



Análisis Espacial de la Concentración de Material Particulado PM10 en el Municipio de Oruro

Spatial Analysis of the Concentration of PM10 Particulate Matter in the Municipality of Oruro

M.Sc. Ing. Kevin David Chambi Colque¹, M.Sc. Ing. Omar Rodolfo Nina Yucra²

Resumen

La contaminación del aire por material particulado (PM) representa un problema creciente en ciudades de Bolivia. Dentro de este, el PM10 está asociado con diversos efectos sobre la salud respiratoria y cardiovascular. Si bien existen mediciones históricas en algunos puntos de ciudades como Oruro, no se dispone información sobre la variabilidad intraurbana de PM10. El presente estudio analizó la distribución espacial de PM10 en el municipio de Oruro mediante un monitoreo en 24 sitios de los 5 distritos y posterior interpolación con el método IDW en ArcGIS. Los mapas generados revelaron alta heterogeneidad, con menores concentraciones en el distrito 1 y mayores niveles en el distrito 3 (zona industrial) y distrito 4 (alto tráfico), sugiriendo un efecto combinado de fuentes de emisión y rutas de transporte preferencial de los contaminantes. El porcentaje del área urbana que superaba límites internacionales de calidad del aire incremento progresivamente de enero a mayo. Este estudio provee un análisis espacial de PM10 sentando una línea base para evaluar impactos en salud e identificar medidas locales de control en el municipio de Oruro.

Abstract

Air pollution from particulate matter (PM) represents a growing problem in Bolivian cities. Within this, PM10 is associated with various effects on respiratory and cardiovascular health. Although there are historical measurements in some points of cities such as Oruro, there is no information on the intra-urban variability of PM10. The present study analyzed the spatial distribution of PM10 in the municipality of Oruro through monitoring at 24 sites in the 5 districts of the municipality and subsequent interpolation with the IDW method in ArcGIS. The generated maps revealed high heterogeneity, with lower concentrations in district 1 and higher levels in district 3 (industrial zone) and district 4 (high traffic), suggesting a combined effect of emission sources and preferential transport routes of pollutants. The percentage of the urban area that exceeded international air quality limits increased progressively from January to May. This study provides a spatial analysis of PM10, establishing a baseline to evaluate health impacts and identify local control measures in the municipality of Oruro.

INFORMACIÓN DE

ARTÍCULO:

Palabras Clave:

Contaminación del aire, Material particulado, Análisis espacial, Sistemas de información geográfica.

Keywords:

Air pollution, particulate matter, Spatial analysis, Geographic information systems.

Citar como:

Chambi K. & Nina O. (2023)

Análisis Espacial de la Concentración de Material Particulado PM10 en el Municipio de Oruro.

Revista de Ciencia y Tecnología en Ingeniería Industrial, 5(1), pag – pag.

¹Carrera Ingeniería Industrial, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Bolivia. kevindavidchambi@gmail.com

²Carrera Ingeniería Industrial, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Bolivia.

1. Introducción

Uno de los problemas ambientales más importantes en la actualidad es la contaminación atmosférica por material particulado (PM) (Santillán et al., 2016). Se presentan especialmente en áreas urbanas como consecuencia de las emisiones de la actividad industrial y el parque automotor (Celis et al., 2007). Este último es un fenómeno en constante crecimiento que amenaza la salud, la calidad de vida y el medio ambiente (Palacio et al., 2014).

El material particulado causa daños a la salud, y su peligrosidad depende de su tamaño, persistencia en el aire y concentración (Ubilla y Yohannessen, 2017). Se han realizado investigaciones extensas sobre el material particulado menor a 10 μm (PM10) debido a sus efectos en el sistema cardiovascular y respiratorio tanto a corto como a largo plazo (Cartení et al., 2015). Tal como señalan Kim et al. (2014), las partículas gruesas PM10 se asientan rápidamente y tienden a depositarse en la región traqueobronquial y las partículas finas - ultrafinas, tienden a penetrar profundamente en los pulmones pudiendo llegar a los alveolos, e incluso ingresar al torrente sanguíneo.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica provoca alrededor de 4,2 millones de muertes prematuras al año en todo el mundo (Scapini et al., 2018). Destacando que más del 80% de la población en países en vías de desarrollo está expuesta a niveles de calidad del aire que superan los límites permitidos por la OMS (Hinojosa et al., 2019). La contaminación por PM10 es un problema que afecta a todo el mundo y la exposición continua a altas concentraciones puede empeorar las enfermedades pulmonares, cardíacas y crónicas (Ubilla & Yohannessen, 2017). Para entender y reducir el impacto que los contaminantes atmosféricos tienen en la salud de la población, es fundamental tomar medidas para mejorar la calidad del aire, siendo una medida inicial y apropiada el monitoreo y evaluación espacial de los contaminantes criterio.

En Bolivia, si bien la implementación de redes de monitoreo de la calidad del aire ha permitido identificar los niveles de PM10 en diferentes ciudades, son aún escasos los análisis sobre su distribución espacial intraurbana. Esta información es útil para identificar zonas críticas, evaluar exposición de la población y establecer las bases para una gestión local efectiva del problema.

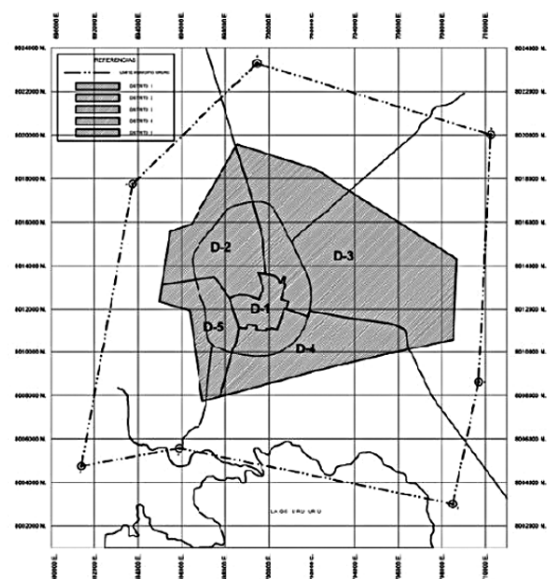
En este contexto, el objetivo del presente estudio fue determinar las concentraciones de PM10 en 24 sitios de los 5 distritos del municipio de Oruro entre enero y mayo de 2021, mediante el método por dispersión de luz utilizando un equipo óptico portátil y empleando herramientas de geoprocésamiento para analizar su variabilidad espacial e identificar tendencias y áreas de contaminación significativas según los límites permisibles de la OMS y la Ley 1333.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de Estudio

El estudio se realizó en el municipio de Oruro, ubicada en la provincia Cercado del departamento de Oruro a 3735 msnm en el altiplano central de Bolivia. Se consideró el área urbana intensiva (Porción de territorio que concentra la mayor consolidación física de su red vial, manzanas, predios y densidad en edificaciones, actividades y servicios del área urbana), conformada por los 5 distritos de la ciudad con una extensión de 10358 Hectáreas (Plan de desarrollo municipal del Municipio de Oruro, 2018) (figura 1). El municipio presenta un clima semiárido frío, con temperaturas medias anuales de 9°C y precipitación pluvial promedio de 83 mm concentrada en los meses de diciembre a marzo (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2021).

Figura : Distritación del municipio de Oruro en la porción del área intensiva



Fuente: Elaboración propia (2023)

2.2. Selección de Sitios de Monitoreo

Se realizó una fase exploratoria de campo para identificar sitios potenciales de monitoreo en cada distrito, considerando áreas de diferente uso del suelo, fuentes de emisión y factores de exposición poblacional. La ubicación final de 24 sitios siguió los lineamientos del método de mediciones simplificadas estipulado en el manual técnico “diseño, implementación y operación de redes de monitoreo de calidad del aire para ciudades de Bolivia” (2016), priorizando zonas de alto tránsito vehicular, industriales, comerciales y lugares de alta concurrencia ciudadana.

Los sitios quedaron distribuidos de la siguiente manera: distrito 1 (4 sitios), distrito 2 (4 sitios), distrito 3 (6 sitios), distrito 4 (6 sitios) y distrito 5 (4 sitios). En cada uno se registraron sus coordenadas geográficas en el sistema UTM zona/huso 19K, mediante un aplicativo para dispositivos móviles “MGRS UTM GPS” para su posterior mapeo e interpolación espacial. En la tabla 1, se presenta la localización de cada uno de los sitios representativos de monitoreo identificados en este estudio.

2.3. Equipo de Monitoreo

Las concentraciones de PM₁₀ fueron medidas en tiempo real utilizando un monitor ambiental portátil “MicroDust Pro” basado en el principio de dispersión óptica con láser infrarrojo. El equipo opera en un rango de 1 µg/m³ a 250 g/m³, con una exactitud de ±3% (CASELLA, s.f.). Fue

configurado para registrar con una resolución temporal de 10 segundos, almacenando los valores de PM₁₀ en mg/m³ como concentración media durante el tiempo total de muestreo en cada sitio para posteriormente expresarlo en µg/m³.

Para separar la fracción respirable (PM₁₀) el equipo se acopló a un adaptador de muestreo provisto de un filtro de espuma de poliuretano (PUF). El flujo de aire fue suministrado por una bomba externa portátil (Tuff Plus 4) a un caudal constante de 4 L/min, de acuerdo a estipulado en el manual técnico propuesta por Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire en Bolivia (2016). Para asegurar una exactitud óptima en las mediciones el equipo fue previamente calibrado por un laboratorio acreditado en el departamento de La Paz.

2.4. Procedimiento de Medición

Las mediciones fueron realizadas interdiariamente durante los meses de enero a mayo de 2021. Los días lunes, miércoles y viernes se midieron 10 sitios y los días martes, jueves y sábados los 14 sitios restantes.

Antes de cada jornada el equipo fue puesto a cero con aire filtrado y se verificó el caudal de operación con un medidor externo. Las mediciones se realizaron a nivel de respiración humana (1,7 m sobre el nivel del suelo) en el perímetro inmediato a cada sitio. Los datos fueron registrados en una planilla de campo y almacenados en la memoria interna del equipo.

Tabla : Localización de sitios de monitoreo

Punto monitoreo	Ubicación	Coordenada X (UTM WGS84)	Coordenada Y (UTM WGS84)
1D1	Antigua terminal de Buses	700735	8013118
1D2	Mercado Simón Bolívar	700628	8011909
1D3	Plazuela de la Ranchería	699935	8012826
1D4	Plaza Castro de Padilla	699764	8012082
2D1	Urbanización Los Pinos	698219	8016979
2D2	Casco del Minero	699220	8016871
2D3	C.S. Aurora	698597	8018432
2D4	C.S. Rumi Campana	698798	8014309
3D1	Mercado Tagarete	702003	8011948
3D2	Área Industrial Huajara	702684	8016193
3D3	Mercado Kantuta	700932	8014253
3D4	Nueva Terminal de Buses	701687	8014248
3D5	Mercado Villa Satélite (Vinto)	706914	8011132
3D6	Plaza Sebastián Pagador	700038	8014234
4D1	Mercado Dios es Amor	700593	8009925
4D2	Mercado Pumas Andinos	704479	8009272
4D3	Plazuela Santa Bárbara	701604	8010936
4D4	Mercado Avaroa	699692	8010193
4D5	Mercado Las Américas	700928	8010580
4D6	Urbanización La Prensa	706213	8010332
5D1	Parada Minibuses 1 celeste	696943	8012442
5D2	SANINCO	697633	8010323
5D3	Mercado Roberto Young	697748	8011200
5D4	Parada Minibuses 7	696748	8011358

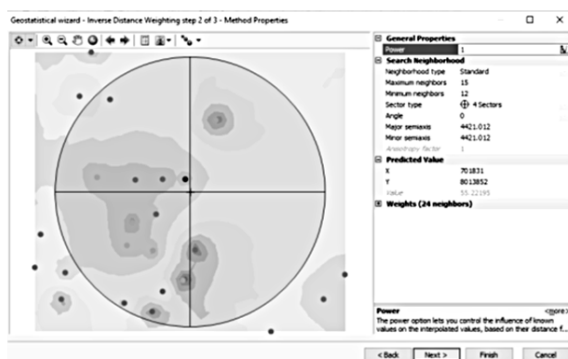
Fuente: Elaboración propia (2023)

2.5. Análisis Espacial

Las concentraciones medias de PM₁₀ por sitio fueron integradas a una base de datos georreferenciada en ArcGIS 10.8. Se generaron mapas mensuales aplicando el método determinístico de interpolación Inverse Distance Weighting (IDW) utilizando una distancia de radio fijo (R=300 m), 4 sectores de búsqueda y exponente de distancia igual a 1 (figura 2). Este método estima valores desconocidos a partir de muestras dispersas asignando mayor peso a aquellos puntos más cercanos (ESRI, 2016).

Como resultado se obtuvieron mapas mensuales de distribución espacial de PM₁₀ expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos fueron clasificados en 5 niveles de concentración para evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire en base a las directrices de la OMS (2021).

Figura : Parámetros del IDW



Fuente: Elaboración propia (2023)

3. Resultados

En la Figura 3 se muestra los mapas de predicción de la concentración de PM₁₀ por el método IDW para los meses de estudio. Los mapas revelaron heterogeneidad espacial en los niveles de PM₁₀ dentro del municipio de Oruro. De forma consistente entre los diferentes meses, las menores

concentraciones se observaron en áreas del distrito 1 y sectores periféricos del distrito 2, donde los valores tendieron a mantenerse por debajo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a excepción de algunos sitios puntuales de alta circulación vehicular. Por ejemplo, en los 4 sitios del distrito 1, las concentraciones de PM₁₀ variaron entre 27 a $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en enero; 31 a $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en febrero; 36 a $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en marzo; 39 a $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en abril y 45 a $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en mayo.

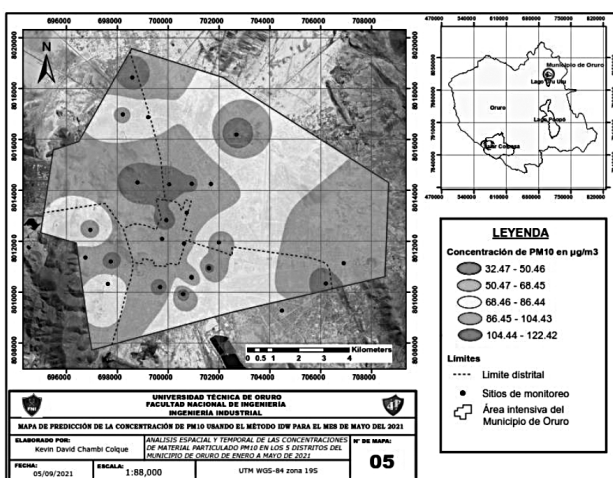
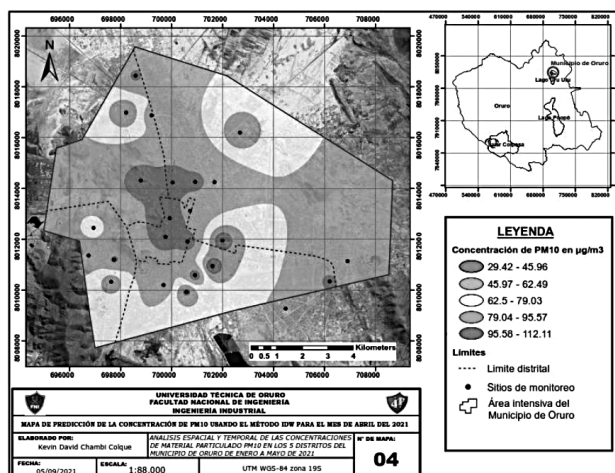
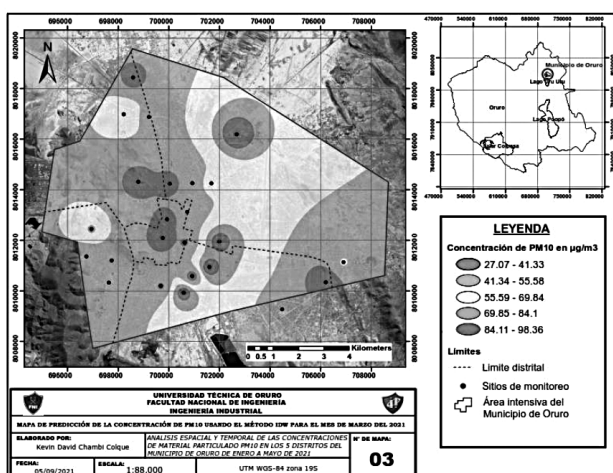
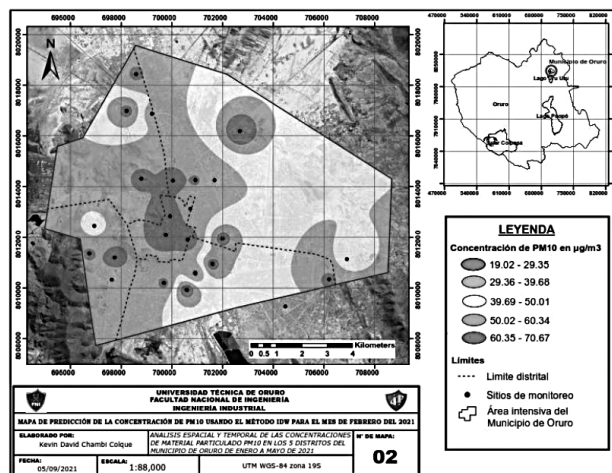
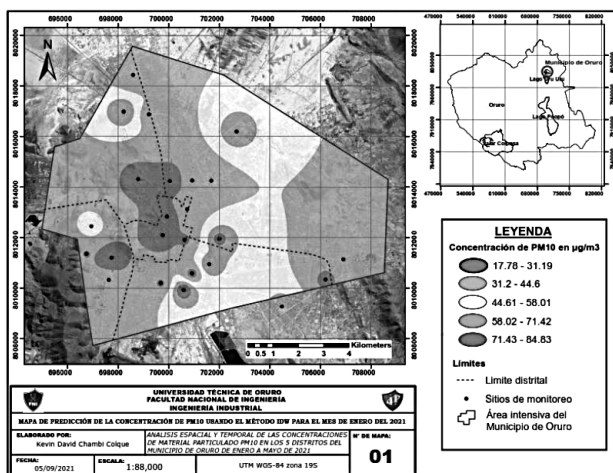
En contraste, los mayores niveles se registraron de forma recurrente en sitios de monitoreo ubicados hacia el sud-este del municipio, en áreas industriales y de alto tráfico vehicular como los distritos 3 y 4. Específicamente, el Área Industrial Huajara en el distrito 3 presentó los picos máximos absolutos entre todos los sitios evaluados, alcanzando concentraciones promedio de $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en marzo, $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en abril y $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en mayo. Asimismo, sectores del distrito 4 como el Mercado Dios es Amor y la Plazuela Santa Bárbara también sobrepasaron reiteradamente el estándar diario de la OMS ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con valores de 85 y $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (enero y febrero) y 98 a $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (marzo y abril) respectivamente.

Al clasificar los mapas según el índice de la calidad del aire en función a los lineamientos de la OMS (M.I. 2), en enero el 71% del área urbana intensiva presentó una calidad de aire “Buena” y el 29% restante “Regular”. En febrero incremento a 79% la superficie con calidad “Buena”, y apreciando un 21% las superficies con calidad “Regulares”. En marzo disminuyó a 58% la superficie con calidad “Buena”, y las áreas “Regulares” alcanzaban el 42%. Finalmente, en abril el porcentaje del municipio con calidad de PM₁₀ “Buena” fue sólo del 46% y apareciendo un 8% de la superficie con calidad “Mala”, ampliándose a un 17% del área urbana en mayo.

Estos resultados reflejan la existencia a una exposición heterogénea de la población a los niveles de PM₁₀ producto de fuentes de emisión localizadas, fuentes móviles e inclusive fuentes fugitivas.

Figura : Mapas de distribución espacial de la concentración de PM10 del municipio de Oruro generados por el método interpolación espacial IDW. Fila superior: mapas predictivos de los meses de enero y febrero. Fila inferior: mapa predictivo del mes de mayo del periodo de estudio.

Fila intermedia: mapas predictivos de los meses de marzo y abril. Fila inferior: mapa predictivo del mes de mayo del periodo de estudio.



Fuente: Elaboración propia (2023)

4. Discusiones

Los mapas de distribución espacial de PM10 en Oruro revelaron heterogeneidad intraurbana, con menores niveles

en el distrito 1 y mayores concentraciones en áreas del distrito 3 (zona industrial de Huajara) y distrito 4 (Mercado Dios es Amor, Plazuela Santa Bárbara), las cuales

superaron reiteradamente el límite diario de la OMS. Esta heterogeneidad se mantuvo entre los meses, aumentando progresivamente la superficie urbana que incumplía los estándares de calidad del aire de PM10.

Estos patrones espaciales son consistentes con un efecto combinado de las fuentes de emisión y las rutas de transporte preferencial de los contaminantes suspendidos. En el distrito 3 la presencia de industrias manufactureras, plantas procesadoras de minerales, el relleno sanitario y una elevada densidad vehicular asociada al anillo vial de la circunvalación explicarían sus altos niveles sostenidos de PM10. Por su parte, las concentraciones más bajas en el distrito 1 se atribuirían a una menor densidad de fuentes fijas de emisión ligada además al arbolado urbano que presentan. Y las áreas periféricas del norte y oeste podrían explicarse por una densidad vial y grado de urbanización más bajos. No obstante, no se descarta la influencia de fuentes difusas como calles sin pavimentar y depósitos temporales de residuos sólidos domésticos.

Estudios en otras ciudades latinoamericanas también han revelado alta variabilidad espacial asociada a emisiones industriales y tráfico vehicular (Santillán P., et al., 2021). Asimismo, nuestra identificación del distrito 3 y 4 como áreas críticas concuerda con mediciones históricas de la red MoniCA, que reportaron por estos sectores los mayores niveles de PM10 en Oruro (Red MoniCA, 2018).

Este estudio provee un mapeo intraurbano de la contaminación por PM10 en Oruro. Los mapas facilitarán la identificación de poblaciones de mayor vulnerabilidad para estudios de atribución de fuentes, evaluación de impactos en salud y definición de medidas locales de control.

Se recomienda extender los monitoreos, incorporar otras variables meteorológicas y de tráfico, aumentar la resolución espacial mediante modelación numérica y repetir los análisis en otras épocas del año para confirmar los patrones y tendencias identificadas.

5. Conclusiones

El presente estudio analizó la variabilidad espacial de los niveles de material particulado PM10 en el municipio de Oruro, identificando áreas críticas y tendencias preocupantes de incremento del incumplimiento de estándares normativos. Los mapas predictivos permitieron determinar que los mayores niveles de PM10 se concentran en los distritos 3 y 4, principalmente en la zona industrial de Huajara, el

Mercado Dios es Amor y la Plazuela Santa Bárbara. Estos sitios recurrentes estarían asociados a la presencia combinada de fuentes fijas y móviles, sumado al transporte preferencial de contaminantes por efecto de los vientos locales.

Este estudio sobre contaminación atmosférica por PM10 que aplica herramientas de geoprocamiento en el municipio de Oruro, provee una línea base para investigaciones orientadas a confirmar las fuentes, evaluar exposición poblacional, modelar dispersión de contaminantes y definir medidas efectivas de control local en Oruro.

Se requieren mediciones continuas abarcando todas las épocas del año, y el análisis conjunto con variables meteorológicas y de tráfico, para validar los patrones identificados. Asimismo, se recomienda aumentar la densidad de puntos de monitoreo mediante el uso combinado de muestreadores de bajo costo.

6. Referencias

- Cartení, A., Cascetta, F., & Campana, S. (2015). Understanding the urban air pollution monitoring networks complexity through multivariate data analysis. *Atmospheric Pollution Research*, 6(3), 529-538.
- CASELLA (s.f.). Manual de Usuario: Monitor de Polvo en Tiempo Real CEL-712 Microdust Pro. CASELLA CEL Inc.
- Celis, J., Morales, J., Zaror, C., & Carvacho, O. (2007). Contaminación del aire atmosférico por material particulado en una ciudad intermedia: El caso de Chillán (Chile). *Información Tecnológica*, 18(3), 49-58.
- ESRI. (2016). Geoprocamiento - Informática con datos geográficos. ArcGIS Resources.
- Gobierno Autónomo Departamental de Oruro (s.f.). Plan Territorial de Desarrollo Integral de Oruro 2016-2020.
- Gobierno Autónomo Municipal de Oruro (2014). Plan de Desarrollo Municipal 2013-2018: Oruro, hacia el 2018.
- Hinojosa, I., Infante, O., & Vallejo, M. (2019). Distribution of PM2.5 air pollution in Mexico City: Spatial analysis with land-use regression model. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(14), 1-16.

- Kim K. H., Kabir E., & Kabir S. (2014). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, 74, 136-143.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: Actualización mundial 2005 (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02). Ginebra: Suiza.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono.
- Palacio, D., Zafra, C., & Rodríguez, J. P. (2014). Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá, Colombia), *Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquía*, (2), 153-166.
- Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (Red MoniCA) (2016). Manual Técnico de Diseño, Implementación y Operación de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire para Ciudades de Bolivia. Segunda Edición. Editorial Proyecto Aire Limpio. La Paz, Bolivia.
- Red de Monitoreo De La Calidad Del Aire (Red MoniCA) (2018). Informe anual calidad del aire: Municipio De Oruro - Gestión 2018.
- Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica. (8 de diciembre de 1995). La Paz, Bolivia.
- Santillán, G., Damián, D., Rodríguez, M., Torres, S., Cargua, F., & Torres, S. (2016). Estimación del grado de contaminación de material particulado atmosférico y sedimentable en el laboratorio de servicios ambientales de la UNACH.
- Santillán, P., Rodríguez, M., Orozco, J., Ríos, I., & Bayas, K. (2021). Evaluación de la concentración y distribución espacial de material particulado en los campus de la UNACH - Riobamba. *Revista Digital Novasinergia*, 4(2), 111-126
- Scapini, V., Carrasco, C., & Vergara, C. (2018). Efectos de la contaminación del aire en atenciones de urgencia de la Región Metropolitana. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 32, 55-74.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (2021). Reporte nacional: informe meteorológico – Municipio de Oruro.
- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111-118.