



UNIVERSIDAD DE CHILE - FACULTAD DE CIENCIAS
Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología

“USO DE SENSORES PORTÁTILES ELECTROQUÍMICOS PARA EL ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO A NIVEL DE CALLE EN DOS SITIOS DE LA REGIÓN METROPOLITANA”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Química Ambiental.

Carol Andrea Salazar Espinoza

Directora seminario de título: Dra. Yeanice Vásquez Pino
Codirector; Dr. Felipe Reyes Reyes
Profesor patrocinante Dr. Carlos Manzano Davila

Diciembre 2022

Santiago, Chile



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS
Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología

INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la Srta. Carol Salazar Espinoza.

“USO DE SENSORES PORTÁTILES ELECTROQUÍMICOS PARA EL ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO A NIVEL DE CALLE EN DOS SITIOS DE LA REGIÓN METROPOLITANA”

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

Directora Seminario de Título

Dra. Yeanice Vásquez Pino

Codirector

Dr. Felipe Reyes Reyes

Profesor Patrocinante

Dr. Carlos Manzano Davila

Comisión Revisora y Evaluadora

Dr. Richard Toro Araya

Dr. Mauricio Canales Andrades

Santiago de Chile, Diciembre 2022

*De eso se trata, de coincidir con gente
que te haga ver cosas que tu no vez.
Que te enseñen a mirar con otros ojos.*

Mario Benedetti.

BIOGRAFIA



Soy la mayor de 3 hermanos, desde pequeña fui una persona curiosa, pero sobre todo observadora, el entender como ocurrían ciertos fenómenos me llevo inevitablemente a querer acercarme a las ciencias. Ya más grande mi amor por la naturaleza me llevo a desear no solo entender cómo funciona, si no también aprender a conservarlo y protegerlo, fue así como llegue a estudiar Química ambiental.

El poder llevar el conocimiento adquirido estos años a personas que no se encuentran ligada a las ciencias, es algo que me llena profundamente y me motiva a querer seguir aprendiendo y profundizando en diversos temas relacionados con mi área.

AGRADECIMIENTOS

Dar termino a este proceso universitario representa una parte importante de mi vida y debido a esto quisiera agradecer a todas las personas que formaron parte de esta etapa.

Inicialmente quisiera agradecer a la Dra. Yeanice Vásquez por darme la oportunidad de realizar mi seminario de título en Airflux SpA, participando en el proyecto internacional liderado por la Universidad del Este de Finlandia llamado “Transport derived Ultrafines and the Brain Effects “, quien además me oriento y animo en el transcurso de este trabajo.

A todo el equipo Airflux por brindarme las herramientas necesarias para el desarrollo de las campañas de monitoreo y por estar siempre disponible cuando necesite de su ayuda.

De igual manera quiero agradecer al Dr. Felipe Reyes del Centro Mario Molina por apoyarme cuando se presentaron dificultades en el transcurso de este seminario.

Al profesor Dr. Carlos Manzano por su patrocinio y apoyo durante todo el proceso del presente trabajo.

Agradezco infinitamente a mi padre y hermano por su apoyo incondicional y animarme a siempre seguir adelante, gracias por estar siempre que lo necesite.

A Pamela Ayala y Macarena Vidal por alegrarme los días aun cuando parecía difícil, por cada momento que compartimos juntas, por sus consejos y darme el apoyo necesario cuando todo parecía ir mal, sin ustedes este proceso no hubiese sido el mismo.

Finalmente, pero no menos importante, a mis amigos y amigas, que, si bien no podría llegar a mencionarlos a todos, están siempre presente, muchas gracias por su apoyo incondicional, por entender mis tiempos y por creer en mí.

TABLA DE CONTENIDOS

INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
I.INTRODUCCIÓN	1
1.1 CONTEXTO NACIONAL.....	2
1.1.1 PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN AMBIENTAL	3
1.1.2 SISTEMA DE MONITOREO AMBIENTAL.....	4
1.1.3 LEGISLACIÓN AMBIENTAL	6
1.2 SENSORES DE BAJO COSTO.....	8
1.2.1 SENSORES ELECTROQUÍMICOS	9
1.3 TECNOLOGÍA IoT.....	10
1.4 CARACTERIZACIÓN DEL NO ₂	11
1.5 MODELOS ESTADÍSTICOS.....	12
1.5.1 MODELO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	14
1.5.2 MODELO ADITIVO GENERALIZADO.....	14
1.6 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.7 OBJETIVO GENERAL	17
1.8 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
II.METODOLOGÍA	17
2.1 EQUIPOS: DESCRIPCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	19
2.1.1 PLATAFORMA LoV-IoT II	19
2.1.2 SENSORES DE NO ₂	21
2.1.3 ANALIZADOR DE NO/NO _x /NO ₂	24
2.2 ELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MONITOREO.....	26
2.2.1 CAMPAÑA DE MONITOREO EN LA COMUNA DE SANTIAGO	27
2.2.2 CAMPAÑA DE MONITOREO EN LA COMUNA DE PEÑALOLÉN	29
2.2.3 CAMPAÑA DE MONITOREO EN LA COMUNA DE LA FLORIDA.....	31
2.3 SOFTWARE	32
2.4 CALIBRACIÓN DEL SENSOR	33
2.4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS.....	34

2.4.2 SELECCIÓN DE PREDICTORES	35
2.4.3 PREPARACIÓN PREVIA AL ANÁLISIS DE LOS DATOS	37
2.4.4 MODELO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	37
2.4.5 MODELO ADITIVO GENERALIZADO	39
2.5 METRICAS DE RENDIMIENTO	40
2.6 CONCENTRACIONES CAMPAÑAS DE MONITOREO	40
III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
3.1 CALIBRACIÓN DEL SENSOR	43
3.1.1 ANÁLISIS DE DATOS CRUDOS PLATAFORMA	43
3.1.2 DATOS CRUDOS PLATAFORMA Y DATOS SINCA	45
3.1.3 SELECCIÓN DE PREDICTORES	47
3.1.4 MODELO DE REGRESION LINEAL MULTIPLE.....	50
3.1.5 MODELO ADITIVO GENERALIZADO	63
3.2 MÉTRICAS DE RENDIMIENTO EPA.....	67
3.3 CAMPAÑAS DE MONITOREO SDT Y MUNICIPALIDAD PEÑALOLÉN	69
3.5.1 SDT.....	71
3.5.2 MUNICIPALIDAD DE PEÑALOLÉN	75
3.4 COMPARACIÓN CONCENTRACIONES PROMEDIO ENTRE SDT Y M. PEÑALOLÉN.....	79
IV. CONCLUSIONES.....	82
V. BIBLIOGRAFIA.....	83
VII. ANEXOS.....	90
ANEXO 1: FICHA TECNICA ALPHASENSE NO2-B43F	90
ANEXO 2:ESPECIFICACIONES ANALIZADOR QUIMIOLUMINISCENCIA NOX 42i.	91
ANEXO 3: COMPARACION DATOS BRUTOS PLATAFORMA Y DATOS OBTENIDOS DE LA ESTACION DE MONITOREO LA FLORIDA	92
ANEXO 4: ECUACIONES METRICAS DE RENDIMIENTO	93
ANEXO 5: OBJETIVOS DE RENDIMIENTO SUGERIDOS PARA USO DE SENSORES DE BAJO COSTO	95
ANEXO 6: CALIDAD DEL MODELO REGRESION LINEAL MULTIPLE.....	96
ANEXO 7: GRAFICAS DATOS DE PRUEBA MODELO REGRESION LINEAL MULTIPLE	98
ANEXO 8: FUNCION BASICA Y PARAMETRO DE SUAVIZADO	100
ANEXO 9: CALIDAD DEL MODELO ADITIVO GENERALIZADO.....	103

ANEXO 10: CONCENTRACION DE NO ₂ EN LA COMUNA LA FLORIDA	109
ANEXO 11: CORRELACIÓN DE SPEARMAN ENTRE VARIABLES PREDICTORAS, TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA, EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE MONITOREO	110
ANEXO 12: ROSA DE LOS VIENTOS, EPOCA VERANO, EN LA REGION METROPOLITANA.....	111
ANEXO 13: ANÁLISIS EXPLORATORIO DATOS CRUDOS CAMPAÑA DE MONITOREO SDT	113
ANEXO 14: GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE NO ₂ EN EL SITIO SDT CALCULADAS POR EL MODELO DE RLM Y GAM.	114
ANEXO 15: ANÁLISIS EXPLORATORIO DATOS CRUDOS CAMPAÑA DE MONITOREO MUNICIPALIDAD DE PEÑALOLÉN.....	114
ANEXO 16: GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE NO ₂ CALCULADAS EN LA MUNICIPALIDAD DE PEÑALOLÉN POR EL MODELO DE RLM Y GAM	116
ANEXO 17: PROMEDIO TRAFICO VEHICULAR EN SANTIAGO 2021	117
ANEXO 18: VALORES ESTADISTICO T-STUDENT	118

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Actual recomendación de la OMS con relación a la concentración anual y diaria del NO ₂ . Fuente: OMS, 2021.	7
Tabla 2: Características generales del modelo de RLM y GAM.	13
Tabla 3 : Descripción de los sensores utilizados en la plataforma LoV-IoT II	20
Tabla 4: Resumen de las campañas de monitoreo realizadas.	26
Tabla 5: Especificación de los equipos de medición tanto de velocidad y dirección del viento informado por el SINCA y parámetros de las rosas de los vientos realizada.....	41
Tabla 6: Valor mínimo y máximo de humedad relativa medido por la estación de monitoreo oficial La Florida.....	46
Tabla 7: Valor p obtenido al aplicar el test de normalidad Shapiro Wilk.....	49
Tabla 8: Coeficiente de correlación (R ²) de las potenciales variables predictoras respecto a la variable respuesta NO ₂ _SINCA.	49
Tabla 9: Temperatura entregada por la plataforma diferenciada por los cuartiles Q1 y Q3.	50
Tabla 10: Valores coeficiente de determinación entre la concentración de NO ₂ [ppb] referencial y las mediciones de NO ₂ [mV] de los deferentes sensores.	51
Tabla 11: Verificación supuestos del modelo temperaturas bajas.....	52
Tabla 12: Verificación supuestos del modelo temperaturas bajas.....	54
Tabla 13: Modelos utilizados en cada uno de los sensores en el rango de temperaturas bajas, además de incluir graficas de dispersión en cada uno de los sensores, donde los colores corresponden al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).....	55
Tabla 14: Verificación supuestos del modelo temperaturas medias.....	56
Tabla 15: Verificación supuestos del modelo temperaturas medias.....	57
Tabla 16: Modelos utilizados en cada uno de los sensores en el rango de temperaturas medias, además de incluir graficas de dispersión en cada uno de los sensores, donde los colores corresponden al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).....	58
Tabla 17: Verificación supuestos del modelo temperaturas altas.....	59
Tabla 18: Verificación supuestos del modelo temperaturas altas.:.....	60
Tabla 19: Modelos utilizados en cada uno de los sensores en el rango de temperaturas altas, además de incluir graficas de dispersión en cada uno de los sensores, donde los colores corresponden al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).....	61
Tabla 20: Valores de coeficiente de determinación (R ²) entre las concentraciones de NO ₂ [ppb] sensor y equipo referencial en los diferentes sensores.....	62
Tabla 21: Desviación estándar y coeficiente de variación (CV) obtenido la campaña de monitoreo en casa particular.	68
Tabla 22: Correlación de la concentración de NO ₂ [ppb] entre el sensor y equipo de referencia.	68

Tabla 23: Valores RMSE para RLM y GAM.....	69
---	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema inversión térmica y capa de mezcla. Fuente: SEA,2021.....	3
Figura 2: Red MACAM-RM. Los puntos verdes representan las estaciones de monitoreo de calidad del aire que se encuentran conectadas en línea a SINCA.	5
Figura 3: Clasificación de los diferentes principios de funcionamiento en los LCS.	9
Figura 4: Representación funcionamiento de la plataforma IoT. (a) Integración de diferentes sensores. (b) Adquisición de datos y análisis previo en el hardware Ezeio. (c) Nube de almacenamiento de datos Ezeio control. (d) Interfaz del usuario.	11
Figura 5: Diagrama de flujo con los principales pasos en la metodología utilizada.	17
Figura 6: Distribución de los componentes en la plataforma LoV IoT II.	19
Figura 7: Esquema de un sensor electroquímico.....	21
Figura 8: Diagrama de una curva de corriente- voltaje típica.	23
Figura 9: Esquema de flujo de NO _x del modelo 42i	25
Figura 10: Ubicación de instalaciones campañas de monitoreo dentro de la Región Metropolitana.	27
Figura 11: a) Punto rojo en el mapa muestra la ubicación exacta del sitio de monitoreo en la comuna de Santiago, mientras que la flecha indica la orientación de la instalación de la plataforma. b) Fotografía del sitio donde se instaló la plataforma LoV-IoT II.	28
Figura 12: a) Punto rojo en el mapa muestra la ubicación exacta del sitio de monitoreo en la comuna de Peñalolén, mientras que la flecha indica la orientación de la instalación de la plataforma. b) Fotografía del sitio donde se instaló la plataforma LoV-IoT II en la municipalidad de Peñalolén.....	30
Figura 13: a) Punto rojo en el mapa muestra la ubicación exacta del sitio de monitoreo en la comuna de Peñalolén, mientras que la flecha indica la orientación de la instalación de la plataforma. Ovalo rojo indica la ubicación de la estación de monitoreo La Florida. b) Fotografía del sitio donde se instaló la plataforma LoV-IoT II en domicilio particular.....	32
Figura 14: Gráfico de error cuadrático medio residual en función del número de predictores. Fuente: Wilks, 2011.	36
Figura 15: Datos crudos medidos por el sensor NO ₂ _01 durante los primeros 5 días de la campaña de monitoreo en una casa particular.	43
Figura 16 : Gráfico de las respuestas de todos los sensores que se encuentran en la plataforma LoV-IoT II durante la campaña de monitoreo en casa particular.	44
Figura 17: Grafico de dispersión entre la concentración de NO ₂ referenciales y las medidas por los diferentes sensores de NO ₂ . El color corresponde al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).....	47
Figura 18: Gráfico correlación de Spearman entre las variables (A) NO ₂ _09. (B)NO ₂ _01. (C) NO ₂ _02. (D) Sensor temperatura. (E) Sensor humedad relativa.	

(F)NO ₂ _SINCA. (G) Temperatura SINCA. (H) Humedad relativa SINCA. (I) Dirección del viento. (J) Velocidad del viento.....	48
Figura 19: Diagrama de caja para la identificación de valores atípicos en los diferentes sensores. (A) NO ₂ _01. (B) NO ₂ _02. (C) NO ₂ _09.....	53
Figura 20: Transformaciones utilizadas en los diferentes sensores (temperaturas bajas).....	53
Figura 21: Transformaciones utilizadas en los diferentes sensores (temperaturas medias).....	57
Figura 22: Transformaciones utilizadas en los diferentes sensores (temperaturas altas).	59
Figura 23: Gráficos de dispersión entre concentración de NO ₂ [ppb] referencial y los datos obtenidos por los diferentes sensores. (A) Datos crudos. (B) Datos de entrenamiento. (c) Datos de prueba. El color corresponde al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).	63
Figura 24: Grafico de dispersión entre la concentración de NO ₂ referenciales y las concentraciones de NO ₂ datos de entrenamiento. (A) sensor NO ₂ _01. (B) Sensor NO ₂ _02. (C) Sensor NO ₂ _09. El color corresponde al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).	65
Figura 25: Grafico de dispersión entre la concentración de NO ₂ referenciales y las concentraciones de NO ₂ datos de prueba. (A) sensor NO ₂ _01. (B) Sensor NO ₂ _02. (C) Sensor NO ₂ _09. El color corresponde al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).	66
Figura 26: Mapa con rosa de concentración del contaminante NO ₂ en la SDT. Donde los colores entregan información sobre la concentración del NO ₂ , donde las mayores concentraciones se muestran en colores más cálidos (rojos) y menores concentraciones se muestran en colores más fríos (azul).....	73
Figura 27: Variación semanal en la concentración de NO ₂ en el sitio SDT. (A)variación diaria. (B) variación promedio diario.....	74
Figura 28: Variación horaria en la concentración de NO ₂ en el sitio SDT.....	75
Figura 29: Mapa con rosa de concentración del contaminante NO ₂ en la Municipalidad de Peñalolén. Donde los colores entregan información sobre la concentración del NO ₂ , donde las mayores concentraciones se muestran en colores más cálidos (rojos) y menores concentraciones se muestran en colores más fríos (azul).	76
Figura 30: Variación semanal en la concentración de NO ₂ en el sitio Municipalidad de Peñalolén. (A)variación diaria. (B) variación promedio diario.....	77
Figura 31: Variación horaria en la concentración de NO ₂ en el sitio Municipalidad de Peñalolén.	78
Figura 32: Comparación entre promedio de concentración horaria de NO ₂ entre los sitios SDT y Municipalidad Peñalolén. (A) RLM. (B) GAM. Valor significancia (valor p): “***” 0,001; “**” 0,01; “*” 0,05; “NS” no significativo.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS

OMS: Organización Mundial de la Salud.

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

NO₂: Dióxido de nitrógeno.

PPDA: Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental.

SINCA: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire

MACAM: Monitoreo Automático de Contaminantes Atmosféricos y Meteorología

LCS: Sensores de Bajo Costo

RLM: Regresión Lineal Múltiple.

GAM: Modelo Aditivo Generalizado.

RESUMEN

La contaminación del aire es un área de interés mundial por su efecto nocivo tanto en la salud de las personas como en el medio ambiente. Los sensores de aire de bajo costo¹ ayudan a determinar la concentración de contaminantes en lugares específicos de interés científico, donde los equipos de referencia actualmente utilizados no pueden llegar.

El presente trabajo de investigación utilizó 3 sensores electroquímicos de bajo costo, marca Alphasense NO2-B43F, que se encontraban dentro de una plataforma desarrollada por un consorcio internacional liderado por el Instituto Sueco del Medio Ambiente con tecnología IoT (Internet de las cosas).

La primera campaña de monitoreo se llevó a cabo en la Sociedad de Desarrollo Tecnológico (SDT) entre el 28/12/20 y el 11/02/21, mientras que la segunda campaña de monitoreo se realizó en la Municipalidad de Peñalolén entre los días 19/02/21 y el 11/03/21, para finalmente realizar una campaña de monitoreo en una casa particular entre el 07/05/21 hasta el 11/06/21 ubicada aproximadamente 530 m de la estación de monitoreo oficial La Florida.

Se utilizaron dos modelos estadísticos, el modelo de Regresión Lineal Múltiple y el Modelo Aditivo Generalizado con la finalidad calibrar los sensores y de esta forma llevar los datos brutos medidos por el sensor, los que se encontraban en milivoltios (mV) a unidades de concentración en partes por billón (ppb). En ambos se utilizó como

¹ Conjunto integrado de hardware y software que utiliza uno o más elementos de detección, para lograr medir las concentraciones de contaminantes. Esta clase de tecnología no reglamentaria es más económica, portátil y, en general, más fácil de operar que los monitores reglamentarios. (Duvall R. et al 2021)

variable respuesta la concentración de NO₂ medida por la estación de monitoreo La Florida y como variables predictoras los datos obtenidos por los sensores de NO₂, temperatura del sensor y humedad relativa reportada por la estación de monitoreo. Al aplicar las métricas de rendimiento recomendadas por la EPA se obtuvieron R² que varían entre 0,7 y 0,75, sesgos <30%, RMSE~ 9,1 ppb, SD ~15,5 ppb y CV ~41,6%.

Al analizar las concentraciones de NO₂ de las campañas de monitoreo llevadas a cabo tanto en la SDT como en la Municipalidad de Peñalolén se obtuvo que ambos modelos estadísticos son capaces de evidenciar las variaciones en el comportamiento del NO₂ tanto de forma horaria como semanal en ambos sitios monitoreados.

Finalmente, al comparar las concentraciones horarias de NO₂ en la SDT y en la Municipalidad de Peñalolén, se encontraron diferencias significativas (valores p < 0,05; al aplicar t Student) en la mayor parte de las horas del día.

ABSTRACT

Air pollution is an area of global interest due to its harmful effect on both people's health and the environment. Low-cost air sensors² help determine the concentration of pollutants at specific locations of scientific interest, where currently used reference equipment cannot reach.

The present research work showed 3 low-cost electrochemical sensors, brand Alphasense NO₂-B43F, which were found within a platform developed by an international consortium led by the Swedish Institute of the Environment with IoT (Internet of Things) technology.

The first monitoring campaign was carried out in the Technological Development Society (SDT) between 12/28/20 and 02/11/21, while the second monitoring campaign was carried out in the Municipality of Peñalolén between days 02/19/21 and 03/11/21, to finally carry out a monitoring campaign in a private house between 05/07/21 to 06/11/21 located approximately 530 m from the official monitoring station La Florida.

Two statistics were used, the multiple linear regression model and the generalized additive model in order to calibrate the sensors and thus carry out the raw data measured by the sensor, which were found in millivolts (mV) to units of concentration in parts per billion (ppb). In both, the NO₂ concentration measured by the La Florida monitoring station was obtained as a response variable, and the data obtained by the NO₂ sensors, sensor temperature and relative humidity reported by the monitoring station as predictor

² Integrated set of hardware and software that uses one or more detection elements to achieve the measurement of pollutant concentrations. This kind of non-regulatory technology is cheaper, more portable, and generally easier to operate than regulatory monitors. (Duvall R. et al 2021).

variables. By applying the performance metrics recommended by the EPA, R^2 varied between 0.7 and 0.75, biases <30%, RMSE~ 9.1 ppb, SD ~15.5 ppb and CV ~41.6%.

When analyzing the NO_2 concentrations of the monitoring campaigns carried out both in the SDT and in the Municipality of Peñalolén, it was obtained that both statistical models are capable of evidencing the variations in the behavior of NO_2 both hourly and weekly at both sites monitored.

Finally, when comparing the hourly concentrations of NO_2 in the SDT and in the Municipality of Peñalolén, significant differences were found (p values < 0.05; when applying t-Student's) in most hours of the day.

I.INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS), considera como un requisito esencial para la salud y el bienestar humano una buena calidad del aire, sin embargo, la contaminación atmosférica sigue representando una amenaza importante para la salud de la población en todo el mundo, ya que tiene el potencial de afectar tanto la vegetación como a la salud, agravando enfermedades respiratorias y cardiovasculares, además de afectar las condiciones climáticas globales (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2015; Williams et al., 2014) .

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de contaminantes en concentraciones que puedan constituir un riesgo, molestia o daño a la salud de las personas o a la calidad de vida de la población. Estos contaminantes son emitidos a la atmósfera por diferentes tipos de fuentes emisoras, estas pueden ser naturales o antropogénicas (creadas por el hombre) (Servicio de Evaluación Ambiental [SEA], 2021), estos contaminantes además se pueden clasificar como primarios, lo que significa que se emiten directamente desde una fuente o secundarios cuando se forman por reacciones químicas en la atmósfera (Williams et al., 2014).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) identifica seis contaminantes como “contaminantes criterio”, esto debido a la preocupación que generan debido al impacto en la salud y el medio ambiente. Estos contaminantes criterio son:

- Ozono (O₃)
- Material Particulado (MP)

- Monóxido de Carbono (CO)
- Dióxido de Nitrógeno (NO₂)
- Dióxido de Azufre (SO₂)
- Plomo (Pb)

1.1 CONTEXTO NACIONAL

La Región Metropolitana tiene una población aproximada de 7 millones de personas según el último censo realizado en 2017 (Datos Geográficos – Gobierno Regional Metropolitano de Santiago), se encuentra ubicada entre la cordillera de Los Andes y la cordillera de la Costa, donde destacan los relieves montañosos que encierran hacia el centro de la región una amplia y extensa cuenca, la cual tiene un complejo escenario de ventilación debido a los altos cerros que la rodean lo que provoca que los contaminantes recirculen dentro de la cuenca (Decreto N°31, 2016), simultáneamente la región se encuentra con la presencia del anticiclón del Pacífico Sur, fenómeno que produce un centro de altas presiones en que el aire desciende desde las capas altas de la atmósfera, generando inversiones térmicas de subsidencia, donde las temperaturas aumentan antes de disminuir con la altura debido a la compresión del aire (Romero et al., 2010). La altura de la capa de mezcla es la que se encuentra por debajo del límite de la inversión térmica, como se muestra en la Figura 1 y corresponde al volumen donde se produce la mezcla de contaminantes, mientras menor sea la altura donde se produce la inversión térmica, menor será la dispersión de los contaminantes (Clements et al., 2020; SEA, 2021)



Figura 1: Esquema inversión térmica y capa de mezcla. **Fuente:** SEA,2021.

1.1.1 PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Como instrumento de gestión ambiental se estableció un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) en la Región Metropolitana, el cual tiene como objetivo evitar superar y recuperar los niveles de las normas y de calidad del aire, tanto primarias como secundarias en una zona latente o saturada por uno o más contaminantes, con la finalidad de reducir los impactos en la salud de la población (Decreto Supremo N°31, 2016).

En 1996 se estableció el primer PPDA en la Región Metropolitana mediante el Decreto supremo N°131 de 1969 del MINSEGPRES, donde se establece la ciudad de Santiago como zona saturada por material particulado respirable, partículas totales en suspensión, monóxido de carbono y ozono, mientras que se declara zona latente con respecto al dióxido de nitrógeno (Raúl G.E. Morales, 2006) . Posteriormente en el año 2014, a través del Decreto Supremo N°67 del año 2014, el Ministerio del Medio Ambiente declara zona saturada por material particulado fino respirable ($MP_{2.5}$) como concentración de 24 horas, a la Región Metropolitana.

Luego de una revisión en la evolución de la calidad del aire en Santiago, se indica en el Decreto Supremo N°31 del año 2017, que establece plan de prevención y descontaminación atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago que el contaminante NO₂ ya no se encuentra en condición de saturación.

Para lograr cumplir con los objetivos del PPDA, se establecieron ciertas medidas en diferentes sectores, algunas de ellas se enfocan en la disminución de las emisiones provenientes del tráfico vehicular, como la renovación tecnológica del transporte público o el incentivo a la reducción de emisiones y eficiencia energética para la flota de vehículos que operen en los sistemas de transporte público (Decreto supremo N°31, 2016; Decreto supremo N°58, 2003) .

1.1.2 SISTEMA DE MONITOREO AMBIENTAL

El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) es una red de estaciones de monitoreo de la calidad del aire que se distribuyen en todo el territorio nacional y que es administrada por el Ministerio del Medio Ambiente. Se utiliza para monitorear en tiempo real los contaminantes atmosféricos, MP_{2.5}, MP₁₀, O₃, SO₂, NO₂ y CO (Sistema nacional de información ambiental [SINIA], 2020) , dando acceso confiable a información sobre la calidad del aire, para así evaluar el cumplimiento de los estándares nacionales, proporcionar datos confiables para la investigación científica, entre otros (Toro A. et al., 2015).

Conforme con la regulación nacional, el Decreto Supremo N°61 del Ministerio de Salud (MINSAL) en el año 2008 aprueba el reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos, donde las estaciones de monitoreo deben contar con

instrumentos de medición de contaminantes atmosféricos que se encuentren incluidos en la lista de métodos de referencia y equivalentes publicado por la EPA o que tengan certificación por las directivas de la Comunidad Europea (SEA, 2015) los que están diseñados específicamente para producir mediciones confiables y de alta calidad para ser utilizados con fines de monitoreo reglamentario (Rachelle Duvall et al, 2021).

La red de Monitoreo Automático de Contaminantes Atmosféricos y Meteorología (MACAM) cuenta con 10 estaciones de monitoreo dentro de la región Metropolitana (ver Figura 2), las cuales entregan información en línea de los contaminantes atmosféricos de la zona además de información meteorológica, específicamente según la estación de monitoreo, se entrega información sobre parámetros contaminantes como MP_{10} , $MP_{2.5}$, O_3 , SO_2 , NO_x , NO_2 , NO , CO y parámetros meteorológicos como humedad relativa del aire, temperatura ambiente, dirección del viento y velocidad del viento (SINCA, n.d)

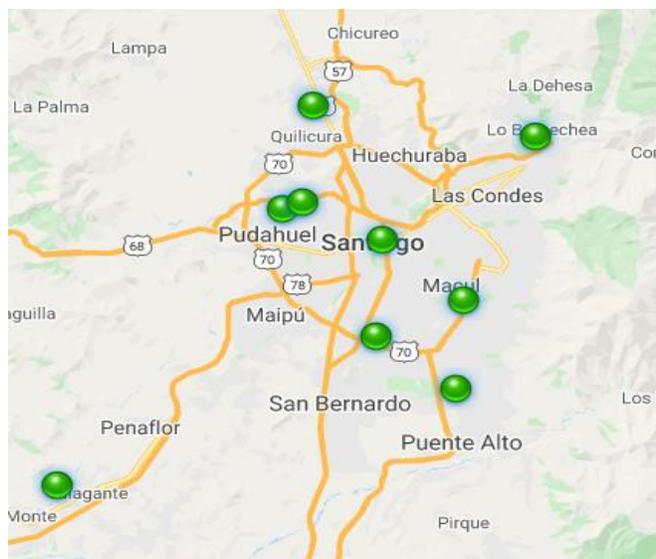


Figura 2: Red MACAM-RM. Los puntos verdes representan las estaciones de monitoreo de calidad del aire que se encuentran conectadas en línea a SINCA.

Fuente: SINCA.

La red de monitoreo existente en la ciudad de Santiago no cuenta con la densidad de estaciones suficiente para poder realizar mapas espacio-temporales para los contaminantes atmosféricos y localizar e identificar fuentes específicas que pueden servir para determinar el éxito de las políticas de descontaminación.

La contaminación atmosférica de las ciudades se concentra en las cercanías de las fuentes emisoras, como sucede a lo largo de las vías de transporte de mayor circulación. Para poder llegar a percibir esta situación se deben tener estaciones de monitoreo instaladas en las cercanías de las fuentes emisoras, lo que no sucede en este caso (Romero et al., 2010), y es a partir de esta problemática que nace la necesidad de introducir nuevas tecnologías de bajo costo y que permitan una mayor cobertura espacial en proyectos de investigación que sean capaces de evaluar políticas públicas como la renovación tecnológica del transporte público, sin embargo, sus potenciales usos también abarcan el uso de sensores en áreas de educación, utilizando sensores como herramientas de enseñanza, monitoreo de exposición personal lo que podría evaluar el impacto de la contaminación en la salud de las personas, o ser utilizados como una red complementaria a las estaciones de monitoreo de la calidad del aire (Williams et al., 2014).

1.1.3 LEGISLACIÓN AMBIENTAL

En el año 2002, el Ministerio Secretaría General de la Presidencia establece en el Decreto Supremo N°114 la norma primaria de calidad de aire para NO₂

- Concentración anual de 53 ppb (100 µg/m³N)
- Concentración horaria de 215 ppb (400 µg/m³N)

En el año 2019 se inicia un proceso de revisión del decreto N°114 debido a los efectos de este contaminante en la salud de la población y como precursor del ozono, además de generar de nueva información acerca de los efectos respiratorios del NO₂ en la salud de las personas (Resolución N°1307 exenta, 2019).

Las directrices de calidad del aire de la OMS publicadas en 2021 establecen nuevas recomendaciones para la concentración de NO₂ (ver Tabla 1), además de proponer metas intermedias con la finalidad de proporcionar una guía para formular políticas que lleven a reducir gradualmente la contaminación del aire hasta los niveles de referencia de la calidad del aire.

	Recomendación	NO ₂ (µg/m ³)
CONCENTRACION ANUAL	Meta intermedia 1	40
	Meta intermedia 2	30
	Meta intermedia 3	20
	NIVEL DE REFERENCIA	10
CONCENTRACION DIARIA	Meta intermedia 1	120
	Meta intermedia 2	50
	NIVEL DE REFERENCIA	25

Tabla 1: Actual recomendación de la OMS con relación a la concentración anual y diaria del NO₂. **Fuente:** OMS, 2021.

Las actuales recomendaciones de la OMS se deben al aumento de la evidencia sobre los efectos adversos de la contaminación del aire en la salud de las personas debido a los avances tanto en la medición de los contaminantes como en la evaluación a la exposición de estos (OMS, 2021).

1.2 SENSORES DE BAJO COSTO

La implementación de nuevas tecnologías en la medición de contaminantes atmosféricos ha tomado especial importancia debido a el costo de un analizador de Óxidos de Nitrógeno es de aproximadamente USD 14.000 (Vásquez Y. et al. 2016). Los equipos de referencia utilizados deben cumplir con los requisitos de precisión de medición, además de un conjunto de procedimientos que garanticen la calidad de los datos. Las estaciones de monitoreo son instaladas en áreas específicas, donde se pueda tener una representación de la calidad del aire, es decir, deben tener representación poblacional. El Decreto Supremo N°59 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, define una estación de monitoreo con representación poblacional (EMRP) cuando esta cumple simultáneamente los siguientes criterios:

- Que exista al menos un área edificada habitada en un círculo de radio de 2 km, contados desde la ubicación de la estación.
- Que esté colocada a más de 15m de la calle o avenida más cercana, y a más de 50m de la calle o avenida más cercana que tenga un flujo igual o superior a 2.500 vehículos/día.
- Que esté colocada a más de 50m de la salida de un sistema de calefacción (que utilice carbón, leña o petróleo equivalente a petróleo-2 o superior) o de otras fuentes fijas similares.

Los sensores de bajo costo, desde ahora llamados LCS, por sus siglas en inglés, surgen de la necesidad de obtener información sobre la concentración de algún contaminante en determinados lugares y con un acceso relativamente más rápido a los datos. Son herramientas portátiles, fácil de instalar y de menor costo en comparación a

una estación de monitoreo (Caquilpán P et al., 2019; Popoola et al., 2018; Spinelle et al., 2015), su valor se encuentra entre los USD 100 - 2.500 (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA] 2017; South Coast AQMD, n.d).

La Figura 3 muestra los diferentes principios de funcionamiento que se pueden utilizar en los LCS para medir las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

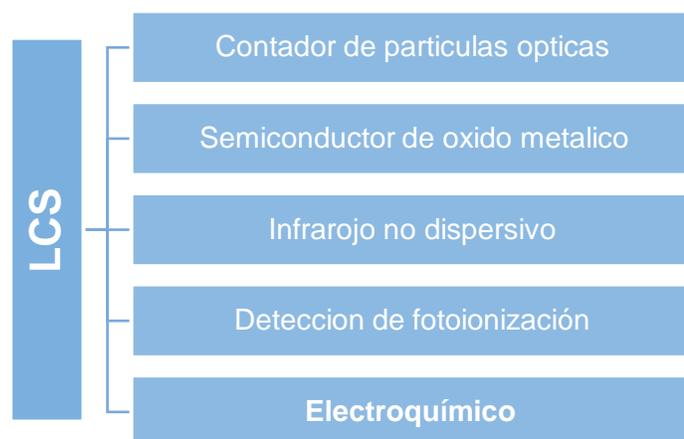


Figura 3: Clasificación de los diferentes principios de funcionamiento en los LCS.
Fuente: Munir et al., 2019.

1.2.1 SENSORES ELECTROQUÍMICOS

Los sensores electroquímicos pueden dividirse en tres grupos según su principio de funcionamiento:

- Sensores amperométricos, miden la corriente generada por la reacción de oxidación o reducción del analito en el electrodo de trabajo a un potencial fijo (Stetter J; 2008).

- Sensores potenciométricos, miden cambios en el potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia (Vázquez I; 2020).
- Sensores conductimétricos, miden el cambio de la conductividad eléctrica en un material a causa de la presencia del compuesto de interés (Escalona L. et al. 2012).

Los sensores ocupados en este trabajo operan de forma amperométrica, lo que quiere decir que miden la corriente producida por la reducción del NO_2 en el electrodo de trabajo a un potencial fijo, la cual es linealmente proporcional a la concentración del NO_2 .

Este tipo de sensores sirven para variadas aplicaciones prácticas, entre ellas para la determinación de gases contaminantes que reaccionan a un proceso de reducción u oxidación, esto debido a que posee un conjunto de características simultáneas como su bajo costo, tamaño reducido, selectividad, baja potencia, sensibilidad, estabilidad y en algunas ocasiones tiempo de respuesta rápido, lo cual que proporciona un rendimiento relativamente alto (Stetter J. et al. 2008; Escalona L. et al. 2012).

1.3 TECNOLOGÍA IoT

El internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés) es un concepto relativamente reciente, que permite la interconexión digital de objetos cotidianos con internet, lo que facilita el acceso a información en tiempo real (López G, et al., 2019). El flujo de información debe ser almacenado, procesado y visualizado posteriormente de forma eficiente.

Esta tecnología permite la conexión de múltiples sensores los cuales envían la información a través de internet a una nube, la que responde a los requerimientos de almacenamiento y procesamiento para una gran cantidad de datos, donde el usuario puede acceder a todos los datos en tiempo real aumentando la capacidad de selección y exploración de los datos (Caquilpán P et al., 2019; Eze system, n.d.; Lounas et al., 2019). La Figura 4 muestra un esquema general del funcionamiento antes mencionado.



Figura 4: Representación funcionamiento de la plataforma IoT. (a) Integración de diferentes sensores. (b) Adquisición de datos y análisis previo en el hardware Ezeio. (c) Nube de almacenamiento de datos Ezeio control. (d) Interfaz del usuario.

Fuente: Eze system.

1.4 CARACTERIZACIÓN DEL NO₂

El NO₂ es un gas de color marrón rojizo con un olor acre característico, en su estado gaseoso es un oxidante, además al absorber la radiación solar visible contribuye con la disminución de la visibilidad atmosférica, por otro lado, es determinante en las concentraciones de ozono en la Troposfera ya que es el único iniciador clave en la formación fotoquímica del ozono tanto en atmósferas contaminadas como las no contaminadas (Organización Mundial de la Salud, 2021).

La concentración de NO_2 en la Región Metropolitana se encuentra dominada principalmente por las emisiones del tránsito vehicular (Gramsch E. et al., 2014), donde la combustión genera tanto NO como NO_2 , sin embargo, el NO se oxida rápidamente para generar NO_2 (Morales, 2006) como se muestra en la ecuación 1 (O'Driscoll et al., 2016)



Las moléculas de NO_2 se disociarán formando ozono (longitudes de onda <424 nm) como lo muestra la ecuación 2 y 3



El NO_2 pueden generarse tanto a partir de fuentes naturales como la actividad volcánica, o emitidos directamente a la atmosfera por fuentes antropogénicas como plantas generadoras de energía térmica, industrias de fertilizantes, por procesos de combustión o la oxidación del óxido nítrico (NO) en la atmósfera (Criollo C. 2018; Campos VP. et al. 2006; Gutiérrez A. 2021; Miranda G. 2017).

1.5 MODELOS ESTADÍSTICOS

La estadística es la disciplina que se aplica al análisis de datos y es posible dividirla en dos grandes grupos, ambos importantes para las ciencias atmosféricas (Wilks D., 2011):

- Estadística descriptiva, la cual hace referencia a la organización y resumen de los datos.

- Estadística inferencial, la cual hace referencia a modelos y procedimientos que se utilizan para sacar conclusiones sobre los procesos subyacentes que generan los datos.

Los modelos estadísticos representan el comportamiento de datos reales de forma aproximada; generalmente estos modelos tienen una variable predictora y variables explicativas. Existen diferentes tipos de modelos estadísticos, este seminario se centrará en la aplicación de dos modelos estadísticos específicos, el modelo de Regresión Lineal Múltiple (RLM) y el Modelo Aditivo Generalizado (GAM, por sus siglas en inglés), ambos utilizados frecuentemente en el uso de sensores de bajo costo al momento de modelar datos reales de NO₂, sus principales características se describen en la Tabla 2.

Tabla 2: Características generales del modelo de RLM y GAM.

	RLM	GAM
Descripción general	Representa la relación lineal entre una variable independiente o respuesta, y dos o más variables dependientes o predictoras.	Representa la relación lineal o no lineal entre una variable independiente o respuesta, y dos o más variables dependientes o predictoras.
Tipo de variable	Paramétrica	Paramétrica No paramétrica
Estructura general del modelo	$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$	$Y = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n)$
Supuestos del modelo	Se debe verificar el cumplimiento de 4 supuestos	No se basa en supuestos

1.5.1 MODELO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

El modelo de RLM describe la relación lineal entre una variable independiente o respuesta, y dos o más variables dependientes o predictoras. Es una de las técnicas estadísticas más utilizadas para el análisis de datos.

Un modelo de regresión que involucra más de una variable predictora se llama modelo múltiple. La ecuación 4 muestra la estructura general del modelo, donde Y representa la variable respuesta, X las variables predictoras, b_0 es la intersección, b_x coeficiente de la variable predictora y ε el error.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon \quad (4)$$

Al aplicar un modelo de regresión lineal múltiple se debe verificar el cumplimiento de cuatro supuestos (Montgomery et al., 2012)

- Residuales se distribuyen normalmente
- Residuales con varianza constante
- Residuales independientes
- Variables predictoras no están correlacionadas

1.5.2 MODELO ADITIVO GENERALIZADO

El GAM surge de la necesidad de modelar datos no lineales y no paramétricos, utilizando para esto funciones de suavizado que conviertan el modelo, en un modelo lineal (Wood, 2017).

La estructura general de un GAM se muestra en la ecuación 5, donde Y representa la variable independiente o respuesta y f_n representan las funciones de suavizado para cada una de las variables predictoras X_n .

$$Y = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n) \quad (5)$$

Una función de suavizado está compuesta por muchas otras funciones más pequeñas que se denominan funciones básicas o funciones base, por lo tanto, una función de suavizado es específicamente la suma de varias funciones base.

Las funciones básicas utilizadas en este trabajo se basan en *Spline* de regresión penalizados, donde la dimensión de la base debe elegirse como parte del proceso de modelado, sin embargo, esta elección solo establece el límite superior en la flexibilidad del modelo, ya que la flexibilidad real se encuentra controlada por el parámetro de suavizado (Wood S., 2017).

Emplear un modelo que sea capaz de calibrar los sensores de forma adecuada es de importancia al momento de obtener las concentraciones de NO_2 en lugares específicos, ya que estos tienen la capacidad de representar el comportamiento de datos reales de forma aproximada. Un buen modelo estadístico será capaz de lograr capturar el comportamiento del NO_2 en los sitios de monitoreo seleccionados dentro de la Región Metropolitana.

1.6 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las campañas de monitoreo realizadas para llevar a cabo el presente trabajo se encontraban enmarcadas en el proyecto internacional liderado por la Universidad del Este de Finlandia llamado “Los ultrafinos derivados del transporte y los efectos cerebrales “(TUBE por sus siglas en inglés), donde su objetivo es estudiar el impacto

inflamatorio, citotóxico y genotóxico de las partículas ultrafinas en los aerosoles de escape generados por distintos tipos de tráfico (Centro Mario Molina, n.d.; CORDIS European commission, 2019).

A partir de los objetivos del proyecto, se decidió seleccionar tres sitios dentro de la Región Metropolitana, dos de los cuales se diferenciaban por la tecnología del transporte público que circulaba por el sector, esto con el objetivo de realizar un posterior análisis de las concentraciones de NO₂ en cada uno de los sitios monitoreados y finalmente una comparación entre las concentraciones ambientales de NO₂ de cada sitio.

Mientras que el tercer sitio seleccionado, se encontraba cercano a la estación de monitoreo oficial La Florida con el propósito de calibrar los sensores de bajo costo, utilizando dos modelos estadísticos diferentes, con el objetivo de encontrar un modelo que lograra obtener el mejor ajuste posible, además de que pudiera capturar la variabilidad ambiental del NO₂.

1.7 OBJETIVO GENERAL

Analizar las concentraciones ambientales de NO_2 en dos sitios diferentes de la Región Metropolitana utilizando sensores electroquímicos de bajo costo con tecnología IoT.

1.8 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar y comparar dos modelos estadísticos en la calibración del sensor con respecto a un instrumento de referencia.
- Evaluar el rendimiento de los modelos estadísticos utilizando las métricas de rendimiento publicados por la EPA para sensores de aire.
- Analizar y comparar las concentraciones ambientales de NO_2 obtenidas a partir de las mediciones en dos sitios diferentes dentro de la Región Metropolitana.

II.METODOLOGÍA

Pasos de la metodología empleada en el presente seminario se detallan en la **Figura 5**

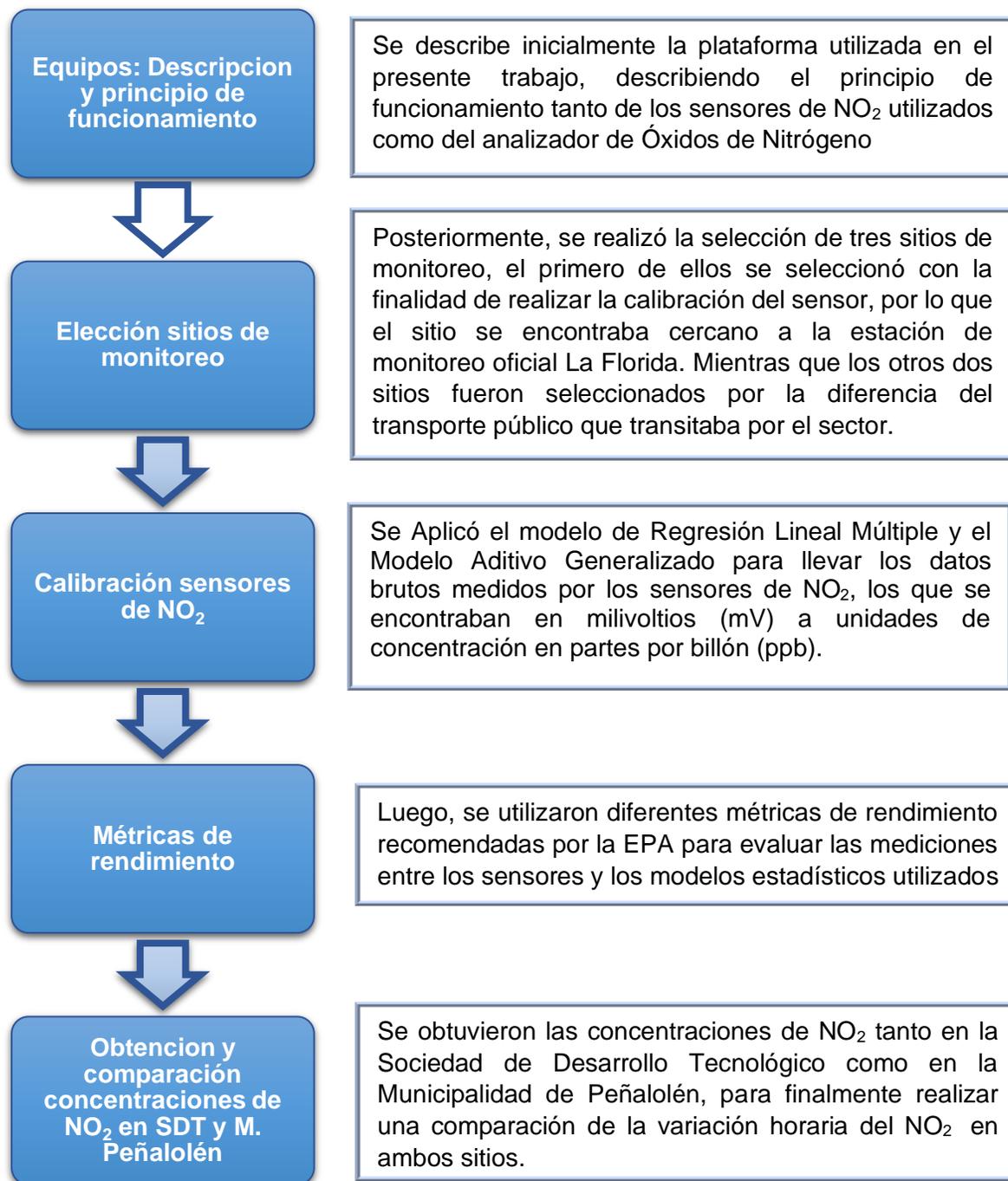


Figura 5: Esquema con los principales pasos en la metodología utilizada.

2.1 EQUIPOS: DESCRIPCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

2.1.1 PLATAFORMA LoV-IoT II

La plataforma LoV-IoT II (LoV, del sueco aire y agua; IoT, del inglés internet de las cosas) fue desarrollada por un consorcio internacional liderado por el Instituto Sueco del Medio Ambiente (IVL) para el monitoreo ambiental de la calidad del aire utilizando sensores y tecnología IoT para el acceso eficiente a los datos. La Figura 6 muestra la distribución de los componentes dentro de la plataforma.

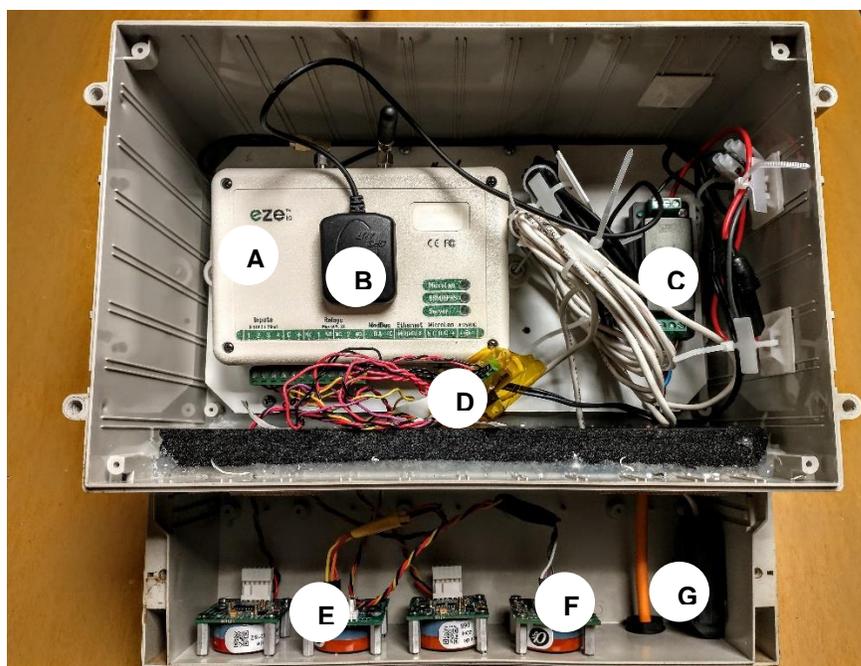


Figura 6: Distribución de los componentes en la plataforma LoV IoT II. (A) Controlador Eze_{io}. (B) GPS. (C) Transformador. (D) Sensores de temperatura y humedad relativa. (E) Sensores Alphasense NO₂- B43F. (F) Sensor Alphasense SO₂- B4. (G) Salida de alimentación.

Los datos se recopilan mediante cuatro sensores de calidad del aire, tres de ellos miden NO_2 y el restante mide SO_2 , además incluye otros sensores que miden la temperatura y humedad relativa. Posteriormente estos datos se transfieren a través de internet utilizando su modem 3G/4G integrado (habilitado por una suscripción de tráfico de datos), esta conexión a internet se utiliza entre otras cosas para enviar los datos de los sensores a una nube de almacenamiento de datos (Lindén et al., 2020). Finalmente es posible acceder a todos los datos en tiempo real a través de la interfaz web ezecontrol³.

La Tabla 3, muestra la descripción de todos los sensores que componen la plataforma, la ficha técnica de los sensores Alphasense se encuentra ubicada en el ANEXO 1.

Tabla 3 : Descripción de los sensores utilizados en la plataforma LoV-IoT II

Sensor	Fabricante	Identificación	Unidad de medida
3 sensores NO_2	Alphasense NO2-B43F	NO2-01 NO2-02 NO2-09	Milivoltios (mV)
Temperatura	Bosh BME 280 Adafruit	#3834/ML Temperature	Grados Celsius (°C)
Humedad relativa	Bosh BME 280 Adafruit	#3834/ML RH	Porcentaje (%)

A través de la interfaz web ezecontrol es posible, además de visualizar los datos en tiempo real, descargar los voltajes medidos por los sensores de NO_2 , el voltaje suministrado y los datos de temperatura y humedad relativa. Además, es posible realizar

³ <https://ezecontrol.com/index.php>

la descarga histórica de los datos o seleccionar alguna fecha de interés. Por otro lado, se entrega a través del GPS integrado los datos de posición de la plataforma (latitud, longitud y elevación).

2.1.2 SENSORES DE NO₂

Los sensores NO₂-B43F son fabricados por Alphasense⁴, son celdas electroquímicas que operan de modo amperométrico, por lo que generan una corriente que es proporcional a la concentración del gas (Alphasense Application Note 104). Esta corriente se genera por el flujo de electrones producido por la reducción del NO₂ en el electrodo de trabajo, los cuales migran al contraelectrodo. La Figura 7 muestra de forma esquemática la estructura de un sensor de gas.

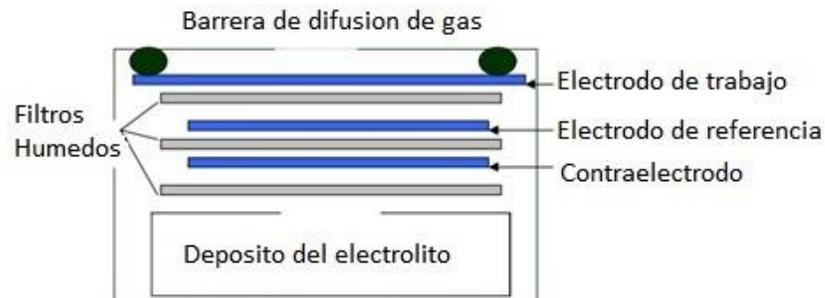


Figura 7: Esquema de un sensor electroquímico.

Fuente: Alphasense Application Note 104.

La barrera de difusión es una membrana porosa y permeable al gas objetivo, que puede ser fabricada con materiales poliméricos o inorgánicos (la mayoría son películas de teflón sólidas muy delgadas) que se usa para controlar el flujo de gas hacia el sensor

⁴<https://www.alphasense.com/>

y ayuda a la selectividad, permitiendo que ingrese el analito de interés y proporciona además una barrera para evitar la fuga del electrolito desde el interior del sensor (Stetter & Li, 2008)

El analito se transporta a la superficie del electrodo mediante difusión, por lo que este mecanismo de captación responde a un gradiente de concentración del contaminante. El proceso físico que regula este mecanismo se puede explicar por la ley de difusión de Fick la cual relaciona el flujo de un gas, que se difunde desde una región de alta concentración, con el tiempo de exposición y el área de la membrana donde se capta el contaminante (Madruga G., 2013)

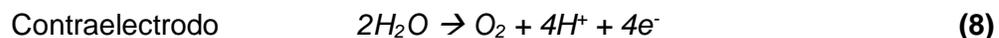
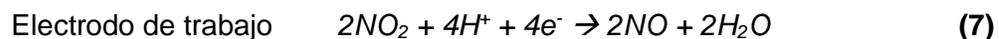
La ecuación 6 corresponde a la primera ley de Fick, donde el flujo de materia hacia el electrodo depende del coeficiente de difusión ($-D$) y el gradiente de concentración (∇C) (Arroquia Cobos, 2016).

$$J = -D * \nabla C \quad (6)$$

El electrodo de trabajo permite que el gas entre en contacto con la superficie del electrodo y el electrolito para crear una interfaz trifásica de gas, líquido y sólido. En su superficie ocurre la reducción de NO_2 y debe tener un potencial de valor fijo respecto al electrodo de referencia. Por otro lado, el contraelectrodo equilibra la reacción del electrodo de trabajo por lo que oxida una molécula de agua para generar una corriente equivalente, en sentido opuesto. A diferencia del electrodo de trabajo el potencial del contraelectrodo puede variar, ya que cuanto mayor sea la concentración del gas a medir, más debe trabajar el contraelectrodo para mantener el equilibrio de la reacción.

El fabricante no entrega las reacciones que se producen tanto en el electrodo de trabajo como en el contraelectrodo para el gas NO_2 , sin embargo, Joseph R. Stetter y

Jing Li en 2008 entregan las siguientes reacciones de oxidación-reducción, las cuales se muestran en la ecuación 7 y 8 (Stetter & Li, 2008):



El electrodo de referencia se encarga de anclar el potencial del electrodo de trabajo para garantizar su funcionamiento en la región correcta de la curva de corriente-voltaje (ver Figura 8). Es importante que tenga un potencial estable ya que de esta forma mantiene al electrodo de trabajo en el potencial electroquímico correcto para mantener una sensibilidad constante, una buena linealidad y una sensibilidad mínima a los gases interferentes.



Figura 8: Diagrama de una curva de corriente-voltaje típica.
Fuente: Alphasense Application Note 104

La región de meseta abarca varios cientos de milivoltios donde la corriente generada es casi independiente del potencial aplicado, y se conoce como corriente

limitada por difusión o transporte. Cuando se opera en la meseta, la corriente medida depende linealmente de la concentración del gas que se está midiendo.

El circuito potencioestático se encarga de proporcionar la corriente y voltaje suficiente para mantener el electrodo de trabajo al mismo potencial que el electrodo de referencia, además de proporcionar la cantidad suficiente de corriente al contraelectrodo para que pueda funcionar al potencial que requiera.

El electrolito proporciona contacto eléctrico iónico entre los electrodos, para esto cuenta con la ayuda de los filtros humectantes, para permitir el transporte capilar del electrolito que generalmente es ácido sulfúrico entre 3 y 7 M.

2.1.3 ANALIZADOR DE NO/NO_x/NO₂

El equipo de referencia utilizado por la estación de monitoreo oficial La Florida, es el analizador de quimioluminiscencia de NO_x modelo 42i, el cual tiene una alta sensibilidad y linealidad en todos los rangos. Las especificaciones técnicas del equipo se encuentran en el ANEXO 2.

El manual de instrucciones del analizador, indica que su principio de funcionamiento se basa en la reacción entre el óxido nítrico y el ozono lo que produce una luminiscencia con una intensidad proporcional a la concentración de NO, la ecuación 9 representa la reacción antes mencionada (Thermo Fisher Scientific Inc, 2007).



Como se observa en la Figura 9, la muestra de aire fluye a través de un capilar a un convertidor de molibdeno calentado a unos 325°C el cual convierte el NO_2 a NO (un sensor de flujo antes de la cámara de reacción mide el flujo de la muestra). Por otro lado, ingresa al equipo aire seco, el cual pasa por un interruptor de flujo para posteriormente llegar al ozonizador, el cual genera la cantidad suficiente de O_3 para la reacción quimioluminiscente. En la cámara de reacción el NO de la muestra reacciona con el O_3 para generar moléculas de NO_2 excitadas. Finalmente, desde la cámara de reacción los gases se mueven a través del convertidor de O_3 a la bomba y se liberan por la ventilación.

El cálculo de las concentraciones de NO_2 se obtienen a partir de la resta entre el valor de NO y el valor de NO_x .

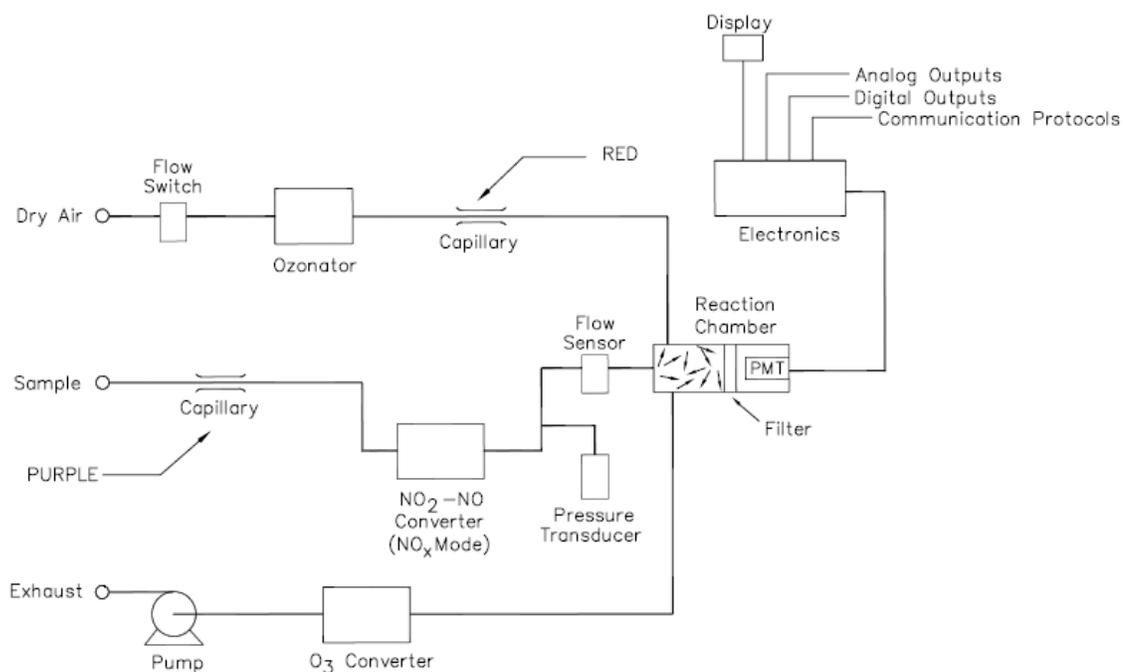


Figura 9: Esquema de flujo de NO_x del modelo 42i

Fuente: Thermo Fisher Scientific Inc, 2007.

2.2 ELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MONITOREO

Se realizó la instalación de la plataforma en la Sociedad de Desarrollo Tecnológico (SDT) y posteriormente la plataforma se instaló en la Municipalidad de Peñalolén. Posteriormente, para la realización del ajuste del sensor, la plataforma fue instalada en una casa particular en las cercanías de la estación de monitoreo oficial La Florida. Idealmente la plataforma debió instalarse dentro de la estación de monitoreo, sin embargo, la contingencia nacional por COVID-19 no lo permitió.

La Tabla 4 indica la ubicación exacta de los sitios seleccionados además de la fecha en que se realizaron las campañas de monitoreo, mientras que la Figura 10 muestra la ubicación donde se realizaron las instalaciones dentro de la Región Metropolitana.

Tabla 4: Resumen de las campañas de monitoreo realizadas.

Sitio de monitoreo	Sociedad de desarrollo tecnológico	Municipalidad Peñalolén	Casa particular
Ubicación	Alameda libertador Bernardo O'Higgins N°1611, Santiago	Avenida Grecia N°8735, Peñalolén.	Isabel Riquelme N°6926, La Florida
Coordenadas UTM	345802.03 m E 6298121.11 m N	356751.25 m E 6294804.67 m S	352416.97 m E 6289799.89 m N
Fecha inicio campaña	28-12-2020	19-02-2021	07-05-2021
Fecha termino campaña	11-02-2021	11-03-2021	11-06-2021
Días de duración	45	21	35



Figura 10: Ubicación de instalaciones campañas de monitoreo dentro de la Región Metropolitana.

2.2.1 CAMPAÑA DE MONITOREO EN LA COMUNA DE SANTIAGO

El monitoreo se realizó a nivel calle por donde circula un alto tráfico vehicular, con un transporte público con tecnología mixta, es decir, transporte público que utilizan diferentes tecnologías, tanto buses eléctricos como buses con diferentes normativas EURO (normativa europea para la emisión de contaminantes).

Especificaciones respecto a la instalación de la plataforma

- ✓ La instalación se realizó en un segundo piso (a 2 metros de altura aproximadamente), con orientación Sur.
- ✓ La plataforma se encontraba a 13 metros aproximadamente de la Avenida Alameda Libertador Bernardo O'Higgins.

La Figura 11 muestra el mapa de la ubicación exacta de la instalación, la orientación de la plataforma en el sitio y una fotografía de la campaña de monitoreo.

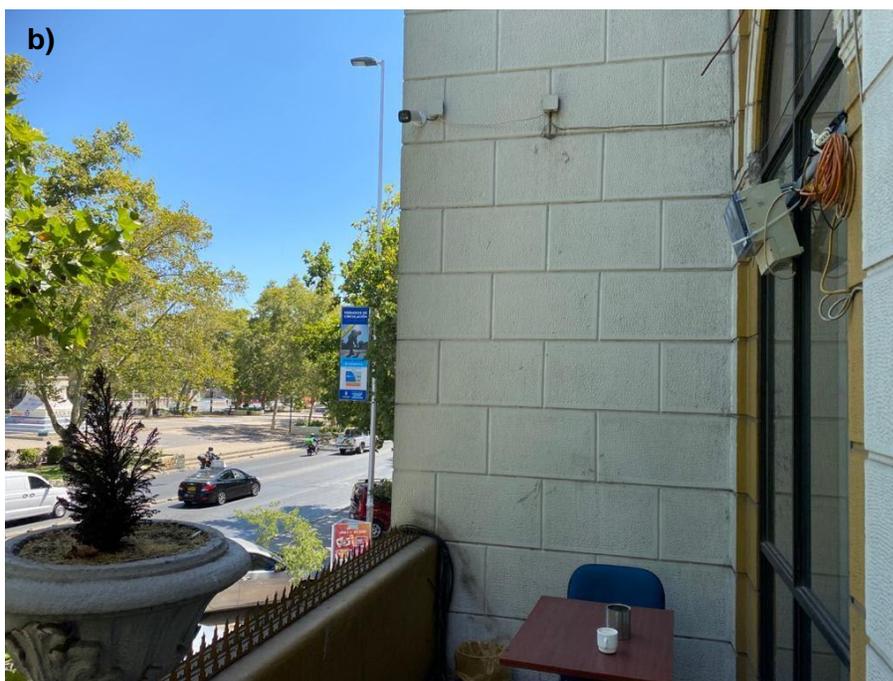
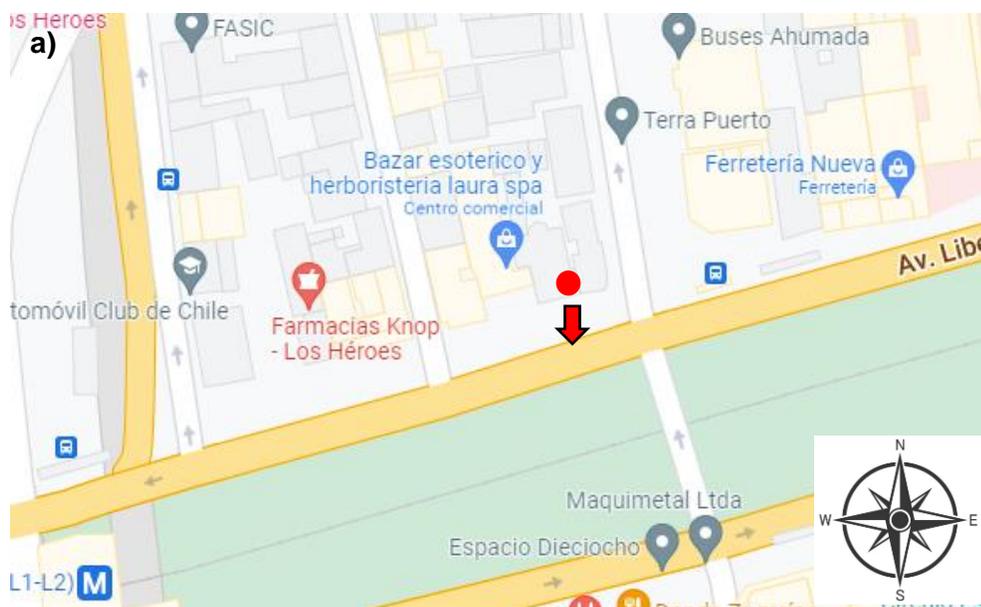


Figura 11: a) Punto rojo en el mapa muestra la ubicación exacta del sitio de monitoreo en la comuna de Santiago, mientras que la flecha indica la orientación de la instalación de la plataforma. b) Fotografía del sitio donde se instaló la plataforma LoV-IoT II.

2.2.2 CAMPAÑA DE MONITOREO EN LA COMUNA DE PEÑALOLÉN

El monitoreo se realizó a nivel calle por donde circula un alto tráfico vehicular además de contar con el primer electro corredor, por lo tanto, el transporte público del sector se caracteriza por ser en su totalidad eléctrico.

Especificaciones respecto a la instalación de la plataforma:

- ✓ La instalación se realizó en un segundo piso (a 2 metros de altura aproximadamente), con orientación Noroeste aproximadamente.
- ✓ La plataforma se encontraba a 33 metros aproximadamente de Avenida Grecia



La

Figura 12 muestra la ubicación exacta de la instalación, la orientación de la plataforma y fotografía del sitio donde se realizó la campaña de monitoreo.

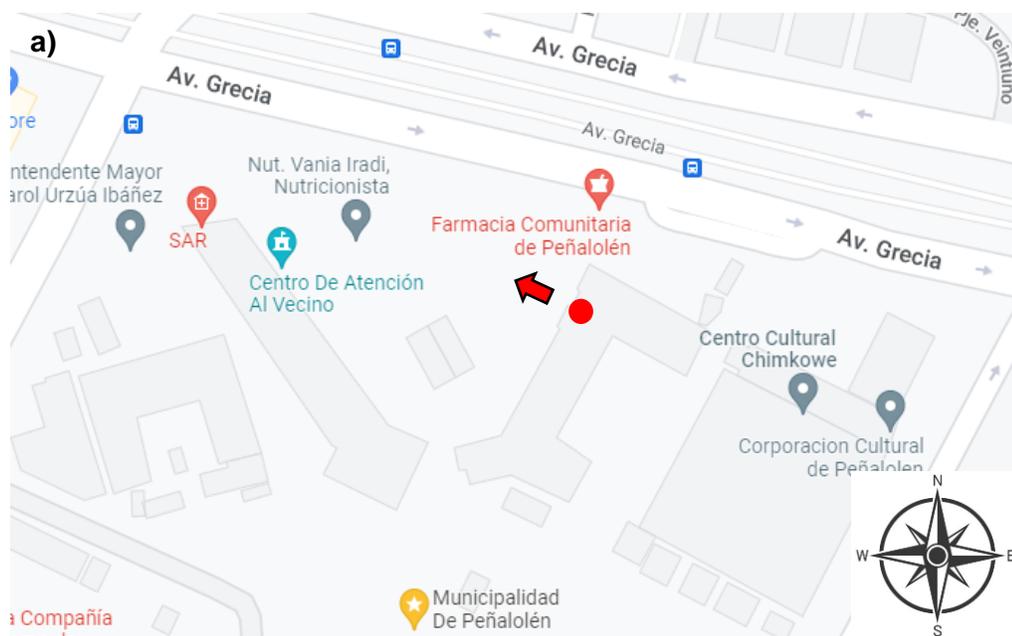


Figura 12: a) Punto rojo en el mapa muestra la ubicación exacta del sitio de monitoreo en la comuna de Peñalolén, mientras que la flecha indica la orientación de la instalación de la plataforma. b) Fotografía del sitio donde se instaló la plataforma LoV-IoT II en la municipalidad de Peñalolén.

2.2.3 CAMPAÑA DE MONITOREO EN LA COMUNA DE LA FLORIDA

La campaña de monitoreo realizada para el ajuste del sensor se llevó a cabo lejos de avenidas principales en una casa particular en las cercanías de la estación de monitoreo oficial La Florida.

Especificaciones respecto a la instalación de la plataforma

- ✓ La instalación se realizó en un segundo piso (a 2 metros de altura aproximadamente), con orientación Este.
- ✓ La plataforma se encontraba a 530 metros aproximadamente de la estación de monitoreo oficial La Florida.

La Figura 13 muestra la ubicación exacta del lugar donde se realizó la instalación de la plataforma y su orientación, además de la ubicación de la estación de monitoreo oficial La Florida. Por otra parte, se muestra una fotografía del sitio de monitoreo.





Figura 13: a) Punto rojo en el mapa muestra la ubicación exacta del sitio de monitoreo en la comuna de Peñalolén, mientras que la flecha indica la orientación de la instalación de la plataforma. Ovalo rojo indica la ubicación de la estación de monitoreo La Florida. b) Fotografía del sitio donde se instaló la plataforma LoV-IoT II en domicilio particular.

2.3 SOFTWARE

El presente trabajo utiliza diferentes softwares para poder llevar a cabo tanto el análisis de los datos como además poder graficarlos de manera adecuada y eficiente.

- ✓ WRPLOT View⁵ fue utilizado para construir rosas de los vientos con los datos meteorológicos obtenidos en la red MACAM-RM⁶ y posteriormente fue posible visualizarlas en Google Earth pro⁷, lo que ayudo a comprender el comportamiento (desde donde vienen o hacia donde van) los vientos dentro de la RM, para el periodo de interés.

⁵ <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>

⁶ <https://sinca.mma.gob.cl/>

⁷ <https://www.google.com/intl/es/earth/>

- ✓ Rstudio⁸, un software gratuito y de código abierto que fue utilizado para realizar el análisis de datos, específicamente para aplicar RLM y GAM en la calibración del sensor, además de utilizar diferentes métodos analíticos que ayudaron a comprender los datos obtenidos en las diferentes campañas de monitoreo.
- ✓ Igor pro⁹, es un software interactivo que se utilizó para realizar gráficas con una alta resolución.
- ✓ Microsoft Excel¹⁰, fue utilizado para realizar el tratamiento previo de los datos proporcionados por el sensor, además de ser utilizado para realizar diferentes tipos de gráficos de forma simple que ayudan a comprender el comportamiento de los datos.

2.4 CALIBRACIÓN DEL SENSOR

La calibración de los sensores es una parte fundamental al momento de utilizar sensores de bajo costo, ya que de esta forma es posible comparar los datos que entregan los sensores con respecto a un instrumento de referencia y saber de esta forma, qué tan confiable son los datos medidos por estas nuevas tecnologías.

Para realizar esta comparación fue necesario:

- Obtener promedios horarios válidos de los datos obtenidos por la plataforma en la campaña de monitoreo en casa particular, ya que las mediciones referenciales entregan sus datos de esta forma.

⁸ <https://www.rstudio.com/>

⁹ <https://www.wavemetrics.com/>

¹⁰ <https://www.microsoft.com/es-cl/microsoft-365/excel>

- Aplicar el modelo de RLM y el GAM para llevar los datos brutos medidos por el sensor, los que se encontraban en milivoltios (mV) a unidades de concentración en partes por billón (ppb).
- Calcular las métricas de rendimiento recomendadas por la EPA para conocer qué tan precisa fue la medición entre los sensores, además de evaluar las concentraciones de NO₂ obtenidos por los diferentes modelos estadísticos utilizados con respecto a las concentraciones entregadas por el instrumento de referencia.

2.4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS

Se realiza en primera instancia un análisis de las señales entregadas por los 3 sensores de NO₂ que se encuentran en la plataforma, con la finalidad de identificar posibles diferencias en el comportamiento inicial de las señales entregadas por cada sensor.

Posteriormente, se realizaron gráficas de series de tiempo de los datos crudos medidos por los diferentes sensores en la casa particular y datos de concentración de NO₂, temperatura y humedad relativa obtenidos de la estación MACAM La Florida con la finalidad de observar posible falta de datos y tendencia entre las señales de los sensores, además de analizar el comportamiento de la señal entregada con efectos meteorológicos como humedad relativa y temperatura medidos por sensores en la plataforma.

Finalmente, se obtuvieron los promedios horarios válidos para los datos entregados por los sensores, esto debido a que la red MACAM entrega los datos de

concentración de los contaminantes de esta forma, lo que permitió realizar la comparación de los datos en las mismas condiciones temporales.

Para que los datos promediados se consideren válidos deben tener una completitud del 75% de los datos en el rango de una hora (Rachelle Duvall et al., 2021).

2.4.2 SELECCIÓN DE PREDICTORES

Los predictores son variables independientes que son utilizadas para explicar el comportamiento de la variable dependiente o respuesta. Existen varios potenciales predictores que pueden utilizarse en los modelos estadísticos, sin embargo, incluir predictores que pueden estar correlacionados complejiza el modelo de forma innecesaria, es por esto por lo que es necesario elegir la cantidad adecuada de predictores para lograr un buen modelo, sin tener un sobreajuste.

La selección de los predictores es un proceso iterativo, donde es importante realizar varias pruebas de diferentes modelos probando con las posibles variables predictoras disponibles, además de posibles interacciones entre estas variables que pudiesen mejorar el modelo sin sobre ajustarlo. Para lograr esto, se suelen utilizar diferentes parámetros como buscar un R^2 lo más cercano a 1 pero con un error cuadrático medio (RMSE) lo más cercano a 0. Un criterio para identificar cuándo se encuentra el número adecuado de variables predictoras es cuando el RMSE no disminuye considerablemente al incorporar otro predictor (Wilks, 2011).

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.14**, muestra un ejemplo de cómo un aumento en el número de predictores (k) no se traduce en una disminución considerable del MSE, utilizando la técnica de validación cruzada para la selección de

los predictores, la cual consiste en probar diferentes modelos hasta lograr encontrar el modelo que obtenga un menor MSE.

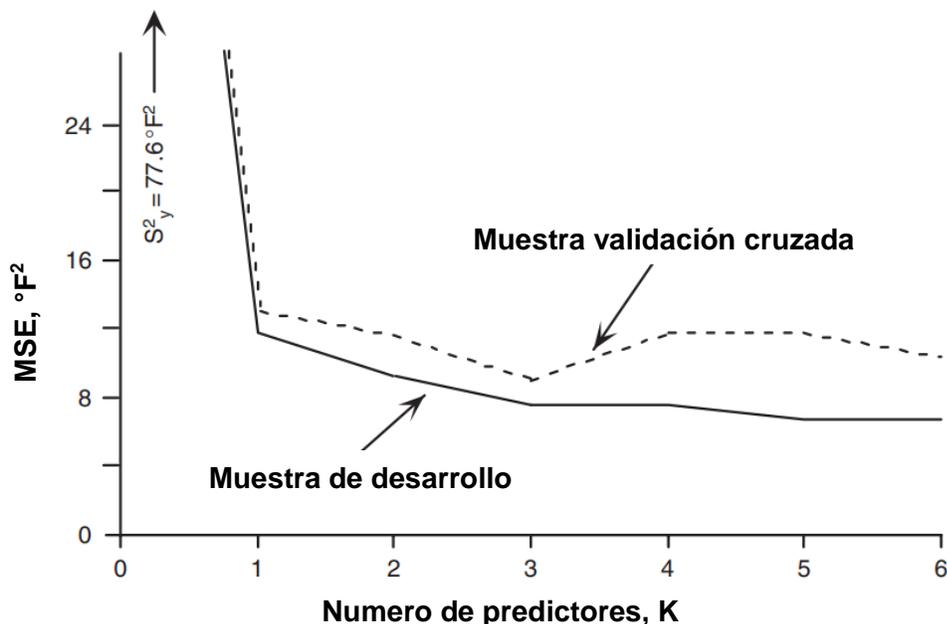


Figura 14: Gráfico de error cuadrático medio residual en función del número de predictores. Fuente: Wilks, 2011.

Se reunieron todos los datos disponibles, los que incluyeron los obtenidos por la plataforma (datos con promedios horarios validos) y los proporcionados por la red MACAM, específicamente los datos de NO_2 , humedad relativa, temperatura, dirección y velocidad del viento obtenidos de la estación de monitoreo oficial La Florida. Se utilizó la correlación de Spearman, un test no paramétrico, para obtener la asociación entre dos variables y utilizarlo como guía para la selección de los predictores. Se utilizó correlación de Spearman ya que entre las variables se encuentran variables no continuas como la dirección del viento.

Las variables predictoras seleccionadas no solo se basaron en un mayor coeficiente de correlación, sino que también fueron seleccionadas a partir del

conocimiento que se tiene sobre el funcionamiento de los sensores electroquímicos utilizados, tomando en consideración los principales interferentes indicados por el fabricante como por ejemplo temperatura y humedad relativa.

2.4.3 PREPARACIÓN PREVIA AL ANÁLISIS DE LOS DATOS

Se realizó una separación aleatoria de los datos, específicamente en dos grupos, datos de entrenamiento y datos de prueba. No existe un consenso actualmente sobre el porcentaje de los datos que serán destinados a ser utilizados como datos de entrenamiento y datos de prueba, sin embargo, varios autores usan porcentajes que se encuentran entre el 65% y 80% del total de los datos para ser utilizados como datos de entrenamiento (Caquilpán P et al., 2019; Malings et al., 2018; Munir et al., 2019; Topalović et al., 2019), los cuales son empleados en la elaboración del modelo estadístico, mientras que el porcentaje restante son usados como datos de prueba para evaluar el rendimiento del modelo.

Debido a lo antes mencionado, se decidió seguir con la metodología propuesta por Ahumada S. (2020) y separar el conjunto de datos de forma aleatoria, utilizando el 70% de los datos como datos de entrenamiento, mientras que el 30 % se utilizó como datos de prueba.

2.4.4 MODELO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Utilizando los datos de entrenamiento se probaron diferentes modelos de RLM, una vez seleccionado el mejor modelo se realizó la verificación de los supuestos del modelo para finalmente aplicarlo a los datos de prueba.

2.4.4.1 VERIFICACIÓN CUMPLIMIENTO DE SUPUESTOS

Se utilizaron las siguientes pruebas estadísticas que se encuentran en el paquete lmtest el cual fue descargado desde el software Rstudio

- Test Durbin-Watson para verificar si los residuales son independientes (Montgomery et al., 2012).
- Test Breusch Pagan para identificar si los residuales tiene una varianza constante (Hernandez B. & Mazo L., 2020).
- Test Shapiro-Wilk el cual identifica si los residuos siguen una distribución Gaussiana (Pedrosa et al., 2014).
- Factor de inflación de varianza (VIF) para verificar que no exista colinealidad entre las variables (Montgomery et al., 2012).

Si al momento de verificar el cumplimiento de los supuestos del modelo, estos no se cumplieron, se utilizaron diferentes técnicas para lograr cumplirlos, entre ellas:

- Detectar valores atípicos entre los residuales, utilizando para esto gráficos de cajas para poder identificarlos y posteriormente eliminarlos.
- Utilización de la transformación Box-Cox (Castaño, E. 2011).

Dependiendo del comportamiento de los datos en cada uno de los sensores en las diferentes temperaturas, se utilizaron diferentes combinaciones de estas técnicas.

2.4.5 MODELO ADITIVO GENERALIZADO

Utilizando los datos de entrenamiento se probaron diferentes funciones básicas, cantidad de nodos y parámetro de suavizado hasta encontrar el mejor modelo, utilizando para esto el Criterio de Información de Akaike (AIC) el cual es un indicador de la relación entre la bondad del ajuste y la cantidad de parámetros requeridos, un menor valor de AIC es un indicativo de un mejor modelo (Crawley, 2013; Wood, 2017) para posteriormente revisar los parámetros utilizados en el modelo y un análisis gráfico de los residuales obtenidos. Finalmente, el modelo seleccionado se aplicó a los datos de prueba.

2.4.5.1 VERIFICACION DEL MODELO

Para indagar sobre el procedimiento de ajuste del modelo elegido se utilizó la información de diagnóstico que proporciono `summary ()` y `gam.check ()` del paquete estadístico `mgcv`, el cual fue descargado desde el software Rstudio.

- `Summary ()`, entrego información sobre la distribución que asume el modelo respecto a la variable respuesta y el R^2 ajustado
- `Gam.check ()`, entrego información respecto a los grados de libertad efectivos (EDF) utilizados en el modelo (indica la complejidad del suavizado), valor p como prueba estadística para los residuos del modelo, además de cuatro gráficas sobre los residuales del modelo.
- `Concurvity ()`, entrego valores que se encuentran entre el rango 0 y 1, y midió la concurvidad entre las variables del modelo, es decir, si la función se encuentra o no completamente en el espacio de uno o más de los otros términos.

2.5 METRICAS DE RENDIMIENTO

Se utilizaron diferentes métricas de rendimiento recomendadas por la EPA para evaluar las mediciones entre los sensores y los modelos estadísticos aplicados (ver Anexo 4). Todos los parámetros usados se calcularon a partir de los datos con promedio horario válido (Rachelle Duvall et al., 2021)

- Desviación estándar (SD), entrego información sobre la distribución de los datos respecto de su media.
- Coeficiente de Variación (CV), entrego la relación entre la desviación de los datos con respecto a la media.
- Sesgo y linealidad, mostro la relación entre las mediciones del sensor y las mediciones de NO₂ de la estación de monitoreo La Florida.
- Error Cuadrático Medio (RMSE), ayudo a comprender el error asociado con las mediciones de la concentración de NO₂ del sensor con respecto a la concentración de NO₂ entregados por la estación de monitoreo La Florida.
- Sesgo, ayudó a clasificar los sensores dentro de los objetivos de rendimiento sugerido por la EPA (Camalier L. et al, 2007)

2.6 CONCENTRACIONES CAMPAÑAS DE MONITOREO

Se obtuvieron dos concentraciones de NO₂ para cada uno de los sitios de monitoreo, una correspondiente al aplicar el modelo RLM y otra al aplicar el GAM, esto con la finalidad de observar si el comportamiento del contaminante depende del modelo estadístico utilizado en la calibración del sensor. Para esto se realizaron gráficas con las diferentes concentraciones obtenidas por RLM y GAM del comportamiento diario y horario del NO₂ en cada uno de los sitios de monitoreo.

Por otro lado, se descargaron los datos de velocidad y dirección del viento en la época de verano, es decir, entre el 21/12/2020 y el 20/03/21 para 5 estaciones de la Red MACAM, específicamente de las estaciones de monitoreos mencionadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la cual además entrega información respecto a las técnicas de medición utilizadas para medir tanto la velocidad como la dirección de viento por las estaciones de monitoreo oficiales consultadas.

Posteriormente se visualizaron en Google Earth las rosas de los vientos realizadas, esto con la finalidad de obtener una idea del comportamiento del viento dentro de la Región Metropolitana, ya que por una parte la velocidad del viento entrega una idea de la concentración de los contaminantes atmosféricos ya que velocidades reducidas permiten la acumulación del contaminante mientras que altas velocidades dispersan las emisiones provocando una disminución en la concentración, por otro lado, la dirección del viento puede llegar a ser relevante ya que permite obtener una idea del transporte de los contaminantes desde determinadas zonas de la región.

Tabla 5: Especificación de los equipos de medición tanto de velocidad y dirección del viento informado por el SINCA y parámetros de las rosas de los vientos realizada.

Estación de monitoreo	Técnica de medición dirección del viento	Técnica de medición velocidad del viento	Fecha	Horario
Los condes Pudahuel Parque O'Higgins La florida El bosque	SENSOR - MET ONE 020C	SENSOR - MET ONE 010C	Entre el 21-12-2020 y 20-03-2021	7:00 -19:00
				19:00 – 7:00

Se realizaron mapas de concentración del NO₂ en cada uno de los sitios de monitoreo, esto con la finalidad de determinar desde que dirección del viento se obtienen las mayores concentraciones del contaminante, utilizando para esto el paquete openairmaps de Rstudio.

Finalmente, se realizaron gráficas comparando la variación horaria de la concentración de NO₂ entre los sitios SDT y Municipalidad de Peñalolén, para posteriormente aplicar el test estadístico t-Student para comprobar si existen o no diferencias significativas entre los sitios.

III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CALIBRACIÓN DEL SENSOR

3.1.1 ANÁLISIS DE DATOS CRUDOS PLATAFORMA

El fabricante indica que el sensor necesitara un tiempo significativo (hasta varias horas) para estabilizarse una vez encendido (Alphasense Application Note 105-03), es debido a esto que se utilizaron los datos del sensor generados al día siguiente de la instalación de la plataforma, asegurando de esta forma que la respuesta del sensor se encuentra estabilizada luego de varias horas conectado a la corriente. Es posible observar esta estabilización en la Figura 15 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se puede notar una diferencia en el comportamiento de la señal medida por el sensor NO2_01 instalado en la campaña de monitoreo en una casa particular entre la señal de voltaje (rectángulo rojo) entregada las primeras horas iniciada la campaña en comparación con la señal a la misma hora durante días posteriores al inicio de la campaña (rectángulos punteados rojos).

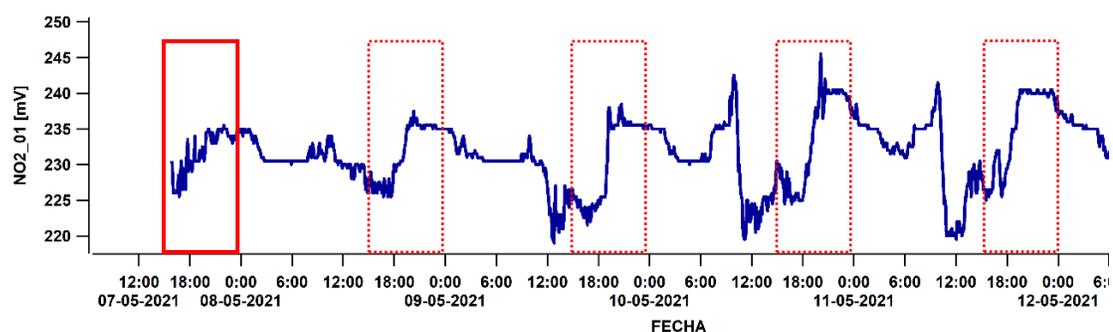


Figura 15: Datos crudos medidos por el sensor NO2_01 durante los primeros 5 días de la campaña de monitoreo en una casa particular.

La Figura 16 muestra la respuesta de los diferentes sensores que se encuentran dentro de la plataforma. No se detectan falta de datos y todos los sensores (NO2_01, NO2_02 y NO2_09) tienen la misma tendencia, diferenciándose entre ellos por el voltaje de estabilización en que trabaja cada sensor. Por otro lado, es posible observar cómo al aumentar la temperatura, la HR disminuye, esto debido a la relación entre estas dos variables, ya que la temperatura define la presión de saturación del vapor de agua, por lo que el aumento o disminución de la temperatura produce cambios en la HR.

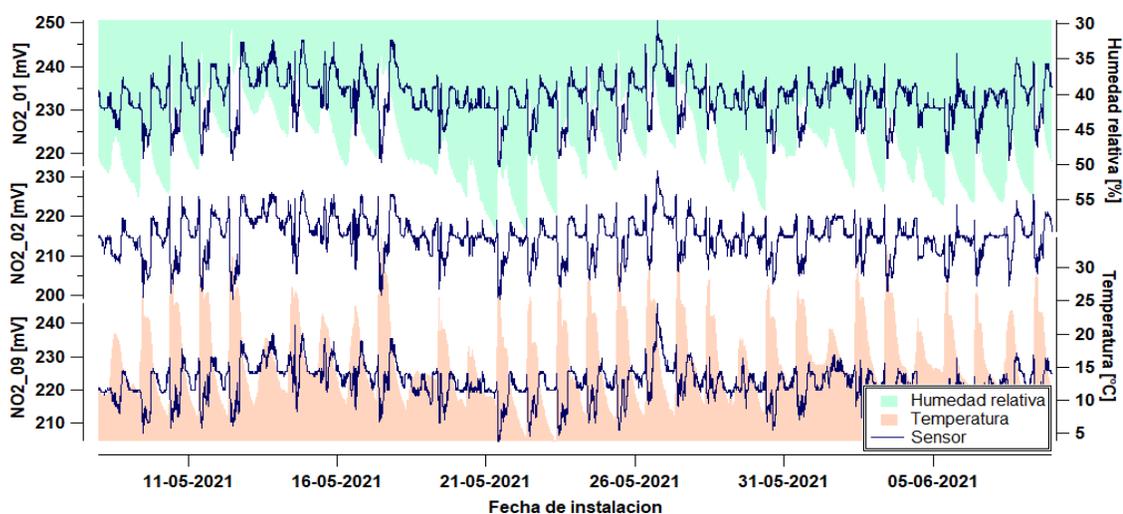


Figura 16 :Gráfico de las respuestas de todos los sensores que se encuentran en la plataforma LoV-IoT II durante la campaña de monitoreo en casa particular.

Otra relación que es posible observar, es el comportamiento del voltaje medido por los sensores de NO₂ con la temperatura medida por la plataforma, ya que cuando existe un máximo en la temperatura, el sensor muestra una disminución del voltaje, mientras que cuando el sensor de temperatura comienza a reportar temperaturas más bajas, el voltaje aumenta.

La correspondencia entre la respuesta del sensor y la temperatura ha sido reportada anteriormente en sensores electroquímicos (Gómez Ortiz, 2016).

El electrolito presente en estos sensores corresponde un ácido fuerte (ácido sulfúrico) por lo que se ioniza completamente y por consiguiente son capaces de conducir corriente eléctrica (Skoog et al., 2014). La solubilidad del NO₂ en el electrolito disminuye con el aumento de la temperatura (Brown et al., 2014), lo que se traduce en una menor concentración del gas en el electrolito y por lo tanto un menor voltaje medido por el sensor. Esto explica la disminución del voltaje a temperaturas elevadas.

3.1.2 DATOS CRUDOS PLATAFORMA Y DATOS SINCA

Los valores máximos y mínimos de humedad relativa que se obtuvieron desde la estación de monitoreo oficial La Florida durante la campaña de monitoreo en la casa particular se detallan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se puede notar como hay valores de HR que se encuentran fuera del rango óptimo de funcionamiento, sin embargo, Alphasense indica que la ganancia o pérdida de agua en el electrolito comienza al tercer día de exposición continua (Alphasense Application Note 106).

Considerando que la máxima exposición del sensor a una HR por sobre el 90% se da durante un día (por un tiempo de 13 horas consecutivas), se puede establecer que el sensor no tuvo pérdida o fuga del electrolito, funcionando de manera óptima durante toda la campaña de monitoreo.

Tabla 6: Valor mínimo y máximo de humedad relativa medido por la estación de monitoreo oficial La Florida.

HR [%]	Campaña de monitoreo Casa particular
Valor mínimo	14,58
Valor máximo	98,83

Una vez separados los datos en forma aleatoria en datos de entrenamiento, correspondiente al 70% de observaciones y en datos de prueba, correspondiente al 30% de las observaciones, se realizaron gráficos de dispersión que relacionan las concentraciones referenciales (Datos SINCA), con las mediciones de los diferentes sensores de NO₂ que se encontraban en la plataforma (específicamente los sensores NO2_01, NO2_02 y NO2_09 y la temperatura medida por la plataforma).

La relación entre las variables se especifica en la 17, donde fue posible observar cómo existe una relación entre las mediciones de NO₂ y la temperatura. Es posible notar como los colores más rojos se concentran en la parte inferior de los gráficos, donde se encuentran los menores voltajes medidos por los diferentes sensores, mientras que los puntos más azules se encuentran en la parte superior del gráfico correspondiente a voltajes más elevados, lo cual ratifica la importancia de incluir la temperatura como una de las variables predictoras.

Por otra parte, los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en la Figura 17, ratifica la importancia de calibrar los sensores introduciendo variables predictoras que ayuden a obtener un mejor modelo estadístico, esto debido a que los LCS tienen interferentes que pueden causar una subestimación o sobrestimación de la concentración del NO₂.

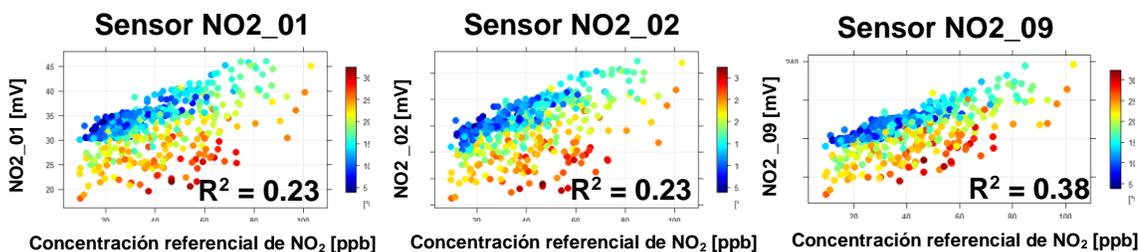


Figura 17: Grafico de dispersión entre la concentración de NO₂ referenciales y las medidas por los diferentes sensores de NO₂. El color corresponde al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).

3.1.3 SELECCIÓN DE PREDICTORES

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.8** muestra los valores de los coeficientes de correlación obtenidos entre cada una de las variables medidas por los diferentes sensores en la campaña de monitoreo en casa particular y las variables obtenidas desde la estación de monitoreo La Florida durante el mismo periodo de tiempo.

Es posible notar en primera instancia que en su diagonal se muestran gráficos de barra, los que muestran como ninguna de las variables sigue una distribución Gaussiana, lo cual se comprobó realizando el test de normalidad Shapiro Wilk (ver Tabla 7**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En la parte inferior se puede apreciar la falta de linealidad (correlación entre variables) entre la mayoría de las variables, sin embargo, se observa una linealidad entre las mediciones de los sensores NO₂_01, NO₂_02 y NO₂_09, lo que se corresponde al ver la parte superior donde los valores de la correlación son los más altos.

Al observar la columna y fila correspondiente a la casilla NO₂_SINCA (marcada en color rojo) es posible seleccionar como posibles variables predictoras (ver tabla 8):

- Utilizando como primer criterio, los valores R² más altos (R² > 0.5)

- Las variables NO2_01, NO2_02, NO2_09, HR plataforma y HR SINCA.
- Utilizando como segundo criterio, el funcionamiento de los sensores electroquímicos y los interferentes indicados por el fabricante
 - Temperatura y humedad relativa.

De esta forma, se descartan las variables dirección y velocidad del viento como posibles variables predictoras.

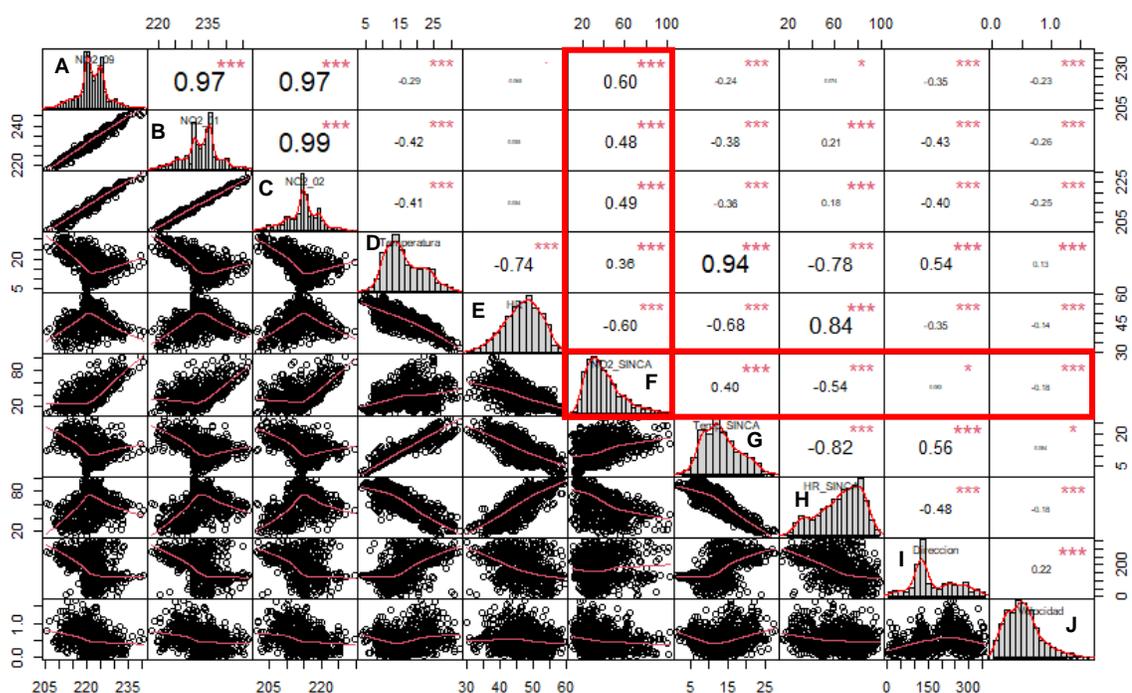


Figura 18: Gráfico correlación de Spearman entre las variables (A) NO2_09. (B)NO2_01. (C) NO2_02. (D) Sensor temperatura. (E) Sensor humedad relativa. (F)NO2_SINCA. (G) Temperatura SINCA. (H) Humedad relativa SINCA. (I) Dirección del viento. (J) Velocidad del viento.

Tabla 7: Valor p obtenido al aplicar el test de normalidad Shapiro Wilk.

Variable predictora	Valor p	Variable predictora	Valor p
NO2_01	8.396e ⁻⁰⁹	NO2_SINCA	< 2.2e ⁻¹⁶
NO2_02	2.097e ⁻⁰⁹	Temperatura SINCA	1.582e ⁻¹⁰
NO2_09	2.662e ⁻⁰⁹	HR SINCA	8.851e ⁻¹⁵
Sensor temperatura	2.616e ⁻¹⁴	Dirección del viento	< 2.2e ⁻¹⁶
Sensor HR	1.908e ⁻⁰⁶	Velocidad del viento	1.462e ⁻¹⁴

Tabla 8: Coeficiente de correlación (R²) de las potenciales variables predictoras respecto a la variable respuesta NO2_SINCA.

Variables	R ²	Significancia
NO2_01	0,48	***
NO2_02	0,49	***
NO2_09	0,60	***
HR plataforma	-0,60	***
HR SINCA	-0,54	***
Temperatura plataforma	0,36	***
Temperatura SINCA	0,40	***

Valor significancia (valor p): "****" 0,001; "***" 0,01; "**" 0,05; "." 0,1; " " 1.

Si bien la temperatura reportada por el SINCA tiene un mayor R² en comparación a la temperatura del sensor, se utilizará esta última como variable predictora, esto debido a que la solubilidad del NO₂ en el electrolito disminuye con el aumento de la temperatura (Brown et al., 2014), lo que se traduce en una menor concentración del NO₂ en el electrolito y por consiguiente un menor voltaje medido por el sensor.

En cuanto a la HR, se opta como variable predictora la entregada por el SINCA, ya que existe una relación entre el electrolito y el vapor de agua en el ambiente. De acuerdo con Alphasense, hay valores extremos de humedad relativa en donde los sensores electroquímicos dejan de funcionar adecuadamente (Alphasense Application Note 106). Esto se debe a que el electrolito perderá agua en humedades bajas y ganará agua en humedades altas.

HR < 15%	Perdida de agua del electrolito
15 % ≤ HR ≤ 90 %	Rango óptimo de funcionamiento
HR > 90%	Ganancia de agua del electrolito

Al estar el área de detección del sensor en contacto con la humedad relativa ambiental y no la humedad relativa medida dentro de la plataforma, se decide ocupar los datos entregados por la estación de monitoreo La Florida.

3.1.4 MODELO DE REGRESION LINEAL MULTIPLE

Para la realización del modelo de regresión se decidió seguir la metodología utilizada en Ahumada S., (2020). Debido a la relación existente entre las mediciones de NO₂ y la temperatura se realizó un modelo de RLM para cada uno de los sensores diferenciando la temperatura por rangos con la finalidad de obtener un mejor modelo. El rango de variables se basará en los cuartiles de la temperatura medida por la plataforma. Por consiguiente, se realizaron 3 modelos de regresión para cada uno de los sensores, los cuales se clasificaron como temperaturas bajas, medias y altas como se detalla en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 9: Temperatura entregada por la plataforma diferenciada por los cuartiles Q1 y Q3.

Temperaturas	Rangos [°C]
Bajas	≤ 11,2
Medias	> 11,2 y < 20,1
Altas	≥ 20,1

Se realizaron nuevamente gráficos de dispersión esta vez con la diferenciación de temperaturas, donde se obtuvieron coeficientes de determinación (R²) más altos en

comparación a R^2 cuando no existe una diferenciación por temperaturas, los valores de esta los R^2 de detallan en la Tabla 10.

Tabla 10: Valores coeficiente de determinación entre la concentración de NO_2 [ppb] referencial y las mediciones de NO_2 [mV] de los diferentes sensores.

Temperaturas [°C]	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
Bajas	$R^2= 0,71$	$R^2= 0,72$	$R^2= 0,78$
Medias	$R^2= 0,68$	$R^2= 0,68$	$R^2= 0,75$
Altas	$R^2= 0,39$	$R^2= 0,36$	$R^2= 0,51$

Existe un mejor ajuste cuando se divide el set de datos en los rangos de temperatura antes mencionados, obteniendo un mejor ajuste a temperaturas más bajas, en comparación a temperaturas medias y altas, comportamiento que se repite en cada uno de los sensores

Para realizar los modelos se agregaron las variables predictoras temperatura de la plataforma y humedad relativa entregada por la estación de monitoreo. La estructura del modelo de RLM que se aplicó tanto a las temperaturas bajas, medias y altas se muestran en las ecuaciones 10, 11 y 12.

$$\text{NO}_2 \text{ SINCA} \sim \text{Sensor} + \text{Temperatura baja} + \text{HR SINCA} \quad (10)$$

$$\text{NO}_2 \text{ SINCA} \sim \text{Sensor} + \text{Temperatura media} + \text{HR SINCA} \quad (11)$$

$$\text{NO}_2 \text{ SINCA} \sim \text{Sensor} + \text{Temperatura alta} + \text{HR SINCA} \quad (12)$$

3.3.3.1 TEMPERATURAS BAJAS

Luego de aplicar el modelo se realizó la verificación de los supuestos del modelo, para cada uno de los sensores. Es posible notar en la Tabla 11 como la homocedasticidad, es decir, la varianza constante de los residuales no se cumple en los

modelos realizados en cada uno de los sensores, además el sensor NO2_02 presenta una no normalidad en sus residuos.

Tabla 11: Verificación supuestos del modelo temperaturas bajas.

Supuestos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
Varianza constante	X	X	X
Residuales independientes	✓	✓	✓
Normalidad de los residuos	✓	X	✓
No colinealidad	✓	✓	✓
R²	0,76	0,76	0,82

En el caso del sensor NO2_02, no se cumplían los supuestos de varianza constante y normalidad, por lo que al utilizar solo la transformación Box-Cox este no lograba corregirlos, esto debido a que esta transformación puede verse afectada por la existencia de valores atípicos (Castaño, E. 2011), lo mismo sucedió con el sensor NO2_01 para el caso de la varianza constante y por ende se decidió eliminar estos valores en primera instancia.

Al realizar un análisis de los valores atípicos en los 3 sensores, se puede observar en la 19 como el error residual en el sensor NO2_02 fue mayor en comparación a los valores encontrados en los otros dos sensores, seguido por los valores atípicos del sensor NO2_01.

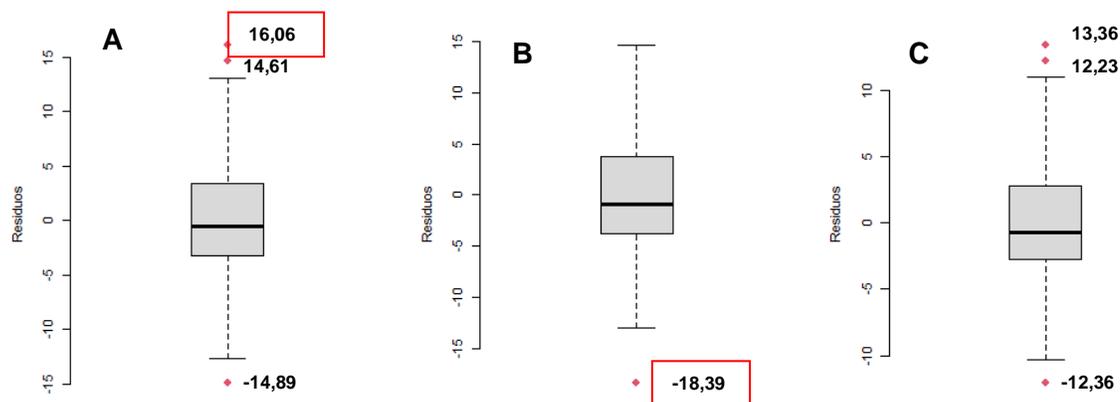


Figura 19:Diagrama de caja para la identificación de valores atípicos en los diferentes sensores. (A) NO2_01. (B) NO2_02. (C) NO2_09.

La Figura 20 especifica el método finalmente utilizado en cada uno de los sensores.

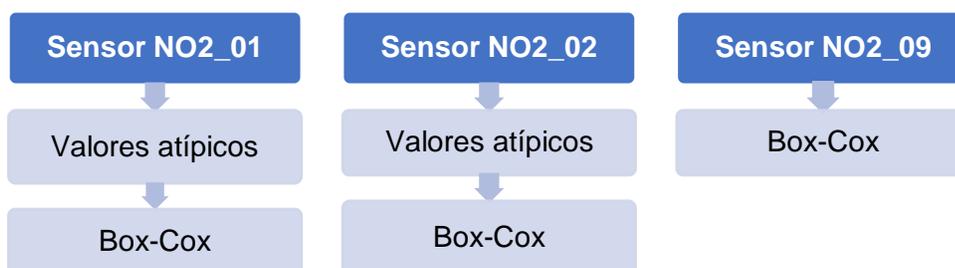


Figura 20:Transformaciones utilizadas en los diferentes sensores (temperaturas bajas).

Luego de aplicar las transformaciones nuevamente se realizó una verificación de los supuestos (ver Tabla 12), donde es posible notar como todos los sensores cumplen con los supuestos del modelo.

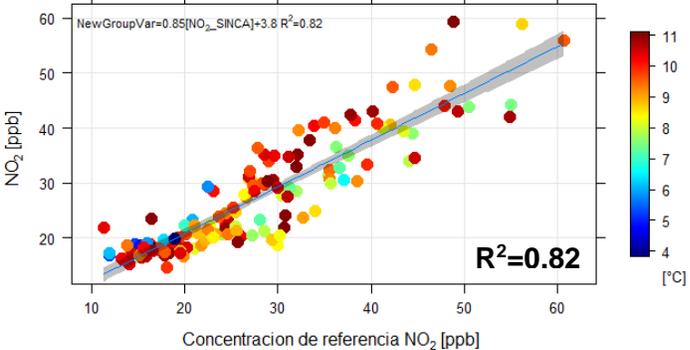
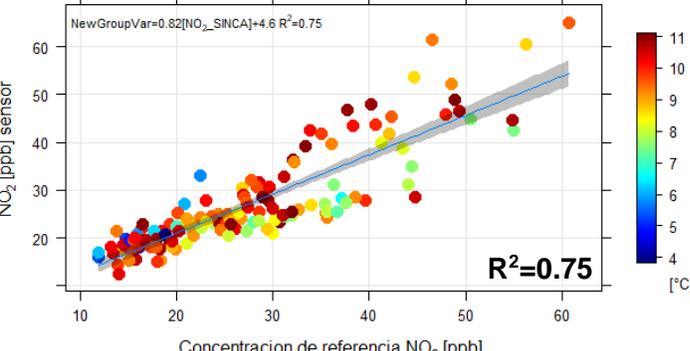
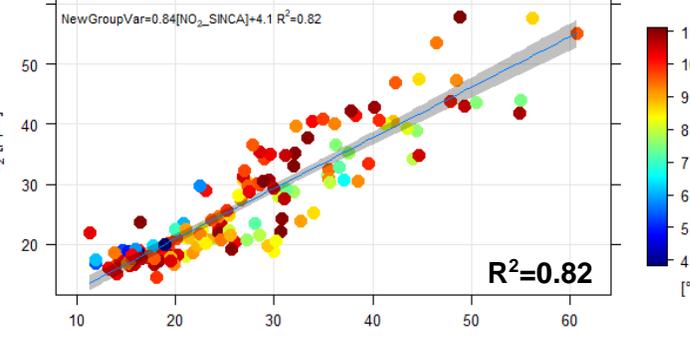
Tabla 12: Verificación supuestos del modelo temperaturas bajas.

Supuestos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
Varianza constante	✓	✓	✓
Residuales independientes	✓	✓	✓
Normalidad de los residuos	✓	✓	✓
No colinealidad	✓	✓	✓
R²	0,77	0,75	0,82

La correlación entre la concentración de NO₂ [ppb] de referencia y la concentración de NO₂ [ppb] medida por los sensores antes y después de las transformaciones aumentó en el caso del sensor NO2_01, y disminuyó en el sensor NO2_02, mientras que el sensor NO2_09 mantuvo el valor de la correlación entre las variables.

Los modelos finalmente utilizados para cada uno de los sensores, sus coeficientes y variables predictoras seleccionadas se detallan en la Tabla 13, junto con graficas de dispersión correspondiente a cada modelo respectivamente.

Tabla 13: Modelos utilizados en cada uno de los sensores en el rango de temperaturas bajas, además de incluir graficas de dispersión en cada uno de los sensores, donde los colores corresponden al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).

Sensor	Modelo estadístico utilizado
NO2_01	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 0,129717(\text{NO2_01}) + 0,017364 (\text{Temperatura baja}) \text{ (13)}$ $- 0,009758 (\text{HR SINCA}) - 26,543256$ 
NO2_02	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 0,0287519(\text{NO2_02}) + 0,0042292(\text{Temperatura baja}) \text{ (14)}$ $- 0,0022370(\text{HR SINCA}) - 4,4236132$ 
NO2_09	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 0,0296978(\text{NO2_09}) - 0,0009427(\text{Temperatura baja}) \text{ (15)}$ $- 0,0018427(\text{HR SINCA}) - 4,8090843$ 

3.3.3.2 TEMPERATURAS MEDIAS

Una vez aplicado el modelo se realizó la verificación de los supuestos del modelo, para cada uno de los sensores, es posible notar en la Tabla 14 como la normalidad y homocedasticidad no se cumplió en ninguno de los modelos realizados en los diferentes sensores.

Tabla 14: Verificación supuestos del modelo temperaturas medias.

Supuestos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
Varianza constante	X	X	X
Residuales independientes	✓	✓	✓
Normalidad de los residuos	X	X	X
No colinealidad	✓	✓	✓
R²	0,85	0,82	0,88

Luego de aplicar diferentes transformaciones en los sensores, se decidió eliminar solo los valores atípicos ejemplificado en la Figura 21, así se logró cumplir con el supuesto de normalidad de los datos para todos los sensores, sin embargo, no fue posible cumplir con el supuesto de heterocedasticidad en los residuales persiste como se detalla en la Tabla 15. Esto probablemente se debe al amplio rango de valores dentro de las temperaturas medias, lo que provoca que el error tenga una variación no constante (Tranmer, M. et al. 2020). La correlación entre la concentración de NO₂ [ppb] de referencia y la concentración de NO₂ [ppb] medida por los sensores aumento al momento de eliminar los valores atípicos en todos los sensores, donde el mejor ajuste se obtiene en el sensor NO2_09.



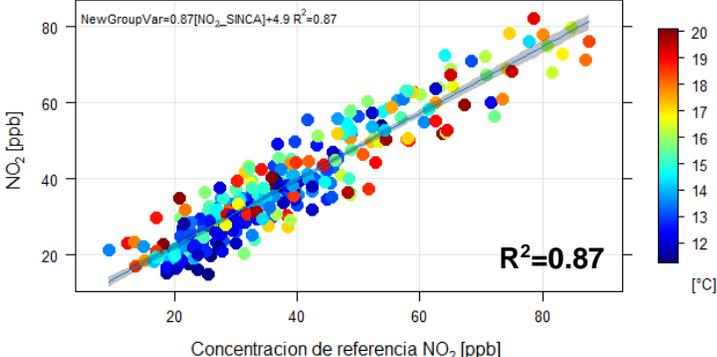
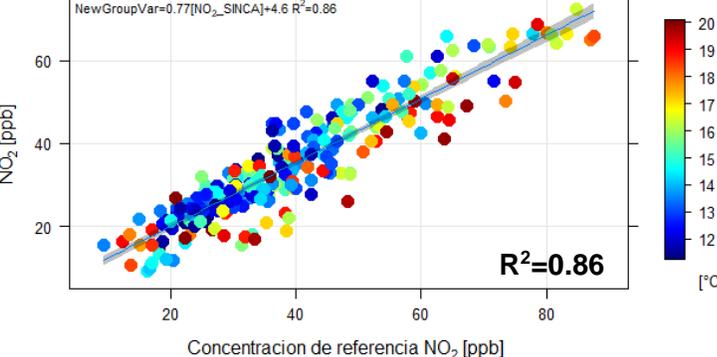
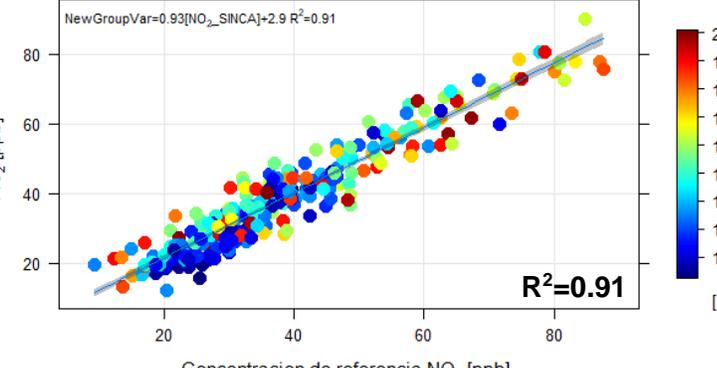
Figura 21: Transformaciones utilizadas en los diferentes sensores (temperaturas medias).

Tabla 15: Verificación supuestos del modelo temperaturas medias.

Supuestos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
Varianza constante	X	X	X
Residuales independientes	✓	✓	✓
Normalidad de los residuos	✓	✓	✓
No colinealidad	✓	✓	✓
R²	0,87	0,86	0,91

Los modelos finalmente utilizados para cada uno de los sensores, sus coeficientes y variables predictoras seleccionadas se detallan en la Tabla 16, junto con graficas de dispersión correspondiente a cada modelo respectivamente.

Tabla 16: Modelos utilizados en cada uno de los sensores en el rango de temperaturas medias, además de incluir graficas de dispersión en cada uno de los sensores, donde los colores corresponden al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).

Sensor	Modelo estadístico utilizado
NO₂_01	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 3,09189(\text{NO}_2\text{-01}) + 1,03296(\text{Temperatura media}) - 0,39993(\text{HR SINCA}) - 674,83572 \quad (16)$ 
NO₂_02	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 3,38105(\text{NO}_2\text{-02}) + 1,11324(\text{Temperatura media}) - 0,37203(\text{HR SINCA}) - 683,84048 \quad (17)$ 
NO₂_09	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 2,95316(\text{NO}_2\text{-09}) + 0,82382(\text{Temperatura media}) - 0,36084(\text{HR SINCA}) - 608,98542 \quad (18)$ 

3.3.3.3 TEMPERATURAS ALTAS

Al igual que en las temperaturas anteriores, luego de aplicar el modelo se realizó la verificación de los supuestos, para cada uno de los sensores. Es posible notar en la Table 17 que no se cumple la homocedasticidad de los residuos en ninguno de los sensores utilizados.

Tabla 17: Verificación supuestos del modelo temperaturas altas

Supuestos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
Varianza constante	X	X	X
Residuales independientes	✓	✓	✓
Normalidad de los residuos	✓	✓	✓
No colinealidad	✓	✓	✓
R²	0,63	0,61	0,64

La transformación de los datos utilizados se detalla en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**²², utilizando la misma transformación en los diferentes sensores.

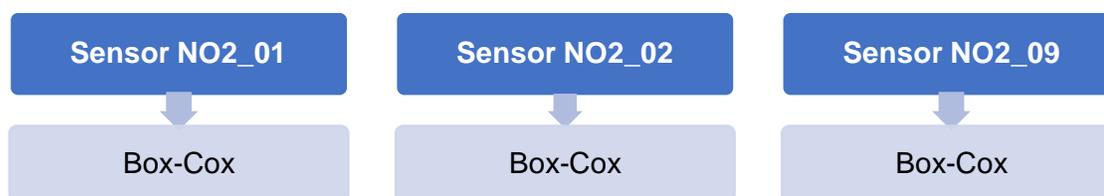


Figura 22: Transformaciones utilizadas en los diferentes sensores (temperaturas altas).

Al aplicar la transformación Box-Cox en los diferentes sensores fue posible cumplir con el supuesto de varianza constante de los residuos como se puede ver en la

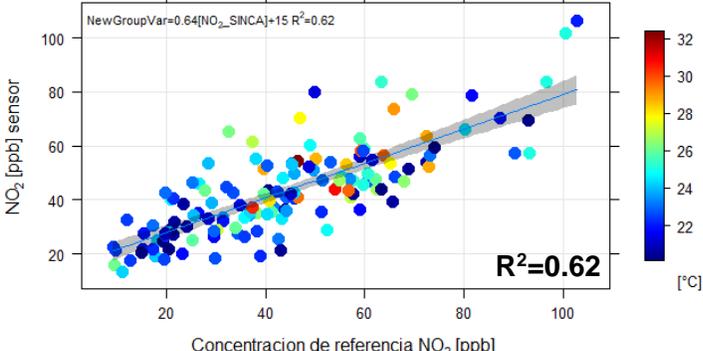
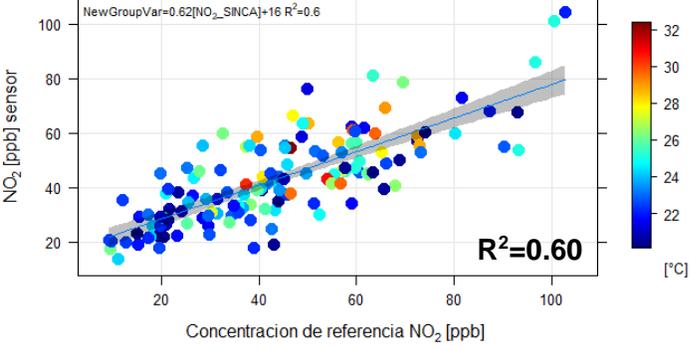
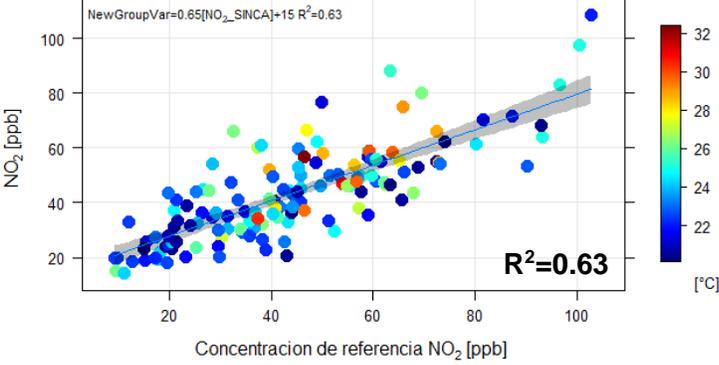
Tabla 18. La correlación entre la concentración de NO₂ [ppb] de referencia y la concentración de NO₂ [ppb] medida por los sensores mejora en el caso de los sensores NO2_01 y NO2_09, mientras que el sensor NO2_09 disminuye la correlación entre las variables una vez aplicada la transformación Box-Cox.

Tabla 18: Verificación supuestos del modelo temperaturas altas.:

Supuestos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
Varianza constante	✓	✓	✓
Residuales independientes	✓	✓	✓
Normalidad de los residuos	✓	✓	✓
No colinealidad	✓	✓	✓
R²	0,62	0,60	0,63

Los modelos finalmente utilizados para cada uno de los sensores, sus coeficientes y variables predictoras seleccionadas se detallan en la Tabla 19, junto con graficas de dispersión correspondiente a cada modelo respectivamente.

Tabla 19: Modelos utilizados en cada uno de los sensores en el rango de temperaturas altas, además de incluir graficas de dispersión en cada uno de los sensores, donde los colores corresponden al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).

Sensor	Modelo estadístico utilizado
NO2_01	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 0,36839(\text{NO2_01}) + 0,38098(\text{Temperatura alta}) - 0,02220(\text{HR SINCA}) - 84,30822 \quad (19)$ 
NO2_02	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 0,37242 (\text{NO2_02}) + 0,38352 (\text{Temperatura alta}) - 0,02336 (\text{HR SINCA}) - 78,65404 \quad (20)$ 
NO2_09	$\text{NO}_2 \text{ SINCA} = 0,292029 (\text{NO2_09}) + 0,272630 (\text{Temperatura alta}) - 0,014348 (\text{HR SINCA}) - 61,720056 \quad (21)$ 

3.3.3.4 DATOS DE PRUEBA

Al aplicar los modelos de las diferentes temperaturas a los datos de prueba, equivalente al 30% del total de los datos, se obtuvieron coeficientes de determinación resumidos en la Tabla 20. Las gráficas correspondientes a cada rango de temperatura y sensor respectivamente se encuentran en el Anexo 7. Es posible notar como los menores R^2 se encuentran en el rango de temperaturas altas ($T > 20,1^\circ\text{C}$), esto debido a la relación existente entre la temperatura y el funcionamiento de los sensores, donde a mayores temperaturas hay una menor solubilidad del NO_2 en el electrolito, además de notar en los gráficos del Anexo 7 como existe una mayor dispersión de los datos a altas temperaturas.

Tabla 20: Valores de coeficiente de determinación (R^2) entre las concentraciones de NO_2 [ppb] sensor y equipo referencial en los diferentes sensores.

Rango de temperaturas	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
Bajas	$R^2= 0,73$	$R^2= 0,71$	$R^2= 0,73$
Medias	$R^2= 0,80$	$R^2= 0,79$	$R^2= 0,83$
Altas	$R^2= 0,53$	$R^2= 0,55$	$R^2= 0,61$

Se juntaron todas las concentraciones obtenidas en cada rango de temperatura en los datos de prueba y se realizaron gráficos de dispersión entre las concentraciones de NO_2 [ppb] del sensor y las entregadas por el equipo referencial. El mismo procedimiento se hizo con los datos de entrenamiento. El cuadro resumen de estos gráficos de dispersión y su respectivo coeficiente de determinación se muestra en la Figura 24.

Es posible notar a partir de la Figura 23 como la correlación entre los datos obtenidos a partir de los diferentes sensores y la concentración referencial de NO_2

mejora significativamente cuando se agregan variables predictoras como la temperatura y humedad relativa al modelo, obteniendo de esta forma el mejor ajuste posible para los datos de NO₂.

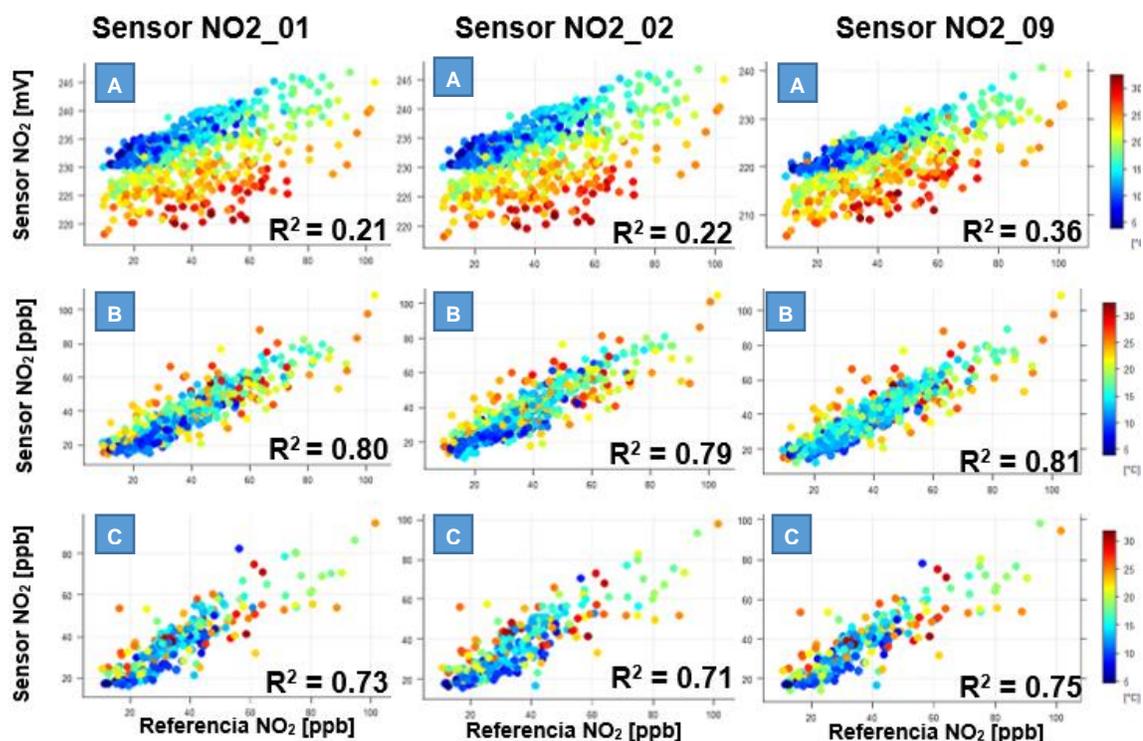


Figura 23: Gráficos de dispersión entre concentración de NO₂ [ppb] referencial y los datos obtenidos por los diferentes sensores. (A) Datos crudos. (B) Datos de entrenamiento. (c) Datos de prueba. El color corresponde al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).

3.1.5 MODELO ADITIVO GENERALIZADO

Se utilizó en mismo set de datos de entrenamiento que se ocupó para realizar el RLM, sin embargo, no es necesario realizar una diferenciación por temperaturas de los datos, esto debido a que este modelo es capaz de capturar relaciones no lineales. El mismo modelo se aplicó a los diferentes sensores (NO₂_01, NO₂_02 y NO₂_09).

El mejor modelo seleccionado utilizó como función básica la base Spline de placa delgada (bs=tp), una cantidad de 10 nodos (k) y el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML, por sus siglas en inglés) como parámetro de suavizado (detalles de la función básica y parámetro de suavizado utilizados, consultar Anexo 8). La ecuación 22 muestra la estructura del modelo utilizado, donde la letra s solo ayudo a configurar el modelo para que este pudiese aplicar la base seleccionada

$$\text{NO}_2 \text{ SINCA} \sim \text{s (Sensor, bs="tp, k=10)} + \text{s (Temperatura, bs="tp", k=10)} + \text{s (HR_SINCA, bs="tp", k=10), method="REML"} \quad (22)$$

Una vez aplicado el modelo para cada uno de los sensores se realizaron gráficos de dispersión entre la concentración de NO₂ obtenido por el sensor y la concentración de NO₂ referencial. La Figura 24 muestra lo diferentes valores de correlación que se obtuvieron para cada uno de los sensores.

Para examinar la calidad del modelo se analizó en primera instancia la importancia de los términos suaves utilizados en cada uno de los modelos, donde todos obtuvieron:

- Valor $p < 2 \cdot 10^{-16}$ significativo, por lo que todos los términos suaves tienen un efecto sobre la variable respuesta.

Posteriormente se realizó la verificación de la base, donde es posible notar:

- Los grados de libertad efectivos (edf) y el número de funciones básicas (k'), en cada uno de los sensores, muestra que los edf de cada una de las variables no se encuentran cercanos al valor k', y donde el valor p

entregado indica que los residuales para cada una de las variables se distribuyen aleatoriamente.

Existen suficientes funciones básicas para lograr la suavidad adecuada en cada una de las variables en cada uno de los modelos realizados.

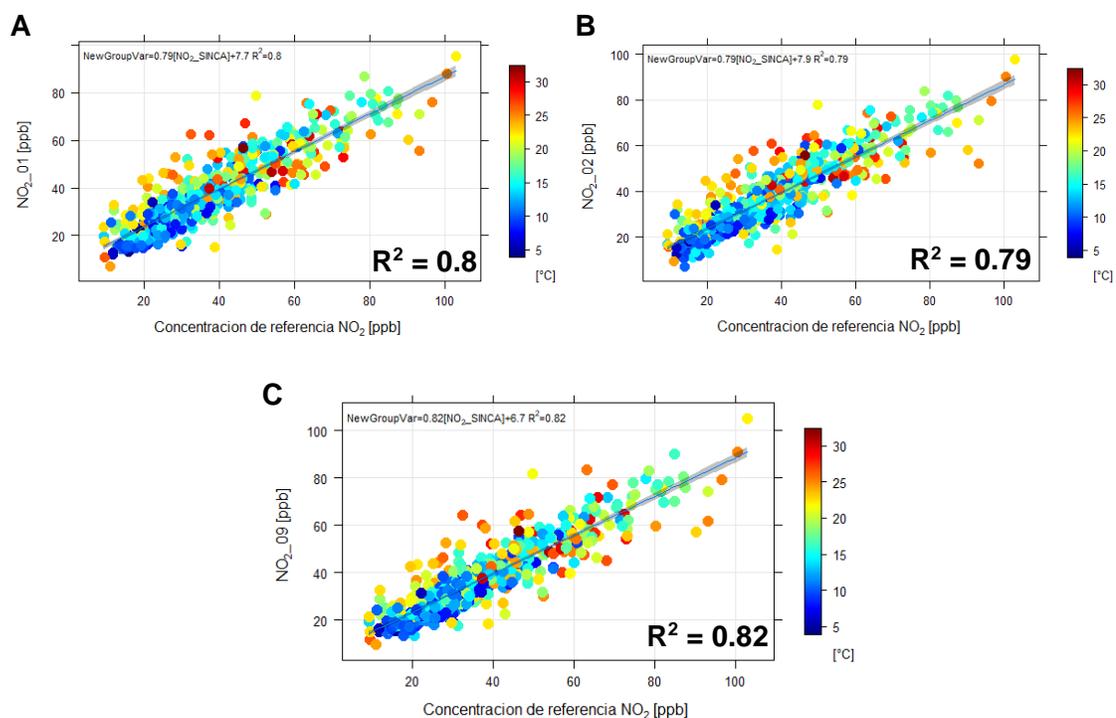


Figura 24: Grafico de dispersión entre la concentración de NO₂ referenciales y las concentraciones de NO₂ datos de entrenamiento. (A) sensor NO₂_01. (B) Sensor NO₂_02. (C) Sensor NO₂_09. El color corresponde al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).

Se analizó la concurrencia entre cada una de las variables, obtenido valores no superiores a 0,8, por lo que no existen problemas de concurrencia que requieran ser revisados en ninguno de los modelos (Ross N., n.d.).

En Anexo 9 es posible encontrar todos los valores y gráficos obtenidos en el análisis de la calidad de los diferentes modelos.

3.6.4.1 DATOS DE PRUEBA

Al aplicar los diferentes modelos a los datos de prueba, equivalente al 30% del total de los datos, se obtuvieron los valores de correlación a partir de los gráficos de dispersión realizados, ver Figura 26. Los sensores NO2_01 y NO2_02 obtuvieron valores de correlación iguales, mientras que el sensor NO2_09 logro el mejor ajuste, esto debido al menor uso de este sensor (más nuevo) en comparación a los otros dos sensores.

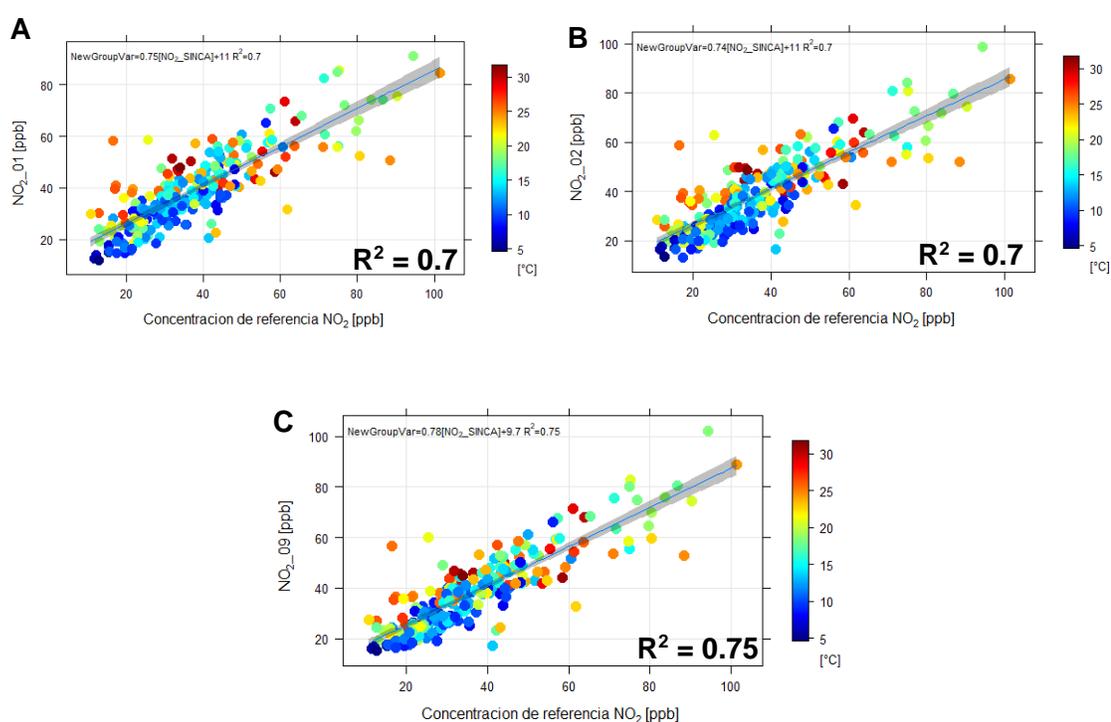


Figura 25: Grafico de dispersión entre la concentración de NO₂ referenciales y las concentraciones de NO₂ datos de prueba. (A) sensor NO2_01. (B) Sensor NO2_02. (C) Sensor NO2_09. El color corresponde al nivel de temperatura (colores más azules corresponden a temperaturas más bajas, mientras que colores más rojos corresponden temperaturas más elevadas).

3.2 MÉTRICAS DE RENDIMIENTO EPA

Las métricas de rendimiento validan los datos obtenidos por la plataforma en la casa particular comparándolos con las concentraciones de NO₂ de la estación de monitoreo La Florida, evaluando la precisión entre los sensores utilizando los valores de concentración obtenidos tanto por el modelo de RLM como por GAM, usando para esto promedios horarios válidos. Para los cálculos de precisión se utilizó el total de los datos de la campaña de monitoreo en la casa particular, dando como resultado los valores mostrados en la Tabla 21 para sensores del mismo tipo instalados bajo las mismas condiciones de muestreo.

El fabricante indica que la vida útil del sensor corresponde a 24 meses, posterior a esto, la señal original del sensor puede llegar a reducirse en un 50% (ver anexo 1), además se tomó en consideración que los sensores empleados en este trabajo se adquirieron en el año 2019.

Los sensores utilizados fueron adquiridos en 2019 donde los sensores tenían hasta terminada la última campaña de monitoreo, 27 meses de uso intermitente en el caso del sensor NO₂_01, mientras que el sensor NO₂_02 tenía un uso intermitente de 25 meses y por último el sensor NO₂_09 un uso de 20 meses aproximadamente, siendo este último el sensor menos utilizado, lo que explicaría los valores de desviación estándar (SD) obtenidos (~15,5 ppb).

El coeficiente de variación obtenido fue en promedio 41,6%, lo cual podría estar relacionado con los extremos de concentración de NO₂ [mínimos y máximos] medidos por los diferentes sensores, por lo que la media aritmética de los datos no sería representativa debido a la variabilidad de los datos.

Tabla 21: Desviación estándar y coeficiente de variación (CV) obtenido la campaña de monitoreo en casa particular.

Casa particular	SD [ppb]	CV [%]
RLM	15,47	41,90
GAM	15,54	41,35

Por otro lado, se evaluó la correlación entre la concentración de NO₂ [ppb] medido por cada uno de los sensores y el equipo de referencia, utilizando para esto, los valores obtenidos con los datos de prueba, es decir el 30% del total de los datos de la campaña de monitoreo en la casa particular, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 22. Es posible notar como los valores obtenidos en los diferentes modelos son muy similares, no obteniendo grandes diferencias en el promedio tanto de R², pendiente e intercepto entre RLM y GAM.

Al obtener valores de sesgo <30% en todos los sensores independiente del modelo estadístico utilizado, es posible clasificar los sensores según la EPA (ver tabla en Anexo 5) para su uso en educación e información (tipificación tipo I), identificación y caracterización de zonas de alta contaminación (tipificación tipo II) y exposición personal (tipificación tipo IV)

Tabla 22: Correlación de la concentración de NO₂ [ppb] entre el sensor y equipo de referencia.

		Sensor NO ₂ _01	Sensor NO ₂ _02	Sensor NO ₂ _09	Promedio
RLM	R²	0,73	0,71	0,75	0,73
	Pendiente	0,76	0,74	0,78	0,76
	Intercepto [ppb]	9,8	11	8,9	9,9
	Sesgo [%]	23,96	24,37	21,55	23,29
GAM	R²	0,70	0,7	0,75	0,72
	Pendiente	0,75	0,74	0,78	0,76
	Intercepto [ppb]	11	11	9,7	10,6
	Sesgo [%]	25,58	25,76	22,79	24,71

Finalmente, se realizó la evaluación del RMSE (ver Tabla 23) para los diferentes modelos, donde los valores obtenidos no muestran grandes diferencias, por lo que ambos modelos tienen un error similar entre las concentraciones de NO₂ medidas por los diferentes sensores y la concentración de NO₂ referencial.

Tabla 23: Valores RMSE para RLM y GAM.

	RMSE [ppb]
RLM	8,93
GAM	9,24

3.3 CAMPAÑAS DE MONITOREO SDT Y MUNICIPALIDAD PEÑALOLÉN

Al obtener similares resultados en las métricas de rendimiento en ambos modelos, se decidió obtener las concentraciones tanto en la SDT como en la Municipalidad de Peñalolén utilizando ambos modelos estadísticos.

Para poder aplicar los modelos estadísticos utilizados en la calibración del sensor (utilizando las mismas variables predictoras) al cálculo de las concentraciones tanto en la Municipalidad de Peñalolén como en la SDT, se realizaron correlaciones de Spearman con la finalidad de establecer si los sitios de monitoreo tienen similares características en cuanto a las variables que afectan el funcionamiento del sensor, por lo tanto, se realizaron correlaciones de Spearman entre:

- Temperaturas medidas por la plataforma en los tres sitios de monitoreo
- Humedad relativa reportada por la estación de monitoreo La Florida en la fecha correspondiente a cada campaña de monitoreo

Al realizar una correlación de Spearman (Anexo 11) entre la temperatura medida por la plataforma en la casa particular y la temperatura que mide la plataforma en la municipalidad de Peñalolén, se obtuvo una correlación positiva considerable ($R^2=0,68$). Mientras que se obtuvo una correlación positiva muy fuerte ($R^2=0,77$) entre la temperatura medida por la plataforma en la casa particular y la temperatura medida por la plataforma en la SDT, ambas con una alta significancia (Barrera M. 2014).

Lo mismo se realizó para la variable predictora HR SINCA, obteniendo correlaciones de Spearman (ver Anexo 11) entre la HR reportada por la estación de monitoreo La Florida en la fecha correspondiente a la campaña realizada en la casa particular y la HR reportada por la estación de monitoreo La Florida en las fechas correspondiente a las otras dos campañas de monitoreo (SDT, Municipalidad de Peñalolén). Se obtuvieron correlaciones positivas considerables (Barrera M. 2014) tanto para la campaña de monitoreo en la Municipalidad de Peñalolén ($R^2=0,65$) como la realizada en la SDT ($R^2=0,56$), ambas con alta significancia.

Debido a que el sensor NO₂_09 obtuvo mejores resultados al aplicar las métricas de rendimiento en comparación a los otros dos sensores dentro de la plataforma, se decidió utilizar los datos obtenidos por este sensor para el cálculo de las concentraciones en ambas campañas de monitoreo.

Finalmente se realizaron rosas de los vientos durante la época de verano (ver Anexo 12), las cuales tienen en general una dirección desde el suroeste hacia el noreste de la Región Metropolitana, lo que concuerda con diversos estudios que indican que la ciudad de Santiago se caracteriza por tener vientos predominantes valle-montaña persistentes (Morales, 2006; Peralta Miranda, 2009; Toro A. et al., 2014).

Por otro lado, las frecuencias en la velocidad del viento, especificadas en el Anexo 11, en los diferentes horarios tiene ciertas diferencias, la velocidad predominante entre las 7:00 - 19:00 hrs se encuentra entre los 0,5 a 2,1 m/s, a excepción de la estación de monitoreo Pudahuel que presenta en su mayoría vientos que van entre los 2,1 y 3,6 m/s. Mientras que la velocidad predominante entre las 19:00 y las 7:00 hrs se clasifica como “calma” en tres de las estaciones de monitoreo, las estaciones de Pudahuel y Parque O’Higgins presentan velocidades predominantes que oscilan entre los 0,5 y 2,1 m/s.

Las velocidades del viento obtenidas indicarían un mayor transporte de contaminantes durante el día desde el suroeste hacia el noreste de la Región Metropolitana debido a mayores velocidades del viento en comparación a la condición de calma que se encuentra durante la noche en la Región Metropolitana.

3.5.1 SDT

La serie de datos crudas del sensor NO2_09 indica un funcionamiento ininterrumpido durante toda la campaña (ver anexo 13).

Al obtener las concentraciones a partir de ambos modelos estadísticos utilizados en la calibración del sensor (empleando como variables predictoras el sensor NO2_09, la temperatura medida por la plataforma y la HR reportada por la estación de monitoreo La Florida para la fecha correspondiente a la realización de la campaña de monitoreo).

Con el modelo de RLM se obtuvieron concentraciones negativas (Anexo13), las cuales no se pueden relacionar directamente con el funcionamiento del sensor, sin embargo, durante la campaña de monitoreo entre los días 28/01/21 y 31/01/21 se produjeron lluvias intensas en la Región Metropolitana, que pudieron afectar el correcto

funcionamiento del sensor, obteniendo los valores negativos de concentración a partir del modelo de RLM, sin embargo, durante el mismo periodo de tiempo las concentraciones obtenidas con GAM, no arrojan valores negativos, lo que podría indicar que el modelo de RLM es más sensible a cambios en una o más de sus variables predictoras.

Debido a que las concentraciones negativas obtenidas por el modelo de RLM representan el 0.5% del total de los datos promediados de forma horaria, se decidió eliminar estos valores ya que dentro del marco de este seminario estos resultados no tienen sentido físico.

Se realizó una rosa de concentración, donde es posible notar en la Figura 26, que las mayores concentraciones de NO_2 provienen desde el suroeste de la Región Metropolitana, donde se encuentra próximo al sitio de monitoreo la Av. Libertador Bernardo O'Higgins.

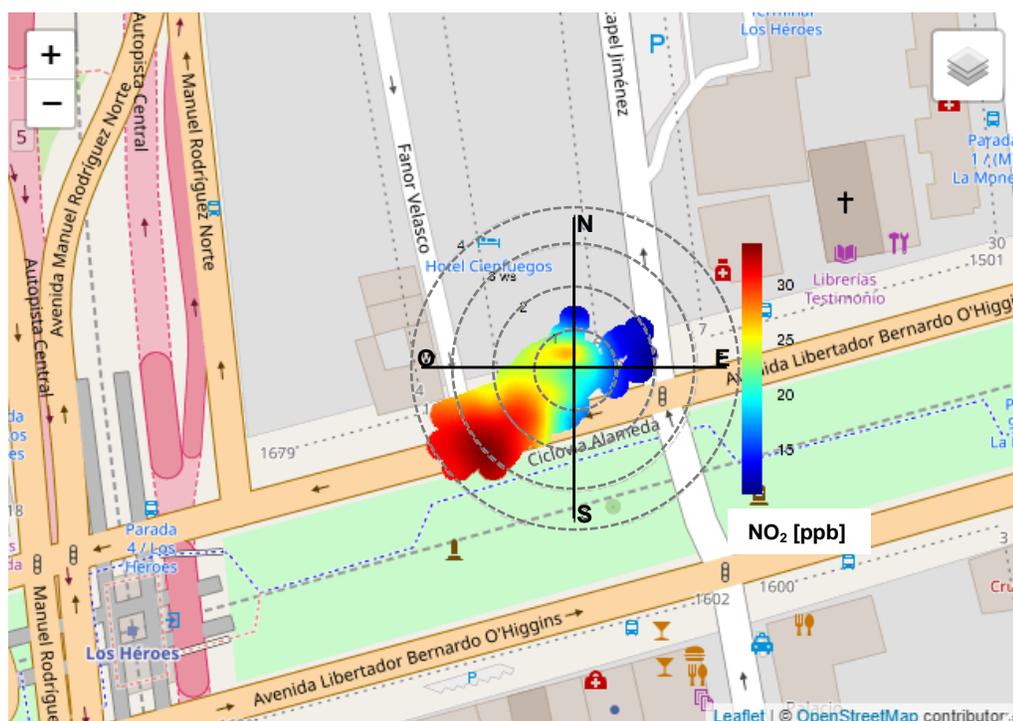


Figura 26: Mapa con rosa de concentración del contaminante NO₂ en la SDT. Donde los colores entregan información sobre la concentración del NO₂, donde las mayores concentraciones se muestran en colores más cálidos (rojos) y menores concentraciones se muestran en colores más fríos (azul).

Se realizó un gráfico de dispersión entre las concentraciones de NO₂ obtenidas por los dos modelos estadísticos, obteniendo un coeficiente de determinación igual a 0,86 (Anexo 14), por otro lado, al observar las Figuras 27 y 28 es posible notar como ambos modelos estadísticos siguen la misma tendencia, con resultados casi idénticos cuando la concentración de NO₂ es baja, sin embargo, cuando el NO₂ aumenta GAM da como resultado mayores concentraciones de NO₂ en comparación a RLM.

Ambos modelos logran capturar las variaciones en la concentración de NO₂ esperadas tanto a lo largo del día como durante la semana, ya que estas tienen una estrecha relación con el aumento o disminución del tráfico vehicular (Beckwith et al., 2019; Perez & Trier, 2001).

La figura 28a muestra el perfil semanal del NO₂, donde el comportamiento del NO₂ es similar, sin embargo, el jueves tiene en promedio las mayores concentraciones de NO₂ (Figura 28b). Por otro lado, las menores concentraciones se obtuvieron los sábados y domingos (días no laborables) por lo que las concentraciones de NO₂ tienen relación con el aumento o disminución del tráfico vehicular.

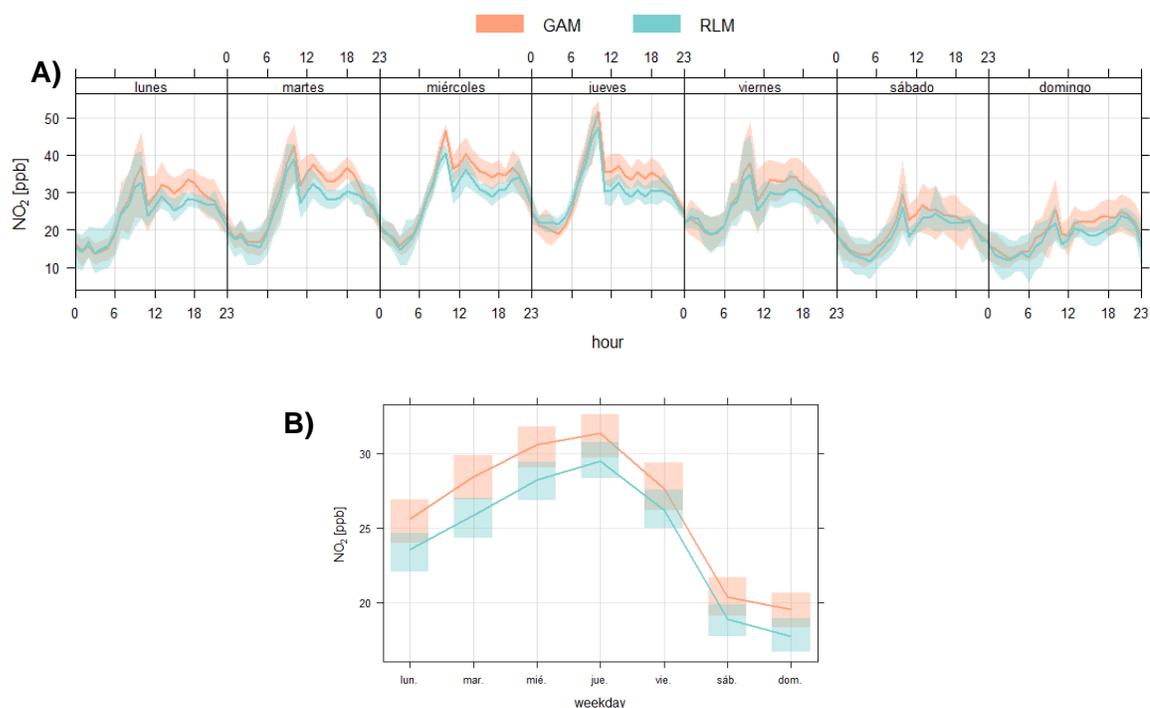


Figura 27: Variación semanal en la concentración de NO₂ en el sitio SDT. (A) variación diaria. (B) variación promedio diario.

La Figura 28 muestra el perfil horario de NO₂, donde alrededor de las 3:00 de la mañana se obtiene la menor concentración de NO₂ para luego ir aumentando hasta llegar a su concentración máxima alrededor de las 10:00 de la mañana, lo cual coincide con el aumento del tráfico vehicular el cual comienza a aumentar alrededor de las 8:00 de la mañana (Santiago Traffic Report | TomTom Traffic Index, n.d). Posteriormente por resultado de reacciones fotoquímicas, se produce un alza en la concentración de NO₂, para finalmente disminuir su concentración provocada por una segunda reacción fotoquímica a medida que comienza a aumentar la radiación solar alrededor del mediodía.

Las concentraciones de NO_2 se mantienen relativamente constantes durante la tarde para luego ir disminuyendo alrededor de las 20:00 hrs, donde comienza a disminuir el tráfico vehicular (ver anexo 16).

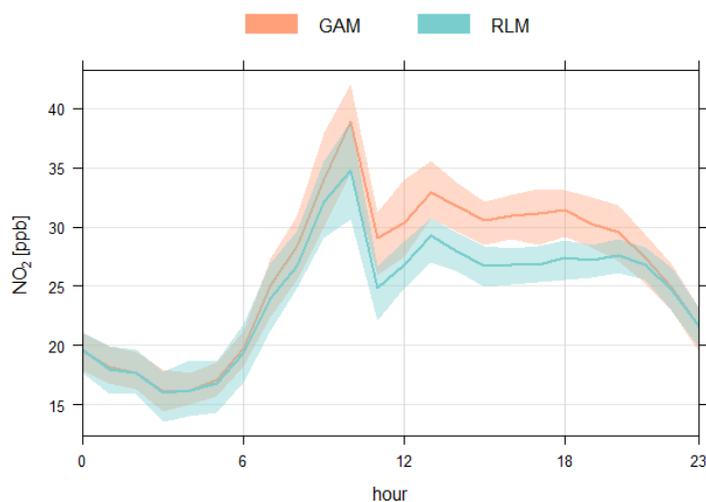


Figura 28: Variación horaria en la concentración de NO_2 en el sitio SDT.

3.5.2 MUNICIPALIDAD DE PEÑALOLÉN

En primera instancia se realizó un análisis exploratorio de los datos (ver anexo 15), para luego obtener las concentraciones a partir de ambos modelos.

Se realizó una rosa de concentración, donde es posible notar en la Figura 29, que las mayores concentraciones de NO_2 provienen desde el Noroeste y Noreste de la Región Metropolitana, donde se encuentra próximo al sitio de monitoreo la Av. Grecia.

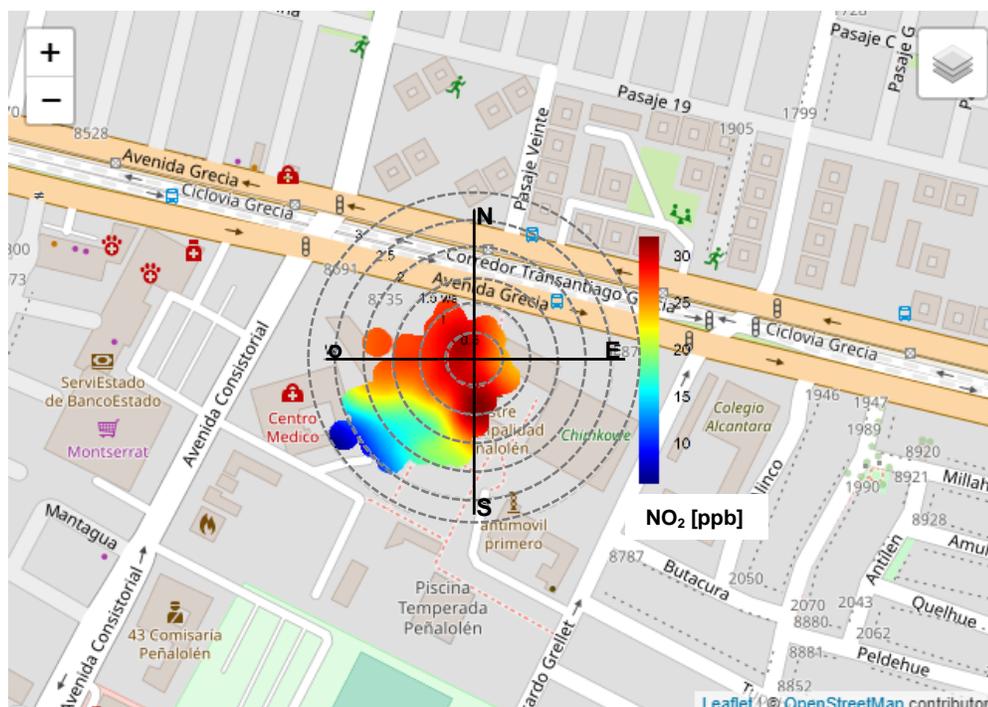


Figura 29: Mapa con rosa de concentración del contaminante NO_2 en la Municipalidad de Peñalolén. Donde los colores entregan información sobre la concentración del NO_2 , donde las mayores concentraciones se muestran en colores más cálidos (rojos) y menores concentraciones se muestran en colores más fríos (azul).

Se realizó un gráfico de dispersión entre las concentraciones de NO_2 obtenidas por los dos modelos estadísticos, obteniendo un coeficiente de determinación igual a 0,85 (Anexo 16), de La Figura 30 muestra la comparación entre los valores de concentración obtenidos por ambos modelos, donde es posible observar que con ambos modelos se obtienen las mismas tendencias en el comportamiento de NO_2 , sin embargo, las concentraciones obtenidas con el modelo de RLM en general son menores en comparación a las concentraciones obtenidas con GAM.

La Figura 30a, muestra el comportamiento semanal del NO_2 , donde se registran las mayores concentraciones de NO_2 durante la tarde, entre las 21:00 y 22:00 horas, mientras que las concentraciones de NO_2 disminuyen a partir del mediodía

independiente del día de la semana. Por otro lado, la Figura 30b muestra la variación del promedio semanal, donde las mayores concentraciones de NO_2 en promedio se registraron los jueves, mientras que las menores concentraciones se obtuvieron los sábados y domingos, lo cual tiene relación con la disminución en el tráfico vehicular (Santiago Traffic Report | TomTom Traffic Index, n.d.).

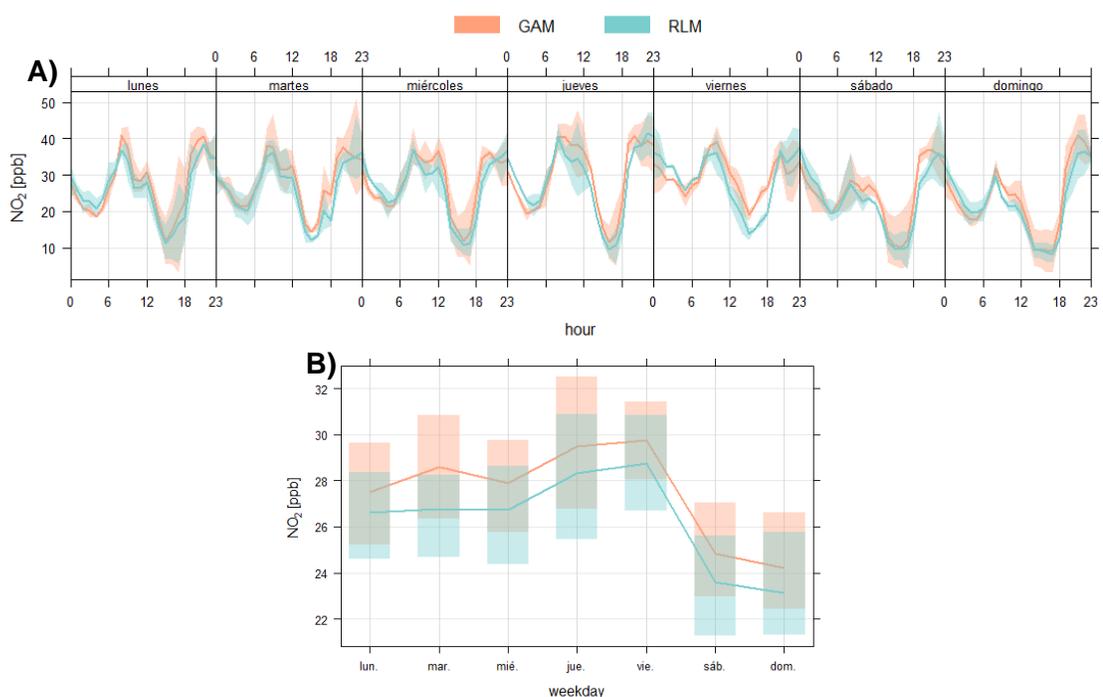


Figura 30: Variación semanal en la concentración de NO_2 en el sitio Municipalidad de Peñalolén. (A) variación diaria. (B) variación promedio diario.

La Figura 31 muestra el perfil horario del NO_2 donde es posible observar dos máximos, el primero de ellos alrededor de las 8:00 de la mañana, donde los niveles en la concentración de NO_2 tienen relación con el inicio de la jornada laboral y por consiguiente un aumento del flujo vehicular, posteriormente las concentraciones comienzan a disminuir hasta aproximadamente las 15:00 horas, donde se encuentran

las menores concentraciones de NO_2 , esto debido principalmente a la fotólisis del NO_2 a medida que aumenta la radiación y posiblemente una disminución en el tráfico vehicular.

A partir de las 15:00 horas las concentraciones de NO_2 comienzan a aumentar, registrando un segundo máximo el cual se obtiene por un nuevo aumento del flujo vehicular por el término de la jornada laboral. Estas concentraciones se producen en un horario donde la radiación solar disminuye por lo que el NO_2 no se fotoliza, lo que provoca que el NO presente reaccione rápidamente con O_3 produciendo NO_2 .

Finalmente, las concentraciones disminuyen, ya que antes del amanecer el NO_2 reacciona con O_3 formando el radical nitrato el cual posteriormente mediante reacciones fotolíticas se produce NO y NO_2 (Seinfeld & Pandis, 2016).

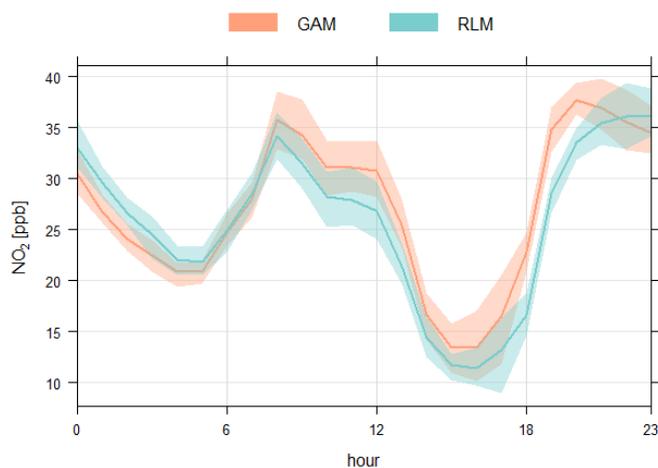


Figura 31: Variación horaria en la concentración de NO_2 en el sitio Municipalidad de Peñalolén.

3.4 COMPARACIÓN CONCENTRACIONES PROMEDIO ENTRE SDT Y M.

PEÑALOLÉN

Al comparar el comportamiento horario promedio del NO_2 en los diferentes sitios de monitoreo, se obtuvieron, como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, diferencias significativas en el promedio de la concentración horaria correspondiente durante la mayor parte del día, no encontrando diferencias significativas a las 9:00, 11:00 y 12:00 horas. Por otro lado, el comportamiento antes mencionado es independiente del modelo estadístico utilizado para obtener las respectivas concentraciones. Sin embargo, se encontraron diferencias a las 19:00, en donde las concentraciones calculadas por RLM no encuentran diferencias significativas, mientras que al ser calculadas con GAM sí se obtiene esta diferencia. Los valores de concentración horaria y el valor p obtenido al aplicar el test estadístico se detallan en el Anexo 18.

La concentración promedio de NO_2 en ambos sitios de monitoreo comienza a aumentar a partir de las 5:00 horas, obteniendo un máximo en el caso de la Municipalidad de Peñalolén a las 8:00 horas, mientras que en la SDT su máxima concentración se presenta entre las 9:00 y 10:00 horas, estos máximos serían un indicativo de un aumento en el tráfico vehicular debido al inicio de la jornada laboral, para luego disminuir su concentración al medio día, donde la radiación solar es más alta, provocando la caída del NO_2 al formar mediante reacciones fotoquímicas O_3 .

Entre el medio día y las 19:00 horas las concentraciones de NO_2 no varían en gran medida en el sitio de monitoreo correspondiente a la SDT, esto puede deberse a que el flujo vehicular en ese sector se mantiene relativamente constante durante la jornada de la tarde, mientras que durante el mismo periodo de tiempo la Municipalidad

de Peñalolén disminuye la concentración de NO_2 , obteniendo su mínimo a las 15:00 horas para luego ir en aumento. A partir de las 19:00 horas la concentración de NO_2 comienza a disminuir en SDT hasta alcanzar su mínimo a las 4:00 de la mañana, lo cual se debería a la disminución en el tráfico vehicular del sector debido al término de la jornada laboral, sin embargo, las concentraciones de NO_2 tienen un comportamiento diferente en la Municipalidad de Peñalolén, donde es posible notar un aumento en la concentración de NO_2 alcanzando las máximas concentraciones entre las 21:00 y 22:00 horas, esto debido principalmente al retorno vehicular luego del término de la jornada laboral, sumado a esto el NO reacciona con el O_3 para producir NO_2 , el cual no se fotoliza por la falta de radiación, lo que indicaría el aumento de las concentraciones del NO_2 obtenido por los diferentes modelos estadísticos durante la noche en la Municipalidad de Peñalolén.

Las concentraciones de NO_2 en ambos sectores se explican principalmente por el aumento o disminución del tráfico vehicular, donde las emisiones de NO_2 en la Municipalidad de Peñalolén provienen principalmente del transporte privado que transita por avenida Grecia, debido a que se encuentra cercano al sitio de monitoreo, el primer electro corredor de la Región Metropolitana (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2018), mientras que el sitio en la SDT, las concentraciones de NO_2 provienen tanto del transporte público como el privado.

La metodología utilizada en el presente trabajo no logra determinar si las diferencias en el promedio de las concentraciones de NO_2 entre ambos sitios se deben a un real impacto producto de la diferencia tecnológica que utilizan los buses que circulan por ambos sectores.

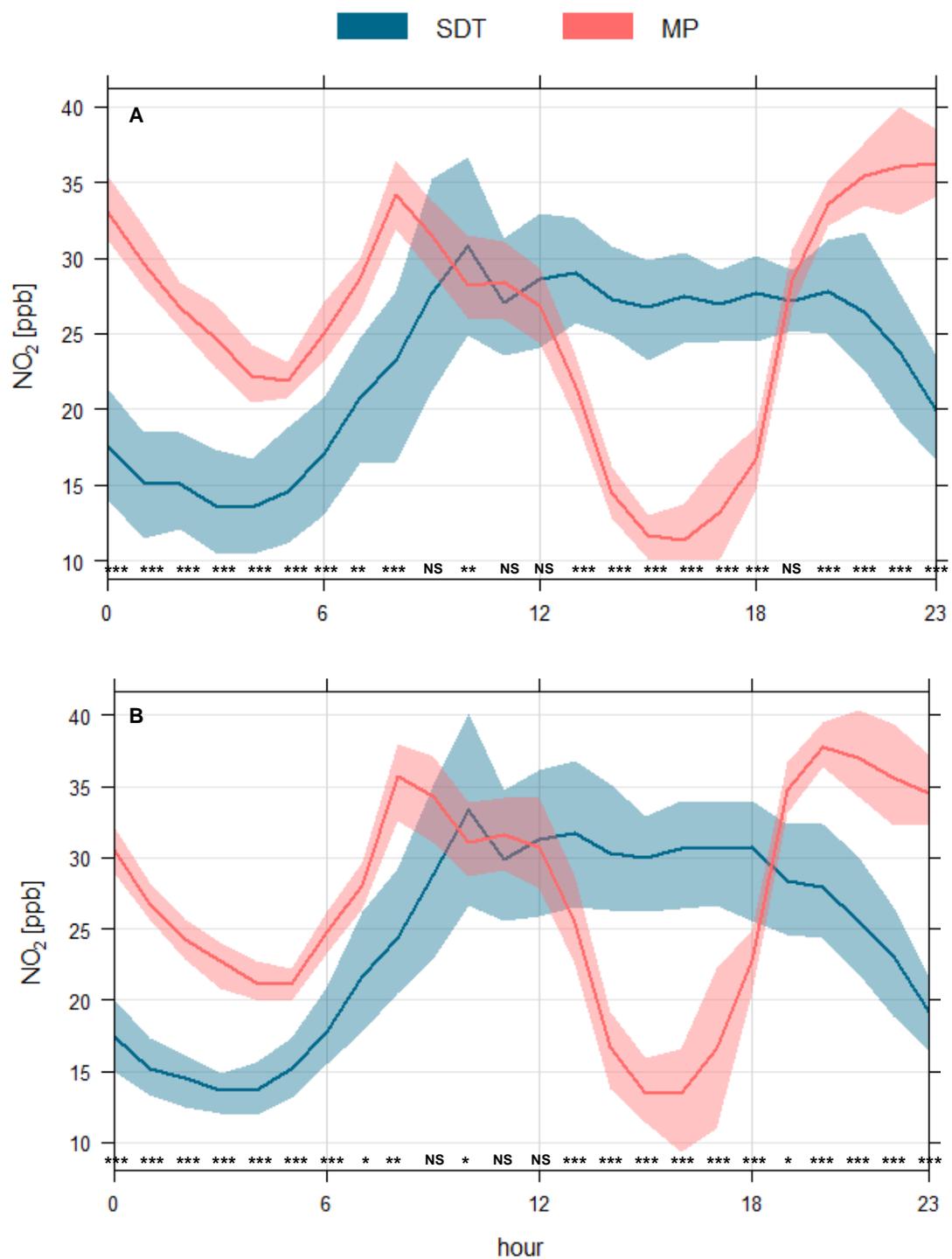


Figura 32: Comparación entre promedio de concentración horaria de NO_2 entre los sitios SDT y Municipalidad Peñalolén. (A) RLM. (B) GAM. Valor significancia (valor p): “***” 0,001; “**” 0,01; “*” 0,05; “NS” no significativo.

IV. CONCLUSIONES

- ✓ Al comprar los modelos estadísticos utilizados es posible concluir que el modelo de regresión lineal múltiple se ve limitado por no ser capaz de capturar relaciones no lineales, mientras que el modelo aditivo generalizado es un modelo más flexible, lo que permite una menor intervención por parte del investigador en el manejo de los datos.
- ✓ Se concluye que independiente del modelo estadístico utilizado para la calibración del sensor, ambos modelos logran explicar en promedio un 70% de la variabilidad temporal del NO₂ ($R^2 > 0,7$).
- ✓ La evaluación de desempeño de uso de sensores (sesgo <30%) recomienda el uso con fines educacional e informativo, Identificación y caracterización de zonas de alta contaminación y exposición personal.
- ✓ Los resultados obtenidos en cuanto a la precisión (SD ~15,5 ppb) se debe al tiempo de uso que tienen los diferentes sensores empleados en la plataforma.
- ✓ Los sensores utilizados logran capturar el comportamiento del NO₂, tanto de forma horaria como semanal, en las campañas de monitoreo realizadas en la SDT y en la Municipalidad de Peñalolén.
- ✓ Se concluye la existencia de diferencias significativas (t-student: valor p < 0,05) en las concentraciones horarias de NO₂ registradas entre los sitios SDT y Municipalidad de Peñalolén, a excepción de 9:00, 11:00, 12:00 y 19:00 horas.

V. BIBLIOGRAFIA

- Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (2017). Cómo evaluar sensores de bajo costo mediante la localización con monitores del método de referencia federal. laboratorio nacional de investigación de la exposición oficina de investigación y desarrollo. https://espanol.epa.gov/system/files/documents/2021-10/102121-tagged-guide-02p_10-15-2021-spanish-y1010-082521-collocation-instruction-guide-10-13-2021_508-tagged-1.pdf
- Ahumada, S. (2020). "Evaluación del desempeño de los sensores electroquímicos de SO₂ y NO₂ utilizando instrumentos de monitoreo regulatorio." Universidad de Chile.
- Alphasense application note 106. (n.d.). Humidity extremes: drying out and water absorption. www.alphasense.com
- Alphasense application note 104. (n.d.). How electrochemical gas sensors work. www.alphasense.com
- Alphasense application note 105-03. (n.d.). Designing a potentiostatic circuit.
- Arroquia Cobos, a. m. (2016). Sensor electroquímico basado en nanoesferas de dopamina auto-ensambladas. Universidad Politécnica de Madrid.
- Barrera, M. (2014). Uso de la correlación de spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *movimiento científico*, 8(1), 98-104.
- Beckwith, M., Bates, e., Gillah, A., & Carslaw, N. (2019). NO₂ hotspots: are we measuring in the right places? *atmospheric environment*: x, 2. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100025>
- Brown, T., Lemay, E., Murphy, C., Cursten, B., & Woodward, P. (2014). Química la ciencia central (decimosegunda).
- Camalier L., Eberly S., Miller J., Papp M. (2007). Guideline on the Meaning and The Use of Precision and Bias Data Required by 40 CFR Part 58 Appendix A. U.S. Environmental Protection Agency.
- Campos V., Cruz L., Alves E., Santos T., Silva A., C. dos Santos A., Lima A., Paixão C., Santos D., Brandão D., Andrade E., Moreira J., Conceição K., Ramos M., Pontes M., Amaral M., Mattos B. (2006). Monitoramento atmosférico passivo de so₂, no₂ e o₃ em áreas urbanas e de influência industrial como prática de química ambiental para alunos de graduação. Universidade Federal da Bahia.
- Caquilpán P, V., Aros G, G., Elgueta A, S., Díaz S, R., Sepúlveda K, G., & Sierralta J, C. (2019). Advantages and challenges of the implementation of a low-cost particulate matter monitoring system as a decision-making tool. *environmental monitoring and assessment*, 191(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7875-4>

- Castaño, Elkin. (2011). Una estimación no paramétrica y robusta de la transformación box-cox para el modelo de regresión. *lecturas de economía*, (75), 89-106.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0120-25962011000200005&lng=en&tlng=es
- Centro Mario Molina. (n.d.). El Centro Mario Molina en conjunto con consorcio internacional liderado por la Universidad del este de Finlandia, se adjudican fondos de investigación e innovación de horizonte 2020. <https://cmmolina.cl/articulo/34>
- Clements, A., Herrera, R., & Hurn, S. (2020). Network analysis: a novel approach to identify pm2.5 hotspots and their spatio-temporal impact on air quality in Santiago de Chile. *air quality, atmosphere and health*, 13(9), 1075–1082. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00862-2>
- Cordis European commission. (2019). Transport derived ultrafines and the brain effects. <https://cordis.europa.eu/project/id/814978>
- Crawley, M. (2013). *The r book* (second edition).
- Criollo C. (2018). Valoración de la concentración de dióxido de nitrógeno atmosférico (NO₂) en el área urbana de la ciudad de cuenca a través de imágenes satelitales”. Universidad Politécnica Salesiana.
- Datos geográficos – Gobierno Regional Metropolitano de Santiago. (n.d.). Retrieved may 2, 2022, from <https://www.gobiernosantiago.cl/datos-geograficos/>
- Decreto Supremo N°31. (2016). Establece plan de prevención y descontaminación atmosférica para la región metropolitana de Santiago. Ministerio del Medio Ambiente
- Decreto Supremo N°58. (2003). Reformula y actualiza plan de prevención y descontaminación atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA). Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- Decreto Supremo N°59 (1998). Norma de calidad primaria para MP₁₀. Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP₁₀, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- Decreto Supremo N°61. (2008). Aprueba reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos. Ministerio de Salud; Subsecretaria de Salud Pública.
- Decreto Supremo N°67. (2014). Declara zona saturada por material particulado fino respirable MP_{2,5}, como concentración de 24 horas, a la Región Metropolitana.
- Decreto Supremo N°114. (2002). Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de nitrógeno (NO₂) Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- Decreto Supremo N°131. (1969). Declara zona saturada por ozono material particulado respirable partículas en suspensión y monóxido de carbono y zona latente por dióxido de nitrógeno.

- Duvall, R., Clements, A., Hagler, G., Kamal, A., Kilaru, v., goodman, I., ... & dye, t. (2021). Performance testing protocols, metrics, and target values for fine particulate matter air sensors: use in ambient, outdoor, fixed sites, non-regulatory supplemental and informational monitoring applications. us epa office of research and development.
- Escalona, I., Manganiello, L., López-fonseca, M., & Vega, c. (2012). Los sensores químicos y su utilidad en el control de gases contaminantes. revista ingeniería UC, 19(1), 74-88.
- Eze System. (n.d.). Sistema multidisciplinar - Eze system - Sistema IoT para la gestión remota de dispositivos. retrieved may 2, 2022, from <https://www.ezesys.com/multi-discipline-system>
- Fahrmeir L., Kneib T., Lang S., Marx B. (2013) Regresión no paramétrica. En: Regresión. Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34333-9_8
- Galán Caballero, Jaime, & Jiménez Pablo, Efraín, & Cervantes Martínez, Cuauhtémoc (2003). Estimación por máxima verosimilitud restringida de componentes de varian-za y covarianza de múltiples características bajo los diseños I y II de Caro-lina del N. Revista Fitotecnia Mexicana, 26(1),53-66.ISSN: 0187-7380. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61026107>
- Galán Madruga, D. (2013). Química medioambiental. metodología pasiva empleada para la toma de muestra de contaminantes atmosféricos (vol. 8, issue 2). www.saber.ula.ve/avancesenquimica
- Gómez Ortiz, I. (2016). Diseño de un sensor electroquímico para la detección cuantitativa de compuestos orgánicos volátiles.
- Gramsch I. Ernesto, López, G., Gidhagen, I., Segersson, D., Castillo, M., Vásquez, y., Valverde, C., Diaz, X., Tagle, M., & Donoso, R. (2014). Estudio “actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana.”
- Gutierrez A. (2021). Monitoreo de SO₂, NO₂ y CO para estimar la calidad del aire en la ciudad de Montería. Universidad de Córdoba.
- Hernandez B., F., & Mazo I., M. (2020). Modelos de regresión con r. https://fhernanb.github.io/libro_regresion/
- Instituto Nacional de estadísticas Chile. (2021). Transporte y Comunicaciones. www.ine.cl.
- Lindén, J., Watne, A., Oyola, P., Giebat, M., Fogel, K., Kolev, D., Segura Roux, M., Gottberg, I., Andersson, O., Rieck Jilden, J., & Mehdi Ghalebani. (2020). The lov-iot project: air and water monitoring with internet of things air quality sensors. <https://goteborg.se/mfrapporter>
- López Garzón, W., & Cárdenas López, J. (2019). Tecnología internet of things (IoT) y el big data. Mare Ingenii, 1(1), 73–79. <https://doi.org/10.52948/mare.v1i1.183>
- Lounas, R., Salhi, D. E., Mokrani, H., Djerbi, R., & Bennai, M. (2019). Towards a smart data transmission strategy for IoT monitoring systems: application to air quality monitoring.

- 2019 international conference on theoretical and applicative aspects of computer science, ictaacs 2019. <https://doi.org/10.1109/ictaacs48474.2019.8988119>
- Malings, C., Tanzer, R., Hauryliuk, A., Kumar, S. P. N., Zimmerman, N., Kara, L. B, Presto, A. A., & Subramanian, R. (n.d.). Development of a general calibration model and long-term performance evaluation of low-cost sensors for air pollutant gas monitoring. <https://doi.org/10.5194/amt-2018-216>
- Manríquez, Y. (2021). “Súper lunes”: Tránsito vehicular aumentó un 18% respecto a la semana pasada, pero sigue siendo un 32% menos que en marzo de 2020. <https://www.adnradio.cl/nacional/2021/03/01/super-lunes-transito-vehicular-aumento-un-18-respecto-a-la-semana-pasada-pero-sigue-siendo-un-32-menos-que-en-2020.html>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). Introduction to linear regression analysis (fifth edition).
- Morales, R. (2006). Contaminación atmosférica urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial universitaria.
- Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (2018). Presidente Piñera y Ministra Hutt presentan los primeros cien buses eléctricos para el transporte público de Santiago. <https://www.mtt.gob.cl/archivos/20065>.
- Miranda G. (2017). Evaluación del comportamiento de los contaminantes atmosféricos O₃, NO₂ y COV_s en el efecto fin de semana en el centro histórico de la ciudad de Riobamba. Escuela superior Politécnica de Chimborazo.
- Munir, S., Mayfield, M., Coca, D., Jubb, S. A., & Osammor, O. (2019). Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—a case study in sheffield. *environmental monitoring and assessment*, 191(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7231-8>
- O’driscoll, R., Apsimon, H. M., Oxley, T., Molden, N., Stettler, M., & Thiyagarajah, A. (2016). A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NO_x and primary NO₂ emissions from euro 6 diesel passenger cars and comparison with copert emission factors. *atmospheric environment*, 145, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.021>
- Organización Mundial de la Salud. (2015). Salud y medio ambiente impacto sanitario de la contaminación del aire. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/hap_bod_results_march2014.pdf?ua=1
- Organización Mundial de la Salud. (2021). Who global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀).
- Pedrosa, I., Basterretxea, J., Fernandez, A., Basteiro, J., & Cueto, E. (2014). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? 1. <https://doi.org/10.11144/javeriana.upsy13-5.pbad>

- Peralta Miranda, H. A. (2009). Contribución a las estrategias de descontaminación atmosférica, considerando el aporte de compuestos orgánicos volátiles biogénicos emitidos por especies arbóreas nativas en la Región Metropolitana. Universidad de Chile.
- Perez, P., & Trier, A. (2001). Prediction of NO and NO concentrations near a street with heavy traffic in Santiago, Chile. In *Atmospheric Environment* (vol. 35).
- Popoola, O., Carruthers, D., Lad, C., Bright, V. B., Mead, M. I., Stettler, M. E. J., Saffell, J. R., & Jones, R. L. (2018). Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. *Atmospheric Environment*, 194, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.030>
- Rachelle Duvall, B. M., Clements, A. L., Hagler, G., Kamal, A., Kilaru, V., Goodman, L., Frederick, S., Barkjohn, K. K., Vonwald, I., Greene, D., & Dye, T. (n.d.). Performance testing protocols, metrics, and target values for fine particulate matter air sensors use in ambient, outdoor, fixed site, non-regulatory supplemental and informational monitoring applications.
- Rachelle Duvall, B. M., Clements, A. L., Hagler, G., Kamal, A., Kilaru, V., Goodman, L., Frederick, S., Barkjohn, K. K., Vonwald, I., Greene, D., & Dye, T. (2021). Performance testing protocols, metrics, and target values for ozone air sensors use in ambient, outdoor, fixed site, non-regulatory supplemental and informational monitoring applications.
- Resolución N°1307 exenta. (2019). Resolución 1307 exenta pone termino al proceso que se indica y da nuevo inicio al proceso de revisión del Decreto Supremo N°114, de 2002, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que establece norma primaria de calidad del aire para dióxido de nitrógeno (NO₂). Ministerio del Medio Ambiente.
- Romero, H., Irrarrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *Eure* (Santiago), 36(109), 35–62. <https://doi.org/10.4067/s0250-71612010000300002>
- Ross, N. (n.d.). Nonlinear modeling in r with gams. <https://campus.datacamp.com/courses/nonlinear-modeling-in-r-with-gams/interpreting-and-visualizing-gams?ex=11>.
- Santiago traffic report | tomtom traffic index. (n.d.). retrieved june 12, 2022, from https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/santiago-traffic/
- Seinfeld, J. H., & Pandis, s. n. (2016). *Atmospheric chemistry and physics* (third edition).
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2015). Guía para la descripción de la calidad del aire en el área de influencia de proyectos que ingresan al SEIA. www.pixabay.com
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2021). Curso evaluación ambiental de la calidad del aire en el SEIA.
- SINCA. (n.d.). Redes de monitoreo en línea - sistema de información nacional de calidad del aire. retrieved may 2, 2022, from <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/redes>

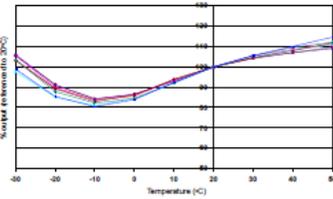
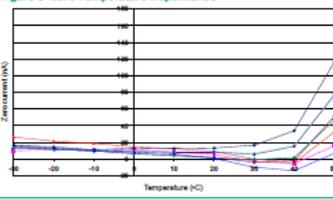
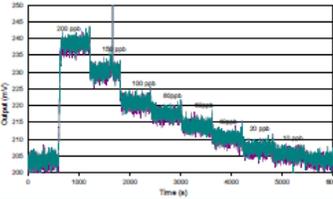
- Sistema Nacional de Información Ambiental. (2020). Informe del estado del medio ambiente. capítulo 14 - calidad del aire.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., Crouch, S. R., & Mora Lugo, e. de la. (2014). fundamentos de química analítica (novena edición).
- South coast aqmd (n.d). Air quality sensor performance evaluation center. <http://www.aqmd.gov/aq-spec>.
- Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, f. (2015). Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. part a: ozone and nitrogen dioxide. sensors and actuators, b: chemical, 215, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.03.031>
- Stetter, J. R., & Li, J. (2008). Amperometric gas sensors - a review. in chemical reviews (vol. 108, issue 2, pp. 352–366). <https://doi.org/10.1021/cr0681039>
- Thermo fisher scientific inc. (2007). Model 42i nox instruction manual chemiluminescence NO_x analyzer. www.thermo.com/weeerohs.
- Topalović, D. B., Davidović, M. D., Jovanović, M., Bartonova, A., Ristovski, Z., & Jovašević-Stojanović, M. (2019). In search of an optimal in-field calibration method of low-cost gas sensors for ambient air pollutants: comparison of linear, multilinear and artificial neural network approaches. Atmospheric Environment, 213, 640–658. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.028>
- Toro A., R., Campos, C., Molina, C., Morales S., R. G. E., & Leiva-Guzmán, M. A. (2015). Accuracy and reliability of Chile's national air quality information system for measuring particulate matter: beta attenuation monitoring issue. Environment International, 82, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.02.009>
- Toro A., R., Morales S., R. G. E., Canales, M., Gonzalez-Rojas, c., & Leiva G., M. A. (2014). Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. building and environment, 79, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.004>
- Tranmer, M., Murphy, J., Elliot, M., and Pampaka, M. (2020). Multiple linear regression (2nd edition); Cathie marsh institute working paper 2020-01. <https://hummedia.manchester.ac.uk/institutes/cmist/archive-publications/working-papers/2020/2020-1-multiple-linear-regression.pdf>
- Vásquez Yeanice y Fernandez Marcelo (2016). Proyecto: “Reducing emissions in latin america and the caribbean through cleaner and more sustainable low carbon transport”. Informe: Diagnóstico y recomendaciones para la red de monitoreo de calidad de aire de la gran área metropolitana de Costa Rica.
- Vázquez Ismael (2020). Sensores potenciométricos, voltamétricos e impedimétricos en el control de calidad de productos lácteos. Universidad de Valladolid.
- Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (third edition).

Williams, R., Kilaru, V., Snyder, E., Kaufman, A., Dye, T., Rutter, A., Russell, A., & Hafner, H. (2014). Air sensor guidebook. www.epa.gov/ord

Wood, S. N. (2017). Generalized additive models an introduction with r (second edition).

VII. ANEXOS

ANEXO 1: FICHA TECNICA ALPHASENSE NO2-B43F

 NO2-B43F Nitrogen Dioxide Sensor 4-Electrode 		 NO2-B43F Performance Data		
Technical Specification	Figure 1 NO2-B43F Schematic Diagram 			Technical Specification
	PERFORMANCE			
	Sensitivity nA/ppm at 2ppm NO ₂ -200 to +500 Response time t ₉₀ (s) from zero to 2ppm NO ₂ < 60 Zero current nA in zero air at 20°C < 70 Noise* ±2 standard deviations (ppb equivalent) 15 Range ppm NO ₂ , limit of performance warranty 20 Linearity ppb error at full scale, linear at zero and 20ppm NO ₂ < ±0.5 Overgas limit maximum ppm for stable response to gas pulse 50 * Tested with AlphaSense ISB low noise circuit			
	LIFETIME			
	Zero drift ppb equivalent change/year in lab air 0 to 20 Sensitivity drift % change/year in lab air, monthly test -20 to +40 Operating life months until 50% original signal (24 month warranted) > 24			
	ENVIRONMENTAL			
Sensitivity @ -20°C (% output @ -20°C/output @ 20°C) @ 2ppm NO ₂ 60 to 80 Sensitivity @ 40°C (% output @ 40°C/output @ 20°C) @ 2ppm NO ₂ 95 to 115 Zero @ -20°C nA 15 to 25 Zero @ 40°C nA -10 to 50				
CROSS SENSITIVITY				
O ₂ Filter capacity (ppm.hr) @ 0.5ppm O ₂ > 500 H ₂ O sensitivity % measured gas @ 5ppm H ₂ O < -80 NO sensitivity % measured gas @ 5ppm NO < -5 Cl ₂ sensitivity % measured gas @ 5ppm Cl ₂ < -65 SO ₂ sensitivity % measured gas @ 5ppm SO ₂ < -1 CO sensitivity % measured gas @ 5ppm CO < -3 H ₂ sensitivity % measured gas @ 100ppm H ₂ < 0.1 C ₂ H ₄ sensitivity % measured gas @ 100ppm C ₂ H ₄ < 0.1 NH ₃ sensitivity % measured gas @ 20ppm NH ₃ < 0.1 CO ₂ sensitivity % measured gas @ 5% Vol CO ₂ < 0.1 Halothane sensitivity % measured gas @ 100ppm Halothane nd				
KEY SPECIFICATIONS				
Temperature range °C -30 to 40 Pressure range kPa 80 to 120 Humidity range % rh continuous 15 to 85 Storage period months @ 3 to 20°C (stored in sealed pot) 6 Load resistor Ω (ISB circuit is recommended) 33 to 100 Weight g < 13				
<p><small>At the end of the product's life, do not dispose of any electronic sensor, component or instrument in the domestic waste, but contact the instrument manufacturer, AlphaSense or its distributor for disposal instructions.</small></p> <p><small>NOTE: All sensors are tested at ambient environmental conditions, with 0 rh (no load) only, unless otherwise stated. An application of use are outside our control, the manufacturer provided a year warranty only. Responsibility of customers should be clear that our sensors, to ensure that the sensors are suitable for their use requirements.</small></p> <p><small>AlphaSense Ltd, Sensor Technology House, 985 Hove Park, Brighton BN1 6RQ, United Kingdom, 01273 756411</small></p> <p><small>Telephone: +44 (0) 1273 888 756 Fax: +44 (0) 1273 138 999 E-mail: sales@alphasense.com Website: www.alphasense.com</small></p>			Figure 2 Sensitivity Temperature Dependence  <p>Figure 2 shows the temperature dependence of sensitivity at 2ppm NO₂. This data is taken from a typical batch of sensors.</p>	
Figure 3 Zero Temperature Dependence  <p>Figure 3 shows the variation in zero output of the working electrode caused by changes in temperature, expressed as nA. This data is taken from a typical batch of sensors. Contact AlphaSense for further information on zero current correction.</p>				
Figure 4 Response to 200 ppb NO₂  <p>With a 33 Ω load resistor, the NO₂-B43F shows excellent resolution, even at the ppb level: ideal for outdoor air environmental testing. Use of AlphaSense ISB circuit reduces noise to 15ppb, with the opportunity of digital smoothing to reduce noise even further. Offset voltage is due to intentional ISB circuit electronic offset.</p>				
<p><small>For further information on the performance of this sensor, on other sensors in the range or any other subject, please contact AlphaSense Ltd. For Application Notes visit "www.alphasense.com".</small></p> <p><small>In the interest of continued product development, we reserve the right to change design features and specifications without prior notification. The data contained in this document is for guidance only. AlphaSense Ltd accepts no liability for any consequences, losses, injury or damage resulting from the use of this document or the reliance thereon without written permission from AlphaSense Ltd. Rev. 01/2018/02/2017</small></p>				

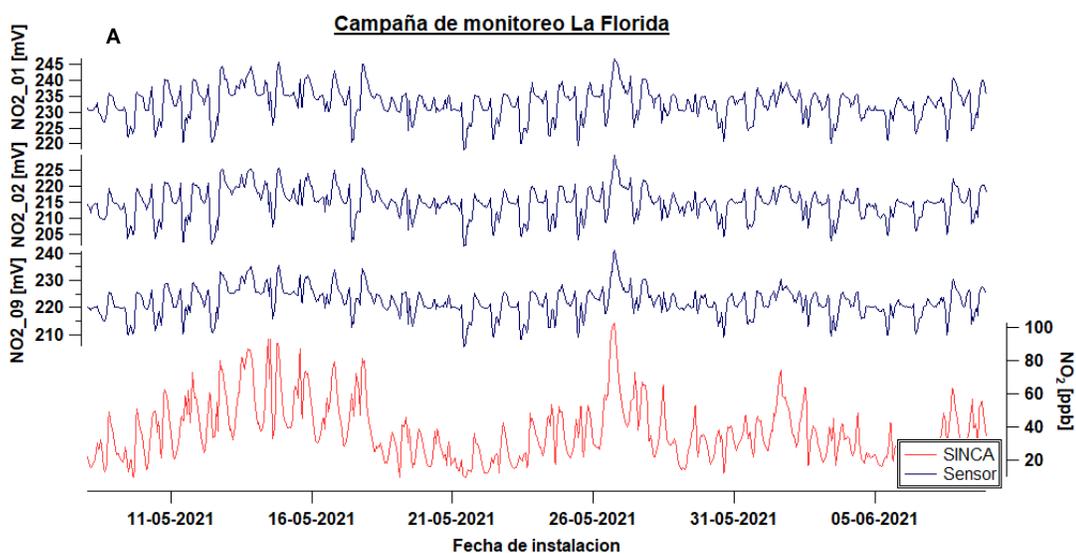
ANEXO 2:ESPECIFICACIONES ANALIZADOR QUIMIOLUMINISCENCIA NOX 42i.

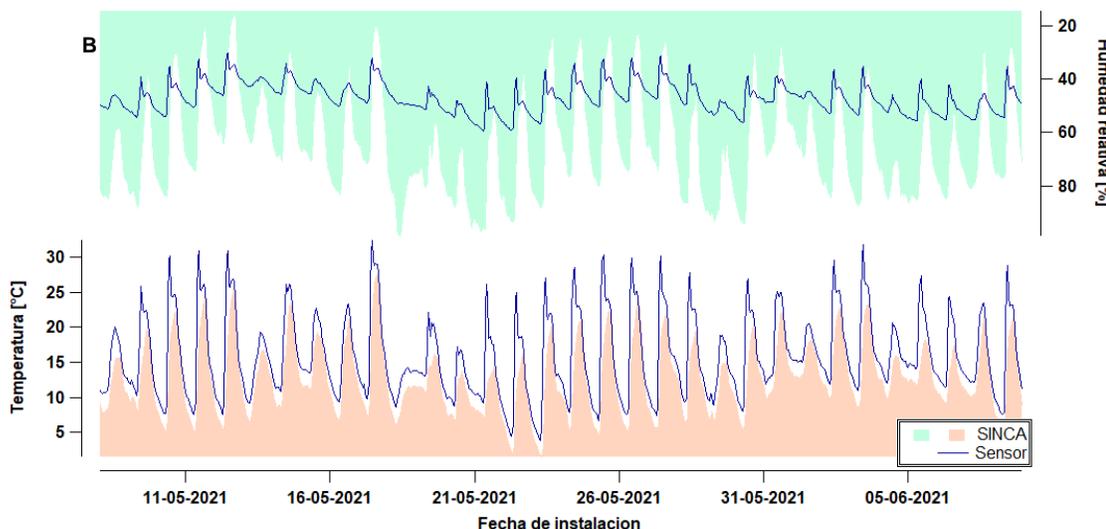
Preset ranges	0-0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 ppm 0-0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30 mg/m ³
Extended ranges	0-0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 ppm 0-0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150 mg/m ³
Custom ranges	0-0.05 to 20 ppm (0-0.02 to 100 ppm in extended ranges) 0-0.1 to 30 mg/m ³ (0-0.05 to 150 mg/m ³ in extended ranges)
Zero noise	0.20 ppb RMS (60 second averaging time)
Lower detectable limit	0.40 ppb (60 second averaging time)
Zero drift (24 hour)	< 0.40 ppb
Span drift	± 1% full-scale
Response time (in automatic mode)	40 sec (10 second averaging time) 80 sec (60 second averaging time) 300 sec (300 second averaging time)
Linearity	± 1% full-scale
Sample flow rate	0.6–0.8 LPM
Operating temperature	15–35 °C (may be safely operated over the range of 0–45 °C)*
Power requirements	100 VAC @ 50/60 Hz 115 VAC @ 50/60 Hz 220–240 VAC @ 50/60 Hz 300 watts
Physical dimensions	16.75" (W) X 8.62" (H) X 23" (D)
Weight	Approximately 55 lbs.
Analog outputs	6 voltage outputs; 0–100 mV, 1, 5, 10 V (User selectable), 5% of full-scale over/under range, 12 bit resolution, user selectable for measurement input
Digital outputs	1 power fail relay Form C, 10 digital relays Form A, user selectable alarm output, relay logic, 100 mA @ 200 VDC
Digital inputs	16 digital inputs, user select programmable, TTL level, pulled high
Serial Ports	1 RS-232 or RS-485 with two connectors, baud rate 1200–115200, data bits, parity, and stop bits, protocols: C-Link, MODBUS, and streaming data (all user selectable)
Ethernet connection	RJ45 connector for 10Mbps Ethernet connection, static or dynamic TCP/IP addressing

ANEXO 3: COMPARACION DATOS BRUTOS PLATAFORMA Y DATOS OBTENIDOS DE LA ESTACION DE MONITOREO LA FLORIDA

Gráficos comparan las señales entregadas por los diferentes sensores y los datos referenciales entregados por la estación de monitoreo oficial La Florida. (A) comparación entre sensores NO₂_01, NO₂_02 y NO₂_09 y concentración NO₂ SINCA. (B) Comparación sensores de temperatura, humedad relativa y datos de temperatura y humedad relativa del SINCA.

Fue posible observar que existe una tendencia similar entre los sensores y las concentraciones reportadas por el SINCA, sin embargo, los sensores presentan curvas menos pronunciadas cuando se mira de forma general el eje x. Es posible que la razón a este comportamiento sea la dependencia entre el voltaje que mide el sensor y la temperatura. Por otro lado, los sensores de temperatura y HR también siguen la misma tendencia al ser comparados con los datos de temperatura y HR reportados por el SINCA.





ANEXO 4: ECUACIONES METRICAS DE RENDIMIENTO

DESVIACION ESTANDAR

$$SD = \sqrt{\frac{1}{(N \times M) - 1} \sum_{j=1}^M \left[\sum_{h=1}^N (x_{hj} - \bar{x}_h)^2 \right]}$$

Donde:

SD= Desviación estándar (mV)

N= Número de periodos de 1 hora durante los cuales todos los instrumentos idénticos están operando y arrojando promedios válidos durante la prueba de campo.

M= Numero de instrumentos idénticos operados simultáneamente durante una prueba de campo.

x_{hj} = Promedio de 1 hora para la concentración de NO_2 del sensor para la hora h y el sensor j (mV)

\bar{x}_h = Promedio de 1 hora para la concentración de NO_2 del sensor para la hora h para los tres sensores (mV)

COEFICIENTE DE VARIACIÓN

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100$$

Donde:

CV = Coeficiente de variación (%)

SD = Desviación estándar (mV)

\bar{x} = Concentración de NO₂ promediada del sensor implementado para una prueba de campo (mV)

SESGO Y LINEALIDAD

Para demostrar la relación entre las mediciones del sensor y las mediciones de NO₂ de la estación de monitoreo es posible utilizar un modelo de regresión lineal simple, utilizando las mediciones de NO₂ del SINCA como variable independiente (x) y el NO₂ medido por el sensor como variable dependiente (y), calculando la pendiente, intercepto y el coeficiente de determinación (R²).

ERROR CUADRÁTICO MEDIO

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N \times M} \sum_{j=1}^M \left[\sum_{h=1}^N (x_{hj} - R_h)^2 \right]}$$

Donde:

RMSE = Error cuadrático medio (ppb)

N= Número de periodos de 1 hora durante los cuales todos los instrumentos idénticos están operando y arrojando promedios válidos durante la prueba de campo

M= Número de instrumentos idénticos operados simultáneamente durante una prueba de campo

X_{hj} = Promedio de 1 hora para la concentración de NO₂ del sensor para la hora h y el sensor j (ppb)

R_h = Concentración de NO₂ SINCA promediada de 1 hora válida para la hora h (ppb)

SESGO (TIPIFICACIÓN USO DE SENSORES)

$$|bias| = AB + t_{0.95, n-1} \cdot \frac{AS}{\sqrt{n}}$$

$$d_i = \frac{\text{Valor concentración NO}_2 \text{ sensor} - \text{Valor concentración NO}_2 \text{ SINCA}}{\text{Valor concentración NO}_2 \text{ SINCA}} * 100$$

$$AS = \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n |d_i|^2 - \left(\sum_{i=1}^n |d_i|\right)^2}{n(n-1)}} \quad AB = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |d_i|$$

Donde:

AB= Promedio de los valores absoluto de d_i

AS= Desviación estándar de los valores absolutos de d_i

n= Número de datos.

ANEXO 5: OBJETIVOS DE RENDIMIENTO SUGERIDOS PARA USO DE SENSORES DE BAJO COSTO

Ejemplos de metas de desempeño sugeridas para sensores para 5 tipos de aplicaciones de ciencia ciudadana en comparación con los requisitos de monitoreo reglamentarios (Williams R. et al, 2014)

Tipificación	Área de aplicación	Contaminantes	sesgo / precisión [%]	Compleitud [%]
I	Educación e información	Todos	<50%	≥ 50%
II	Identificación y caracterización de zonas de alta contaminación	Todos	<30%	≥ 75%
III	Monitoreo complementario	Contaminantes criterios	<20%	≥ 80%
IV	Exposición personal	Todos	<30%	≥ 80%
V	Monitoreo regulatorio*	NO ₂	<15%	≥ 75%

ANEXO 6: CALIDAD DEL MODELO REGRESION LINEAL MULTIPLE

TEMPERATURAS BAJAS

Test estadísticos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
<i>Durbin-Watson</i>	0.4391	0.6353	0.3513
<i>Breusch Pagan</i>	0.206	0.0532	0.1593
<i>Shapiro-Wilk</i>	0.1123	0.06293	0.1978
<i>Factor de inflación de varianza</i>	NO2_01	NO2_02	NO2_09
	2.140655	2.280410	2.086042
	Temperatura	Temperatura	Temperatura
	1.000619	1.001243	1.027070
	HR_SINCA	HR_SINCA	HR_SINCA
	2.141022	2.278867	2.051994

TEMPERATURAS MEDIAS

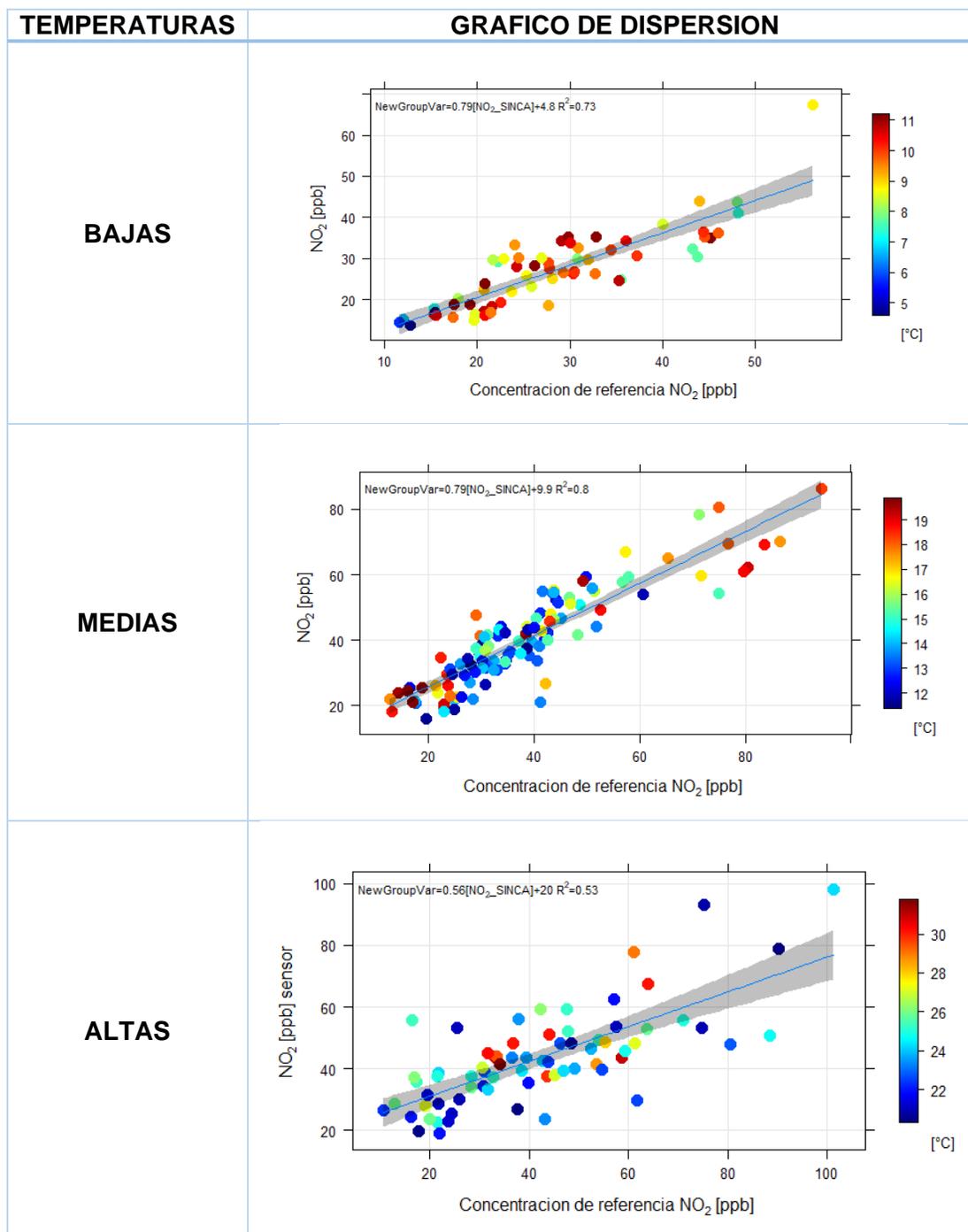
Test estadísticos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
<i>Durbin-Watson</i>	0.6039	0.4305	0.2195
<i>Breusch Pagan</i>	7.351e-07	4.992e-07	2.426e-05
<i>Shapiro-Wilk</i>	0.1049	0.3023	0.08494
<i>Factor de inflación de varianza</i>	NO2_01	NO2_02	NO2_09
	1.149005	1.177567	1.163410
	Temperatura	Temperatura	Temperatura
	1.684468	1.694310	1.641529
	HR_SINCA	HR_SINCA	HR_SINCA
	1.807368	1.842149	1.822251

TEMPERATURAS ALTAS

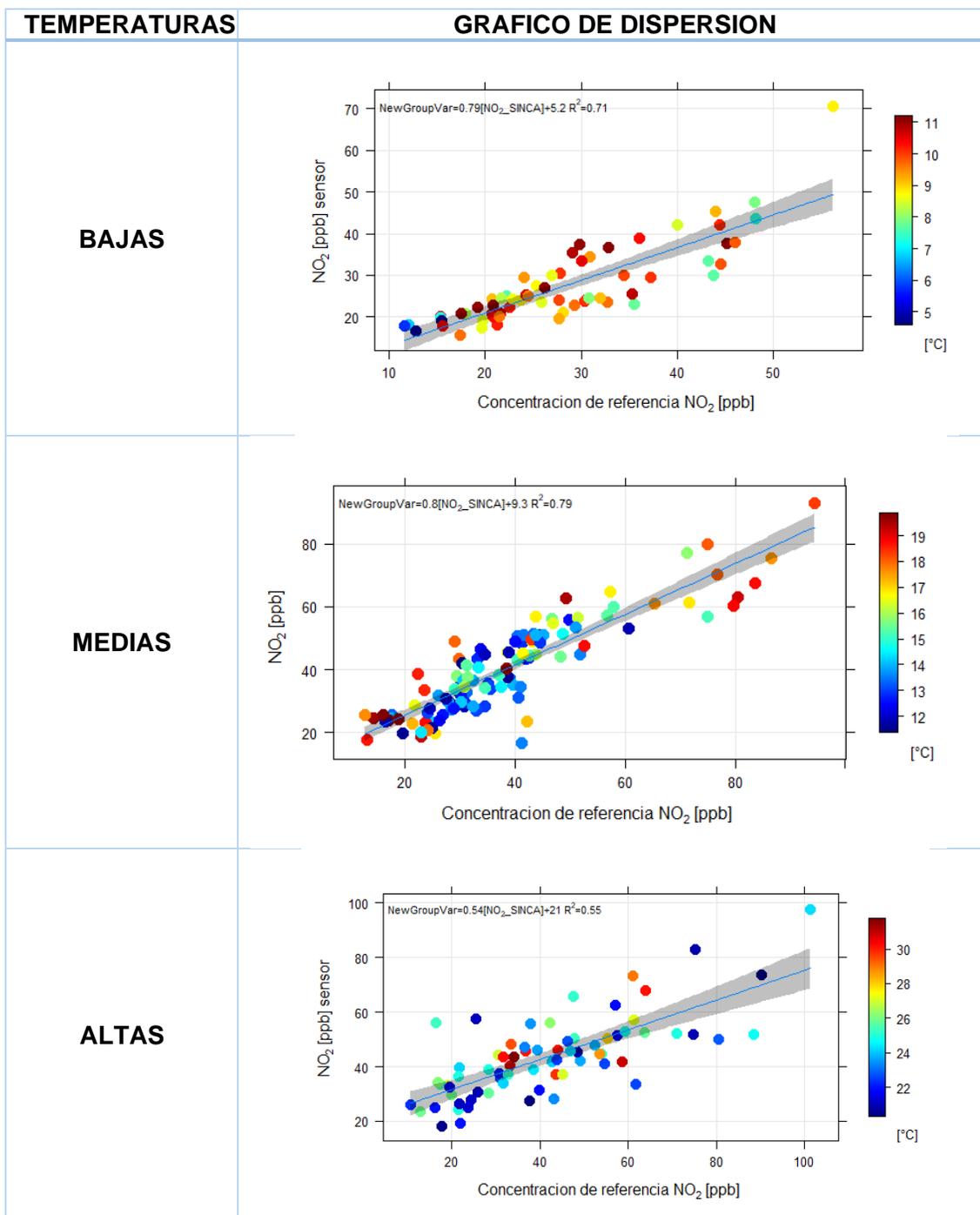
Test estadísticos	Sensor NO2_01	Sensor NO2_02	Sensor NO2_09
<i>Durbin-Watson</i>	0.956	0.8962	0.956
<i>Breusch Pagan</i>	0.199	0.2284	0.1124
<i>Shapiro-Wilk</i>	0.5008	0.8031	0.6336
<i>Factor de inflación de varianza</i>	NO2_01	NO2_02	NO2_09
	1.213189	1.226518	1.086378
	Temperatura	Temperatura	Temperatura
	1.599483	1.613156	1.441638
	HR_SINCA	HR_SINCA	HR_SINCA
	1.354154	1.351958	1.377708

ANEXO 7: GRAFICAS DATOS DE PRUEBA MODELO REGRESION LINEAL MULTIPLE

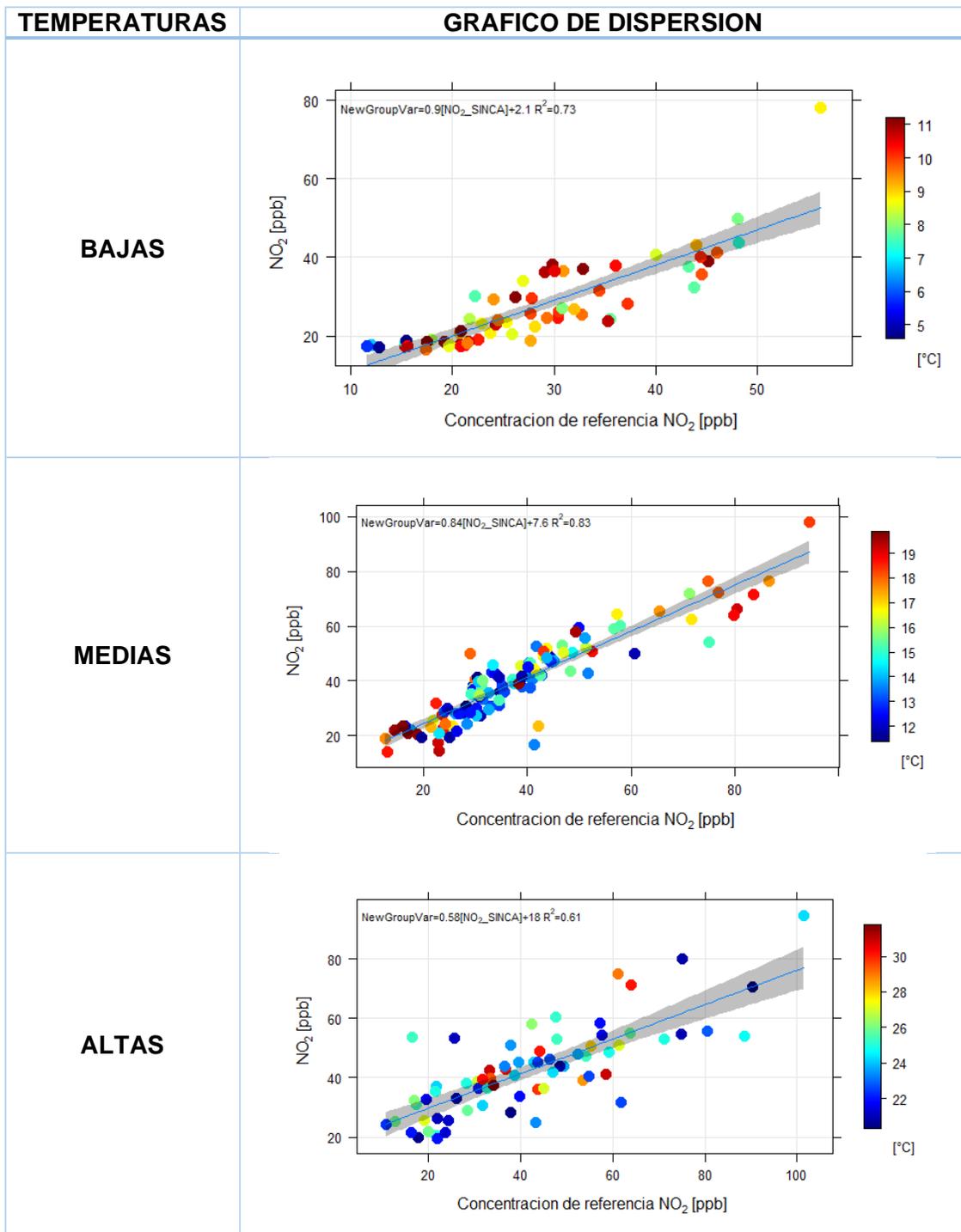
SENSOR NO₂_01



SENSOR NO2_02



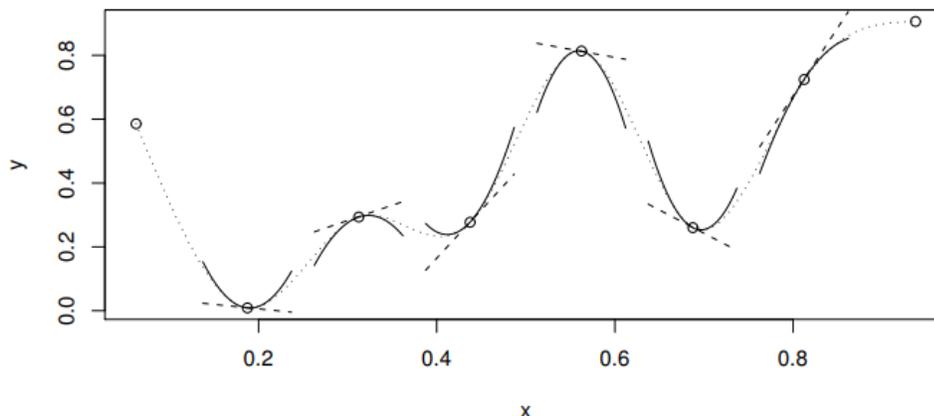
SENSOR NO2_09



ANEXO 8: FUNCION BASICA Y PARAMETRO DE SUAVIZADO

Una función de suavizado está compuesta por muchas otras funciones más pequeñas que se denominan funciones básicas o funciones base, por lo tanto, una función de suavizado es específicamente la suma de varias funciones base

La función de suavizado utilizada en este seminario serán basados en splines, los cuales son trozos de polinomios que se unen en puntos llamados nodos.



Dentro del paquete “mgcv” que se utiliza para aplicar el modelo es posible encontrar Splines de regresión de placa delgada los cuales tienen la propiedad de evitar tener que elegir las ubicaciones de los nudos y son razonablemente eficientes desde el punto de vista computacional.

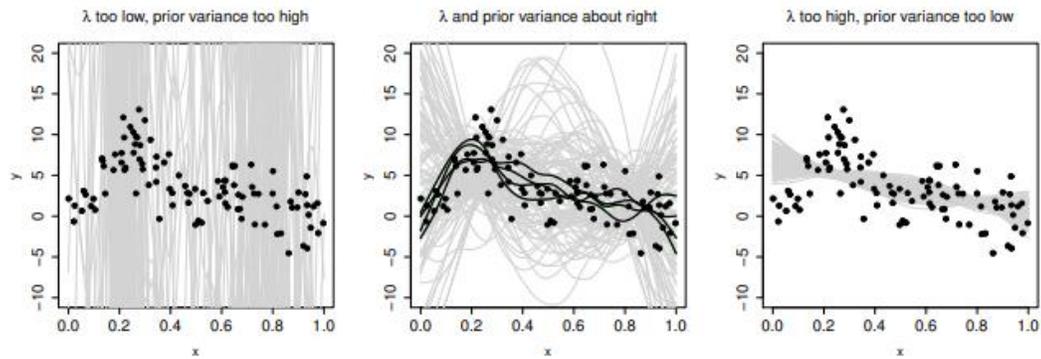
PARAMETRO DE SUAVIZADO

La forma en el que GAM captura un patrón en los datos, es mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ajuste} = \text{Likelihood} - \lambda (\text{wigglines})$$

donde la forma de obtener un buen ajuste es la compensación entre el término probabilidad (likelihood) y la ondulación (wigglines) de la curva, donde λ representa un parámetro de suavizado que controla el equilibrio.

Como se muestra en la siguiente Figura, si λ es demasiado alto los datos se van a suavizar en exceso pudiendo formar una línea recta en un conjunto de datos que pueden llegar a ser curvos en, mientras que si toma un valor muy bajo se suavizarán los datos por debajo de lo normal pudiendo ajustar el ruido en lugar de la tendencia de los datos. Es debido a esto la importancia de seleccionar un λ adecuado para los datos de la muestra.



A la izquierda es posible notar como un parámetro de suavizado demasiado bajo falla en pasar cerca de los datos, mientras que un parámetro de suavizado demasiado alto (derecha) tampoco pasan lo suficientemente cerca de los datos. Por lo tanto, al tener un parámetro de suavizado correcto la curva tiene un nivel correcto entre pasar cerca de los datos y tener una alta probabilidad, alguna de estas curvas se puede observar cómo líneas negras en la imagen central.

El paquete “mgcv” utilizado para realizar el modelo puede obtener un parámetro de suavizado óptimo a través de un método de estimación específico. Se utilizó el **método de máxima verosimilitud restringida (REML)**, el cual por una parte reduce el sesgo en comparación a otros métodos que se pueden llegar a utilizar, como lo es el método de máxima verosimilitud (ML) y además tiene una serie de ventajas teóricas que lo hacen un método recomendable (Fahrmeir L. 2013; Galan C. 2003; Wood S. 2017)

ANEXO 9: CALIDAD DEL MODELO ADITIVO GENERALIZADO

Sensor NO2_01

Efecto de los términos suavizados en el modelo para sensor NO2_01

```

Family: gaussian
Link function: identity

Formula:
NO2_SINCA ~ s(NO2_01) + s(Temperatura) + s(HR_SINCA)

Parametric coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  37.1654    0.3325   111.8  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:
              edf Ref.df      F p-value
s(NO2_01)    1.001  1.002 1113.49 <2e-16 ***
s(Temperatura) 5.038  6.209   34.38 <2e-16 ***
s(HR_SINCA)  6.375  7.536   13.13 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.792  Deviance explained = 79.6%
-REML = 2051.8  Scale est. = 64.436    n = 583

```

Valores entregados para el análisis de las funciones de suavizado en el modelo para el sensor NO2_01

```

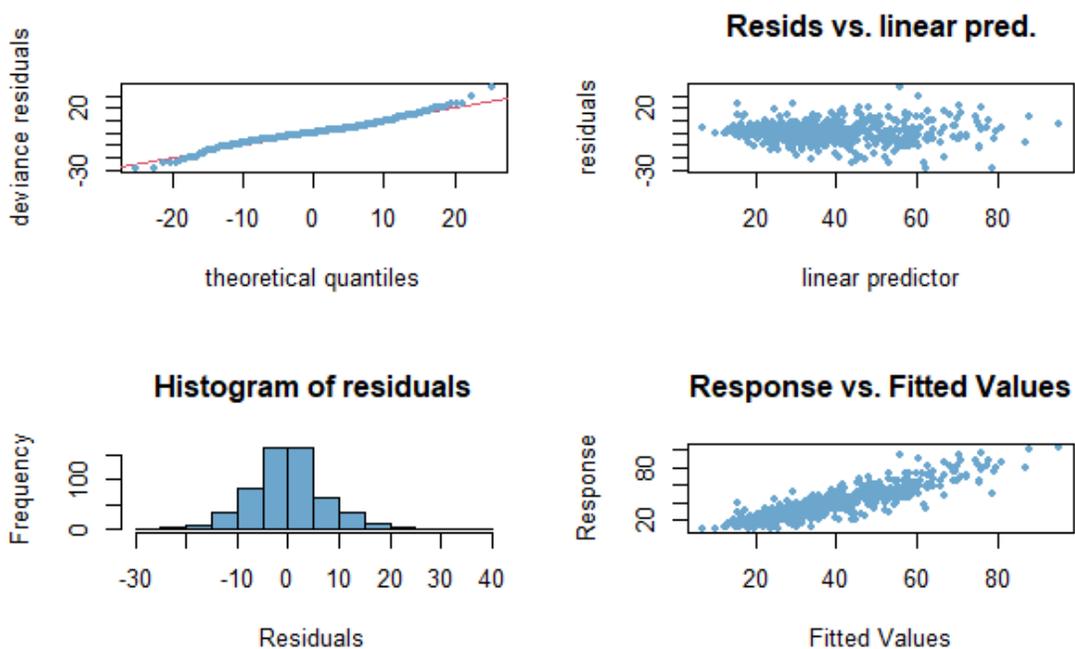
Method: REML  Optimizer: outer newton
full convergence after 5 iterations.
Gradient range [-0.0002066527,0.0002320392]
(score 2051.835 & scale 64.4356).
Hessian positive definite, eigenvalue range [0.000206636,289.5389].
Model rank = 28 / 28

```

Basis dimension (k) checking results. Low p-value (k-index<1) may indicate that k is too low, especially if edf is close to k'.

	k'	edf	k-index	p-value
s(NO2_01)	9.00	1.00	0.96	0.22
s(Temperatura)	9.00	5.04	1.08	0.98
s(HR_SINCA)	9.00	6.37	0.95	0.14

Gráficos de los residuales del modelo para el sensor NO2_01.



Valores de concurrencia para las variables explicativas para sensor NO2_01.

```

$worst
      para      s(NO2_01) s(Temperatura) s(HR_SINCA)
para      1.000000e+00 6.763298e-24 2.893541e-26 1.019197e-24
s(NO2_01) 6.764751e-24 1.000000e+00 5.523390e-01 4.503113e-01
s(Temperatura) 2.892422e-26 5.523390e-01 1.000000e+00 7.394887e-01
s(HR_SINCA) 1.011510e-24 4.503113e-01 7.394887e-01 1.000000e+00

$observed
      para      s(NO2_01) s(Temperatura) s(HR_SINCA)
para      1.000000e+00 7.462679e-34 5.057619e-30 1.086803e-27
s(NO2_01) 6.764751e-24 1.000000e+00 5.238084e-01 3.786199e-01
s(Temperatura) 2.892422e-26 3.839566e-01 1.000000e+00 6.759181e-01
s(HR_SINCA) 1.011510e-24 2.478642e-01 6.888583e-01 1.000000e+00

$estimate
      para      s(NO2_01) s(Temperatura) s(HR_SINCA)
para      1.000000e+00 2.343019e-26 1.104277e-28 2.597034e-27
s(NO2_01) 6.764751e-24 1.000000e+00 4.107844e-01 3.688317e-01
s(Temperatura) 2.892422e-26 3.183224e-01 1.000000e+00 6.426582e-01
s(HR_SINCA) 1.011510e-24 2.289470e-01 5.764380e-01 1.000000e+00

```

Sensor NO2_02

Efecto de los términos suavizados en el modelo para sensor NO2_02

```

Family: gaussian
Link function: identity

Formula:
NO2_SINCA ~ s(NO2_02) + s(Temperatura) + s(HR_SINCA)

Parametric coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  37.1654    0.3362   110.5   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:
              edf Ref.df      F p-value
s(NO2_02)     2.242  2.879 364.06 <2e-16 ***
s(Temperatura) 6.059  7.255  27.54 <2e-16 ***
s(HR_SINCA)   6.620  7.755  10.94 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.787  Deviance explained = 79.2%
-REML = 2061.8  Scale est. = 65.898  n = 583

```

Valores entregados para el análisis de las funciones de suavizado en el modelo para el sensor NO2_02

```

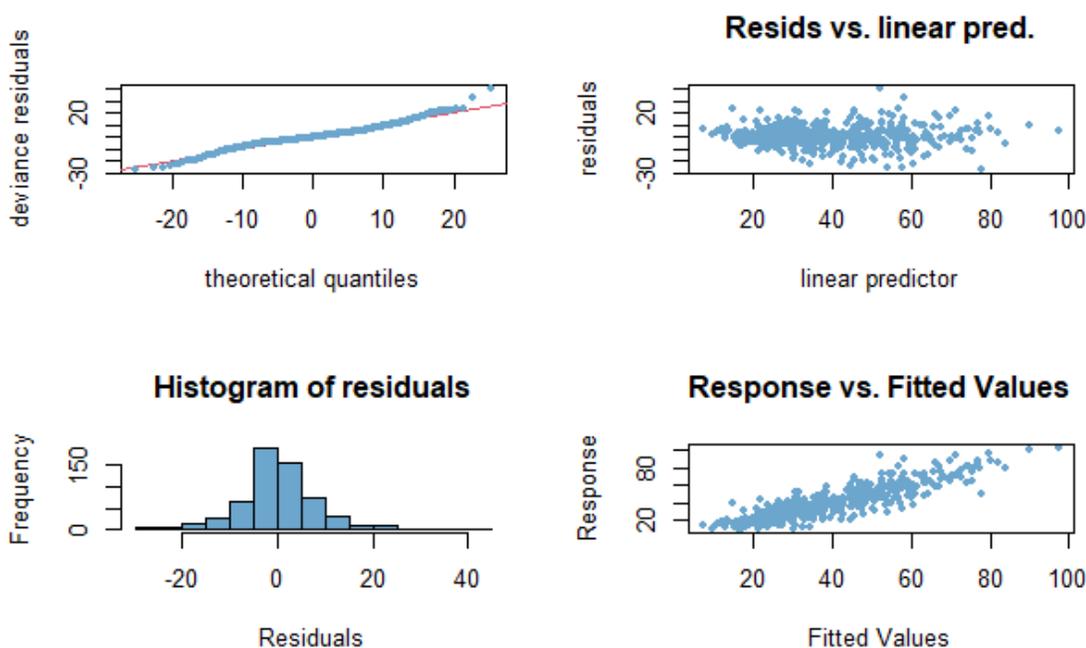
Method: REML  Optimizer: outer newton
full convergence after 6 iterations.
Gradient range [-3.697245e-06,1.65211e-06]
(score 2061.8 & scale 65.89765).
Hessian positive definite, eigenvalue range [0.3345338,289.5509].
Model rank = 28 / 28

Basis dimension (k) checking results. Low p-value (k-index<1) may
indicate that k is too low, especially if edf is close to k'.

              k'  edf k-index p-value
s(NO2_02)     9.00 2.24   0.96   0.16
s(Temperatura) 9.00 6.06   1.04   0.82
s(HR_SINCA)   9.00 6.62   0.93   0.07 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Gráficos de los residuales del modelo para el sensor NO2_02



Valores de concurrencia para las variables explicativas para sensor NO2_02

```

$worst
      para      s(NO2_02) s(Temperatura) s(HR_SINCA)
para      1.000000e+00 2.576310e-24 1.554669e-25 1.019197e-24
s(NO2_02) 2.575666e-24 1.000000e+00 5.424686e-01 4.481534e-01
s(Temperatura) 1.577674e-25 5.424686e-01 1.000000e+00 7.394887e-01
s(HR_SINCA) 1.018063e-24 4.481534e-01 7.394887e-01 1.000000e+00

$observed
      para      s(NO2_02) s(Temperatura) s(HR_SINCA)
para      1.000000e+00 8.945671e-32 9.753558e-29 9.350212e-28
s(NO2_02) 2.575666e-24 1.000000e+00 5.200044e-01 3.601828e-01
s(Temperatura) 1.577674e-25 3.546119e-01 1.000000e+00 6.596883e-01
s(HR_SINCA) 1.018063e-24 2.341435e-01 6.874293e-01 1.000000e+00

$estimate
      para      s(NO2_02) s(Temperatura) s(HR_SINCA)
para      1.000000e+00 6.856678e-27 4.460925e-28 2.597034e-27
s(NO2_02) 2.575666e-24 1.000000e+00 4.143236e-01 3.638531e-01
s(Temperatura) 1.577674e-25 3.007405e-01 1.000000e+00 6.426582e-01
s(HR_SINCA) 1.018063e-24 2.264201e-01 5.764380e-01 1.000000e+00
  
```

Sensor NO2_09

Efecto de los términos suavizados en el modelo para sensor NO2_09

```

Family: gaussian
Link function: identity

Formula:
NO2_SINCA ~ s(NO2_09) + s(Temperatura) + s(HR_SINCA)

Parametric coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  37.1654      0.3112   119.4  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:
              edf Ref.df      F p-value
s(NO2_09)     3.069  3.914 345.61 <2e-16 ***
s(Temperatura) 5.114  6.288  21.33 <2e-16 ***
s(HR_SINCA)   6.279  7.446  12.68 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) =  0.817  Deviance explained = 82.2%
-REML = 2015.4  Scale est. = 56.451    n = 583

```

Valores entregados para el análisis de las funciones de suavizado en el modelo para el sensor NO2_09

```

Method: REML  Optimizer: outer newton
full convergence after 5 iterations.
Gradient range [-1.870579e-05,1.158836e-07]
(score 2015.405 & scale 56.45051).
Hessian positive definite, eigenvalue range [0.4272795,289.5425].
Model rank = 28 / 28

```

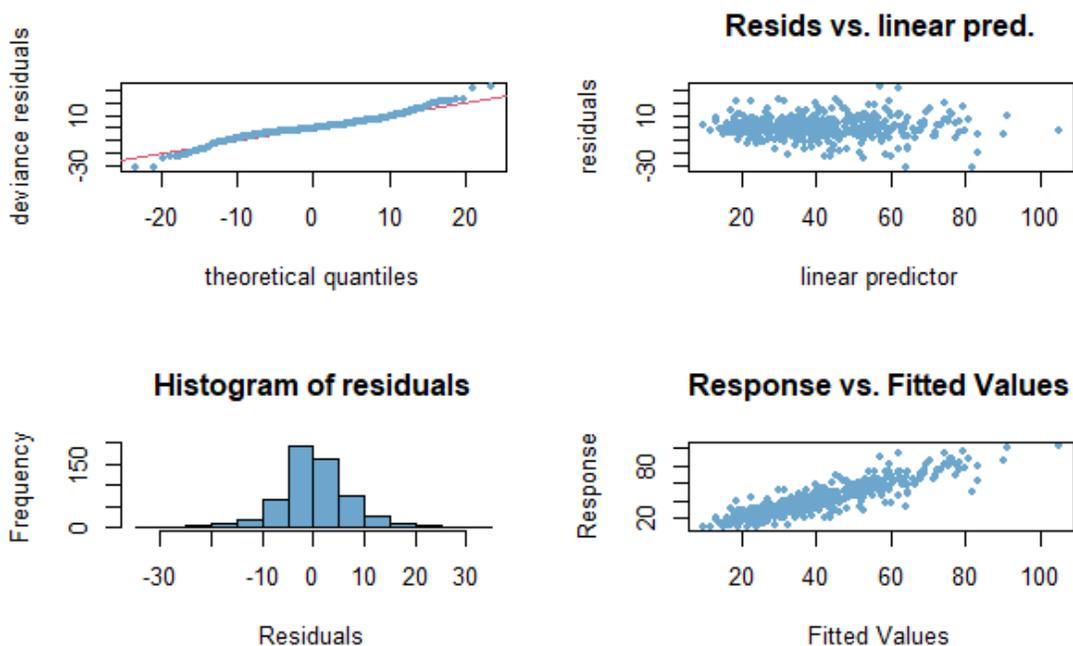
Basis dimension (k) checking results. Low p-value (k-index<1) may indicate that k is too low, especially if edf is close to k'.

```

              k'  edf k-index p-value
s(NO2_09)     9.00 3.07   0.93  0.065 .
s(Temperatura) 9.00 5.11   1.05  0.905
s(HR_SINCA)   9.00 6.28   0.97  0.165
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Gráficos de los residuales del modelo para el sensor NO2_09.



Valores de concurrencia para las variables explicativas para sensor NO2_09.

\$worst

	para	s(NO2_09)	s(Temperatura)	s(HR_SINCA)
para	1.000000e+00	1.715267e-25	1.554669e-25	1.019197e-24
s(NO2_09)	1.735289e-25	1.000000e+00	3.898585e-01	3.419070e-01
s(Temperatura)	1.569260e-25	3.898585e-01	1.000000e+00	7.394887e-01
s(HR_SINCA)	1.017632e-24	3.419070e-01	7.394887e-01	1.000000e+00

\$observed

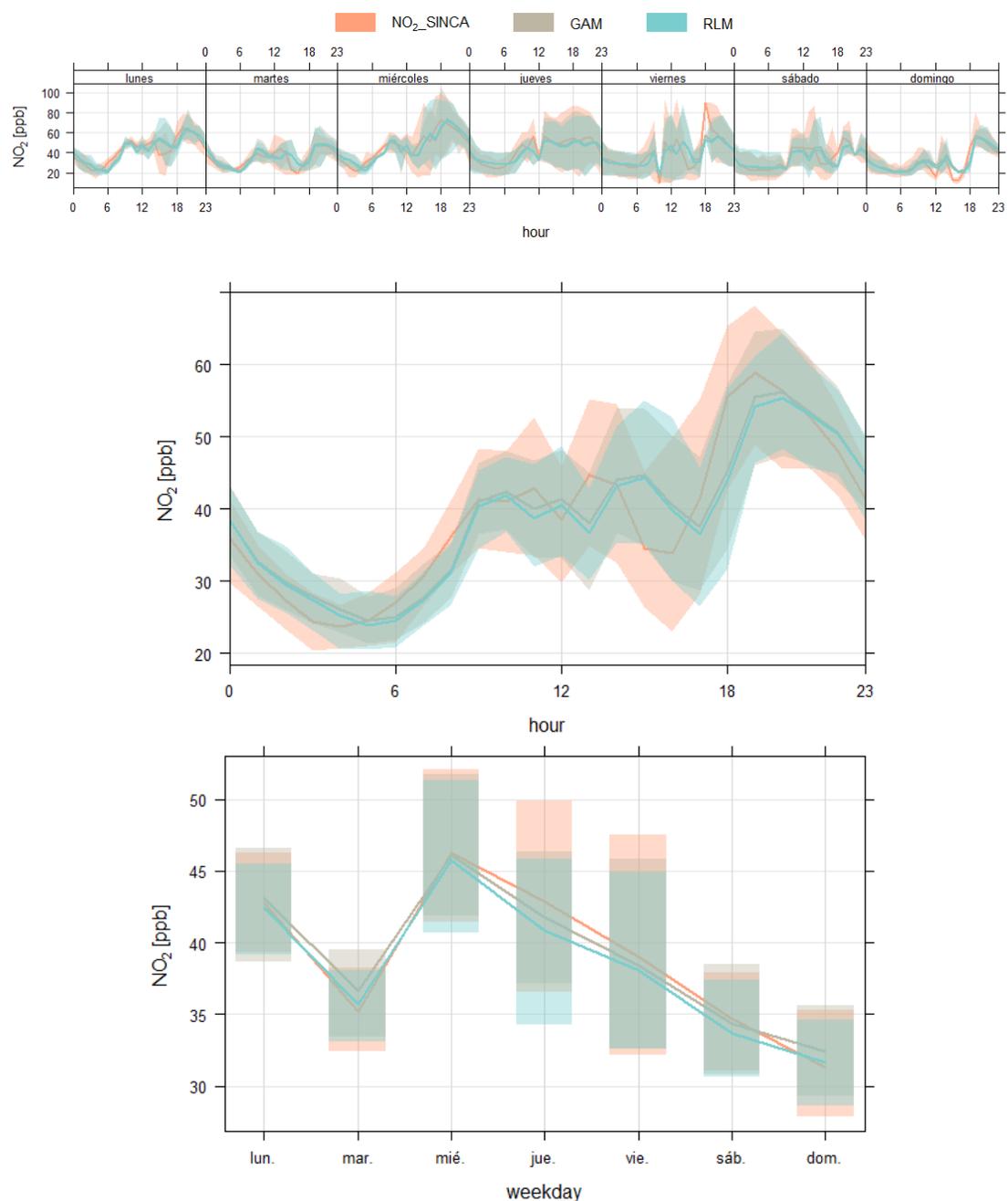
	para	s(NO2_09)	s(Temperatura)	s(HR_SINCA)
para	1.000000e+00	9.446066e-36	4.304033e-29	5.880023e-28
s(NO2_09)	1.735289e-25	1.000000e+00	3.424093e-01	2.892916e-01
s(Temperatura)	1.569260e-25	2.136519e-01	1.000000e+00	6.491499e-01
s(HR_SINCA)	1.017632e-24	1.478337e-01	6.847616e-01	1.000000e+00

\$estimate

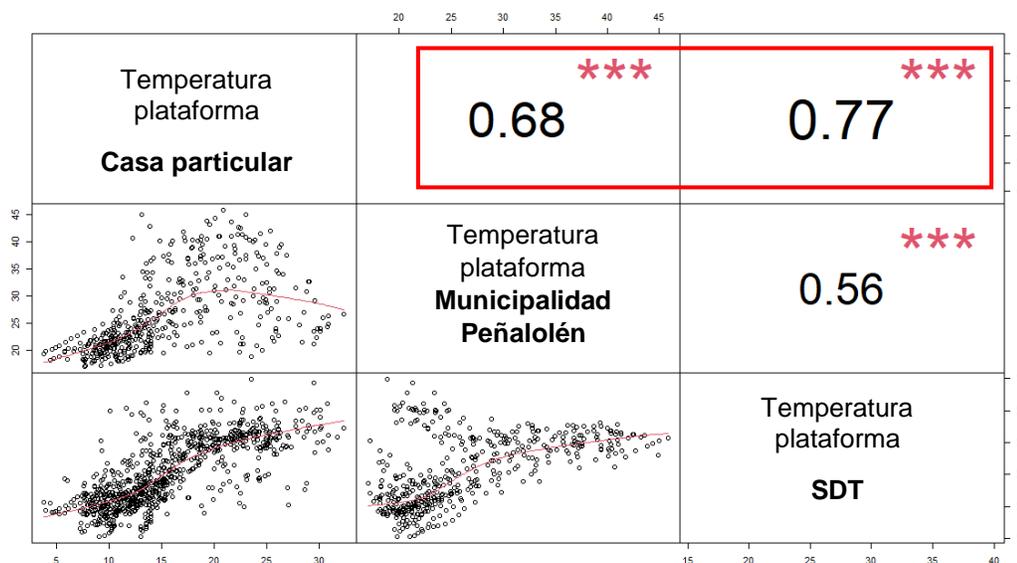
	para	s(NO2_09)	s(Temperatura)	s(HR_SINCA)
para	1.000000e+00	7.005502e-28	4.460925e-28	2.597034e-27
s(NO2_09)	1.735289e-25	1.000000e+00	2.868503e-01	2.707785e-01
s(Temperatura)	1.569260e-25	2.078902e-01	1.000000e+00	6.426582e-01
s(HR_SINCA)	1.017632e-24	1.485339e-01	5.764380e-01	1.000000e+00

ANEXO 10: CONCENTRACION DE NO₂ EN LA COMUNA LA FLORIDA

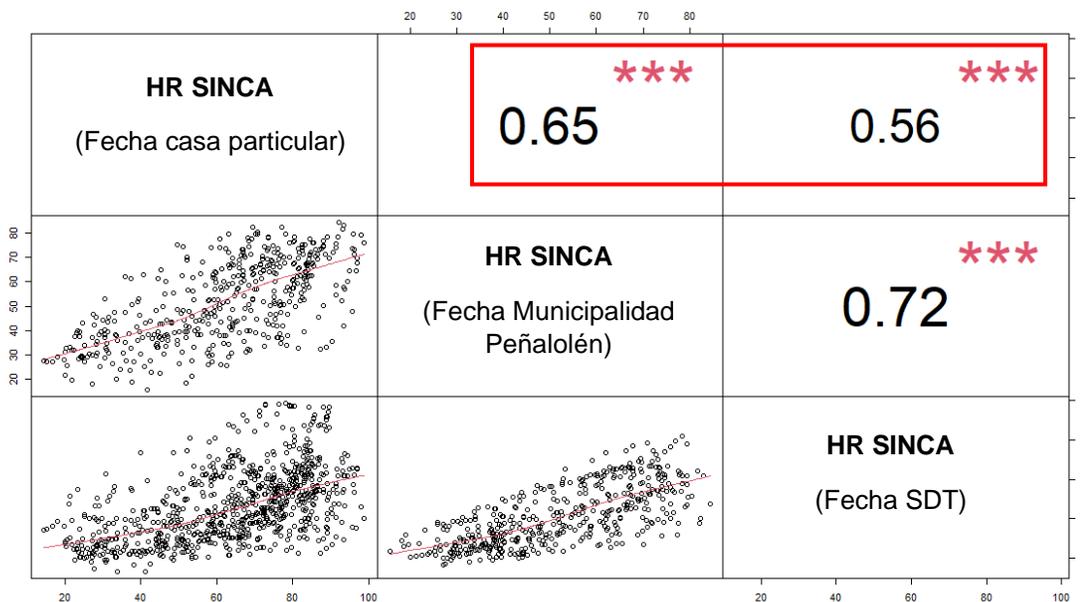
Gráfico variación semanal, horaria y promedio diario respectivamente en la concentración de NO₂ en la comuna de La Florida. Datos obtenidos por los sensores con los diferentes modelos estadísticos utilizados (GAM y modelo RLM) y los valores referenciales entregados por la estación de monitoreo oficial La Florida (NO₂_SINCA).



ANEXO 11: CORRELACIÓN DE SPEARMAN ENTRE VARIABLES PREDICTORAS, TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA, EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE MONITOREO



Correlación de Spearman entre las temperaturas medidas por la plataforma en las diferentes campañas de monitoreo. Valor significancia (valor p): “***” 0,001; “**” 0,01; “*” 0,05; “.” 0,1; “ ” 1.

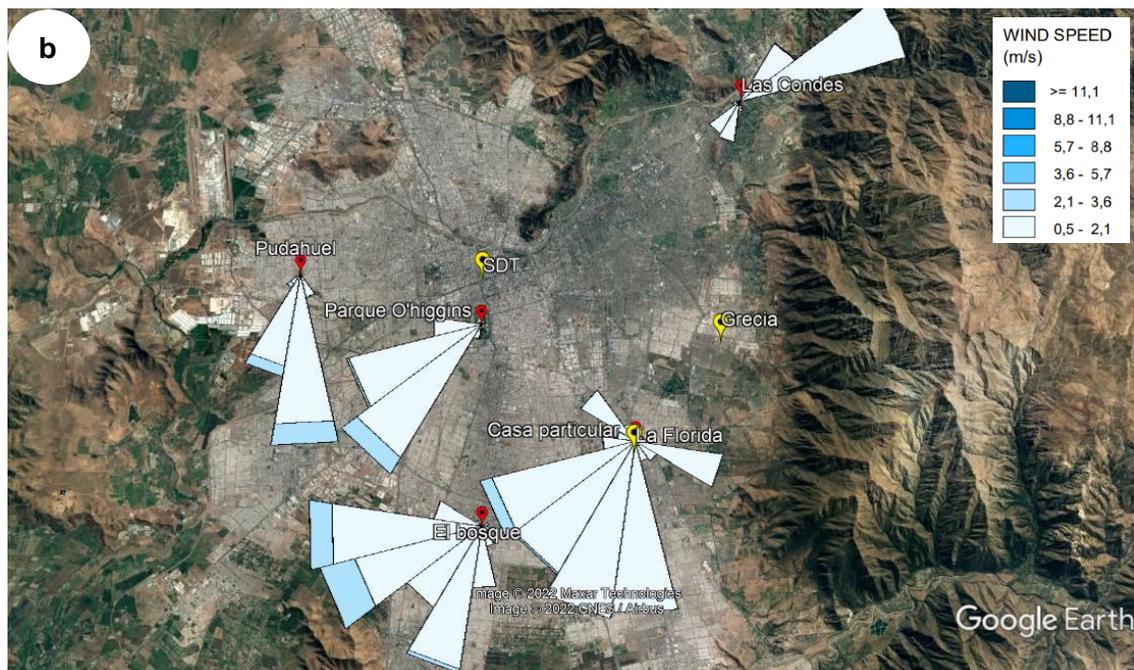
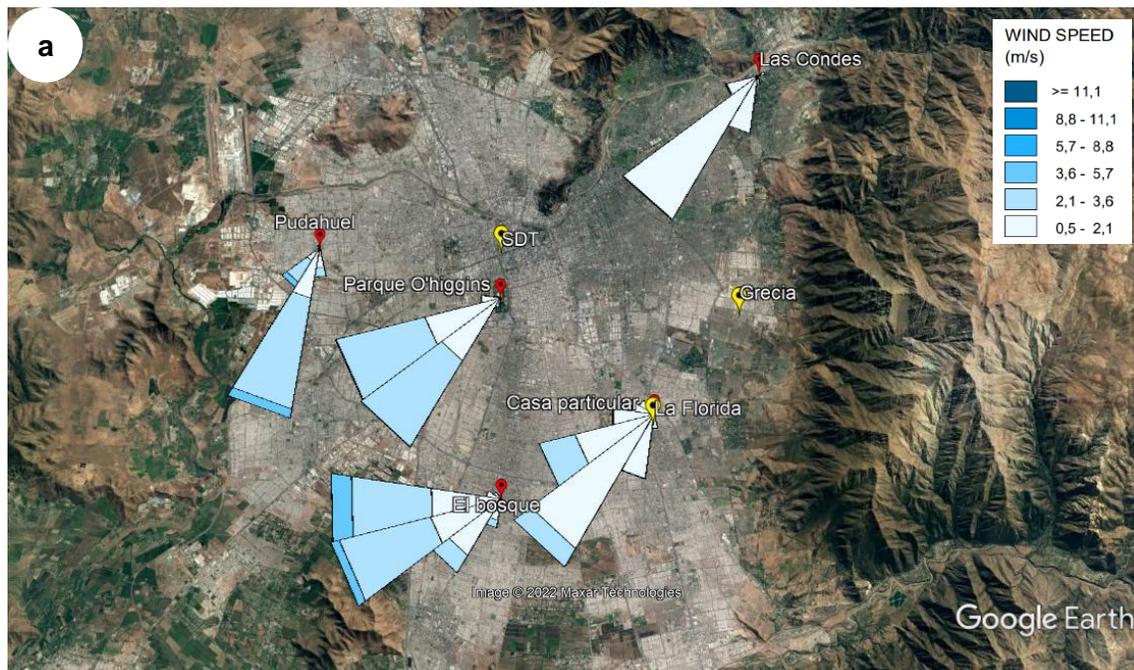


Correlación de Spearman para la HR reportadas por la estación de monitoreo oficial La Florida para las diferentes campañas de monitoreo. Valor significancia (valor p): “***” 0,001; “**” 0,01; “*” 0,05; “.” 0,1; “ ” 1.

ANEXO 12: ROSA DE LOS VIENTOS, EPOCA VERANO, EN LA REGION METROPOLITANA

Rosa de los vientos realizada a partir de los datos de dirección y velocidad del viento

a) entre las 7:00 y las 19:00 horas b) entre las 19:00 y las 7:00

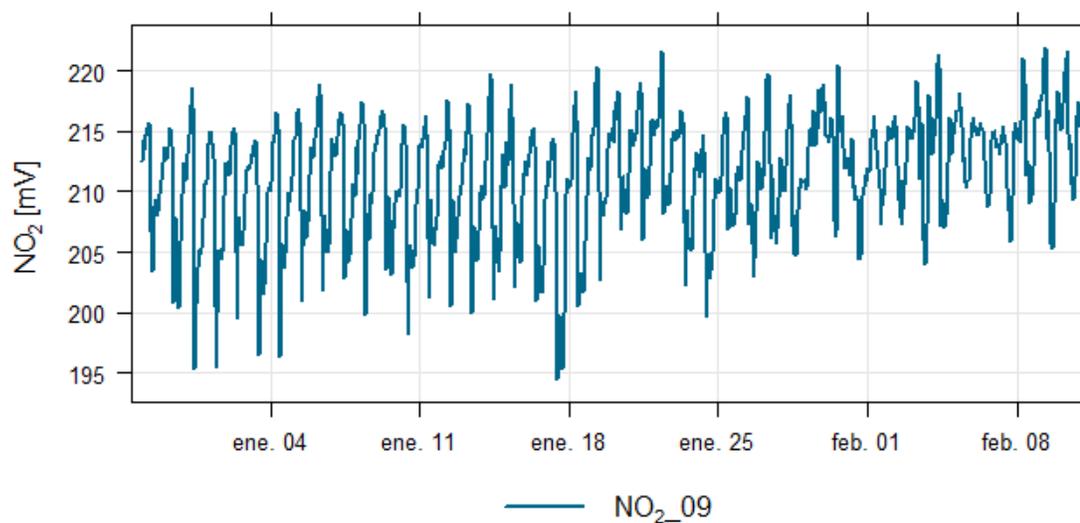


FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO PARA LAS DIFERENTES ESTACIONES DE MONITOREO CONSULTADAS

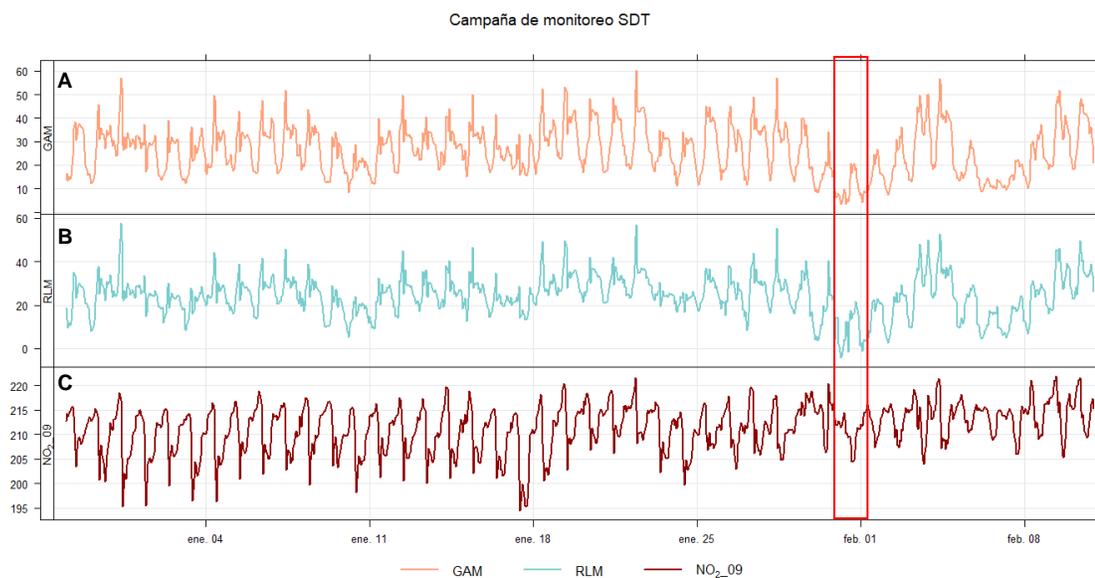
Horario	Velocidad del viento [m/s]	Frecuencia de distribución [%]				
		Estaciones de monitoreo oficiales				
		El Bosque	La Florida	Las Condes	Pudahuel	Parque O'Higgins
7:00 - 19:00	Calma	7.6	14.0	13.2	8.0	9.1
	0.5 - 2.1	49.3	75.2	86.2	35.8	46.1
	2.1 - 3.6	37.6	10.8	0.6	50.9	44.5
	3.6 - 5.7	5.5	-	-	5.2	0.3
	5.7 - 8.8	-	-	-	-	-
	8.8 - 11.1	-	-	-	-	-
	≥ 11.1	-	-	-	-	-
19:00 - 7:00	Calma	50.8	59.8	65.8	31.1	44.7
	0.5 - 2.1	45.0	39.6	34.2	61.0	52.3
	2.1 - 3.6	4.2	0.6	0.1	7.9	3.0
	3.6 - 5.7	-	-	-	-	-
	5.7 - 8.8	-	-	-	-	-
	8.8 - 11.1	-	-	-	-	-
	≥ 11.1	-	-	-	-	-

ANEXO 13: ANÁLISIS EXPLORATORIO DATOS CRUDOS CAMPAÑA DE MONITOREO SDT

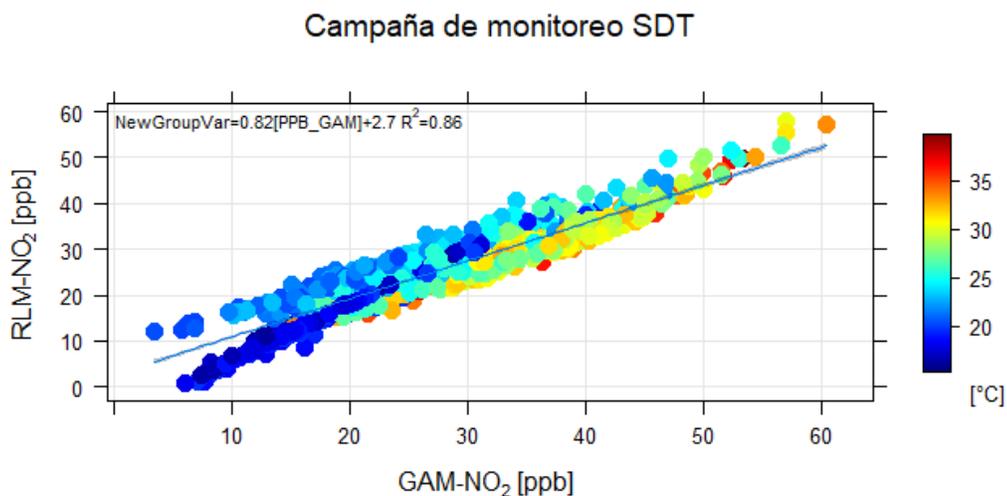
Campaña de monitoreo SDT



Serie de tiempo campaña de monitoreo SDT (A) Concentraciones de NO_2 [ppb] a partir de GAM. (B) Concentraciones de NO_2 [ppb] a partir de RLM. (C) Señal sensor NO_2_{09} [mv].

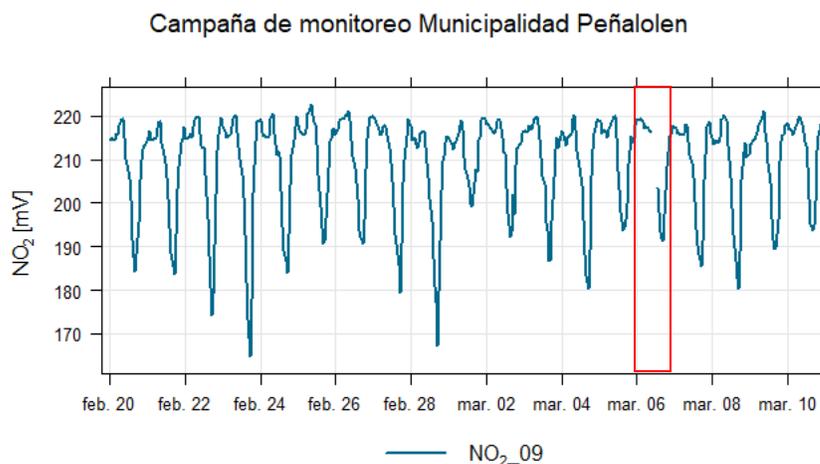


ANEXO 14: GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE NO₂ EN EL SITIO SDT CALCULADAS POR EL MODELO DE RLM Y GAM.

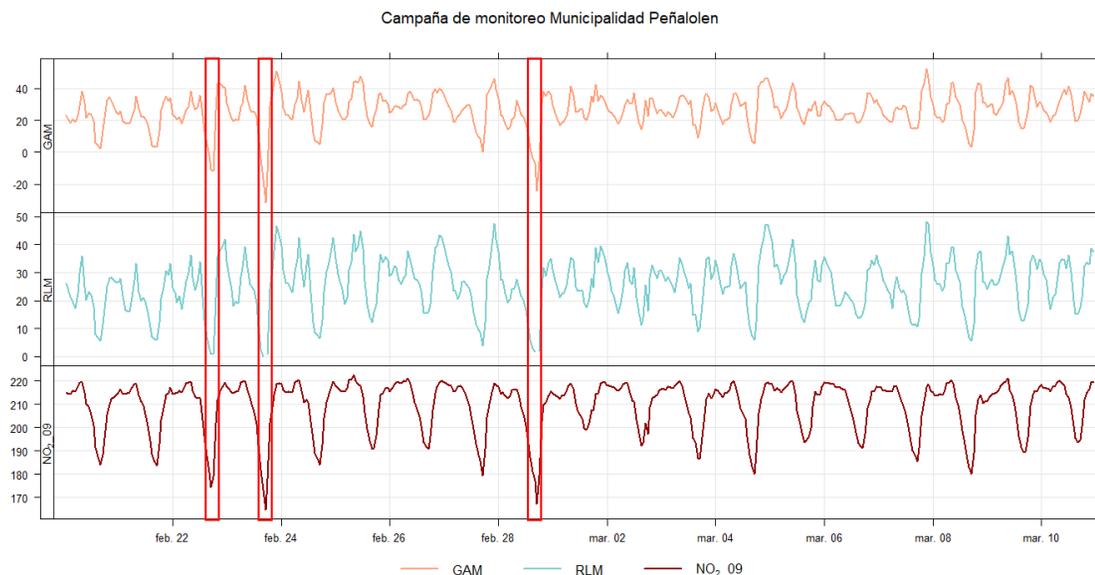


ANEXO 15: ANÁLISIS EXPLORATORIO DATOS CRUDOS CAMPAÑA DE MONITOREO MUNICIPALIDAD DE PEÑALOLÉN

En primera instancia se realizó una revisión de los datos crudos medidos por el sensor NO₂_09, encontrando una falta de datos el día 06/03/21 entre las 10:00 y las 13:00 esto debido a un corte de corriente no programado ocurrido en la municipalidad de Peñalolén.

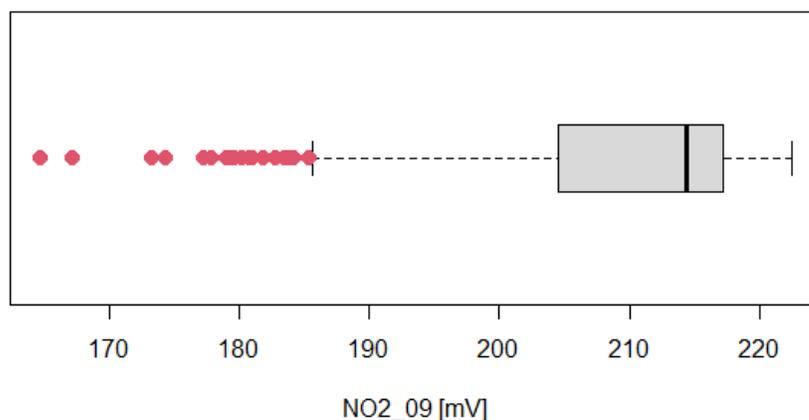


Una vez obtenidas las concentraciones es posible observar en la figura como al utilizar GAM se obtienen valores negativos de concentración, mientras que RLM no logra obtener los valores de concentración de NO₂ en dos oportunidades. Los rectángulos marcados en color rojo en la figura muestran como los valores antes mencionados se relacionan con un bajo voltaje medido por el sensor NO₂_09.

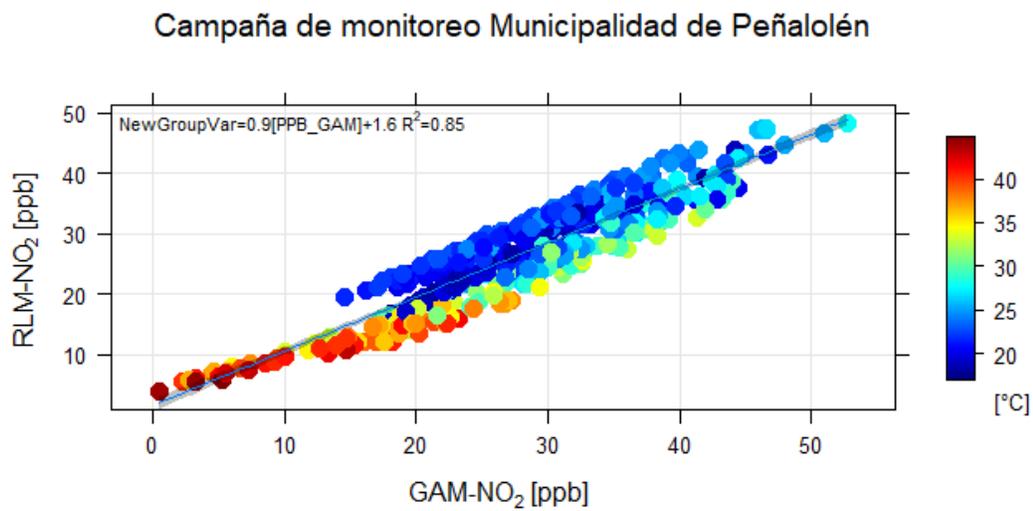


Serie de tiempo concentraciones de NO₂ en municipalidad Peñalolén.

Debido a que el sensor muestra esta baja de voltaje en 3 oportunidades, se decidió realizar un diagrama de caja con la finalidad de identificar y eliminar los valores atípicos dentro de la campaña de monitoreo. Los valores atípicos encontrados corresponden a voltajes medidos por el sensor inferiores a 185,7 mV.



ANEXO 16: GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE NO₂ CALCULADAS EN LA MUNICIPALIDAD DE PEÑALOLÉN POR EL MODELO DE RLM Y GAM



ANEXO 17: PROMEDIO TRAFICO VEHICULAR EN SANTIAGO 2021

 **trafico de santiago**

	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
12:00 AM	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%
02:00 AM	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
04:00 AM	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
06:00 AM	0%	16%	17%	16%	16%	15%	0%
	0%	43%	43%	42%	41%	38%	2%
08:00 AM	0%	46%	49%	48%	47%	40%	5%
	2%	35%	39%	40%	39%	34%	12%
10:00 AM	6%	33%	37%	39%	38%	37%	18%
	10%	36%	40%	42%	42%	43%	26%
12:00 PM	15%	40%	44%	47%	47%	50%	33%
	18%	42%	46%	50%	51%	57%	37%
02:00 PM	14%	36%	39%	42%	44%	54%	31%
	11%	35%	37%	39%	42%	54%	22%
04:00 PM	12%	40%	42%	44%	47%	67%	20%
	13%	54%	57%	60%	63%	82%	20%
06:00 PM	15%	72%	78%	80%	83%	89%	20%
	16%	57%	61%	64%	67%	71%	19%
08:00 PM	16%	28%	31%	34%	35%	45%	17%
	12%	13%	15%	17%	16%	26%	14%
10:00 PM	5%	4%	5%	7%	7%	13%	8%
	0%	0%	0%	0%	1%	4%	3%

ANEXO 18: VALORES ESTADISTICO T-STUDENT

HORA	NO ₂ [ppb] RLM		t-Student	NO ₂ [ppb] GAM		t-Student
	SDT	M. Peñalolén	valor p	SDT	M. Peñalolén	valor p
0:00	19,62	33,03	1.61e ⁻¹¹	19,59	30,48	4.16e ⁻¹⁰
1:00	17,95	29,64	1.31e ⁻¹¹	18,14	26,76	5.66e ⁻⁸
2:00	17,67	26,65	8.72e ⁻⁹	17,69	24,06	1.56e ⁻⁶
3:00	16,02	24,55	9.39e ⁻⁶	16,12	22,45	7.38e ⁻⁶
4:00	16,20	22,06	1.3e ⁻⁴	16,19	20,85	3.2e ⁻⁴
5:00	16,77	21,87	3.6e ⁻⁴	17,12	20,86	2.7e ⁻⁴
6:00	19,31	24,95	9.3e ⁻⁴	19,70	24,75	0.001
7:00	23,99	28,57	0.009	25,00	28,05	0.051
8:00	26,71	34,22	4.9e ⁻⁴	28,34	35,77	0.004
9:00	32,10	31,49	0.79	33,98	34,30	0.89
10:00	34,75	28,23	0.008	38,87	31,09	0.004
11:00	24,81	27,96	0.12	29,03	31,06	0.39
12:00	26,81	26,88	0.97	30,33	30,78	0.86
13:00	29,23	21,45	3.31e ⁻⁵	32,89	25,49	0.0015
14:00	27,92	14,43	1.21e ⁻¹²	31,68	16,67	3.62e ⁻¹⁰
15:00	26,67	11,70	2.2e ⁻¹⁶	30,51	13,49	8.53e ⁻¹³
16:00	26,86	13,02	4.34e ⁻¹⁰	30,93	16,41	2.91e ⁻⁸
17:00	26,77	16,70	9.8e ⁻⁷	31,11	22,55	6.8e ⁻⁴
18:00	27,40	16,68	5.5e ⁻¹⁰	31,42	22,78	1e ⁻⁴
19:00	27,23	28,51	0.35	30,23	34,79	0.017
20:00	27,64	33,57	7e ⁻⁶	29,58	37,72	5.19e ⁻⁷
21:00	26,85	35,46	6.8e ⁻⁶	27,45	37,00	1.6e ⁻⁵
22:00	24,60	36,07	1.2e ⁻⁷	24,85	35,60	1.09e ⁻⁶
23:00	21,62	36,24	4.15e ⁻¹²	21,56	34,53	8.14e ⁻¹¹