

**Universidad Nacional de Córdoba**

**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**

Tesina de Grado para optar por el título de Biólogo

**“RELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA CON EL USO DE LA  
TIERRA. BASES PARA ELABORAR PROPUESTAS DE MITIGACIÓN ANTE LOS  
EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE  
CÓRDOBA, ARGENTINA”.**

Estudiante: **Díaz, María Pilar**

Firma:  .....

Director/a: **Dra. Amarillo, Ana Carolina**

Firma:  .....

Co-director/a: **Mgter. Schwindt, Guillermo Ernesto**

Firma:  .....

Cátedra de Química general (FCEFN -UNC)

AÑO: 2024

Tesina de Grado para optar por el título de Biólogo

**“RELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA CON EL USO DE LA TIERRA. BASES PARA ELABORAR PROPUESTAS DE MITIGACIÓN ANTE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE CÓRDOBA, ARGENTINA”.**

**Tribunal Examinador**

Dra. Carreras, Hebe

Firma:  .....

Dra Amarillo, Ana Carolina

Firma:  .....

Dr. Tavera Busso, Iván

Firma:  .....

Calificación: 10 (diez) .....

Fecha: 27/03/2024 .....

## ***AGRADECIMIENTOS***

- A la Universidad Nacional de Córdoba, pública y gratuita, que me dio la posibilidad de formarme profesionalmente.
- A la FCEFyN que me albergó tantos años, y a la Cátedra de Química general y a todos los profesionales que allí trabajan, por abrirme sus puertas y dejarme ser parte de ese espacio de trabajo.
- A mi directora, la Dra. Ana Amarillo y mi codirector, el Mgter. Guillermo Schwindt, ambos excelentes tanto a nivel profesional como a nivel personal. Gracias por el tiempo dedicado, la paciencia, las charlas sobre la vida, las herramientas que me brindaron, lo amoroso de su trato para conmigo y por darme palabras de aliento cuando los tiempos se ponían complicados.
- A los integrantes del tribunal, la Dra Hebe Carreras, el Dr Iván Tavera Busso y a la Dra Ana Amarillo por la buena predisposición y las sugerencias que fueron un valioso aporte a mi trabajo final.
- A la Fundación Cuomo, a SECyT y Proyectos FORMAR 2020-2021, a las Becas CIN de la Unc, por permitir que este proyecto se pudiera llevar a cabo.
- A Sci-Hub por eliminar barreras y permitir que el conocimiento científico esté al alcance de todes. La ciencia es con y para todes.
- A mis amigas de la facultad que hicieron de esta etapa una experiencia hermosa e inolvidable, sin su compañía este camino no hubiese sido posible. Gracias por las risas, las “lloraditas y a seguir”, los mates, los viajes de campo, las horas de desvelo estudiando, pero también bailando y jugando para evitar el estudio. A quienes estuvieron desde un comienzo y siguen estando, a quienes me fui cruzando más tarde en este camino y se quedaron a mi lado: Sol, Tami, Nico, Dani, Andrés, Pau, Sole, Pato, Nati, Sandra, Jor... y muchas personas más de las que estoy agradecida.
- A mis amichas del cole que más que amichas son hermanas. Las de siempre, las eternas: Chon, Sol, Lau, Maru y Colo. Gracias por ser siempre refugio, por ayudar(nos) a crecer y por acompañar en los buenos y en los malos momentos. Las quiero para siempre en mi vida.

- A mis amigos del barrio y a quienes fui conociendo a través del feminismo, del trabajo y de otras personas. Gracias por su cariño y acompañamiento.
- A mi compañero de vida, Ezequiel, y a la familia que formamos junto a Malta, mi fiel compañera. Por ser mi apoyo y sostén de todos los días, por estar para celebrar los buenos momentos y por acompañar los momentos de crisis, sobre todo en esta última etapa de la carrera, siempre desde el amor y la comprensión, y siempre pero siempre con un plato de comida bien rico para que pudiera seguir estudiando. Gracias por creer en mí e impulsarme a creer en mí.
- A mi familia, gracias infinitas por apoyarme en cada cosa que quise emprender, siempre desde el amor y el respeto. Por incentivarme a estudiar, a perseguir mis sueños, a nunca quedarme quieta. Gracias por acompañarme durante este largo proceso, no hubiese podido llegar a esta instancia si no fuera por su apoyo. A mis viejis Lily y Jorge, a mis ratsos hermanos Cecilia y Pablo, a mis cuñados/as, mi suegra, a mis sobrines por hacer de este mundo un lugar más hermoso.
- A mi abuela Mamina que hoy me acompaña desde otro plano. Gracias por las velitas prendidas cada vez que rendía, por llevarme el cafecito y las cositas dulces a la mesa cada vez que me quedaba a estudiar en tu casa, por cada palabra de aliento y abrazo, cada gesto de amor que voy a llevar siempre conmigo. ¡Finalmente llegué, mi vieca! Y esto también es gracias a vos.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>A. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CO <sub>2</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el AMC medidos mediante sensores de bajo costo.	10
<b>C. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>10</b>
Área de estudio	10
1. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CO <sub>2</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el AMC medidos mediante sensores de bajo costo.	12
Muestreo de CO <sub>2</sub> y PM <sub>2.5</sub>	12
2. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CH <sub>4</sub> y O <sub>3</sub> medidos mediante sensado remoto.	12
3. Generar capas de información geográfica y obtener información meteorológica a partir de información disponible.	13
Sector energía:	14
Sector agricultura, silvicultura y otros usos del suelo:	16
Sector desechos (B):	18
Meteorología	19
4. Ajustar modelos de regresión múltiple para explicar la concentración de contaminantes en función de variables geográficas y meteorológicas.	19
5. Elaborar propuestas de mitigación de la contaminación atmosférica para la provincia de Córdoba.	20
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>21</b>
1. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CO <sub>2</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el AMC medidos mediante sensores de bajo costo.	22
2. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CH <sub>4</sub> y O <sub>3</sub> medidos mediante sensado remoto.	26
3. Generar capas de información geográfica y obtener información meteorológica a partir de información disponible.	31
Industrias / Procesos industriales y uso de productos (I)	31
Sector energía	33
Sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra:	35
Sector desechos (B) [nro de basurales]:	39
4. Ajustar modelos de regresión múltiple para explicar la concentración de contaminantes en función de variables geográficas y meteorológicas.	40
5. Elaborar propuestas de mitigación de la contaminación atmosférica para el Área Metropolitana de Córdoba.	50
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO</b>	<b>62</b>

## RESUMEN

El cambio climático y el calentamiento global son el mayor desafío actual para la humanidad, debido a que tienen una incidencia negativa tanto en los ecosistemas como en la salud humana. El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por acción antropogénica ha elevado la temperatura global, proyectándose un aumento de 1,1°C a 6,4°C para el año 2100. Los principales GEI son CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y O<sub>3</sub> troposférico. Existen además otros componentes con efectos comparables a los de los GEI que tienen impacto en el clima, ellos son los aerosoles de origen antropogénico. La relación entre el uso del suelo y los contaminantes atmosféricos, a través de “modelos de regresión de uso del suelo” (del inglés, LURs) que permiten estimar la concentración de contaminantes, es crucial para comprender y mitigar la contaminación atmosférica. El objetivo del presente trabajo es explicar la concentración de GEI y partículas a escala regional (Área Metropolitana de Córdoba: AMC) en función de las características espaciales y las variables meteorológicas, con la finalidad de obtener información útil para proponer medidas de mitigación de la contaminación atmosférica. Se analizaron variables geográficas relacionadas con las fuentes de emisión de contaminantes según diferentes sectores (energía, procesos industriales y uso de productos, desechos, y agricultura, silvicultura y otros usos del suelo); así como meteorológicas, en relación a los gases O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, y las partículas inferiores a 2,5 micras (PM<sub>2,5</sub>), medidos por satélite (los 2 primeros) y sensores (los 2 últimos). Se realizaron análisis de correlación simple de Spearman y modelos de regresión lineales múltiples. Se encontró que los modelos presentaron limitaciones debido a que las variables geográficas consideradas eran estáticas. Por esta razón, para analizar la relación entre las variables geográficas y meteorológicas, se tomaron en cuenta solamente los resultados de las correlaciones simples significativas. Para todos los contaminantes las correlaciones más significativas fueron de manera negativa con cobertura verde (CV) y de manera positiva con el tramo de calles (TC). En base a esto se elaboraron propuestas de mitigación teniendo en cuenta estas dos variables geográficas. Este trabajo destaca la importancia del acceso a la información geográfica como así también a la actualización de la misma. A su vez, brindó herramientas para poder proponer medidas de mitigación de la contaminación atmosférica acordes a la realidad local (AMC).

**TÍTULO:** “RELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA CON EL USO DE LA TIERRA. BASES PARA ELABORAR PROPUESTAS DE MITIGACIÓN ANTE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE CÓRDOBA, ARGENTINA”.

**Palabras clave:** CAMBIO CLIMÁTICO, GASES DE EFECTO INVERNADERO, MODELOS DE REGRESIÓN DE USO DEL SUELO.

## **A. INTRODUCCIÓN**

El principal desafío al que se enfrenta hoy la humanidad es la lucha contra el cambio climático y el calentamiento global, que impactan sobre los ecosistemas y la salud humana, afectando en mayor medida a las naciones pobres.

El efecto invernadero es un fenómeno natural; el problema ha sido que la humanidad ha incrementado las emisiones de los GEI, subiendo la temperatura global, para la cual se proyecta un aumento de 1,1°C a 6,4°C para el año 2100 (Pachauri, 2008). Los GEI son CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y O<sub>3</sub> troposférico, entre otros. Los 3 primeros son directamente emitidos a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles, agricultura y ganadería, manejo de residuos, cambios en el uso del suelo, etc (Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Argentina, 2017). El O<sub>3</sub> troposférico es un contaminante secundario que se forma por las reacciones químicas en la atmósfera y es considerado actualmente el tercer gas en importancia del efecto invernadero (después del CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>) (GIEC, 2007; EEA, 2010).

Además de los GEI, los aerosoles también impactan sobre el clima, siendo más importantes los de origen antropogénico (Ramanathan y col., 2007), aunque no hay consenso científico en cuanto a si calientan o enfrían la atmósfera, ya que ello varía en función de su composición (Papadimas y col., 2012). Se estima que los efectos de las partículas son de magnitud comparable a los de los GEI (Buseck y Schawartz, 2003).

La contaminación atmosférica produce efectos regionales en el corto plazo, por lo que su mitigación es una tarea urgente (Garg y col., 2001). La mitigación del cambio climático consiste en reducir las fuentes de emisión o mejorar los sumideros de GEI (Inventario de Gases de Efecto Invernadero de Argentina, 2017) y debe estar diseñada acorde a las posibilidades socioeconómicas de cada nación.

Argentina es un país en vías de desarrollo y su principal actividad económica la constituye la agricultura y la ganadería. Se ha elaborado un inventario de GEI en el año 2021, en el que se señalan como principales fuentes: la fermentación entérica de herbívoros de la

industria ganadera (15%), las fuentes móviles (transporte aéreo, terrestre, marítimo y fluvial, excluyendo transporte internacional) (14%), la generación de electricidad (generación combinada de calor y energía y las centrales de calor) (11%), cambio de uso del suelo y silvicultura (conversión de tierras forestales, tierras de cultivo y pastizales en tierras de cultivo o pasturas) (11%), suelos agrícolas (aplicación de urea y fertilizantes sintéticos, suelos gestionados por quema de biomasa, residuos de cosecha, producción de arroz) (6%), combustible de uso residencial/comercial (emisiones de la quema de combustibles en edificios comerciales, institucionales y en hogares) (7%) (Inventario de Gases de Efecto Invernadero de Argentina, 2021). Puliafito y col (2015, 2017, 2020) estimaron las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de todo el país, describiendo la variación espacial de 11 especies de contaminantes atmosféricos provenientes de diferentes sectores, basándose en actividades y fuentes de emisión, a partir de información geográfica y con una resolución espacial de  $0,025^\circ$ . En este trabajo se busca describir la variación espacio-temporal en una escala local-regional en el Área Metropolitana de Córdoba de la concentración (y no del flujo, como se reporta en los inventarios) del  $PM_{2,5}$  y de los GEI  $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $O_3$ , medidos mediante sensores y teledetección. Luego, analizar la relación de estos contaminantes con variables geográficas y meteorológicas, relacionadas de modo más o menos directo con los sectores responsables de las emisiones, de manera de poder proponer medidas de mitigación del cambio climático a escala local-regional.

Las variaciones en la concentración de contaminantes en el aire están asociadas, entre otros fenómenos, a los cambios en el uso del suelo, y ello afecta el clima a una escala global o regional, reduciendo o acentuando el calentamiento y afectando la intensidad, frecuencia y duración de eventos extremos (Mbow y col., 2017). Es por esto que resulta importante describir la relación entre el uso del suelo y los contaminantes atmosféricos.

Durante las últimas décadas, Argentina experimentó un avance en la frontera agropecuaria acompañada de una disminución de alrededor del 90% de la cobertura forestal natural (Carranza y col., 2015). Asociado a estas alteraciones del hábitat, se registraron eventos climáticos extremos como inundaciones (Bertoni y col., 2004), incendios (Argañaraz y col., 2015) y fuertes tormentas. La información existente acerca del vínculo entre los cambios regionales en las tendencias climáticas de las últimas décadas y la concentración de aerosoles y GEI, se ha ido ampliando gracias al avance de la tecnología y a distintos trabajos de investigación realizados (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, 2021). Algunos impactos regionales para la región centro de Argentina son las olas de calor; cambios en las condiciones de humedad, como consecuencia del aumento de las precipitaciones, lo que

provoca una expansión de la frontera agrícola; degradación ambiental y sequías más prolongadas (Camilloni, 2021)

Actualmente en Argentina, algunos contaminantes se estiman mediante información satelital (García Ferreyra, 2014; Della Ceca, 2018; Amarillo y col., 2021) o monitoreo en superficie. En nuestro país se miden CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en la estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de Ushuaia desde el año 1994 (SMN, 2019). Sin embargo, son pocos los contaminantes que se monitorean, en general se hace de manera discontinuada y con muy baja cobertura espacial, (Represa, 2016), ya que existen muy pocas estaciones fijas de monitoreo (Gupta y col., 2006).

Los LURs permiten estimar la concentración de contaminantes a partir de información geográfica y meteorológica (Zhang y col., 2015; Hoek y col., 2008), y resultan particularmente muy útiles para el manejo de ambientes contaminados que no disponen los recursos para monitoreos exhaustivos (Romanazzi y col., 2014). Hay antecedentes para la ciudad de Córdoba en el empleo de estos modelos a una escala urbana para la estimación de la concentración y composición del PM<sub>2,5</sub> (Mignola, 2020). En este trabajo se busca explicar la variación espacio-temporal de la concentración de GEI y partículas a escala regional (AMC) en función de variables geográficas y meteorológicas, de manera que los gestores de políticas ambientales cuenten con información más precisa para la toma de decisiones tendientes a reducir las emisiones.

## **B. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Explicar la concentración de gases de efecto invernadero y partículas en el Área Metropolitana de Córdoba (AMC), en función de las características espaciales y las variables meteorológicas, a fin de obtener información útil para proponer medidas de mitigación de la contaminación atmosférica.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2,5</sub> en el AMC medidos mediante sensores de bajo costo.
2. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CH<sub>4</sub> y O<sub>3</sub> medidos mediante sensado remoto.
3. Generar capas de información geográfica y obtener información meteorológica a partir de información disponible.
4. Ajustar modelos de regresión múltiple para explicar la concentración de contaminantes en función de variables geográficas y meteorológicas.
5. Elaborar propuestas de mitigación de la contaminación atmosférica para el AMC.

## **C. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Área de estudio**

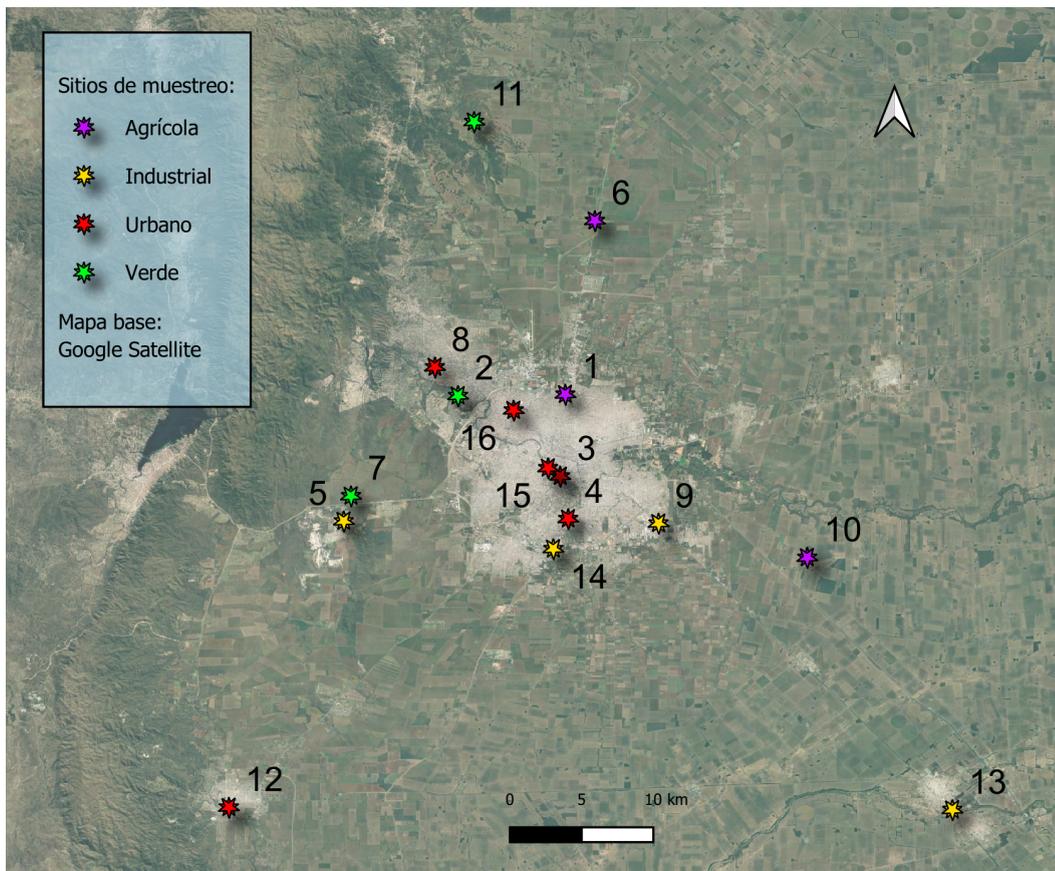
El área de trabajo se sitúa en Córdoba (Argentina) más precisamente en el AMC. De acuerdo al Instituto de Planificación del Área Metropolitana (IPLAM) esta forma de organizar el territorio abarca 46 localidades en los alrededores de la Capital, las cuales se encuentran dentro de los departamentos Punilla, Colón, Capital, Río Primero, Río Segundo y Santa María y presenta una superficie de 630 km<sup>2</sup>. Localizada a 390 msnm, la ciudad de Córdoba destaca como el centro urbano más importante del AMC, tanto por su población como por su infraestructura y actividad económica. Dicha ciudad exhibe una estructura tipo embudo la cual provoca inversión térmica al reducir la circulación del aire (Amarillo y col., 2021).

En cuanto al clima, se caracteriza por ser templado subtropical húmedo con una marcada estacionalidad, presentando inviernos secos y veranos húmedos y calurosos. La precipitación media anual es de 800 mm y se concentra principalmente en la época estival. La temperatura media anual es de 17,4°C (Gobierno de la Provincia de Córdoba, 2024).

### **Elección de sitios**

La selección de los puntos de muestreo se realizó de manera tal que contemplara diferentes condiciones en cuanto a las emisiones de gases y material particulado. Para ello, se realizó en primer lugar un análisis de componentes principales (PCA) (Software QGIS

3.34.1) utilizando información espacial (formato ráster) de inventarios de emisión (Pulíafito y col., 2020) a fin de obtener una sectorización del AMC según emisiones de GEI y partículas. Para este análisis se usaron 56 bandas, que incluyeron las emisiones estimadas de CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, Compuestos Orgánicos Volátiles No metánicos (NMVOCs) y PM<sub>2.5</sub>, sin considerar las bandas correspondientes a CO<sub>2</sub> ya que la inclusión de las mismas no permitía ver la variabilidad de los sitios en cuanto a las demás emisiones. Además se tuvo en cuenta la topografía del lugar. Una vez realizados dichos análisis, se procedió a ubicar los 16 puntos de muestreo en el AMC (Fig 1).



**Fig. 1. a)** Sitios de muestreo en el Área Metropolitana de la ciudad de Córdoba. **Anillo 1:** sitios 1: Academia, 2: Reserva Natural Urbana General San Martín, 3: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (sede centro), 4\*: Residencial sur, 15: Residencial centro, 16\*: Residencial Norte. **Anillo 2:** sitios 5: Malagueño, 6: Campo privado Juárez Celman 7: Espacio para la Memoria “La Perla”, 8: Residencial noroeste, 9: Transelectric, 14\*: Porta. **Anillo 3:** sitios 10: Campo Escuela Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), 11: Campo privado, 12: Residencial suroeste, 13: Pilar-Río Segundo. \*Sitios monitoreados con sensor Airvisual.

Para más detalle de los sitios de muestreo, consultar la Tabla 1 del material suplementario.

## **1. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el AMC medidos mediante sensores de bajo costo.**

### **Muestreo de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>**

Para este trabajo se utilizaron datos de monitoreo del Laboratorio de Investigación en Contaminantes Atmosféricos, correspondientes al período diciembre de 2020 a mayo de 2021, para los sitios 4, 14 y 16 (Fig. 1). Estas mediciones en campo fueron tomadas durante el “Aislamiento Social, Preventivo y Obligatorio” debido a la pandemia de COVID19.

Se utilizó el sensor AirVisual (<https://www.iqair.com/>), el cual mide los siguientes parámetros: PM<sub>2.5</sub> en el rango de 0 a 1000 µg/m<sup>3</sup> ± 10 µg/m<sup>3</sup> o ±10%, CO<sub>2</sub> en el rango de concentración de 400 a 10000 ppm, temperatura de -40 a 90 °C ± 2 °C y humedad relativa desde 0 a 100 % ± 1%.

## **2. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CH<sub>4</sub> y O<sub>3</sub> medidos mediante sensado remoto.**

Los datos satelitales se obtuvieron de la página web de Sentinel Hub (Sentinel Hub EO Browser, s.f). El satélite Sentinel 5P tiene como propósito evaluar la calidad del aire, monitorizar el O<sub>3</sub>, evaluar la radiación UV y monitorear y pronosticar el estado del tiempo (Sentinel Hub EO Browser, s.f.) A bordo, el instrumento TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) toma mediciones de CH<sub>4</sub> (ppm) y O<sub>3</sub> (mol/m<sup>2</sup>). Este sensor tiene un ancho de barrido de ~2600 km en la superficie de la Tierra. Desde su fecha de lanzamiento hasta el 6 de agosto de 2019, su resolución espacial fue de 7 x 3,5 km cerca del nadir, la cual luego fue corregida a 5,6 x 3,5 km (Sanucci, 2020). Posee una resolución temporal de 1 día.

Se descargaron datos de series temporales correspondientes al período comprendido entre junio de 2018 y junio de 2023 para cada punto de muestreo, utilizando un área de interés circular de 5m de radio, de manera tal de obtener un dato puntual.

### **3. Generar capas de información geográfica y obtener información meteorológica a partir de información disponible.**

Las capas de información geográficas fueron descargadas y posteriormente procesadas para obtener información espacial que pudiera estar relacionada con la concentración de los contaminantes. De esta manera, las variables fueron escogidas para representar las posibles fuentes de emisión de contaminantes según los diferentes sectores propuestos por las directrices del IPCC para la elaboración de inventarios de emisión, actualización del año 2019 (IPCC, 2019): procesos industriales y uso de productos (del inglés, IPPU); energía; agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (del inglés, AFOLU), y desechos. En relación a esto, se elaboraron las siguientes capas: Industrias (I), del sector IPPU; Tramo de calles (TC) y Densidad poblacional (DP), del sector Energía; Uso de suelo (US) y Cobertura verde (CV), del sector AFOLU y basurales (B), del sector Desechos. En cada una de las capas, se analizó la información espacial, a diferentes escalas, es decir, empleando diferentes áreas de influencia o buffer circulares de radios 0,5 km, 1 km y 2 km. Para lograr esto se utilizó el software QGIS (Versión 3.34.1-Prizren).

#### **Sector IPPU:**

##### **Industrias (I)**

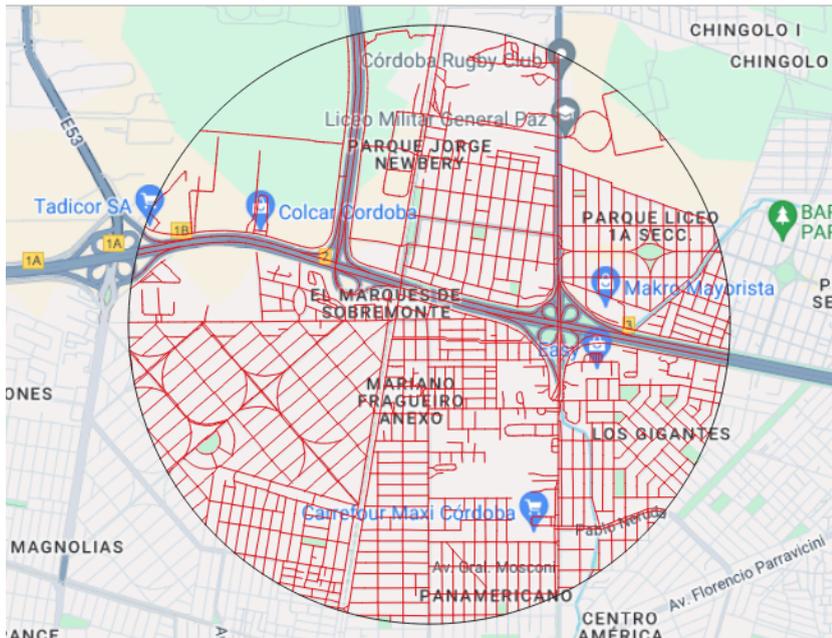
La capa de industrias (I) se generó a partir de información obtenida sobre industrias y parques industriales de la Secretaría de Industrias, disponible en la página web de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN, 2021) (Chiodi y Fernández, 2017) y de la web de Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba (IDECOR, s.f). Se generó una única capa, uniendo las dos anteriores, la cual consistió en una clasificación de las industrias, adaptando la categorización que se establece en el manual del IPCC para “Procesos industriales y uso de productos” (IPCC, 2006. Vol. 3, Ch. 1, p. 1.6). Las categorías establecidas fueron; “Industria de los metales (Met), de los minerales (Min), alimenticia (A), Química (Q), Manufacturera (Man), Madera (Md), Papel (Ppl), Textil (Tx), Librería (L) y las industrias mixtas como Metal-Química (Met-Q), Metal-Manufacturera (Met-Man), Metal-Madera (Met-Md), Química-Mineral (Q-Min), y Química-Alimenticia (Q-A). Se borraron repeticiones y puntos que no tuvieron su correlato con el mapa base de Google Maps. De esta capa se obtuvo el número de cada tipo de industria dentro de cada área buffer, para cada sitio de muestreo.

### **Sector energía:**

Se utilizaron capas que tuvieran relación con el sector, a la vez que permitieran estimar de manera indirecta las emisiones de las especies contaminantes. En tal sentido se trabajó con capas vinculadas al transporte como así también a la densidad poblacional.

### **Tramo de Calles (TC)**

Para el tramo de calles se utilizaron capas vectoriales obtenidas de la web de la FCEFyN (2022) y de la Municipalidad de Córdoba (Datos Abiertos, s.f) : red vial nacional, provincial (Metadato del 2014) y tramos de calles (Metadato del 2016). Las mismas fueron editadas para obtener una sola capa de información, eliminando datos redundantes (calles y/o rutas repetidas) y recortadas por las áreas buffer de cada punto de muestreo (0,5 km, 1 km y 2 km). Para esto se utilizó el software QGIS y sus herramientas de geoprocursos para realizar las intersecciones de la red vial con cada área de influencia de cada punto de muestreo. A través del uso de la calculadora de campos se agregó el campo de salida “Largo” para posteriormente poder calcular la longitud del largo de líneas/calles trazadas, como la sumatoria de los metros lineales de calles, para cada área de influencia.

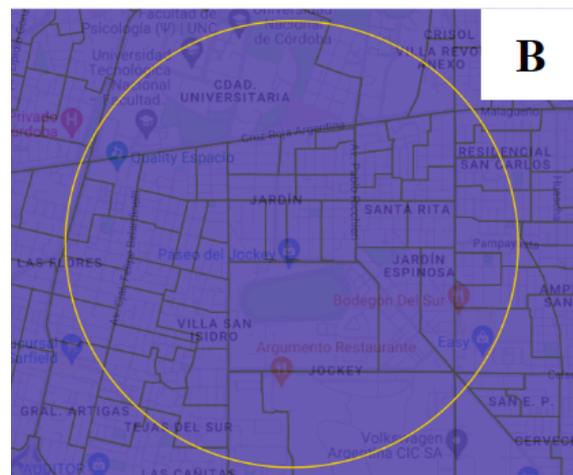


**Fig. 2.** Obtención de la capa de información geográfica “Tramo de Calles” (TC) como la sumatoria de los metros lineales de las líneas de la capa vectorial que intersectan el área de influencia.

## Densidad Poblacional (DP)

Los datos fueron obtenidos de la página web del Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina (INDEC), del censo realizado en el año 2010.

Se utilizó una capa formato shape de radios censales de la provincia de Córdoba. Allí se calculó primero la densidad poblacional (para toda Córdoba) a partir del total de habitantes dividido el área de cada radio censal. A continuación se realizó un recorte/intersección de la capa original (de radios censales) por las distintas áreas buffer (0,5km, 1km y 2km) de cada sitio de muestreo. A partir de allí, y mediante la utilización de la calculadora de campos (QGIS), se calcularon primero las áreas de cada radio censal que caían dentro del buffer, y luego mediante la multiplicación de la densidad poblacional por el área de dichos radios censales se obtuvo el número de habitantes existente en cada intersección. Finalmente, se realizó la sumatoria total del número de habitantes y se lo dividió por el área total/superficie del buffer en cuestión, obteniéndose así la densidad poblacional para cada área de influencia, expresada en personas/km<sup>2</sup>.





**Fig 3.** Cálculo de Densidad Poblacional a partir de Radios censales para cada área de influencia de los sitios de muestreo. a) Radios censales de la Provincia de Córdoba. b) Detalle de los radios censales dentro del área de interés (Buffer de 2 km) para un punto de muestreo. c) Cálculo de la densidad poblacional para cada radio censal. d) Una vez obtenida la densidad poblacional, calculamos el número de habitantes que existe para cada radio censal dentro del área buffer. e) Cociente entre la sumatoria de habitantes dentro del área de interés y el área total de la misma.

## **Sector agricultura, silvicultura y otros usos del suelo:**

### **Uso de suelo de 1 ha (US)**

Para la capa de Uso de Suelo de 1 ha (2020-2021), obtenida de la web de IDECOR (IDECOR, s.f), se realizó previamente una reclasificación de las categorías de la capa, agrupándolas de acuerdo a las directrices del IPCC, obteniendo así las siguientes categorías:

- *Tierras Forestales (Tf)*: Monte, Matorral/Arbustal y Plantación Forestal.
- *Tierras de Cultivo (Tcul)*: Cultivo extensivo anual, Cultivo irrigado, Pastura implantada, Pastura natural manejada y Cultivo hortícola diverso.
- *Pastizales (Pz)*: Pastizal natural, Arbustal/Pastizal natural con rocas o Suelo desnudo.
- *Humedales (Hum)*: Cuerpo de agua, Zona anegable y Curso de agua.
- *Asentamientos (As)*: Urbano compacidad alta, Urbano compacidad media, Urbano compacidad baja, Urbano compacidad muy baja o abierta e Infraestructura vial.
- *Otras tierras (Ot)*: Roca, Suelo desnudo o con baja cobertura vegetal, Salina.
- *Emisión de quema de biomasa (Eq)*: Vegetación leñosa afectada por incendios.

Mediante la herramienta estadística del software QGIS (3.34.1-Prizren) en dicha capa ráster se realizaron extracciones o recortes por capa de máscara utilizando las áreas buffer de 2 km de cada punto de muestreo y luego se vectorizaron para poder calcular estadísticas de cada tipo de cobertura. Una vez obtenidos los recortes vectorizados de las áreas buffer de 2km de radio, se procedió a interseccionarlos con las áreas de influencia más pequeñas, de 1km y 0,5km. A través del uso de la calculadora de campos, se agregó el campo de salida “área”. De esta manera, para cada categoría o tipo de cobertura se calculó el área (en metros cuadrados), en cada una de las zonas de influencia y finalmente su porcentaje de cobertura.

### **Cobertura verde (CV)**

Para dicha capa se utilizó el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (del inglés, Atmospherically Resistant Vegetation Index: ARVI), el cual tiene como característica distintiva ser menos sensible a los efectos atmosféricos (dispersión y la absorción de la luz) que otros índices, lo que lo hace más preciso para medir la salud de la vegetación en ambientes contaminados (Klimisch y col, 2022).

Se utilizó el visualizador Land Viewer (EOS, s.f) para calcular online el índice ARVI empleando imágenes del satélite SENTINEL- 2 L2A (con corrección atmosférica y

radiométrica). Se cargaron las áreas de interés (AOI) de 0,5km, 1km y 2km de radio y escogiendo aquellas imágenes comprendidas entre los años 2018 - 2023 que tuvieran menos del 3% de nubosidad, se calculó el porcentaje de cobertura de cada categoría del índice ARVI para cada punto de muestreo con sus buffers correspondientes. Dicho visualizador calcula de manera automática este índice, generando 9 categorías con distinto porcentaje. Los límites que conforman cada categoría se convirtieron a valores de NDVI empleando la fórmula

$$\text{ARVI} = -0.18 + 1.17 * \text{NDVI}$$

propuesta por Kaufman y Tanre (1992).

De esta manera, se interpretaron los valores de ARVI según su equivalente NDVI, considerando las clases propuestas por Alencar da Silva Alves y col. (2019):

Valores NDVI	Clases
-1 a -0,32	Agua
-0,31 a -0,059	Áreas húmedas
-0,058 a 0,0039	Suelo expuesto
0,004 a 0,12	Vegetación poco densa
0,13 a 1	Vegetación densa

Y finalmente se elaboraron las siguientes 4 categorías (teniendo en cuenta los valores originales de ARVI):

- Cobertura Verde de alta densidad (**CVad**): 0,6 a 1
- Cobertura Verde de baja densidad (**CVbd**): 0,2 a 0,6
- Cobertura Verde sin vegetación/suelo desnudo (**CVsd**): -0,3 a 0,2
- Agua (**CVag**): -1 a -0,3

Se corroboró la reclasificación tomando como referencia las imágenes de Google satélite.

Se obtuvo un porcentaje para cada tipo de cobertura en cada sitio por estación.

### **Sector desechos (B):**

Se obtuvo a partir de la capa vectorial de Residuos Sólidos Urbanos de la Provincia de la Secretaría de Ambiente de la Provincia de Córdoba, disponible en la página web de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (2020) (Chiodi, 2016). Se contabilizó el

número de basurales existentes dentro de los distintos buffers (0,5km, 1km y 2km) de cada punto de muestreo.

### **Meteorología**

Los datos meteorológicos fueron descargados a través de web Merra2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications 2; SODA-PRO, 2014-2022), con un período de tiempo que abarcó desde el invierno del 2018 al otoño del 2023, obteniéndose así información diaria de cada sitio de interés: temperatura (T) [°C], presión atmosférica (P) [hPa], humedad relativa (HR) [%], precipitaciones (Pp) [mm], velocidad (VV) [m/s] y dirección del viento [deg] y radiación solar de onda corta (RS) [Wh/m<sup>2</sup>]. La dirección del viento (DV) se categorizó en viento norte, sur, este y oeste (DV<sub>N</sub>, DV<sub>S</sub>, DV<sub>E</sub> y DV<sub>O</sub>, respectivamente). También se utilizó información de temperatura (T<sub>S</sub>) y humedad relativa (HR<sub>S</sub>) medida por el sensor AirVisual.

### **Análisis de datos**

Los datos descargados fueron organizados en tablas con diferentes resoluciones temporales, combinando los datos de gases y partículas (CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y CO<sub>2</sub>) en los distintos puntos de muestreo, con información geográfica y meteorológica. Esto se realizó utilizando el software R (versión 4.3.1, 2023) con el entorno de desarrollo integrado RStudio (versión 2023.06.2, 2023). Se realizó una exploración de los datos con gráficos de caja (boxplots), gráficos de dispersión (Scatterplot) de cada variable y se identificaron y eliminaron valores atípicos (outliers). Para caracterizar la variación espacial entre sitios de las variables de tipo y distribución geográficas, se realizaron gráficos de barras y de barras apiladas. La variación espacial en la concentración de contaminantes se analizó mediante análisis de la varianza no paramétrico de Kruskal Wallis (p<0.05) y test U de Mann Whitney *a posteriori*, ya que no se cumplieron los supuestos de distribución normal de los residuos para realizar ANAVA (Infostat - Di Rienzo y col., 2020).

#### **4. Ajustar modelos de regresión múltiple para explicar la concentración de contaminantes en función de variables geográficas y meteorológicas.**

Primero se exploró la relación entre pares de variables, mediante un análisis de correlación de Spearman (coeficiente de correlación:  $\rho$ ), empleando las variables de respuesta (concentración de contaminantes) y las variables independientes o regresoras: DP, TC, I (número y tipo), US, B, CV, T, P, HR, Pp, VV y RS. La relación con las variables categóricas se probó utilizando análisis de la varianza no paramétrica de Kruskal Wallis y test U de Mann Whitney comparando diferencias en las variables de respuesta según estación, día de la semana y dirección del viento (N, S, E, O).

A los fines de ponderar el efecto conjunto de las variables y de generar un modelo explicativo de la concentración de contaminantes, se realizaron modelos de regresión lineal múltiple. De esta manera, se buscó obtener una función que proporcione el valor de la variable dependiente: concentración de GEI o partículas, a partir de la combinación lineal de una serie de variables independientes predictoras: de tipo o distribución geográficas y meteorológicas. Como se explicó anteriormente, se consideraron áreas buffer o zonas de influencia circulares de radio variable debido a que los patrones de distribución de los contaminantes dependen de procesos a diferentes escalas espaciales (Peng y col. 2016).

Los modelos se elaboraron en R (versión 4.3.1, 2023) y RStudio (versión 2023.06.2, 2023). Se empleó un enfoque de selección de variables utilizando el método paso a paso (Stepwise) con validación cruzada k-fold repetida. Este método realiza de manera automatizada la división del conjunto de datos en k subconjuntos, de los cuales k-1 se utilizan para entrenar el modelo y el restante se utiliza para la validación. El proceso se repite varias veces, utilizando diferentes combinaciones de subconjuntos, para obtener una estimación más robusta del rendimiento del modelo. El entrenamiento de los modelos de regresión utiliza el método leapSeq, que es una técnica de selección de variables del paquete caret (Kuhn, 2008). Así, se evaluaron modelos con diferentes combinaciones de variables predictoras para encontrar el modelo óptimo que minimizara el error cuadrático medio (RMSE). El uso de validación cruzada k-fold repetida en todos los casos garantiza una evaluación robusta del rendimiento del modelo en datos no vistos, contribuyendo así a la generalización efectiva del modelo a nuevos conjuntos de datos.

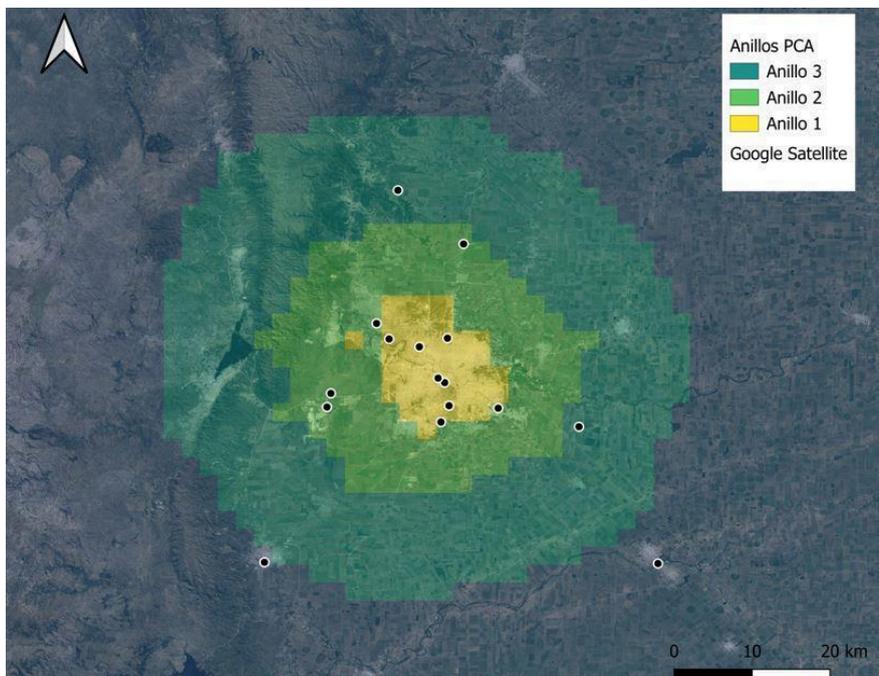
## **5. Elaborar propuestas de mitigación de la contaminación atmosférica para la provincia de Córdoba.**

A partir de los resultados obtenidos en las correlaciones simples y los modelos de regresión lineal múltiple, se discutieron aquellas variables que podrían ser gestionadas en un plan de mitigación, teniendo en cuenta las condiciones socio-económicas de la región.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Elección de sitios

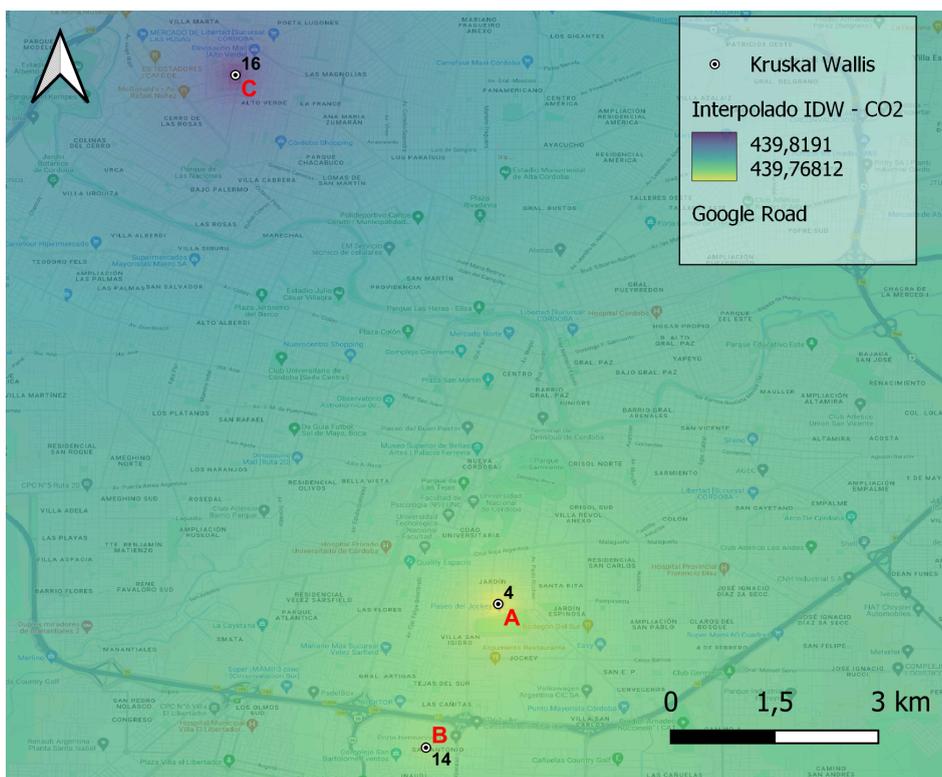
Se identificaron dos componentes principales, el Componente Principal 1 (CP1) explicó el 76,27 % de la variabilidad y estuvo principalmente vinculado con NO<sub>x</sub> y Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs) de caminos (bandas 48 y 25); y el Componente Principal 2 (CP2) explicó el 18,63% de la varianza. El CP1 mostró un patrón tipo “anillos concéntricos”, por lo cual, a partir de ese resultado, se definieron 3 anillos concéntricos alrededor de la ciudad de Córdoba,. En cada anillo se seleccionaron sitios urbanos(tránsito, residencial e industrias), agrícolas y áreas naturales, sumando un total de 16 sitios de muestreo, entre los 3 anillos. El uso del suelo se consideró de acuerdo a la capa disponible en la web de Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba (IDECOR, s.f), la cual contempla el Plan metropolitano de usos del suelo (Ley 9841). Además, para evitar la influencia de la topografía, se clasificó el área de interés de acuerdo a su pendiente en: pendiente plana o suave, pendiente moderada, pendiente moderada a fuerte, pendiente alta y pendiente extrema, utilizando un modelo digital de elevaciones (MDE) obtenido de la misma web (IDECOR, s.f). Todos los sitios elegidos se ubicaron en zonas de pendiente plana y/o moderada, donde la circulación del aire no se vea afectada por la topografía (Fig. 4 a y b).





A nivel de variación espacial, para la concentración de CO<sub>2</sub> se observó que existieron diferencias significativas entre los sitios ( $p < 0,05$ ), representadas por las distintas letras A, B y C (Fig. 5). En el sitio 16 la concentración fue mayor, seguida por el sitio 14 y el sitio 4. Esto puede deberse a la ubicación del mismo, el cual es cercano a grandes emplazamientos comerciales, al anillo de “Circunvalación”, como así también a la estación de trenes “Rodríguez del Busto” (B° Alto Verde). A su vez, presenta menor cantidad de espacios verdes en comparación con los sitios 4 y 14 lo cual podría indicar que estos espacios actúan como sumideros de CO<sub>2</sub>. Esto se discutirá cuando se presenten los resultados de correlación con la variable “cobertura verde”.

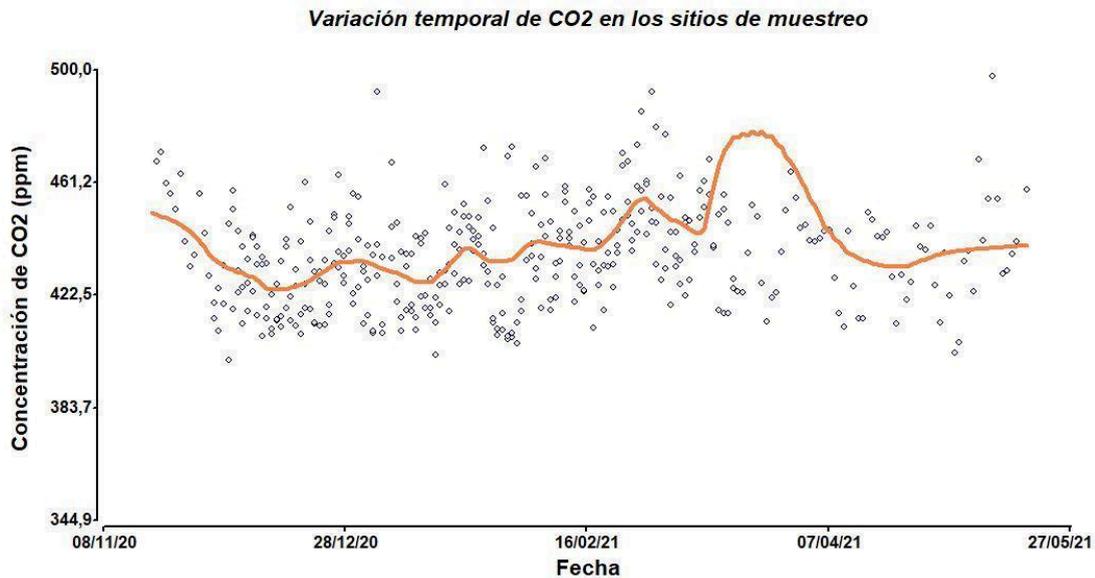
Cabe destacar que la interpolación aquí realizada no es del todo representativa debido a la escasa cantidad de sitios de muestreo y datos recolectados.



**Fig. 5.** Variación espacial de las concentraciones promedio de CO<sub>2</sub> (ppm) en el AMC en el período 2020-2021. Estimación realizada por IDW. Se señalan los sitios donde se realizaron los muestreos.

En cuanto a la variación temporal, en la Fig. 6 se observa un aumento paulatino con oscilaciones, alcanzando su máximo de concentración en marzo para luego disminuir

comenzado el otoño. Dicho comportamiento puede deberse a que los datos fueron recolectados durante el “Aislamiento Social, Preventivo y Obligatorio”, y en marzo comenzaron a relajarse las medidas de confinamiento.



**Fig 6.** Variación temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> (ppm) en los distintos sitios de muestreo para el periodo 2020-2021. La curva naranja representa un suavizado LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing: Suavizado Local de Diagrama de Dispersión Ponderado, Infostat, di Rienzo y col. 2020 )

En relación a la concentración de PM<sub>2.5</sub>, se encontró que existieron diferencias significativas para todos los sitios. El sitio 16 fue el que presentó los valores de concentración más altos en relación a los sitios restantes (Fig. 7). Las razones de esta configuración espacial en la concentración de PM<sub>2.5</sub> pueden ser similares a las postuladas para CO<sub>2</sub>, la ubicación espacial y la escasa cobertura de espacios verdes como sumideros. En el caso de PM<sub>2.5</sub> existe evidencia que a medida que disminuye la cobertura verde, aumenta la concentración de partículas debido a la disponibilidad de las mismas para ser resuspendidas (Mignola, 2020).

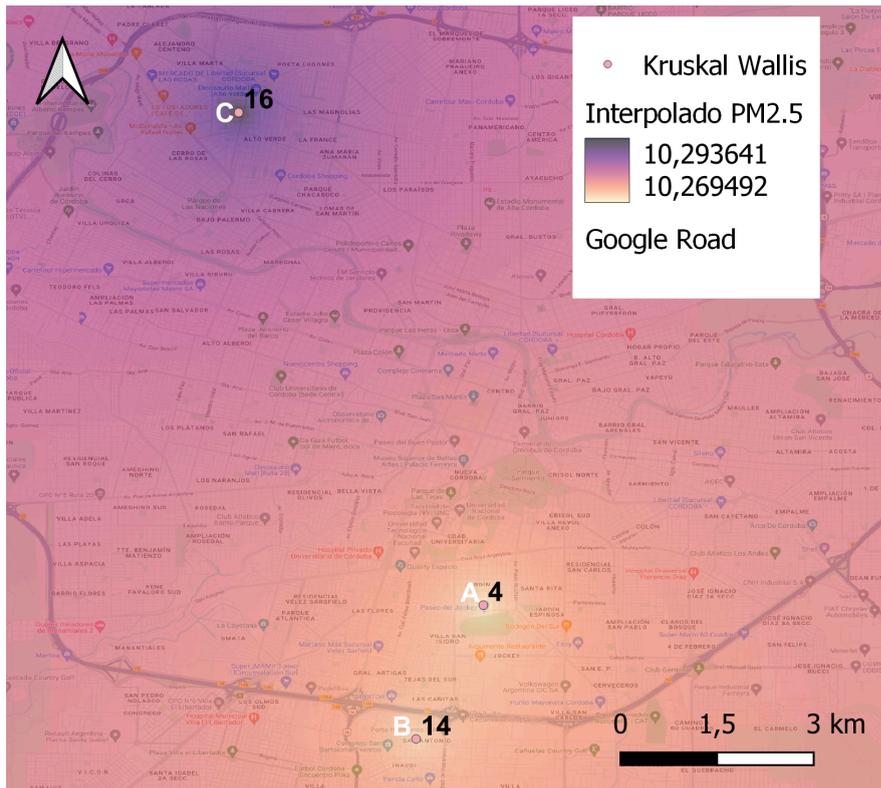
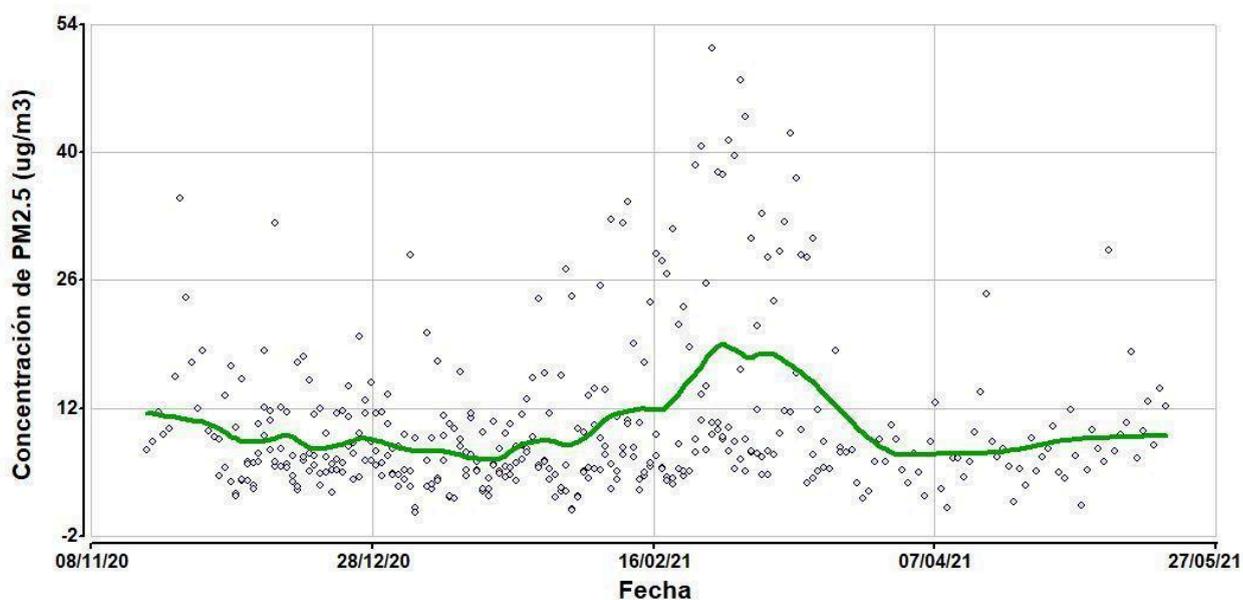


Fig. 7. Variación espacial de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  ( $\mu g/m^3$ ) en el AMC. Estimación realizada por IDW. Se señalan los sitios donde se realizaron los muestreos.

En cuanto a la variación temporal de dicho contaminante, se observaron dos picos alrededor del mes de marzo de 2021 (Fig. 8). Existen antecedentes que reportan mayores valores de PM durante los períodos invernales debido a la inversión térmica (López y col., 2011, Mignola, 2020). En el presente trabajo ese comportamiento típico no alcanza a observarse porque los muestreos fueron insuficientes y no alcanzaron a recolectar datos en dicha época del año. Además, al igual que el  $CO_2$ , los años en que se realizaron las mediciones corresponden al ASPO, y como se dijo anteriormente, en marzo de dicho año se empezaron a permitir cada vez más actividades y mayor circulación de personas.

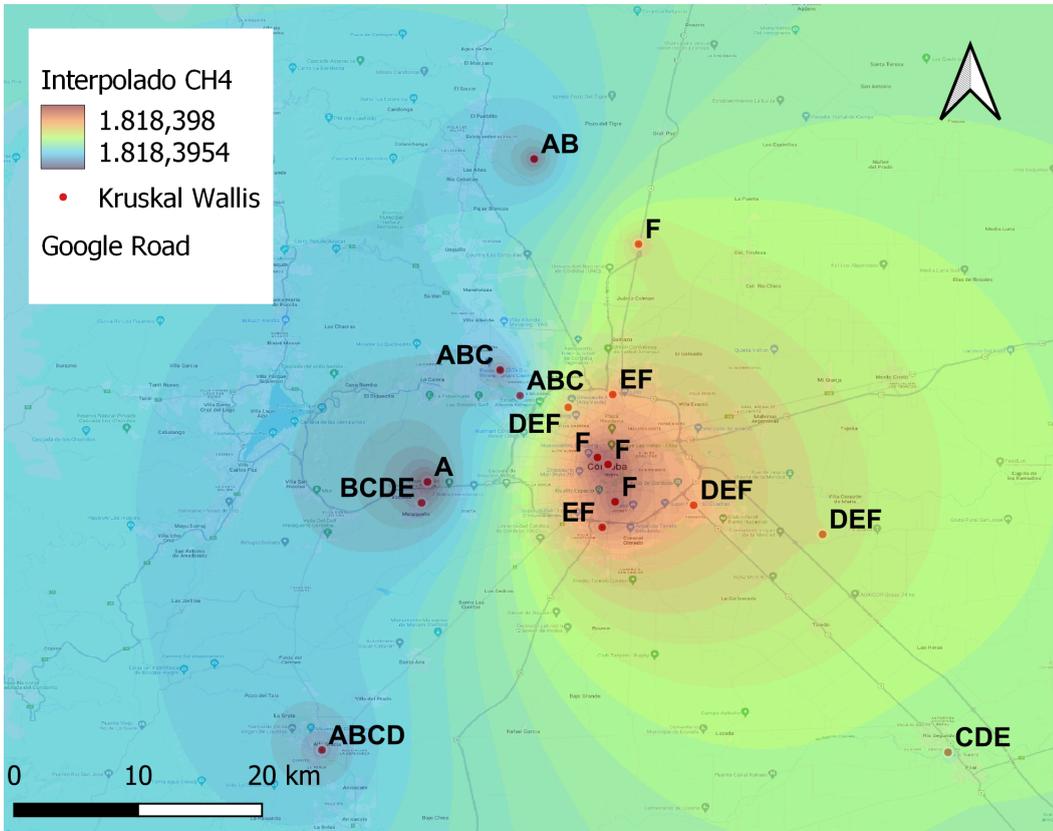
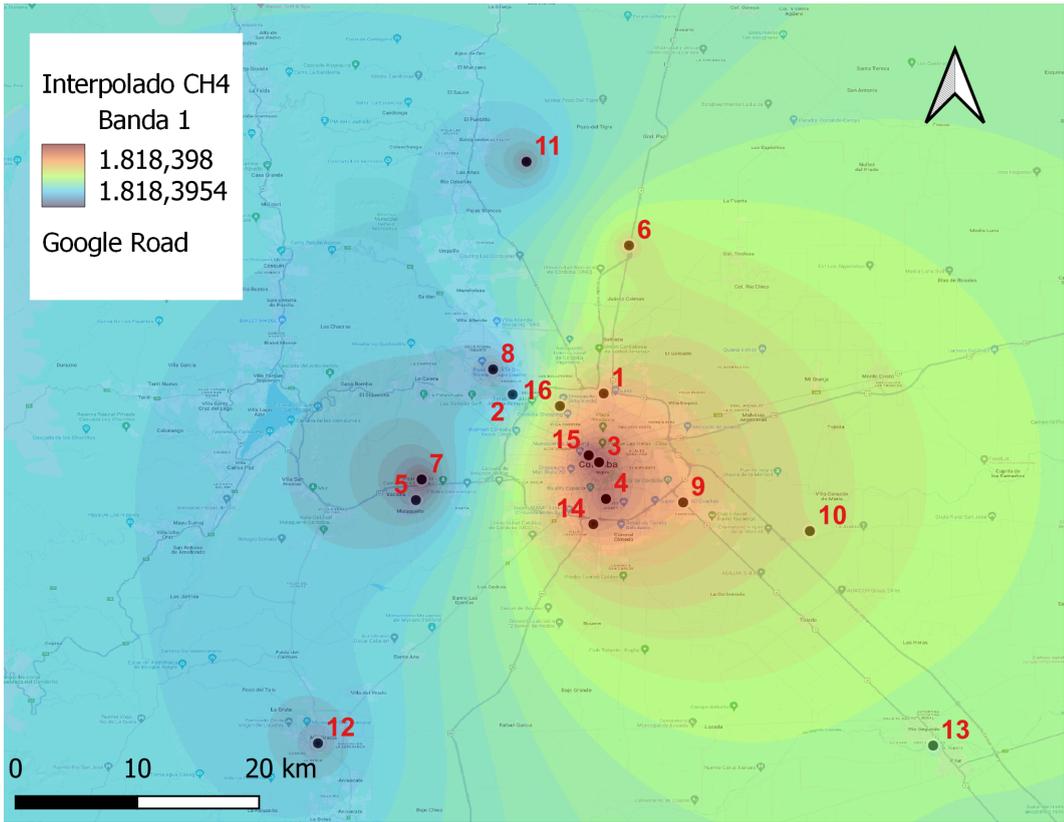
### Variación temporal de PM<sub>2.5</sub> en los sitios de muestreo



**Fig 8.** Variación temporal de la concentración de PM<sub>2.5</sub> (ug/m<sup>3</sup>) en los distintos sitios de muestreo para el período 2020-2021. La curva verde representa un suavizado LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing: Suavizado Local de Diagrama de Dispersión Ponderado, Infostat, di Rienzo y col. 2020 )

## 2. Describir la variación espacio-temporal en la concentración de CH<sub>4</sub> y O<sub>3</sub> medidos mediante sensado remoto.

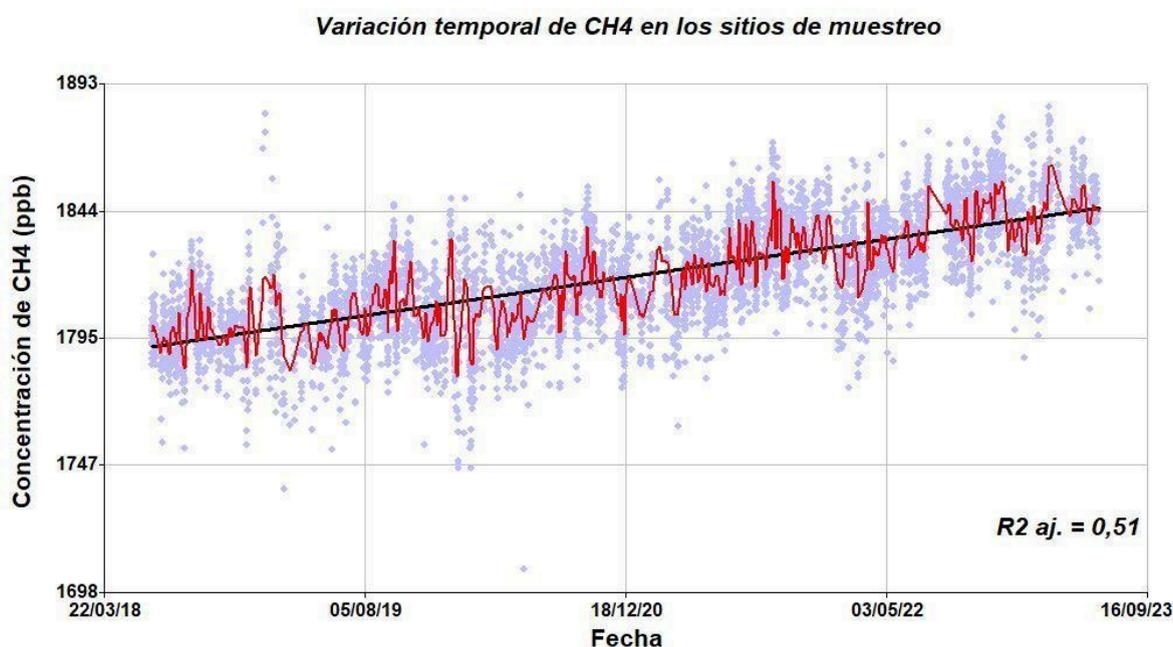
Los siguientes mapas muestran la variación espacial de las concentraciones de CH<sub>4</sub> (ppm) y O<sub>3</sub> (mol/m<sup>2</sup>) en el AMC. Cada sitio está definido por su número (del 1 al 16) y las diferencias significativas, obtenidas mediante un análisis de la varianza no paramétrica de Kruskal Wallis, se representan a través de las diferentes letras.



**Fig. 9. a)** Variación espacial de las concentraciones de CH<sub>4</sub> (ppb) en el AMC. Se señalan los sitios donde se realizaron los muestreos. **b)** Resultado de Kruskal Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas.

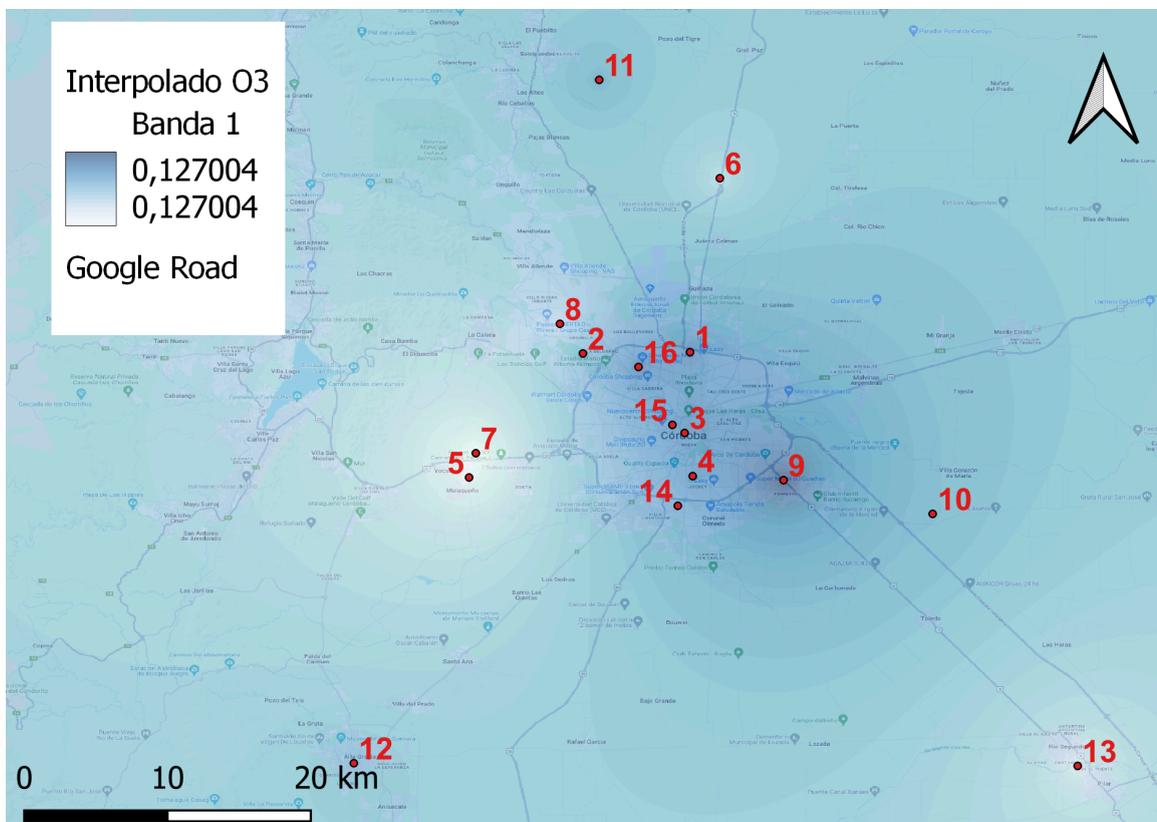
Para la concentración de CH<sub>4</sub> se observó que existieron diferencias significativas entre los sitios ( $p < 0,05$ ) (Fig. 9b). Las concentraciones más elevadas se observaron en los sitios 3, 4, 15 y 6, los tres primeros correspondientes a las zonas del centro de la ciudad (Urbano), mientras que el sitio 6 se encuentra a las afueras de la ciudad y corresponde a una zona agrícola (Fig. 9a). Esta distribución espacial concentrada en la zona céntrica puede deberse a la actividad humana: basurales a cielo abierto, uso de combustibles fósiles, infraestructura de distribución de gas (fugas), entre otros. El valor más bajo de concentración se observó en el sitio 7.

En relación a su variación temporal, el CH<sub>4</sub> muestra una tendencia creciente muy evidente año tras año (Fig.10). Este mismo resultado obtuvieron Javadinejad y col. (2019) en su trabajo sobre la variación estacional de CH<sub>4</sub> en relación al cambio climático mediante la utilización de datos satelitales. En el mismo se confirma la tendencia creciente del CH<sub>4</sub> en los últimos años en distintas partes del mundo. Este patrón claro y esperable podría estar explicado por: el crecimiento poblacional, mala gestión de residuos sólidos, cloacales, aumento del número de industrias, aumento de la temperatura, etc.



**Fig. 10.** Variación temporal de la concentración de CH<sub>4</sub> (ppb) en los distintos sitios de muestreo para el período 2018-2023. La curva roja representa un suavizado LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing: Suavizado Local de Diagrama de Dispersión Ponderado). Se muestra la recta de ajuste lineal y el R<sup>2</sup> (Infostat, di Rienzo y col. 2020).

En relación a la concentración promedio de  $O_3$ , al realizar el análisis no paramétrico de Kruskal Wallis se obtuvo un p-valor  $>0.05$  resultando no significativo estadísticamente. Es por esta razón que en el mapa de distribución espacial de las concentraciones se puede observar que todos los sitios presentan similar concentración del contaminante en cuestión (Fig. 11). A diferencia de lo reportado en el trabajo de Mateos y col (2018) quienes reportaron diferencias espaciales entre sitios en datos fueron tomados en terreno, en este trabajo no hay diferencias significativas espacialmente. Una posible explicación a esto es que el dato satelital no esté reflejando dicha variabilidad espacial debido a que la medición se realiza teniendo en cuenta toda la columna de aire de la troposfera.

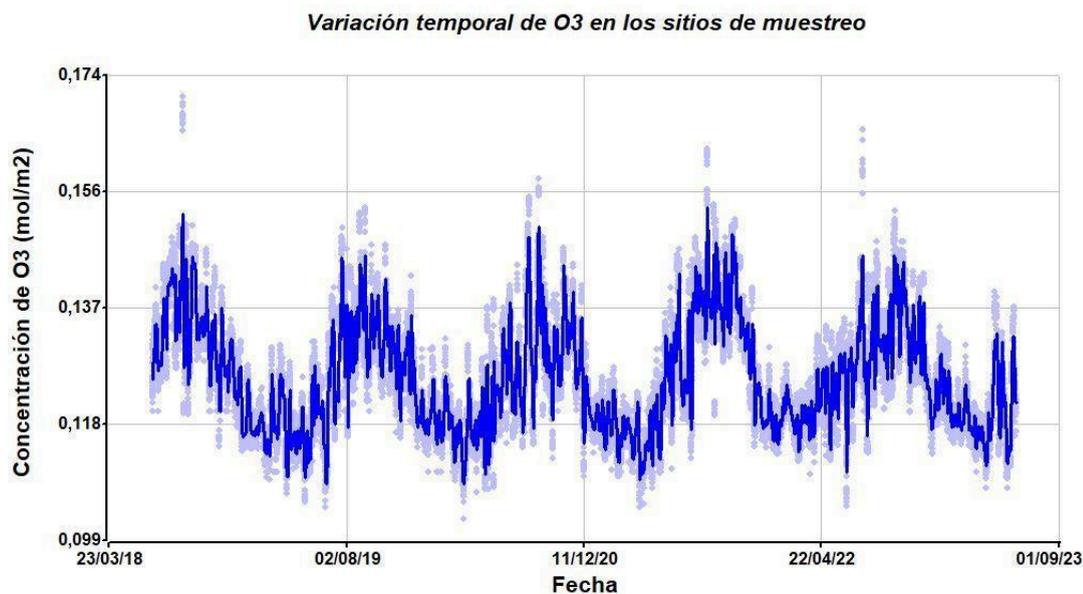


**Fig. 11.** Distribución espacial de las concentraciones de  $O_3$  ( $mol/m^2$ ) en el AMC. Se señalan los sitios donde se realizaron los muestreos.

A pesar de no observarse diferencias espaciales para la resolución empleada, el  $O_3$  presenta una clara variación estacional, con picos en aumento hacia la primavera (mayores temperaturas) y valores bajos en otoño (Fig. 12). Si bien no se observaron diferencias significativas, se encontraron valores mayores en la estación de primavera.

Li y col (2022) describieron una variación estacional de  $O_3$  en la que la concentración máxima más alta se observa en verano, seguida por la primavera, y la concentración más baja se registró en invierno. Mateos y col. (2018) realizaron un monitoreo en la ciudad de Córdoba con sensores electroquímicos en terreno, una década atrás y describieron diferencias estacionales según los sitios. Por ejemplo, en la zona residencial norte la concentración resultó mayor en otoño e invierno, mientras que en verano fue mayor en una zona agrícola, y en primavera, en la zona de industrias. Sin embargo, en este trabajo (mediciones satelitales), se encontraron siempre concentraciones más altas de  $O_3$  durante el comienzo de la primavera, luego en otoño y verano. La concentración de este gas generalmente es más alta en verano debido a la intensa radiación solar y a la mayor actividad fotoquímica, pero hay casos en los que las concentraciones de ozono pueden ser altas en invierno o primavera. Esto puede deberse a la existencia de incendios que ocurren en nuestra provincia a finales de invierno y la primavera (Olcese y Toselli, 1998; Mateos, 2019).

Además, el hecho que la concentración de ozono sea más alta en invierno- primavera puede suceder por el fenómeno de inversión térmica, que puede atrapar a los contaminantes cerca de la superficie aumentando las concentraciones de  $O_3$ . A su vez, este fenómeno hace que se concentren los precursores del  $O_3$ , como son los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y los COVs, los cuales tienen, entre otras fuentes, el tráfico vehicular y las emisiones residenciales (calefacción).



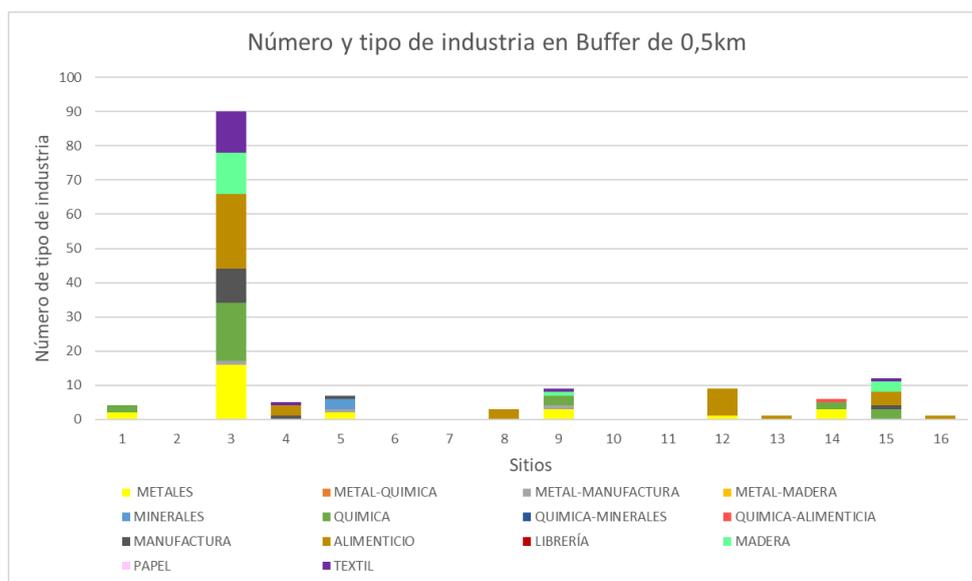
**Fig. 12.** Variación temporal de la concentración de  $O_3$  ( $mol/m^2$ ) en los distintos sitios de muestreo para el período 2018-2023.

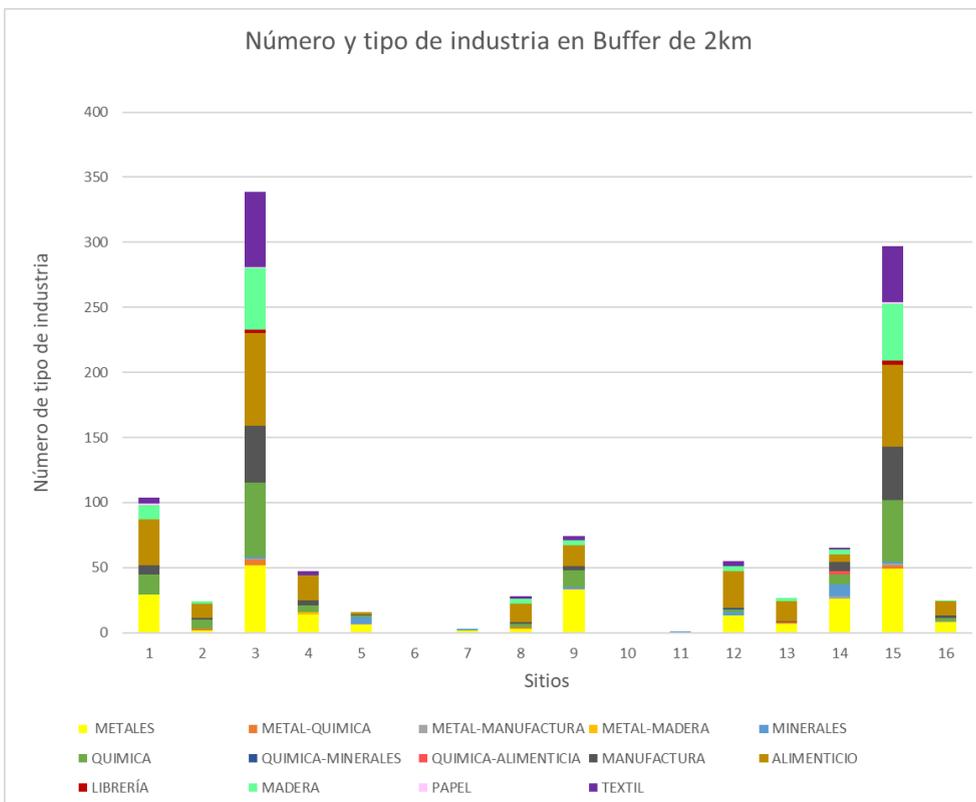
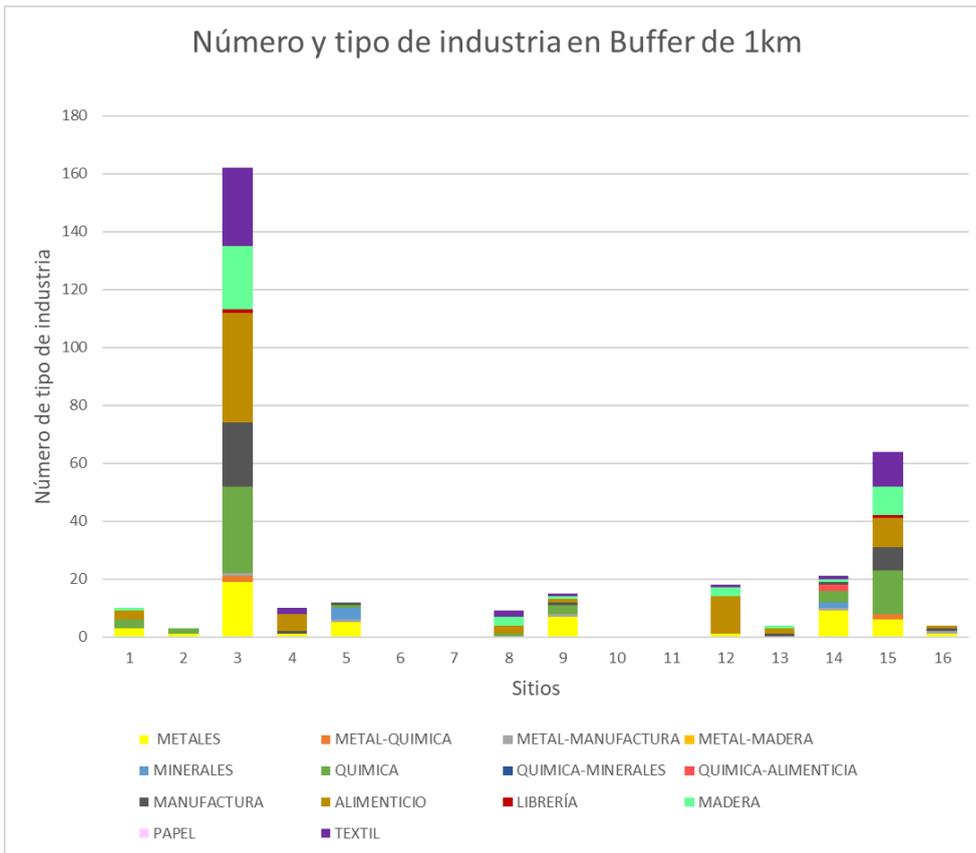
### 3. Generar capas de información geográfica y obtener información meteorológica a partir de información disponible.

#### Industrias / Procesos industriales y uso de productos (I)

En las siguientes figuras (Fig. 13 a, b y c) se puede observar que a una escala de Buffer 0,5 km, existe una mayor proporción de industrias y mayor diversidad de las mismas en el sitio 3, predominando aquellas del tipo A, Q y Met, seguido por Man, Md y Tx. Los sitios 2, 6, 7, 10 y 11 no presentan industrias, esto puede deberse a que son zonas donde hay escasos asentamientos, es decir zonas alejadas de las grandes urbes y con un uso de suelo del tipo agrícola o verde, careciendo de la infraestructura necesaria para albergar grandes emplazamientos industriales (Fig. 13a).

A escala intermedia (Buffer 1km) se incrementa lo observado con anterioridad, presentándose una mayor proporción de industrias en el sitio 15, similar al 3 (Fig. 13b). En todas las escalas espaciales el sitio 3 es el que se destaca por su gran diversidad y proporción de industrias. Esto puede deberse a su ubicación, en pleno centro, pero también a que quizás exista una sobreestimación de los datos resultado de la falta de información supervisada en terreno para verificar la precisión de la capa aquí analizada. A su vez, de los sitios que no presentaron industrias a escala pequeña (2, 6, 7, 10 y 11) esto cambia paulatinamente para los sitios 2 y 7, pero el número de industrias sigue siendo menor en comparación al resto de los sitios.





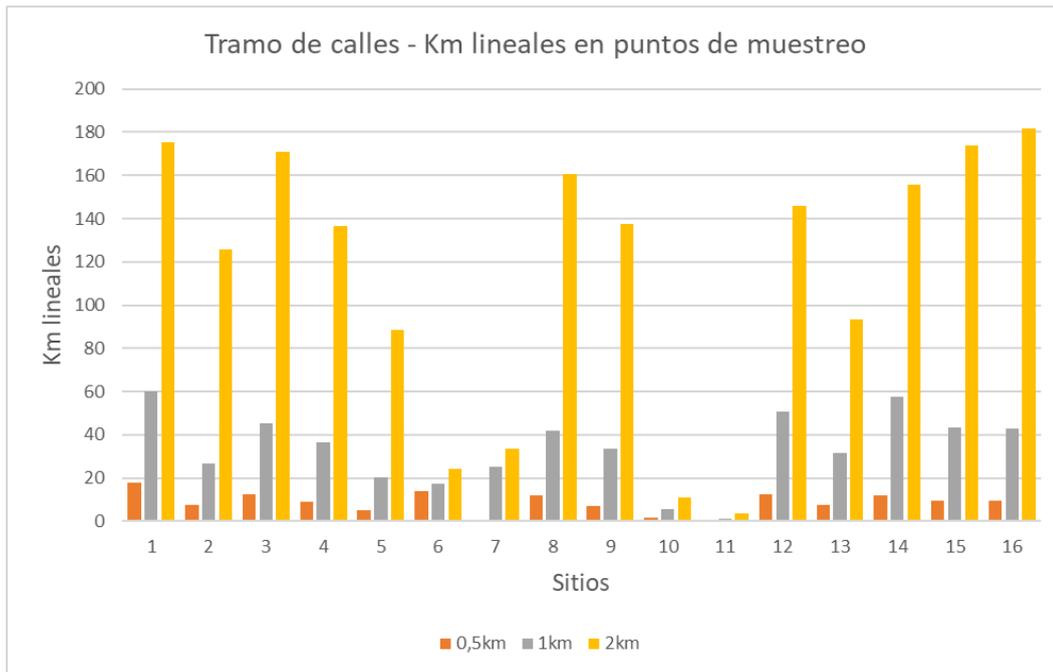
**Fig 13. a, b y c.** Cantidad (número) y tipo de industria para los sitios analizados a distintas escalas espaciales (buffers).

## Sector energía

### - Tramo de Calles (TC) [km lineales]

En la Fig. 14 se muestra la sumatoria, en km lineales de calles, para cada sitio a distintas escalas espaciales. A simple vista se puede observar que a una escala pequeña no existe gran variación en la mayoría de los sitios, a excepción de los sitios 7, 10 y 11 los cuales presentaron los valores más bajos y se corresponden a zonas alejadas de la ciudad, del tipo rurales (La Perla, FCA y Campo privado); este bajo valor en cuanto a km de calles puede deberse a que por ejemplo el punto de muestreo se encontraba en un área central de dichos sitios donde no hubieran calles alrededor. A su vez, esta información se puede contrastar con la de uso de cobertura de suelo (Fig. 16), dando cuenta de que en su mayoría poseen tierras cultivadas y/o tierras forestales. A medida que aumentamos la escala espacial en estos sitios en particular, el sitio 7 presenta mayor aumento de **TC**, debido a que incluye a la ruta 20 y otras calles de la zona de Malagueño, en cambio los sitios 10 y 11 se mantienen bajos. En el resto de los casos se dio un aumento moderado de **TC** a una escala de buffer de 1km, y a una escala mayor el aumento fue abrupto, en especial en aquellos sitios que se ubican dentro del anillo de circunvalación (ciudad de Córdoba) y en ciudades de los alrededores (sitio 12 y 13 correspondientes a Residencial Suroeste y Pilar-Río Segundo).

En el buffer de 2km los sitios que presentaron valores más altos fueron el 16 y el 1, ubicados en la zona norte de la ciudad de Córdoba donde la cobertura de uso de suelo es principalmente de asentamientos (incluye infraestructura vial); le siguieron los sitios 3 y 15, también de zonas urbanas pero en pleno centro de la ciudad.



**Fig 14.** Sumatoria de km lineales de calles para los distintos puntos de muestreo a diferentes escalas espaciales.

**- Densidad Poblacional (DP) [hab/km<sup>2</sup>]**

La Fig. 15 muestra la densidad poblacional para cada sitio a diferente escala espacial. Los sitios más densamente poblados fueron los sitios 3 (FCEFYN - sede Centro) y 15 (Residencial centro). Le siguen los sitios 1, 4, 12 y 16, los cuales se encuentran dentro del anillo de la circunvalación que rodea a la ciudad de Córdoba, a excepción del sitio 12 que se encuentra en la zona céntrica de la ciudad de Alta Gracia. Aquellos que presentaron los valores más bajos de densidad poblacional fueron los ubicados a las afueras de la ciudad, sitios 6, 7, 10 y 11. En dichos sitios con mayor densidad se observa un aumento de la misma al reducir la escala espacial (buffer 0,5km), esto coincide con una zona donde existe un gran desarrollo inmobiliario con muchas edificaciones. En cambio en los sitios más alejados de la ciudad, la relación fue inversa: 2, 5, 8, 9, 13, 14 y 16; esto puede deberse a que por ejemplo el sitio 14 es una zona que concentra gran diversidad de centros industriales ocupando importantes superficies o en el sitio 2, donde nos encontramos con la Reserva Natural Urbana General San Martín que posee grandes extensiones de bosque, obteniendo así zonas con poca población.

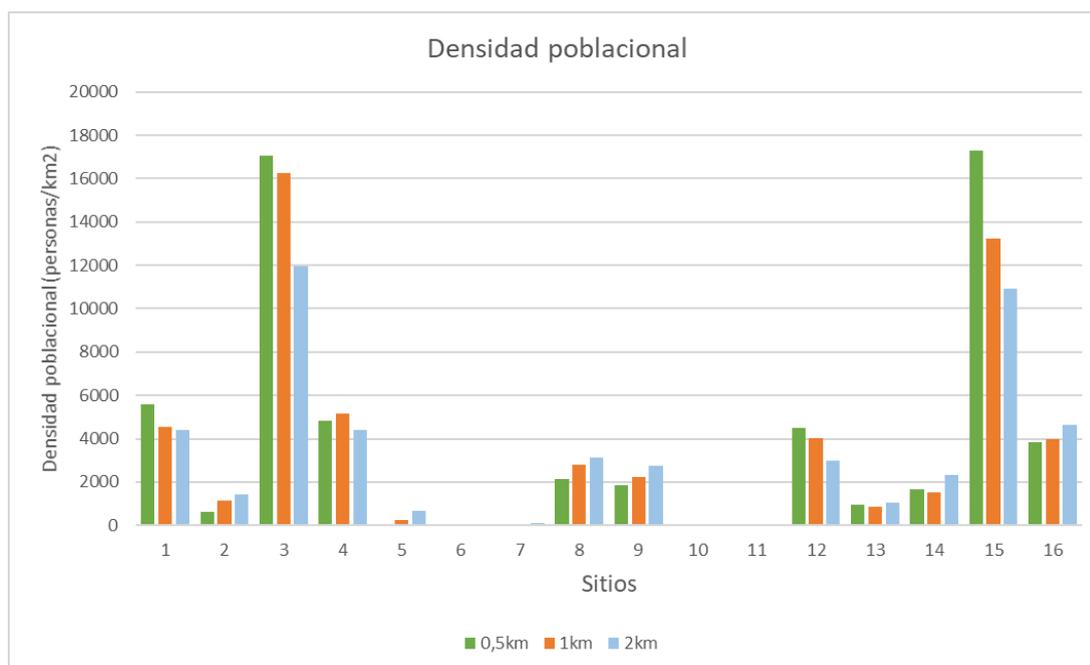


Fig. 15. Densidad poblacional (número de habitantes/km<sup>2</sup>) en cada punto de muestreo y para cada área buffer.

### **Sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra:**

#### **- Uso de suelo de 1ha (US) [%cobertura de uso]**

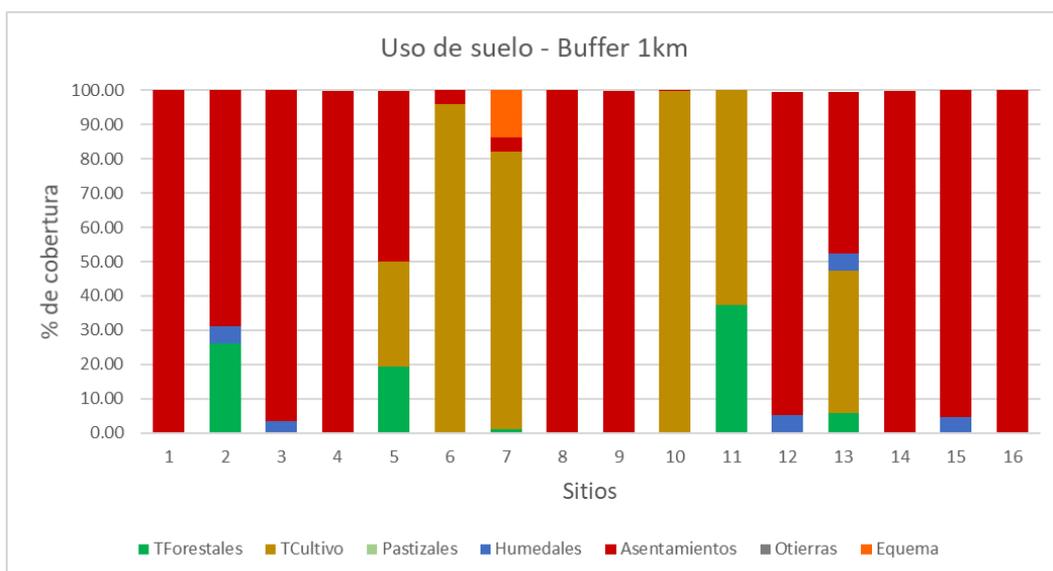
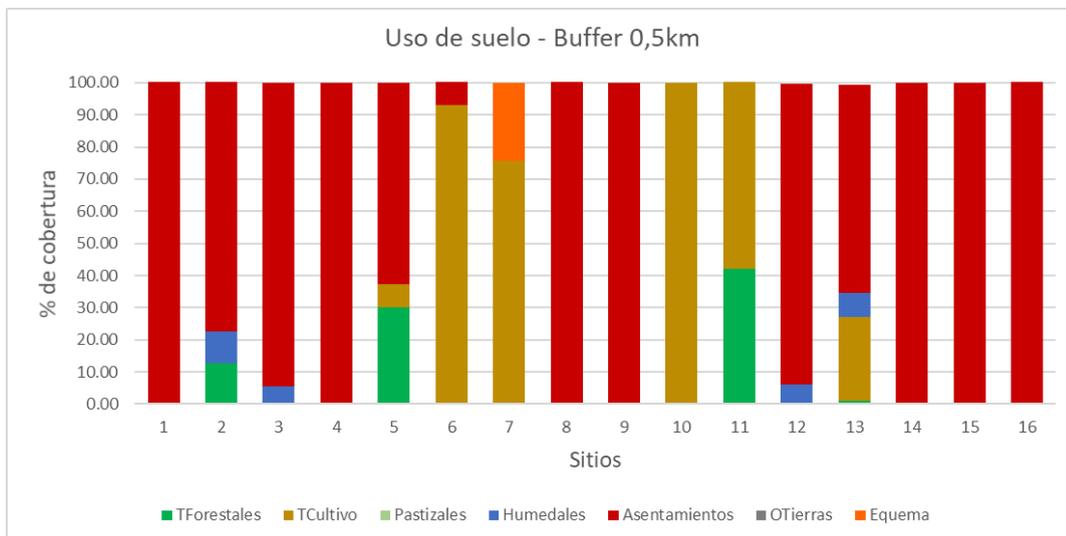
En las siguientes figuras (Fig. 16 a, b y c) se muestran los porcentajes de cobertura de uso de suelo para los 16 sitios analizados a distintas escalas espaciales (buffer 0,5km; buffer 1km y buffer 2km).

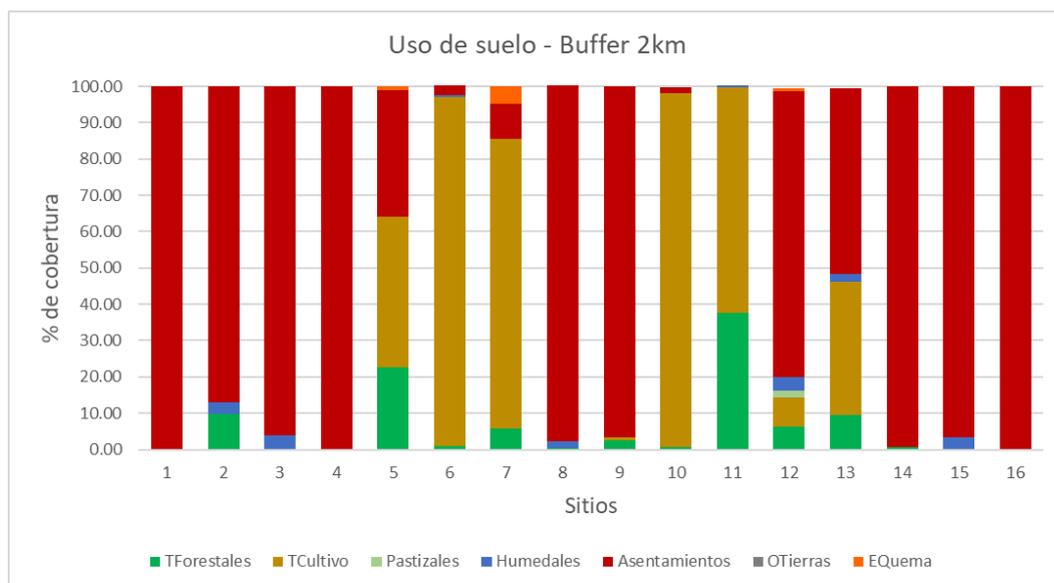
Los sitios 1, 4 y 16 son los únicos que presentan un tipo de uso de suelo el cual no varía al cambiar la escala de trabajo, es decir, solamente hay asentamientos (Urbano de distinta compacidad e infraestructura vial). Estos puntos se encuentran en zonas residenciales y céntricas de la ciudad, donde existen gran cantidad de edificaciones y pocos espacios verdes. Sucede algo similar con los sitios 8, 9, 14 y 15 pero presentan una leve variación al cambiar la escala espacial a 2km. El sitio 12 a escala de 2km es el único sitio que tiene representado todos los usos de suelo, aunque con predominio del tipo **As** (Fig. 16c).

En el sitio 10, correspondiente al Campo Escuela de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), predominan en todas las escalas el uso del suelo **Tcul**.

En el sitio 2 se da un caso particular a distintas escalas en relación a la cobertura de **Tf**. A la menor (0,5km) y a la mayor escala (2km) poseen un porcentaje de cobertura menor y similar en comparación a una escala intermedia (1km) donde se da el mayor porcentaje de cobertura de este tipo de uso de suelo. Esto puede deberse a que a una escala mayor comienzan a aparecer zonas de urbanización (barrios cerrados, calles internas y tramos de Av. “Circunvalación”) por lo cual se ve reducido el porcentaje de **Tf** mientras el de **As** aumenta. En cambio a una escala menor ocurrió que el área buffer fue construída a partir de un punto donde había pequeñas edificaciones y calles de tierra, contribuyendo a un mayor valor de **As** (Fig. 15a).

El sitio 7 correspondiente a la zona del Espacio para la Memoria “La Perla” presenta un nuevo tipo de cobertura que corresponde a **Eq** (vegetación leñosa afectada por incendios), también aparece en el sitio 5 pero en pequeña proporción.





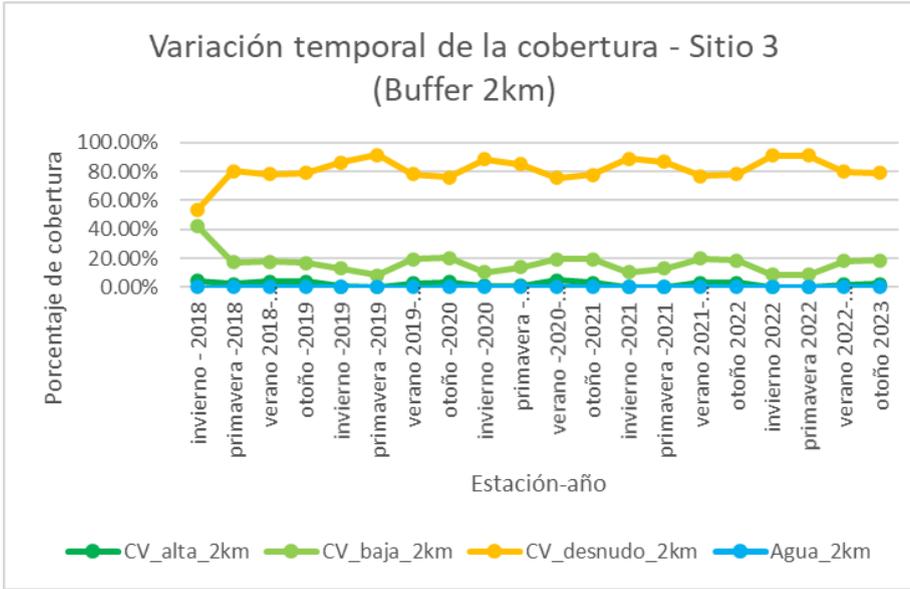
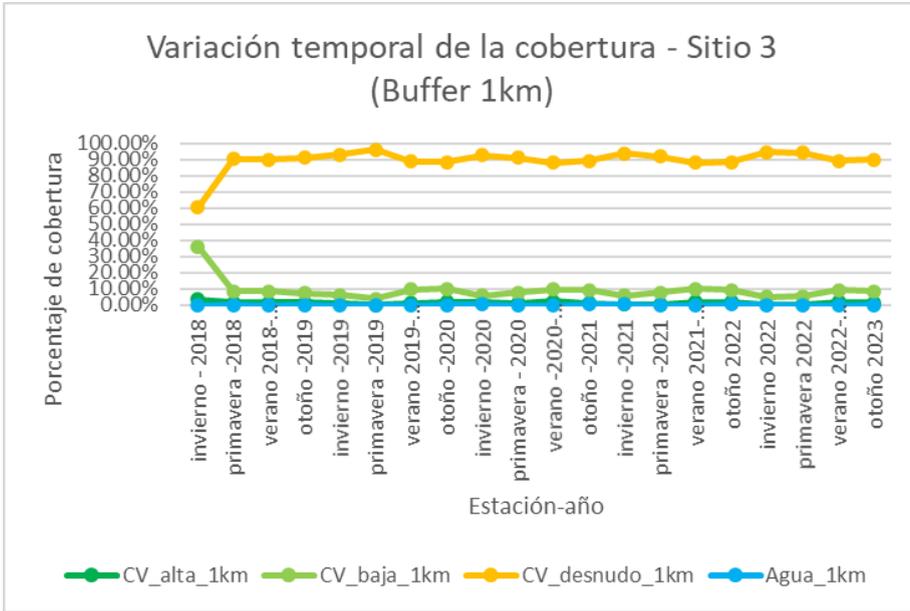
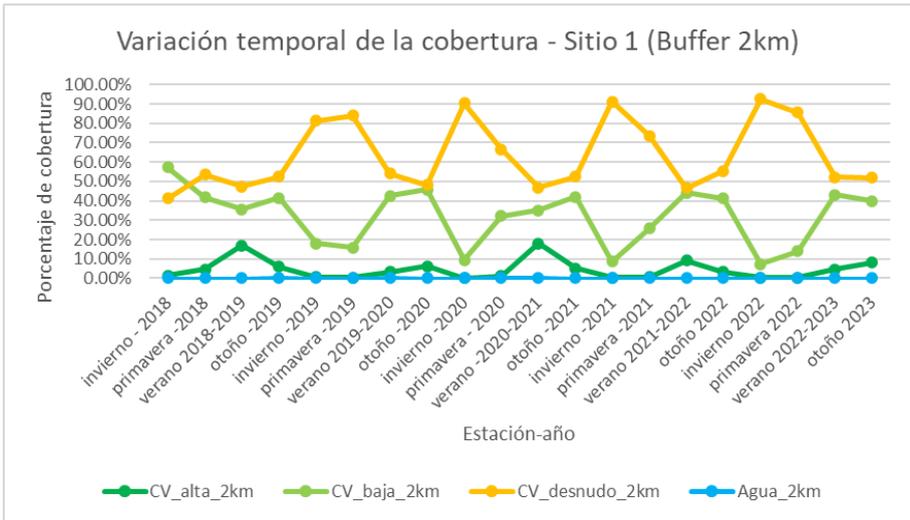
**Fig. 16. a, b y c.** Porcentajes de cobertura de uso de suelo para los sitios analizados a distintas escalas espaciales (buffers).

#### - Cobertura verde (CV)

Para la variable cobertura verde se obtuvieron gráficos de variación temporal del porcentaje de cobertura para cada sitio y a distintas escalas espaciales, los mismos se pueden observar con mayor detalle en las Figs. 19 a 34 del material suplementario. En la gran mayoría de los sitios no se observaron grandes variaciones del patrón a distintas escalas espaciales, lo que sí presentó una leve variación fue el porcentaje de cobertura a medida que aumentaba la escala espacial.

Se observa un patrón opuesto entre los picos y valles en la mayoría de los sitios, en donde en otoño-invierno hay predominio de **CVsd** mientras que la **CVad** y/o **CVbd**, dependiendo el sitio, se encuentra en su punto más bajo de cobertura. Durante la primavera-verano el porcentaje (pico) de **CVad** y/o **CVbd** aumenta, mientras que el de **CVsd** disminuye, pero siempre se mantiene por debajo de este último, en especial en zonas donde el uso del suelo es predominantemente del tipo **As**. En el caso del sitio 3 se observa poca variación a escala de 1km, manteniéndose siempre por encima la **CVsd** y siendo la **CVad** escasa en todo momento (Fig. 17a). A una mayor escala (2km), las variaciones de la **CVsd** empiezan a ser un poco más notorias, presentando disminuciones leves en los períodos cálidos (primavera - verano), mientras que la **CVbd** tiende a aumentar, pero siempre por debajo de la **CVsd** (Fig. 17b).

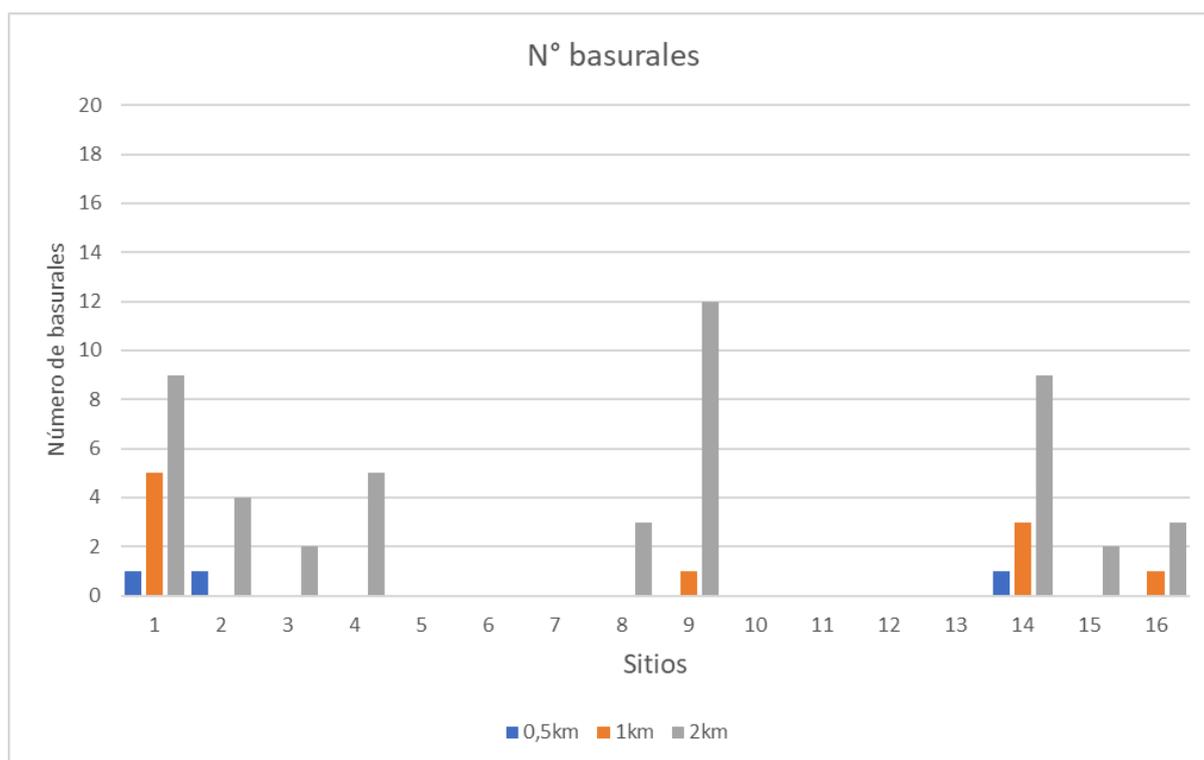
El siguiente gráfico muestra la variación temporal en el porcentaje de cobertura de cada categoría para el sitio 1. Los demás sitios se muestran en el anexo.



**Fig. 17 a).** Variación temporal del porcentaje de cobertura vegetal (ARVI) para el sitio 1 a escala espacial de 2km, durante el período analizado 2018-2023. **b y c)** Variación temporal del porcentaje de cobertura vegetal (ARVI) para el sitio 3 a escala espacial de 1 y 2km, durante el período analizado 2018-2023.

**Sector desechos (B) [nro de basurales]:**

El siguiente gráfico (Fig. 18) muestra el número de basurales por cada punto de muestreo a distintas escalas espaciales. Se puede observar que los sitios 1 y 14 son los únicos que presentan basurales en cada una de las áreas de influencia analizadas, aumentando el número de los mismos de manera proporcional a la escala espacial. Existen sitios, como el 5, 6, 7, 10, 11, 12 y 13, para los que no se encontraron basurales, esto puede deberse quizás a que los datos estén incompletos o desactualizados para dicha capa o también que muchos de estos sitios presentan zonas de uso de suelo del tipo **Tcul**. En los sitios restantes, los basurales son reportados únicamente en el área buffer de 2km.



**Fig. 18.** Número de basurales (B) en cada punto de muestreo a diferentes escalas espaciales.

**4. Ajustar modelos de regresión múltiple para explicar la concentración de contaminantes en función de variables geográficas y meteorológicas.**

Los coeficientes de correlación de Spearman para CH<sub>4</sub> y O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> con las variables cuantitativas meteorológicas y geográficas se muestran en las tablas 4A y 4B. Aquí se tomaron en cuenta sólo las correlaciones estadísticamente significativas. Luego fueron puestas a prueba mediante un análisis de la varianza no paramétrica de Kruskal Wallis.

**Tabla 4A.** Coeficientes de correlación de Spearman entre las concentraciones de CH<sub>4</sub> y O<sub>3</sub> y las variables geográficas y meteorológicas. Período: 2018 - 2023

<b>Coeficiente de correlación de Spearman</b>								
Variable respuesta (contaminante)	Dato puntual	CH <sub>4</sub>			Dato puntual	O <sub>3</sub>		
		0,5km	1km	2km		0,5km	1km	2km
<b>Variables geográficas estáticas</b>								
DP		0.570*	0.525*	0.516*				
TC		0.579*						
Met			0.565*	0.610*				
Met - Q			0.574*					
Met - Man								
Met - Md								
Min								
Q		0.616*	0.445	0.551*				

Q - Min								
Q - A								
Man		0.517*	0.633**	0.691**				
A								
L			0.574*	0.574*				
Md		0.526*						
Ppl				0.573*				
Tx		0.604*		0.528*				
Tf			-0.647**	-0.711**				
Teul								
Pz								
Hum								
As		0.498*						
Ot		0.000						
Eq								
B								0.503*
<b>Variables geográficas dinámicas</b>								
CVad		-0.216* *	-0.225**	-0.231* *		-0.596* *	-0.619* *	-0.627* *
CVbd		-0.254* *	-0.276**	-0.277* *		-0.230* *	-0.256* *	-0.279* *

CVsd		0.314**	0.328**	0.334**		0.386**	0.419**	0.468**
CVag								
<b>Variables meteorológicas</b>								
T	0.13**				-0.34**			
HR	-0.11**				-0.34**			
P	0.025*				0.051**			
VV	0.023*				0.11**			
Pp	-0.063**				-0.2**			
RS	0.05**				-0.049**			

Se muestran sólo los coeficientes de correlación significativos. \*p<0,05; \*\* p<0,01. Los nombres completos de las variables estudiadas se encuentran en la sección “Materiales y métodos”.

**Tabla 4B.** Coeficientes de correlación de Spearman entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> con las variables geográficas y meteorológicas. Período 2020 - 2021

<b>Coeficiente de correlación de Spearman</b>								
Contaminante	Dato puntual	CO <sub>2</sub>			Dato puntual	PM <sub>2.5</sub>		
		0,5km	1km	2km		0,5km	1km	2km
<b>Variables geográficas estáticas</b>								
DP		-0.109*	-0.109*	0.174*				0.496**
TC		0.109*	0.109*	0.364*				0.626**

Met				-0.174*		-0.286*	-0.286**	-0.496**
Met - Man			0.295**	0.109*			0.371**	
Met - Md				-0.295*				-0.371**
Min							-0.286**	-0.286**
Q				-0.174*		-0.286*	-0.286**	-0.496**
Q - Min								
Q - A						-0.286*	-0.286**	-0.286**
Man		-0.295**		-0.174*		-0.371*		-0.496**
A		-0.109*	-0.109*	-0.109*				
L								
Md				0.109*			-0.286**	
Ppl								
Tx		-0.295**	-0.364*	-0.364*		-0.371*	-0.626**	-0.626**
Tf								-0.286**
Tcul								
Pz								
Hum								
As								0.286**
Ot								

Eq								
B			0.109*	-0.174*		-0.286*		-0.496**
<b>Variables geográficas dinámicas</b>								
CVad		0.141**		-0.128*				-0.455**
CVbd		0.130*	0.146**	-0.103*				-0.370**
CVsd		-0.162**					0.291**	0.406**
CVag			-0.154*				-0.134**	
<b>Variables Meteorológicas</b>								
T□	0.147**				0.365**			
HR	0.103**							
P					-0.315*			
VV	-0.173**							
Pp								
RS	-0.169**							

Se muestran sólo los coeficientes de correlación significativos. \* $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ . Los nombres completos de las variables estudiadas se encuentran en la sección “Materiales y métodos”.

Para analizar la diferencia en la concentración de los contaminantes en función de las variables categóricas: día de la semana, estación y dirección del viento, se realizó un análisis de Kurkall Wallis, obteniéndose para el  $\text{CH}_4$  diferencias significativas en los días de la semana, ordenándose de la siguiente manera: Jueves > Viernes - Domingo - Lunes > Martes - Miércoles - Sábado ( $p < 0,05$ ). Cuando se compararon las concentraciones en función de la

variable “estación”, se obtuvieron mayores concentraciones en: Primavera> Verano - Otoño > Invierno. Con respecto a la variable “Dirección del viento”: Norte> Este - Oeste > Sur. Cabe destacar que cuando el viento proviene del Norte su velocidad es significativamente más alta en relación al resto, por lo que los contaminantes podrían estar siendo transportados distancias más largas.

En el caso del  $O_3$ , los datos obtenidos de dicha variable relacionada con el “día de la semana” fueron: Jueves> Viernes - Miércoles - Martes - Lunes - Domingo > Sábado. En cuanto a “estación”: Invierno > Primavera > Verano - Otoño. En relación a la dirección del viento, se obtuvo: Sur> Oeste > Este> Norte. Tal como se discutió en el apartado 2 (resultados), la variación estacional de este contaminante puede estar relacionada a los incendios que ocurren en épocas invernales y primaverales en nuestro territorio.

No existieron diferencias en la concentración de  $PM_{2.5}$  respecto a las variables “día de la semana”, “estaciones” ni “dirección del viento”. En el caso de  $CO_2$ , en relación a la variable “estación”, se observó que: Otoño - Verano> Primavera. No sería correcto interpretar esta diferencia dado la falta de representatividad de las estaciones en el muestreo, por el corto período de tiempo analizado. No se encontraron diferencias significativas en cuanto a los días de la semana y dirección del viento.

En los siguientes párrafos se discuten las correlaciones encontradas para cada uno de los contaminantes, que se mostraron en la tabla 4A y 4B.

## $CO_2$

Para el  $CO_2$  y las variables meteorológicas se obtuvieron tanto relaciones negativas como positivas, a saber:  $T_{\square}$ , HR, -VV, -RS. En cuanto a la VV y la concentración de  $CO_2$  podemos decir que existe una relación negativa y un grado de correlación débil entre las variables. El hecho de que la relación sea inversa (negativa) puede deberse a que a mayor VV los contaminantes atmosféricos tienden a dispersarse, pudiendo reducir así su concentración en la zona donde se tomaron los datos. En relación a la  $T_{\square}$  y HR, las relaciones que observamos fueron positivas en contraposición a lo encontrado por Tovar (2017), en donde se identifica una conexión estrecha entre el incremento de PM y  $CO_2$  con la disminución de la temperatura y el incremento de la humedad en el ambiente. En trabajos realizados sobre niveles de  $CO_2$  de tránsito vehicular en la ciudad de Toluca, México, se encontró una relación positiva entre la concentración de este contaminante y HR en invierno debido a que ésta última impediría su dispersión (Unzueta Diego, A. L.,2023).

En cuanto a las variables geográficas,  $\text{CO}_2$  se correlacionó significativamente con  $\text{CV}$ , en general y para todas las escalas espaciales, con  $+\text{TC}$ ,  $-\text{DP}$  y  $\text{B}$  (con signo variable según la escala), como así también con las industrias  $-\text{Met}$ ,  $-\text{Met-Man}$ ,  $-\text{Q}$ ,  $-\text{Man}$ ,  $-\text{A}$ ,  $+\text{Md}$  y  $-\text{Tx}$ . Las  $\text{CVad}$  y  $\text{CVbd}$  se relacionan negativamente, lo cual sugiere que en áreas con mayor cobertura vegetal existe menor concentración de  $\text{CO}_2$ , esto se debe a que los espacios verdes actúan como sumideros.

La  $\text{DP}$  mostró una relación significativa pero baja, incluso variable modificando la escala espacial. Esto puede atribuirse a la calidad de los datos que no son representativos debido al corto período de tiempo y a la vez son escasos.

La relación con  $\text{B}$  no es del todo clara y varía con la escala espacial. Esto indica la falta de información suministrada por la capa, un subregistro. Al ser una fuente puntual de contaminación, la relación con el  $\text{CO}_2$  en cada día depende de la dirección del viento.

Los coeficientes negativos en torno a la actividad industrial resultaron muy diferentes a los esperados, ya que ninguna de las industrias mostró una correlación positiva con  $\text{CO}_2$ , y no solo eso, sino que la relación fue de tipo negativa. Esto refleja que los datos no son del todo representativos, fueron pocas mediciones en sólo 3 sitios y durante la pandemia. Otro motivo para esta falta de consistencia, puede ser que el domicilio fiscal de las industrias no coincide con la verdadera ubicación de las mismas.

### **$\text{PM}_{2.5}$**

Para  $\text{PM}_{2.5}$  se encontraron relaciones significativas entre algunas de las variables meteorológicas:  $+\text{T}\square$  y  $-\text{P}$ . En relación a la  $\text{T}\square$  se obtuvo una correlación positiva, esto también puede observarse en la **Fig 8**, que muestra la variación de la concentración de dicho contaminante en el período de muestreo. Nuevamente, y como se mencionó anteriormente en el apartado 1 (resultados), lo esperado hubiera sido una relación inversa entre  $\text{T}\square$  y  $\text{PM}_{2.5}$  ya que durante el invierno, donde se registran las temperaturas más bajas, se da el máximo de concentración de dicho contaminante (Mignola, 2020). Además de esto, los muestreos no alcanzaron a tomar datos en esta temporada. En relación a  $\text{P}$  la correlación fue negativa, en contraposición a lo reportado por Amarillo (2015) para la ciudad de Córdoba. Esto puede deberse al breve período de tiempo analizado para este contaminante.

El  $\text{PM}_{2.5}$  presentó una correlación negativa con la  $\text{CVad}$  y  $\text{CVbd}$ , aunque las variables no fueron retenidas en los modelos. Esto indica que a medida que disminuye la cobertura vegetal, las partículas aumentan, relación que también fue reportada por Mignola

(2020). Esta relación inversa podría explicarse por diversos factores. Por un lado, la presencia de mayor vegetación puede reducir la velocidad del viento, lo que a su vez disminuiría la resuspensión de partículas y aumentaría la tasa de deposición de las que se encuentran en el aire. Además, esto implicaría la existencia de poca disponibilidad de partículas para ser suspendidas (Mignola, 2020). A esta misma situación la podemos observar en la correlación de  $PM_{2.5}$  con los usos de suelo del tipo **Tf** y **As**, donde se relacionan de manera negativa con **Tf** y de manera positiva con **As**, indicando que en zonas altamente urbanizadas el  $PM_{2.5}$  aumenta. Esto va de la mano con el **TC**, en donde existen más km lineales de calles en zonas céntricas, por lo tanto urbanizadas, resultando en un aumento de partículas.

En relación a industrias, ocurrió algo similar a lo reportado para  $CO_2$  donde los coeficientes fueron negativos. Cabe destacar que estos datos fueron tomados en conjunto con los de  $CO_2$  en el mismo período y en los mismos sitios.

### **O<sub>3</sub>**

Para **O<sub>3</sub>** se encontraron relaciones significativas entre todas las variables meteorológicas, pero en mayor grado y con una correlación inversa para **T** y **HR**. El **O<sub>3</sub>** es un contaminante secundario que se forma por la interacción de precursores ( $NO_2$  y COVs) en presencia de la luz solar (**RS**) (Mateos, 2018). La relación negativa entre este contaminante y la **T** puede deberse a que la inversión térmica, que ocurre en nuestra ciudad (López y col., 2011, citado en Mignola, 2020), estaría jugando un papel crucial en la formación de  $O_3$  atmosférico al atrapar los contaminantes cerca de la superficie y permitir que reaccionen y formen **O<sub>3</sub>** en condiciones de luz solar intensa. Además, la concentración de precursores como  $NO_x$  y VOCs puede influir significativamente en la producción de **O<sub>3</sub>**.

En relación a **-RS** puede ser el resultado de factores como la altura de la capa de mezcla, que puede variar con la radiación solar, encontrándose más alta en verano. Esta variación estacional de dicha capa fue reportada por Della Ceca (2018), en donde se obtuvo una correlación positiva entre la misma y la temperatura. A su vez, ésta tiende a aumentar su altura a medida que la temperatura es más elevada. Entonces, teniendo en cuenta esto, con una capa de mezcla más alta, los precursores del ozono pueden dispersarse más fácilmente, lo que podría conducir a una disminución de la concentración de ozono en la superficie.

En cuanto a su relación con **CV**, la misma resultó negativa cuando la cobertura vegetal era del tipo **CVad** y **CVbd**, y positiva cuando fue **CVsd**. Esto puede deberse al proceso de absorción del  $O_3$  por parte de las plantas, el cual se da a través de los estomas y

está regulado tanto por factores internos como externos, como pueden ser las condiciones climáticas (Bermejo y col., 2009). En el caso de que exista contaminación atmosférica en la zona, el funcionamiento de los mismos va a verse alterado, por tanto puede que exista una disminución o daño en la cobertura vegetal.

#### **CH<sub>4</sub>**

Para el **CH<sub>4</sub>** y las variables meteorológicas se obtuvieron las siguientes relaciones con su signo: **+T**, **- HR**, **- Pp**, **+RS**. En cuanto a la **T**, podemos decir que esta relación positiva puede tener que ver con la actividad microbiana en los suelos o con la descomposición de la materia orgánica y la liberación del contaminante, procesos que se aceleran o que se ven favorecidos a medida que aumenta la temperatura. Pero en el contexto del presente trabajo, que abarca el AMC y en donde las mayores concentraciones se observaron en el centro de la Ciudad de Córdoba (Fig. 9a y b) esto podría estar relacionado a la actividad humana y al uso de combustibles fósiles. En el caso del estudio realizado por Urteaga (2016) esta correlación se reportó de manera inversa y estuvo asociada al uso de calefacción (pérdidas) en los hogares durante los meses más fríos (otoño - invierno).

Para **HR** la relación fue negativa, una de las posibles razones puede ser que a mayor **HR** puede haber una menor actividad de microorganismos que producen metano como subproducto, lo que resultaría en una menor liberación de dicho contaminante hacia la atmósfera. En el trabajo publicado por Javadinejad y col. (2019) también se reporta una correlación negativa, esto se lo atribuyen a los radicales libres de **OH•** en el aire seco. A su vez estos autores informan una correlación negativa con **Pp**, situación que también se observó en este trabajo. Esto podría deberse a que las lluvias tienden a reducir las emisiones de **CH<sub>4</sub>** al modificar las condiciones del suelo y el transporte del gas, lo que resulta en una correlación negativa entre ambos.

Para **+RS** podría estar sucediendo que se esté estimulando la actividad fotosintética de las plantas, lo que puede aumentar la producción y liberación de materia orgánica al suelo. Ésta, cuando se descompone en condiciones anaeróbicas, puede generar metano como subproducto. Además, **RS** puede influir en la temperatura del suelo y en la actividad microbiana, lo que también puede afectar la producción de metano.

En cuanto a las variables geográficas existieron correlaciones significativas con **- CV** en todas las escalas espaciales, con **+ As** a una escala pequeña, con **-Tf** y con gran variedad

de industrias de manera positiva (**Tx**, **Ppl**, **Md**, **L**, **Man**, **Q**, **Met-Q**, **Met**) al igual que con **TC** y **DP**.

La correlación negativa entre la concentración de **CH<sub>4</sub>** y **CV**, que indica mayor concentración del contaminante a medida que hay menos **CV**, puede deberse a que los sistemas arbóreos aumentan la capacidad del suelo para absorber y oxidar el metano. Los bosques y forestaciones, al tener suelos más aireados, actúan como sumideros de este gas (De Bernardi y col., 2022).

En relación a **DP**, la correlación positiva puede deberse a que, como se explicó con anterioridad en el apartado 2, está muy asociado a actividades humanas como el sistema de red cloacal, el uso de combustibles fósiles, etc. Esto va de la mano con **TC**, que también se relaciona de manera positiva con el **CH<sub>4</sub>** y tiene que ver más que nada con el tránsito vehicular. En el trabajo publicado por Urteaga (2016) se observa algo similar, en donde la variación espacial en la concentración de **CH<sub>4</sub>** se atribuye a actividades que se realizan en las cercanías de los sitios de muestreo, y en especial a problemas locales en el sistema de distribución de gas, las variaciones en la densidad de población y el tráfico vehicular.

En cuanto a la actividad industrial, se correlacionó con casi todas y de manera positiva. Es común que en la producción de hierro y acero, propio de las industrias **Met**, se libere **CO<sub>2</sub>** y **CH<sub>4</sub>**, razón por la cual esta relación es positiva. A mayor cantidad de **Met** habrá mayor concentración del contaminante en cuestión (IPCC, 2006. Vol. 3, Cáp. 4, p. 4.10). Con respecto a **Q**, en muchas industrias se utiliza al **CH<sub>4</sub>** como materia prima para producir otros compuestos. Cabe destacar que el **CH<sub>4</sub>** es el principal componente del gas natural y se utiliza principalmente para producir luz y calor, por lo cual esto podría estar explicando la relación positiva entre muchas industrias como **Ppl**, entre otras.

### ***Modelos de regresión***

En la Tabla 2 se muestran los resultados de los modelos predictivos para cada contaminante junto con sus valores de  $R^2$  aj. y RMSE.

**Tabla 2.** Modelos de regresión múltiple ajustados para O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

Variable respuesta	Fórmula	R <sup>2</sup> aj.	RMSE
O <sub>3</sub>	$O_3 \sim 0,2483*(\text{Intercept}) - 0,01085 * \text{estación Otoño} + 0,002612 * \text{estación Primavera} - 0,007542 * \text{estación Verano} - 0,0003825 * T - 0,0001007 * HR - 0,0003123 * VV - 4,875e-07 * RS + 0,002585 * CV_{bd} 2km - 7,209e-07 * B 2km$	0,506	0,0064 80098
CH <sub>4</sub>	$CH_4 \sim 1554*(\text{Intercept}) + 9,699*\text{estación Otoño} - 1,027*\text{estación Primavera} + 7,788*\text{estación Verano} + 0,8254*T + 40,19*CV_{sd} 2km - 457,9*CV_{ag} 2km + 0,009292*TC 2km - 0,1884*Met 2km + 12,74*Tf 0,5km + 0,27*B 2km$	0,1717	18,514 48
CO <sub>2</sub>	$\log CO_2 \sim 1,845*(\text{Intercept}) + 0,04967*SITIO 16 - 0,01319*SITIO 4 - 0,009583*\text{estación Primavera} + 0,000471*\text{estación Verano} + 0,002465*T - 0,000259*HR + 0,003758*P - 0,006119*VV - 4,45 \times 10^{-6}*Pp - 4,897 \times 10^{-6}*RS$	0,2182	0,0360 1500
PM <sub>2.5</sub>	$\log PM_{2.5} \sim -30,11*(\text{Intercept}) + 0,997*SITIO 16 - 0,159*SITIO 14 + 0,0327*P - 8,547e-05*RS + 0,06585*T \square$	0,4877	0,5347 565

El modelo resultante para O<sub>3</sub> explica un 50% de su variabilidad en el período analizado. En el caso del CH<sub>4</sub> esta variación se explicó en un 17% con el modelo obtenido. Respecto al CO<sub>2</sub> se encontró que el modelo explicó el 21% de su variabilidad, mientras que para PM<sub>2.5</sub> el modelo logra explicar un 48% de su variación.

Es importante destacar que estos modelos presentan limitaciones debido a que las variables geográficas consideradas son estáticas. Por esta razón, para analizar la relación entre las variables geográficas y meteorológicas, se tomaron en cuenta los resultados de las correlaciones simples significativas.

## 5. Elaborar propuestas de mitigación de la contaminación atmosférica para el Área Metropolitana de Córdoba.

La lucha contra el cambio climático se centra en dos estrategias fundamentales: adaptación y mitigación. En el presente trabajo, y basado en las relaciones previamente analizadas entre las variables de interés, se propone tomar como estrategia la mitigación, la cual se centra en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y/o fortalecer la capacidad de absorción de los mismos (Plan Nacional de adaptación y mitigación al cambio

climático, 2019). En base a los resultados obtenidos a lo largo del trabajo, se pudo observar que las variables geográficas que aparecen en los modelos y en las correlaciones que tienen mayor relevancia son las de CV y TC. A partir de esta observación se proponen medidas de mitigación que apunten a mejorar, y por ende a reducir las concentraciones de GEI, los sectores relacionados a la cobertura vegetal y al tramo de calles; este último entendido como una variable que estima de manera indirecta el consumo de energía (uso de combustibles fósiles en automóviles). Cabe aclarar que estas medidas se piensan teniendo en cuenta las posibilidades socioeconómicas del territorio.

#### *En relación a CV.*

Plan de forestación (sumideros): Se propone la forestación en zonas donde exista potencial de ampliación, como ser en áreas periféricas del AMC, creando cinturones forestales. Dentro de la ciudad podría evaluarse a través de mapas aquellos lotes o zonas industriales, que suelen estar en la periferia de las ciudades, susceptibles a ser forestadas. Se sugiere utilizar especies arbóreas estratégicamente seleccionadas para reducir la dispersión de aerosoles y capturar material particulado. Además, se promueve el uso de vegetación arbórea nativa de uso múltiple, que pueda ser aprovechada de manera sostenible. Así mismo se propone una estrategia de manejo de cobertura forestal en áreas agrícolas como ser el establecimiento de acuerdos con productores agrícolas para garantizar una cobertura continua del suelo a lo largo del año, evitando el suelo desnudo. Esto podría lograrse mediante la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, como rotación de cultivos y cobertura vegetal permanente, con el apoyo económico del gobierno o incentivos para los productores que adopten estas prácticas.

### *En relación a TC*

Algunas de las propuestas podrían ser la promoción del transporte público y de calidad: Incentivar el uso del transporte público mediante la mejora de la calidad y cobertura del servicio, la implementación de tarifas accesibles y la ampliación de la red de transporte.

Otra posibilidad y que ya se está implementando mucho en la ciudad de Córdoba es fomentar la movilidad sustentable: uso de medios de transporte no motorizados, como la bicicleta y caminar, mediante la creación de infraestructuras seguras y cómodas, como carriles bici y veredas peatonales, y la implementación de programas de bicicletas compartidas. Restricciones al tráfico vehicular: implementar medidas de restricción al tráfico vehicular en áreas urbanas congestionadas, como zonas de bajas emisiones o peatonalización de calles, especialmente en el centro de la ciudad, y promover la implementación de horarios escalonados para reducir la congestión vehicular. Control riguroso y mensual de las emisiones de contaminantes por parte de los vehículos.

Además de las medidas propuestas, es esencial reconocer el papel fundamental de la educación ambiental y la concientización en este proceso. Enfatizar la realización de campañas de sensibilización y programas educativos sobre la importancia de reducir las emisiones de GEI, promover hábitos de cuidado y respeto por el ambiente, y fomentar la participación ciudadana en la lucha contra el cambio climático son acciones clave para promover una cultura de sostenibilidad en la comunidad.

## **CONCLUSIÓN**

En el presente estudio se llevó a cabo un análisis de la variación espacio-temporal de la concentración de GEI y  $PM_{2.5}$  como así también de la relación entre éstos y variables tanto geográficas como meteorológicas, con el objetivo de elaborar propuestas de mitigación acordes a la escala espacial analizada. Para esto se emplearon modelos de LUR e información geográfica obtenida mediante teledetección. Sin embargo, los datos de concentración de  $CO_2$  y  $PM_{2.5}$  fueron recolectados en un número bajo de puntos de muestreo (3) y en un período de tiempo escaso (finales del 2020 - principios del 2021) lo que puede haber afectado la representatividad de los datos.

A pesar de lo mencionado anteriormente, los datos obtenidos de observaciones satelitales y mediciones *in situ*, proporcionaron información valiosa para comprender la distribución y variabilidad de los contaminantes atmosféricos en el área de estudio. Se

podieron observar también ciertas limitaciones con algunas de las capas de información geográfica utilizadas, como la presencia de información no supervisada a terreno en la capa de industrias, así como metadatos incompletos en otras capas. Estos hallazgos resaltan la importancia de poder contar con información espacial sistematizada y de fácil acceso para los ciudadanos, aspecto clave para la planificación y la toma de decisiones en cuanto a políticas ambientales de mitigación del cambio climático.

En relación a los modelos múltiples obtenidos para las variables seleccionadas, consideramos que no fue el mejor modo de explicar la variación en la concentración de contaminantes debido a que las variables geográficas no presentaban variabilidad en el tiempo (datos estáticos). Es por esto que las relaciones simples fueron la manera más adecuada para explicar dicha variación.

Una contribución novedosa de este estudio, es la incorporación de observaciones satelitales, así como también el empleo de información geográfica, a nivel local para elaborar modelos predictivos que se ajusten a la realidad del lugar. Esta aproximación permitió proponer medidas de mitigación del cambio climático a escala local y regional, lo cual constituye un avance significativo en materia ambiental.

En conclusión, los resultados obtenidos en este trabajo subrayan la importancia de mejorar continuamente la calidad y accesibilidad de la información geoespacial para facilitar futuros estudios y la implementación de políticas efectivas de mitigación ante el cambio climático. A su vez destacamos el valor de mejorar la comunicación entre organismos gubernamentales y de gestión con la academia en cuanto a la producción y actualización de la información geográfica disponible. Para futuras investigaciones se sugiere la toma de datos en terreno, por períodos de tiempo más prolongados y la selección de variables geográficas que varíen en el tiempo que representen a los diferentes sectores de emisión de GEI y el desarrollo de estrategias específicas de mitigación adaptadas a diferentes escalas espaciales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alencar da Silva Alves, K. M., Parodi D'avila, M. C., Silva Nóbrega, R., & Opazo Albarran, D. (2019). Variabilidad espacial y temporal de la cobertura vegetal de los años 1984 a 2011 en la cuenca hidrográfica del río Moxotó, Pernambuco, Brasil. *Diálogo andino*, (58), 139-150.
- Alonso, C. “Mapa plan metropolitano de uso del suelo - Ley 9841” [Modelo vectorial, polígono]. Escala rural (1:50000) y urbana (1:5000). “Mapas Córdoba, Geoportal IDECOR de la Provincia de Córdoba”, 2019, <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/descargas> descargas, geografía social, Plan Metropolitano de Usos del Suelo - Ley 9841. (acceso el 9/11/2021)
- Amarillo, A., Carreras, H., Krisna, T., Mignola, M., Busso, I. T., & Wendisch, M. (2021). Exploratory analysis of carbonaceous PM<sub>2.5</sub> species in urban environments: Relationship with meteorological variables and satellite data. *Atmospheric Environment*, 245, 117987.
- Amarillo, A. (2015). “Contaminantes atmosféricos particulados en el área urbana de la Ciudad de Córdoba: impacto en la salud de la población”. Tesis de doctorado en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Cátedra de Química general. Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV) CONICET, Universidad Nacional de Córdoba.
- Argañaraz, J. P., Pizarro, G. G., Zak, M., Landi, M. A., & Bellis, L. M. (2015). Human and biophysical drivers of fires in Semiarid Chaco mountains of Central Argentina. *Science of the Total Environment*, 520, 1-12.
- Bermejo, V., Alonso, R., Elvira, S., Rábago, I., & García, M. (2009). El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación. Madrid, España, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (MARM) y el Centro de Investigaciones, Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
- Bertoni, J.C.; Ambrosino, S.; Barbeito, O.; Daniele, A.; Maza, J.A.; Ubaldo Paoli, C.; Serra, J.J. 2004. Inundaciones urbanas en Argentina. Disponible en: <https://www.ina.gov.ar/legacy/pdf/Libro-Inundaciones-Urbanas-en-Argentina.pdf>
- Buseck, P.R., Schwartz, S.E., 2003. Tropospheric aerosols. In: Turekian, K.K., Holland, H. D. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Science Ltd, New York, pp. 91–142.

- Camilloni, I. (2021). Impactos climáticos globales y en Argentina. Parte 2. [Material de aula]. Módulo 2.B.b. Diplomado de posgrado Bases y Herramientas para la Gestión Integral del Cambio Climático. Universidad Nacional de Quilmes, Universidad Nacional de Jujuy, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Argentina.
- Carranza, M. L., Hoyos, L., Frate, L., Acosta, A. T., & Cabido, M. (2015). Measuring forest fragmentation using multitemporal forest cover maps: Forest loss and spatial pattern analysis in the Gran Chaco, central Argentina. *Landscape and Urban Planning*, 143, 238-247.
- Chiodi, V. y Fontana, T, M.F. "MIN\_INFR\_CBA\_red vial\_ 2015.shp".[Vectorial, de líneas]. Escala provincial. "*Red vial de la Provincia de Córdoba*". 1 de abril de 2015. <https://fcefyn.unc.edu.ar/facultad/secretarias/investigacion-y-posgrado/-investigacion/equipo-de-ordenamiento-ambiental-del-territorio/> (acceso el 9/11/2021)
- Chiodi, V. y Fernández, M.F. "Sec\_Ind\_Parques\_Industriales".[Vectorial, de puntos]. Escala provincial. "*Parques Industriales*". 22 de noviembre de 2017. <https://fcefyn.unc.edu.ar/facultad/secretarias/investigacion-y-posgrado/-investigacion/equipo-de-ordenamiento-ambiental-del-territorio/> (acceso el 9/11/2021)
- Chiodi, V. y Fernández, M.F. "Sec\_Ind\_Industrias".[Vectorial, de puntos]. Escala provincial. "*Industrias*". 22 de noviembre de 2017. <https://fcefyn.unc.edu.ar/facultad/secretarias/investigacion-y-posgrado/-investigacion/equipo-de-ordenamiento-ambiental-del-territorio/> (acceso el 9/11/2021)
- Chiodi, V. y Fernández, M.F. "SEC\_AMB\_PROV\_RSU".[Vectorial, de puntos]. 22 de noviembre de 2017. <https://fcefyn.unc.edu.ar/facultad/secretarias/investigacion-y-posgrado/-investigacion/equipo-de-ordenamiento-ambiental-del-territorio/> (acceso el 9/11/2021)
- Copernicus Data Space. (s.f.). Sentinel-5P Level 2 Aerosol Index. Recuperado el 8/10/2023 de <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel5P.html#sentinel-5p-level-2-aerosol-index>
- de Abelleira D, Verón S, Banchemo S, Iturralde Elortegui M, Valiente S, Puig O, Murray F, Martini JP, Zelaya K, Maidana D, Varlamoff N, Peiretti J, Benedetti P, Portillo J, Melilli M, Maidana E, Goytía Y, Sapino V, Regonat A, Cracogna F, Espíndola C, Parodi M, Colombo F, Scarel J, Ayala J, Martins L, Basanta M, Rausch A, Almada G, Boero L, Calcha J, Chiavassa A, Lopez de Sabando M, Kurtz D, Marini F,

- Sarrailhe S, Petek M, Propato T, Ferraina A, Pezzola A, Winschel C, Muñoz S, Mesa J, Volante J. 2021. Mapa Nacional de Cultivos campaña 2020/2021. Colección 1. Versión 1.0. Informe. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina.
- De Bernardi, M., Juliarena, P., Fernández, M.E., & Gyenge, J. (2022). Los bosques como mitigadores de emisiones de gases de efecto invernadero: Aportes de sus suelos al consumo de metano. En XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires.
- Della Ceca, L. S. (2018). Tesis de Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias. UNC.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Earth Observing System (EOS) Land Viewer (s.f). Recuperado el 30/06/2023 de <https://eos.com/landviewer/>
- EEA European Environment Agency. (2010) <http://www.eea.europa.eu/soer>
- García Ferreyra, M. F. (2014). Tesis de Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias. UNC.
- GIEC, 2007. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Cambridge University Press.
- Gobierno de la provincia de Córdoba , 2024. Recuperado el 15/01/2024 de <https://www.cba.gov.ar/territorio/>
- Gupta, P.; Sundar, A.C.; Wang, J.; Gehrig, R.; Lee, Y.; Kuman, N. 2006. ATMOS ENVIRON 40, 5880-5892.
- Hoek, G., Beelen, R., de Hoogh, K., Vienneau, D., Gulliver, J., Fischer, P., & Briggs, D. (2008). ATMOS ENVIRON, 42(33), 7561-7578.
- IDERA Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina (22 de Octubre de 2021). *Geoservicios*. Recuperado el 22/10/2021 de [https://www.idera.gob.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=335:geoservicios&catid=33:services&Itemid=302](https://www.idera.gob.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=335:geoservicios&catid=33:services&Itemid=302)
- IGN Instituto geográfico Nacional (s.f). *Capas SIG. Capas de información geoespacial estandarizada según normas de IDERA*. Recuperado el 22/10/2021 de <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- INDEC (s.f). Unidades Geoestadísticas - Cartografía y códigos geográficos del Sistema Estadístico Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Censos, República Argentina.

Recuperado el 22 de octubre de 2021. Link

<https://www.indec.gov.ar/indec/web/Institucional-Indec-Codgeo>

INDEC Instituto Nacional de Estadística y Censos (2016). Censo Nacional de Población, Hogares Y Viviendas”.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Javadinejad, S., Eslamian, S. & Ostad-Ali-Askari, K. Investigation of monthly and seasonal changes of methane gas with respect to climate change using satellite data. *Appl Water Sci* 9, 180 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1067-9>.

Kaufman, Y. J., & Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270.

Klimisch, B., Maglione, D., Paredes, P., & Soto, J., (2022). Análisis del Comportamiento de la Vegetación a partir de Índices del Sensor MODIS en Santa Cruz, Argentina. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 14(3), 69–90. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v14.n3.895>

Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>

Li, C., Boru, M., Li, Y., Peng, J., & Huang, Q. (2022). Study on Transmission Channel and Pollution Sources Region of O<sub>3</sub> in Qingyuan City. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022.

Mbow, H. O. P., Reisinger, A., Canadell, J., & O’Brien, P. (2017). SR2.

Mateos, A. C., Amarillo, A. C., Tavera Busso, I., & González, C. M. (2018). Evaluación espacial y temporal de la contaminación por SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO en la ciudad de Córdoba. *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 5(2), 47.

Recuperado a partir de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/17745>

Mateos, A. C., Amarillo, A. C., Tavera Busso, I., & Carreras, H. A. (2019). Influence of

- meteorological variables and forest fires events on air quality in an urban area (Córdoba, Argentina). *Archives of environmental contamination and toxicology*, 77, 171-179.
- Mignola, M. (2020). “Empleo de modelos de regresión de uso de la tierra para describir la variación espacial en la concentración y composición de PM<sub>2.5</sub> en la Ciudad de Córdoba”. Tesis de grado para la obtención de título de biólogo. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina (s.f). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero y Monitoreo de Medidas de Mitigación*. Recuperado el 26/6/2023 de <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República Argentina. (2019). Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático.
- Morales, Hernán (IDECOR). “Cobertura y uso de suelo 2017 - 2018 1 ha” [modelo ráster]. Escala 1: 500000. “Mapas Córdoba, Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba”. 2020-10-11. <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/descargas> (acceso el 22/10/2021)
- Morales, Hernán (IDECOR). “Modelo digital de elevaciones” [modelo ráster]. Escala 1:100000. “Mapas Córdoba, Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba”. 11/12/2017. <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/descargas> (acceso el 22/10/2021)
- Municipalidad de Córdoba (s.f). *Tramos de Calle*. Recuperado el 22/10/2021 de <https://gobiernoabierto.cordoba.gob.ar/data/datos-abiertos/categoria/geografia-y-mapas/tramos-de-calle/127>
- Natchimuthu, S., Panneer Selvam, B., & Bastviken, D. (2014). Influence of weather variables on methane and carbon dioxide flux from a shallow pond. *Biogeochemistry*, 119, 403-413.
- Olcese, L. E., & Toselli, B. M. (1998). Unexpected high levels of ozone measured in Córdoba, Argentina. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 31, 269-279.
- Pachauri, R.K., Reisinger, A., (2008). *Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
- Paoletti, E., Feng, Z., Fares, S., Sicard, P., Agathokleous, E., & De Marco, A. (2021). Interactions Between Ozone Pollution and Forest Ecosystems. *Frontiers in Forests and Global Change*, 120.

- Papadimas, C. D., Hatzianastassiou, N., Matsoukas, C., Kanakidou, M., Mihalopoulos, N., & Vardavas, I. (2012). The direct effect of aerosols on solar radiation over the broader Mediterranean basin. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(15), 7165-7185.
- Peng, C., Wang, M., Zhao, Y., & Chen, W. (2016). *ENVIRON MONIT ASSESS*, 188(3), 162.
- Puliafíto, S. E., Allende, D., Pinto, S., & Castesana, P. (2015). *ATMOS ENVIRON*, 101, 303-311.
- Puliafíto, S.E.; Castesana, P.S., Allende, D.G., Ruggeri, M.F., Pinto, S y Gariglio, A. (2017). Trabajo completo en congreso PROIMCA – PRODECA 2017.
- Puliafíto, S. Enrique, Allende, D. G., Castesana, P. S., & Ruggeri, M. F. (2017). High-resolution atmospheric emission inventory of the argentine energy sector. Comparison with edgar global emission database. *Heliyon*, 3(12), e00489. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00489>
- Puliafíto, S. E., Bolaño Ortiz, T. R., Berná Peña, L. L., & Pascual Flores, R. M. (2020). High resolution inventory of atmospheric emissions from livestock production, agriculture, and biomass burning sectors of Argentina. *Atmospheric Environment*, 223, 117248. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117248>
- QGIS.org (2023). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 3.34.1-Prizren. <https://www.qgis.org/es/site/>
- Quiroga, Mario (DIRECCIÓN PROVINCIAL DE VIALIDAD). “Red Vial Nacional” [modelo vector]. Escalas 1: 5000 (urbano), 1:50000 (rural). “Mapas Córdoba, Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba”. 2020-10-11. <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/descargas> (acceso el 22/10/2021)
- Quiroga, Mario (DIRECCIÓN PROVINCIAL DE VIALIDAD). “Red Vial Provincial” [modelo vector]. Escalas 1: 5000 (urbano), 1:50000 (rural). “Mapas Córdoba, Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba”. 2020-10-11. <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/descargas> (acceso el 22/10/2021)
- Ramanathan, V., Ramana, M. V., Roberts, G., Kim, D., Corrigan, C., Chung, C., & Winker, D. (2007). Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. *Nature*, 448(7153), 575–578.
- Represa, S. 2016. Conferencia: Air quality in Argentina, What is known and what is missing? Centro de Investigaciones del Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.
- Reyna, S. y Pesci, H. “SEC\_AMB\_PROV\_RSU”. [Vectorial, de puntos]. Escala provincial. “Residuos Sólidos Urbanos”. 06 de marzo de 2015.

- <https://fcefyn.unc.edu.ar/facultad/secretarias/investigacion-y-posgrado/-investigacion/equipo-de-ordenamiento-ambiental-del-territorio/> (acceso el 9/11/2019)
- Romanazzi, V., Casazza, M., Malandrino, M., Maurino, V., Piano, A., Schilirò, T., & Gilli, G. (2014). CHEMOSPHERE, 112(0), 210-216.
- RStudio. (2023). RStudio: Integrated development environment for R (Version 2023.06.2 Build 561) [Software]. Posit Software, PBC. <https://www.rstudio.com/>
- Sanucci, C., Represa, N. S., & Porta, A. A. (2020). Evaluación de las imágenes satelitales del sensor TROPOMI para el análisis de los niveles de metano en la provincia de Neuquén. In III Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO 2020)-JAIIO 49 (Modalidad virtual).
- Secretaría de Energía. (s.f.). *Datasets. Datos públicos generados, almacenados y publicados por Secretarías y Subsecretarías dependientes de la Secretaría de Gobierno de Energía*. Recuperado el 9/11/2021 de <http://datos.minem.gob.ar/dataset?groups=mapas>
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). (s/f). USGS Science for a changing world. Earth Explorer. Fecha de recuperación: posterior al muestreo de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- SMN, 2019. Facebook del Servicio Meteorológico Nacional.
- SODA-PRO. (2014-2022). Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications 2. Recuperado el 30/06/2023 de <https://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra>
- The R Foundation for Statistical Computing. (2023). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.3.1) [Software]. <https://www.R-project.org/>
- Tovar, K. I. L., Gómez López, Z. A., & Zamorategui Molina, A. (2017). Monitoreo de contaminantes atmosféricos (PM2.5, PM10 y CO2) y variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en la ciudad de Guanajuato. Jóvenes en la Ciencia, Vol. 3, núm. 2, Verano de la Investigación Científica.
- Unzueta Diego, A. L. (2023) “NIVELES DE CO Y CO2 GENERADO POR EL TRÁFICO VEHICULAR DE MARZO – JULIO EN LA CIUDAD DE TINGO MARÍA – HUÁNUCO, 2023”. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental. Facultad de Recursos Naturales Renovables, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Agraria de la Selva Tingo María, Perú.
- Urteaga, D (2016). “Monitoreo de las concentraciones atmosféricas de metano en la ciudad de Tandil: correlación con parámetros meteorológicos y estimación de emisiones

fugitivas originadas por el consumo de gas natural”. Trabajo Final de la Licenciatura en Tecnología Ambiental. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

Wang, D. (2017). Tesis de grado. Harvard University School, Cambridge, MA

Zhang, J. J., Sun, L., Barrett, O., Bertazzon, S., Underwood, F. E., & Johnson, M. (2015). *ATMOS ENVIRON*, 106, 165-177.

## ANEXO

**Tabla 1.** Ubicación geográfica de los sitios de muestreo y caracterización según uso de suelo y ordenamiento del Análisis de Componentes Principales (PCA).

<b>Id sitio</b>	<b>Nombre</b>	<b>Ordenamiento resultante del PCA</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Uso de suelo (Ley 9841)</b>
1	Academia	Anillo 1	31°21'28.8"S 64°11'02.4"W	Agrícola
2	Reserva Natural Urbana General San Martín	Anillo 1	31°21'32.4"S 64°15'46.8"W	Verde
3	Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (sede centro)	Anillo 1	31°25'04.8"S 64°11'16.8"W	Urbano
4	Residencial Sur	Anillo 1	31°27'00.0"S 64°10'55.2"W	Urbano
5	Malagueño	Anillo 2	31°27'03.6"S 64°20'49.2"W	Industrial
6	Campo privado Juarez Celman	Anillo 2	31°13'44.4"S 64°09'43.2"W	Agrícola
7	Espacio para la Memoria “La Perla”	Anillo 2	31°25'58.8"S 64°20'31.2"W	Verde
8	Residencial Noroeste	Anillo 2	31°20'13.2"S 64°16'48.0"W	Urbano
9	Transelectric	Anillo 2	31°27'10.8"S 64°06'54.0"W	Industrial
10	Campo Escuela (Facultad de Ciencias Agropecuarias)	Anillo 3	31°28'40.8"S 64°00'18.0"W	Agrícola
11	Campo privado	Anillo 3	31°09'21.6"S	Verde

			64°15'03.6"W	
12	Residencial Suroeste	Anillo 3	31°39'46.8"S 64°25'55.2"W	Urbano
13	Pilar-Río Segundo	Anillo 3	31°39'54.0"S 63°53'52.8"W	Industrial
14	Porta	Anillo 2	31°28'19.2"S 64°11'34.8"W	Industrial
15	Residencial centro	Anillo 1	31°24'43.2"S 64°11'49.2"W	Urbano
16	Residencial Norte	Anillo 1	31°22'08.4"S 64°13'19.2"W	Urbano

**Tabla 3a.** Estadística descriptiva para valores de concentraciones promedio de PM 2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y CO<sub>2</sub> (ppm) en los 3 sitios de muestreo para el período de tiempo analizado (2020-2021).

Sitio	Estadística descriptiva	CO <sub>2</sub>		PM <sub>2.5</sub>	
	<b>Media ± DE</b>	<b>427,91</b>	<b>± 15,80</b>	<b>5,70</b>	<b>± 2,33</b>
<b>4</b>	<b>Min - Máx</b>	<b>408,48</b>	<b>507,64</b>	<b>0,63</b>	<b>16,17</b>
	<b>Media ± DE</b>	<b>435,49</b>	<b>± 17,66</b>	<b>7,08</b>	<b>± 3,90</b>
<b>14</b>	<b>Min - Máx</b>	<b>400,06</b>	<b>508,75</b>	<b>0,88</b>	<b>29,12</b>
	<b>Media ± DE</b>	<b>455,98</b>	<b>± 99,37</b>	<b>16,08</b>	<b>± 10,83</b>
<b>16</b>	<b>Min - Máx</b>	<b>412,45</b>	<b>1503,13</b>	<b>4,42</b>	<b>51,05</b>

**Tabla 3b.** Estadística descriptiva para valores de concentraciones promedio de CH<sub>4</sub> (ppb), O<sub>3</sub> (mol/m<sup>2</sup>) en los distintos sitios de muestreo para el período de tiempo analizado).

Sitio	Estadística descriptiva	METANO		OZONO	
1	Media ± DE	1819.89	± 19.93	0.12520	± 0.00912
	Min - Máx	1776.06	1876.78	0.10516	0.16681
2	Media ± DE	1815.67	± 19.46	0.12526	± 0.00918
	Min - Máx	1759.74	1876.78	0.10617	0.16744
3	Media ± DE	1821.19	± 20.05	0.12533	± 0.00916
	Min - Máx	1774.56	1879.98	0.10619	0.16541
4	Media ± DE	1820.69	± 19.67	0.12535	± 0.00921
	Min - Máx	1774.56	1883.69	0.10536	0.16541
5	Media ± DE	1817.43	± 19.82	0.12520	± 0.00924
	Min - Máx	1760.27	1874.12	0.10443	0.16832
6	Media ± DE	1820.81	± 21.37	0.12517	± 0.00909
	Min - Máx	1745.39	1876.19	0.10674	0.16757
7	Media ± DE	1814.14	± 20.24	0.12520	± 0.00926
	Min - Máx	1760.27	1878.81	0.10531	0.16687
8	Media ± DE	1815.48	± 19.67	0.12523	± 0.00915
	Min - Máx	1753.01	1870.96	0.10565	0.16554
9	Media ± DE	1818.93	± 20.07	0.12539	± 0.00922
	Min - Máx	1763.66	1871.80	0.10438	0.16767
10	Media ± DE	1818.49	± 21.53	0.12553	± 0.00924
	Min - Máx	1706.67	1879.81	0.10430	0.17105
11	Media ± DE	1814.92	± 22.50	0.12568	± 0.00939
	Min - Máx	1753.15	1877.41	0.10241	0.16810
12	Media ± DE	1816.42	± 21.60	0.12532	± 0.00933
	Min - Máx	1737.41	1872.06	0.10527	0.16940

	<b>Media ± DE</b>	<b>1818.01 ± 20.09</b>	<b>0.12568 ± 0.00939</b>
<b>13</b>	<b>Min - Máx</b>	<b>1759.09 1880.96</b>	<b>0.10241 0.16810</b>
	<b>Media ± DE</b>	<b>1820.05 ± 19.93</b>	<b>0.12532 ± 0.00926</b>
<b>14</b>	<b>Min - Máx</b>	<b>1767.41 1883.69</b>	<b>0.10536 0.16741</b>
	<b>Media ± DE</b>	<b>1821.28 ± 20.07</b>	<b>0.12531 ± 0.00919</b>
<b>15</b>	<b>Min - Máx</b>	<b>1774.56 1879.98</b>	<b>0.10461 0.16541</b>
	<b>Media ± DE</b>	<b>1819.42 ± 20.15</b>	<b>0.12529 ± 0.00915</b>
<b>16</b>	<b>Min - Máx</b>	<b>1772.87 1876.78</b>	<b>0.10568 0.16654</b>

**Tabla 5.** Código para ajustar un modelo de regresión lineal múltiple en R.

```
# Fecha de creación: 07/12/2023
# Adaptado de Trevor Hastie , Robert Tibshirani - An introduction to
#statistical learning with Applications in R
# Autores: Ana Amarillo y Pilar Díaz.

# Limpiar entorno y ventana gráfica
rm(list=ls())
graphics.off()
# Importar DF a partir de excel --> import data set from excel.

#Abrir librerías
library(tidyverse)
library(caret)
library(MASS)

#Eliminar datos faltantes
DF<- na.omit(DF)
```

```

# Regresión lineal múltiple utilizando selección de modelos STEPWISE
#(paso a paso) y validación cruzada repetida con k subconjuntos (repeated
#k-fold cross validation)

# La función train() del paquete caret lleva a cabo las selecciones
#"stepwise" utilizando el método leapSeq y el paquete MASS

# Se debe especificar nvmax (número máximo de variables a retener en el
#modelo, hiperparámetro)

# Se elige el mejor modelo acorde al menor RMSE (Root Mean Square Error -
#raíz cuadrada promedio de los errores) de la validación cruzada.

#Establecer semilla para reproducibilidad
set.seed(123)

# Establecer validación cruzada repetida de k-subconjuntos
train.control<-trainControl(method="cv",number=10)

#Entrenar el modelo
step.model<-train(contaminante~.,data=DF,
                  method="leapSeq",
                  tuneGrid=data.frame(nvmax=1:10), #10 variables máximo
                  trControl=train.control
)

step.model$results

warning("aquí está el dato de RMSE")

# R2 indica la correlación entre los valores observados del resultado y
#los valores predichos por el modelo - cuanto mayor, mejor

step.model$bestTune # el mejor modelo es el que tiene nvmax = ...
#variables

# la función summary() reporta el mejor conjunto de variables para tamaño
#de modelo, hasta el número máximo de variables retenidas

summary(step.model$finalModel)

#el * especifica que una variable ha sido incluida en el modelo

# Obtener los coeficientes de regresión en el modelo final (id=best Tune)
warning("poner en id el número del best Tune")

```

```

coef(step.model$finalModel,id)

# Obtener el R2 ajustado
warning("Modificar las variables del modelo lineal acorde al mejor modelo
resultante")

names(DF) #ver nombres

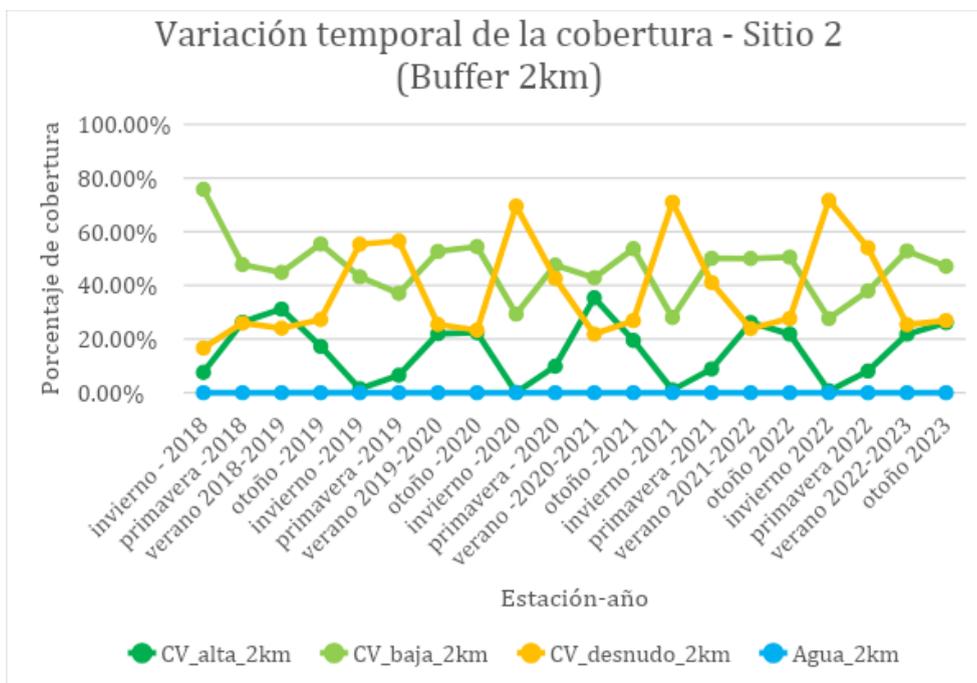
modelo <- lm(`contaminante` ~ `Temperature` + `Relative Humidity`, data =
DF) #este es un ejemplo

summary(modelo)

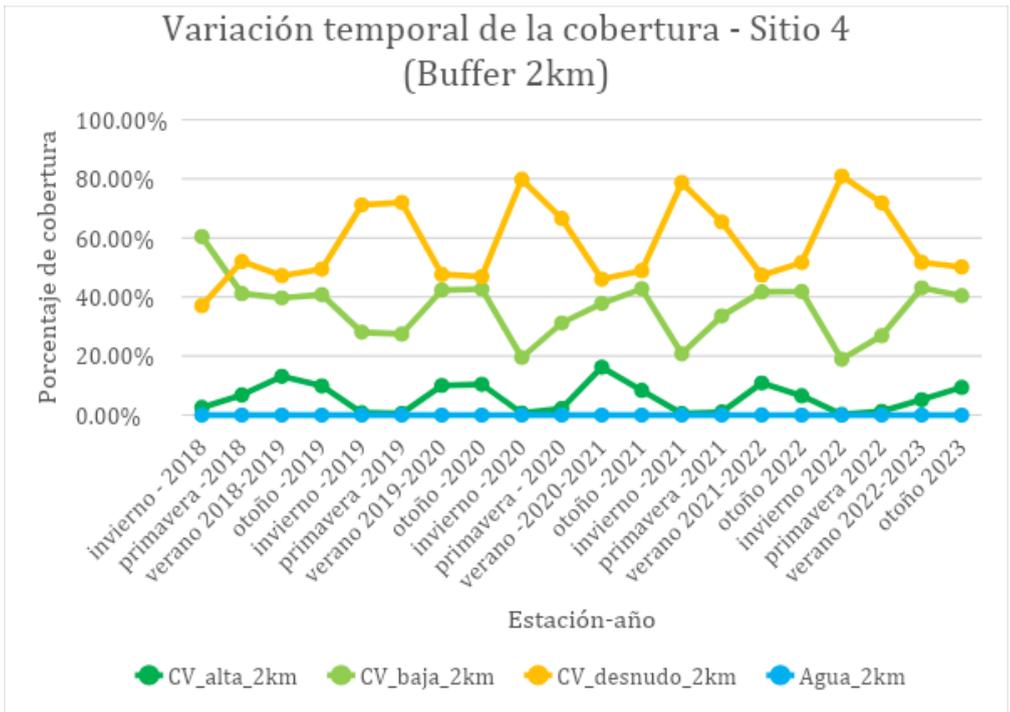
warning("anotar el R2 ajustado")

# Diagnóstico gráfico
par(mfrow=c(2,2))
plot(step.model)
plot(modelo)

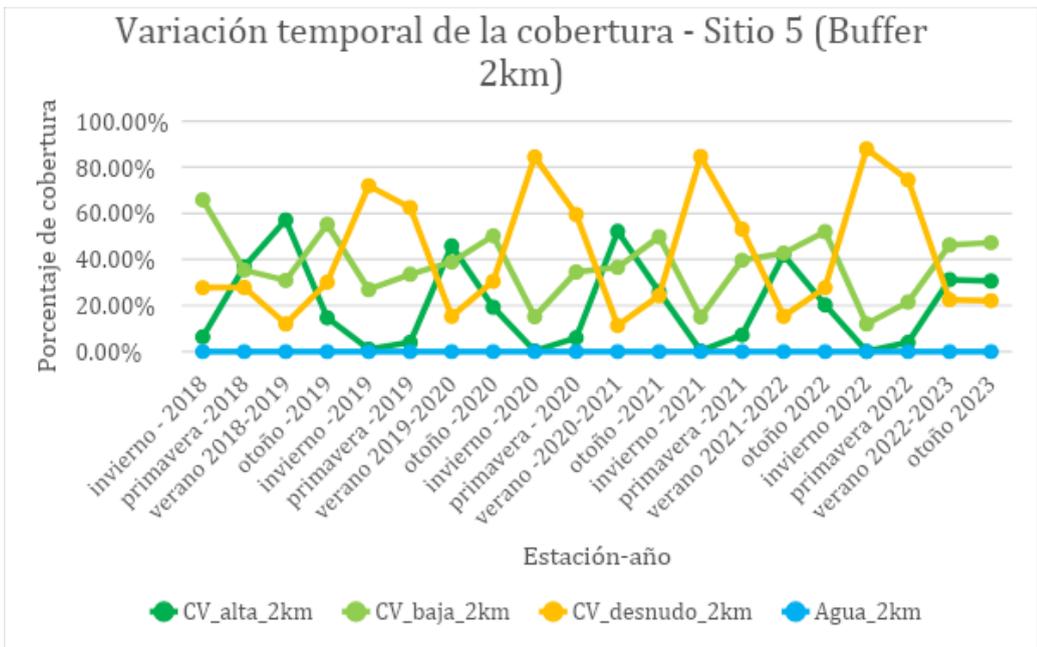
```



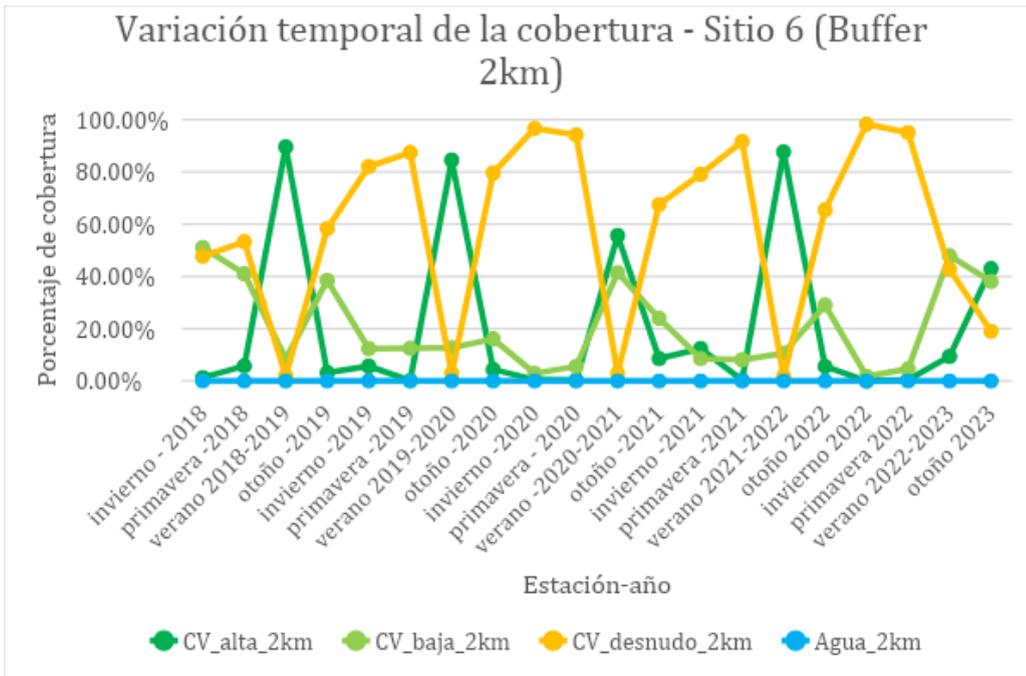
**Fig. 19.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 2 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



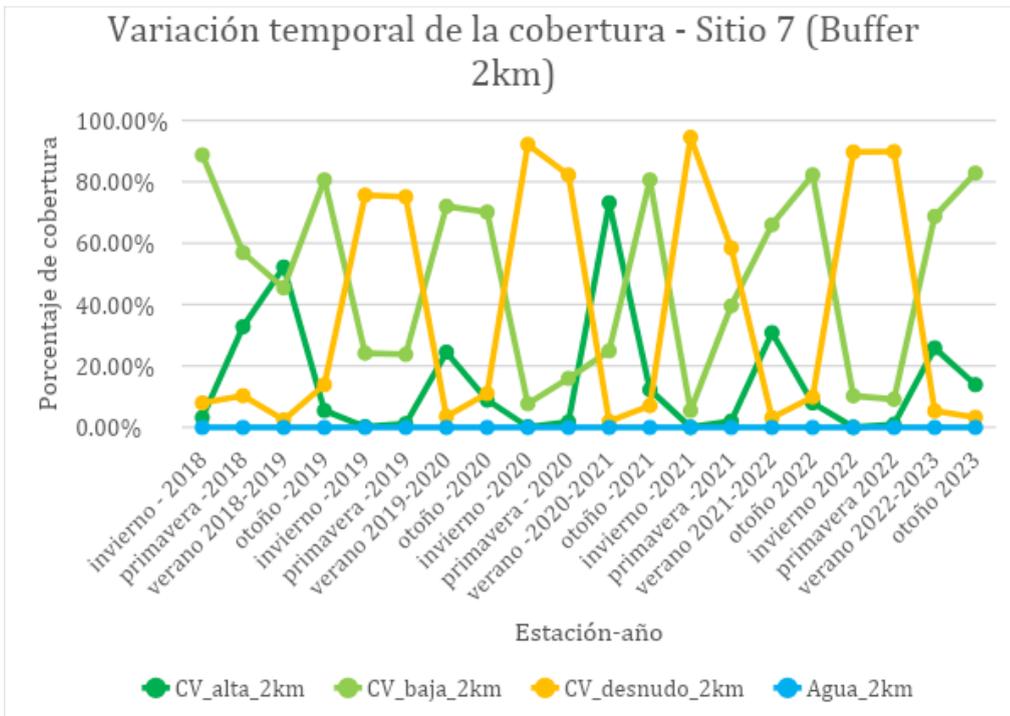
**Fig. 20.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 4 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



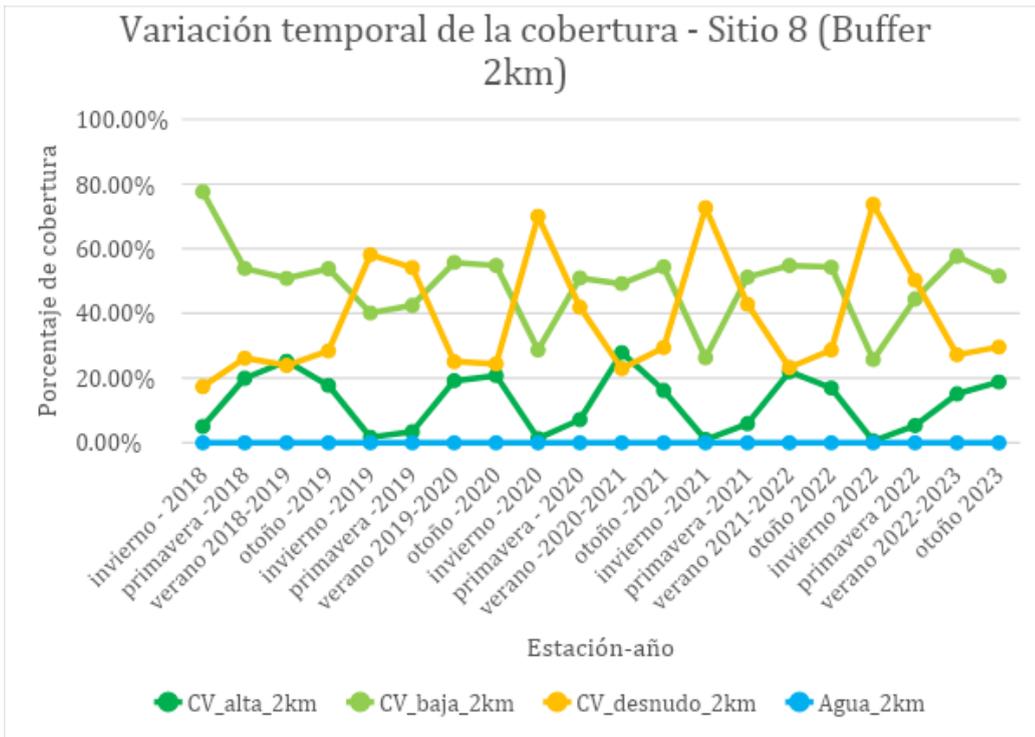
**Fig. 21.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 5 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



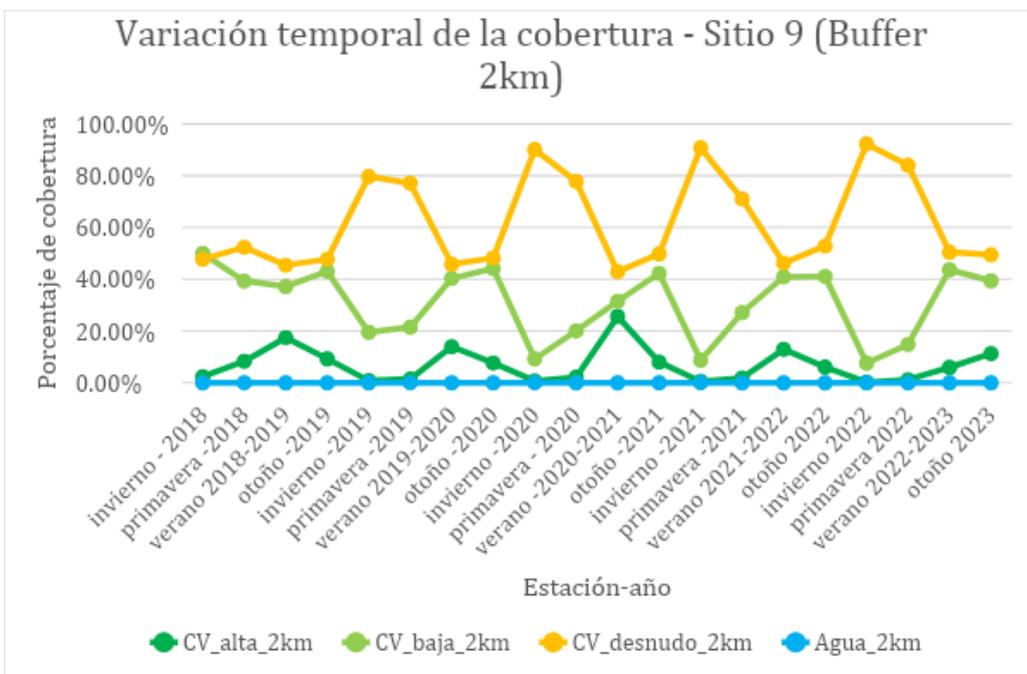
**Fig. 22.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 6 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



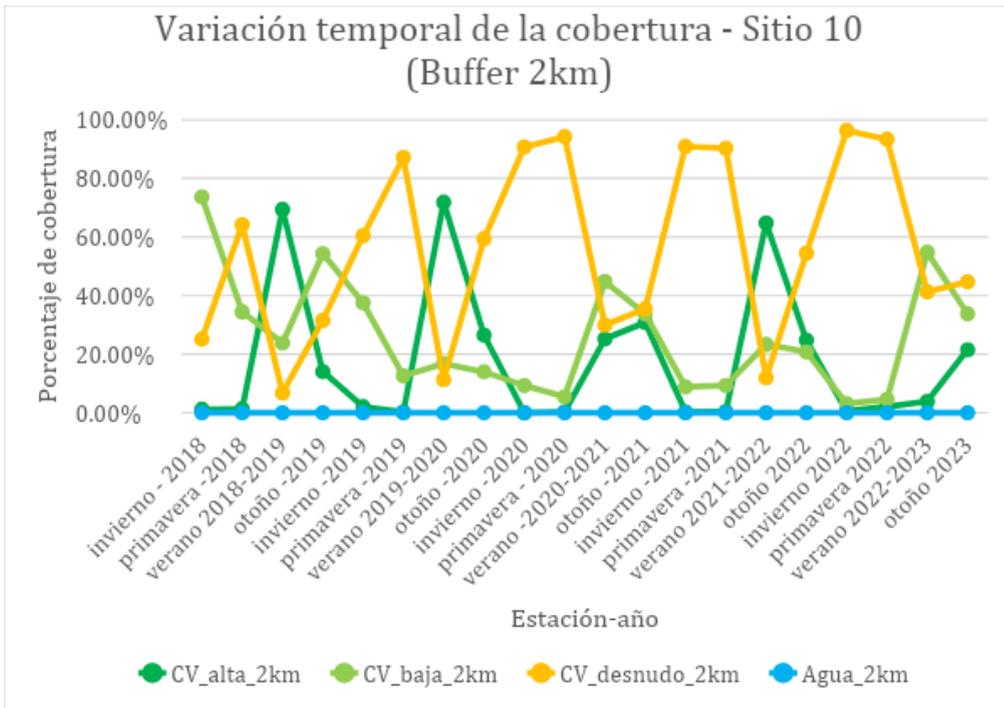
**Fig. 23.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 7 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



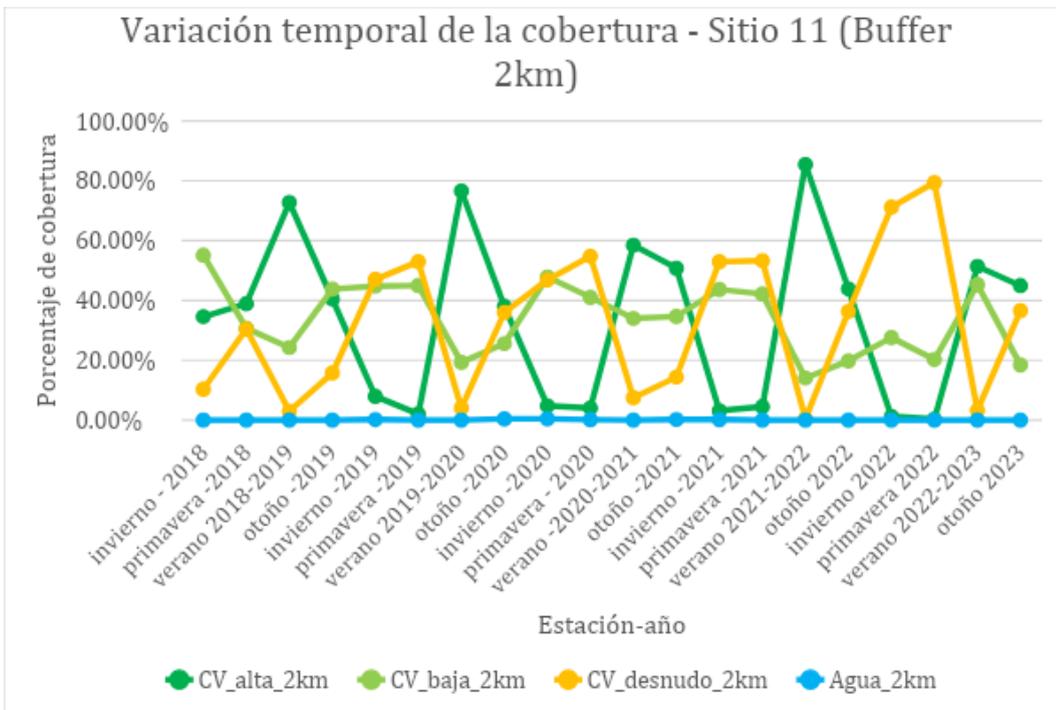
**Fig. 24.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 8 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



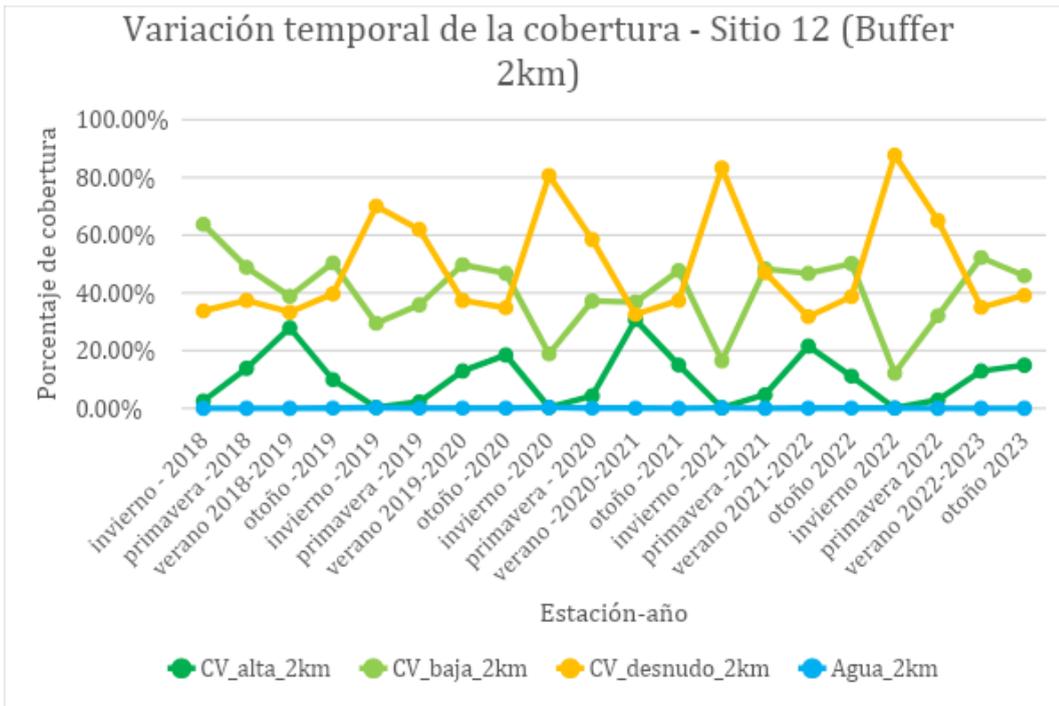
**Fig. 25.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 9 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



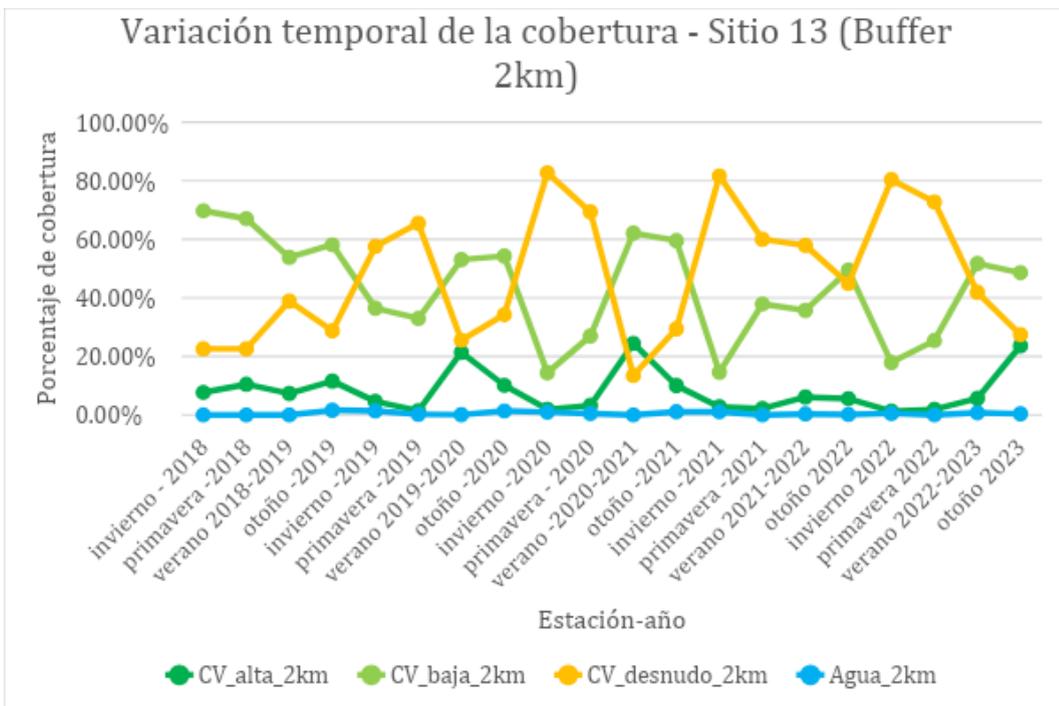
**Fig. 26.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 10 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



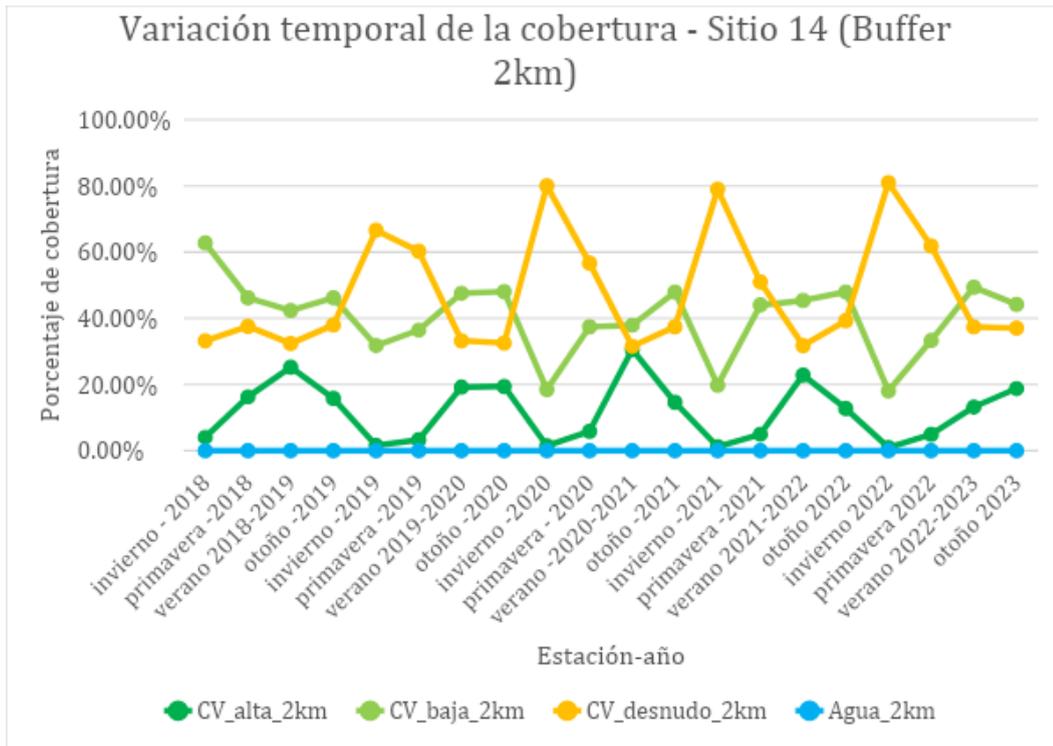
**Fig. 27.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 11 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



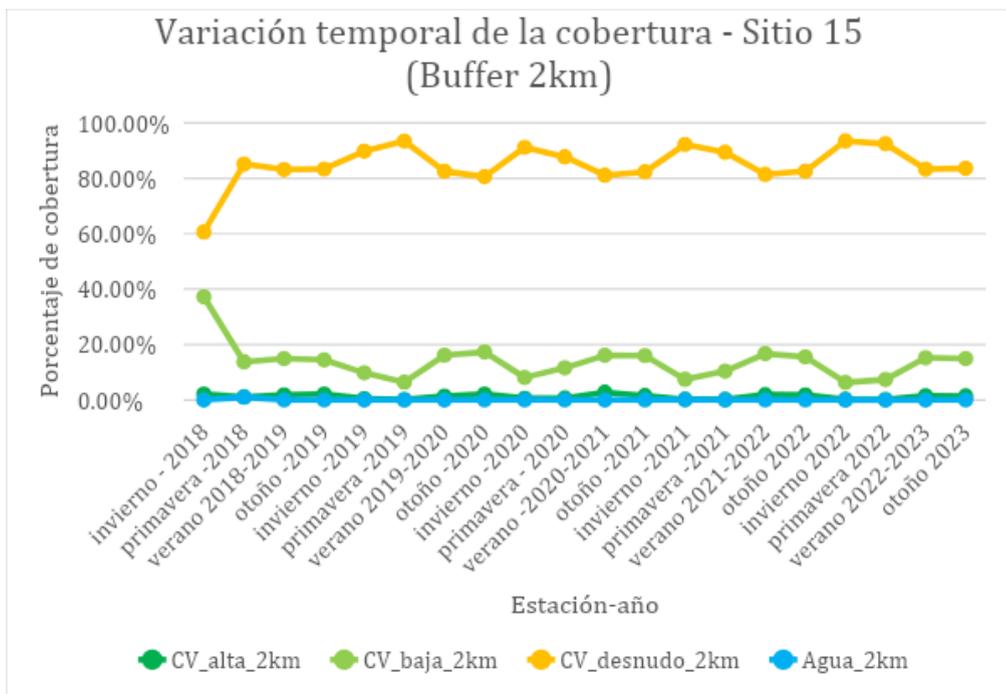
**Fig. 28.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 12 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



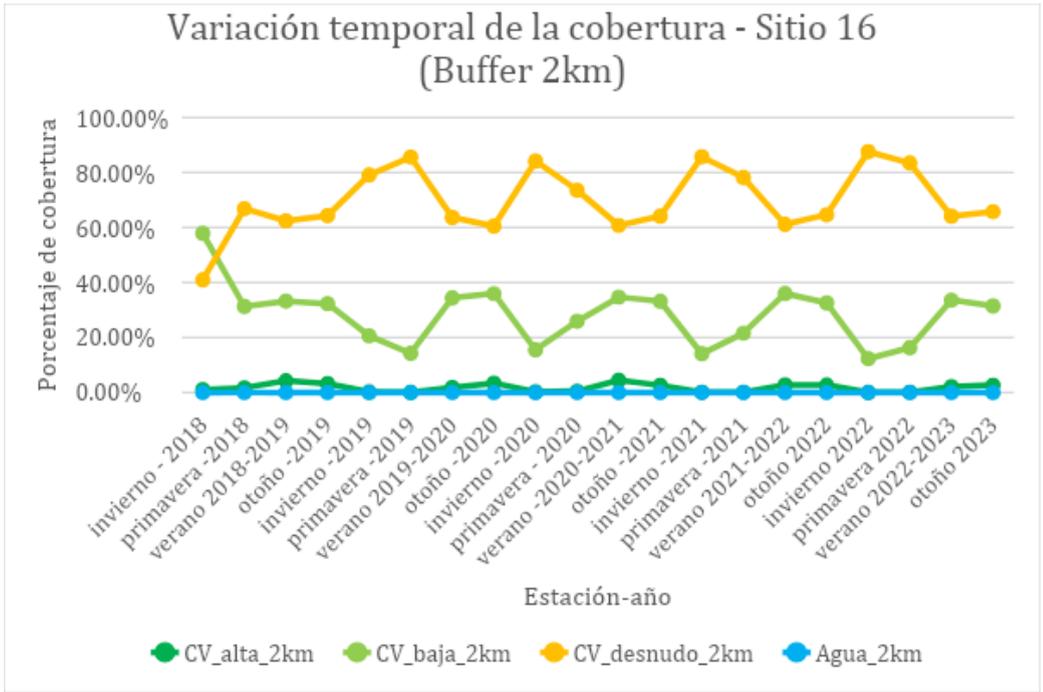
**Fig. 29.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 13 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



**Fig. 30.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 14 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



**Fig. 31.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 15 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).



**Fig. 32.** Variación temporal de la cobertura verde en el Sitio 16 a escala espacial de 2km en el período de tiempo analizado (junio 2018- junio 2023).

