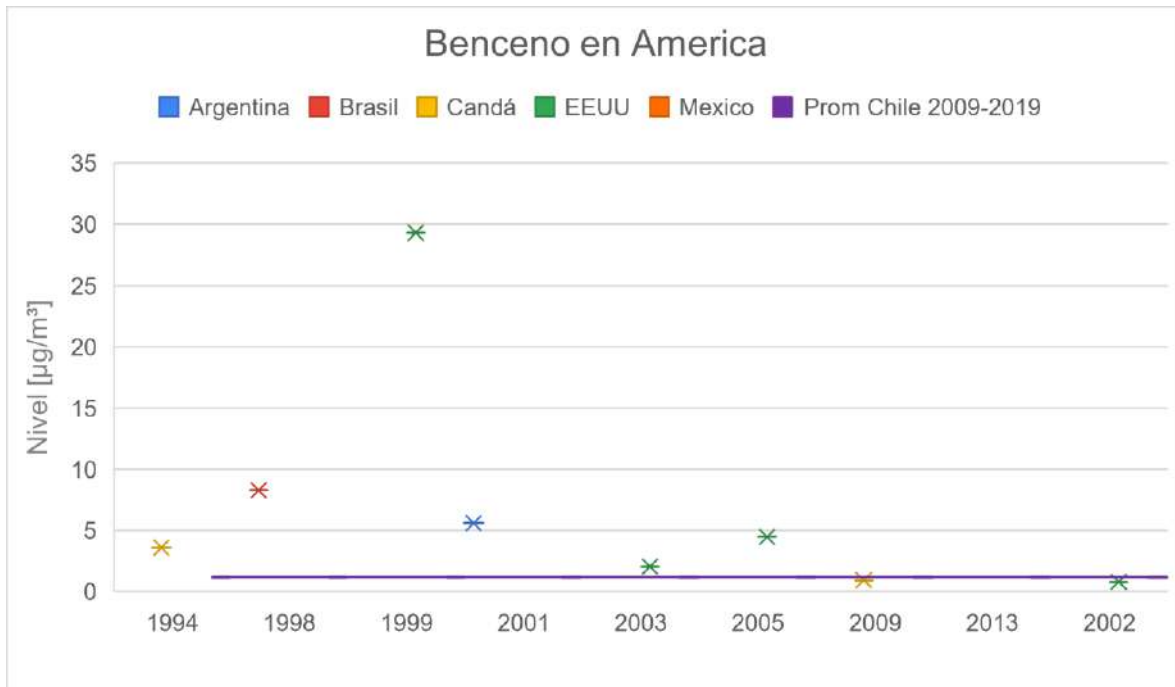


Figura 27: Nivel de benceno por año en países de América.

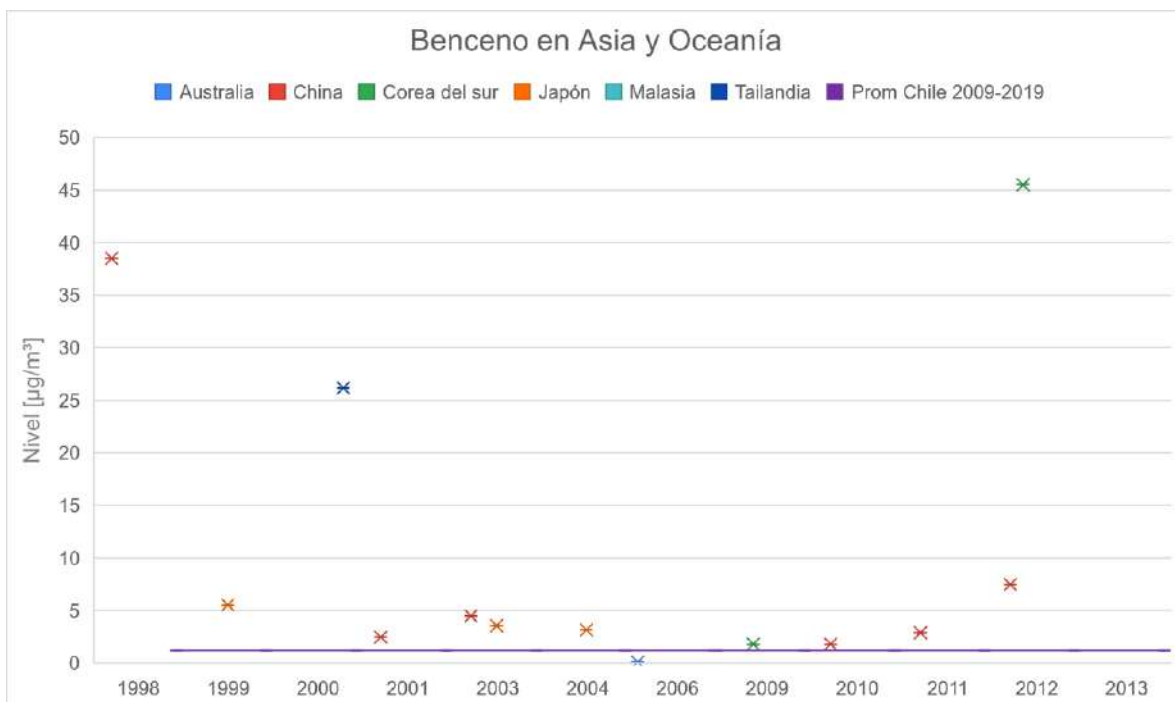


Figura 28: Nivel de benceno por año en países de Asia y Oceanía.

3 REGULACIÓN INTERNACIONAL

Antes de enlistar la regulación internacional, vale la pena mencionar la naturaleza de las normas de calidad a nivel nacional, con la finalidad de realizar una comparación más adecuada.

La regulación ambiental nacional incluye las normas primarias de calidad del aire, que son instrumentos de gestión ambiental que establecen los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos, permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos, o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o salud de la población, definiendo los niveles que originan situaciones de emergencia. Se aplican en todo el territorio de la República (MMA, 2013). Los siguientes **contaminantes criterios** tienen normas de calidad de aire.

Tabla 15: Normas Primarias de calidad del aire actualmente vigentes. Fuente: SINCA.

Contaminante Criterio	Regulación
MP _{2,5}	D.S. N° 12/2010 del Ministerio de Medio Ambiente
MP ₁₀	D.S. N° 59/1998, modificado por D.S. N° 45/2001, ambos del Ministerio Secretaría General de la Presidencia
SO ₂	D.S. N° 104/2018 del Ministerio de Medio Ambiente
NO ₂	D.S. N° 114/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia
CO	D.S. N° 115/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia
Pb	D.S. N° 136/2000
O ₃	D.S. N° 112/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia

Estas normas permiten dar un diagnóstico de la calidad del aire de una zona poblada. Se dice que existe una **condición de Saturación** cuando el nivel de concentración del contaminante criterio está por sobre el límite establecido por la regulación respectiva, mientras que hay **condición de Latencia** cuando el nivel de concentración se encuentra entre el 80 y el 100% del nivel de la norma. Cuando existe incumplimiento de ellas la autoridad ambiental debe establecer medidas que busquen recuperar la calidad del aire (en condición de Saturación) o bien evitar que se superen (en condición de Latencia), conocidos como Planes de Prevención y Descontaminación.

El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (en adelante PPDA CQP) (MMA, 2018) compromete la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire, referida a contaminantes clasificados como Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), que pueden presentar impactos negativos en la salud de la población. La

Resolución Exenta N° 415/2020 del MMA dio inicio a la Elaboración del anteproyecto de Norma Primaria De Calidad del Aire para Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs). Cabe resaltar que el PDA CQP, ya incorpora exigencias de reducción de COVs, exigiendo a las empresas de la zona la implementación de “mejores tecnologías disponibles” en un plazo máximo de 3 años, que se cumplen en marzo 2022.

Existen muchas definiciones de COV's, las cuales dependen del contexto regulatorio y también de la metodología de monitoreo. Por ejemplo, la USEPA tiene definiciones diferentes de COV's si la regulación es hacia concentraciones intradomiciliarias (indoor) o extradomiciliarias (outdoor). Esto es así puesto que, si bien en ambos casos hay efectos en la salud, la regulación indoor está enfocada en efectos específicos en la salud, mientras que la regulación outdoor está más enfocada en el rol en la formación de contaminantes fotoquímicos (O_3 y Aerosoles Orgánicos Secundarios (SOA)).

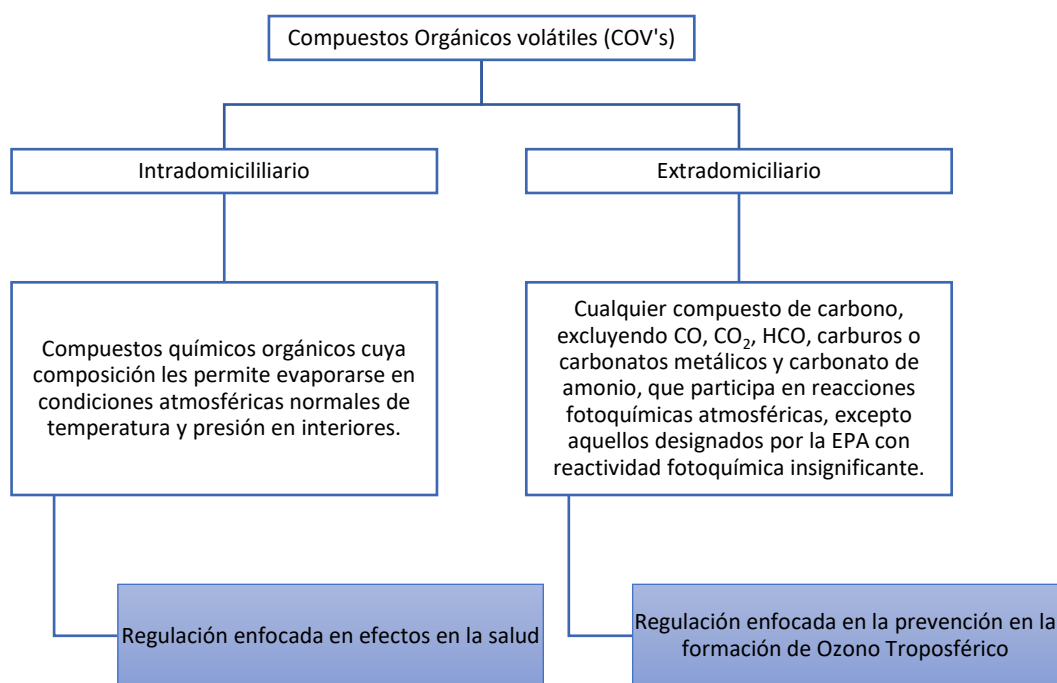


Figura 29: Definiciones generales de COV's de la USEPA. Fuente: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#2>

El Ministerio del Medio Ambiente define los COV's como toda sustancia química que, a excepción del Metano, contenga átomos de carbono e hidrógeno (que puedan ser sustituidos por otros átomos como halógenos, oxígeno, azufre, nitrógeno o fósforo) y que a 20°C tenga una presión de vapor mayor o igual a 0,01 kPa, o que tenga una volatilidad equivalente según condiciones particulares de uso, manipulación y/o almacenamiento. Se incluye en esta definición la fracción de creosota que sobrepase este valor de presión de vapor a la temperatura indicada de 20°C (PDA PQC).

La definición de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, COV's son compuestos orgánicos producidos por el hombre, distintos del metano, que son capaces de producir oxidantes fotoquímicos por reacción con óxidos de nitrógeno en presencia de luz solar.

En cualquier caso, la definición de COV's involucra a miles de compuestos diferentes. No obstante, las *normas de calidad siempre están referidas a una sustancia/compuesto/molécula específica* (contaminante criterio), por lo tanto, resulta complejo elaborar norma de calidad a muchos compuestos diferentes a la vez, como lo son los COV's. Adicionalmente, tampoco existe una metodología capaz de cuantificar toda la familia de COV's al mismo tiempo, por el contrario, las técnicas de monitoreo tienen una capacidad limitada que está enfocada a número específico de COV's, y que a su vez dependen también sus niveles de cuantificación. En efecto, la Unión Europea (UE) disponía de un límite máximo de COV's de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, ese límite se eliminó debido a la falta de documentación robusta que indique efectos adversos en la salud.

Por lo anterior, se ha considerado enfocar el análisis en aquellos COV's que están normados a nivel internacional, con especial atención en Benceno, ya que en la UE está considerado como un contaminante criterio similar al de los otros (NO_2 , O_3 , $\text{MP}_{2,5}$, etc.) y puede servir como guía para dar respuesta al requerimiento del PPDA CQP. El valor límite de la UE es de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Directiva UE 2008/50/CE)⁹. Una publicación reciente señala que, de todos los países del mundo, solo 53 tienen un estándar de calidad del aire ambiente para el Benceno, que varían entre sí en más de un orden de magnitud (Sekar et al., 2019). Entre los valores anuales más estrictos (menores que el de la UE) se destacan en Irak, Japón ($3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Israel ($1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Nueva Zelanda ($3,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Francia ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$); mientras que los valores más altos se identifican en Siria ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Marruecos, Vietnam, Sudáfrica y Bielorrusia ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En el caso de Francia¹⁰ (el estándar más estricto), se pueden distinguir tres niveles de estándares que están superpuestos (europeo, nacional y local). El valor límite¹¹ es de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en tanto que el objetivo de calidad¹² es de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Respecto de la UE, se establecen los objetivos siguientes para el intervalo de tolerancia: $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (100 %) a 13 de Diciembre de 2000, reduciendo a partir del 1 de Enero de 2006 y cada 12 meses posteriormente en $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para llegar a 0 % el 1 de Enero de 2010.

⁹ http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuiid=57d9d4c2-2aaa-4611-877b-c6ed65d35ca7&fname=Informe%20final%20NILU%20JUN_2019.pdf&access=public

¹⁰ <https://www.airparif.asso.fr/en/reglementation/normes-francaises>

¹¹ Valor límite: nivel fijado sobre la base de los conocimientos científicos con el objetivo de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana y / o el medio ambiente en su conjunto, que debe alcanzarse en un período determinado y no superarse una vez alcanzado.

¹² Objetivos de calidad: nivel a largo plazo que se debe alcanzar y mantener, excepto cuando no se pueda lograr mediante medidas proporcionadas para garantizar una protección eficaz de la salud humana y el medio ambiente en su conjunto.

Tabla 16: Estándares mundiales de calidad del aire ambiental para benceno. Los estándares de calidad del aire de Kenia especifican los límites para los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (máximo instantáneo 700 ppb) y los compuestos orgánicos volátiles totales ($600 \mu\text{g} / \text{m}^3\text{-}24 \text{ h}$), pero no explícitamente para el benceno. Fuente: Sekar et al., 2019.

Continente	País	Valor Límite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Intervalo de evaluación	Estándar/Definición	Referencia
Asia	India	5	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Central Pollution Control Board, 2009)
Asia	Irak	3	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Ministry of Oil, 2018)
Asia	Japón	3	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Ministry of Environment, 2009)
Asia	Líbano	5	Anual	Valor límite	(European Union, 2016)
Asia	Rusia, Armenia, Azerbaiyán y Tayikistán	100	24 h	Concentración máxima permitida GN 2.1.6.1338–03 para zona de protección sanitaria	(ENVIRON, 2014)
		300	20 min		
		5	Anual		
Asia	Corea del Sur	5	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Ministry for the Environment South Korea, 2010)
Asia	Siria	20	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Official Gazette, 2003)
Asia	Vietnam	22	1 h	Reglamento técnico nacional sobre sustancias peligrosas en el aire ambiente (QCVN 06:2009/BTNMT)	(Clean Air Initiative for Asian Cities (CAI-Asia) Center, 2010)
		10	Anual		
Asia	Israel	3,9	24 h	Estándar de calidad del Aire	(Department of Environmental health, 2017)
		1,3	Anual		
Australia	Nueva Zelanda	5 (2002) 3,6 (2010)	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Ministry for the Environment and the Ministry of Health, 2002)
África	Botsuana	5	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Modupe O. Akinola, 2017)
África	Marruecos	10	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Chirmata et al., 2017)
África	Sud África	10	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Department of Environmental Affairs South Africa, 2009)
Europa	28 miembros	5	Anual	Valor límite para la protección de la salud humana	(European Union, 2008)

Continente	País	Valor Límite (µg/m ³)	Intervalo de evaluación	Estándar/Definición	Referencia
	de la Unión Europea, Corea del Norte y Turquía				
Europa	Francia	2	Anual	Objetivo de Largo Plazo	(Air quality observatory in the Paris region, 2018)
Europa	Albania	5	8 h	Estándar Primario y Secundario	(Environmental center for Administration and Technology, 2008)
Europa	Bielorrusia	40 10	24 h Anual	Concentración máxima permitida	(European Union, 2012)
Europa	Suecia	Umbral Superior: 3,5 Umbral Inferior: 2	Anual	Estándar de calidad Ambiental	(Swedish Code of Statutes, 2010)
Europa	Malta	Umbral Superior: 3,5 Umbral Inferior: 2	Anual	Regulación Ambiental de Calidad del Aire	(Ambient air quality Standards Malta, 2010)
Europa	Escocia	3,25	Anual	Valor Objetivo	(Air Pollution Information System, 2016)
Europa	Irlanda del Norte	3,25	Anual	Valor Objetivo	(Air Pollution Information System, 2016)
S. América	Colombia	5	Anual	Concentración máxima permitida	(Airlex worldwide Air quality legislation, 2013)
S. América	Perú	4	Anual	Estándar de calidad del Aire	(Decreto Supremo N 074, 2001-Pcm, 2007)
N. América	Cuba	1000	20 min	Concentración máxima permitida	(Airlex worldwide Air quality legislation, 2013)

El benceno, al igual que otros COV's, está presente en varios tipos de fuentes emisoras (vehiculares, industriales, domésticas, etc.), y proviene de emisión evaporativa de solventes o bien como emisión de cualquier tipo de combustión incompleta, por lo que casi toda la población está expuesta a él. A concentraciones altas, se han identificado varios efectos en la salud, que incluye cáncer, daño al sistema inmunológico, neurológico, reproductivo, de desarrollo, respiratorio, entre otros. Es catalogado como un contaminante atmosférico tóxico por la USEPA y es el que más información de monitoreo se tiene. La regulación de la UE, además de establecer el valor límite ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), también establece valores umbrales superior e inferior de evaluación, los que determinan las diferentes alternativas de seguimiento (monitoreo y modelación) de la concentración de benceno en el aire ambiente, en función de sus niveles de precisión requeridos expresados en términos de incertidumbre¹³.

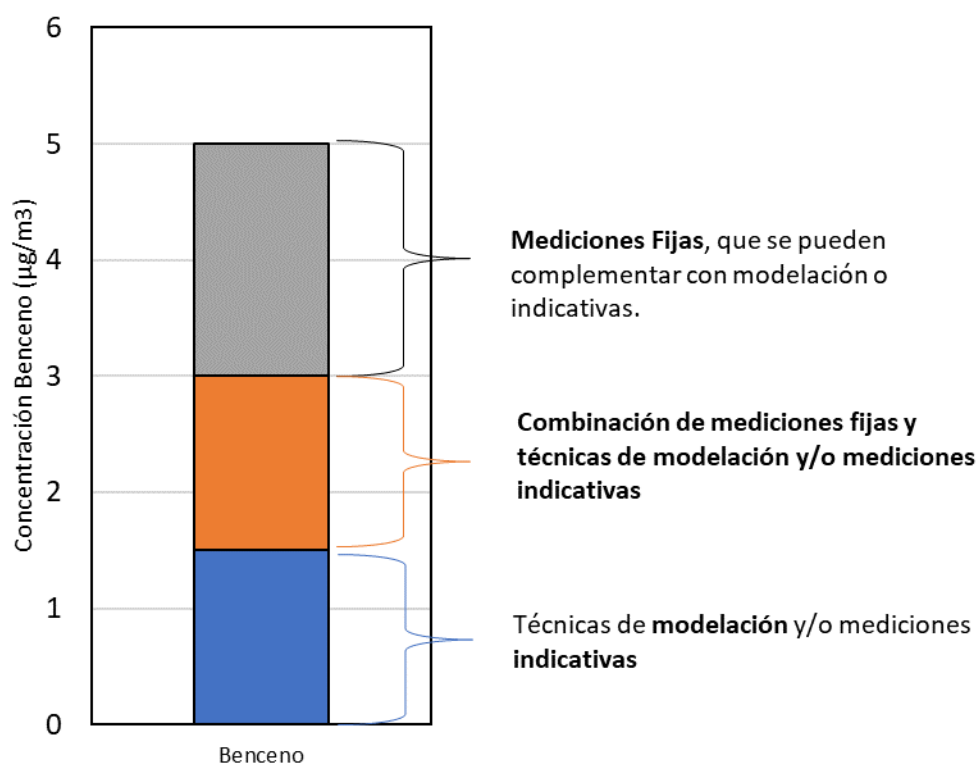


Figura 30: Alternativas de tipos de seguimiento de Benceno en el aire. Directiva UE 2008/50/CE.

¹³ El valor límite es de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (concentración media anual); los umbrales de evaluación superior e inferior correspondientes son 3.5 y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Si los niveles de benceno están entre los umbrales de evaluación superior e inferior (de 2 a $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se necesitan mediciones de referencia, pero pueden ser combinadas con datos suministrados por métodos indicativos y de modelación que cumplan los objetivos mínimos de calidad para la precisión del 30% y 50%, respectivamente. Por debajo del umbral de evaluación inferior, se aceptan mediciones, modelación y evaluación objetiva. Para la evaluación objetiva, se requiere un objetivo de calidad mínima para la precisión del 100%.

Nivel de benceno en Chile respecto a la Norma Europea

En la directiva de calidad del aire (2008/EC/50) de la Unión Europea, señala que el valor medio anual no puede exceder los 5 microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). De los datos recopilados se calculó el promedio de benceno por año en cada comuna de las tres regiones. Los resultados se muestran en las en las tablas Tabla 17-Tabla 19. Es posible señalar que en ningún lugar se supera la Norma Europea. La única excepción es la medición de 1995 en Santiago. Esta medición se realizó con periodos de una semana, utilizando una bolsa de muestreo con equipo de muestreo portátil en una amplia variedad de sitios al aire libre dentro. Las ubicaciones fueron cercanas a carreteras con mucho tráfico, así como ubicaciones más alejadas. El muestreo se realizó durante un período de aproximadamente 2 horas y el Sistema de medición fue con desorción térmica/cromatografía de gases capilar, utilizando un Perkin-Elmer ATD400 y un cromatógrafo de gases (GC) 8320.

Tabla 17 Promedio de benceno por año en las comunas de la RM.

Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por año en comunas de RM y O'Higgins				
Comuna	2009	2010	2015	2019
Cerrillos	2,65	1,8		
Huechuraba	2,80			
La Cisterna	3,24	2,2		
La Florida	2,98	1,6		
La Granja	2,93			
La Pintana	2,08	1,8		
Las Condes	2,13	1,8		
Lo Barnechea	1,67	1,2		
Maipú	2,08	1,4		
Peñalolén	2,44	1,6	0,3	
Pudahuel	2,20			
Puente Alto	1,55	1,5		
Quilicura	2,99	2,3		
Renca	2,38	1,5		
San Joaquín	1,1			
Santiago	2,50	1,45		2,80
Peñaflor	1,77	1,3		
Talagante			0,32	
Melipilla			0,3	
Tiltil			0,27	
Coya			0,16	
Provincia de Santiago (1995)	14,8			

Tabla 18: Promedio de benceno por año en las comunas de la Región de Valparaíso.

Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por año en Comunas de Región Valparaíso						
Comuna	2012	2015	2016	2017	2018	2019
Casa Blanca		0,25				
Concón	1,98		0,55	0,50	2,1	2,70
Puchuncaví	1,66		0,29	0,48	0,47	0,72
Quintero	1,59		0,24	0,47	0,52	0,55

Tabla 19: Promedio de benceno por año en las comunas de la Región del Biobío,

Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por año en comunas de Región Biobío		
Comuna	2009	2010
Chiguayante	1,88	2,85
Concepción	1,58	2,23
Coronel	1,33	1,93
Hualpen	3,30	4,28
Hualqui	0,91	2
Penco	1,25	2
San Pedro de la Paz	1,35	1,63
Talcahuano	5,77	4,92
Tomé	1,49	2,08

4 CAMPAÑA DE MONITOREO

4.1 Metodologías de monitoreo

Conforme con la propuesta de monitoreo aprobada por la contraparte técnica, la campaña de monitoreo está pensada en utilizar dos tipos de tecnologías de monitoreo. De forma adicional se ha incluido en la propuesta una tercera metodología exploratoria, e innovadora en base a sensores exploratorios. El detalle se entrega a continuación.

4.1.1 Metodología continua: DOAS OPSIS para Benceno¹⁴

La espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS) utiliza la absorción de energía electromagnética a longitudes de onda específicas que muestran determinados gases atmosféricos en el espectro ultravioleta (UV), visible (V) e infrarrojo cercano (NIR) para identificar y cuantificar concentración de sustancias químicas individuales.

Esta tecnología es una derivada de la ley de Lambert-Beer, el cual relaciona la intensidad de la luz transmitida con la intensidad de la luz recibida después de haber viajado por una distancia determinada. La tecnología DOAS se fundamenta en la medición de los espectros de absorción en lugar de la medición de la intensidad de la luz a una determinada longitud de onda. Este tipo de tecnología ha mostrado se útil para la medición de gases y vapores inorgánicos (SO_x, NO_x, NH₃, H₂S, HF), monoaromáticos (BTEX) y aldehídos (HCHO).

A diferencia del monitoreo tradicional en estaciones o puntos de monitoreos “fijos”, esta tecnología entrega un valor promedio de concentración a lo largo de un camino (path) óptico de un contaminante determinado. Se espera que esta forma de monitoreo entregue una mejor cobertura espacial y temporal de monitoreo que las estaciones fijas. Diversos programas de la USEPA y en Europa han evaluado sus aplicaciones de monitoreo. Ambos permiten su utilización para monitoreo con fines regulatorios y han establecido recomendaciones y requerimientos para el correcto uso¹⁵.

El sistema DOAS entrega un monitoreo rápido que provee de una alta disponibilidad de datos a con bajos costo de mantenimiento, lo que es una ventaja cuando la medición es con propósitos regulatorios, como la de una norma de calidad. A su vez la medición óptica permite disponer de datos continuos estableciendo la capacidad de analizar perfiles temporales, diarios etc., y así identificar fuentes de emisión importantes.

Debido a que cada tipo de molécula, cada gas, tiene sus propias propiedades de espectro de absorción únicas, o “huella digital”, es posible identificar y determinar las concentraciones de varios gases diferentes en el camino de luz al mismo tiempo. El sistema DOAS transfiere el haz de luz de una fuente de luz (una lámpara de xenón de alta presión), sobre un camino elegido y luego utiliza

¹⁴ <https://www.opsis.se/en/Applications/Ambient-Air-Quality-Monitoring/Urban-Background-Monitoring>

¹⁵ https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-E_to_part_58

algoritmos de cálculos avanzados automatizados para evaluar y analizar las pérdidas de luz por absorción molecular a lo largo del path óptico. La luz de la lámpara de xenón proporciona energía que va desde el UV hasta el IR cercano. La luz proveniente del emisor se recibe por el receptor, el cual es enviada al analizador por medio de una fibra óptica.

El analizador contiene un espectrómetro de alta calidad, una PC y circuitos integrados. El espectrómetro divide la luz en bandas estrechas de longitud de onda utilizando una rejilla óptica, ajustado a operar en un rango óptimo de longitudes de onda según sea el propósito de monitoreo. La luz se transforma en pulsos eléctricos, los que son utilizados para registrar a alta velocidad, espectros de absorción. Éstos son comparados con otro calculado por el PC, que consiste en una suma equilibrada de los espectros de referencia para el análisis en cuestión. El PC procede variando los factores de tamaño para cada espectro de referencia hasta que alcanza la mejor coincidencia posible. A partir de esto, las diferentes concentraciones de gas se pueden calcular con alta precisión. A continuación, se ilustra el mecanismo de funcionamiento.

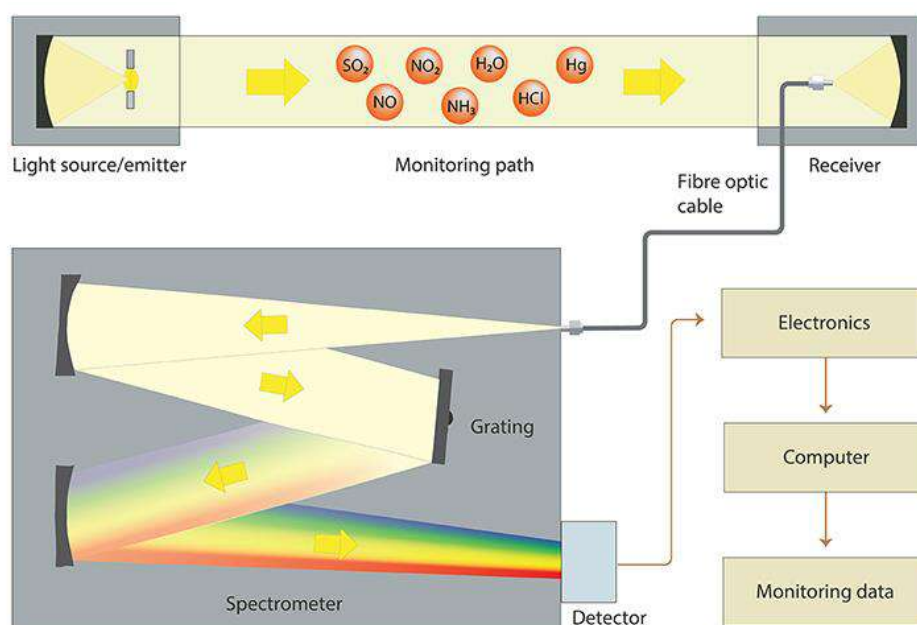


Figura 31: Resumen del sistema DOAS (OPSIS AB).



Figura 32: Vista exterior del receptor con sistema FC 150 integrado.

Existen algunas diferencias que pueden presentarse con los tipos de monitoreo tradicionales (en un punto específico). Dado que el valor que entrega el DOAS es una concentración ponderada a lo largo de todo el path de medición puede haber alguna subestimación de altas concentraciones.

El sistema de monitoreo DOAS dispone de varias aprobaciones internacionales¹⁶. En el caso de Benceno para calidad del aire es una tecnología testada por el programa ETV de la USEPA¹⁷ y también acreditado por Accredited Test and Inspection Institute DAR - German Accreditation Council DAP-P-02.544-04, como se muestra a continuación.

¹⁶ <https://www.opsis.se/en/Products/Approvals>

¹⁷ https://archive.epa.gov/nrmrl/archive-etv/web/pdf/01_vs_opsis.pdf



PRODUCT CONFORMITY CERTIFICATE

This is to certify that the
AR500 Open Path Monitor
Manufactured by:
Opsis AB
PO Box 244
S-244 02 Furulund
Sweden

has been assessed by Sira Certification Service
And for the conditions stated on this certificate complies with:
**MCERTS Performance Standards for Open Path Ambient Air Quality Monitoring
Systems using Differential Optical Absorption Spectrometry (DOAS)
Version 3, August 2017**

Certification Ranges :

CaHe (Benzene) 0 to 10 µg/m³ at 300m equivalent to 0 to 1 ppm.metres

Project No.:	674/0422 & 80025781	<i>EM Alexander</i>
Certificate No.:	Sira MCD40048/03	
Initial Certification:	05 November 2004	
This Certificate issued:	20 November 2019	
Renewal Date:	04 November 2024	Emily Alexander Environmental Project Engineer

MCERTS is operated on behalf of the Environment Agency by



Sira Certification Service
Unit 6, Hawarden Industrial Park
Hawarden, Deeside, CH5 3US
Tel: +44 (0)1244 670 900



The MCERTS certificate consists of this document in its entirety.
For conditions of use, please consider all the information within.
This certificate may only be reproduced in its entirety and without change.
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/mcerts

Form 1305
Issue 6
Page 1 of 5

4.1.2 Muestreadores por difusión (tubos pasivos). IVL¹⁸

Se ha seleccionado esta metodología debido a que tienen varias ventajas entre las que destaca.

- pequeño, silencioso y ligero no necesitan de suministro eléctrico en el sitio de monitoreo.
- las muestras se pueden almacenar a temperatura ambiente.
- no se necesita personal calificado en el sitio de muestreo, las muestras se envían al laboratorio por medios convencionales.

¹⁸ <https://diffusivesampling.ivl.se/oursamplers.4.75d7780712240e747ea80004619.html>

Se proponen utilizar tubos pasivos de Carbopack y de TENAX como absorbente, con exposición semanal (7 días). Acorde con los plazos señalados en las bases técnicas, se espera que la campaña de monitoreo sea a realizar en época de primavera Verano, donde se pueden obtener mayores temperaturas y utilizando esta configuración de muestreadores tendremos la capacidad de medir diferentes COV's en los siguientes límites de concentración,

Tenax		Carbopack B	
gas	$\mu\text{g m}^{-3}$	gas	$\mu\text{g m}^{-3}$
benzene	0.18-100	benzene	1.30-150
toluene	0.20-90	toluene	0.9-90
n-octane	0.13-100	n-octane	0.16-240
ethyl benzene	0.09-70	ethyl benzene	0.06-230
m+p-xylene	0.32-150	m+p-xylene	0.23-240
o-xylene	0.12-70	o-xylene	0.06-270
butyl acetate	0.50-70	n-nonane	0.3-220
n-nonane	0.12-120		

Figura 33: Rangos de medición de tubos pasivos de COV's para tiempo de exposición semanal.



Figura 34: Imagen de tubo pasivo de monitoreo de COV's (IVL).

Esta metodología está incluida en la normativa europea EN 14662¹⁹ y también en ISO 16017-2: 2003²⁰. En Suecia y otras partes de la UE, se puede utilizar para la verificación y seguimiento del estándar de Benceno, bajo mediciones indicativas. Las mediciones deben ser al menos el 15% del año repartidas en todas las estaciones.

En esta propuesta estamos considerando utilizar muestreadores pasivos del IVL. En Suecia se suelen utilizar 20 semanas de medición distribuidas de manera uniforme durante el año para estar seguro en caso de pérdida de datos y cumplir con la regulación respectiva.

¹⁹ Calidad del aire ambiente. Método estándar para medir las concentraciones de benceno. EN 14662-4: Muestreo difusivo seguido de desorción térmica y cromatografía de gases.

²⁰ ISO 16017-2: 2003 Aire interior, ambiente y lugar de trabajo - Muestreo y análisis de compuestos orgánicos volátiles por tubo sorbente / desorción térmica / cromatografía de gases capilares - Parte 2: Muestreo difusivo

Cabe mencionar, el rango de medición (límite de detección inferior y superior) de los tubos pasivos no es un intervalo de concentración fijo, sino que un intervalo de cantidad de contaminante en la muestra. Así, la concentración correspondiente depende del tiempo de exposición de la muestra.

Los límites de concentración son inversamente proporcionales al tiempo de exposición. Respecto de los tubos pasivos de VOC (BTEX), el laboratorio IVL utiliza dos tipos de sustratos: Tenax y Carbopack. Los sustratos de TENAX solamente duran hasta 7 días de exposición, y en lo posible la temperatura ambiental no debe superar los 25 °C. En tanto, el sustrato Carbopack B pueden estar a mayor temperatura y pueden estar hasta dos semanas de exposición, y si la temperatura no supera los 25 °C pueden llegar inclusive hasta el mes de exposición.

Así, el rango de cuantificación de los sustratos es dependiente del tiempo. Abajo está la simulación de rangos de cuantificación para benceno usando diferentes tipos de sustratos. Los tubos de TENAX ofrecen la posibilidad de llegar a límites de detección más bajos que los de Carbopack, lo que es una ventaja cuando se encuentran en concentraciones bajas. Sin embargo, se debe tener en consideración que son más sensibles a la temperatura y tienen menor tiempo de exposición que los Carbopack.

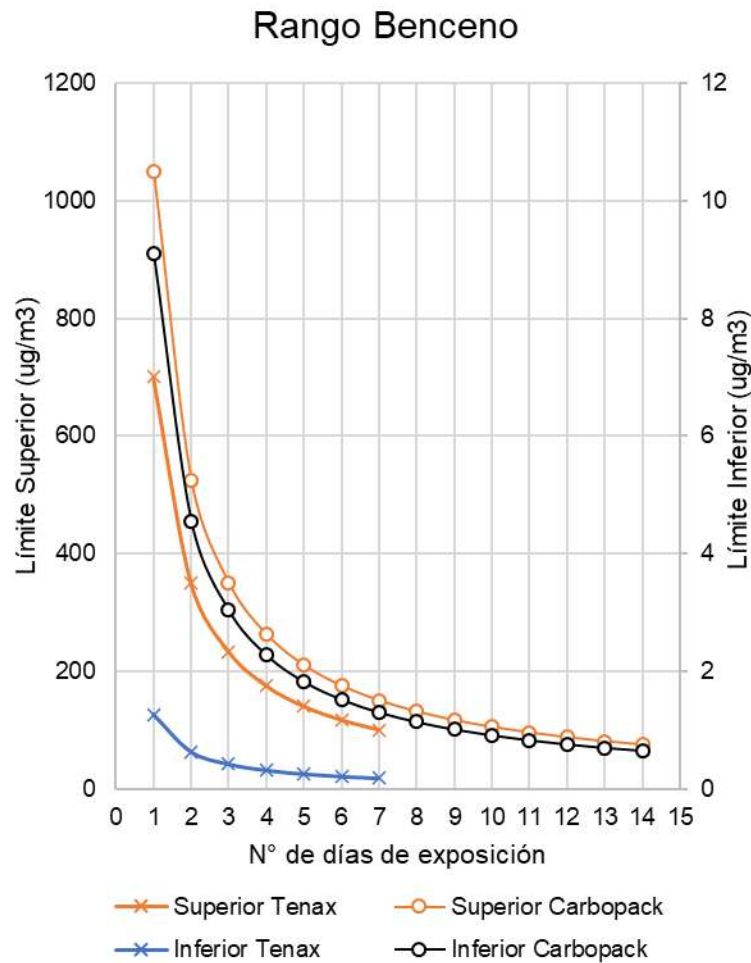


Figura 35: Simulación de los límites de detección de los tubos pasivos para Benceno para 1-14 días de exposición.

Analizando los datos de temperatura registrados en la estación Central Quintero y Loncura, se encuentra que los valores horarios en verano superan levemente los 25 °C, por lo que los tubos de TENAX pueden ser perfectamente usables .

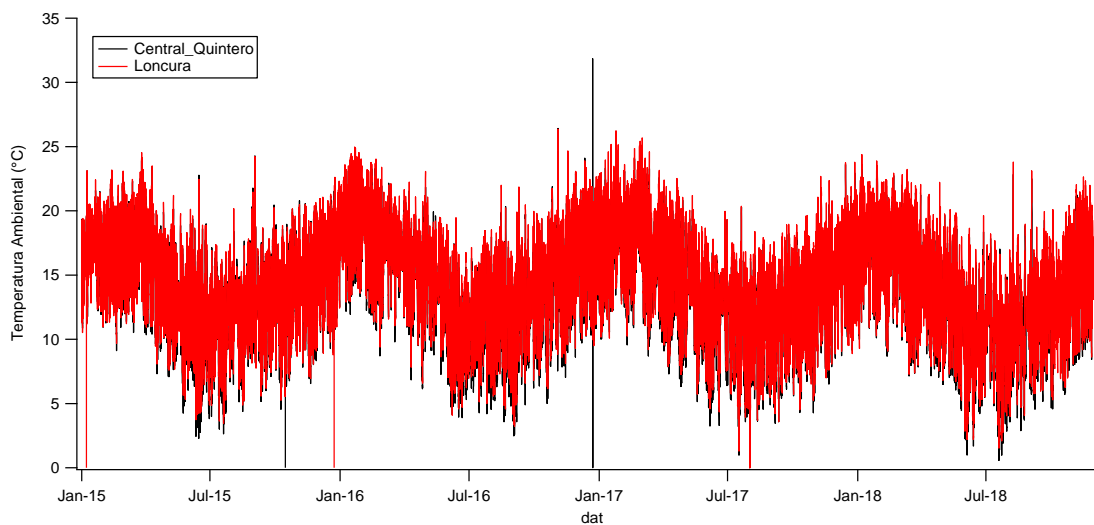


Figura 36: Valores horarios de temperatura ambiental de estaciones en la V región, 2015-2019.

4.1.3 Metodología de monitoreo innovador: Low Cost Sensors para COV (LCS)

Se presenta la campaña de monitoreo complementaria con Low Cost Sensor, con el objetivo de entregar la mayor evidencia de las tecnologías costo/efectivas disponibles en el mercado para el monitoreo de compuestos orgánicos volátiles.

Un grupo diverso de usuarios está utilizando sensores de calidad del aire de bajo costo para satisfacer una amplia variedad de necesidades de medición y de democratización de la información a los ciudadanos, concepto denominado como ciencia de la ciudadanía.

La definición “Low-cost-bajo costo” generalmente representa dispositivos que cuestan menos de \$ 2,500 USD, aunque no existe una definición de costo formalmente reconocida para dicha nomenclatura. La calidad de los datos de estos sensores a menudo está mal caracterizada y hay confusión entre los diversos usuarios de sobre cómo utilizar eficazmente los datos resultantes (Lewis et al., 2018). Por otro lado, está la necesidad de garantizar que los sensores proporcionen datos de calidad que cumplan con los criterios básicos de rendimiento (Lewis y Edwards, 2016). Actualmente, no existe un medio estandarizado de abordar el desempeño para el uso final específico (Woodall et al., 2017). Como tales, los sensores aún no son apropiados para uso reglamentario en el que se requieren criterios específicos de funcionamiento y rendimiento, sin embargo, se han reportado aplicaciones no reglamentarias que incluyen:

- Mapeo de alta resolución en tiempo real de la calidad del aire (entornos espacio-temporales),

- Monitoreo de vallas para detectar emisiones atmosféricas de fuentes industriales,
- Monitoreo comunitario para evaluar los puntos calientes,
- Monitoreo microambiental personal, interior u otro para evaluar exposiciones humanas,
- Recolección de datos en lugares remotos o en ubicaciones que no son rutinariamente cuidadosamente monitoreado,
- Monitoreo de eventos extremos (por ejemplo, incendios forestales) y
- Actividades de sensibilización ambiental y ciencia ciudadana.

Como se ve en la lista anterior, los requisitos de calidad de los datos pueden variar según el uso final previsto, y es fundamental realizar un análisis de datos que responda a las necesidades. Dada la rápida adopción y los avances tecnológicos de las nuevas tecnologías de sensores de aire, existen numerosas preguntas sobre qué tan bien funcionan y cómo se pueden utilizar tecnologías de menor costo para ciertas aplicaciones reglamentarias y no reglamentarias.

Para facilitar la discusión sobre estos temas, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) y otras agencias de autoridad ambiental (AQMD-SC) han definido las comparaciones requeridas con las metodologías referenciales y equivalentes, Reference Method and Federal Equivalent Method Program (FRM/FEM), para la evaluación de rendimiento de sensores, los parámetros sugeridos para la evaluación del desempeño y posterior clasificación por uso de los sensores son: sesgo, precisión y completitud. En la siguiente tabla se presenta la clasificación de uso de los sensores según los parámetros recién nombrados.

Tabla 20 Objetivos de rendimiento sugeridos para la clasificación de uso de sensor por la EPA, en comparación con los requisitos del monitoreo regulatorio. Fuente: (Williams , et al., 2014).

Tipificación del uso	Área de aplicación	Contaminantes	% sesgo / precisión	% Completitud
I	Educación y información	Todos	< 50	≥ 50
II	Identificación y caracterización de puntos calientes	Todos	< 30	≥ 75
III	Monitoreo complementario	Contaminantes criterios	< 20	≥ 80
IV	Exposición personal	Todos	< 30	≥ 80
V	Monitoreo regulatorio	Contaminantes criterios	< 10% < 15%	≥ 75

Para el monitoreo de COV, los sensores a utilizar consisten en detectores de tipo PID, que quiere decir, que su método de detección es la fotoionización. Para esto, el gas muestra se expone a luz ultravioleta profunda, la luz emitida ioniza los gases objetivo y luego son detectados por el detector y reportados como una concentración (ppb o ppm). Los sensores PID pueden medir COV a concentraciones muy bajas. La mayoría de los COV pueden detectarse mediante sensores de PID, las excepciones notables son los hidrocarburos de bajo peso molecular, además son prácticamente insensibles a los cambios de humedad, lo que proporciona un rendimiento incomparable en zonas de gran amplitud térmica.

La detección que realizan los sensores PID tiene su principio en el fenómeno de ionización. Cuando una muestra de gas absorbe energía de una lámpara, el gas se estimula y su contenido molecular se altera. El compuesto pierde un electrón y se convierte en un ion con carga positiva. Una vez que ocurre este proceso, se dice que la sustancia está ionizada.

Para generar la radiación, utilizan un tubo de descarga que contiene una mezcla de gases a baja presión, estos son excitados por medio de una diferencia de potencial elevada que se mantiene entre dos electrodos. La variación en las proporciones de la mezcla de gases de la lámpara permite obtener radiación ultravioleta de diferentes energías. La corriente resultante, es proporcional a la concentración de COV.

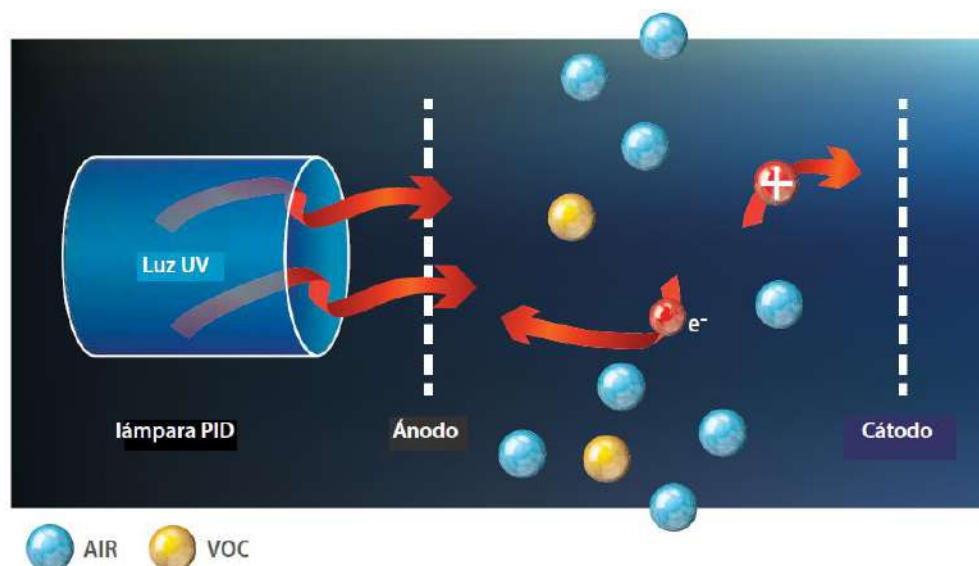


Figura 37: Diagrama del funcionamiento del detector de fotoionización

La mayoría de las sustancias pueden ser ionizadas, algunas más fácilmente que otras. La capacidad de una sustancia de ionizarse se mide a través del potencial de ionización (PI), utilizando una escala de energía en electronvoltios (eV). Por lo general, esta escala va de un valor de 7 a 16 eV. Las sustancias con un valor de PI de 7 eV son muy fáciles de ionizar, mientras que las sustancias con un valor entre 12 y 16 eV son extremadamente difíciles de ionizar. Los potenciales de ionización de algunos COV se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 21: Tabla de potenciales de ionización específico para distintos COV

Sustancia	PI
BENCENO	9.25
HEXANO	10.13
TOLUENO	8.82
ESTIRENO	8.47
METILETILCETONA (MEK)	9.51
XILENO	8.56
FOSFANO	9.87

Una lámpara de 10.6 eV irradia suficiente energía para ionizar cualquier compuesto con un PI de menos de 10.6 eV (MSA, 2015) incluyendo todos los compuestos que se pueden ionizar con una lámpara de 9.8 eV. Aunque hay algunos compuestos que requieren una lámpara de 11.7 eV, las lámparas disponibles con esa energía son inestables, lo cual resulta en una vida útil muy corta.

Los sensores a utilizar para esta campaña de monitoreo serán 5 nodo-sensor, que corresponderán al sensor Alphasense PID modelos A12 o AH2, ver siguiente figura.



Figura 38: Sensor Alphasense PID

Los sensores incluyen un detector con controlador de lámpara, circuito amplificador y pila de electrodos reemplazables por el usuario, lámpara de 10,6 eV y filtro de partículas a energía máxima de fotones generada en un detector depende de la lámpara PID utilizada: xenón = 9,6 eV, deuterio = 10,2 eV, criptón = 10,6 eV y Argón = 11,7 eV. Por lo tanto, el uso de una lámpara de argón conduce a la detección de la mayor variedad de compuestos volátiles (Alphasense, 2010), mientras que el uso de una lámpara de xenón puede aumentar la selectividad, por lo tanto, se deja en manifiesto discutir con la contraparte técnica del proyecto, la elección de la lámpara de los sensores PID a utilizar.

4.2 Lugares de medición

LA USEPA ha definido requerimientos de lugares de monitoreo en términos de escala de medición. Dicho de otra manera, cada estación de monitoreo debe estar localizada de forma tal que represente adecuadamente una parcela de aire o volumen determinado. Así, se han definido seis escalas de representatividad para describir el tamaño de estas parcelas de aire. Se asume que, a lo largo de cada escala definida, el contaminante de interés está homogéneamente distribuido.

Tabla 22: Características de diferentes escalas espaciales definidas por la USEPA.

Escala	Tamaño (aprox)
Microescala	Varios metros a 100 metros
Escala media	100 a 500 metros
Vecindad	500 metros a 4 kms
Urbana	4 a 5 kms
Regional	Decenas a cientos de kms

4.2.1 Instalación DOAS

Según la clasificación indicada en la sección 4.1.3 cada estación de monitoreo debe estar localizada de forma tal que represente adecuadamente una parcela de aire o volumen determinado.

Dado que el origen de este proyecto nace en el Plan de Descontaminación de Puchuncaví Quintero Concón, se considera apropiado realizar la campaña de medición en la zona de Quintero. Mediante reuniones con la contraparte técnica y a conversaciones avanzadas que dispone se considera utilizar la siguiente configuración para la instalación del DOAS. A continuación, se entrega el detalle de la configuración propuesta.

- Lugar de instalación: Comuna de Quintero
- Largo del Path Óptico: 800 mts aproximadamente.
- Contaminantes a Medir: Benceno, Tolueno, Etilbenceno (BTE)

El receptor estará instalado en la [Capitanía Puerto Quintero](#), en tanto que el [Emisor DOAS](#) cerca del Centro de Buceo Desafío Submarino.



Figura 39: Sitios de monitoreo de DOAS.



Figura 40: Ubicación receptor DOAS.



Figura 41: Ubicación emisor DOAS.

4.2.2 Tubos pasivos

Los tubos pasivos se instalarán en tres puntos de la actual red de monitoreo en condiciones de background (condiciones de fondo), urbano y rural, con la finalidad de tener mediciones representativas de la exposición poblacional a las concentraciones de COV's (BTEX).

Tabla 23: ubicación potencial de tubos pasivos.

Estación	Potencial Clasificación
Puchuncaví	Urbano
Ventanas	Industrial
La Greda	Industrial
Los Maitenes	Urbano
Valle Alegre	Rural
Quintero	Urbano
Quintero Centro	Urbano
Sur	Rural
Concón	Urbano

4.2.3 Sensores

Se contempla utilizar los sensores low-cost PID de forma complementaria al path óptico del DOAS. Se considera la instalación de un sensor en el path óptico con la finalidad de comparar mediciones entre ambas tecnologías. 4 sensores restantes 3 estarán ubicados en las estaciones de referencia de calidad del aire Ventanas, Concón, y los Maitenes, y el quinto sensor será utilizado en duplicado en cada una de las estaciones por un periodo de 2 semanas aproximadamente, con el objetivo de comparar en duplicado el rendimiento de los sensores PID.

Tabla 24: Potencial ubicación de sensores de monitoreo.

Sensor	Estación	Potencial Clasificación
1	Path óptico	Urbano
2	Ventanas	Industrial
3	Concón	Urbano-Industrial
4	Los Maitenes	Urbano
5	Ventanas, Concón y Los Maitenes	Sensor en duplicado para control de QA/QC

5 BIBLIOGRAFÍA

- Carbone, S., Saarikoski, S., Frey, A., Reyes, F., Reyes, P., Castillo, M., Gramsch, E., Oyola, P., Jayne, J., Worsnop, D.R., Hillamo, R., 2013. Chemical Characterization of Submicron Aerosol Particles in Santiago de Chile. *Aerosol and Air Quality Research* 13, 462–473. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.10.0261>
- Gramsch, E., Reyes, F., Vásquez, Y., Oyola, P., Rubio, M.A., 2016. Prevalence of Freshly Generated Particles during Pollution Episodes in Santiago de Chile. *Aerosol and Air Quality Research* 16, 2172–2185. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.12.0691>
- Lewis, A., von Schneidmesser, E., Peltier, R., 2018. Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition: Overview of Topic and Future Applications. World Meteorological Organization, WMO-No.1215 Available at: https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Low_cost_sensors_post_review_final.pdf.
- Lewis, A., Edwards, P., 07 July 2016. Validate personal air-pollution sensors. *Nature* 535, 29–31. <https://doi.org/10.1038/535029a>.
- MMA, 2018. PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LAS COMUNAS DE CONCÓN, QUINTERO Y PUCHUNCAVÍ.
- MMA, 2013. DECRETO 38. APRUEBA REGLAMENTO PARA LA DICTACIÓN DE NORMAS DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE EMISIÓN.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2016. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, 3rd ed. Wiley.
- Sekar, A., Varghese, G.K., Ravi Varma, M.K., 2019. Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment. *Heliyon* 5, e02918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02918>
- SISTAM Ingeniería, 2019. INVENTARIO DE EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS, DESDE LA REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O´HIGGINS HASTA LA REGIÓN DE LOS LAGOS” (Informe Final). SUBSECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE.
- Tagle, M., Reyes, F., Vásquez, Y., Carbone, S., Saarikoski, S., Timonen, H., Gramsch, E., Oyola, P., 2018. Spatiotemporal Variation in Composition of Submicron Particles in Santiago Metropolitan Region, Chile. *Front. Environ. Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00027>
- Woodall, G., Hoover, M., Williams, R., Benedict, K., Harper, M., Soo, Jhy-Charm, Jarabek, A., Stewart, M., Brown, J., Hulla, J., Caudill, M., Clements, A., Kaufman, A., Parker, A., Keating, M., Balshaw, D., Garrahan, K., Burton, L., Batksa, S., Limaye, V., Hakkinen, P., Thompson, R., 2017. Interpreting mobile and handheld air quality sensor readings in relation to air quality standards and health effect reference values: tackling the challenges. *Atmosphere* 8, 182. <https://doi.org/10.3390/atmos8100182>.

6 ANEXOS

- **Región Metropolitana**

En la siguiente se encuentran los datos recopilados de nivel de benceno según comuna, época del año y año de la RM.

Tabla 25: Datos recopilados de concentraciones de benceno en la Región Metropolitana. Fuente: Elaboración propia a partir de Base de datos de la Campañas 2009 y 2010 de CMM junto con Swedish Environmental Research Institute e informe del NILU "Fase 2: Huella Digital de Compuestos Orgánicos Volátiles en el Área de Concón y Quintero-Puchuncaví, Norbert Schmidbauer y Susana López-Aparicio, 2019".

Provincia de Santiago					
Método de medición: Tubos Pasivos					
Zona	Comuna	Comunidad	Época de medición	Año	Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Norte	Huechuraba	Urbana	Invierno	2009	4.77
	Huechuraba	Urbana	Primavera	2009	0.79
	Quilicura	Urbana	Invierno	2009	4.56
	Quilicura	Urbana	Primavera	2009	1.41
	Quilicura	Urbana	Invierno	2010	2.30
	Renca	Urbana	Invierno	2009	3.88
	Renca	Urbana	Primavera	2009	0.88
	Renca	Urbana	Invierno	2010	1.50
Poniente	Maipú	Urbana	Invierno	2009	3.32
	Maipú	Urbana	Primavera	2009	0.65
	Maipú,Ciudad Satélite	Urbana	Primavera	2009	0.93
	Maipú,Ciudad Satélite	Urbana	Invierno	2010	1.40
	Cerrillos	Urbana	Invierno	2009	4.49
	Cerrillos	Urbana	Primavera	2009	0.80
	Cerrillos	Urbana	Invierno	2010	1.80
	Pudahuel	Urbana	Invierno	2009	3.80
Pudahuel	Urbana	Primavera	2009	0.59	
Centro	Santiago	Urbana	Invierno	2009	4.14
	Santiago	Urbana	Primavera	2009	0.80
	Santiago	Urbana	Invierno	2010	1.45
	Santiago	Urbana	Primavera	2019	2.80
	Santiago	Urbana	Año completo	1995	14.80
	San Joaquín	Urbana	Primavera	2009	1.10
Oriente	Peñalolén	Urbana	Invierno	2009	3.96
	Peñalolén	Urbana	Primavera	2009	0.91
	Peñalolén	Urbana	Invierno	2010	1.60
	Las Condes	Urbana	Invierno	2009	3.54
	Las Condes	Urbana	Primavera	2009	0.72
	Las Condes	Urbana	Invierno	2010	1.80
	Lo Barnechea	Urbana	Invierno	2009	1.67
	Lo Barnechea	Urbana	Invierno	2010	1.20
Sur	La Cisterna	Urbana	Invierno	2009	5.61
	La Cisterna	Urbana	Primavera	2009	0.86
	La Cisterna	Urbana	Invierno	2010	2.20
	La Pintana	Urbana	Invierno	2009	3.05

Provincia de Santiago					
Método de medición: Tubos Pasivos					
	La Pintana	Urbana	Primavera	2009	1.12
	La Pintana	Urbana	Invierno	2010	1.80
	Puente Alto	Urbana	Invierno	2009	2.10
	Puente Alto	Urbana	Primavera	2009	0.99
	Puente Alto	Urbana	Invierno	2010	1.50
	La Florida	Urbana	Invierno	2009	4.36
	La Florida	Urbana	Primavera	2009	1.60
	La Florida	Urbana	Invierno	2010	1.60
	La Granja	Urbana	Invierno	2009	4.77
	La Granja	Urbana	Primavera	2009	1.08
Fuera de Santiago	Peñaflor	Urbana	Invierno	2009	2.66
	Peñaflor	Urbana	Primavera	2009	0.88
	Peñaflor	Urbana	Invierno	2010	1.30
	Melipilla	Urbana	Verano	2015	0.30
	Til Til	Urbana	Verano	2015	0.27
	Peñaflor	Urbana	Verano	2015	0.32

Provincia de Valparaíso

A continuación, se entregan los datos recopilados de nivel de benceno, en función del tipo de sector (respecto a la industria), época y año de medición, entre otros detalles. Se identificó información para las comunas Concón, Quintero y Puchuncaví.

Tabla 26: Datos recopilados de concentraciones de benceno de la comuna de Concón. Fuente: Elaboración propia a partir de los Informes de CMM "Informe Diagnóstico de la calidad del aire y propuesta de una red integrada de calidad del aire-emisiones-meteorología para la zona industrial de Concón-Quintero-Puchuncaví-Ventanas, 2008", NILU "Huella digital de compuestos orgánicos volátiles en la zona de Quinteri-Puchuncaví, Norbert Schmidbauer and Susana López-Aparicio, 2019" y "Fase 2: Huella Digital de Compuestos Orgánicos Volátiles en el Área de Concón y Quintero-Puchuncaví, Norbert Schmidbauer y Susana López-Aparicio, 2019", y CENMA "Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, 2013"

Comuna de Concón							
Sector	Comunidad	Columna2	Crácterísticas del sector	Epoca	Año	Método de medición	Nivel Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
	Urbana	Zona costera	Cerca de zona Industrial	Verano	2016	Tubos pasivos	0,31
	Urbana	Zona costera, residencial	Cerca de zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,64
	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,49
	Urbana	Zona costera	Zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,59
	Urbana	Zona costera	Zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,74
	Urbana	Zona costera, residencial	Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,52
	Urbana	Zona costera, residencial	Muy Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,57
	Urbana	Zona costera, residencial	Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,52
	Urbana	Zona costera	Zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,57
	Urbana	Zona costera	Zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,54
	Urbana	Zona costera, residencial	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,52
	Rural	Zona costera	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,39
Junta de vecinos	Urbana	Zona costera, residencial	Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,52
	Rural	Zona costera	Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,39
Calle San Agustín/Ruta F30-E	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	3,30
Calle 13 / Calle Cortés	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	1,50
Calle 13/ Calle Sta Margarita	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	1,50
Ruta F-32	Urbana	Zona costera	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	1,40
Calle 14/ Calle San Agustín	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	3,80
Calle Vergara / Calle 12	Urbana	Zona costera, residencial	Cerca de zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	2,50
Calle 14 / Calle Cortés	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,80
Calle 13 / Calle Cortés	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,40
Casa Alejandra	Urbana	Zona costera, residencial	Cerca de zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	3,28
Casa Alejandra	Urbana	Zona costera, residencial	Cerca de zona Industrial	Otoño	2019	Cánisters de acero, GC-MS	6,15
Ruta F-32	Urbano	Zona costera	Zona Industrial	Otoño	2019	Cánisters de acero, GC-MS	1,72
Calle 14/ Calle San Agustín	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Invierno	2019	Cánisters de acero, GC-MS	3,762727273
Calle 14/ Calle San Agustín	Urbana	Zona costera, residencial	Zona Industrial	Primavera	2019	Cánisters de acero, GC-MS	1,621333333
Consultorio Concón	Urbana	Zona costera,	Cerca de zona	Invierno-	2012	tubos pasivos	2,60

		residencial	Industrial	Primavera			
Junta de Vecinos	Urbana	Zona costera, residencial	Cerca de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,80
Cementerio	Urbana	Zona costera	Zona industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,50
Caleta-Concón	Urbana	Zona costera	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	2,20

Tabla 27: Datos recopilados de concentraciones de benceno de la comuna de Quintero. Fuente: Elaboración propia a partir de los Informes de CMM "Informe Diagnóstico de la calidad del aire y propuesta de una red integrada de calidad del aire-emisiones-meteorología para la zona industrial de Concón-Quintero-Puchuncaví-Ventanas, 2008", NILU "Huella digital de compuestos orgánicos volátiles en la zona de Quintero-Puchuncaví, Norbert Schmidbauer and Susana López-Aparicio, 2019" y "Fase 2: Huella Digital de Compuestos Orgánicos Volátiles en el Área de Concón y Quintero-Puchuncaví, Norbert Schmidbauer y Susana López-Aparicio, 2019", y CENMA "Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero, Puchuncaví"

Comuna de Quintero

Sector	Comunidad	Características del sector	Época	Año	Método de medición	Nivel Benceno [µg/m ³]
	Rural	Zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,21
	Urbana	Cerca de zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,27
	Rural	Zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,39
	Urbana	Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,45
	Urbana	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,45
	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,45
	Rural	Zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,62
	Urbana	Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,46
Colegio Sargento Aldea	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,40
Pasaje Colegio Santa Filomena	Urbana	Medianamente cerca de zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,25
Pasaje Colegio Santa Filomena	Urbana	Medianamente cerca de zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,33
Transciente Cerca De Playa	Rural	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,40
Transciente Cerca De Playa	Rural	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	1,08
Mitad Transciente	Rural	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,20
Mitad Transciente	Rural	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,20
Frente Enap	Rural	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	1,47
Frente Enap	Rural	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	2,20
Transciente Borde Playa	Rural	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	1,40
Transciente Borde Playa	Rural	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,20
Salida A Quintero	Urbana	Cerca de zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,10
Mitad Transciente	Rural	Zona Industrial	Otoño	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,42
Transciente Cerca De Playa	Rural	Zona Industrial	Invierno	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,66
Transciente Cerca De Playa	Rural	Zona Industrial	Primavera	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,42
Sur	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,20

Valle Alegre	Rural	Medianamente lejos de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,20
Loncura	Urbana	Cerca de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,40
Quintero-AES	Rural	Zona industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,60
Quintero-GNL	Rural	Zona industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,90
Mantagua	Rural	Lejos de zona industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,70
Champiñon	Rural	Cerca de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	2,30
Las Gaviotas	Rural	Lejos de zona industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,40

Tabla 28: Datos recopilados de concentraciones de benceno de la comuna de Puchuncaví y Casa Blanca. Fuente: Elaboración propia a partir de los Informes de CMM "Informe Diagnóstico de la calidad del aire y propuesta de una red integrada de calidad del aire-emisiones-meteorología para la zona industrial de Concón-Quintero-Puchuncaví-Ventanas, 2008", NILU "Huella digital de compuestos orgánicos volátiles en la zona de Quinteri-Puchuncaví, Norbert Schmidbauer and Susana López-Aparicio, 2019" y "Fase 2: Huella Digital de Compuestos Orgánicos Volátiles en el Área de Concón y Quintero-Puchuncaví, Norbert Schmidbauer y Susana López-Aparicio, 2019", CENMA "Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, 2013" y Base de Resultados 2015 de Swedish Environmental Research Institute.

Comuna de Puchuncaví y Casa Blanca

Sector	Comunidad	Crácterísticas del sector	Época	Año	Método de medición	Nivel Benceno [µg/m ³]
	Rural	Zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,63
	Rural	Cerca de zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,13
	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Verano	2016	tubos pasivos	0,12
	Rural	Zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,52
	Rural	Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,45
	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,45
Ventanas	Urbana	Cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,45
Campiche	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno	2017	tubos pasivos	0,52
Colegio La Greda	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,30
Aes Gener	Urbana	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,17
Codelco Ventanas	Rural	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,87
Codelco Ventanas	Rural	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,20
Carretera, Zona Oriente Enap	Rural	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,57
Carretera, Zona Oriente Enap	Rural	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	1,20
Carretera, Zona Oriente Enap	Rural	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	1,50
Camino A Maitenes	Rural	Cerca de zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,16
Camino A Maitenes	Rural	Cerca de zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,26
Borde Playa Frente Oxiquim	Rural	Zona Industrial	Primavera	2018	Cánisters de acero, GC-MS	0,60
Borde Playa Frente Oxiquim	Rural	Zona Industrial	Verano	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,60
Colegio La Greda	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Otoño	2019	Cánisters de acero, GC-MS	0,36
Carretera, Zona Oriente Enap	Rural	Zona Industrial	Invierno	2019	Cánisters de acero, GC-MS	1,29
Hogar de Ancianos		Zona industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,70
Colegio La Greda	Rural	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,70

Los Maitenes	Urbana	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,10
Horcón	Urbana	Medianamente cerca de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,50
Consultorio Puchuncavi	Urbana	Medianamente lejos de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	2,30
Interior Puchuncavi	Rural	Medianamente lejos de zona Industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	1,20
Colmo	Rural	Lejos de zona industrial	Invierno-Primavera	2012	tubos pasivos	2,10
Casa Blanca	Urbana		Verano	2015	tubos pasivos	0,25

Región del Bío Bío

Tabla 29: Datos recopilados de concentraciones de benceno de la Provincia de Concepción, Zona Norte y Oeste. Fuente: Elaboración propia a partir de Base de datos de la Campañas 2009 y 2010 de CMM junto con Swedish Environmental Research Institute.

Provincia de Concepción						
Método de medición: Tubos Pasivos						
Zona	Comuna	Lugar	Comunidad	Epoca	Año	Nivel Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Norte	Tomé	CONAF, Punta Parra	Urbana	Invierno	2009	1,70
	Tomé	CONAF, Punta Parra	Urbana	Verano	2009	2,07
	Tomé	Tome de CONAMA	Urbana	Invierno	2009	1,10
	Tomé	Tome de CONAMA	Urbana	Verano	2009	2,59
	Tomé	CONAF, Punta Parra	Urbana	Primavera	2009	0,89
	Tomé	Tomé de CONAMA	Urbana	Primavera	2009	0,60
	Tomé	Tome de CONAMA	Urbana	Otoño	2010	2,60
	Tomé	CONAF, Punta Parra	Urbana	Otoño	2010	2,10
	Tomé	Tome de CONAMA	Urbana	Invierno	2010	2,10
	Tomé	CONAF, Punta Parra	Urbana	Invierno	2010	1,50
Oeste	Hualpen	Av Concepcion 130	Urbana	Invierno	2009	2,40
	Hualpen	Av Concepcion 130	Urbana	Verano	2009	3,10
	Hualpen	Hungría / Yugoslavia	Urbana	Invierno	2009	5,90
	Hualpen	Hungría / Yugoslavia	Urbana	Verano	2009	3,42
	Talcahuano	Cía Bomberos, San Vicente	Urbana	Invierno	2009	1,80
	Talcahuano	Cía Bomberos, San Vicente	Urbana	Verano	2009	5,43
	San Pedro de la Paz	Mapal Masisa	Urbana industrial	Invierno	2009	1,50
	San Pedro de la Paz	Mapal Masisa	Urbana industrial	Verano	2009	1,90
	San Pedro de la Paz	SEREMI Salud	Urbana	Invierno	2009	1,40
	San Pedro de la Paz	SEREMI Salud	Urbana	Verano	2009	1,96
	Talcahuano	Indura	Urbana industrial	Invierno	2009	1,70
	Talcahuano	Indura	Urbana industrial	Verano	2009	1,98
	Talcahuano	Jabones Maritano	Urbana industrial	Invierno	2009	10,00
	Talcahuano	Jabones Maritano	Urbana industrial	Verano	2009	12,76
	San Pedro de la Paz	Mapal, San Pedro	Urbana industrial	Primavera	2009	0,92
	Hualpen	Hungría/yugoslavia	Urbana	Primavera	2009	4,20
	Talcahuano		Urbana	Primavera	2009	1,40
	Talcahuano	Janones maritano	Urbana industrial	Primavera	2009	16,00
	Talcahuano	Cio bomberos, San Vivente	Urbana	Primavera	2009	0,90
	San Pedro de la Paz	SEREMI Salud	Urbana	Primavera	2009	0,41
Hualpen	Hualpen	Urbana	Primavera	2009	0,75	

Hualpen	Av Concepcion 130	Urbana	Otoño	2010	3,10
San Pedro de la Paz	Mapal Masisa	Urbana industrial	Otoño	2010	1,90
Talcahuano	Jabones Maritano	Urbana industrial	Otoño	2010	13,00
Talcahuano	Cía Bomberos, San Vicente	Urbana	Otoño	2010	5,40
Hualpen	Hungría / Yugoslavia	Urbana	Otoño	2010	3,40
Talcahuano	Indura	Urbana industrial	Otoño	2010	2,00
San Pedro de la Paz	SEREMI Salud	Urbana	Otoño	2010	2,00
Talcahuano	Jabones Maritano, Libertad	Urbana industrial	Invierno	2010	3,80
Hualpen	Hungría / Yugoslavia	Urbana	Invierno	2010	5,30
San Pedro de la Paz	Mapal Masisa, San Pedro	Urbana industrial	Invierno	2010	1,30
Talcahuano	Cía Bomberos, San Vicente	Urbana	Invierno	2010	3,10
Talcahuano	Indura	Urbana industrial	Invierno	2010	2,20

Tabla 30: Datos recopilados de concentraciones de benceno de la Provincia de Concepción, Zona Centro y Sur. Fuente: Elaboración propia a partir de Base de datos de la Campañas 2009 y 2010 de CMM junto con Swedish Environmental Research Institute.

Provincia de Concepción						
Método de medición: Tubos Pasivos						
Zona	Comuna	Lugar	Comunidad	Epoca	Año	Nivel Benceno [µg/m ³]
Centro	Concepción	CONAMA	Urbana	Invierno	2009	2,70
	Concepción	CONAMA	Urbana	Verano	2009	3,17
	Concepción	CONAMA	Urbana	Invierno	2009	0,09
	Concepción	CONAMA	Urbana	Verano	2009	2,91
	Concepción	Kingston College	Urbana	Invierno	2009	1,10
	Concepción	Kingston College	Urbana	Verano	2009	1,50
	Chiguayante	Porvenir 314	Urbana	Invierno	2009	3,30
	Chiguayante	Porvenir 314	Urbana	Verano	2009	3,33
	Chiguayante	Fábrica textil	Urbana industrial	Invierno	2009	1,70
	Chiguayante	Fábrica textil	Urbana industrial	Verano	2009	2,15
	Concepción	Pje 2 nro 155	Urbana	Invierno	2009	1,88
	Concepción	Pje 2 nro 155	Urbana	Verano	2009	2,16
	Penco		Urbana	Invierno	2009	1,40
	Penco		Urbana	Verano	2009	2,05
	Concepción	Kingston College	Urbana	Primavera	2009	0,65
	Concepción	CONAMA	Urbana	Primavera	2009	1,20
	Concepción	CONAMA	Urbana	Primavera	2009	1,20
	Penco		Urbana	Primavera	2009	0,31
	Concepción	Concepción, pje 2 n 155	Urbana	Primavera	2009	0,45
	Chiguayante	Porvenir 314	Urbana	Primavera	2009	0,49
	Chiguayante	Fabrica textil	Urbana industrial	Primavera	2009	0,30
	Concepción	CONAMA	Urbana	Otoño	2010	3,20
	Concepción	Kingston College	Urbana	Otoño	2010	1,50
	Chiguayante	Porvenir 314	Urbana	Otoño	2010	3,30
	Chiguayante	Fábrica textil	Urbana industrial	Otoño	2010	2,10
	Penco		Urbana	Otoño	2010	2,00
	Concepción	Pje 2 nro 155	Urbana	Otoño	2010	2,20
	Concepción	CONAMA	Urbana	Otoño	2010	2,90
	Concepción	Kingston College	Urbana	Invierno	2010	1,50
	Chiguayante	Porvenir 314	Urbana	Invierno	2010	3,40
Concepción	Oficina CONAMA	Urbana	Invierno	2010	2,50	
Chiguayante	Fábrica textil, santista	Urbana industrial	Invierno	2010	2,60	
Sur	Coronel	UDT	Urbana	Invierno	2009	0,75
	Coronel	UDT	Urbana	Verano	2009	1,76
	Hualqui		Urbana	Invierno	2009	0,89
	Hualqui		Urbana	Verano	2009	1,50

Coronel	FPC, San Pedro	Urbana industrial	Invierno	2009	0,69
Coronel	FPC, San Pedro	Urbana industrial	Verano	2009	1,25
Coronel	Pesquera Camanchaca	Urbana industrial	Invierno	2009	1,80
Coronel	Pesquera Camanchaca	Urbana industrial	Verano	2009	2,67
Coronel	FPC, San Pedro	Urbana industrial	Primavera	2009	2,10
Coronel	UDT	Urbana	Primavera	2009	0,39
Coronel	Pesquera Camanchaca	Urbana industrial	Primavera	2009	0,52
Hualqui		Urbana	Primavera	2009	0,34
Hualqui		Urbana	Otoño	2010	1,50
Coronel	Pesquera Camanchaca	Urbana industrial	Otoño	2010	2,70
Coronel	FPC, San Pedro	Urbana industrial	Otoño	2010	1,20
Coronel	UDT	Urbana	Otoño	2010	1,80
Coronel	FPC, San Pedro	Urbana industrial	Invierno	2010	1,00
Coronel	Pesquera Camanchaca	Urbana industrial	Invierno	2010	3,40
Hualqui		Urbana	Invierno	2010	2,50
Coronel	UDT	Urbana	Invierno	2010	1,50

Tabla 31: Datos recopilados de nivel de benceno en Europa y América. Fuente: Elaboración propia a partir de Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment. Abinaya Sekar, George K. Varghese, M.K. Ravi Varma, 2019

Continente	País	Lugar	Año	Nivel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Europa	España	La Coruña	2000	3,06
	España	La Coruña	1996	9,48
	Italia	Verona	2012	1,81
	Italia	Roma	2011	3,29
	Italia	Roma	2011	2,04
	Italia	Roma	2011	1,53
	Italia	Roma	2011	2,01
	Italia	Torino	2005	3,2
	Italia	Pragelato	2005	1,7
	Italia	noreste	1998	2,3
	Italia	noreste	1998	10,3
	Holanda	Cabauw	2000	1,4
	Francia	zona norte	2009	4,9
	Francia	Douai, Dunkerque y Marsella	2004	1,55
	Francia	Lille	1999	0,61
	Grecia	llanura de Lakki, Isla Nisyros	2012	5,4
	Grecia	Mandraki, Isla Nisyros	2012	22
	Grecia	la costa norte, Isla Nisyros	2012	0,5
	Grecia	el borde de Lakki Caldera	2012	0,19
	Polonia	Sopot	2012	0,63
	Polonia	Gdansk y Gdynia (ciudades portuarias)	2011	1,255
	Polonia	Zabrze	2005	2,8
	Polonia	Zabrze	2001	8,1
Suecia	zona noreste, costa	2001	8,85	
Alemania	Schleswig-Holstein	2000	2,9	
Bélgica	carreteras	1995	3,07	
Hungría	carreteras	1995	2,3	
Letonia	carreteras	1995	7,8	
América	Candá		2009	0,93
	Candá		1994	3,6
	EEUU	vecindario Waterfront South, sur de Camden, Nueva Jersey	2005	1,2
	EEUU	vecindario Copewood / Davis Streets, a ~ 1000 m al este de Waterfront South, sur de Camden, Nueva Jersey	2005	1,4
	EEUU	East 7 Mile	2005	7,02
	EEUU	Dearborn	2005	8,29

EEUU	En Deer Park, Texas, cerca de Houston	2003	2,04
EEUU	Pittsburgh, oeste de Pensilvania	2001-2002	0,89
EEUU	Pittsburgh, oeste de Pensilvania	2001-2002	0,69
EEUU	Texas	1999	29,32
Mexico	Nuevo León	2013	55,24
Brasil	Sao Paulo, horas de mucho tráfico	1998	8,29
Argentina	La Plata y áreas vecinas	2000-2002	16,1
Argentina	La Plata y áreas vecinas	2000-2002	3,15
Argentina	La Plata y áreas vecinas	2000-2002	1,64
Argentina	La Plata y áreas vecinas	2000-2002	1,52

Tabla 32: Datos recopilados de nivel de benceno en Oceanía y Asia. Fuente: Elaboración propia a partir de Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment. Abinaya Sekar, George K. Varghese, M.K. Ravi Varma, 2019

Continente	País	Localidad	Año	Nivel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Oceanía	Australia	Cape Grim, Tasmania	2006	0,01
	Australia	océano tropical del hemisferio norte	2006	0,17
Asia	Malasia	Kula Lumpur	2013	58,06
	China	Shenyang, Yucheng, Taihu y Dinghu	2012-2013	2,99
	China	noreste de Beijing	2012	11,98
	China	Hong-Kong, costado de carretera	2011	2,89
	China	Hong-Kong, costado de carretera	2003	4,49
	China	sur de Taiwán	2010	2,55
	China	sur de Taiwán, costero	2010	1,02
	China	en y alrededor del Parque Científico de Hsinchu, Taiwán	2001	4,47
	China	en y alrededor del Parque Científico de Hsinchu, Taiwán	2001	0,86
	China	en y alrededor del Parque Científico de Hsinchu, Taiwán	2001	2,26
	China	Changchun, zonas de carretera	1997-1998	38,5
	Japón	Tokio	2004	4
	Japón	Tokio	2003	2,5
	Japón	Tokio	2004	2,3
	Japón	Tokio	2003	4,6
	Japón	Chiba	1999	5,05
	Japón	Chiba	1999	6
	Tailandia	Bangkok, horas pico	2000	28,75
	Tailandia	Bangkok, horas pico	2000	23,6
	Corea del sur		2012-2013	45,5
Corea del sur	ciudad capital	2009	1,79	