

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN SATELITAL PARA ESTIMAR LA
CALIDAD DEL AIRE A NIVEL DE SUPERFICIE**

**EVALUACIÓN DE LOS DATOS SATELITALES DE DIÓXIDO DE
NITRÓGENO EN CONTRASTE CON LA INFORMACIÓN DE
SUPERFICIE DE LA RED METROPOLITANA DE MONITOREO
ATMOSFÉRICO DE QUITO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

EDISON ALEXANDER MALDONADO BUELE

edison.maldonado@epn.edu.ec

DIRECTOR: CARLOS LUIS PÁEZ PÉREZ

carlos.pérez@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, EDISON ALEXANDER MALDONADO BUELE declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Edison Maldonado

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Edison Maldonado, bajo mi supervisión.

CARLOS PÁEZ PÉREZ
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MALDONADO BUELE EDISON ALEXANDER

CARLOS PÁEZ PÉREZ

DEDICATORIA

A mis padres Angel y Maritza por siempre confiar en mi incluso cuando yo ya no podía.

A mis hermanos Roger y Anahí por ser cómplices en los momentos de des estrés y alegrías.

A mis amigos Ariel, David y Kevin que desde el primer día de clases en la Poli supieron darme esa mano amiga.

A Allyson Tipán, por todas las experiencias vividas, los buenos momentos y por convertir un lugar de enseñanza como lo es la Poli, en un templo. Gracias por su apoyo incondicional y por alegrar mi estadía en la universidad.

AGRADECIMIENTO

Al ingeniero Jordy Matamoros, por su paciencia y conocimiento al ayudarme a desarrollar el código para la extracción de datos en el satélite TROPOMI y OMI.

A mi tutor de TIC el profesor Carlos Páez, que desde los semestres inferiores encamina a los estudiantes a ser buenos profesionales. Por su enorme paciencia y su gran poder de docencia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	3
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Descripción del área de estudio.....	11
2.2 Descarga de datos satelitales	12
2.3 Utilización de datos satelitales	16
2.4 Transformación de los datos a valores norma NO ₂	23
2.5 Contraste entre observaciones satelitales y mediciones.....	24
2.6 Interpolación de la información	26
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
3.1 Resultados	27
3.2 Conclusiones	44
3.3 Recomendaciones	45
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
5 ANEXOS.....	51
ANEXO I.....	52

RESUMEN

En este trabajo de integración curricular, se aborda la problemática de la calidad del aire en Quito, Ecuador. Esta es una gran problemática a nivel de salud que requiere atención inmediata debido a las varias enfermedades que la exposición a aire contaminado genera. El objetivo de este trabajo fue utilizar información satelital para estimar los niveles de dióxido de nitrógeno (NO_2) a nivel de superficie. La metodología empleada se basa en un enfoque deductivo, partiendo del supuesto de que las observaciones satelitales de NO_2 de los instrumentos OMI y TROPOMI pueden servir como estimaciones de los niveles medidos en superficie. Para la extracción de datos, se utilizaron programas en Python y la zona de estudio se delimitó con un buffer de 5 km y 10 km para TROPOMI y OMI respectivamente, optimizando recursos computacionales y garantizando la coherencia de los resultados. Los resultados obtenidos permitieron contrastar la información satelital con las mediciones de la red de monitoreo atmosférico de Quito, aquí se puede destacar una correlación lineal con un R^2 de 0.76, mientras que para el OMI se obtuvo una correlación polinómica de grado 3 con un R^2 de 0.73. Esto permitió generar una función lineal usando la información para TROPOMI con el fin de generar mapas de contaminación por NO_2 en el DMQ y contrastar la información. Finalmente, se construyó un mapa a nivel de nacional y se determinó que la contaminación por NO_2 es subestimada y se encuentra bajo los límites de la NECAA.

PALABRAS CLAVE: calidad del aire, dióxido de nitrógeno, correlación, información satelital, OMI y TROPOMI.

ABSTRACT

In this curriculum integration project, the issue of air quality in Quito, Ecuador is addressed. This is a significant health concern requiring immediate attention due to the various illnesses associated with exposure to polluted air. The objective of this study was to utilize satellite information to estimate surface-level nitrogen dioxide (NO₂) concentrations. The methodology employed follows a deductive approach, assuming that satellite observations of NO₂ from the OMI and TROPOMI instruments can serve as estimates of surface-level concentrations. Data extraction utilized Python programs, and the study area was delimited with a 5 km buffer for TROPOMI and a 10 km buffer for OMI, optimizing computational resources and ensuring result coherence. The obtained results facilitated a comparison between satellite data and measurements from Quito's atmospheric monitoring network, revealing a linear correlation with an R² of 0.76 for TROPOMI, while a third-degree polynomial correlation with an R² of 0.73 was found for OMI. This allowed the creation of a linear function using TROPOMI data to generate NO₂ pollution maps in the DMQ for comparison. Ultimately, a national-level map was constructed, determining that NO₂ pollution is underestimated and falls below the NECAA limits.

KEYWORDS: air quality, nitrogen dioxide, correlation, satellite information, OMI, TROPOMI.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La contaminación del aire se define como una alteración de las características normales de la atmósfera, debido a la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos (OMS, 2020). Estos agentes afectan la calidad del aire, que representa un aspecto crucial para la salud humana y el medio ambiente. Nueve de cada diez personas están constantemente respirando aire que excede los límites de las Directrices Mundiales de la OMS para la calidad del aire (Henze, 2023). Actualmente se calcula que la morbilidad asociada a la contaminación del aire es comparable a otros riesgos como la dieta malsana y el tabaquismo, colocando a este tipo de contaminación como la amenaza ambiental más peligrosa para la salud humana (OMS, 2021).

Las enfermedades cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares, enfermedad pulmonar obstructiva y cáncer de pulmón son las que representan la mayor morbilidad (Rodríguez & Cuvi, 2019). Los niños son particularmente vulnerables en ambientes contaminados desde que nacen, ya que respiran altos volúmenes y su sistema inmune no está completamente desarrollado (Rawat & Kumar, 2023). En consecuencia, los gobiernos de todo el mundo están tratando de mejorar la calidad del aire y de reducir la carga y los costos para la salud pública derivados de la contaminación atmosférica (OMS, 2021).

Uno de los agentes químicos que afecta la calidad del aire es el dióxido de nitrógeno (NO_2), un gas tóxico color café rojizo, resultado de la conversión de monóxido de carbono (NO) en presencia de compuestos orgánicos volátiles. El NO_2 , se encuentra presente naturalmente en la atmósfera, como parte del ciclo bio-geoquímico del nitrógeno (Represa et al., 2019). En altas concentraciones es uno de los principales degradantes de la calidad del aire, tanto en centros urbanos como industriales, ya que actúa como catalizador para la formación de ozono troposférico y es precursor de aerosoles secundarios, los cuales afectan a la salud humana y al clima (Bauwens et al., 2020).

La fuente antropogénica primaria de óxidos nitrosos NO_x , ($\text{NO} + \text{NO}_2$), es la quema de combustibles fósiles asociada al tránsito vehicular, con un 65% de las emisiones globales totales, el restante corresponde a la quema de biomasa, sectores industriales, entre otros (Chan et al., 2021; Bauwens et al., 2020). De esta manera, resulta esencial encontrar la forma adecuada para monitorear continuamente este agente que afecta a las personas y evaluar el impacto de la contaminación del aire exterior a nivel de superficie con el objetivo de tomar medidas adecuadas para mitigar sus efectos (Virghileanu et al., 2020).

Bajo esta perspectiva en el Ecuador, el grado de contaminación atmosférica ha sido un tema de estudio en algunas ciudades del país. Por ejemplo, en la publicación realizada por

(Rodríguez & Cuvi, 2019) se menciona que en la década de 1990 algunos investigadores ya sugerían que Quito era el sitio más problemático del país en términos de contaminación del aire, al igual que otras ciudades latinoamericanas como Santiago de Chile o Bogotá, debido a sus características montañosas.

Pese a que una de las competencias de los Gobiernos Autónomos Descentralizados, según el Código Orgánico del Ambiente, es la gestión, monitoreo y difusión de la información ambiental, solo en pocos lugares del Ecuador como Quito, Guayaquil y Cuenca, se mide y se tiene certeza de la contaminación del aire (WAQI, 2024). Uno de los mayores problemas al implementar una red de monitoreo del aire es la capacidad económica de los GADs, ya que las estaciones constan de instrumentos muy costosos y de alta calidad, por lo cual, su uso está limitado a la capacidad de manejar los costos de instalación y mantenimientos de estos sistemas de información (Represa et al., 2019).

Por este motivo, se propone una alternativa que posibilite la vigilancia de los niveles de contaminación del aire, centrándose específicamente en el monitoreo del NO₂. Para ello existe una amplia literatura donde menciona los instrumentos de teledetección, debido a que este tiene características espectrales que permiten que sea detectado desde el espacio (Golderg et al., 2021). Un ejemplo de esto es el satélite Aura, de la NASA, que fue lanzado en el 2004, y lleva el instrumento OMI (Ozone Monitoring Instrument), el cual proporciona información de NO₂, con una resolución espacial de 13x24 km². Otro ejemplo es el satélite Sentinel-5p de la Agencia Espacial Europea que fue lanzado en 2017, y lleva el instrumento TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) que arroja datos de NO₂ a una escala de 5.5x3.5 km² (mejor resolución espacial) (Prados et al., 2020).

A pesar de ser usados ampliamente el esfuerzo de estos estudios radica en reducir la incertidumbre de los datos satelitales con aquellos que son medidos a nivel de superficie. Por lo tanto, se propone el uso de información satelital para evaluar la relación entre las mediciones terrestres y satelitales del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) y extrapolar esta información a un mapa nacional de contaminación por NO₂.

1.1 Objetivo general

Validar la determinación de los niveles de NO₂ en el aire a nivel de superficie utilizando imágenes satelitales de los instrumentos TROPOMI y OMI, como alternativa de bajo costo.

1.2 Objetivos específicos

1. Identificar fuentes disponibles para descargar datos satelitales de NO₂ para diversas regiones y períodos de tiempo y analizar su utilidad para el Ecuador.

2. Desarrollar un algoritmo de procesamiento de imágenes satelitales que permitan obtener estimaciones de NO₂ para contrastarlos con mediciones en superficie de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ).
3. Validar si la información satelital es adecuada para la comprensión de los patrones espaciales y temporales de la contaminación por NO₂ en la ciudad de Quito y considerar su extrapolación a nivel nacional.
4. Construir un mapa de contaminación del aire a nivel de superficie por NO₂, para una escala local y nacional.

1.3 Alcance

El presente trabajo de integración curricular espera analizar la información satelital producida por los instrumentos de medición TROPOMI de la Agencia Espacial Europea y OMI de la NASA, luego estimar datos de NO₂ para la ciudad de Quito a nivel de superficie. Posteriormente, validar si las estimaciones realizadas usando la información satelital como método alternativo de medición, cumple una buena correlación con los datos medidos en superficie de la REMMAQ para el año 2022. Finalmente, se pretende construir mapas de contaminación de NO₂ para la ciudad de Quito y extrapolar la información a nivel nacional.

1.4 Marco teórico

El aire, constituido por una mezcla de gases esenciales, desempeña un papel fundamental en el sustento de la vida. Según las investigaciones de Parker (2021), se estima que las personas inhalan unos 16 kg de aire al día, mientras que consumen unos 2 kg de agua y menos de 1 kg de alimentos secos. De ahí que, mientras mejor sea la calidad del aire que se respire, menos problemas de salud se tendrán a largo plazo. En este punto cabe definir correctamente el término de "calidad". El diccionario de la Real Academia Española (RAE) proporciona la siguiente definición: "calidad es la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo que permiten juzgar su valor" (RAE, 2023). Es decir, el aire presenta ciertas propiedades que permiten, mediante criterios o directrices, calificar si este presenta una buena o mala calidad. Siempre que se menciona el tema de la contaminación se habla de una alteración a las condiciones normales de algún componente, en este caso el aire. De esta manera la Organización Panamericana de la Salud (OPS), refiere que una mala calidad del aire se ocasiona cuando existe una presencia de contaminantes en el aire ambiental exterior que alcanzan concentraciones tales que ocasionan una afectación negativa en la salud humana y/o medio ambiente (OPS, 2018).

Afectaciones a la salud humana a causa de la contaminación del aire

Existe evidencia suficiente para enlazar los problemas de salud de las personas con la contaminación del aire en exteriores e interiores. Sin embargo, las acciones políticas en cuanto a controlar, regular, o disminuir los niveles de contaminación han sido insuficientes. De hecho, la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su Informe de Estado de la Base de Datos Sobre la Calidad de Aire Ambiente, menciona que existe un amplio set de información disponible que proporciona evidencia clara de las afectaciones que la contaminación del aire tiene sobre la salud de las personas incluso en concentraciones que antes se consideraban como bajas, por este motivo la OMS decidió ser más estricto en las Directrices Mundiales sobre la calidad del aire publicadas en el año 2021 (OMS, 2023).

Existe una variedad de contaminantes que no solo generan una afectación a la salud humano, sino que también presentan un impacto sobre el ambiente. Entre ellos podemos encontrar el material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), los óxidos de nitrógeno (NO_2 y NO), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COVs), entre otros. Estos se han demostrado que ocasionan graves problemas a los sistemas; respiratorio, cardiovascular, reproductor y nervioso, también se encuentran relacionados con casos de cáncer de pulmón y aumenta la mortalidad y morbilidad en países con un desarrollo bajo y medio (Manisalidis et al., 2020).

Por este motivo, se considera que la contaminación del aire es uno de los problemas que se deben solucionar prontamente, debido al gran impacto que tiene sobre la salud de las personas y sobre el ambiente. De hecho, una de las medidas que la OMS sugiere a los gobiernos para mejorar la calidad del aire y, por ende, la salud pública, consiste en llevar a cabo un monitoreo constante de la calidad del aire, identificando sus fuentes de contaminación. Esta recomendación ha sido ampliamente adoptada por numerosas ciudades a nivel mundial. Es así, como para el año 2022, más de 6000 ciudades distribuidas en 17 países ya están implementando sistemas de vigilancia de la calidad del aire, evidenciando un compromiso global con la protección del medio ambiente y la salud de la población (OMS, 2022).

Contaminación del aire ambiente por NO_2

Como se había mencionado anteriormente, existe una gran variedad de contaminantes y uno de estos grupos son los óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales son expulsados al aire ambiente principalmente por la combustión de combustibles fósiles. Los óxidos de nitrógeno, se considera al grupo de contaminantes que se obtienen de la suma tanto de monóxido de nitrógeno como dióxido de nitrógeno ($NO + NO_2$), este último refiere gran interés ya que comprende alrededor del 70% de los óxidos (Goldberg et al., 2021). Además, es importante

mencionarlo como interés de este estudio porque presenta un criterio tanto en las directrices de la OMS como en la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire Ambiente (NECAA).

La NECAA se basa en las directrices de la OMS y por tanto en ambas se considera al dióxido de nitrógeno (NO_2) como un contaminante criterio. Esto quiere decir que “se especifica un valor máximo de concentración permitida a nivel del suelo en el aire ambiente, y por lo tanto afecta a los receptores ya sean personas, animales, vegetación o materiales para diferentes períodos de tiempo” (MAATE, 2015).

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un gas tóxico color café rojizo, resultado de la conversión de NO en presencia de compuestos orgánicos volátiles. Generalmente es un contaminante primario, ya que su fuente de emisión es el tráfico vehicular y la quema de combustibles fósiles en el sector industrial, aunque también tiene fuentes naturales como los rayos y los microbios en el suelo (Virghileanu et al., 2020). Además, es un precursor de contaminantes secundarios, el NO_2 puede reaccionar en la atmósfera para formar el ozono estratosférico, el cual puede causar muertes y envejecimiento prematuro de los pulmones. Otro contaminante es el HNO_3 , la forma final del NO_2 en la atmósfera, el cual afecta a los ecosistemas debido a sus propiedades ácidas ocasionando lluvias ácidas. También se ha visto que el NO_2 puede participar en una serie de reacciones para crear nitrato particulado (NO_3^-), un componente del Material Particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$), el cual es el principal causante de mortalidad en cuanto a contaminación del aire se refiere (Goldberg et al., 2021). Para destacar aún más los graves problemas de salud ocasionados por el NO_2 , estudios epidemiológicos han demostrado que este contaminante puede ocasionar muertes cardiopulmonares, cáncer de pulmón y puede agravar problemas de asma a largo plazo. (Huang et al., 2021).

Regulación de la calidad del aire en Ecuador

En este contexto, y tomando en cuenta las recomendaciones realizadas por la OMS acerca del monitoreo constante y la identificación de fuentes, es importante destacar los avances en términos de calidad del aire en el Ecuador.

Como se había mencionado antes la NECAA establece ciertos contaminantes criterio, apoyado en las Directrices de la OMS, que deberían monitorearse constantemente, ya que estos presentan un valor máximo de concentración por un tiempo definido. Sin embargo, la importancia que se le ha dado a este tema en términos legales no ha sido del todo alentador, ya que a pesar de que el Código Orgánico del Ambiente (COA), establezca como obligación a los Gobiernos Autónomos Descentralizados gestionar, monitorear y difundir la información ambiental, no existen datos a nivel de superficie para todas las ciudades del Ecuador (UNICEF, 2019).

Las razones para no acatar estos principios establecidos en el COA pueden ser varias, pero una de las principales se debe a que para lograr establecer una Red de Monitoreo de Aire correctamente, los costos son muy elevados, ya que la instrumentación es de muy alta calidad y por ende muy costosa (Represa et al., 2019).

Mencionando otra arista de la situación en el Ecuador, la NECAA maneja criterios desactualizados con respecto a las Directrices de la OMS para la calidad del aire. Un ejemplo de ello se presenta en la Tabla 1.4.1, donde se muestra los valores máximos permisibles para una exposición anual, horaria y de 24 horas del NO₂.

Tabla 1.4.1. Comparación entre las concentraciones de los valores de la NECAA y OMS.

Contaminante	Período	NECAA	OMS
NO ₂ (ug/m ³)	Anual	40	10
	1 hora	200	200

Como se puede observar, el promedio anual de la OMS sugerido es de 10 ug/m³, sin embargo, la NECAA, maneja un máximo de 40 ug/m³, y asumiendo que el objetivo de la OMS es precautelar la vida de las personas, la normativa del Ecuador no está cumpliendo esta función.

Instrumentos de monitoreo de NO₂

Resulta de suma importancia vigilar constantemente los contaminantes que afectan la calidad del aire, entre ellos el NO₂. De manera general, la determinación de las concentraciones de los gases necesita de técnicas en laboratorios bastante complejas, muy comúnmente llamados como métodos de referencia y desarrollados principalmente por los Estados Unidos y por Directivas de la Comunidad Europea y normas ASTM (Maldonado & Pablo, 2024). Algunas de las técnicas, mencionadas como “referencia” o “equivalente” pueden ser; la quimioluminiscencia para el NO₂, infrarrojo no disperso para medir monóxido de carbono, la fluorescencia UV para obtener concentraciones de SO₂ y H₂S, entre otros (Baltuano et al., 2020)

Como se mencionó anteriormente Quito es una de las ciudades del Ecuador que monitorea la calidad del aire mediante la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ). Esta red usa como método de referencia para los óxidos de nitrógeno (NO_x) la quimioluminiscencia (EPA No. RFNA-1194-099), que consiste en producir luz durante la reacción entre el NO (previamente obtenido en la conversión de NO₂) y el ozono (O₃). Este instrumento obtiene concentraciones para NO y NO₂. (Díaz, 2024).

El inconveniente radica en que para muchas regiones y países resulta económicamente inviable la implementación de una amplia red de monitoreo, por lo que se requieren métodos alternativos para estimar el grado de contaminación del aire (Garaga et al., 2018). Los métodos alternativos se entienden como maneras de obtener información de la contaminación del aire mediante instrumentos que no son de referencia pero que proporcionan un valor estimado. Algunos de ellos son los sensores de bajo costo (LCS – Low Cost Sensors) o las estimaciones basadas en información satelital (OMS, 2023). Este trabajo de integración curricular basará sus esfuerzos en utilizar esta última como un método alternativo para estimar la contaminación del aire por NO₂ a nivel de superficie.

La información satelital como método alternativo ha sido ampliamente desarrollado en la última década, combinando mediciones realizadas a nivel de superficie y resultados de los modelos de transporte químico, han ayudado a mapear frecuentemente las concentraciones de varios contaminantes (Diner et al., 2018). Una de las ventajas del uso de información satelital destinado a la medición de contaminantes del aire a superficie es su amplia cobertura espacial. Lo cual permite obtener datos donde la topografía resulta complicada para los métodos de referencia. Además, la información satelital permite observar puntos calientes de contaminantes o hot-spots, cuál es su composición y como, debido a la dinámica de los vientos, estos son transportados a otras regiones, considerando además que permite observar los cambios en el tiempo de estos contaminantes. Sin embargo, una de las grandes desventajas es que los datos obtenidos deben ser validados con información medida en superficie (Holloway et al., 2021). Debido a que las observaciones satelitales toman una muestra de la columna de aire sobre la tierra, estos deben ser enlazados con datos en superficie, lo cual representa un desafío porque existen zonas en las cuales simplemente no hay información disponible o el acceso debido a la topografía es complicado (Represa, 2020).

El sector de la salud y las comunidades expuestas a niveles de contaminación altos se ha recomendado el uso de la información satelital. De hecho, Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental junto con la EPA, destacan que la teledetección ayuda consolidar el muestreo en superficie y llena aquellos vacíos geográficos, que impiden estudiar la contaminación de aire y velar por la salud pública (Diner et al., 2018).

Información satelital disponible

A lo largo de los años la teledetección (remote sensing en inglés) se ha convertido es una de las principales fuentes para adquirir información espacial. La teledetección satelital comprende a todo el conjunto de dispositivos utilizados para obtener datos de un objeto mediante su escaneo a una distancia remota (EOS, 2021). Según Sánchez (2018) existen dos tipos de teledetección; pasiva y activa. La teledetección activa comprende su

funcionamiento a una emisión de luz propia, es decir funciona a cualquier hora del día, y tiene aplicaciones como la determinación de la topografía y orografía, un ejemplo de ellos es el Lidar que ha ayudado a obtener información para los SIG. Por otro lado, la pasiva depende de una fuente emisora de luz (rayos solares), un ejemplo son las imágenes satelitales producidas por los instrumentos a bordo de los satélites, algunas aplicaciones tienen que ver con la meteorología y protección del medio ambiente en cuanto a medir contaminantes del aire. Este último será el tipo de teledetección espacial usada.

Los instrumentos que se analizarán y servirán como punto de comparación para este trabajo de integración curricular son los instrumentos TROPOMI y OMI, de los cuales se detallarán ciertas características más adelante.

Antes es importante aclarar como un satélite puede medir la contaminación del aire. En realidad, hay que empezar haciendo una distinción entre satélites e instrumentos. Los satélites llevan consigo uno o más instrumentos que proporcionan observaciones tanto de tierra como de la atmósfera. Por ejemplo, el satélite Aura lleva el instrumento OMI (Ozone Monitoring Instrument) y consigo otros adicionales. Por otro lado, cada gas traza presente en la atmósfera, tiene un espectro de absorción conocido. El instrumento del satélite recibe la radiación que refleja y emite la superficie de la tierra, misma que es afectada por las condiciones atmosféricas. Es decir, el satélite puede identificar una huella espectral para cada contaminante y esta contiene información de la atmósfera y superficie terrestre (Prados et al., 2020).

Luego de asimilar este proceso, los instrumentos realizan tres pasos primordiales para la recuperación de cualquier gas contaminante. Primero se recupera la densidad de la columna inclinada de NO_2 , esto se lo realiza mediante Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencia llamada DOAS por sus siglas en inglés (Differential Optical Absorption Spectroscopy), midiendo la concentración total de NO_2 a lo largo del trayecto que la luz realiza hasta llegar al satélite, atravesando la atmósfera y siendo reflejada por la superficie terrestre. A continuación, se utiliza información sobre el perfil vertical de NO_2 proveniente de un modelo de transporte químico y un sistema de asimilación de datos. Este sistema asimila las observaciones satelitales y permite separar los componentes estratosféricos y troposféricos de la columna inclinada total de NO_2 . Finalmente, se convierten estos datos, en densidades de columnas estratosféricas y troposféricas verticales de NO_2 (Represa, 2020).

Una vez comprendido como los satélites e instrumentos logran obtener mediciones, se mencionará los instrumentos TROPOMI y OMI que serán utilizados para extraer la información y realizar comparaciones entre ambos. Estos pueden ser comparables ya que proveen observaciones de casi las mismas zonas y tiempos (Van Geffen et al., 2020).

Empezando por el Instrumento de Monitoreo Troposférico o TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), el cual fue lanzado al espacio en el satélite Sentinel-5 Precursor (S5P) y está a cargo de la Agencia Espacial Europea. El día del lanzamiento fue el 13 de octubre del 2017, con el objetivo de proveer de mediciones atmosféricas de gases traza, entre ellos el NO₂. Además, proporcionaba información adicional de la nubosidad y ciertos aerosoles (Van Geffen et al., 2020). La resolución espacial que tiene este instrumento es de 3.6 a 7.2 km, y esta puede ser reducida a 5.5 x 3.5 km² con una franja de 2600 km lo que le permite realizar una cobertura casi global en un solo día, los valores de la columna troposférica total de NO₂ se encuentran en moles por metro cuadrado (mol/m²) (Prados et al., 2020).

Por otro lado, el Instrumento de Monitoreo de Ozono u OMI (Ozone Monitoring Instrument) fue lanzado al espacio a bordo del satélite EOS-Aura, a cargo de la NASA, en el año 2004, con el objetivo de realizar mediciones atmosféricas de ozono en columna total y troposférica, formaldehidos, SO₂ en columna total y el contaminante de interés, NO₂ en columna total y troposférica. La resolución espacial es de 13 x 24 km, y logra una cobertura global entre 1 a 2 días. Las unidades en las cuales se presenta el valor de NO₂ son moléculas sobre centímetro cuadrado (molec/cm²) (Prados et al., 2020).

Dependiendo del instrumento a usarse, este puede contener información disponible en varios niveles de tratamiento. Los niveles de tratamiento pueden ser; nivel 0 (L0), nivel 1A (L1A), nivel 1B (L1B), nivel 2 (L2), nivel 2G & 3 (L2G&3) y nivel (4) (Follette-Cook & Gupta, 2021). A continuación, se hará una breve explicación de cada uno de estos.

Los datos del nivel 0, corresponden información cruda, es decir, con la resolución espacial completa. Aquellos del nivel 1A, son datos que han sido sometidos a una referencia en cuanto a tiempo y espacio usando coeficientes de calibración y parámetros de georreferenciación. Así mismo, los del nivel 1B son imágenes del nivel 1A que han sido procesados en unidades de sensores. Mientras que, los datos del nivel 2 son variables geofísicas derivadas a la misma resolución y localidad que las del nivel 1. Las del nivel 2G & 3 son variables mapeadas en una escala uniforme y aplicadas algún relleno y consistencia en los datos para mejorar su resolución. Finalmente, la información de nivel 4 son resultados de un modelo de análisis de variables con múltiples mediciones (Lamsal et al., 2021).

Finalmente es importante aclarar que en cuanto a archivos del instrumento TROPOMI nivel 2, estos presentan tres tipos de archivos en este nivel de tratamiento; archivos medidos casi en tiempo real (Near Real Time), medidos fuera de línea (OFFLINE) y los reprocesados (RPRO). Los archivos fuera de línea y reprocesados son los que se encuentran disponibles en las fuentes de datos ya que estos requieren algún tratamiento adicional antes de subirlos completamente a la plataforma de descarga (KNMI, 2021).

Herramientas para procesamiento de datos de imágenes satelitales

Como ya se ha podido observar el uso de imágenes satelitales se ve como una opción alentadora para combatir la escasez de información y poder validar sus datos con los de superficie y así monitorear continuamente la contaminación del aire. En este contexto, es necesario el uso de herramientas y técnicas estadísticas y de programación avanzadas que nos permiten obtener la información de las imágenes satelitales, y a su vez poder estimar los valores de NO₂ en superficie (Represa, 2020).

Las imágenes satélites normalmente se encuentran en archivos denominados NetCDF. Este es un formato que permite guardar datos orientados al arreglo de matrices. Es decir, representan y almacenan datos de n dimensiones con n mayor o igual a dos. Existen varios lenguajes de programación y herramientas capaces de trabajar con estos archivos como son; Python o R, bajo ciertas bibliotecas. La NASA, por otro lado, también ha desarrollado un software llamado Panoply capaz de trabajar directamente con estos archivos. (Scaroponi et al., 2018).

Python es un lenguaje de programación ampliamente usado debido a sus extensas bibliotecas que permiten realizar y agilizar un sin número de procesos a la par. Su simplicidad, flexibilidad y su amplia acogida por la comunidad científica lo convierte en un lenguaje muy apreciado en el campo de la teledetección (Sultonov, 2023).

Por otro lado, Panoply, es una herramienta poderosa para visualizar y analizar datos satelitales. Esta aplicación fue desarrollada en el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA por el Dr. Robert B. Schmunk, quien sigue siendo la persona que mantiene y actualiza la herramienta. Panoply, puede abrir archivos de datos con varios formatos; desde NetCDF, HDF y GRIB, con el objetivo de explorar las carpetas y grupos donde se encuentra la información, visualizar variables y realizar gráficos de tendencias superponiendo capas de todo el planeta de manera efectiva y rápida (Schmunk, 2023).

Otra de las herramientas que son esenciales para trabajar con observaciones realizadas por teledetección son los SIG (Sistemas de Información Geográfica). Estos nos permiten georreferenciar, localizar, extraer y crear mapas con información en las zonas de incidencia de las imágenes. El QGIS (Quantum Geographic Information System) o sistema de información geográfica cuántica es una multiplataforma gratuita de código abierto, con complementos desarrollados en lenguajes como C++ y Python, que permite leer y procesar un sin número de imágenes geográficas. Esta plataforma ha ido mejorando en sus últimas versiones mediante la corrección de errores por varios usuarios al ser de código abierto, su interfaz gráfica permite generar mapas de alta calidad (Moyroud & Portet, 2018).

2 METODOLOGÍA

Como se ha mencionado, el presente trabajo de integración curricular pretende abordar la utilización de información satelital para estimar la calidad del aire a nivel de superficie del contaminante criterio NO₂; para ello, se presenta una metodología integral que permita reconocer a detalle los fenómenos estudiados. El método de investigación utilizado corresponde a un enfoque deductivo, debido a que se parte del supuesto que establece que las observaciones realizadas por los instrumentos satelitales de NO₂, pueden servir como estimaciones de los niveles de NO₂ medidos en superficie. A lo largo de este capítulo, el desarrollo se centrará en: (i) la descarga y la utilización de los datos; (ii) la transformación de las observaciones satelitales a valores de NO₂ en superficie; (iii) el contraste de toda la información satelital con observaciones a nivel de superficie; y, (iv) la obtención de una interpolación de valores estimados generando mapas de contaminación por NO₂.

2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio seleccionada para el presente trabajo queda comprendida en la provincia de Pichincha, ubicada al norte de la República del Ecuador, en la región Sierra. En ella se contiene, El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), que representa el 45% de la extensión territorial de la provincia. El DMQ se encuentra encerrado por sistemas montañosos a una altura aproximada de 2800 a 2850 m.s.n.m (Prefectura de Pichincha, 2019).

Conviene subrayar un poco la situación del DMQ en cuanto a generación de emisiones. En concreto, acerca del parque automotor que ha presentado un constante crecimiento en los últimos años, siendo esta una de las principales fuentes de emisión de NO₂. Así pues, la contaminación del aire ocasionada por la quema de combustibles fósiles aumenta, provocando afectaciones a la salud y al ambiente como ya se lo mencionó en secciones anteriores (MDMQ, 2021).

En cuanto a la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), usada para registrar las concentraciones de diferentes contaminantes del aire, entre ellos el NO₂. Este es medido mediante quimioluminiscencia como se mencionó anteriormente. La Red Automática (RAUTO), un subsistema de la REMMAQ cuenta con 8 estaciones fijas distribuidas por las administraciones zonales del DMQ, como se puede observar en la Figura 2.1.1. Asimismo, otro subsistema es la Red Meteorológica (REMET), que toma mediciones de velocidad y dirección del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura, precipitación y presión atmosférica con sensores ubicados en 6 estaciones de las antes mencionadas. Toda la información proporcionada por las estaciones de la REMMAQ, es recolectada por un centro

de control donde se gestiona y depura la información para luego ser subida a la página web de la Secretaría del Ambiente de Quito (Díaz, 2014).

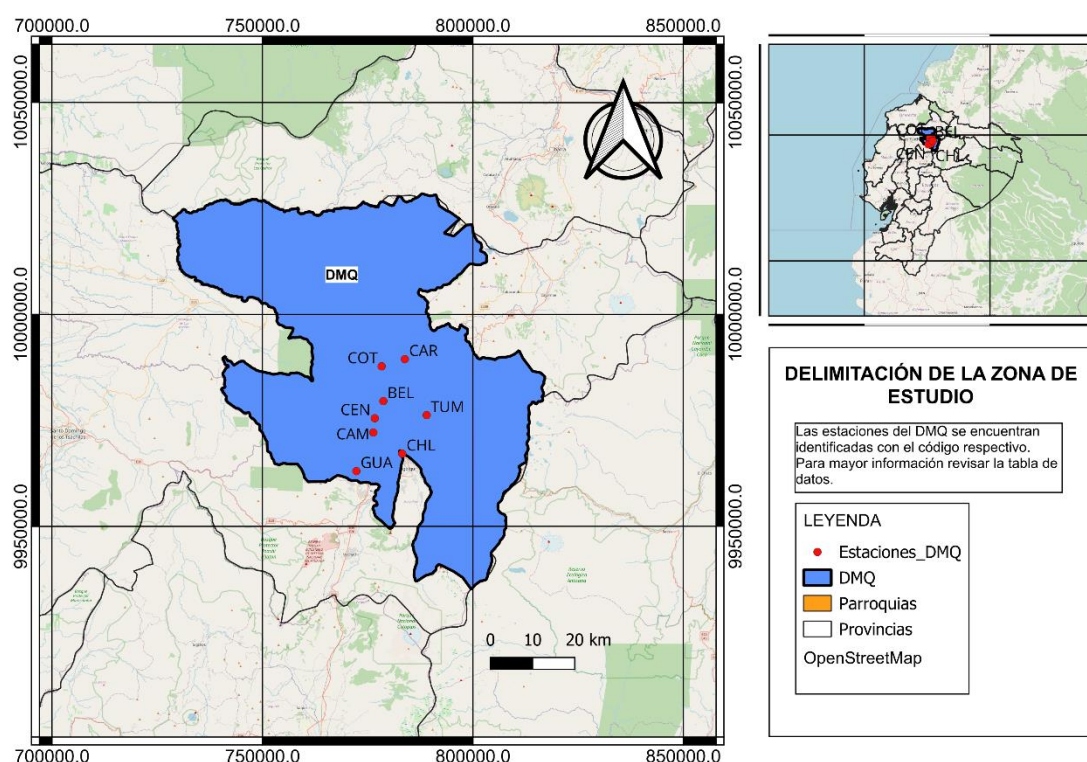


Figura 2.1.1. Delimitación de la zona de estudio.

Los datos utilizados para el presente trabajo fueron obtenidos del siguiente enlace <http://datosambiente.quito.gob.ec/>, mismo que funciona correctamente hasta la entrega del presente trabajo. La Tabla 2.1.1, presenta los datos de cada una de estaciones inmersas en este estudio. Además, de denotar la nomenclatura con la cual se irá a nombrar cada una de las estaciones.

Tabla 2.1.1. Datos de las estaciones de monitoreo de la REMMAQ.

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Período
BEL	Belisario	-0.18495	-78.49592	2022
CAM	El Camal	-0.25192	-78.51713	2022
CEN	Centro	-0.22150	-78.51413	2022
TUM	Tumbaco	-0.21484	-78.40326	2022
LCH	Los Chillos	-0.29693	-78.45555	2022
COT	Cotocollao	-0.11072	-78.49953	2022
CAR	Carapungo	-0.09548	-78.44988	2022
GUA	Guamaní	-0.33428	-78.55340	2022

2.2 Descarga de datos satelitales

Los datos para usarse para el presente trabajo corresponden a observaciones realizadas por los instrumentos OMI y TROPOMI antes descritos. Estos corresponden a un nivel de datos con tratamiento 2 (L2), es decir que ya se encuentran georreferenciados en tiempo y hora y además contienen datos para cierta hora. En este caso la hora de medición se la realiza entre las 18 y 19 UTC, sin embargo, se deben restar 5 horas a esa para obtener los datos en hora local. Esta y otras consideraciones serán explicadas más a detalle en las siguientes secciones.

Antes de iniciar con la descarga de datos en el portal de GES DISC, fue necesario crearse una cuenta en EARTH DATA. Esto con el objetivo de permitir enlazar el portal de la nasa con la aplicación de GES DISC, como se muestra en la Figura 2.2.1.

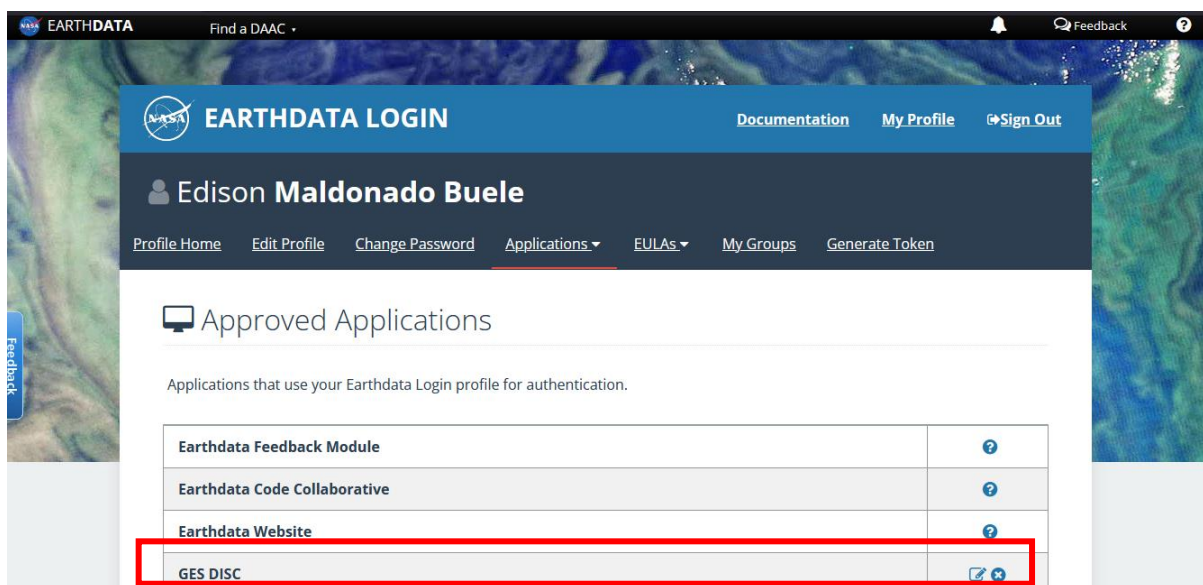


Figura 2.2.1. Página de Earth Data con la aplicación GES DISC añadida.

Una vez añadida esta aplicación, que enlazará el hogar de los datos satelitales de la NASA a el Earth Data para permitir la descarga la información de una manera más sencilla se procede a explicar cada uno de los procesos.

Ozone Monitoring Instrument (OMI)

Los datos disponibles del instrumento OMI de la NASA pueden ser fácilmente descargados desde su página principal <https://disc.gsfc.nasa.gov>. El enlace se traslada a la página de GES DISC, el hogar de los archivos y datos sobre información satelital de la NASA. En esta página basta con colocar en el buscador las palabras “OMI” + “NO₂”, y se despliega un menú con varias opciones asociadas a los intereses de cada caso de estudio.

Para el presente trabajo la Tabla 2.2.1. muestra las características de los datos seleccionados, en esta se puede observar la siguiente información de manera detallada; el

nombre del satélite, la versión usada, la resolución espacial y temporal, el nivel de procesamiento de datos y las fechas disponibles con información satelital.

Tabla 2.2.1. Características de los datos descargados de OMI.

Característica	Valor	Unidad
Satélite	Aura	-
Versión	003	-
Resolución Temporal	98.8	Minutos
Resolución Espacial	13 x 24	Kilómetros
Nivel de procesamiento	2	-
Fecha de Inicio	2004-10-01	-
Fecha fin	2024-01-31	-

Fuente: Modificado de (Lamsal, et al. 2022).

Una vez seleccionado el set de datos que se va a utilizar para la descarga, se establecen diferentes filtros y parámetros para que la obtención de estos sea precisa y de acuerdo con los objetivos de la presente investigación.

Uno de los filtros tiene que ver con la ubicación geográfica del área de estudio. Tomando en cuenta que uno de los objetivos finales es realizar un mapa de contaminación de NO₂ a nivel nacional, se estableció un polígono de puntos que contengan a todo el Ecuador, como se indica en la Figura 2.2.2.

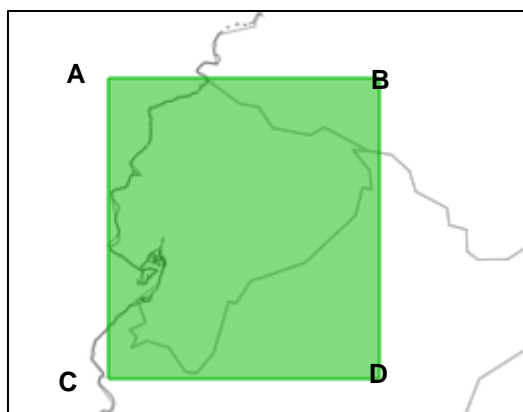


Figura 2.2.2. Ubicación geográfica de los puntos de selección. **Fuente:** Elaboración propia.

De esta manera se obtienen las coordenadas en latitud y longitud usadas para la delimitación de las imágenes satelitales, esta información se presenta en la Tabla 2.2.2.

Tabla 2.2.2. Coordenadas del área de estudio.

Punto	Latitud	Longitud
A	1.476°	-80.99°
B	1.476°	-75.06°
C	-5,116°	-80.99°
D	-5,116°	-75.06°

Se seleccionó adicionalmente un rango de fechas comprendido entre 2022-01-01 hasta 2022-12-31 para todas las horas del día. Utilizando estos parámetros de búsqueda, se generó un menú que contenía 483 enlaces, cada uno asociado a una imagen satelital. En consecuencia, se llevó a cabo la descarga de 459 archivos debido a que algunos presentaban problemas con la red. El formato de cada uno de ellos fue NetCDF, a continuación, se presenta la Figura 2.2.3, que muestra los criterios de selección.

Estimated size of results
365 days, 5,402 links, 95.59 GB

Download Method [?](#)

Download Method: Get File Subsets using the GES DISC Subsetter

Method Options [?](#)

Refine Date Range: 2022-01-01 00:03:05 to 2022-12-31 13:33:46

Refine Region: -80.99, 1.476, -75.06, -5.116

Use 'Refine Region' for geo-spatial subsetting [?](#)

Select Variables: Get all select variables

Select Time Range: Keep original time range

Data Presentation: CROP

Output format [?](#)

File Format: netCDF

Figura 2.2.3. Muestra de los parámetros establecidos para la descarga.

En la Figura 2.2.3, se muestra como el método de descarga utiliza GES DISC, además se aprecia en la parte final el formato netCDF. La palabra CROP quiere decir que los datos van a estar en forma ráster y en la selección “Refine Region” solo serán extraídos datos para las coordenadas de la Tabla 2.2.2. Luego de la descarga se analizó la convención de los nombres. La Tabla 2.2.3. presenta un ejemplo de un archivo cualquiera. Esto es importante para la extracción de la fecha y hora local de la columna troposférica de NO₂.

Tabla 2.2.3. Convención del nombre de un archivo OMI.

OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0101t1727-o92901_v003-2022m0331t001313.SUB	
Convención	Descripción
OMI-Aura	Identificador del instrumento usado con el satélite a bordo
L2-OMNO2	Tipo de información (Nivel de procesamiento-Contaminante)
2022m0101t1727	Fecha de observación (YYYYMMDD – HHMM)
o92901	Número de orbita
v003	Número de colección
2022m0331t001313	Fecha de producción (YYYYMMDD – HHMMSS)
SUB	Sufijo

Fuente: Modificado de (Krotkov et al., 2019)

Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI)

Existen al menos cinco maneras para descargar información satelital medida por el instrumento TROPOMI que está a bordo del satélite Sentinel-5P o S5P, perteneciente a la Agencia Espacial Europea (ESA-European Space Agency's). Estas opciones de descarga dependen del propósito de la investigación. Por ejemplo, si es un estudio a corto plazo (uno o varios días) se puede realizar la descarga accediendo al portal de Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu>) o mediante el portal del Sentinel-5P (<https://data-portal.s5p-pal.com>). Por otro lado, cuando se desea datos en un periodo de largo plazo (meses o años) se puede acceder a esta información por tres métodos; el primero usa OpenAPI de SentinelSAT y Python con PySTAC, el segundo se lo realiza a través del portal de PAL y el tercero usa el buscador Earth Data de la NASA. Este último fue el método usado para la descarga de datos de NO₂ del instrumento TROPOMI. Por lo tanto, se siguieron los mismos pasos que en el caso de OMI, ya que los datos se encuentran en el mismo portal de la NASA. La Tabla 2.2.4. presenta las características de los datos obtenidos mediante el último método de búsqueda.

Tabla 2.2.4. Características de los datos descargados de TROPOMI

Característica	Valor	Unidad
Satélite	Sentinel-5P TROPOMI	-
Versión	2	-
Resolución Temporal	101.5	Minutos
Resolución Espacial	5.5 x 3.5	Kilómetros
Nivel de procesamiento	2	-
Fecha de Inicio	2022-01-10	-
Fecha fin	2022-12-31	-

Las coordenadas usadas para la obtención de datos fueron las mismas que se presentan en la Tabla 2.2.2. Estos criterios de búsqueda arrojaron 479 enlaces de los 365 días establecidos en el período de estudio, de estos se pudo descargar un total de 469 imágenes tanto reprocesadas (RPRO) como fuera de línea (OFFL).

Estos archivos siguen una convención similar a los archivos OMI por lo que fue fácil identificar el año, mes, día y hora de cada observación.

2.3 Utilización de datos satelitales

La utilización de las observaciones satelitales obtenidas radicó en estudiar cómo se presentan los datos, identificar las variables de interés, sus unidades e indagar herramientas para la extracción de información.

Visualización y estudio de variables usando Panoply

Un primer acercamiento a las variables disponibles en las imágenes satélites y a los valores de NO₂ de los instrumentos OMI y TROPOMI, se dieron usando el software Panoply, al estudiar un archivo cualquier de ambos satélites, bajo el supuesto de que todas las imágenes tendrán la misma estructura. Para ello se selecciona la opción de "File" y luego "Open" en la interfaz de Panoply. Posteriormente, en la vista previa que presenta los datos, se pudo explorar las variables, dimensiones, y estructura del conjunto de datos para comprender qué tipo de información está disponible en los archivos y localizar los datos de interés, en este caso la columna total troposférica de NO₂, la Figura 2.3.1. representa un ejemplo del menú resultante con la variable localizada.

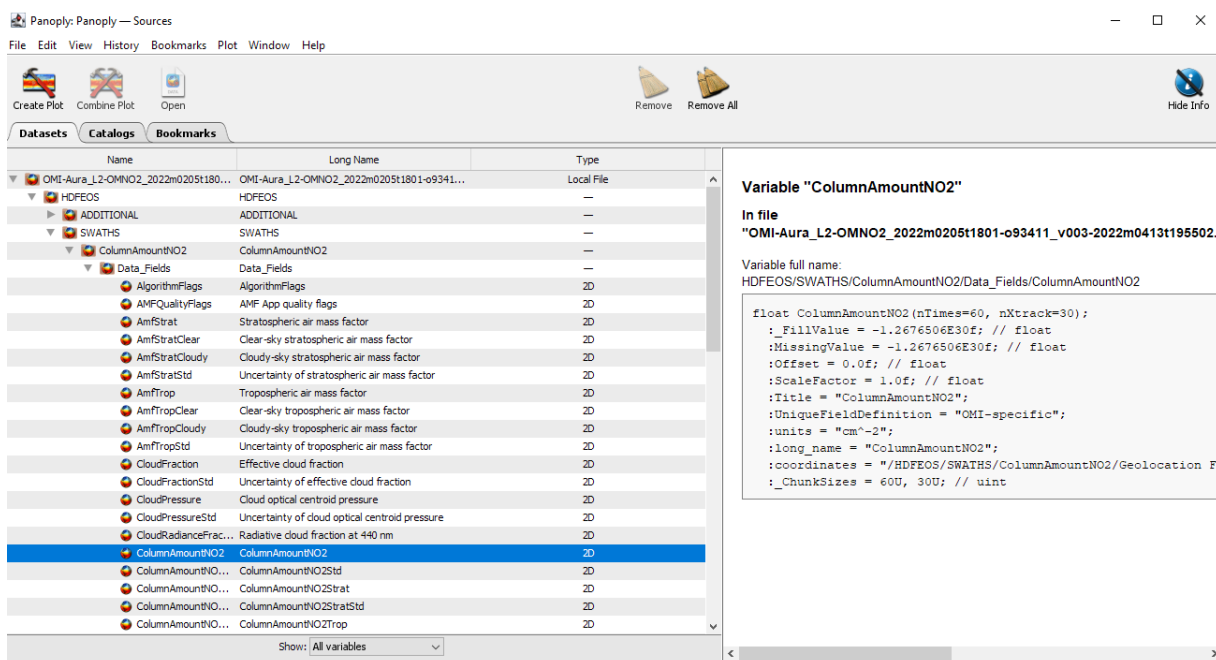


Figura 2.3.1. Visualización de un archivo OMI usando Panoply.

De esta manera en la parte derecha de la Figura 2.3.1 se presentan algunos datos como el valor del `_FillValue` que no permite identificar aquellos valores que han sido rellenados o que no son válidos. También se presentan las unidades, el nombre completo de la variable, y otra información adicional de suma importancia para la realización del código de extracción.

Con relación al instrumento OMI ofrece una carpeta general denominada, "HDFEOS", en ella se encuentran dos subcarpetas de datos con nombres "ADITTIONAL" y "SWATHS". La información con respecto a la columna troposférica de NO₂, se encuentra en la carpeta SWATHS, dentro un subgrupo denominado "Data_Fields", mientras que los datos de longitud y latitud se encuentran en el subgrupo "Geolocation_Fields". A continuación, se presenta la Figura 2.3.2., para aclarar esta descripción.

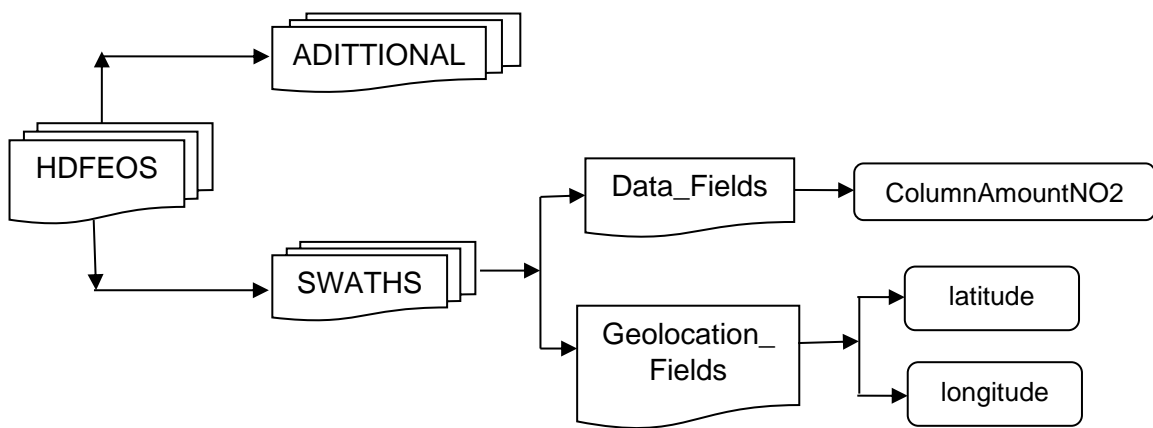


Figura 2.3.2. Diagrama de ubicación de las variables dentro del OMI.

Por otro lado, en caso de los datos de TROPOMI, se presentan dos carpetas; “METADATA” y “PRODUCT”. En la primera carpeta se presentan varios datos acerca de la ubicación de los satélites y demás. La carpeta de “PRODUCT” es la que contiene los datos de mayor importancia como la latitud y longitud junto con la columna vertical total de NO₂. De igual manera se presenta en la Figura 2.3.3, un diagrama con el objetivo de aclarar este punto.

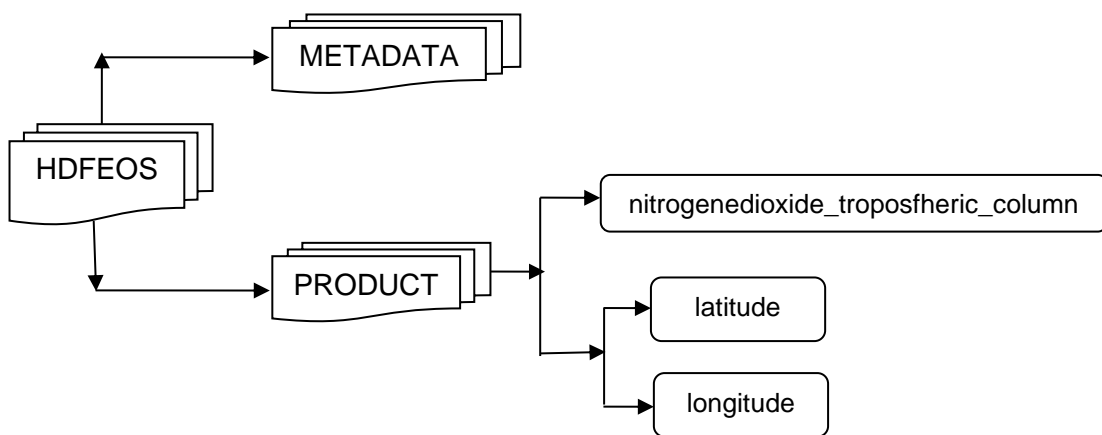


Figura 2.3.2. Diagrama de ubicación de las variables dentro del TROPOMI.

Otra de las herramientas que ofrece Panoply y que resulta de mucha utilidad, es su opción de “visualización de datos”, ya que permite trazar mapas, perfiles verticales y series temporales de varias variables de las imágenes satelitales. Esto ayudó a comprobar que las imágenes se encuentren en la zona de estudio.

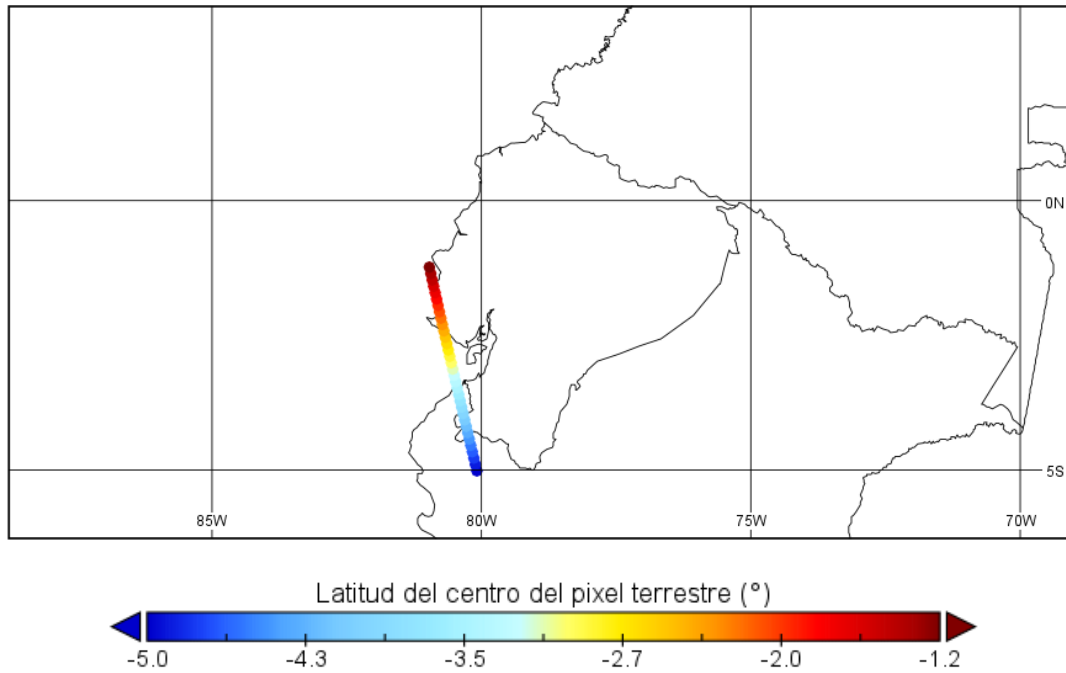


Figura 2.3.4. Presentación de valores de latitud del instrumento OMI.

A partir de la descarga de imágenes satelitales para todo el Ecuador, se realizó una validación inicial en relación con los datos de las estaciones en el Distrito Metropolitano de Quito. Se observó que, si bien algunas imágenes cubren áreas fuera de Quito, carecen de datos específicos para esta zona. Esto se ilustra en las Figuras 2.3.4 y 2.3.5, donde se presentan los rangos de latitud y longitud de las imágenes satelitales del OMI. En dichas figuras, se muestra claramente que las latitudes y longitudes máximas corresponden a regiones con datos disponibles del OMI, proporcionando así una referencia visual para la selección de imágenes pertinentes a nuestra área de estudio.

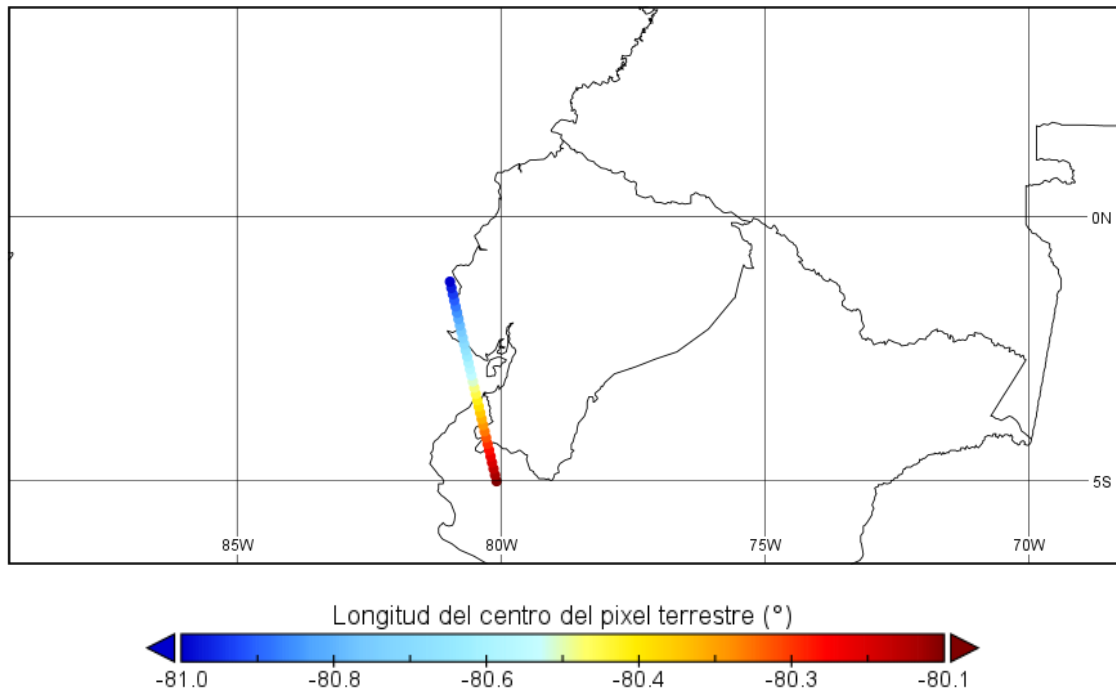


Figura 2.3.4. Presentación de valores de longitud del instrumento OMI.

Al utilizar el instrumento TROPOMI para obtener los valores de NO_2 , se presenta la Figura 2.3.6, la cual, valida la correspondencia de los datos con la zona de estudio previamente delimitada, según se indica en la Tabla 2.2.2. Además, esta figura proporciona una visualización de los niveles de contaminación por NO_2 a nivel nacional. Asimismo, se observa una tendencia de contaminación en el Distrito Metropolitano de Quito

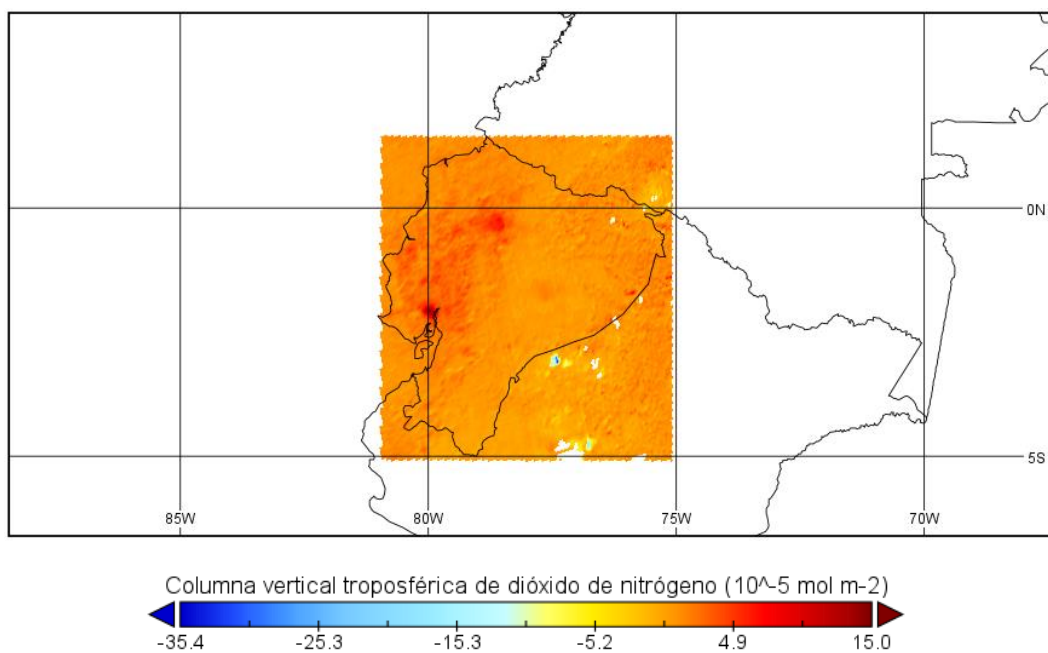


Figura 2.3.6. Presentación de valores con el instrumento TROPOMI.

Con la verificación de que las observaciones satelitales se encuentran dentro de la zona delimitada y que ciertos archivos no contienen datos específicos para Quito, se procede con la extracción de los valores de la columna troposférica de NO₂.

Extracción de datos satelitales

En esta sección metodológica, se detalla el procedimiento utilizado para extraer datos de NO₂ de imágenes satelitales obtenidas de los instrumentos OMI y TROPOMI, así como para procesar y analizar estos datos con la ayuda de herramientas informáticas especializadas.

El código implementado para esta tarea hace uso de varias librerías y módulos de Python diseñados específicamente para el procesamiento de datos espaciales y científicos. Entre estas, se destacan “h5py”, una librería que facilita la manipulación de archivos en formato HDF5 y NetCDF, comúnmente utilizados para almacenar grandes conjuntos de datos estructurados. Además, se emplea la popular librería “numpy”, fundamental para el manejo eficiente de matrices y operaciones matemáticas, lo que resulta esencial para el procesamiento de datos satelitales. Antes de explicar como se extraen los datos se presenta la Figura 2.3.7, que explica de manera esquemática el procedimiento para obtener la validación de NO₂.

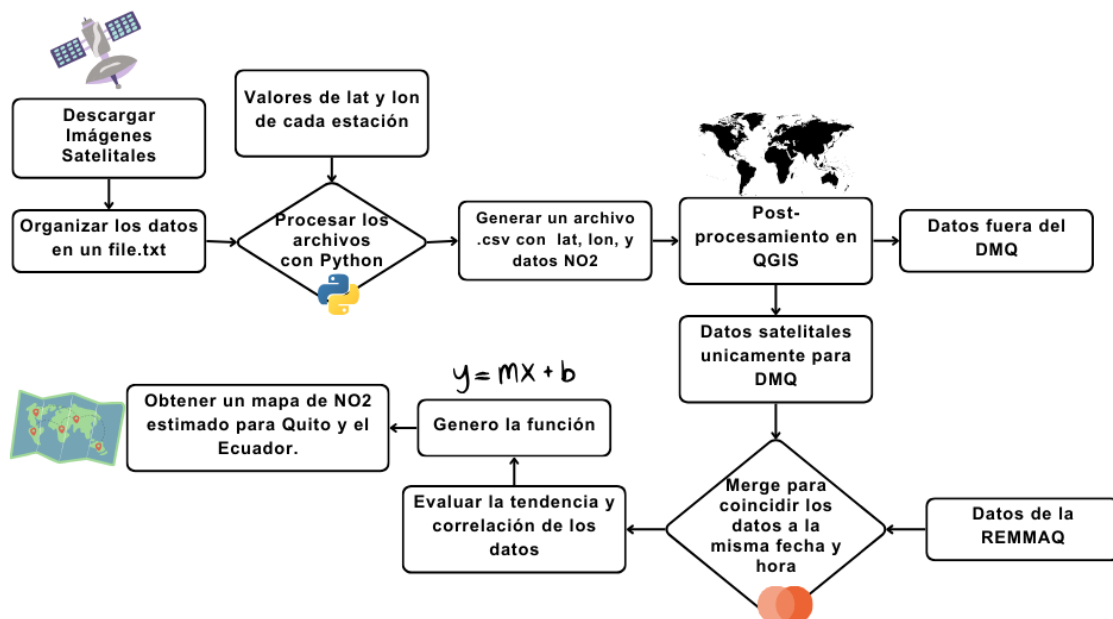


Figura 2.3.7. Esquema realizado para explicar correctamente el proceso llevado a cabo durante la metodología y uso del código.

El proceso de extracción de valores de NO₂ se realiza en varias etapas, teniendo previamente un archivo en formato texto con todos los nombres de los archivos a analizar. Luego se procede con la identificación y apertura de archivos de imágenes satelitales almacenadas en formato netCDF. Se accede a los datos de interés, como la columna troposférica de NO₂ y la

información de geolocalización, a través de estructuras jerárquicas definidas en los archivos netCDF. La librería h5py facilita esta tarea al proporcionar una interfaz intuitiva para trabajar con este tipo de archivos.

Para cada archivo de imagen satelital, se calcula la distancia entre la ubicación de interés, definida por el usuario, y cada punto en la imagen utilizando la fórmula del semiverseno. La ecuación fue aplicada al código de la siguiente manera (Dauni & Firdaus, 2019)

$$\Delta long = (long2 + long1) \cos\left(\frac{lat\ 1 + lat2}{2}\right) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$$

$$\Delta lat = (lat2 - lat1)$$

$$a = \sin 2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) + \cos(lat\ 1) \cos(lat\ 2) \sin 2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right)$$

$$d = \sqrt{(a) * R}$$

Donde:

- R = EL radio de la tierra (6371 km)
- 1 grado es igual a 0.0174532925 radianes
- Δlat = magnitud de la Latitud en (km)
- $\Delta long$ = magnitud de la Longitud (km)
- d = distancia (km)

Esta ecuación nos permite identificar el punto más cercano a la ubicación deseada o ingresada por el usuario. Luego, se extraen los valores de NO₂ y las coordenadas geográficas de ese punto, y se ajustan utilizando factores de escala y desplazamiento proporcionados en los metadatos del archivo.

Se calculan promedios, medianas y desviaciones estándar de los valores de NO₂ en vecindades 3x3 y 5x5 alrededor de estos puntos. Esto proporciona una comprensión más completa de la distribución espacial y la variabilidad de NO₂ en las áreas cercanas a la ubicación específica.

Al finalizar el proceso de extracción de valores de NO₂ de las imágenes satelitales, se genera un archivo CSV que contiene los resultados obtenidos. Estos resultados serán utilizados para análisis posteriores, como la geolocalización de los puntos, la correlación con datos de

estaciones de superficie y el desarrollo del modelo de estimación de NO₂ en la superficie terrestre. Además, se identifican y registran los archivos que generaron errores durante el proceso de extracción para garantizar la calidad y fiabilidad de los datos obtenidos, ver archivos dañados en la parte de Anexos.

2.4 Transformación de los datos a concentración de NO₂ en superficie.

Antes de proceder con esta etapa del proceso, fue necesario extraer específicamente los valores correspondientes al Distrito Metropolitano de Quito. Para lograr esto, se llevó a cabo una geocalización de los puntos más cercanos a las latitudes y longitudes de cada una de las estaciones del REMMAQ, utilizando el código en Python proporcionado. Durante este proceso, se pudo observar que ciertos puntos seguían la tendencia delineada en las Figuras 2.3.4 y 2.3.5, lo que indicaba que solo era factible extraer datos para estas coordenadas específicas, y no para el área de Quito en su totalidad. Teniendo en cuenta la resolución espacial de los satélites OMI y TROPOMI, que es respectivamente de 13 km x 24 km y 3.5 km x 5.5 km, se decidió establecer un buffer de 5 km para los datos de TROPOMI y uno de 10 km para los datos de OMI.

Utilizando la herramienta Buffer en QGIS, se implementó este procedimiento para las 8 estaciones distribuidas a lo largo de Quito. Posteriormente, se aplicó la herramienta de corte para seleccionar únicamente los puntos que estuvieran dentro de este buffer. Los datos resultantes fueron exportados a un archivo Excel para su posterior procesamiento y transformación a valores normalizados de NO₂. La Figura 2.4.1 muestra un mapa en QGIS donde se visualizan los datos obtenidos a través de los programas, la zona buffer establecida y los datos que lograron ser incluidos dentro de esta área delimitada.

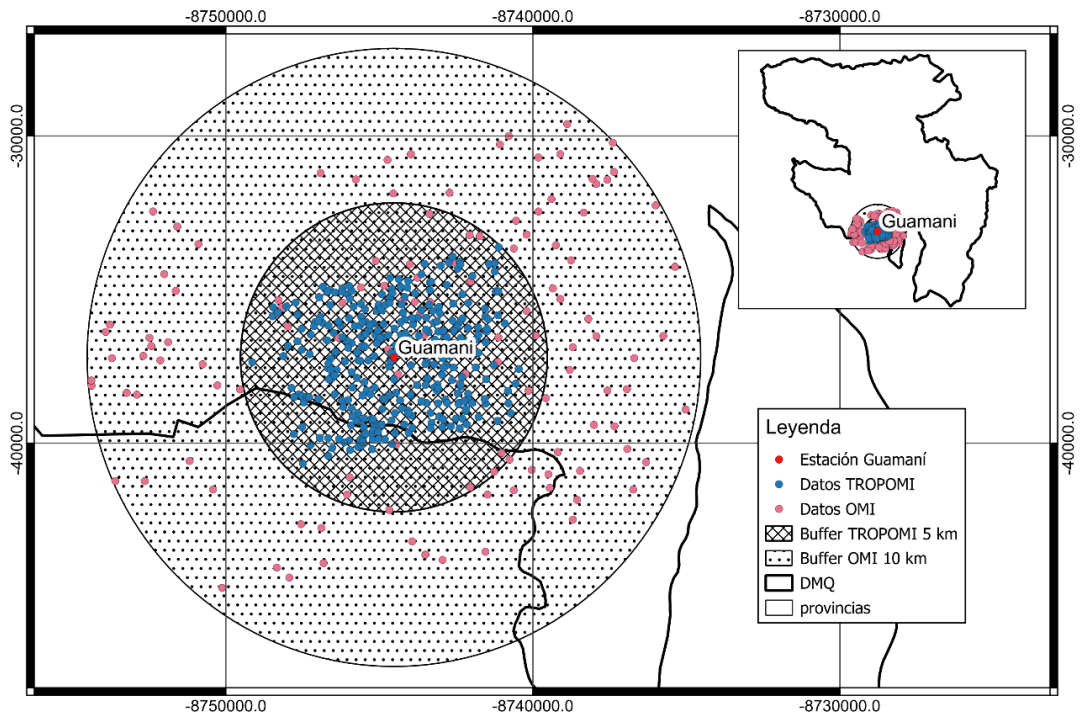


Figura 2.4.1. Extracción de valores satelitales utilizando un buffer de 5km y 10 km para TROPOMI y OMI respectivamente.

Con esta estrategia, se garantizó que el análisis se centrara en las áreas más relevantes para el estudio, optimizando así los recursos computacionales y asegurando la coherencia de los resultados obtenidos. Una vez centrados los puntos de interés se utilizó la herramienta cortar para extraer únicamente estos datos. Finalmente se extrajo la información en formato xlsx, para ver ser trabajos directamente.

En esta sección no se realizó ninguna transformación a nivel de superficie. Se utilizaron directamente los valores de NO_2 en mol/m^2 y $\text{moléculas}/\text{cm}^2$ tal cual proporcionan los instrumentos, y estos resultados son los que se discutirán,

2.5 Contraste entre observaciones satelitales y mediciones

Los valores obtenidos de las imágenes satelitales fueron consolidados en un archivo Excel, uno para cada satélite, con el propósito de agrupar los datos correspondientes a la misma hora, mes y día. Para ello, es necesario comprender como expulsa los datos el código de extracción. En la Figura 2.5.1. se presenta un ejemplo de los datos curdos extraídos para cada una de la estación referente a un instrumento, los datos se ordenan en; ID, un identificador, el nombre del archivo, la latitud y longitud del unto más cercano, el valor de NO_2 en ese punto y un promedio en una grillada de 3x3 y 5x5 km.

ID	File	Latitud	Longitud	NO2	Promedio 3x3	Promedio 5x5
0	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0101t1727-o92901_v003-2022m0331t001313.SUB.nc4'	-0.16921541	-78.79847	3.9839E+15	3.09521E+15	2.62315E+15
1	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0102t1811-o92916_v003-2022m0331t001339.SUB.nc4'	-0.11089281	-78.451546	nan	None	None
2	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0103t1715-o92930_v003-2022m0331t001346.SUB.nc4'	-0.21964559	-78.88062	5.27613E+15	3.6543E+15	3.2474E+15
3	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0103t1854-o92931_v003-2022m0331t001347.SUB.nc4'	-0.36406144	-79.48477	2.77419E+15	None	2.9138E+15
4	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0104t1758-o92945_v003-2022m0331t001414.SUB.nc4'	-0.0645959	-78.47684	nan	None	3.34096E+15
5	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0105t1703-o92959_v003-2022m0331t001435.SUB.nc4'	0.46468592	-75.933266	3.96831E+15	3.31193E+15	3.05951E+15
6	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0105t1842-o92960_v003-2022m0331t001518.SUB.nc4'	-0.15592693	-78.626076	3.21798E+15	3.24565E+15	3.48139E+15
7	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0106t1746-o92974_v003-2022m0331t001521.SUB.nc4'	-0.16863613	-78.488075	1.22082E+15	2.47316E+15	2.68E+15
8	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0107t1829-o92989_v003-2022m0331t001445.SUB.nc4'	-0.03294636	-78.3247	nan	3.05136E+15	2.77444E+15
9	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0108t1734-o93003_v003-2022m0331t001449.SUB.nc4'	-0.08131854	-78.35787	2.87124E+15	2.3087E+15	2.67099E+15
10	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0109t1817-o93018_v003-2022m0331t001454.SUB.nc4'	-0.07977664	-78.38924	nan	1.31043E+15	2.17728E+15
11	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0110t1722-o93032_v003-2022m0331t001559.SUB.nc4'	-0.00703523	-78.16325	2.7569E+15	2.95317E+15	2.90134E+15
12	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0110t1900-o93033_v003-2022m0331t001504.SUB.nc4'	-0.69423604	-80.96071	2.23812E+15	2.10404E+15	2.12476E+15
13	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0111t1805-o93047_v003-2022m0331t001911.SUB.nc4'	-0.1485952	-78.49498	nan	None	None
14	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0112t1709-o93061_v003-2022m0331t001932.SUB.nc4'	0.08298388	-77.415764	2.74479E+15	3.00326E+15	3.07231E+15
15	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0112t1848-o93062_v003-2022m0331t001936.SUB.nc4'	0.05222552	-78.040474	1.58519E+15	2.83641E+15	2.95333E+15
16	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0113t1753-o93076_v003-2022m0331t001949.SUB.nc4'	-0.1372075	-78.60594	3.74831E+15	5.08691E+15	3.80737E+15
17	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0114t1836-o93091_v003-2022m0331t002009.SUB.nc4'	-0.09564959	-78.67371	3.14403E+15	4.08291E+15	3.34148E+15
18	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0115t1740-o93105_v003-2022m0331t002038.SUB.nc4'	-0.09739193	-78.46384	2.06786E+15	3.09826E+15	2.92222E+15
19	OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0116t1804-o93109_v003-2022m0331t002042.SUB.nc4'	-0.0771893	-78.60444	1.70149E+15	2.9861E+15	2.14420E+15

Figura 2.5.1. Orden de las variables obtenidas para la estación Cotocollao correspondiente al OMI.

Posterior a ello se utilizaron algunas funciones en Excel, entre ella la función “EXTRAER” que permite extraer los caracteres correspondientes a la fecha de cada archivo. Estos caracteres se encuentran dentro del nombre de los archivos como sea había explicado en la Tabla 2.2.3. acerca de la convención de los nombres. Este paso me permitió asociar cada columna a un valor de año, mes, día y hora respectivamente, la Figura 2.5.2, muestra el orden final de los datos aplicada esta función de extracción. Asimismo, se aplicó la función de Excel “REDONDEAR.MULT” para redondear la hora al múltiplo más cercano, lo que facilitó la alineación temporal de los datos satelitales y de las estaciones de la REMMAQ.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	AÑO	MES	DIA	HORA	Latitud	Longitud	NO2	Promedio 3x3	Promedio 5x5
2	2022	1	2	18	-0.23182	-78.4257			
3	2022	1	4	18	-0.18555	-78.4512			3.10E+15
4	2022	1	6	18	-0.16864	-78.4881	1.2E+15	2.50E+15	2.70E+15
5	2022	1	11	18	-0.1486	-78.495			
6	2022	1	15	18	-0.21782	-78.4383	2E+15	2.70E+15	2.80E+15
7	2022	1	16	18	-0.19765	-78.5686	2.4E+15	3.40E+15	3.30E+15
8	2022	1	18	18	-0.12902	-78.4663			
9	2022	1	20	18	-0.13798	-78.4898			3.80E+15

Figura 2.5.2. Orden final de los datos para usar el script.

Como se puede destacar en la Figura 2.5.2. se evidencia la presencia de vacíos en cuanto a promedios de NO₂ es importante notar esto ya que permite entender la poca cantidad de datos finalmente extraída. En este formato, se arregló el Excel que contiene información de cada estación en una hoja de cálculo, y en cuanto a los datos de la REMMAQ, estos presentan su fecha en formato personalizado “2022/01/12 12:00 am”, de igual manera se arregló en formato de la Figura 2.5.2.

Luego con ayuda del script presentado en la sección de anexos se permitió juntar los datos de la REMMAQ con su respectivo valor del OMI y TROPOMI respectivo. Es decir, cada valor de NO₂ proporcionado por los instrumentos a una cierta hora, fue necesario asociar esa hora, día y mes, respectivo al valor de la REMMAQ. De esta manera se garantiza que la correlación sea con valores comparables. Por lo tanto, si un instrumento tiene un valor de 3xE27 el martes 15 de febrero a las 14h00, el script realizado en Python busca el valor de NO₂ en ug/m³ de la REMMAQ a la misma fecha y hora y los organiza en un Excel, de esta manera se presenta la Figura 5.2.3, a manera de ejemplificar este paso. El valor de “SUP”, corresponde al valor asociado a superficie, es decir el dato de la REMMAQ en ug/m³

	A	B	C	D	G	H	I	J
1	AÑO	MES	DIA	HORA	NO2	Promedio 3x3	Promedio 5x5	SUP
2	2022	1	2	13				
3	2022	1	4	13			3.1E+15	19.92
4	2022	1	6	13	1.2E+15	2.47E+15	2.68E+15	19.5
5	2022	1	11	13				22.87
6	2022	1	13	13	9.3E+15	5.13E+15	3.93E+15	38.75
7	2022	1	15	13	2E+15	2.73E+15	2.84E+15	19.91
8	2022	1	16	13	2.5E+15	3.37E+15	3.32E+15	8.67

Figura 5.2.3. Extracciones de valores asociados a la misma hora y fecha para NO₂

Posteriormente, utilizando las capacidades de análisis de Excel, se calcularon las correlaciones del coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de NO₂ obtenidos de los satélites y los registrados por las estaciones de la REMMAQ para cada ubicación específica.

El coeficiente de determinación es una medida estadística que proporciona información sobre la proporción de la varianza de una variable dependiente que puede explicarse por la variabilidad de una o más variables independientes. Es decir, un valor 0.7 me indica que el 70% de la variabilidad de la variable depende del modelo de regresión, que es la fórmula que modela esta tendencia (Van Geffen et al., 2020). Este proceso permitió evaluar la calidad de la relación entre los datos satelitales y las mediciones de las estaciones terrestres, proporcionando una base sólida para el análisis comparativo y la validación de los datos obtenidos mediante diferentes fuentes de observación.

2.6 Interpolación de la información

Para llevar a cabo la interpolación de la información, una vez obtenida la función de correlación a partir de los datos, se propone la selección de 25 puntos abarcando todas las capitales de las provincias del Ecuador, parte de esta información se presenta en la Tabla

2.6.1, misma que contiene las coordenadas de cada uno de los puntos tomados para este análisis, para ver la Tabla completa dirigirse a la sección de Anexos.

Tabla 2.6.1. Selección de ciudades para la interpolación de información.

ID	Nombre	Latitud	Longitud
1	Ambato	-1.266	-78.611
2	Babahoyo	-1.813	-79.513
3	Cañar	-2.554	-78.936
4	Cuenca	-2.918	-78.976
5	Esmeraldas	0.969	-79.634
6	Francisco de Orellana	-0.468	-76.968
7	Guaranda	-1.597	-78.980
8	Guayaquil	-2.176	-79.851
9	Ibarra	0.342	-78.125

Nota: Los puntos fueron extraídos de manera visual precautelando que todas las ciudades de cada provincia sean contenidas. **Elaborado por:** Edison Maldonado.

Utilizando el código desarrollado previamente para la extracción de datos satelitales, se obtendrán los valores de NO₂ para cada uno de estos puntos generados. Obteniendo como resultado un documento en formato “csv” con la información de las 463 observaciones para ciudad. Estos valores serán tabulados en tablas dinámicas con el fin de obtener un valor promedio anual para cada uno de ellos. Este valor se insertará en la función de correlación obtenida, permitiendo así estimar los niveles de NO₂ promedios, medidos en la superficie terrestre para el año.

Posteriormente, con los valores de NO₂ obtenidos para cada una de las ciudades seleccionadas en todo el Ecuador, se aplicará una técnica de interpolación, como el Inverse Distance Weighting (IDW) con el fin de visualizar la distribución espacial de la contaminación por NO₂ a nivel nacional. Este proceso de interpolación proporcionará una representación más completa y detallada de los niveles de contaminación en todo el país, permitiendo identificar patrones y tendencias significativas para una evaluación más precisa de la calidad del aire o simplemente para afianzar los datos medidos en superficie.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Control de calidad de los datos

Luego de haber obtenido los datos satelitales únicamente para el área de estudio delimitada al DMQ, se realizó un control de la calidad de los datos obtenidos. De esta sección se presenta a continuación la Tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1. Resumen de vacíos y negativos de las observaciones satelitales.

ESTACIÓN	OMI			TROPOMI		
	# Datos	%Vacíos	%Negativos	# Datos	%Vacíos	%Negativos
BEL	138	59%	0%	330	0.0%	1.8%
CAR	116	58%	0%	337	2.1%	1.5%
CEN	130	53%	0%	331	0.3%	0.6%
CAM	120	58%	0%	330	0.3%	0.6%
COT	127	55%	0%	330	0.9%	1.2%
GUA	124	46%	0%	328	0.3%	0.9%
CHL	124	55%	0%	329	0.6%	1.2%
TUM	121	60%	0%	337	2.7%	3.3%
PROM	125	56%	0%	332	0.9%	1.4%

En esta se puede observar el número total de observaciones satelitales para cada estación y su porcentaje de vacíos y negativos. Notando que los datos extraídos del instrumento TROPOMI son los que mejor calidad tienen, obteniendo unas 332 observaciones para todo el período de estudio y con un porcentaje total de vacíos y valores negativos bastante bajo. Por otro lado, las observaciones del Instrumento OMI se reducen casi a la mitad llegando a un promedio total de 125 observaciones con un 56% de vacíos, denotando la falta de observaciones para Quito.

Asimismo, en la Tabla 3.1.2, se presenta el control de la calidad de los datos correspondientes a la REMMAQ.

Tabla 3.1.2. Resumen de vacíos y negativos de la REMMAQ.

Estación	# Datos	%Vacíos	%Negativos
BEL	8670	5.9%	0.0%
CAR	8670	2.6%	0.0%
CEN	8670	5.8%	0.1%
CAM	8670	3.1%	0.0%
COT	8670	13.2%	0.0%
GUA	8670	4.1%	0.0%
CHL	8670	4.6%	0.2%
TUM	8670	3.4%	0.0%
PROM	8670	5.4%	0.0%

Aquí se puede observar que al ser mediciones horarias todas las estaciones de la REMMAQ tienen un total de 8670 observaciones, y también se aprecia que el porcentaje promedio de

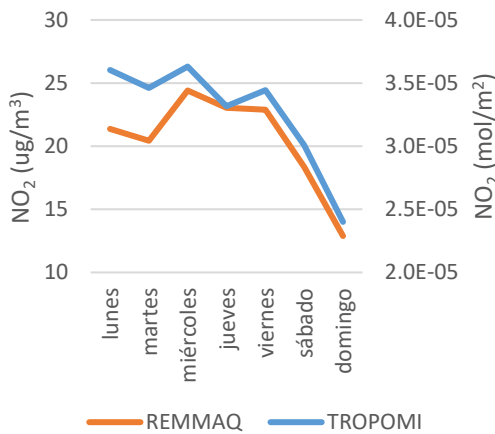
vacíos y negativos en muy bajo. La estación que más vacíos presenta para el año 2022 es Cotocollao con un porcentaje de 13.2%.

Tendencia semanal y mensual de los datos

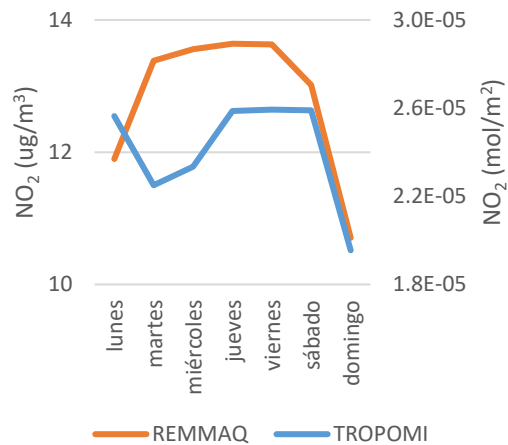
Se analizó la tendencia semanal y mensual de los datos obtenidos tanto para los instrumentos TROPOMI y OMI como las observaciones en superficie medidas por las estaciones de la REMMAQ. Estas tendencias se las realizó luego de la concatenación de los datos, es decir. Los resultados presentados a continuación corresponden a valores semanales y mensuales de todo el año 2022 a la hora en la que los instrumentos TROPOMO y OMI contienen datos, es decir alrededor de las 13h00 y 14h00.

De este modo, se presenta en la Figura 3.1.1 la tendencia semanal de las observaciones TROPOMI (eje derecho) con los datos de la REMMAQ (eje izquierdo) para todas las estaciones.

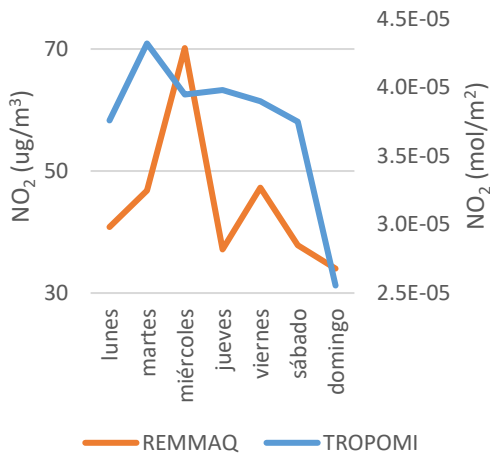
a) Belisario



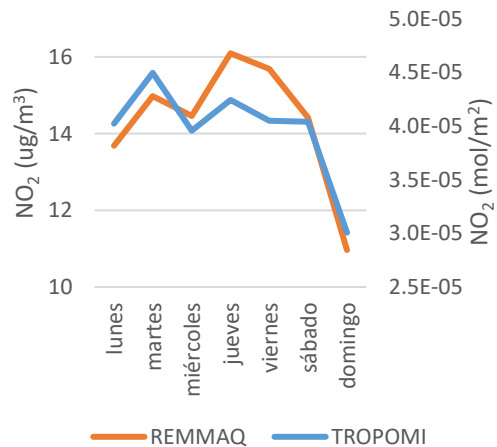
b) Carapungo



c) Centro



d) Camal



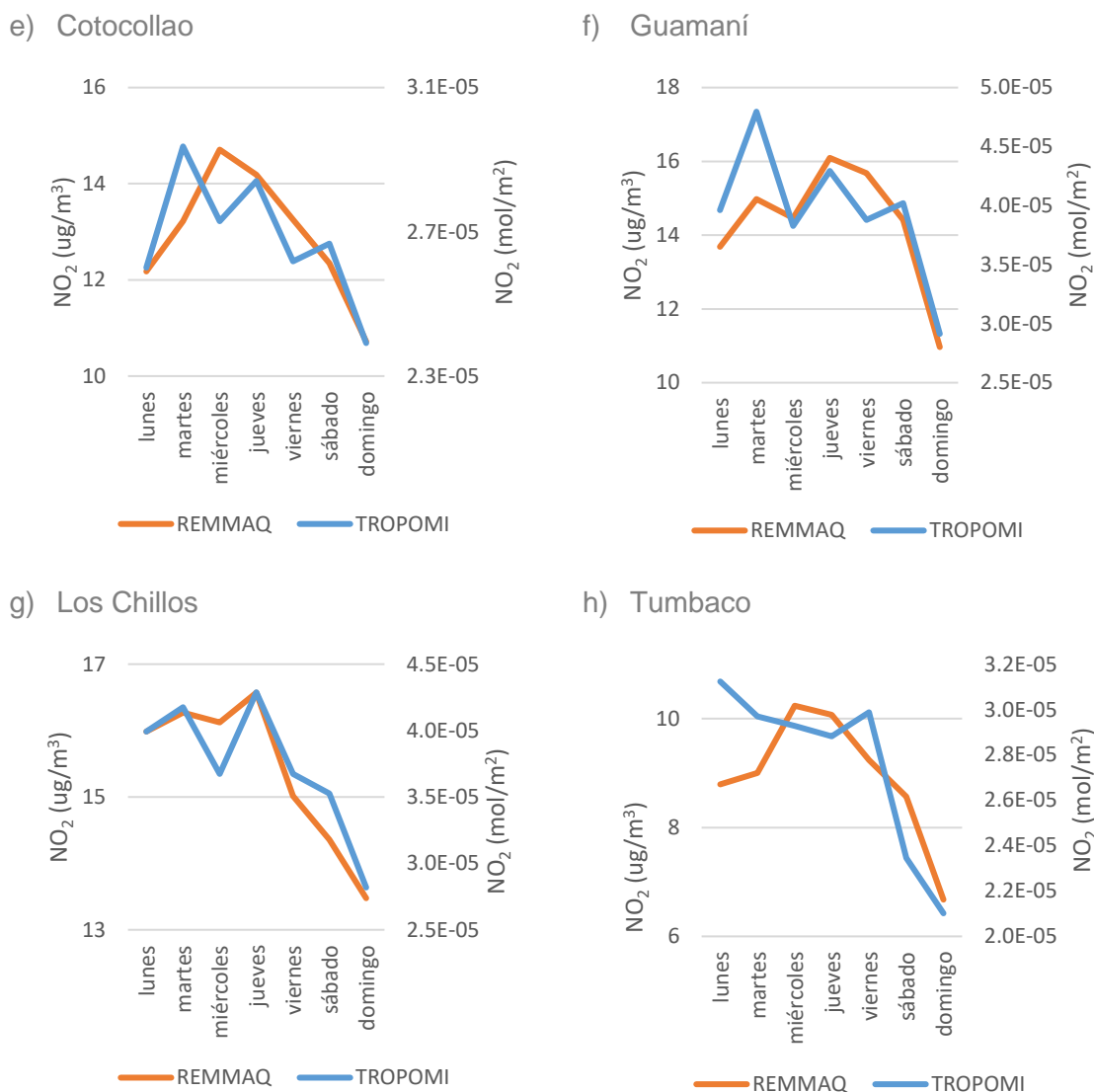


Figura 3.1.1. Tendencia semanal para todas las estaciones de la REMMAQ.

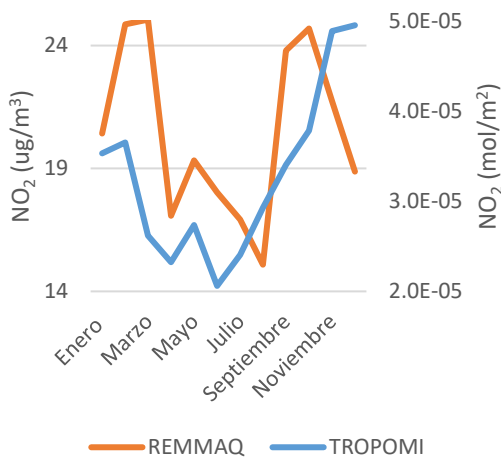
La tendencia de la Figura 3.1.1. facilita la comprensión de los patrones semanales presentes en las observaciones satelitales del Instrumento TROPOMI en comparación con las estaciones de la REMMAQ. Al analizar visualmente estos datos, se destaca una consistencia específica, como en el caso de la estación Belisario (a), donde es evidente que mantienen una tendencia semanal uniforme. No obstante, esta uniformidad no se replica en la estación Centro (c), donde se observa un patrón de crecimiento en la observación TROPOMI hasta el martes, seguido de una disminución el miércoles, un aumento el jueves y otra disminución el viernes, con una brusca caída durante el fin de semana. En contraste, las observaciones en superficie muestran un pico el miércoles, seguido de una disminución abrupta hasta el jueves, un aumento significativo el viernes y una disminución gradual durante el fin de semana.

Estas variaciones pueden ser resultado de la disponibilidad en la que el instrumento TROPOMI ofrece los datos. Según Virghileanu et al., (2020), en regiones donde los patrones de contaminación son muy específicos y cambian en zonas reducidas la sensibilidad del TROPOMI disminuye, al igual que del OMI, otorgando valores promedio y subestimando los valores de NO₂ a nivel de superficie.

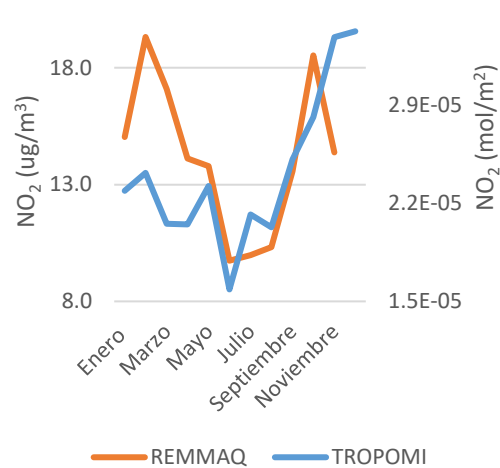
En términos generales, se puede afirmar que, en algunas estaciones, las observaciones satelitales siguen la misma tendencia que los datos de superficie proporcionados por la REMMAQ. Esto resalta la posibilidad de establecer una correlación entre ambas variables, si bien es crucial tener en cuenta que este análisis se circunscribe exclusivamente al intervalo horario de 13h00 a 14h00.

Así mismo, se presenta en la Figura 3.1.2. la tendencia mensual de las observaciones TROPOMI con los datos de la REMMAQ para todas las estaciones.

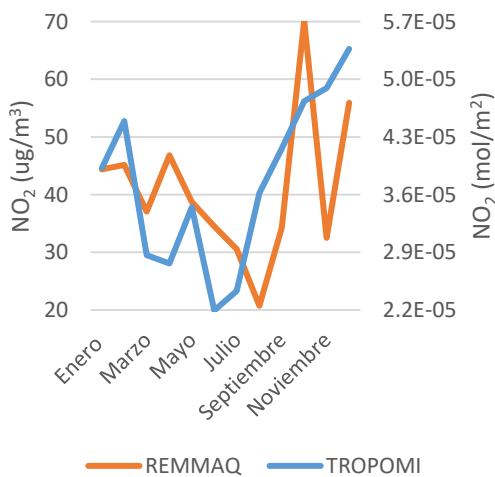
a) Belisario



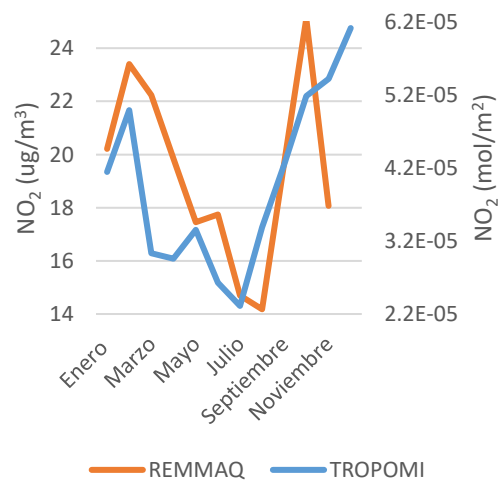
b) Carapungo



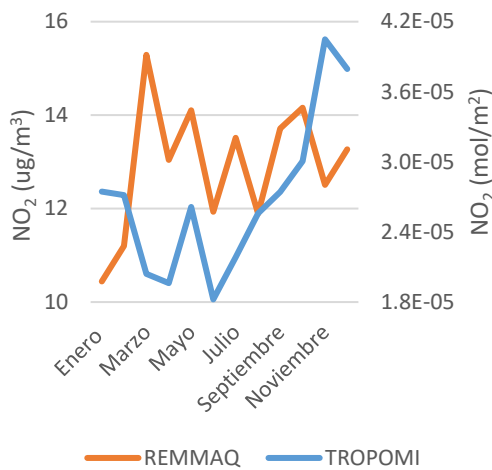
c) Centro



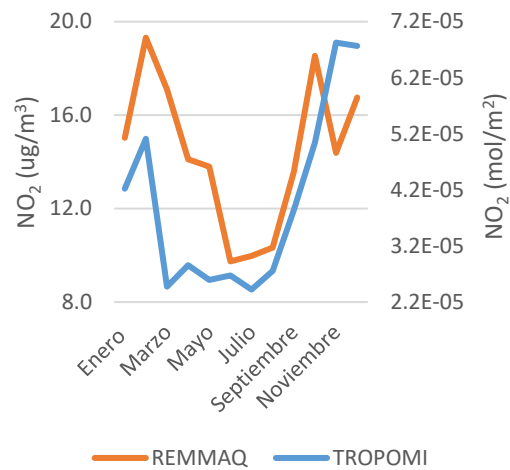
d) Camal



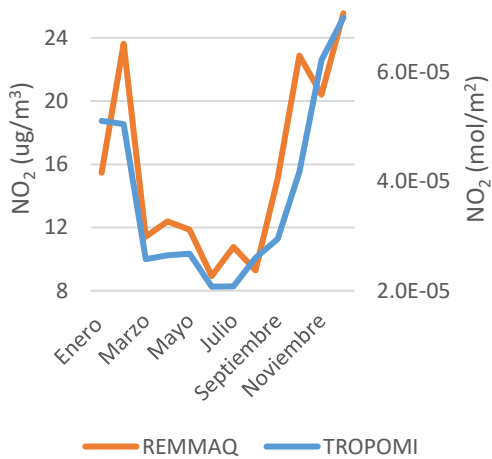
e) Cotocollao



f) Guamaní



g) Los Chillos



h) Tumbaco

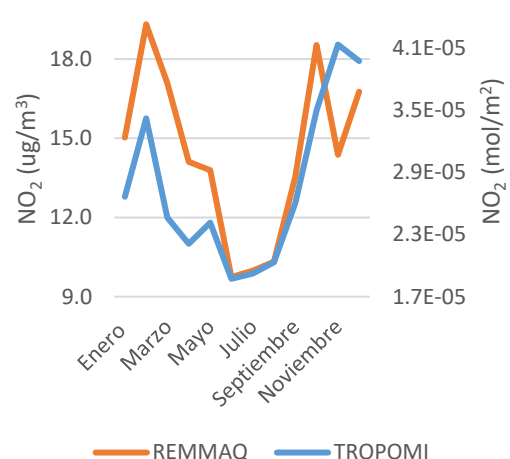


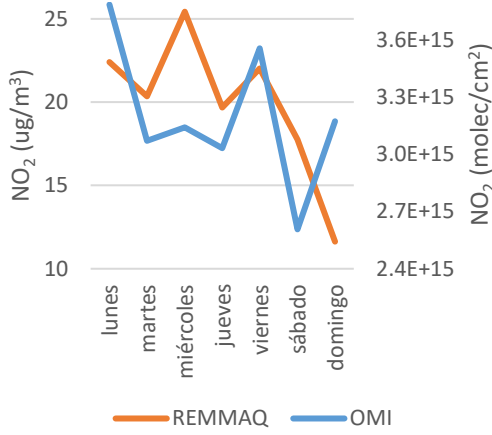
Figura 3.1.2. Tendencia semanal para todas las estaciones de la REMMAQ.

En la representación gráfica correspondiente a la Figura 3.1.2, presentada anteriormente, se aprecia una mejora en la coherencia de las tendencias en las observaciones satelitales y en superficie al extender el análisis al nivel mensual en lugar de semanal. Ejemplos notables de esta convergencia se evidencian en Los Chillos, Tumbaco y Guamaní, cuyas tendencias exhiben una notable similitud con los datos proporcionados por la REMMAQ. No obstante, cabe señalar que este patrón no se replica de manera completa en el resto de las estaciones, divergiendo en parte de la dinámica capturada por las estaciones en superficie.

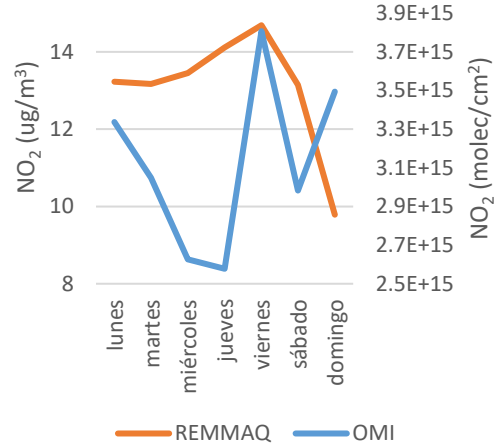
En contraste, se examinaron las tendencias de las observaciones del Instrumento OMI disponibles. Asimismo, se limitó el análisis de los datos de TROPOMI exclusivamente a la región del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), considerando únicamente los datos ya

concatenados. En otras palabras, se disponen de observaciones de OMI y REMMAQ durante el intervalo horario comprendido entre las 13h00 y 14h00 a lo largo de todo el año.

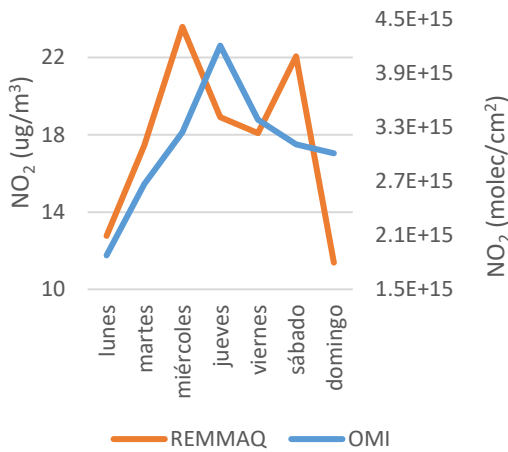
a) Belisario



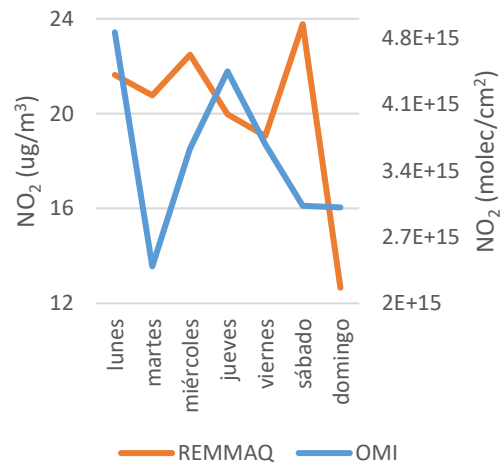
b) Carapungo



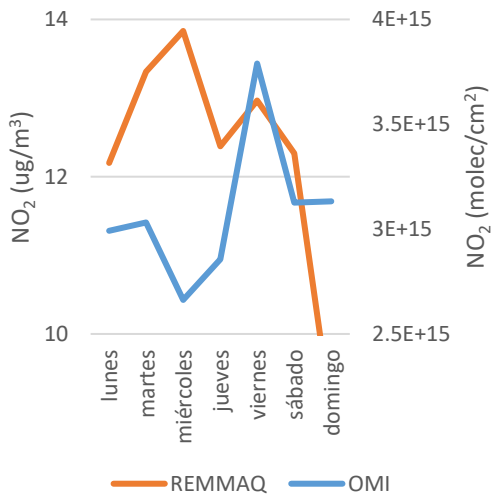
c) Centro



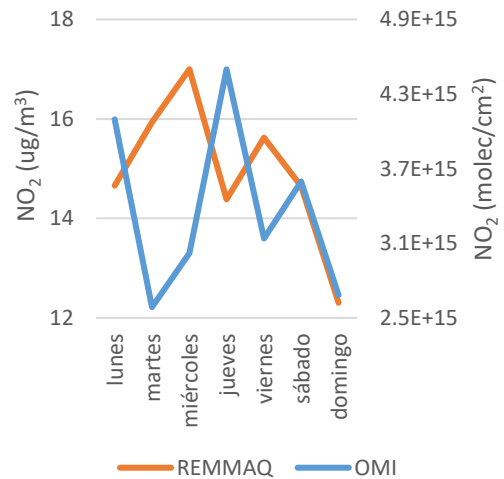
d) Camal



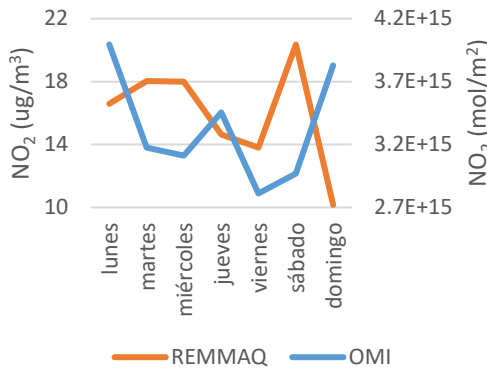
e) Cotocollao



f) Guamaní



g) Los Chillos



h) Tumbaco

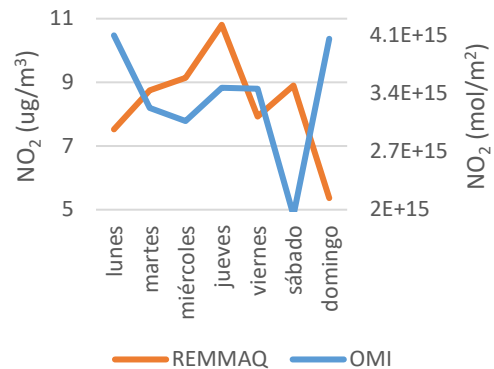


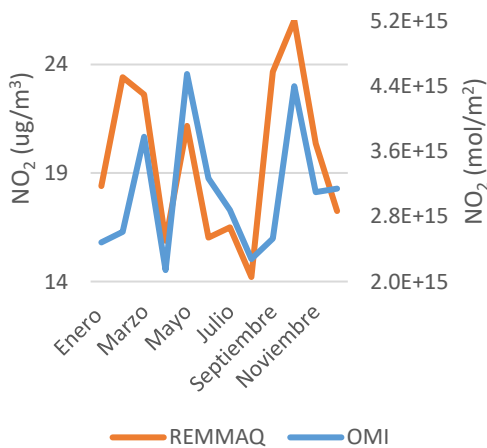
Figura 3.1.3. Tendencia semanal de las observaciones OMI con datos de la REMMAQ.

En el análisis de estas observaciones, se evidencia una discrepancia notable con respecto a la tendencia anticipada, al igual que las mediciones TROPOMI. Visualmente, se destaca la falta de concordancia temporal entre las observaciones satelitales y los datos recopilados en la superficie. Este desacuerdo visual sugiere una correlación significativamente baja.

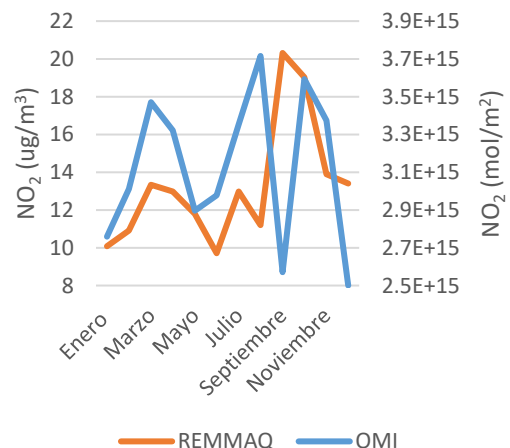
Resulta interesante examinar los resultados de la estación Cotocollao, que exhibe la menor tendencia para ambos satélites. En el caso del instrumento OMI, se observa una tendencia semanal completamente inversa, donde si la una curva sube, la otra baja, encontrándose en un punto.

Asimismo, se presenta la tendencia mensual para todas las estaciones. Al evaluar una mayor cantidad de datos, esta tendencia ofrece una perspectiva más completa, permitiendo la identificación de patrones de manera más efectiva, estas tendencias se presentan en la figura 3.2.4.

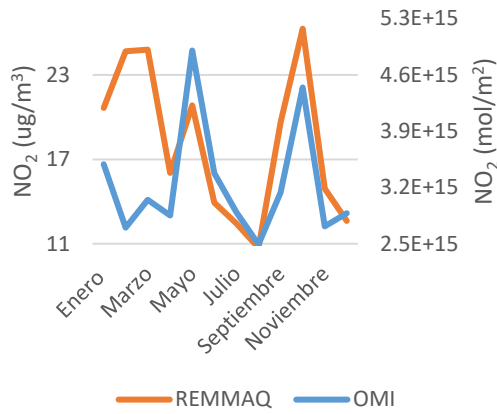
a) Belisario



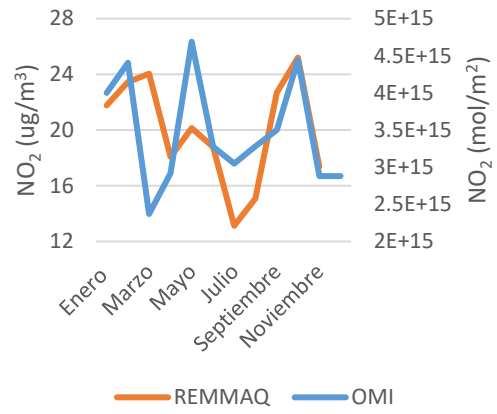
b) Carapungo



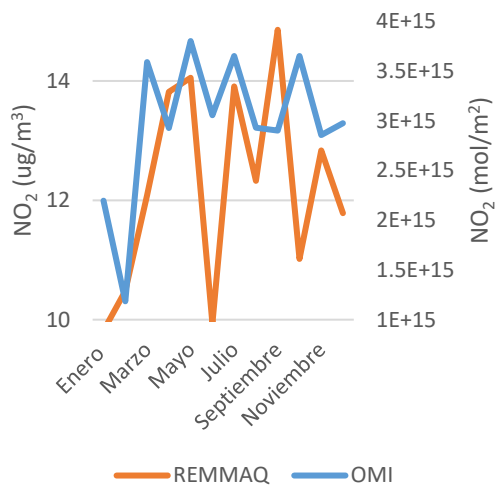
c) Centro



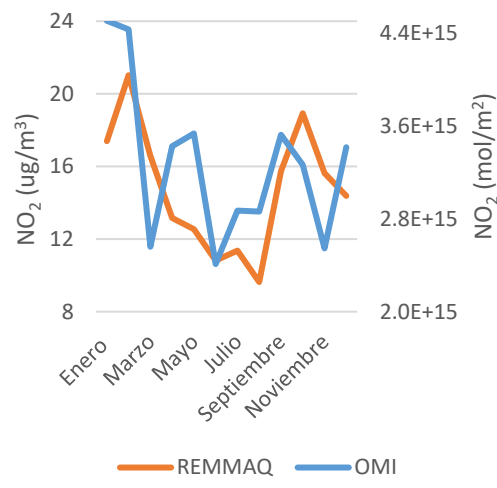
d) Camal



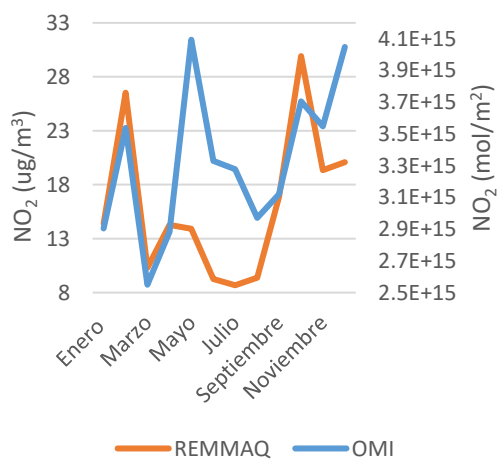
e) Cotocollao



f) Guamaní



g) Los Chillos



h) Tumbaco

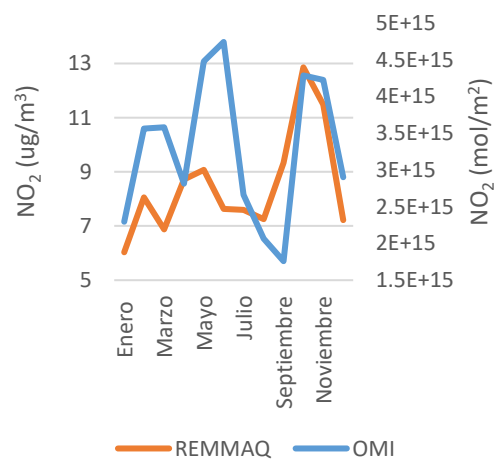


Figura 3.1.4. Tendencias mensuales para las observaciones OMI con la REMMAQ.

Es pertinente recalcar que la estación de Cotocollao muestra la menor tendencia, al igual que con el TROPOMI. En esta estación, las curvas de la REMMAQ presentan oscilaciones y picos alternados, mientras que las observaciones del OMI muestran patrones de picos similares, pero dentro de un rango establecido.

Destaca la estación Belisario como aquella que presenta la mejor tendencia igual que con la de TROPOMI durante este período y para el satélite en cuestión. Aunque no es perfecta, sigue el mismo patrón que las observaciones, lo cual es un indicativo positivo.

En conclusión, el análisis detallado de las tendencias semanales y mensuales de las observaciones satelitales TROPOMI y OMI, en comparación con los datos de superficie proporcionados por las estaciones de la REMMAQ, revela patrones significativos y divergencias notables. Mientras algunas estaciones, como Belisario, muestran una consistencia destacada entre las observaciones satelitales y en superficie, la estación Cotocollao presenta anomalías pronunciadas con tendencias inversas y oscilaciones notables. Las estaciones de Los Chillos y Tumbaco exhiben una notable similitud entre las tendencias mensuales de las observaciones TROPOMI y los datos de la REMMAQ, sugiriendo tomar en cuenta una variabilidad temporal y espacial para el análisis posterior.

Correlación entre datos satelitales y datos medidos en superficie

Las correlaciones fueron establecidas entre la observación satelital del OMI y TROPOMI con los valores medidos en superficie. Estas correlaciones primero se las realizaron con los valores horarios para cada día que la REMMAQ, tenga datos, tal cual se muestra en la Figura 3.1.5, donde la correlación es muy baja con valores horarios.

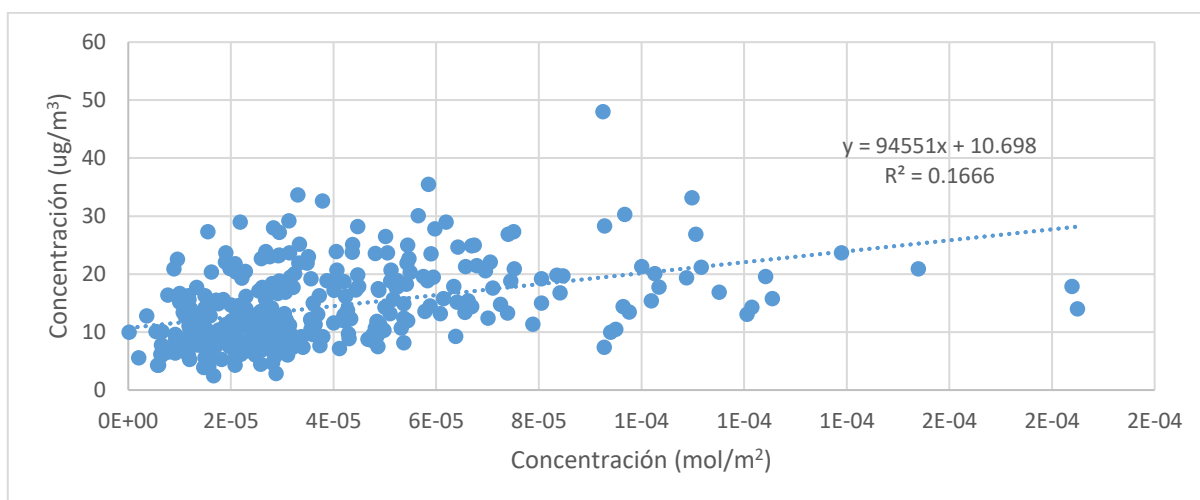


Figura 3.1.5. Correlación obtenida con datos horarios.

La Figura presenta una correlación de 0.166 lo que quiere decir que es una correlación positiva. Sin embargo, fue la correlación lineal más alta con valores horarios. Por lo tanto, debido a sus bajísimos niveles de correlación se decidió realizar esta sección con los valores para todo el mes. Es decir, un promedio para enero, febrero y así sucesivamente. A continuación, se presenta una de las correlaciones más altas obtenidas a partir de todos los días concatenados. Como se logra apreciar el R^2 tiene un valor de 0.22 y fue la correlación más alta que se obtuvo de todas las estaciones.

Por lo tanto, viendo esto fue necesario realizar el promedio mensual de cada una de las mediciones, tanto satelitales como en superficie y correlacionar los valores promedio. De esta manera se pudieron obtener valores del R^2 más altos. La Tabla 3.1.3 resume los hallazgos alcanzados en esta sección del trabajo. También es importante considerar que muchas de las correlaciones altas se obtuvieron mediante ecuaciones polinómicas de hasta orden 6. Sin embargo, se decidió realizar el modelo con la correlación lineal más alta obtenida, que en este caso fue la estación Los Chillos.

Tabla 3.1.3. Resumen de correlaciones de los satélites OMI y TROPOMI

Estación	OMI	TROPOMI	Tipo de función OMI	Tipo de función TROPOMI
Belisario	0.30	0.40	Polinómica (3 grados)	Polinómica (3 grados)
Carapungo	0.36	0.58	Polinómica (3 grados)	Polinómica (6 grados)
Centro	0.28	0.28	Polinómica (2 grados)	Polinómica (3 grados)
El Camal	0.73	0.76	Polinómica (3 grados)	Polinómica (6 grados)
Cotocollao	0.23	0.40	Polinómica (6 grados)	Polinómica (3 grados)
Guamaní	0.41	0.60	Polinómica (4 grados)	Polinómica (3 grados)
Los Chillos	0.47	0.76	Polinómica (3 grados)	Lineal
Tumbaco	0.49	0.54	Polinómica (3 grados)	Polinómica (6 grados)

En la evaluación de la correlación entre las observaciones satelitales y los datos de superficie, el valor del coeficiente de determinación (R^2) desempeña un papel crucial para determinar la fuerza y la dirección de la relación entre las variables. En este contexto, se observa que las estaciones con un coeficiente de correlación superior a 0,5 se encuentran en la estación El Camal, mientras que el resto corresponde a correlaciones bajas. Para el caso del TROPOMI se evidencia que las estaciones Carapungo, El Camal, Guamaní, Los Chillos y Tumbaco presentan correlaciones más fuertes, es decir superiores a 0.5. Lo que indica que los datos de TROPOMI tienen una mayor correlación con respecto a los valores medidos en superficie.

Así mismo sugiere destacara el hecho de que en algunas estaciones se obtuvieron valores similares para OMI y TROPOMI, tal es el caso de la estación Centro, que presenta un coeficiente igual en ambos casos, al igual que en la estación Tumbaco cuya diferencia no es

tan notable. Se observa generalmente que tanto en ambos instrumentos la proporción de las correlaciones es similares. TROPOMI tiene mejores, pero OMI está bastante cercano.

Por otro lado, la estación Tumbaco muestra un R^2 notablemente alto para OMI y un valor más modesto para TROPOMI. Sin embargo, es crucial destacar que la función lineal utilizada para modelar la relación con las observaciones de OMI en Tumbaco puede indicar una correlación más directa y fácilmente interpretable en comparación con la función polinómica de 5 grados utilizada para TROPOMI. La simplicidad de una función lineal podría ser preferible en términos de interpretación y generalización de la relación entre las variables, lo que respalda la elección de Tumbaco para un análisis más detallado.

En este contexto, la elección de la estación de Tumbaco se justifica no solo por su alto valor de R^2 en las observaciones de OMI, sino también por la preferencia de una función lineal para modelar la relación con TROPOMI. La simplicidad y la interpretabilidad asociadas con una función lineal pueden proporcionar una base más sólida para el análisis de la correlación entre las observaciones satelitales y los datos de superficie en esta estación específica.

Estos resultados no son tan desapegados de la realidad ya que, en varios estudios muy robustos, en donde analizan la relación de la contaminación del NO_2 , con las variables meteorológica, incluso aquellos donde estiman usando redes neuronales, los resultados de las correlaciones van entre 0.5 a 0.6. En otro estudio, si se logran correlaciones de 0.7 a 0.8, debido a que las mediciones tomadas de los satélites son más frecuentes (Virghileanu et al., 2020).

Por lo tanto, se procede a presentar algunas de las correlaciones obtenidas con la función respectiva asociada a cada instrumento de medición OMI y TROPOMI. En la Figura 3.1.5 se muestra un valor moderado de correlación obtenido para la estación Belisario para OMI con una función polinómica de grado 6.

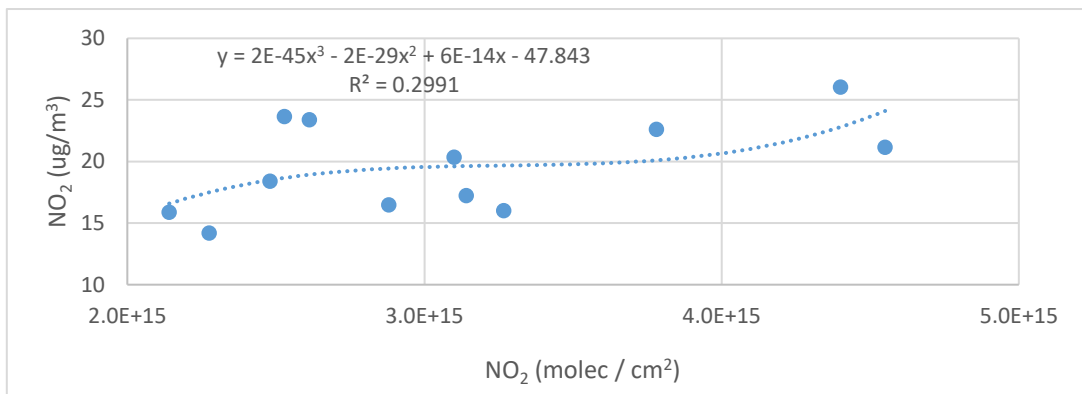


Figura 3.1.5. Correlación de OMI vs REMMAQ para la estación Belisario

Adicionalmente se coloca otro ejemplo en la Figura 3.1.5, con la estación Carapungo, obteniendo un valor de correlación R^2 de 0.36, utilizando una función polinómica de grado seis.

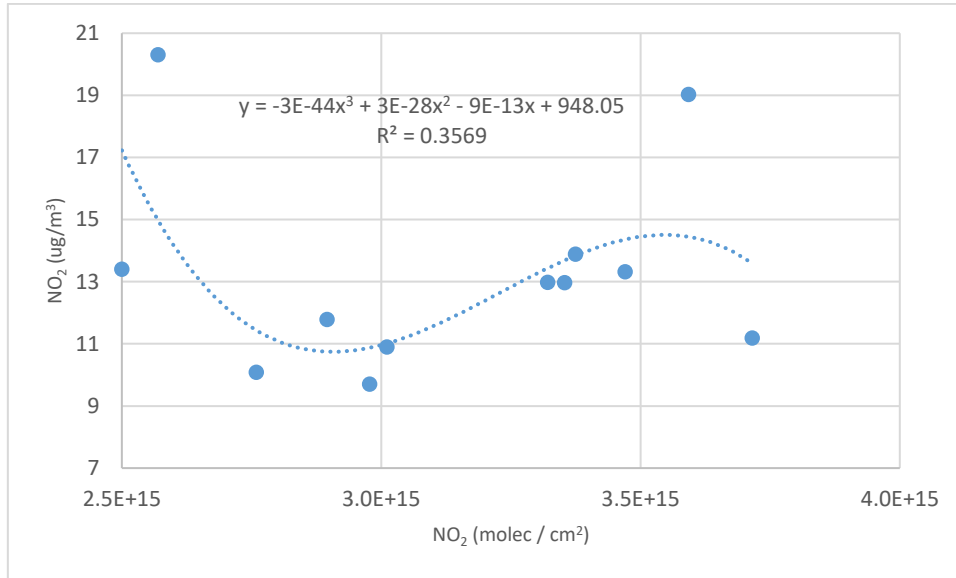


Figura 3.1.5. Correlación de OMI vs REMMAQ para la estación Carapungo

Y finalmente se presenta la correlación lineal más alta con un valor de R^2 de 0.76, correspondiendo a la estación de los Chillos y con el satélite TROPOMI. El resto de las gráficas con sus respectivas correlaciones y ecuaciones se las coloca en la parte de Anexos.

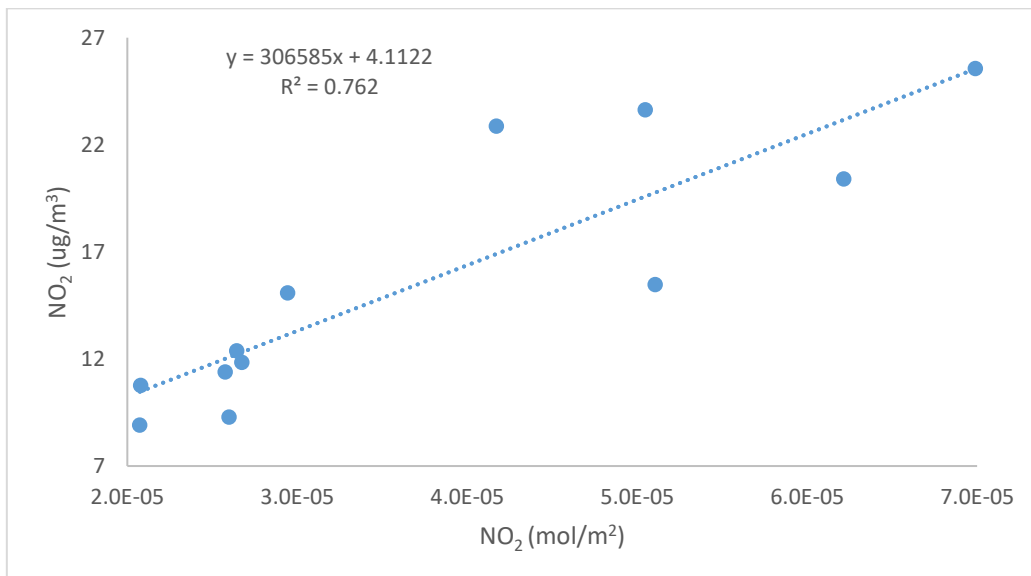


Figura. 3.1.6. Correlación lineal entre TROPOMI y REMMAQ para datos de Los Chillos.

Finalmente, y de acuerdo con que la correlación lineal para Los Chillos utilizando el instrumento TROPOMI, se obtuvo un valor de 0.76, lo cual sugiere que la forma en la de correlacionar los datos es más clara y sencilla. Por lo tanto, la ecuación 1 presenta la manera

de calcular y estimar el valor en superficie de NO₂ utilizando las observaciones satelitales. Para este ejemplo se sugiere usar la nomenclatura de (SUP) para valor medido de NO₂ en superficie, y (SAT) para la observación satelital.

$$SUP = 306585(SAT) + 4.1122$$

Es decir, para cualquier valor del satélite utilizando esta fórmula se podría llegar a tener una buena estimación de las observaciones en superficie. De modo que se puede pasar a las observaciones.

Interpolación

En cuanto a la interpolación se decidió realizar primeramente una evaluación para Quito, con los datos promedio anuales para el año 2022, de cada una de estaciones, presentado de esa la manera la siguiente Figura 3.1.6.

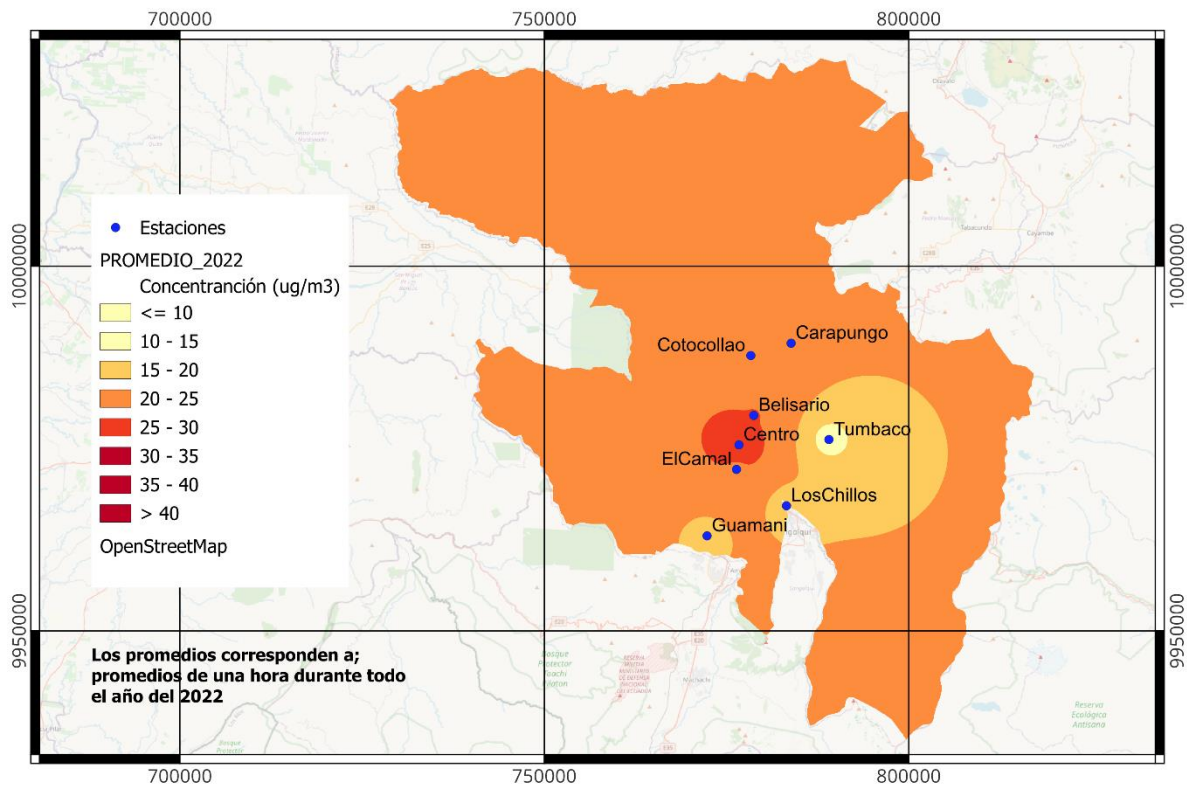


Figura 3.1.6. Isolíneas de contaminación para NO₂ en el 2022. Datos REMMAQ.

En esta Figura se puede apreciar como los valores con mayor concentración se encuentran en las estaciones de Belisario, El Camal y Centro, que se encuentran bastante cercanas entre sí. Así mismo, la estación de Tumbaco es la que menos concentración presenta y los Chillos y Guamaní presentan un valor un tanto mayor. Para el resto de las estaciones y estimación alrededor del DMQ, se observa con una concentración promedio de 20 a 25 ug/m³.

Si se utiliza el modelo calculado a partir de la estación de Tumbaco se obtiene la siguiente figura donde se subestima la cantidad de NO₂ alrededor del distrito metropolitano. Realmente las estaciones miden valores mayores a 30 ug/m³ sin embargo, los valores calculados con el modelo no sobrepasan las 15 ug/m³, por lo tanto no se calcula de manera correcta los valores de concentración, esto se puede observar en la Figura 3.1.7.

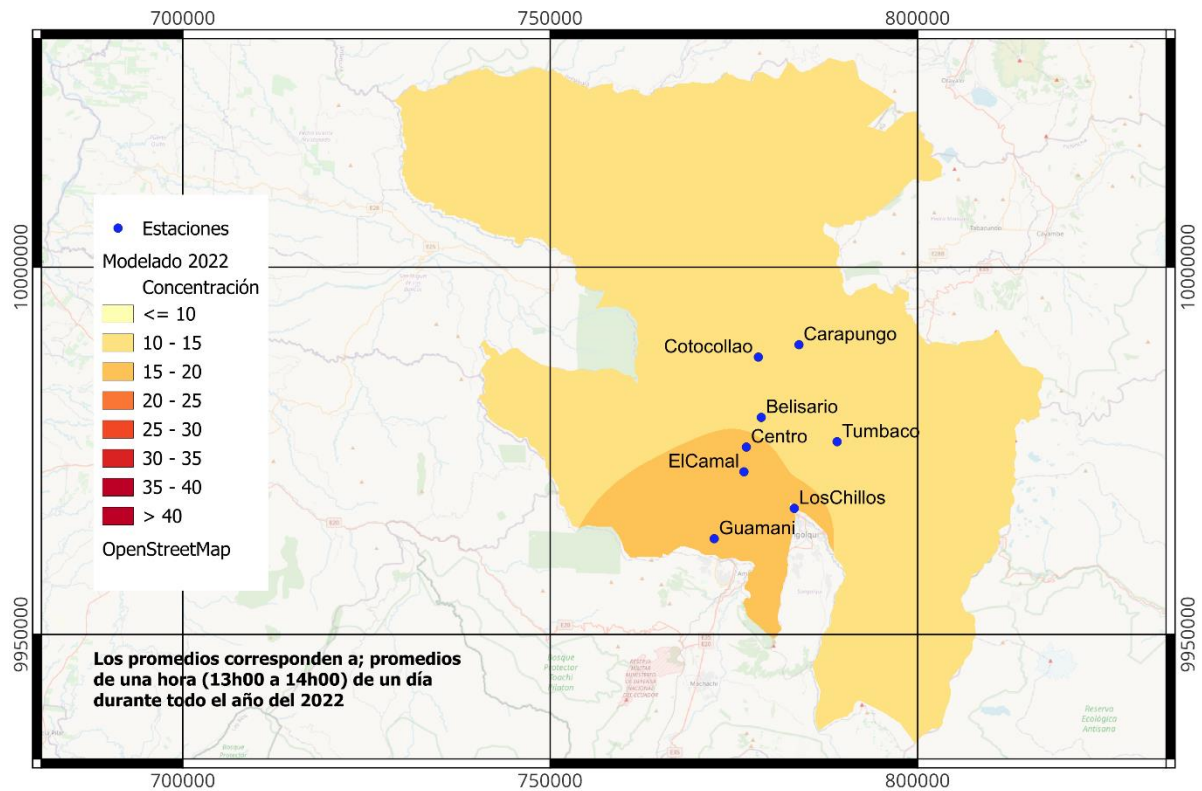


Figura 3.1.7. Isótopos de contaminación para NO₂ en el 2022. Datos estimados a partir del modelo de la ecuación 1.

Para poder apreciar de mejor manera estos resultados se realiza un calculado a partir de las variaciones entre las estimaciones y los valores de superficie. Para ello se realizó un mapa de delta concentraciones. Es decir, se restó ambas contracciones para determinar las diferencias, esta Figura 3.1.8 se presenta a continuación.

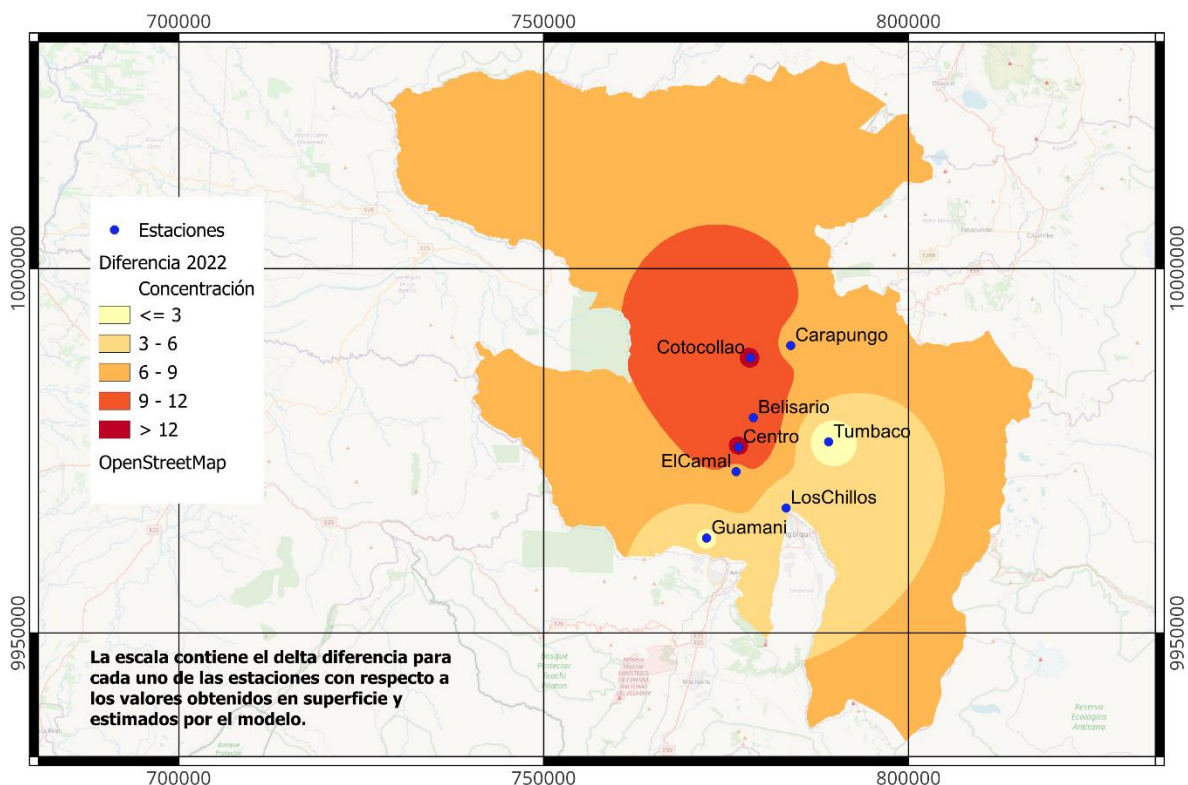


Figura 3.1.8. Diferencia entre las concentraciones estimadas y medidas.

Aquí se logra considerar que alrededor de la estación Tumbaco las variaciones con el valor medido es superficie es menor a 3, al igual que en la estación de Guamaní. Por lo contrario, las estaciones de Cotocollao, Belisario y Centro son las que presentan una mayor diferencia. Es decir, el modelo para estas estaciones no es el adecuado para estimar la concentración, por lo que sería conveniente usar otra función que permita unifica los valores de estas tres estaciones.

Por otro lado, y extrapolando toda esta información a nivel nacional, con la ayuda de la Ecuación 1 se logró se determinar valores de NO_2 para cada una de las ciudades presentadas en la Tabla 2.6.1. Un ejemplo de estos datos se presenta en la siguiente Tabla 3.1.4.

Tabla 3.1.4. Estimación de NO_2 a partir del modelo para cada una de las ciudades.

ID	Nombre	Latitud	Longitud	Dato satelital (mol/m^2)	Estimación en Superficie (ug/m^3)
1	Ambato	-1.266	-78.611	1.09E-05	7.44
2	Babahoyo	-1.813	-79.513	2.33E-05	11.26
3	Cañar	-2.554	-78.936	8.68E-06	6.77
4	Cuenca	-2.918	-78.976	1.25E-05	7.93
5	Esmeraldas	0.969	-79.634	1.70E-05	9.33
6	Francisco de Orellana	-0.468	-76.968	1.03E-05	7.26
7	Guaranda	-1.597	-78.980	1.27E-05	8.00

8	Guayaquil	-2.176	-79.851	5.54E-05	21.11
9	Ibarra	0.342	-78.125	1.55E-05	8.85

Nota: Los datos estimados en superficie son calculados con la Ecuación 1. **Elaborado por:**
Edison Maldonado

Estos datos fueron colocados en el software QGIS, para ser graficados. Primero se georreferenció correctamente los puntos y luego se aplicó la interpolación IDW con una cuadrícula de 1000 metros. Posteriormente se realizó un corte con la máscara del shapefile regiones y se obtuvo de esta manera la Figura 3.1.9.

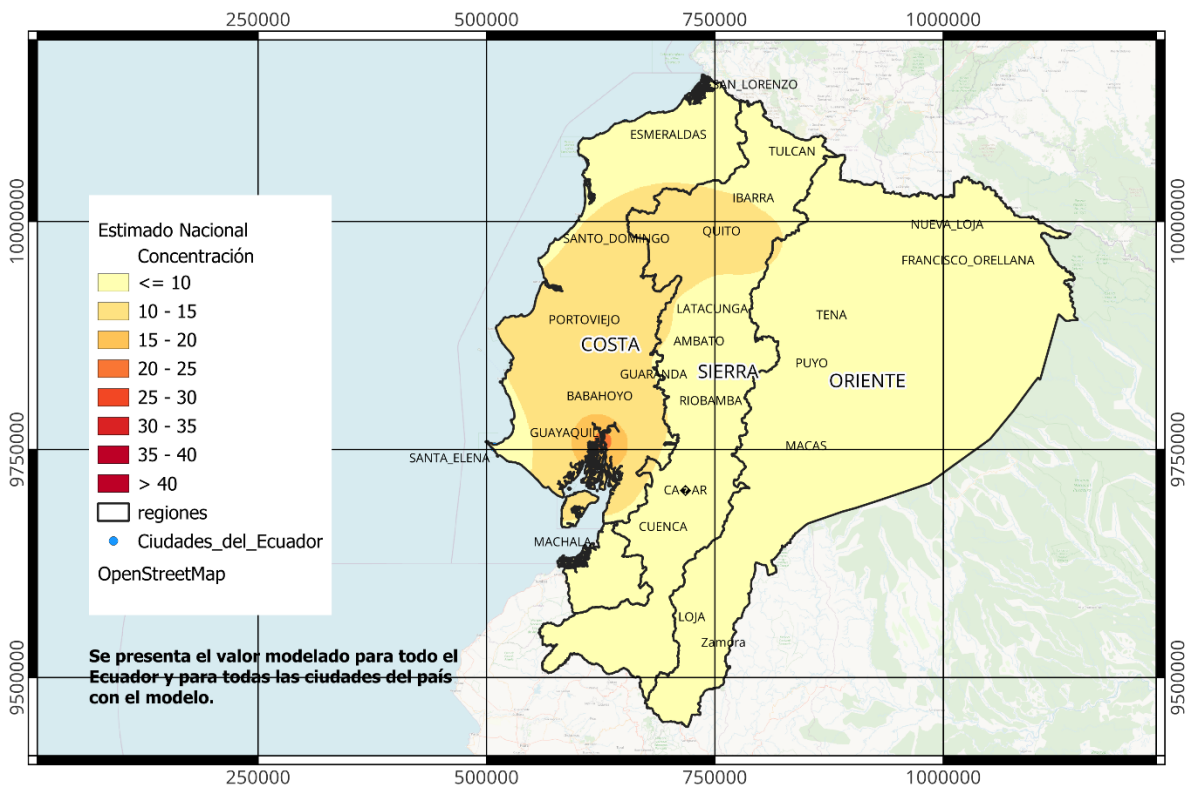


Figura 3.1.9. Concentración estimada de NO₂ a nivel nacional.

En la presente imagen se puede observar cómo la ciudad de Guayaquil presenta la mayor contaminación de NO₂ con valores entre los 15 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Seguidamente de Quito y Santo Domingo donde se observa una mancha de contaminación. Por otro lado, existe lugares como el oriente que se presentan niveles de contaminación bajas, mejores a las 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para ampliar mejor este rango se decidió presentar la Figura 3.1.10. misma que presenta el mapa de NO₂ estimado a nivel nacional, pero con una escala reducida para poder focalizar y encontrar de mejor manera estos hot spots. Aquí se puede observar ciertas tendencias de mejor manera y permite visualizar las concentraciones en mejor rango.

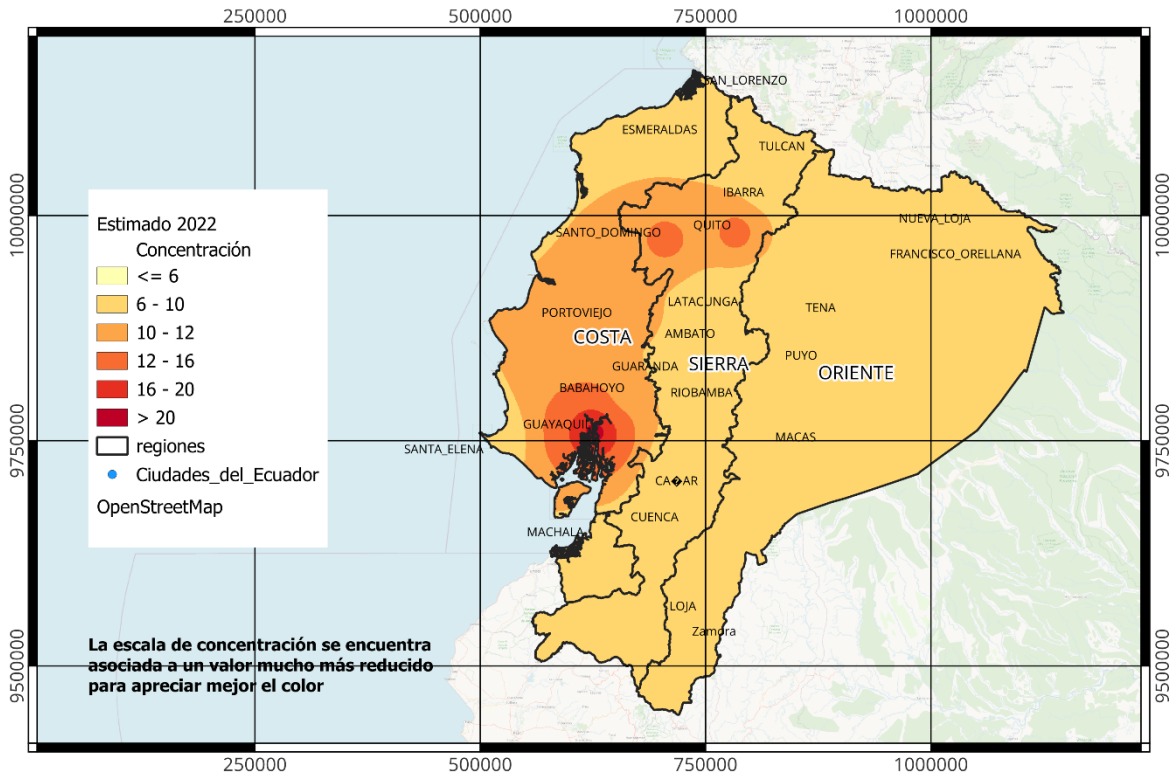


Figura 3.1.10. Concentración estimada de NO₂ a nivel nacional, escala reducida.

Esto puede ser contrastado con varias investigaciones, ya que por ejemplo (Vîrghileanu et al., 2020) menciona que en varios estudios de teledetección se subestima la concentración de dióxido de nitrógeno medida en la superficie. Esto se ve representado claramente en el mapa de la Figura 3.1.9, donde hay varios valores en Quito que no se encuentran a los niveles normales.

3.2 Conclusiones

Revisando los objetivos planteados para este trabajo de integración curricular se puede concluir que; en cuanto a identificar las fuentes disponibles para la descarga de datos satelitales de NO₂, para diversas regiones y períodos de tiempo se logró cumplir al 100%. Ya que existen varias fuentes disponibles, que son de acceso libre y que proporcionan información muy actualizada con respecto a la teledetección, además de que el acceso a la descarga es bastante sencillo.

Por otro lado, se pudo cumplir con el desarrollo del algoritmo de procesamiento de imágenes satelitales, capaz que obtener estimaciones de NO₂ para contrastar con mediciones en superficie de la REMMAQ. Este algoritmo fue desarrollado en Python y proporciona información bastante útil, no solo con respecto al valor de NO₂, sino también al promedio de NO₂ alrededor de una grilla de 3x3 y 5x5 km.

En cuanto a la validación de la información satelital. Es decir, saber si es adecuada a no a los patrones espaciales y temporales de la contaminación de NO₂, en la ciudad de Quito y considerar su extrapolación resultó bastante alentador. Después de analizar detalladamente los datos satelitales de dióxido de nitrógeno (NO₂) y contrastarlos con las mediciones de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), se pueden extraer varias conclusiones significativas. En primer lugar, se observa una correlación positiva entre los niveles de NO₂ detectados por satélite y las mediciones en superficie, lo que sugiere que la información satelital es útil para comprender los patrones espaciales y temporales de la contaminación por NO₂ en la ciudad de Quito. Esta validación refuerza la fiabilidad de los datos satelitales como una herramienta complementaria para monitorear la calidad del aire.

Además, al analizar las imágenes satelitales, se identifican áreas críticas con altas concentraciones de NO₂, lo que permite visualizar los focos de contaminación y establecer posibles fuentes emisoras en la ciudad. Esta capacidad de detección espacial proporciona información valiosa para la planificación urbana y la implementación de medidas de mitigación de la contaminación atmosférica en Quito. Asimismo, la comparación de los datos satelitales a lo largo de diferentes períodos de tiempo revela tendencias estacionales y variaciones interanuales en los niveles de NO₂, lo que destaca la importancia de monitorear de forma continua y sistemática la calidad del aire en la ciudad.

Finalmente se pudo construir un mapa de contaminación del aire a nivel de superficie para NO₂ esto fue posible ya que se obtuvo una correlación bastante buena, a pesar de que los valores de NO₂ era subestimados, como se lo planteaban ya en investigaciones anteriores. Este mapa sirvió tanto de manera local como nacional. Y se concluyó que la teledetección puede ser una herramienta valiosa para afianzar el sistema de monitoreo de actual de la REMMAQ:

3.3 Recomendaciones

Las imágenes satélites descargas por cualquiera de los medios disponibles tengan un nivel de procesamiento 2 y además en cuanto a TROPOMI se trate, utilizar aquellas que sea OFFLINE, ya que las REPROCESADAS pueden tener algún proceso realizado de manera que interfiera con los datos de superficie al realizar las correlaciones.

Además, se sugiere fortalecer la colaboración interinstitucional para mejorar la disponibilidad y accesibilidad de los datos satelitales de NO₂, facilitando su uso en investigaciones futuras y en la toma de decisiones ambientales. Asimismo, se recomienda realizar estudios complementarios que integren datos satelitales con información de otras variables atmosféricas y factores de emisión para obtener una visión más completa de la calidad del

aire en Quito y su impacto en la salud pública. Además, es fundamental implementar estrategias de sensibilización y educación ambiental para concienciar a la población sobre los riesgos asociados a la contaminación atmosférica y promover prácticas sostenibles que contribuyan a mejorar la calidad del aire en la ciudad.

Otra recomendación clave para mejorar el uso de imágenes satelitales en el monitoreo de la contaminación atmosférica es la implementación de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes. Se sugiere explorar y aplicar algoritmos de análisis de imágenes satelitales más sofisticados, como las redes neuronales, para mejorar la precisión en la estimación de concentraciones de NO₂ a nivel de superficie. Estas técnicas permitirán una mayor discriminación de los diferentes contaminantes atmosféricos y una mejor identificación de las fuentes de emisión, lo que contribuirá a una evaluación más detallada de la calidad del aire en Quito.

Se recomienda evaluar y realizar estudios con imágenes satélites enfocado en Guayaquil, ya que a pesar de que el modelo en Quito subestima la cantidad medida de NO₂, Guayaquil es la ciudad que presenta los niveles más altos. Por lo tanto, se recomienda realizar un estudio similar con imágenes satélites dentro de esa zona para poder estudiar la variabilidad y posibles fuentes. Además de Guayaquil un estudio en Santo Domingo y la región Costa podría ser de gran utilidad a futuro.

Finalmente se recomienda centrar el estudio en el instrumento TROPOMI ya que fue el que mayor correlación presentó y que a pesar de subestimar los valores de NO₂ para estaciones a las afueras de Los Chillos, nos proporciona un valioso estimado de NO₂.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baltuano, O., Rosas, F., Chan, R., Fashé, O., & Montoya, E. (2020). *Evaluación de la operación de un medidor remoto de calidad del aire basado en sensores de lectura directa*. Obtenido de Revista de Investigación de Física: https://fisica.unmsm.edu.pe/rif/previo_files/2020-2/01baltuano.pdf
- Bauwens, S., Compernelle, T., Müller, J., Gent, J., Eskes, H., Leve, P., . . . Zehner, C. (2020). *Impact of Coronavirus Outbreak on NO₂ Pollution Assessed Using TROPOMI and OMI Observations*. Obtenido de Advancing Earth and Space Science: <https://doi.org/10.1029/2020GL087978>
- Chan, K. L., Khorsandi, E., Liu, S., Baier, F., & Valks, P. (2021). *Estimation of surface NO₂ concentrations over Germany from TROPOMI satellite observations using a machine learning method*. Obtenido de Remote Sensing: <https://doi.org/10.3390/rs13050969>
- Dauni, & Firdaus. (2019). *Implementation of Haversine formula for school location*. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1402/7/077028/pdf>
- Díaz, M. (2024). *Reporte Anual de la Calidad del Aire en el DMQ 2023*. Quito: Secretaria del Ambiente.
- Díaz, V. (2014). *Informe de la Calidad del aire de Quito 2013*. Obtenido de Secretaria del Ambiente: <https://aqicn.org/images/aqi-scales/Quito-ICA-2013.pdf>
- Diner, D., Boland, S. W., Brauer, M., Bruegge, C., Burke, K., Chipman, R., . . . Lyapustin, A. (2018). *Advances in multiangle satellite remote sensing of speciated airborne particulate matter and association with adverse health effects: from MISR to MAIA*. Obtenido de SPIE Digital Library: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.042603>
- EOS. (2021). *Teledetección Satelital: Tipos, Usos Y Aplicaciones*. Obtenido de EOS web: <https://eos.com/es/blog/teledeteccion/>
- Follette-Cook, M., & Gupta, P. (2021). *Remote Sensing of NO₂, OMI Data Products, and Tools*. Obtenido de NASA Arset: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/NO2_Session_1_final.pdf
- Goldberg, D. L., Anenberg, S. C., Kerr, G. H., Mohegh, A., Lu, Z., & Streets, D. G. (2021). *TROPOMI NO₂ in the United States: A detailed look at the annual averages, weekly cycles, effects of temperature, and correlation with surface NO₂ concentrations*. Obtenido de Earth's Future: <https://doi.org/10.1029/2021EF002125>
- Garaga, R., Sahu, S. K., & Kota, S. H. (2018). *A Review of Air Quality Modeling Studies in India: Local and Regional Scale*. Obtenido de Curr Pollution Rep 4, 59–73 : <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0081-0>
- Henze, D. (2023). *Effects of urban to regional emissions on the air pollution health burden in Europe*. Obtenido de The Lancet Public Health: [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(23\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(23)00125-1)
- Holloway, T., Miller, D., Anenberg, S., Diao, M., Duncan, B., Fiore, A., & Zondlo, M. A. (2021). *Satellite Monitoring for Air*. Obtenido de Annual Reviews: <https://doi.org/10.1146/annurev-biodatasci-110920-093120>

- Huang, S., Li, H., Wang, M., Qian, Y., Steeland, K., Caudle, W., . . . Shi, L. (2021). *Long-term exposure to nitrogen dioxide and mortality: A systematic review and meta-analysis*. Obtenido de El Sevier: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145968>
- KNMI. (2021). *Sentinel-5P TROPOMI Tropospheric NO2 1-Orbit L2 5.5km x 3.5km, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)*. Obtenido de https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/S5P_L2_NO2_HiR_2/summary?keywords=tr opomi
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNIM). (2021). *Sentinel-5P TROPOMI Tropospheric NO2 1-Orbit L2 5.5km x 3.5km, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)*. Obtenido de [10.5270/S5P-9bnp8q8](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/S5P_L2_NO2_HiR_2/summary?keywords=tr opomi)
- Krotkov, N., Lamsal, L., Marchenko, S., & Swartz, W. (2019). *OMNO2 README Document*. NASA Goddard Space Flight Center. Obtenido de GES DIC.
- Lamsal, L. N., Krotkov, N. A., Marchenko, S. V., Joiner, J., Oman, L., Vasikov, A., . . . Haffner, D. (2021). *OMI/Aura NO2 Tropospheric, Stratospheric & Total Columns MINDS 1-Orbit L2 Swath 13 km x 24 km, NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)*. Obtenido de https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMI_MINDS_NO2_1.1/summary
- MAATE. (2015). *Acuerdo N° 61 - Reforma el Libro VI de la Calidad Ambiental, del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Obtenido de <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC155133/>
- Maldonado, E., & Pablo, A. (2024). *Calidad de aire y sostenibilidad: revisión de la contaminación atmosférica por PM2.5 en ciudades de América Latina y Europa*. Obtenido de Working Paper Series Puentes Interdisciplinarios, serie 2, 06. Bonn: https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/bitstream/handle/20.500.11811/11313/Puentes_Interdisciplinarios_WP_2024_06_2.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). *Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review*. Obtenido de Frontiers: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- MDMQ. (2021). *PMDOT: Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. Obtenido de <https://gobiernoabierto.quito.gob.ec/Archivos/pmdot/PMDOT%202021-2033.pdf>
- Moyroud, N., & Portet, F. (2018). *Introduction to QGIS*. Obtenido de Wiley online: <https://doi.org/10.1002/9781119457091.ch1>
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2021). *PMDOT: Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. Obtenido de <https://gobiernoabierto.quito.gob.ec/Archivos/pmdot/PMDOT%202021-2033.pdf>
- OMS. (2020). *Contaminación atmosférica*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- OMS. (2021). Obtenido de Directrices Mundiales de OMS sobre la Calidad del Aire. Materia particulada (MP2,5 y MP10), ozono, Resumen Ejecutivo:

<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- OMS. (2022). *Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
- OMS. (2023). *OMS, Base de datos de la OMS, sobre la calidad del aire ambiente, actualización de 2022: informe de situación. Ginebra* .: Obtenido de who.int: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240047693>
- OPS. (2018). *Contaminación del aire ambiental exterior*. Obtenido de <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire-salud/contaminacion-aire-ambiental-externo-vivienda-preguntas-frecuentes>
- Parker, A. (1983). *Contaminación del aire por la industria*. Reverté.
- Prados, A., Follette-Cook, M., & Gupta, P. (2020). *Monitoreando el Dioxido de Nitrogeno (NO2) desde el Espacio*. Obtenido de NASA ARSET: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf
- Prefectura de Pichincha. (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2019 - 2023: Reactivación Socioeconómica Productiva COVID-19*. Obtenido de GAD Pichincha: https://www.pichincha.gob.ec/images/2023/pdf/rendicion_cuentas_2022/PDOT%2019-2023_2.pdf
- RAE. (2023). *Calidad*. Obtenido de Real Academia Española: <https://dle.rae.es/calidad>
- Rawat, N., & Kumar, P. (2023). *Interventions for improving indoor and outdoor air quality in and around schools*. . Obtenido de Science of the Total Environment.: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159813>
- Represa, N. (2020). *Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos*. Obtenido de Universidad Nacional de la Plata: <http://hdl.handle.net/10251/144645>
- Represa, N., Ojeda, S., Abril, G., & García, M. (2019). *Satellite Product Evaluation of the OMI/AURA Sensor for the Nitrogen Dioxide Analysis in the Province of Buenos Aires*. Obtenido de IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON): <https://ieeexplore.ieee.org/document/8645993>
- Rodriguez, A., & Cuvi, N. (2019). *Contaminación del Aire y Justicia Ambiental en Quito, Ecuador*. Obtenido de Research Gate: 10.21664/2238-8869.2019v8i3.p13-46
- Sánchez, B. (2018). *La teledetección en investigaciones ecológicas como apoyo a la conservación de la biodiversidad: una revisión*. Obtenido de SCIELO: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-22532018000300243&script=sci_arttext
- Scaroponi, P., Coro, G., & Pagano, P. (2018). *A collection of Aquamaps native layers in NetCDF format*. Obtenido de El Sevier: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.01.026>

- Schmunk, R. (2023). *Panoply netCDF, HDF and GRIB Data Viewer*. Obtenido de Goddard Institute for Space Studies. NASA: <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>
- Sultonov, S. (2023). *Importance of python programming language in machine learning*. Obtenido de International Bulletin of Engineering and Technology: <https://internationalbulletins.com/intjour/index.php/ibet/article/view/1020>
- UNICEF. (2019). *El aire que respiramos. Los efectos de la contaminación del aire y del cambio climático en la salud de la niñez en el Ecuador*. Obtenido de UNICEF: https://www.unicef.org/ecuador/media/6611/file/Ecuador_el_aire_que_respiramos.pdf%20.pdf
- Van Geffen, J., Boersma, K. F., Eskes, H., Sneep, M., Ter Linden, M., Zara, M., & Veefkind, J. P. (2020). *S5P TROPOMI NO2 slant column retrieval: method, stability, uncertainties and comparisons with OMI*. Obtenido de Atmospheric Measurement Techniques: <https://doi.org/10.5194/amt-13-1315-2020>
- Vîrghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., & Dobre, R. (2020). *Nitrogen Dioxide (NO2) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak*. Obtenido de Remote Sensing: <https://doi.org/10.3390/rs12213575>
- WAQI. (2024). *World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index*. Obtenido de Waqi.Info.: <https://waqi.info/#/c/-1.711/-77.934/7z>
- Zhang, T., Su, J., Xu, Z., Luo, Y., & Li, J. (2021). *Sentinel-2 Satellite Imagery for Urban Land Cover Classification by Optimized Random Forest Classifier*. Obtenido de Applied Sciences: <https://doi.org/10.3390/app11020543>

5 ANEXOS

ANEXO I. Correlaciones de TROPOMI

ANEXO II. Correlaciones de OMI.

ANEXO III. Ejemplo para ingresar al portal de descarga de datos.

ANEXO IV. Código para la extracción de datos de OMI

ANEXO V. Código para la extracción de datos de TROPOMI

ANEXO VI. Ejemplo de datos crudos para OMI

ANEXO VIII. Código para concatenar los datos entre TROPOMI y REMMAQ

ANEXO VIII. Tabla con las ciudades y su respectiva estimación de NO₂

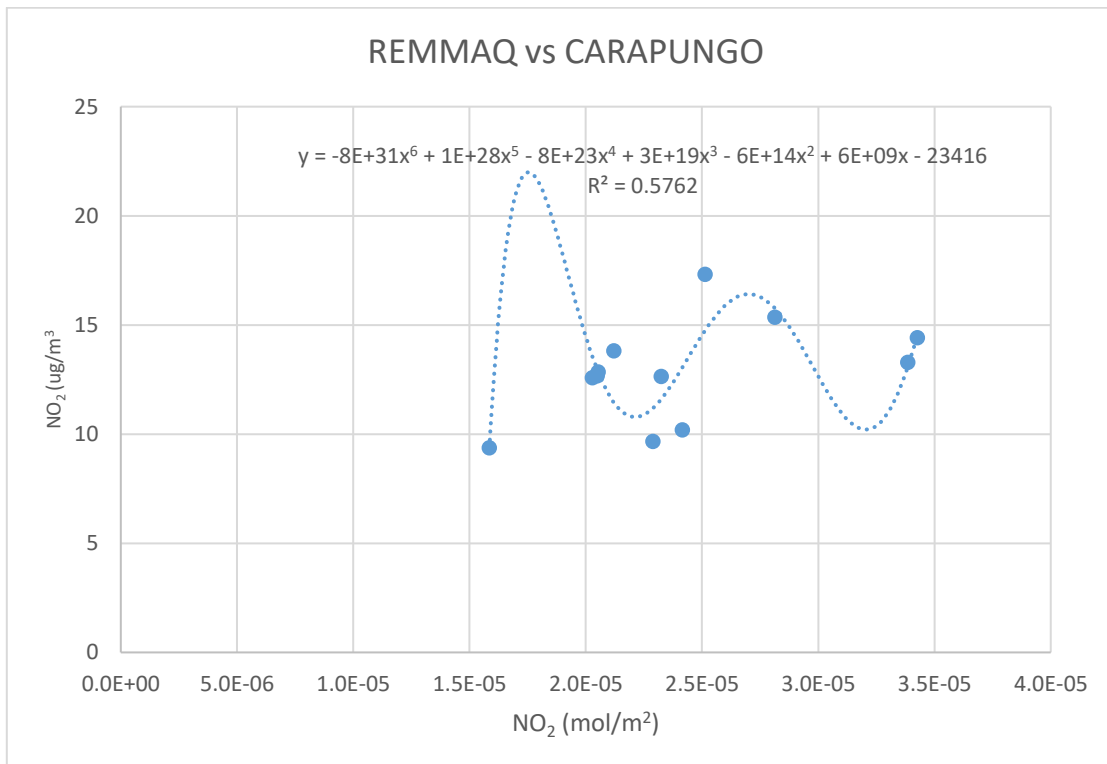
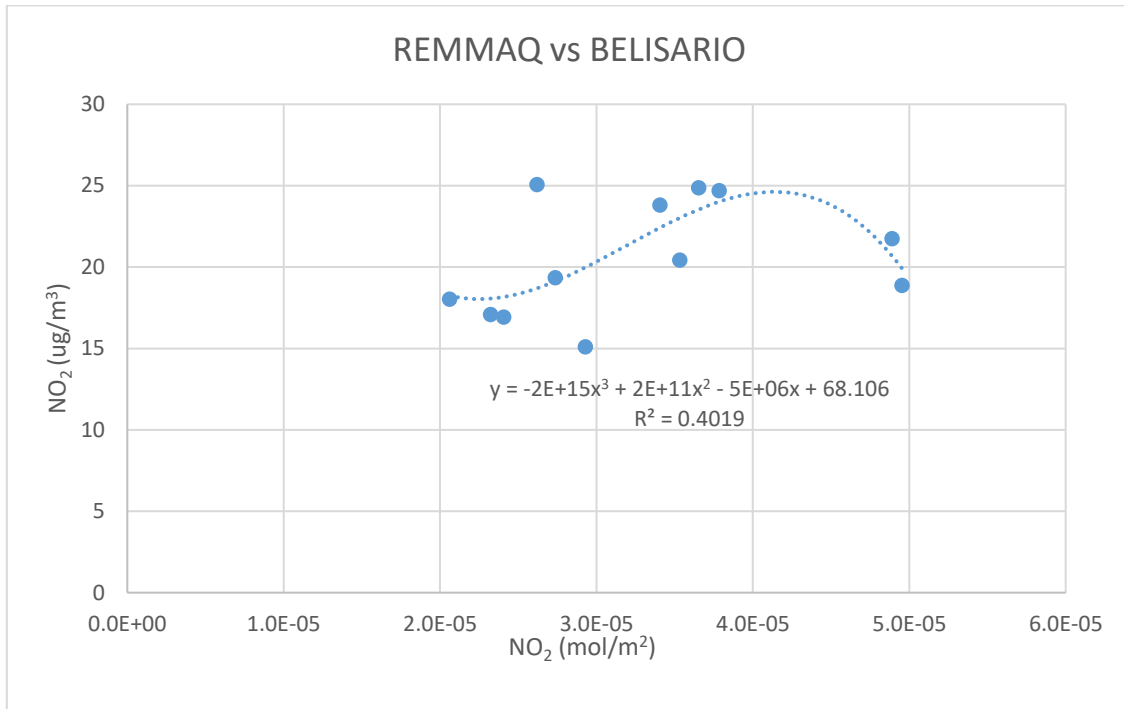
ANEXO IX. Tabla de estimación anuales para las estaciones en el DMQ

ANEXO X. Tabla con las ciudades y su respectiva estimación de NO₂

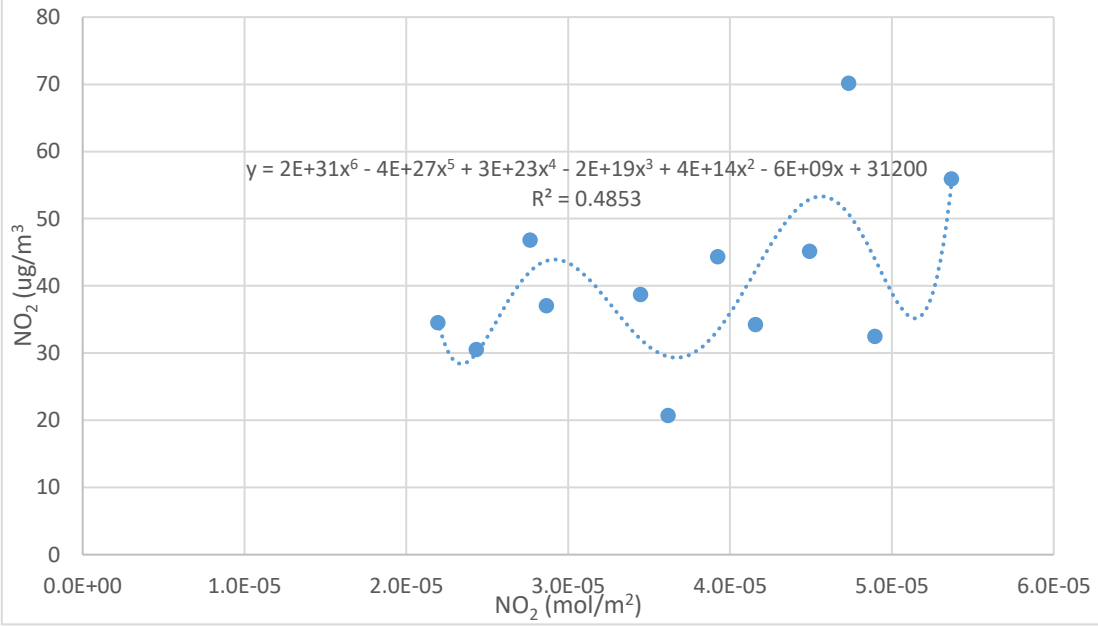
ANEXO XI. Mapa con la ubicación de todos los puntos extraídos para las estaciones de OMI y TROPOMI.

ANEXO I

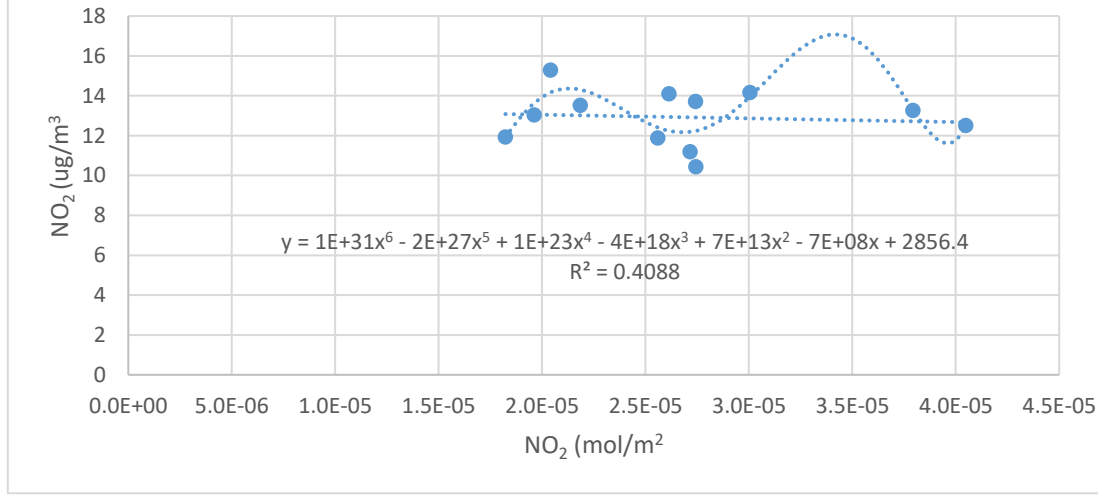
ANEXO 1. Correlaciones de TROPOMI

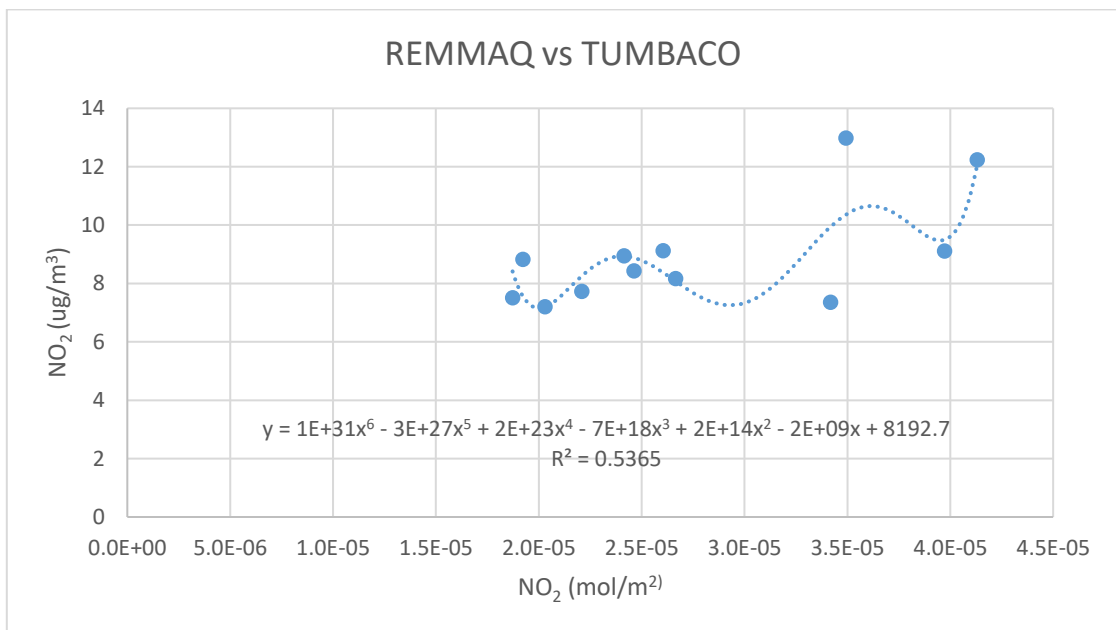
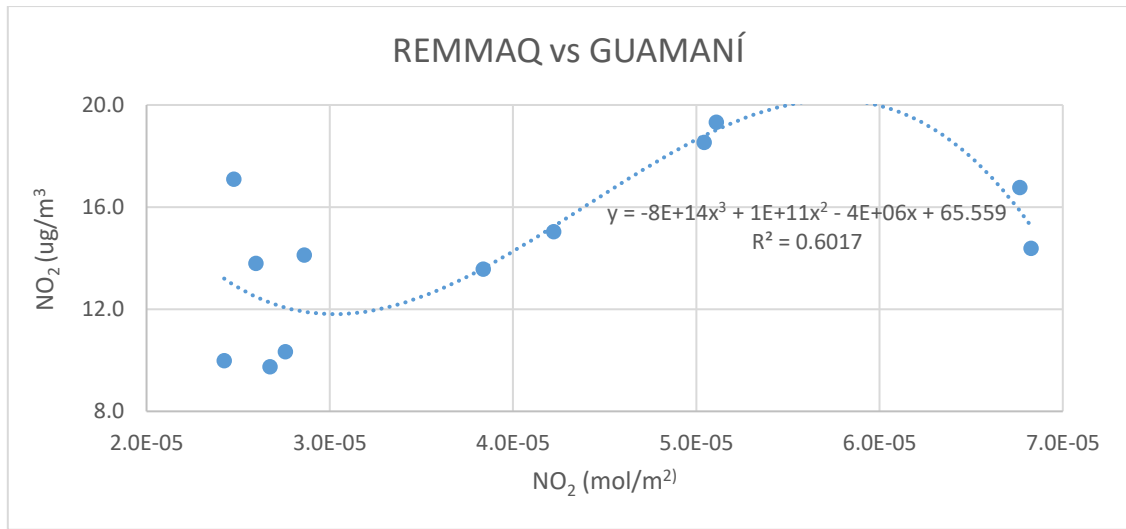
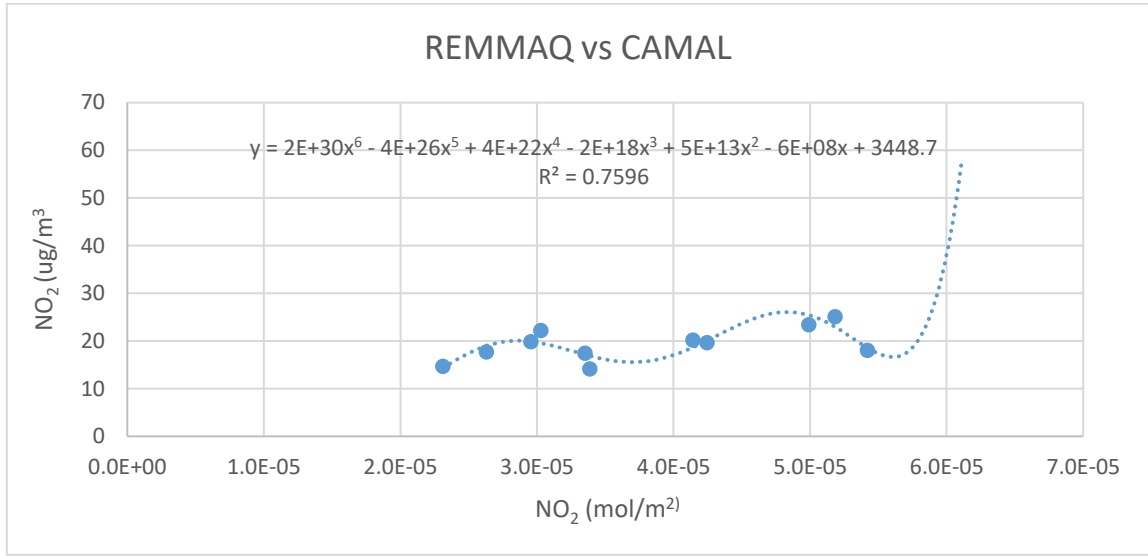


REMMAQ vs CENTRO

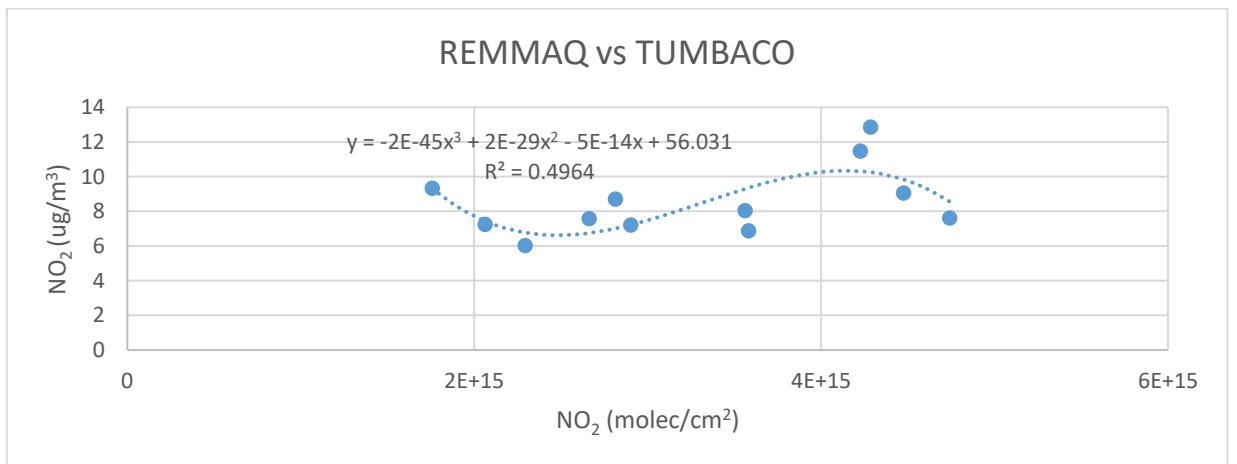
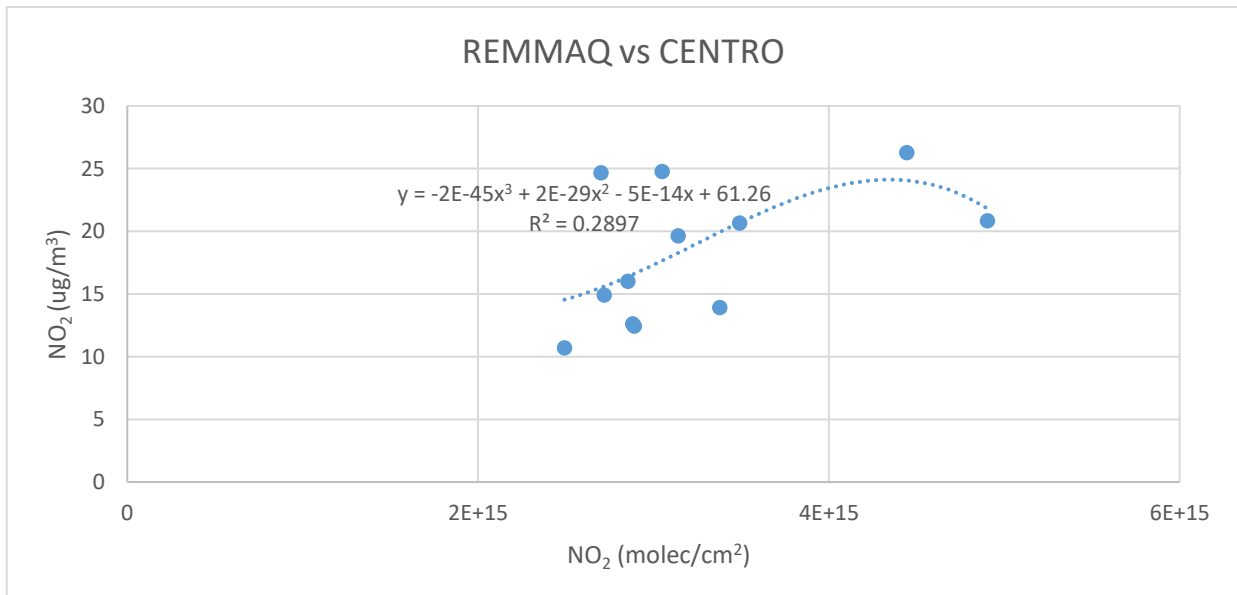
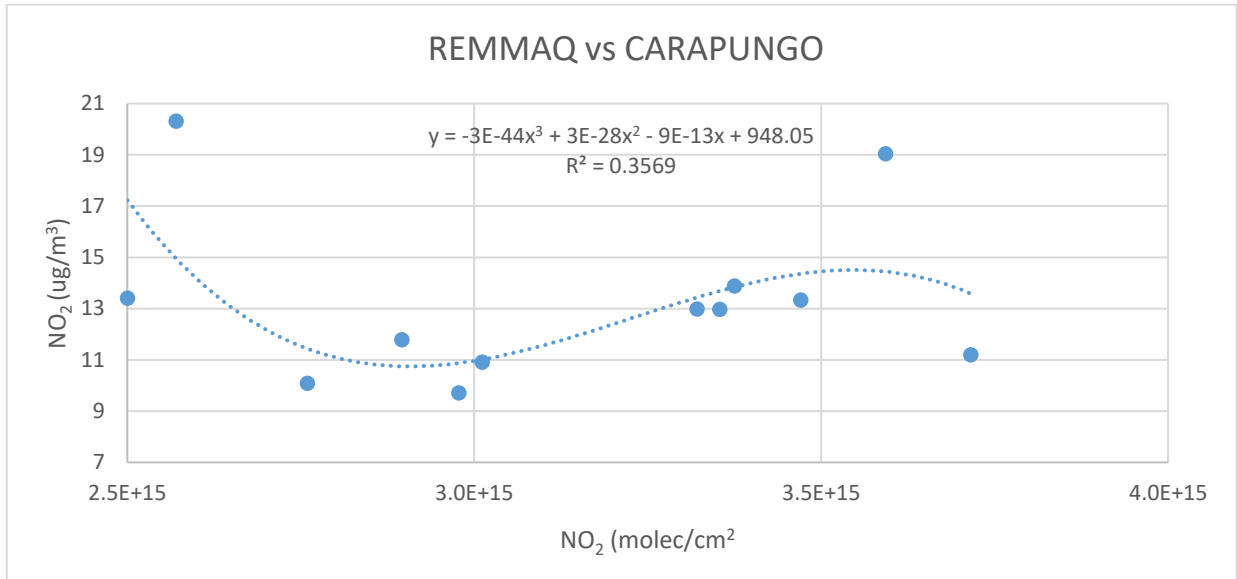


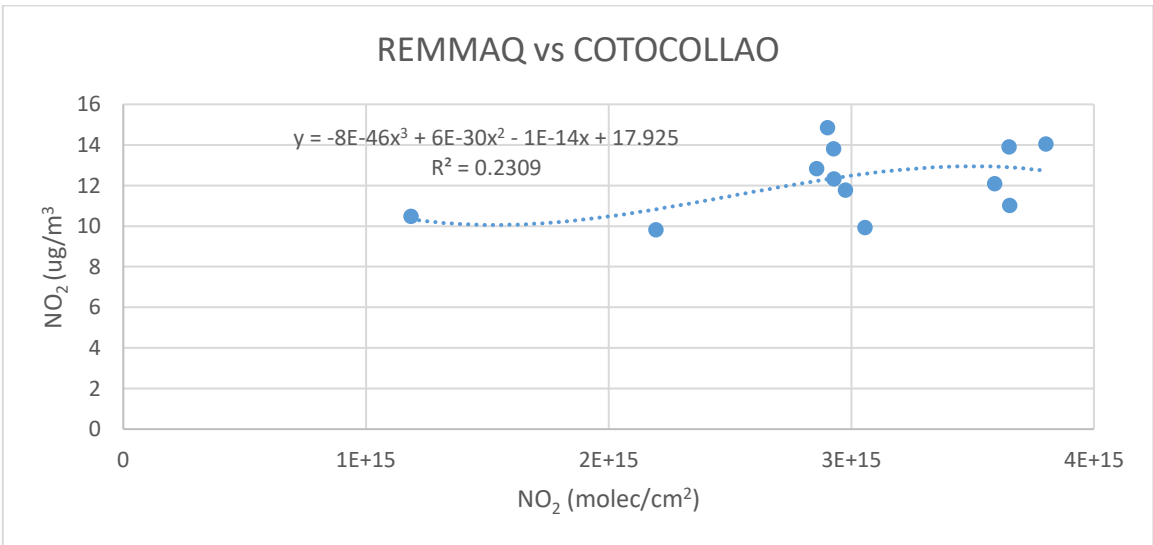
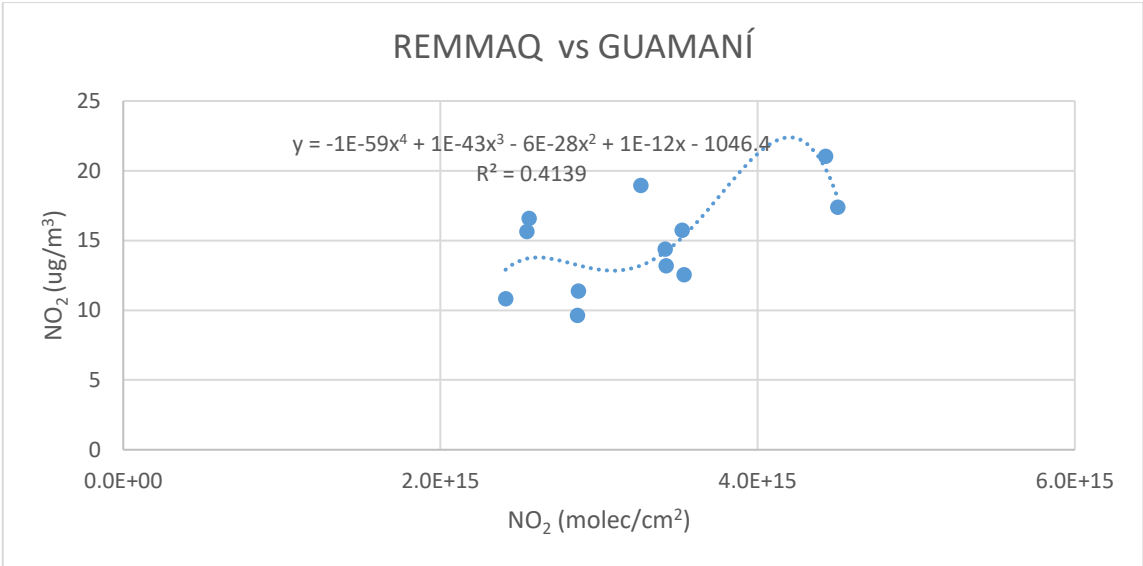
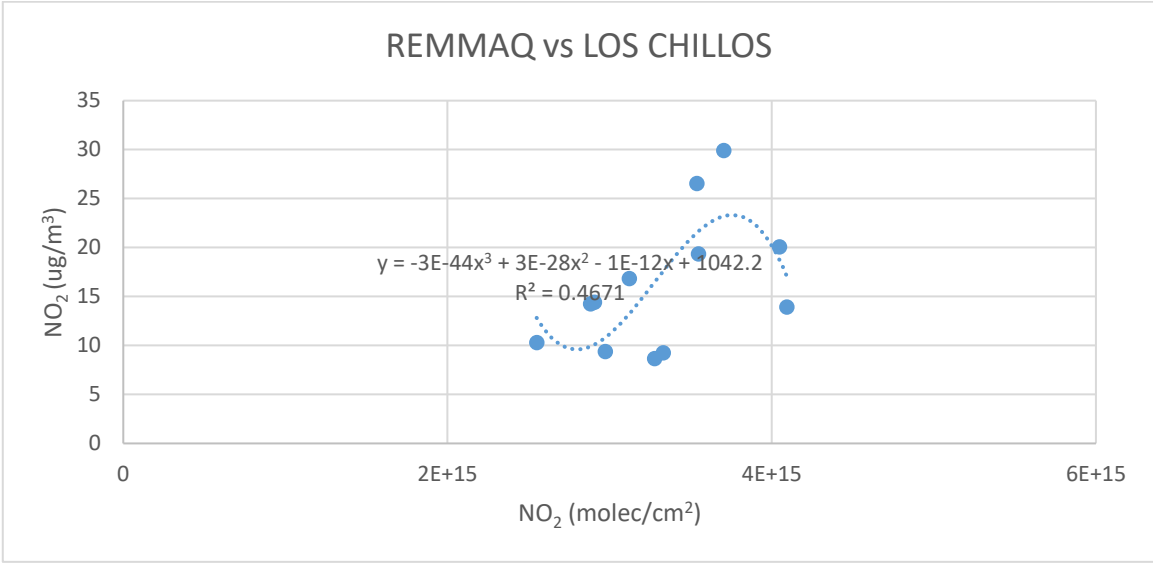
REMMAQ vs COTOCOLLAO



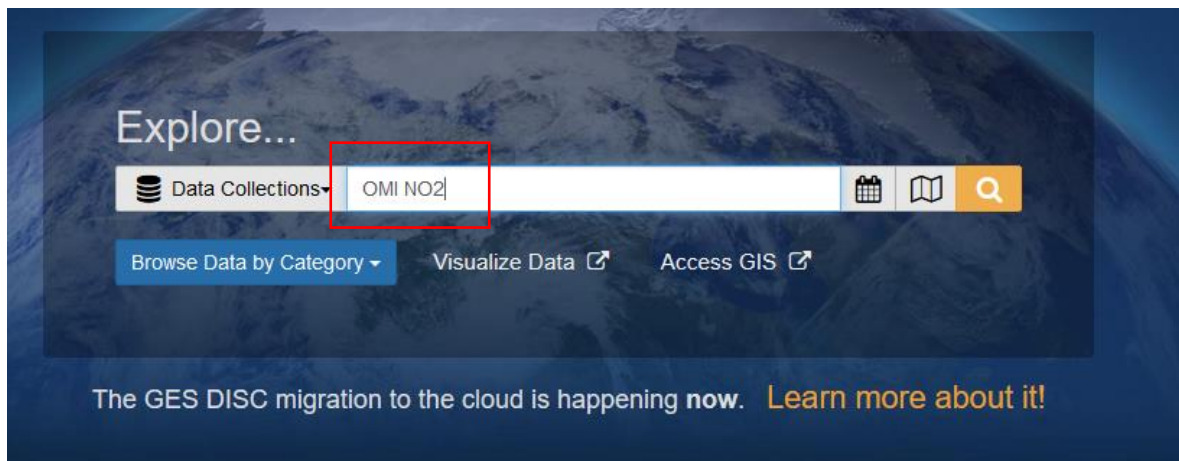
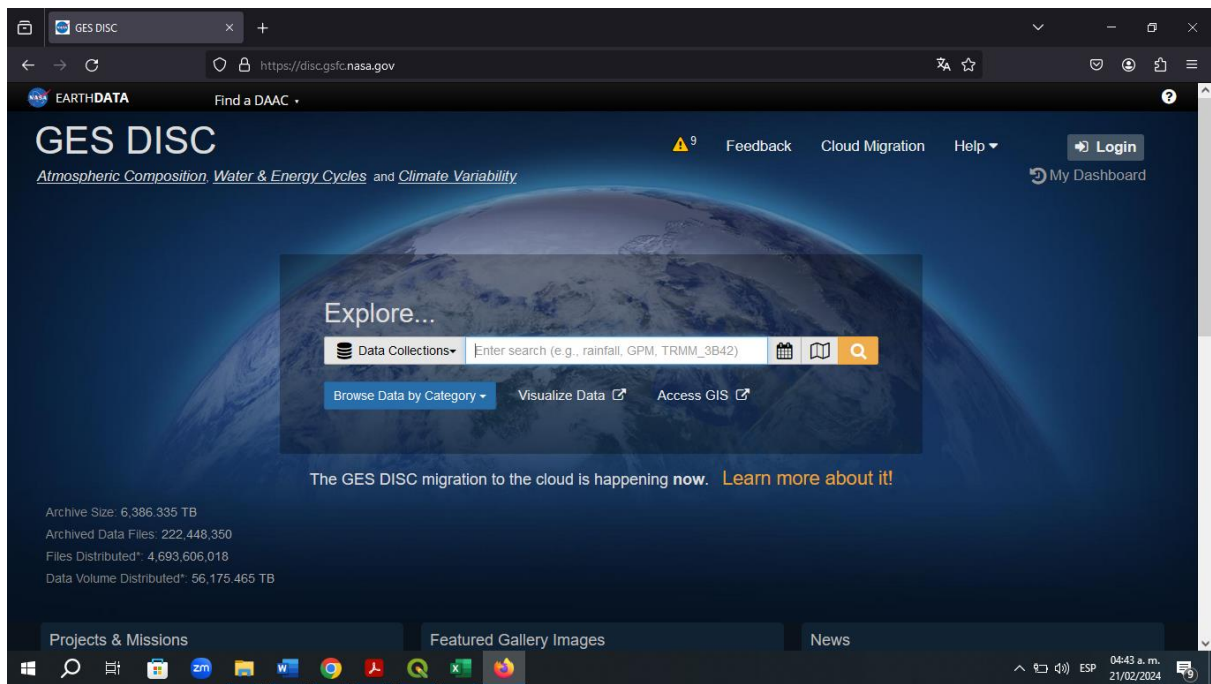


ANEXO II. Correlación de OMI





ANEXO III. Ejemplo para ingresar al portal de descarga de Datos.



GES DISC Search: Showing 1 - 2 x

https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=OMI_NO2&page=1

Refine By

Features

- Cloud Enabled (77)

Subject

- Aerosols (22)
- Air Quality (2)
- Altitude (3)
- Atmospheric Chemistry (61)
- Atmospheric Pressure (6)
- More...

Measurement

- Acetylene (6)
- Aerosol Extinction (16)
- Aerosol Optical Depth/Thickness (12)
- Atmospheric Carbon Dioxide (6)
- Atmospheric Carbon Monoxide (8)
- More...

Source

- ADEOS-II TOMS (1)
- ATLAS-1 ATMOS (6)
- ATLAS-2 ATMOS (6)
- ATLAS-3 ATMOS (6)
- Aqua AIRS (3)

Want to focus your search?

- Add more keywords to your search (e.g., surface precipitation).
- Use the filters in 'Refine By'.

Dataset	Source	Version	Time Res.	Spatial Res.	Level	Begin Date	End Date
OMI/Aura NO2 Tropospheric, Stratospheric & Total Columns MINDS 1-Orbit L2 Swath 13 km x 24 km (OMI_MINDS_NO2 1.1)	Aura OMI	1.1	98.8 minutes	13 km x 24 km	2	2004-10-01	2024-01-31
TROPOMI/S5P NO2 Tropospheric, Stratospheric and Total Columns MINDS 1-Orbit L2 Swath 5.5 km x 3.5 km (TROPOMI_MINDS_NO2)	Sentinel-5P TROPOMI	1.1	101.5 minutes	5.5 km x 3.5 km	2	2018-05-01	2022-01-01
GOME/ERS-2 NO2 Tropospheric, Stratospheric and Total Columns MINDS 1-Orbit L2 Swath 40 km x 320 km (GOME_MINDS_NO2 1.1)	ERS-2 GOME	1.1	100 minutes	40 km x 320 km	2	1995-06-30	2003-06-22

https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TROPOMI_MINDS_NO2_1.1/summary?keywords=OMI_NO2

GES DISC Dataset: TROPOMI/S5P

https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TROPOMI_MINDS_NO2_1.1/summary?keywords=OMI_NO2

GES DISC Find a DAAC

Atmospheric Composition, Water & Energy Cycles and Climate Variability

Back to search results

Making Earth System Data Records for Use in Research Environments

TROPOMI/S5P NO2 Tropospheric, Stratospheric and Total Columns MINDS 1-Orbit L2 Swath 5.5 km x 3.5 km (TROPOMI_MINDS_NO2)

Cloud Enabled

[View Full-size Image](#)

As part of the NASA's Making Earth System Data Records for Use in Research Environments (MEaSUREs) program, this project entitled "Multi-Decadal Nitrogen Dioxide and Derived Products from Satellites (MINDS)" will develop consistent long-term global trend-quality data records spanning the last two decades, over which remarkable changes in nitrogen oxides (NOx) emissions have occurred. The objective of the project is to adapt Ozone Monitoring Instrument (OMI) operational algorithms to other satellite instruments and create consistent multi-satellite L2 and L3 nitrogen dioxide (NO2) columns and value-added L4 surface NO2 concentrations and NOx emissions data products, systematically accounting for instrumental differences. The instruments include Global Ozone Monitoring Experiment (GOME, 1996-2011), Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY, 2002-2012), OMI (2004-present), GOME-2 (2007-present), and TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI, 2018-p...more

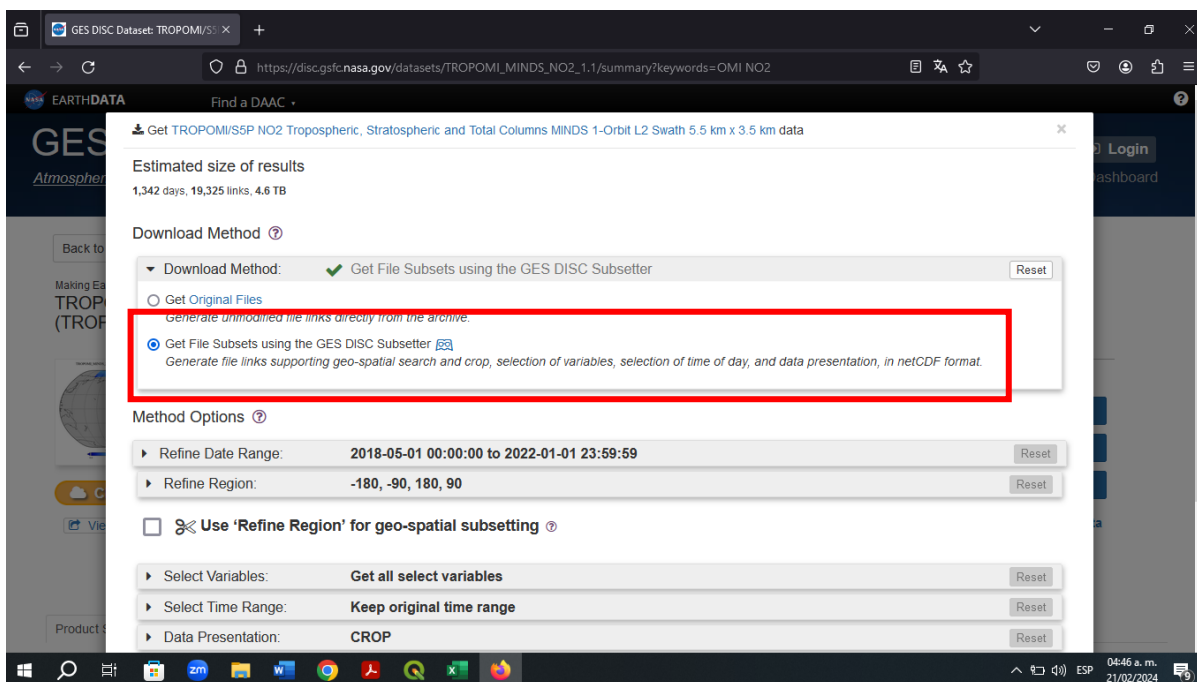
Data Access

- Online Archive
- Earthdata Search
- OPENDAP
- Subset / Get Data**

Subset and download the data for this collection

Product Summary | Data Citation | Documentation | References | Data Calendar

04:45 a.m. 21/02/2024



ANEXO IV. Ejemplo del File_Test.txt para OMI y TROPOMI.

```

filelistO: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0101t1727-o92901_v003-2022m0331t001313.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0102t1811-o92916_v003-2022m0331t001339.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0103t1715-o92930_v003-2022m0331t001346.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0103t1854-o92931_v003-2022m0331t001347.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0104t1758-o92945_v003-2022m0331t001414.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0105t1703-o92959_v003-2022m0331t001435.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0105t1842-o92960_v003-2022m0331t001518.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0106t1746-o92974_v003-2022m0331t001521.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0107t1829-o92989_v003-2022m0331t001445.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0108t1734-o93003_v003-2022m0331t001449.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0109t1817-o93018_v003-2022m0331t001454.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0110t1722-o93032_v003-2022m0331t001559.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0110t1900-o93033_v003-2022m0331t001504.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0111t1805-o93047_v003-2022m0331t001911.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0112t1709-o93061_v003-2022m0331t001932.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0112t1848-o93062_v003-2022m0331t001936.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0113t1753-o93076_v003-2022m0331t001949.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0114t1657-o93090_v003-2022m0331t001954.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0114t1836-o93091_v003-2022m0331t002009.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0115t1740-o93105_v003-2022m0331t002038.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0116t1824-o93120_v003-2022m0331t002043.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0117t1728-o93134_v003-2022m0331t002047.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0117t1907-o93135_v003-2022m0331t002047.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0118t1812-o93149_v003-2022m0331t002058.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0119t1716-o93163_v003-2022m0331t002109.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0119t1855-o93164_v003-2022m0331t002114.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0120t1759-o93178_v003-2022m0331t002133.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0121t1704-o93192_v003-2022m0331t002534.SUB.nc4
OMI-Aura_L2-OMNO2_2022m0121t1843-o93193_v003-2022m0331t002506.SUB.nc4

```

ANEXO V. Código para la extracción de datos de OMI

....

Created on Fri Feb 02 18:26:32 2024

Autor: Edison Maldonado

Objetivo: Lectura de imágenes satelitales OMI

Modificado de: NASA ARSET

Author: Justin Roberts-Pierel, 2015

Purpose: To view info about a variety of SDS from an OMI he5 file
both generally and at a specific lat/lon

"""

```
#Importar las librerias y módulos necesarios
import h5py

import numpy as np
import sys

from numpy import unravel_index
import pandas as pd

#Definir las variables de interés SDS=Scientific Data Set
SDS_NAME='nitrogendioxide_tropospheric_column'
grp='PRODUCT'

final_dict = {"File": [], "Latitud": [], "Longitud": [], "NO2": [],
              "Promedio 3x3": [], "Promedio 5x5": []}

#Variables para saber cuales son los archivos que generan errores
num_file = 1

num_error_files = 0
error_files_number = []
error_files_names = []

#Encuentra el path en donde están todos los archivos.
try:
    fileList=open('filelist0.txt','r')
except:
    print('Did not find a text file containing file names (perhaps name does
not match)')
    sys.exit()

#Ingresa latitud y longitud de interés

user_lat=float(input('\nPlease enter the latitude you would like to analyze
(Deg. N): '))

user_lon=float(input('Please enter the longitude you would like to analyze
(Deg. E): '))

print("INICANDO...")
```

```

#Esta función genera un loop de análisis para cada uno de los archivos en el
file .txt.

for FILE_NAME in fileList:
    FILE_NAME=FILE_NAME.strip()

    file = h5py.File(FILE_NAME, 'r')

    #Uso de un try para ingresar al HDFEOS y extraer toda la información de
    interés

    try:

        dataFields=file['HDFEOS']['SWATHS']['ColumnAmountNO2']['Data Fields']
        geolocation=file['HDFEOS']['SWATHS']['ColumnAmountNO2']['Geolocation
Fields']

    except:

        print(num_file, "Unable to open object (object 'HDFEOS' doesn't
exist)")

        num_error_files += 1
        error_files_number.append(num_file)
        error_files_names.append(FILE_NAME)
        continue

#Establezco el nombre de la variable de interés
SDS_NAME='ColumnAmountNO2'
data=dataFields[SDS_NAME]
map_label=data.attrs['units'].decode()

    # Obtiene información acerca de la latitud y longitudu (Valores máx y min)
lat = geolocation['Latitude'][:]

min_lat=np.min(lat)
max_lat=np.max(lat)

lon = geolocation['Longitude'][:]
min_lon=np.min(lon)
max_lon=np.max(lon)

    #Obtengo el SDS, valor y aquellos valores faltantes
sds=dataFields[SDS_NAME]
scale=sds.attrs['ScaleFactor']
fv=sds.attrs['_FillValue']
mv=sds.attrs['MissingValue']
offset=sds.attrs['Offset']

    #Obtengo información del SDS definido previamente
data=dataFields[SDS_NAME]

dataArray = data[:].astype(float)
dataArray[dataArray==float(fv)]=np.nan

```

```

dataArray[dataArray==float(mv)]=np.nan
dataArray = (scale * (dataArray - offset))

    #Calculo para encontrar el punto más cercano a la lat y lon ingresadas.
    #(haversine formula ó Fórmula del semiverseno)

    R=6371000#radius of the earth in meters
    lat1=np.radians(user_lat)
    lat2=np.radians(lat)
    delta_lat=np.radians(lat-user_lat)
    delta_lon=np.radians(lon-user_lon)

a=(np.sin(delta_lat/2))*(np.sin(delta_lat/2))+(np.cos(lat1))*(np.cos(lat2))*(np
.sin(delta_lon/2))*(np.sin(delta_lon/2))
    c=2*np.arctan2(np.sqrt(a),np.sqrt(1-a))
    d=R*c

    #obtiene el valor de x,y al punto ingresado más cercano de la latitud y
    longitud.

    x,y=np.unravel_index(d.argmin(),d.shape)

    #Creo un data Array con los valores de latitdd, longitud y N02 a (X,Y) más
    cercanos de la

    #Lat y Long ingresada inicialmente
    if dataArray[x,y] != fv:

        result_data = {"Latitud": [lat[x,y]], "Longitud": [lon[x,y]], "N02":
[dataArray[x,y]]}

    #Calculado la el promedio, media y desvest en un grilla 3x3 alrededor del
    punto.

    if x < 1:
        x+=1

    if x > dataArray.shape[0]-2:
        x-=2

    if y < 1:
        y+=1

    if y > dataArray.shape[1]-2:
        y-=2

    three_by_three=dataArray[x-1:x+2,y-1:y+2]
    three_by_three=three_by_three.astype(float)
    three_by_three[three_by_three==float(fv)]=np.nan
    nnan=np.count_nonzero(~np.isnan(three_by_three))
    three_by_three_average = None

    if nnan != 0:

```

```

three_by_three_average= np.nanmean(three_by_three)
three_by_three_std=np.nanstd(three_by_three)
three_by_three_median=np.nanmedian(three_by_three)

#Calculado la el promedio, media y desvest en un grilla 5x5 alrededor del
punto.
if x < 2:
    x+=1
if x > dataArray.shape[0]-3:
    x-=1
if y < 2:
    y+=1
if y > dataArray.shape[1]-3:
    y-=1

five_by_five=dataArray[x-2:x+3,y-2:y+3]
five_by_five=five_by_five.astype(float)
five_by_five[five_by_five==float(fv)]=np.nan
nnan=np.count_nonzero(~np.isnan(five_by_five))

five_by_five_average = None

if nnan != 0:
    five_by_five_average = np.nanmean(five_by_five)
    five_by_five_std=np.nanstd(five_by_five)
    five_by_five_median=np.nanmedian(five_by_five)

#Imprimo los valores de las grillas 3x3 y 5x5.
result_grided = {"Promedio 3x3": [three_by_three_average], "Promedio 5x5":
[five_by_five_average]}

#Guardo las variables de acuerdo al nombre de cada uno de los archivos
analizados

result_dict={"File":[FILE_NAME]}
result_dict.update(result_data)
result_dict.update(result_grided)

for key in final_dict.keys():
    final_dict[key].append(result_dict[key])

#Imprimo para un mensaje de "procesado" para cada uno de los archivos
print(num_file, ". Archivo procesado")

num_file += 1

#Creo un data Frame para guardos los resultados
#final_dict = {"Filename": {OMI_L2, OMI_L3, ...}, "Latitud": {5.5, 5.6,
..},...}

```

```

result_df = pd.DataFrame(final_dict)
result_df.to_csv('results.csv')

print("TODOS LOS ARCHIVOS HAN SIDO PROCESADOS")

#Guardo los archivos con errores
error_files = {"Numero archivo": error_files_number, "Nombre archivo":
error_files_names}

error_df = pd.DataFrame(error_files)
error_df.to_csv('errorFiles.csv')

print("Número de archivos con errores:", num_error_files)

```

ANEXO VI. Código para la extracción de datos de TROPOMI

```

"""

Created on Fri Feb 02 18:26:32 2024
Autor: Edison Maldonado

Objetivo: Lectura de imágenes satelitales OMI
Modificado de: NASA ARSET

    Author: Justin Roberts-Pierel, 2015

    Purpose: To view info about a variety of SDS from an OMI he5 file
    both generally and at a specific lat/lon

"""

#Importar las librerías y módulos necesarios
import numpy as np

import sys

from numpy import unravel_index
from netCDF4 import Dataset

import pandas as pd

#Definir las variables de interés SDS=Scientific Data Set
SDS_NAME='nitrogen dioxide_tropospheric_column'
grp='PRODUCT'

final_dict = {"File": [], "Latitud": [], "Longitud": [], "NO2": [],
              "Promedio 3x3": [], "Promedio 5x5": []}

num_file = 1

#Encuentra el path en donde están todos los archivos.
try:
    fileList1=open('filelistT.txt','r')
except:

```



```

    print('Did not find a text file containing file names (perhaps name does
not match)')

    sys.exit()

#Ingresa latitud y longitud de interés

user_lat=float(input('\nPlease enter the latitude you would like to analyze
(Deg. N): '))

user_lon=float(input('Please enter the longitude you would like to analyze
(Deg. E): '))

print("INICANDO...")

#Esta función genera un loop de análisis para cada uno de los archivos en el
file .txt.

for FILE_NAME in fileList1:
    FILE_NAME=FILE_NAME.strip()

    ds = Dataset(FILE_NAME, 'r')

    #Código para ingresar a los grupos de cada uno de los archivos para llamar
a las variables

    lat= ds.groups[grp].variables['latitude'][0][:][:]

    lon= ds.groups[grp].variables['longitude'][0][:][:]
    data= ds.groups[grp].variables[SDS_NAME]

    #get necessary attributes
    fv=data._FillValue

    #get lat and lon information
    min_lat=np.min(lat)
    max_lat=np.max(lat)
    min_lon=np.min(lon)
    max_lon=np.max(lon)

    #get the data as an array and mask fill/missing values
    dataArray=np.array(data[0][:][:])
    dataArray[dataArray==fv]=np.nan

    data=dataArray

    #get statistics about data
    average=np.nanmean(dataArray)
    stdev=np.nanstd(dataArray)
    median=np.nanmedian(dataArray)

```

```

#Continues to ask for lat and lon until the user enters valid
values # while user_lat < min_lat or user_lat > max_lat:

#    print('The range of latitude in this file is: ',min_lat,'
to ',max_lat, ' degrees')

#    user_lat=float(input('The latitude you entered is out of range.
Please enter a valid latitude: '))

# while user_lon < min_lon or user_lon > max_lon:

#    print('The range of longitude in this file is: ',min_lon, '
to ',max_lon,' degrees')

#    user_lon=float(input('The longitude you entered is out of range.
Please enter a valid longitude: '))

#calculation to find nearest point in data to entered location (haversine
formula)

R=6371000#radius of the earth in
meters lat1=np.radians(user_lat)
lat2=np.radians(lat)
delta_lat=np.radians(lat-user_lat)
delta_lon=np.radians(lon-user_lon)

a=(np.sin(delta_lat/2))*(np.sin(delta_lat/2))+(np.cos(lat1))*(np.cos(lat2))*(np
.sin(delta_lon/2))*(np.sin(delta_lon/2))
c=2*np.arctan2(np.sqrt(a),np.sqrt(1-
a)) d=R*c

#gets (and then prints) the x,y location of the nearest point in data to
entered location, accounting for no data values

x,y=np.unravel_index(d.argmin(),d.shape)

if dataArray[x,y] != fv:
    result_data = {"Latitud": [lat[x,y]], "Longitud": [lon[x,y]], "NO2":
[dataArray[x,y]]}

#calculates mean, median, stdev in a 3x3 grid around nearest point to
entered location

if x < 1:
    x+=1

if x > dataArray.shape[0]-
2: x-=2

if y < 1:
    y+=1

```

```

if y > dataArray.shape[1]-
    2: y-=2

three_by_three=dataArray[x-1:x+2,y-1:y+2]
three_by_three=three_by_three.astype(float)
three_by_three[three_by_three==float(fv)]=np.nan
nnan=np.count_nonzero(~np.isnan(three_by_three))

three_by_three_average =
None if nnan != 0:

    three_by_three_average=np.nanmean(three_by_three)
    three_by_three_std=np.nanstd(three_by_three)
    three_by_three_median=np.nanmedian(three_by_three)

#calculates mean, median, stdev in a 5x5 grid around nearest point to
entered location

if x < 2:
    x+=1

```

ANEXO VII. Ejemplo de datos crudos para OMI

	File	Latitud	Longitud	NO2	Promedio 3x3	Promedio 5x5
0	['OMI-Aura_L	[-0.16921541	[-78.79847]	[3983900531	[3095214889	[2623154958966456.5]
1	['OMI-Aura_L	[-0.11089281	[-78.451546]	[nan]	[None]	[None]
2	['OMI-Aura_L	[-0.21964559	[-78.88062]	[5276133784	[3654295957	[3247400999861616.5]
3	['OMI-Aura_L	[-0.36406144	[-79.48477]	[2774189169	[None]	[2913799980764365.0]
4	['OMI-Aura_L	[-0.0645959]	[-78.47684]	[nan]	[None]	[3340961966142259.0]
5	['OMI-Aura_L	[0.46468592]	[-75.933266]	[3968307384	[3311933660	[3059511846554829.0]
6	['OMI-Aura_L	[-0.15592693	[-78.626076]	[3217978208	[3245646014	[3481390920153170.0]
7	['OMI-Aura_L	[-0.04796537	[-78.51368]	[1591047280	[2682610370	[2820260172566364.0]
8	['OMI-Aura_L	[-0.03294635	[-78.3247]	[nan]	[3051358396	[2774437841600512.0]
9	['OMI-Aura_L	[-0.08131854	[-78.35787]	[2871242008	[2308696155	[2670992723468615.5]
10	['OMI-Aura_L	[-0.07977664	[-78.38924]	[nan]	[1310431745	[2177277165043712.0]
11	['OMI-Aura_L	[-0.00703523	[-78.16325]	[2756902463	[2953166720	[2901343577026068.5]
12	['OMI-Aura_L	[-0.69423604	[-80.96071]	[2238116718	[2104038756	[2124762734133248.0]
13	['OMI-Aura_L	[-0.1485952]	[-78.49498]	[nan]	[None]	[None]
14	['OMI-Aura_L	[0.08298388]	[-77.415764]	[2744793071	[3003258923	[3072305480387789.0]
15	['OMI-Aura_L	[0.052225523	[-78.040474]	[1585194314	[2836412083	[2953325494403072.0]
16	['OMI-Aura_L	[-0.08958535	[-78.35846]	[4397038804	[4105314335	[3722696152223580.0]
17	['OMI-Aura_L	[-0.09564958	[-78.67371]	[3144030145	[4082909459	[3341484227454566.5]
18	['OMI-Aura_L	[-0.09739192	[-78.46384]	[2067858712	[3098258321	[2922216651006935.0]
19	['OMI-Aura_L	[-0.0771993]	[-78.59444]	[1701118434	[3286144379	[3144386456227676.0]
20	['OMI-Aura_L	[-0.05753071	[-78.086365]	[1927807881	[2715194498	[2622603248942448.5]
21	['OMI-Aura_L	[-0.12902321	[-78.46629]	[nan]	[None]	[None]
22	['OMI-Aura_L	[-0.18804171	[-78.91514]	[3558793795	[2568637418	[2360616922560594.0]

ANEXO VIII. Código para concatenar los datos entre TROPOMI y REMMAQ.

```

import pandas as pd

path = "E:/TIC/DATA_CORRE/ESTACIONES_TROPOMI_5KM_HORAUTC.x1sx"

```

```

#Cargar los dos archivos de texto
Data_BEL = pd.read_excel(path,"BEL")
Data_CAM = pd.read_excel(path,"CAM")
Data_CAR = pd.read_excel(path,"CAR")
Data_CEN = pd.read_excel(path,"CEN")
Data_CHL = pd.read_excel(path,"CHL")
Data_COT = pd.read_excel(path,"COT")
Data_GUA = pd.read_excel(path,"GUA")
Data_TUM = pd.read_excel(path,"TUM")

Data_Satelite = [Data_BEL, Data_CAR, Data_CEN, Data_COT, Data_CAM, Data_GUA,
Data_CHL, Data_TUM]

    if x > dataArray.shape[0]-
        3: x-=1

    if y < 2:
        y+=1

    if y > dataArray.shape[1]-
        3: y-=1

    five_by_five=dataArray[x-2:x+3,y-2:y+3]
    five_by_five=five_by_five.astype(float)
    five_by_five[five_by_five==float(fv)]=np.nan
    nnan=np.count_nonzero(~np.isnan(five_by_five))

    five_by_five_average =
    None if nnan != 0:

        five_by_five_average=np.nanmean(five_by_five)
        five_by_five_std=np.nanstd(five_by_five)
        five_by_five_median=np.nanmedian(five_by_five)

#Guardar los resultados de 3x3 y 5x5

    result_grided = {"Promedio 3x3": [three_by_three_average], "Promedio 5x5":
[five_by_five_average]}

    result_dict={"File":[FILE_NAME]}
    result_dict.update(result_data)
    result_dict.update(result_grided)

    for key in final_dict.keys():
        final_dict[key].append(result_dict[key])

    print(num_file, ". Archivo procesado")
    num_file += 1

#final_dict = {"Filename": {OMI_L2, OMI_L3, ...}, "Latitud": {5.5, 5.6,
..},...}

result_df = pd.DataFrame(final_dict)
result_df.to_csv('results.csv')

```

```

print("TODOS LOS ARCHIVOS HAN SIDO PROCESADOS")

Data_Sup = pd.read_excel("E:/TIC/DATA_CORRE/RS_SUPERFICIE.xlsx")

# Columna del satélite actual dentro del excel de los datos de superficie
satelite_index = 4

# Creación de un writer para crear más hojas dentro de un mismo excel
writer = pd.ExcelWriter("RS_TROPOMI_5KM.xlsx")

# Iterar por cada satélite
for satelite in Data_Satelite:

    result = {"AÑO": [], "MES": [], "DIA": [], "HORA": [], "NO2": [], "Promedio
3x3": [],

            "Promedio 5x5": [], "SUP": []}

    # Iterar en cada fila de los datos de superficie
    for value_sup in Data_Sup.values:

        # Iterar en cada fila de los datos del satélite seleccionado
        for value_satelite in satelite.values:

            # 0: Año      6: NO2
            # 1: Mes      7: Promedio 3x3
            # 2: Día      8: Promedio 5x5
            # 3: Hora

            # print(value_satelite[0], value_sup[1])

            if value_sup[1] == value_satelite[1] and value_sup[2] ==
value_satelite[2] and value_sup[3] == value_satelite[3]:

                result["AÑO"].append(value_satelite[0])
                result["MES"].append(value_satelite[1])
                result["DIA"].append(value_satelite[2])
                result["HORA"].append(value_satelite[3])
                result["NO2"].append(value_satelite[6])
                result["Promedio 3x3"].append(value_satelite[7])
                result["Promedio 5x5"].append(value_satelite[8])

                result["SUP"].append(value_sup[satelite_index]) continue

    # Genera la hoja excel del
    satelite result_df =
pd.DataFrame(result)

    result_df.to_excel(writer,
sheet_name=Data_Sup.columns[satelite_index], index=False)

    print("Satelite", Data_Sup.columns[satelite_index], "Guardado
satisfactoriamente")

```

```
satelite_index += 1
```

```
# Guardar archivo
excel writer._save()
writer.close()
```

```
print("RESULTADOS GUARDADOS SATISFACTORIAMENTE")
```

ANEXO IX. Tabla de estimación anuales para las estaciones en el DMQ

ID	Código	Nombre	Latitud	Longitud	2022	Dato satélite	Estimación en Superficie	Diferencia
1	BEL	Belisario	-0.18495	-78.49592	25.05	3.26E-05	14.12	10.94
2	CAR	Carapungo	-0.09548	-78.44988	19.95	2.40E-05	11.48	8.47
3	CEN	Centro	-0.2215	-78.51413	28.51	3.74E-05	15.57	12.94
4	COT	Cotocollao	-0.11072	-78.49953	24.73	2.69E-05	12.35	12.38
5	CAM	EICamal	-0.25192	-78.51713	24.59	3.97E-05	16.28	8.32
6	GUA	Guamani	-0.33428	-78.5534	18.97	3.96E-05	16.24	2.73
7	CHL	LosChillos	-0.29693	-78.45555	18.47	3.74E-05	15.58	2.9
8	TUM	Tumbaco	-0.21484	-78.40326	13.51	2.76E-05	12.58	0.93

ANEXO X. Tabla con las ciudades y su respectiva estimación de NO₂

ID	Nombre	Latitud	Longitud	UTMX	UTMY	Dato satelital (mol/m ²)	Estimación en Superficie (ug/m ³)
1	AMBATO	-1.266	-78.611	765883.3	9859951.1	1.09E-05	7.44
2	BABAHOYO	-1.813	-79.513	665412.4	9799545.3	2.33E-05	11.26
3	CAÑAR	-2.554	-78.936	729499.3	9717535.2	8.68E-06	6.77
4	CUENCA	-2.918	-78.976	724977.9	9677239.4	1.25E-05	7.93
5	ESMERALDAS	0.969	-79.634	651980.7	10107136	1.70E-05	9.33
6	FRANCISCO_ORELLANA	-0.468	-76.968	949054	9948279	1.03E-05	7.26
7	GUARANDA	-1.597	-78.98	724787	9823412.4	1.27E-05	8
8	GUAYAQUIL	-2.176	-79.851	627751.9	9759434.7	5.54E-05	21.11
9	IBARRA	0.342	-78.125	820000.5	10037784	1.55E-05	8.85
10	LATACUNGA	-0.945	-78.604	766714.7	9895456.4	1.37E-05	8.31
11	LOJA	-4.001	-79.156	704785.1	9557547.5	7.05E-06	6.27
12	MACAS	-2.305	-78.105	821987.2	9744923.3	7.50E-06	6.41
13	MACHALA	-3.261	-79.922	619783.4	9639540.8	1.71E-05	9.34
14	NUEVA_LOJA	0.08	-76.875	959465	10008872	1.20E-05	7.8
15	PORTOVIEJO	-1.058	-80.436	562798.3	9883089.4	1.93E-05	10.03
16	PUYO	-1.484	-78.007	833108.1	9835799.2	7.37E-06	6.37
17	QUEVEDO	-1.026	-79.441	673475.2	9886578.2	2.28E-05	11.1
18	QUITO	-0.176	-78.455	783267.3	9980532	2.89E-05	12.98

19	RIOBAMBA	-1.668	-78.639	762650.2	9815469.2	1.25E-05	7.96
20	SAN_LORENZO	1.273	-78.821	742438.5	10140948	1.15E-05	7.64
21	SANTA_ELENA	-2.238	-80.921	508766	9752588.7	1.15E-05	7.64
22	SANTO_DOMINGO	-0.251	-79.151	705804	9972296.1	2.87E-05	12.92
23	TENA	-1.008	-77.803	856039	9888488.7	7.90E-06	6.53
24	TULCAN	0.803	-77.717	865541	10088902	6.52E-06	6.11
25	Zamora	-4.064	-78.927	730145.7	9550503.7	7.31E-06	6.35

ANEXO XI. Mapa con la ubicación de todos los puntos extraídos para las estaciones de OMI y TROPOMI

