Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Subdirección de Estudios de Posgrado

Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental

Protocolo de Investigación

Sinergia de sensores remotos y SIG para el diagnóstico y condiciones de servicio de la infraestructura urbana del metro en la Zona Metropolitana de Monterrey.

Presenta:

Ing. Alejandro Barrón Duarte

Director de tesis: Dra. Fabiola D. Yépez Rincón

San Nicolás de los Garza, NL. 23 de Abril 2021.

FECHA: 2020/DIC/04

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS,** cuyo título es **"SINERGIA DE SENSORES REMOTOS Y SIG PARA EL DIAGNÓSTICO Y CONDICIONES DE SERVICIO DE LA INFRAESTRUCTURA URBANA DEL METRO EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY"**, que presenta el **ING. ALEJANDRO BARRÓN DUARTE,** como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS,** del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.**

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DRA. FABIOLA D. YÉPEZ RINCÓN

Evaluador

FECHA: 2021/02/15

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS,** cuyo título es **"SINERGIA DE SENSORES REMOTOS Y SIG PARA EL DIAGNÓSTICO Y CONDICIONES DE SERVICIO DE LA INFRAESTRUCTURA URBANA DEL METRO EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY"**, que presenta el **ING. ALEJANDRO BARRÓN DUARTE,** como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS,** del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.**

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

MC Rita Bustamante Alcántara
Evaluador

Monterrey Nuevo León a 28 de enero 2021

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Gerardo

Sirva la presente para saludarlo, a la vez me permito hacer de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS,** cuyo título es **"SINERGIA DE SENSORES REMOTOS Y SIG PARA EL DIAGNÓSTICO Y CONDICIONES DE SERVICIO DE LA INFRAESTRUCTURA URBANA DEL METRO EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY"**, que presenta el **ING. ALEJANDRO BARRÓN DUARTE,** como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS,** del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.**

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO.**

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes enviándole un cordial saludo.

Atentamente,

M.C. ELIZABETH GARZA MARTÍNEZ
DIRECTORA TÉCNICA
Evaluador

c.c.p. Archivo.

Sinergia de sensores remotos y SIG para el diagnóstico y condiciones de servicio de la infraestructura urbana del metro en la Zona Metropolitana de Monterrey.

Este documento fue aprobado por el comité:

Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón

Presidente

Maestra Rita Bustamante Alcántara

Sinodal Claustro UANL

Maestra Elizabeth Garza

Sinodal Externo a la UANL

Dr. Daniel Sánchez

Coordinador de la maestría

Oficio dirigido al Dr. GERARDO FAJARDO

Oficio dirigido al departamento escolar y de archivo de la UANL

Comprobante de corrección de tesis

Dedicatoria

Agradecimientos

Índice

1 Introducción 18

1.1 Justificación 24

1.2 Objetivo general 25

1.2.1 Objetivos específicos 25

1.3 Hipótesis 26

2 Antecedentes y marco teórico 26

2.1 Antecedentes 26

2.2 Marco teórico 33

2.2.1 Sensores remotos 33

2.2.2 LIDAR 37

2.2.3 Tipos de LIDAR 38

2.2.4 Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT). 39

2.2.5 Sistemas de información geográfica 42

2.2.6 Estructuras 43

3 Materiales y métodos 44

3.1 Área de estudio 44

3.2 Equipo 48

3.2.1 Escáner Terrestre 48

3.2.2 Estación total topográfica 49

3.2.3 DJI Inspire 2, cámara Zenmuse X5 50

3.3 Desarrollo metodológico 51

3.3.1 Levantamiento en campo 52

3.3.1.1 GLS (Ground Laser Escanner). 52

3.3.1.2 Postproceso 54

3.3.1.2.1 Alineación de nube de puntos 54

3.3.1.3 Levantamiento fotogramétrico aéreo con VANT 57

3.3.2 Condiciones atmosféricas en la ZMM conSIMA 59

3.3.3 Índice de accesibilidad 60

3.3.4 Mapeo de vulnerabilidad 71

4 Resultados y discusiones 74

4.1 Levantamiento en campo 74

4.1.1 EscaneosGLS 74

4.2 Inspección visual 76
4.3 Condiciones atmosféricas 80
4.4 Análisis de accesibilidad 87
4.5 Modelo de vulnerabilidad 90
5. Conclusiones y recomendaciones 92
6. Referencias 95
7. Anexos 103

Lista de figuras

Figura 1. Diferentes subsistemas de sensores remotos. a) Satélite Landsat 7, b) imagen obtenida de un sensor multiespectral, c) cámara térmica, d) cámara fotográfica. 8

Figura 2. Espectro electromagnético, longitud de onda en metros. 9

Figura 3. Combinación de bandas de una imagen en formato rasterizado. 12

Figura 4. Ejemplo de una nube de puntos obtenida con LIDAR terrestre. 12

Figura 5. Funcionamiento del LIDAR aéreo. 13

Figura 6. Clasificación de VANTs dependiendo del tipo de aeronave (Barrientos, A, et.al., 2007). 14

Figura 7. Ejemplos de VANTs de: a) ala rotativa, b) ala fija. 14

Figura 8. Bombardero aéreo de Perley (Vila Rovira, O. 2011). 15

Figura 9. Población viviendo en zonas urbanas históricamente (Fuente Gu, 2019). 23

Figura 10. Modalidades de transporte urbano en la ZMM: (A) metro, (B) autobús de tránsito y (C) autobús urbano. 32

Figura 11. Localización del área de estudio en la ZMM del Nuevo León al Noreste de México y ubicándose las líneas del metro y la zona muestreada de la Línea 2, donde además se ubican las columnas de interés por su grado de deterioros durante el levantamiento. Fuente: Propia. 40

Figura 12. Principal motivo de viaje dentro de la ZMM para los años 2017 y 2018. Fuente: Encuesta Ciudadana “Así Vamos 2017”. 44

Figura 13. Participación Modal en la ZMM. Fuente: Encuesta Ciudadana “Así Vamos 2017”. 44

Figura 14. Metodología de análisis de accesibilidad. Fuente: Saghapour (2015). 48

Figura 15. Metodología de inspección a través de Google Earth. 49

Figura 16. Metodología de levantamiento con VANT y LIDAR. 50

Figura 17. Toma de datos en campo utilizando escáner. 57

Figura 14. Toma de fotografías utilizando una cámara Nikon. 58

Figura 15. Fotografías tomadas en campo de la columna F-C3. 59

Figura 16. Montaje de la cámara GoPro y acercamiento. 60

Figura 17. a) Vuelo programado para el levantamiento fotográfico, b) fotografías tomadas por el VANT. 61

Figura 18. Segmento de la nube de puntos de la estructura del metro sin alinear. 62

Figura 19. Proceso de clasificación de agrietamientos. 63

Figura 4. Principal motivo de viaje dentro de la ZMM para los años 2017 y 2018. Fuente: Encuesta Ciudadana “Así Vamos 2017”. 67

Figura 5. Participación Modal en la ZMM. Fuente: Encuesta Ciudadana “Así Vamos 2017”. 68

Figura 9. Integración de archivos vectoriales (SHAPES), líneas del metro, vialidades, AGEB’s, Manzanas, estaciones y espacios públicos. 72

Figura 10. Arriba la Columna G…, grietas longitudinales sobre cabezal y abajo la Columna F-C1, Ind. de contaminación externo al sistema. Fuente: Google Earth. 73

Figura 11. Arriba la visualización de escaneos previo a su alineación y abajo una vista frontal del metro con la rampa de intensidades previa a la limpieza de puntos, pues aún están presentes los elementos de ruido como son cables, postes, árboles etc. 74

Figura 12. Levantamientos aéreos para la toma de evidencias en (A) la sección preliminar en Av. Nogalar de una sección de la línea 2 del metro. (B) trabes con manchas y hollín; (C), vista lateral con elementos de infraestructa y vialidades y (D) carril del metro aéreo con acumulación de humedadFuente: Propia. 75

Lista de tablas

Tabla 1. Longitudes de onda del rango óptico del espectro electromagnético (Viera, González, 2014). 10

Tabla 2. Aplicaciones civiles de los VANTs (Barrientos, A., et.al. 2007). 16

Tabla 1. Población de la ciudad, ingreso anual (US dolar) y tiempo de viaje al trabajo de ciudades seleccionadas con datos de 1990, fuente (Ralph Gakenheimer, 1998). 27

Tabla 2 Municipios de la Zona Metropolitana de Monterrey. Fuente: Programa de Desarrollo Urbano de la Zona Metropolitana de Monterrey 2040 en el capítulo de cartografía. 42

Tabla 3. Configuración del escáner GLS-1500 en modo normal. 55

Tabla 4. Características de la ETT Leica TS02. 56

Tabla 5. Características técnicas de Nikon D5600. 57

Tabla 6. Características de la Cámara Go Pro Hero 6. 57

Tabla 7. Características del drone DJI Inspire 2 y cámara Zenmuse X5. 58

Tabla 2 Municipios de la Zona Metropolitana de Monterrey. Fuente: Programa de Desarrollo Urbano de la Zona Metropolitana de Monterrey 2040 en el capítulo de cartografía. 66

Nomenclatura

LIDAR	Detección de luz y Rango (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging)
MDE	Modelo Digital de Elevación
MLC	Clasificación de máxima similitud (Maximum Likelihood Classification)
SIG	Sistema de información geográfica
VANT/dron	Vehículo aéreo no tripulado

Sinergia de sensores remotos y SIG para el diagnóstico y condiciones de servicio de la infraestructura urbana del metro en la Zona Metropolitana de Monterrey

Facultad de Ingeniería Civil, UANL

Resumen

La movilidad urbana eficiente favorece la meta de sostenibilidad de las ciudades, de tal forma que la inadecuada operación en los sistemas de transporte podría impactar a la población y su calidad de vida. Esta investigación busca generar un modelo con base SIG, dinámico y actualizable que permita evaluar la movilidad urbana sostenible de la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) considerando la accesibilidad al transporte público del metro, además de autobuses urbanos (AU), y Bus Rapid Transit (BRT) y generando nuevas bases de datos a través de sensores remotos para la inspección de la infraestructura. El estudio se enfoca en el sistema de transporte metro, por su importancia para la movilidad de la ZMM, tomando como estudio de caso al municipio de San Nicolás de los Garza, N.L. El análisis de accesibilidad es realizado con base a semáforos del acceso que la población tiene desde cada una de las áreas geoestadísticas básicas urbanas (AGEB) con respecto a las estaciones del metro y las paradas oficiales de los AUs. La inspección y análisis de las condiciones de servicio se realiza a través de inspección visual en campo utilizando la sinergia de sensores remotos (LIDAR y VANT) y en gabinete utilizando Google Earth y la información generada. La gestión del SIG permite la ubicación y análisis del deterioro de la estructura, la caracterización de contaminantes presentes en el ambiente y la relación de estos factores para la movilidad urbana sustentable.

Palabras Clave:

Movilidad Urbana Sostenible, VANT, LIDAR, SIG, sensores remotos.

1 Introducción

El acelerado de crecimiento de las ciudades durante los últimos siglos ha provocado problemáticas y consecuencias negativas en la economía, ecología y medio ambiente local y regional, debido a la falta de planeación de las áreas urbanas (Alberti, 2005, Lowe, 1991 y Moll, 1989). La edificación de estructuras urbanas modifica significativamente la morfología del territorio, impacta en la topografía, hidrología, calidad del aire, etc, y en algunos casos vulnera la sostenibilidad del entorno urbano (Ferrando, 2008; Frediani, 2009). El aumento acelerado de la población y la expansión urbana requiere de la cuantificación y monitoreo de su crecimiento para entender los procesos que ahí ocurren (Rodríguez, 2010). La ciudad es el espacio donde el ciudadano se desarrolla día con día en todos los aspectos de su vida cotidiana para su desarrollo personal y comunitario (Park y Burgguess, 2019; Milgram, 1970; Löw, 2008; Smith, 1997). Un mal funcionamiento de la ciudad podría causar el deterioro de la calidad de vida de la población y el medio ambiente (ONU et al. 2014; Carmichael et al. 2019; Sandstrôm et al. 2006; Gandy, 2004).

La dispersión urbana puede ocasionar una serie de conflictos relacionados al *"modus vivendi"* del ciudadano como un alto uso del automóvil, congestión vehicular, segregación residencial, contaminación ambiental, entre otras, representando un gran problema para la movilidad (Sarkar y Chalumuri, 2019; Rodríguez, 2019, Alan, M. y Ahmed, F., 2013). La movilidad urbana es el conjunto de desplazamientos de personas o mercancías que ocurren en la ciudad y los cuales pueden llevarse a cabo ya sea en transporte público o transporte privado (Jiménez, J. J. et al., 2010). La movilidad urbana puede ser un reto especialmente en las grandes urbes, donde desplazamiento rápido y eficaz se ve comprometido por los altos niveles de congestión por vehículos privados, tiempos de traslado y disponibilidad de aparcamiento (Keeley y Benton-Short, 2019; Rodríguez Quintanilla, I. A, 2013). Además de efectos indirectos como posibles accidentes que reducen la percepción de seguridad para usuarios, altos niveles de ruido o reducción de espacios públicos y áreas verdes, así como emisiones de gases de efecto invernadero (E. Arco, 2019; Jiménez, J. J. et. al., 2014).

Un sistema de transporte público bien organizado es capaz de mejorar los niveles de movilidad en las ciudades, intentando proveer formas accesibles de movilidad en una ciudad. Su eficiencia se basa en transportar una gran cantidad de personas, generando beneficios en diferentes áreas (Unibazo, M., 2010), por lo tanto, un sistema de transporte público debe considerar la accesibilidad paradas/estaciones, movilidad del sistema y la conectividad entre los diferentes modos de transporte (Cheng y Chen, 2015).

Para contar con una movilidad urbana adecuada es importante considerar un diseño adecuado al sistema, la cual Santos y De las Rivas Sanz (2008) la definen como “La calidad del acceso al sistema de movilidad urbana y a la infraestructura como a los servicios”. Proveer altos niveles de accesibilidad para los diferentes sistemas de transporte público con buena conectividad promueve un sistema de transporte activo y sostenible (Ceder et al., 2009; Saghapour, T., Moridpour, S., & Thompson, R. G. 2016).

En los últimos años los esquemas de planeación urbana han tomado enfoques para atender diferentes conceptos de estilo de vida con calidad, considerando un contexto de cualidad ambiental (Galicia, S. P., 2009). Hoy en día es notorio en las ciudades la falta de urbanismo adecuado a las necesidades particulares de cada una, y considerando que los desplazamientos son parte de la vida cotidiana y productiva de las mismas. La movilidad urbana eficaz será capaz de conectar y brindar accesibilidad a los ciudadanos, aquí es donde resulta importante fomentar un sistema de transporte público eficaz que logre competir en tiempo, costo y calidad con respecto al coche y al mismo tiempo ayude a contrarrestar las problemáticas existentes. Es de aquí donde se encuentra el término “*movilidad urbana sustentable*”, el cual implica que los sistemas de transporte respondan a las necesidades económicas, sociales y ambientales, buscando reducir al mínimo sus repercusiones negativas, promover una inclusión social y el desarrollo urbano balanceado (Gudmundsson, 2004; Elias & Shiftan, 2012; Miranda & Rodrigues da Silva, 2012). Un sistema de movilidad sustentable procurará disminuir el impacto en la calidad del ambiente urbano (Chen, P., 2019), principalmente en la calidad del aire, tomando en cuenta que los medios de transporte masivos permiten el traslado

de una mayor cantidad de personas, disminuyendo el parque vehicular y generando beneficios económicos y sociales, al disminuir las concentraciones de los contaminantes.

El transporte público debe ser visto como una solución a los problemas relacionados con la movilidad en las ciudades, por lo cual los sistemas de transporte público deben considerar la accesibilidad de estos hacia los usuarios, su funcionamiento adecuado y la conectividad existente entre los diferentes modalidades (Mushra et al., 2012). Es importante resaltar que las necesidades sociales son de suma importancia para los modelos de movilidad, ya que de esta manera se puede realizar planeaciones y gestiones adecuadas para cubrir estas necesidades, buscando un desarrollo sostenible.

La infraestructura urbana juega un rol importante en el funcionamiento de las ciudades (Yépez Rincón, F. D, 2013), como medio de transporte, vivienda o seguridad, entre otras. En este caso la infraestructura de interés es la que integra el sistema de transporte urbano, específicamente el transporte público que permiten generar una movilidad urbana.

Existen diversos modos de transporte público, sin embargo, a los que se les dará importancia serán los medios de transporte masivo de personas y presentes en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), metro o ferrocarril metropolitano, autobuses y autobús de tránsito rápido (BRT por sus siglas en inglés; Ecovía).

El concepto de movilidad urbana sostenible o transporte sostenible busca asegurar que los sistemas de transporte involucren las necesidades sociales, económicas y ambientales mientras se minimizan los impactos negativos hacia estos. Para poder realizar esto y ofrecer una mejor calidad en los servicios de movilidad, es necesario utilizar recursos más eficientes al mismo tiempo (Comisión Europea, 2011). Sin embargo, este objetivo necesita una estrategia fuerte en la red de infraestructura involucrada, por lo cual utilizar diferentes tecnologías que permitan vincular los datos de cada una, de manera que se logre optimizar la capacidad y el uso de la infraestructura. Tomando en cuenta esto, la integración de información es de suma importancia, la cual se refiere tanto a la información física

de la infraestructura como a la información de las condiciones de servicio de la misma (frecuencias, tráfico, nivel de servicio…), particularmente entre niveles administrativos (E. Arco, 2019).

En México, el 62.80% de la población (75.1 millones de habitantes) radica en zonas metropolitanas (CONAPO, 2015). Los efectos directos en el crecimiento acelerado de la población urbana pueden observarse en el aumento de la demanda de servicios, vivienda, transporte, educación, salud, entre otros, así como las problemáticas que de esto se puedan derivar.

Las actividades diarias generadas por las industrias, el comercio y tránsito vehicular, entre otros, usualmente producen grandes cantidades de sustancias que alteran la composición natural del aire, los cuales suelen estar asociados a graves afecciones de la salud humana (INECC, 2017; ProAire, 2016; OMS, 2018).

Considerando que en la ZMM se concentra el 95% de la población del estado de Nuevo León, así como vivienda, industria, comercio y vehículos automotores (ProAire, 2016). Esto ha resultado en que los límites máximos permisibles de calidad del aire sean superados, principalmente en el caso de partículas menores a los 10 y 2.50 micrómetros (PM10 y PM2.5), así como el ozono (O3).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) nos dice que la contaminación atmosférica urbana aumenta el riesgo a padecer enfermedades respiratorias. Por ejemplo, las PM10 se alojan en los pulmones, mientras que las PM2.5 penetran la barrera pulmonar y entran al sistema sanguíneo, por lo que una exposición crónica a estas partículas contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón. De igual manera, el ozono puede causar problemas respiratorios, causar asma, reducir la función pulmonar y originar enfermedades pulmonares.

La OMS estima que la contaminación ambiental del aire, ya sea en ciudades como en zonas rurales, fue causa de 4.2 millones de muertes prematuras en todo el mundo por año, principalmente debidas a la exposición a partículas PM2.5.

Es por esto que conocer las condiciones en las que se encuentra la calidad del aire urbana permitiría tomar las medidas necesarias para reducir la

contaminación y mejorar la calidad de vida, sin embargo, es importante resaltar que la participación de los gobiernos e instancias normativas es importante, en sectores como industria, energía, transporte, planificación urbana, gestión de desechos, entre otros (OMS, 2018).

Tomando en cuenta la variedad de datos que se deben recolectar para poder desarrollar estrategias y mejorar la calidad de vida urbana, y las diferentes áreas que aportan esta información, es importante que definamos el término de geomática, la cual se define como la integración sistémica de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada (Gómez, R. A., 2009; SO/TC211/WG1 N119), término que nace en Canadá en 1969 acuñado por Français Bernard Dubuisson.

Existen diversas técnicas para la obtención de estos datos espaciales a través de diferentes disciplinas tales como: topografía, cartografía, teledetección o percepción remota, fotogrametría, análisis espacial, Sistema de Posicionamiento Global de Navegación por Satélite (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Hoy en día, el levantamiento de datos cuenta con el apoyo de una gran variedad de instrumentos, técnicas y métodos matemáticos que permiten realizar mediciones de objetos (Gómez, R. A., 2009). Entre estas metodologías modernas se encuentra el GPS, convirtiéndose en una técnica indispensable al requerir una localización precisa.

Por otro lado, la percepción remota o teledetección se define como la obtención e interpretación de información sobre objetos o superficies sin estar en contacto físico con ellos (Chuvieco, 1990). Este término hace uso de métodos que por medio de la energía electromagnética en forma de luz calor y ondas de radio, pueden detectar y medir diferentes características de los objetos (Gebhard, 2002 ms; Landgrebe, 2005).

Aunque la utilización de los sensores remotos se ha enfocado más en las aplicaciones en el campo de los recursos naturales (Colwell, 1968; Verbyla, 1995), la tendencia actual es que se incremente su utilización en otras áreas de la

ingeniería gracias a los avances tecnológicos, el desarrollo de la computación, los bajos costos de obtención de las imágenes y a las ventajas que presenta en cuanto a resolución (Rodríguez Chávez, Ó., et. al. 2005).

En el campo de la ingeniería civil, los sensores remotos, como cámaras montadas en Vehículos Aéreos no Tripulados (VANTs o drones) y el escáner láser, se han utilizado en problemáticas relacionadas con estudios de infraestructura urbana (Jensen y Cowen, 1999; Sundar, M. L., Prasath, C. A., Rosario, H. E., & Tamilselvan, K., 2019), infraestructura hidráulica (Pereira, B., Medeiros, P., Francke, T., Ramalho, G., Foerster, S., & De Araújo, J. C., 2019) e infraestructura de transporte, entre otros (Pan, Y., Dong, Y., Wang, D., Chen, A., & Ye, Z. 2019; Chen, S., Truong-Hong, L., O'Keeffe, E., Laefer, D. F., & Mangina, E. 2018).

Diferentes avances tecnológicos en sensores remotos se han desarrollado para ayudar a garantizar la seguridad operativa de las estructuras de transporte alrededor del mundo (Zhang et al., 2009; Delatte et. al., 2003), para inspección de agrietamientos en concreto (Yu et al. 2007; Nishikawa 2012) y en estructuras de acero (Roach, D., 2009). En la mayor parte de los casos estas investigaciones pretenden monitorear la salud estructural para prevenir mal funcionamiento, determinando que la caracterización de elementos de las estructuras como el concreto y acero pueden emitir información cualitativa y cuantitativa para la evaluación del riesgo y por lo tanto formar parte de un sistema de seguridad (Stajano, et al., 2008).

Hoy en día la geomática permite realizar inspecciones no destructivas, principalmente visuales, en estructuras con zonas de difícil acceso, haciendo posible a través de la información recolectada la toma de decisiones referentes a mantenimiento y cuidado de la estructura (Mills, J., & Barber, D., 2004)

Por este motivo, se buscan otros métodos que puedan aportar datos a tales inspecciones, como lo es el uso de VANT con cámaras y sensores integrados (p.e. cámaras multi e hiperespectrales, térmicas, entre otras).

La integración de diferentes sistemas y tecnologías es importante para la toma de decisiones públicas efectivas. Crear un sistema de transporte integrado y

eficiente representa una solución para organizar y monitorear la movilidad de diferentes modos de transporte, de manera que aumente el transporte sostenible mediante la creación de nuevas oportunidades para la movilidad colectiva (E. Arco, 2019).

1.1 Justificación

Llevar a cabo una gestión urbana adecuada implica poner en práctica diferentes áreas de conocimiento que sean complementarias entre sí. No podemos hablar de movilidad urbana sin tomar en cuenta la relación e importancia que tiene en la gestión urbana. Sin embargo, para lograr que esta se lleve a cabo es necesario contar con información que nos permita analizar la situación y buscar soluciones adecuadas a las necesidades.

La presente investigación considera tres modelos con información específica cada uno que posteriormente se integrarán en uno mismo. En el primer modelo se obtiene información a través de sensores remotos de las condiciones de la estructura del metro. El segundo modelo proporciona información de la calidad del aire en el área de estudio obtenida a través de las estaciones de monitoreo del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) y el tercer modelo nos muestra un diagnóstico de las condiciones de accesibilidad al transporte público en el municipio de San Nicolás de los Garza.

Por sí solo cada modelo proporciona información relevante en diferentes áreas, sin embargo, es información que se puede relacionar entre sí. Es por esto que mediante SIG se integrará la información de cada uno de estos modelos, permitiendo la interacción en conjunto de los datos, generando un modelo georreferenciado que permita evaluar las condiciones de movilidad tomando en cuenta la accesibilidad del transporte público (Autobuses urbanos, Bus Rapid Transit (ecovía) y el metro), las condiciones de la calidad del aire y de la infraestructura urbana de transporte, el cual permite visualizar de manera integral las condiciones del área en estudio, sirviendo como herramienta para la planeación urbana, la cual permitirá plantear sostenibles de problemáticas, facilitando la toma de decisiones.

Este tipo de metodologías tienen de un gran potencial de aplicación en áreas metropolitanas en donde la infraestructura y los servicios que esta aporta no pueden ser interrumpidos, pues esto representaría problemáticas como pérdidas económicas, caos vial, entre otros.

En la ZMM en donde, actualmente su población asciende a más de 4.8 millones de habitantes (INEGI, 2015), la infraestructura de transporte representa uno de los mayores retos ya que la movilidad urbana se basa principalmente en el uso de vehículos particulares (Información de gobierno), y es poca la infraestructura de transporte masivo comparándolo con otras metrópolis como lo es el caso de Cd. De México (Izquierdo, C., & María, J. (2008).

Por lo tanto, conocer las condiciones de la infraestructura de transporte así como las condiciones de servicio de los medios de transporte público, los cuales movilizan grandes cantidades de personas es de suma importancia para mantener un funcionamiento adecuadamente.

1.2 Objetivo general

Realizar un modelo interactivo con base SIG para mapear las zonas vulnerables de la movilidad urbana sostenible de la Zona Metropolitana de Monterrey fundamentado en el índice de accesibilidad, las condiciones de servicio de la estructura del metro analizada a través de la sinergia de sensores remotos (LIDAR y VANT) y considerando la calidad del aire.

1.2.1 Objetivos específicos

- Realizar un análisis de la accesibilidad general de la población hacia el servicio del metro y los medios de transporte urbano que conecten con ella a través sistemas de información geográfica.
- Obtener información para la inspección y evaluación del metro para determinar las secciones que pudieran poner en riesgo sus condiciones de servicio a la población mediante métodos no destructivos, ágiles y económicos como Google Earth, y sensores remotos (VANT y LIDAR).

- Obtención de las condiciones atmosféricas en la ZMM durante el periodo 2015-2018 a través de estaciones de monitoreo del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), que permitan conocer la distribución de las emisiones generadas y el grado de exposición de la estructura.
- Realizar un mapeo de la vulnerabilidad de la estructura con base a todo lo anterior.

1.3 Hipótesis

El sistema de movilidad urbana sostenible de la Zona Metropolitana de Monterrey es un elemento importante que puede beneficiarse del uso de las tecnologías geomáticas que podrían aumentar la posibilidad de detectar y prevenir problemáticas en la infraestructura de los sistemas de transporte urbano, mitigando efectos que comprometan la movilidad y sostenibilidad de la ciudad y su población.

2 Antecedentes y marco teórico

2.1 Antecedentes

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) informó en 2018 que el 55% de la población mundial vive en ciudades, y se estima que esta aumente hasta un 13% para el año 2050. América del Norte y América Latina presentan los niveles de urbanización más altos a nivel mundial; según datos de las Naciones Unidas durante las últimas tres décadas, la tasa de urbanización de la región aumentó 9% en tan solo 20 años (Sánchez, 2002). Considerando todas estas estimaciones y cifras resulta de suma importancia que se consideren los efectos económicos (Stren, 1995), sociales (UNICEF, 2012; Pryer &Crook, 1998) y ambientales (PNUMA, 2003) dentro de la planificación urbana y acciones políticas de las ciudades, que consideren medidas de mitigación y acciones para aumentar su resiliencia.

El crecimiento de las ciudades ha ido incrementando de manera exponencial en todo el mundo. La Real Academia Española define el urbanismo como “el conjunto de conocimientos relacionados con la planificación y desarrollo de las

ciudades". La urbanización se ve reflejada en cambios a través del tiempo que generan modificaciones en la geografía económica y la situación social de una región o país (Miranda, 2003), los cuales suelen asociarse a un incremento en el bienestar del mismo. Sin embargo, si esta no se lleva a cabo una planificación y gestión adecuada puede generar problemáticas como pobreza, rezago social y deterioro del medio urbano y ambiental.

Los problemas urbanos no son actuales, Sánches y Bonilla (2007) nos indican en su libro "Urbanización, cambios globales en el ambiente y desarrollo sustentable en América Latina" que desde los años sesenta ya se conocían estas problemáticas. El urbanismo fue creando avances para entender las dimensiones sociales, económicas y políticas de las áreas urbanas, y fue para los años ochenta cuando se comenzó con la temática ambiental, mientras que en los noventa el enfoque cambió de manera internacional hacia el desarrollo sostenible (García, Arzalus & Fitch, 2011; Gaza & Rodríguez, 1998).

Las ciudades han crecido de manera exponencial en todo el mundo, esto fue documentado por Gu (2019) y en la Figura 1 se demuestra cómo a partir de la revolución industrial la urbanización se dispara.

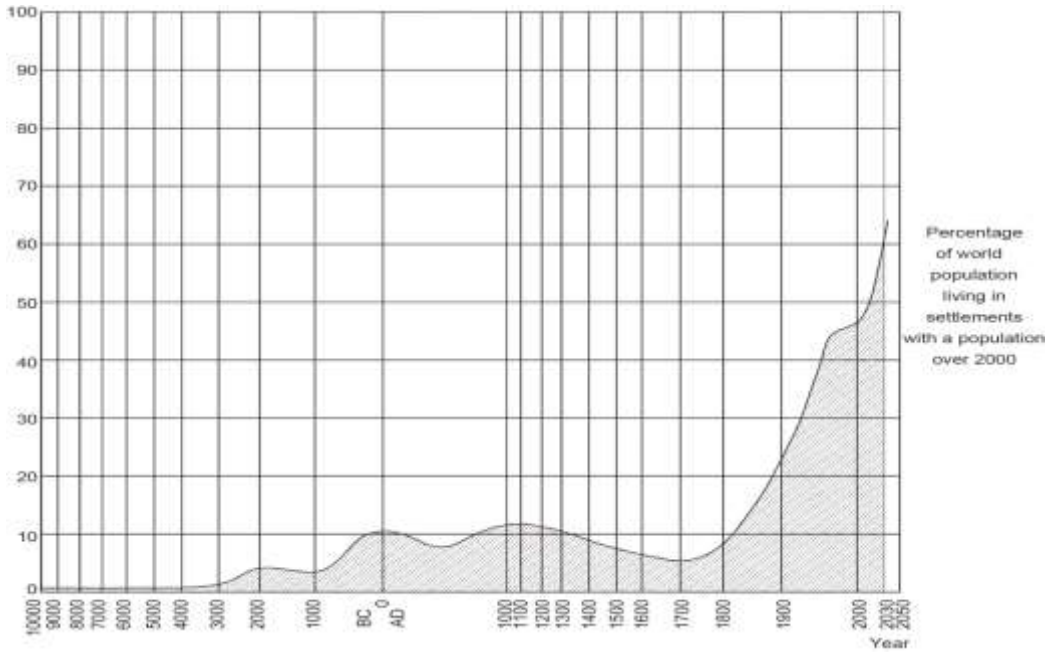


Figura 1. Población viviendo en zonas urbanas históricamente (Fuente: Gu, 2019).

El crecimiento descontrolado de las ciudades dispersa a las nuevas construcciones cuando no se considera una planeación urbana adecuada. Esto ocasionará una serie de conflictos cuando no se cuenta con la infraestructura necesaria para cumplir las necesidades de la población, en términos de movilidad, el aumento en los tiempos invertidos para desplazarse en la ciudad propiciará el alto uso del automóvil, congestión vehicular, así como segregación residencial, aumentó en los costos de vivienda, contaminación ambiental, entre otras.

Las condiciones de movilidad en las grandes y medianas ciudades tienden a incrementarse en la medida de la diversificación de las actividades de la población y de un inadecuado modelo de ordenamiento urbano (Galicia, S. P., 2009). Esto se puede observar por ejemplo en la ciudad de México, donde se realizan más de 30 millones de viajes/persona/día, de los cuales cerca del 80% usan el transporte colectivo. En los últimos años estas condiciones han aumentado, incrementando el número de viajes y el total de vehículos en los que estos se realizan, donde el 93% son automóviles privados (Baranda, 2006).

Las grandes ciudades del mundo en desarrollo presentan tiempos empleados en viajes generalmente altos. Por ejemplo, de acuerdo con el estudio de Gakenheimer (1998), el tiempo promedio de un viaje diario en un solo sentido en Río de Janeiro era de 90 minutos y en Bogotá, 60 minutos. La velocidad vehicular promedio en Manila es de siete millas por hora y en promedio un automovilista en Bangkok pasa detenido en el tráfico, en promedio, el equivalente a 44 días al año.

Jirón y Mansilla (2013) proponen una forma de estimar las múltiples barreras de accesibilidad que los viajeros en la ciudad latinoamericana y los problemas que encuentran diariamente en sus trayectos por la ciudad y cómo los enfrentan. Este estudio expone cómo las barreras de accesibilidad limitan las oportunidades de la población generando diversas formas de exclusión urbana.

En algunos casos los sistemas de transporte pueden llegar a ser considerados deficientes pero no necesariamente la principal barrera de accesibilidad (Cass et al. 2005; Elliot y Urry 2012). La forma en que la ciudad se construye y el tamaño de la población tienen una repercusión en la eficiencia de los sistemas, la eficiencia de la

movilidad se puede medir en el tiempo invertido, por ejemplo, en la Tabla 1, se mencionan algunas ciudades en los la década de los 90s, entre ellas Monterrey, el tiempo estimado de movilidad era de 25 minutos hace 30 años, sin embargo, la población era la mitad de lo que hoy es, y el tiempo estimado actual definitivamente es más del doble también.

Tabla 1. Población de la ciudad, ingreso anual (US dólar) y tiempo de viaje al trabajo de ciudades seleccionadas con datos de 1990, fuente (Modificada de Ralph Gakenheimer, 1998).

País	Ciudad	Población de ciudad	Autos por cada 1.000 habitantes	Promedio de ingreso por ciudad	Viaje al trabajo (minutos)
India	Nueva Delhi	8.427.083	3,4	1.084	59
China	Beijing	6.984.000	1,1	1.079	25
Ghana	Accra	1.387.873	5,5	1.241	35
Indonesia	Jakarta	8.222.515	7,2	1.975	40
Egipto	El Cairo	6.068.695	19,8	1.345	40
Filipinas	Manila	7.928.867	7,4	3.058	30
Costa de Marfil	Abidjan	1.934.398	12,9	3.418	38
Marruecos	Rabat	1.050.700	26,7	4.158	25
Ecuador	Quito	5.345.900	15,4	2.843	56
Colombia	Bogotá	4.907.600	35,9	3.252	90
Tailandia	Bangkok	6.019.055	21,4	4.132	91
Túnez	Túnez	1.631.000	25,5	3,327	37
Jamaica	Kingston	587.798	28,3	3.696	60
Turquía	Estambul	7.309.190	28,1	3.576	40
Polonia	Varsovia	1.655.700	137,8	2.265	45
Chile	Santiago	4.767.638	53,9	3.433	51
Argelia	Argelia	1.826.617	29,0	7.335	30
Malasia	Kuala Lumpur	1.232.900	103.3	6.539	34
México	Monterrey	2.532.349	80.0	4.810	25
Sudáfrica	Johannesburg	8.740.700	102,0	9,201	59
Venezuela	Caracas	3.775.898	80,2	5.123	39
Brasil	Rio de Janeiro	6.009.397	70,5	5.204	107
Corea del Sur	Seúl	10.618.500	32,1	19.400	37
Grecia	Atenas	3.075.000	172,9	14.229	40

Israel	Tel Aviv	1.318.000	174,5	16.680	32
España	Madrid	4.845.851	307,9	23.118	33
Singapur	Singapur	2.690.100	95,5	12.860	30
Hong Kong	Hong Kong	5.800.600	37,0	15.077	45
Reino Unido	Londres	6.760.000	363,5	18.764	30
Australia	Melbourne	3.035.758	435,6	26.080	25
Holanda	Amsterdam	695.221	366,6	14.494	18
Austria	Viena	1.503.194	387,9	22.537	25
Francia	París	10.650.600	417,3	32.319	40
Canadá	Toronto	3.838.744	475,9	44.702	26
Estados Unidos	Washington	3.923.574	574,3	49.667	29
Alemania	Munich	1.277.576	485,3	35.764	25

Gakenheimer en 1998 menciona las 12 características esenciales que distinguen a las ciudades en desarrollo con respecto a las temáticas de la movilidad, algunas de ellas son:

- ➔ El ritmo acelerado de la motorización, esto se debe a las facilidades de construcción, sin embargo la demanda del espacio para la movilidad resulta en una congestión enorme.
- ➔ Las demandas de viaje exceden con mucho el suministro de infraestructura. Los altos niveles de congestión y la gran demanda latente de viajes son el resultado de que la motorización excede toda posible expansión de carreteras.
- ➔ Alto porcentaje de viajes en tránsito público. En la mayor parte del mundo en desarrollo los viajes urbanos son cubiertos en alrededor de 75 por ciento. Por lo que tiene elevada prioridad lograr que el transporte público funcione y que es un problema difícil introducir buses en la congestión automovilística.
- ➔ Intenso deseo de tener un automóvil y usarlo.
- ➔ Estructura urbana incompatible con la motorización. La densidad residencial limita el espacio para nueva infraestructura urbana.
- ➔ Inadecuado mantenimiento de calles y carreteras.

- ➔ Respuesta irregular al impacto provocado por las nuevas construcciones, lo cual es derivado de la falta de criterios de planificación, generando incluso más problemáticas.

La mala calidad de aire en la ciudad es un problema que se ha incrementado en las últimas décadas, teniendo gran influencia el aumento al parque vehicular. Al aumentar la dependencia de los combustibles fósiles para movilizar a la población de la ZMM se generan una serie de problemáticas causadas por las emisiones de dióxido de carbono (CO2). En la ZMM concentra el 95% de la población del estado de Nuevo León, así como vivienda, industria, comercio y vehículos automotores (ProAire, 2016). Las fuentes fijas (industria) son las principales emisoras de bióxido de azufre (SO2) y PM2.5, además de aportar significativamente a las PM10 y monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx), mientras que las fuentes móviles carreteras son las principales emisoras de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno (Tabla 2).

Tabla 2. Inventario de emisiones por fuente para la ZMM.: LT Consulting, 2015. Información del Inventario de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera para el Estado de Nuevo León

Fuente de emisión	Ton/año						
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NOx	COV	NH_3
Fijas	**4,662.30**	**3,221.00**	**6,613.00**	**5,284.50**	**12,208.50**	**6,749.80**	**160.30**
Área	5,707.50	1,207.50	5.70	1,733.60	1,344.60	51,370.60	6,722.30
Móviles carreteras	**643.30**	**606.60**	**234.70**	**232,946.30**	**29,035.20**	**22,261.60**	**931.60**
Móviles no carreteras	23.10	21.90	79.50	1,767.00	1,089.80	167.90	0.10
Naturales	NA	NA	NA	NA	746.40	2,133.10	NA

Los municipios de la ZMM aportan más del 70% en la emisión de CO, COV y NOx, así como en el 50% de emisión o más de material particulado. Las concentraciones de partículas suspendidas y ozono (O3) en la ZMM, es un problema ambiental grave con implicaciones en la salud que deterioran la calidad de vida de sus habitantes. Las tendencias históricas de estos contaminantes indican que la exposición de la población ha sido de manera constante y con episodios

esporádicos de altas concentraciones, implicando diversos efectos en la salud (ProAire, 2016; INE, 2011).

La planeación urbana es un elemento importante, estratégico, trascendental y apremiante para las ciudades (Yépez Rincón, F. D., 2013), tomando en cuenta los factores no solo de la estructura física de la ciudad, sino también las afectaciones que se tengan hacia la población.

La información es vital para poder planear, los datos georreferenciados y manejados desde una plataforma SIG resultan de mucha utilidad para la toma de decisiones, siendo los sensores remotos una tecnología que permite generar información importante para su manipulación e integración el SIG como herramienta para la planeación urbana.

Algunos autores como Lagüela, S., Solla, M., Puente, I., & Prego, F. J. (2018) y Pejić, M. (2013) han implementado tecnologías para obtener información geométrica y alta precisión mediante el Ground Laser Scanner (GLS o escáner) para realizar inspecciones de infraestructura de transporte de secciones largas en túneles o metros, mientras que Gopalakrishnan, K., Gholami, H., Vidyadharan, A., Choudhary, A., & Agrawal, A. (2018) utilizan imágenes para la detección de deterioros.

Lerma, C., Mas, Á., Gil, E., Vercher, J., & Peñalver, M. J. (2014) utilizan imágenes termográficas que les permiten examinar los muros exteriores del Seminari-Escuela de Corpus Christi en Valencia, España, hechos con bloques de piedra caliza tradicionales de la región de Valencia. Ellos resaltan la necesidad de utilizar este tipo de técnicas no destructivas para examinar edificios históricos y así evitar daños a la estructura.

Dawood T., Zhu Z., & Zayed T. (2018) en Singapur, hablan de la utilización de un método basado en procesamiento de imágenes Red, Green and Blue (RGB) y de un análisis de regresión para identificar y cuantificar la fragmentación (desprendimiento) del concreto en las redes de metro de la ciudad de Montreal. Se busca a través de este método cubrir la necesidad de realizar inspecciones como un nuevo método, que permita obtener resultados consistentes, sin el requerimiento

de mucho tiempo de trabajo y que permita registrar los desprendimientos en zonas de difícil acceso.

En Estados Unidos, Vaghefi, K. (2012), resalta la importancia del uso de las tecnologías basadas en la percepción remota para la evaluación y monitoreo del estado de los puentes y de cómo se pueden volver más eficientes los esfuerzos en las inspecciones realizadas a estos, así como de su reparación y rehabilitación. Una de las ventajas principales que le encuentran al uso de estas tecnologías es eliminar la necesidad de interrumpir el tráfico o el cierre de carriles en las vialidades para realizar las inspecciones, ya que no implican entrar en contacto directo de la estructura (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

Estas tecnologías en conjunto con los SIG se han desarrollado de manera paralela, los expertos en sensores remotos (SR) se interesan más por el procesamiento de imágenes o datos y formar patrones de reconocimiento a ciertos problemas, mientras que los investigadores dedicados a los SIG se interesan más en la visualización de la información o el análisis espacial (Yépez Rincón, 2013). Los SIG son manejados principalmente en bases vectoriales, a través de líneas, puntos y polígonos (Krabill, W. B., Collins, J. G., Link, L. E., Swift, R. R. y M. L. Butler, 1984), mientras que los SR utilizan principalmente celdas o pixeles.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Sensores remotos

El proceso mediante el cual se recolecta información de un objeto o superficie sin tener contacto directo se le conoce como percepción remota, mientras que un sensor remoto es el aparato mediante el cual se obtiene esta información. La información obtenida varía dependiendo del tipo de sensor que utilicemos, como puede ser fotografías, dígitos, gráficos, etc. Por mencionar algunos ejemplo de sensores remotos tenemos del satélite Landsat 7, radiómetros y espectroradiómetros, georadar (GPR), escáner láser (LiDAR), cámaras hiper o

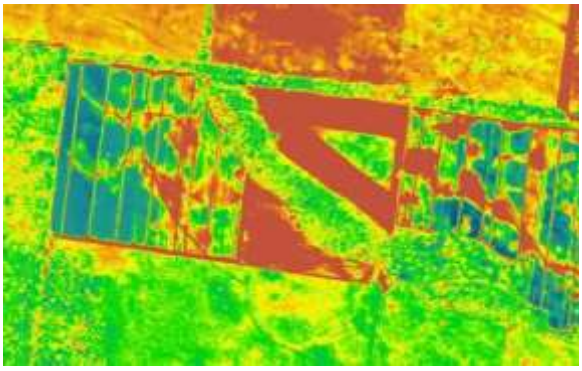
multiespectrales, cámaras térmicas p cualquier cámara fotográfica ((Caria de Moraes, E., 2002; Vaghefi, K., 2012) (Figura 2).

Al obtener información por medios remotos, hay que considerar un factor muy importante, la resolución, la cual depende de la cantidad y calidad de la información que se registre (López-Granado, F., 2013). La resolución se define como la habilidad para discriminar información de detalle acerca del objeto que se está estudiando y del entorno geográfico en que se encuentra.

El concepto de resolución de un sensor remoto implica 4 manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal:

La resolución espacial se refiere al campo de visión con el cual se pueden detectar los objetos, es decir, la menor área que se puede distinguir en un píxel y que representan una parte de la superficie en observación. Un píxel es la unidad base de información que conforma una imagen.

a)



b)

c)

d)

Figura 2. Diferentes subsistemas de sensores remotos. a) Satélite Landsat 7, b) imagen obtenida de un sensor multiespectral, c) cámara térmica, d) cámara fotográfica (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

Por otro lado, nos referimos a resolución espectral al número y anchura de las bandas espectrales que un sensor remoto puede identificar, y por lo tanto, el espaciamiento o rango de las longitudes de onda en el espectro electromagnético que el sensor es capaz de registrar. Una alta resolución espectral implica un mayor número de bandas que cubren un rango electromagnético más angosto. Cuanto mayor sea el número de medidas en un determinado intervalo de longitud de onda mejor será la resolución espectral de la recolección.

La periodicidad con la que un sensor obtiene información de cierta área se le conoce como resolución temporal. Por ejemplo, el satélite Landsat 7 obtiene imágenes de la misma zona cada 16 días.

La resolución radiométrica trata de la sensibilidad del sensor, es decir, la capacidad que este tiene para detectar variaciones en la energía reflejada (radiación espectral) que emiten los elementos u objetos que se analizan. Usualmente se indica por el número de niveles de gris que se obtiene; los píxeles de la imagen tienen un nivel digital, que se representa como un número entero, este valor puede ser traducido a escala de grises. Entre mayor sea la resolución radiométrica se podrán interpretar mejor las imágenes.

Podemos clasificar los sensores remotos según la fuente de energía de donde obtienen la información y pueden ser activos o pasivos. Los sensores remotos activos generan su propia energía, mientras que los pasivos dependen de una fuente de energía externa (Figura 3). Los más utilizados son los sensores pasivos, los cuales miden la magnitud de la radiación electromagnética que se refleja e irradia desde la superficie de la tierra y de la atmósfera; con esto se obtiene información sobre la superficie que se analiza. El espectro visible, el infrarrojo y las microondas son algunos rangos que forman parte del espectro electromagnético (Tabla 3).

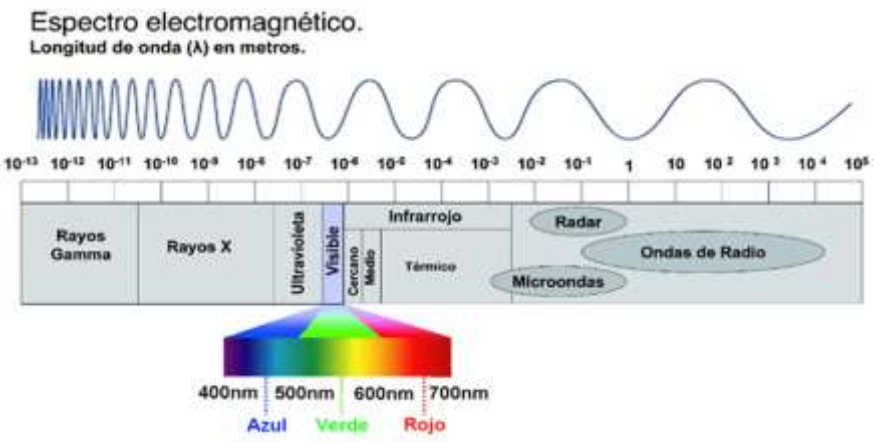


Figura 3. Espectro electromagnético, longitud de onda en metros (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

Tabla 3. Longitudes de onda del rango óptico del espectro electromagnético (Viera, González, 2014).

Rango	Longitud de onda
Radiación UVC, UVB y UVA	200 nm - 400 nm
Espectro visible	360 nm - 780 nm
Infrarrojo cercano	0.780 µm - 1.1 µm
IR de onda corta	1.1 µm - 2.5 µm
IR de onda media	2.5 µm - 7 µm
IR de onda larga	7 µm - 15 µm

Otra clasificación para los sensores remotos es por su resolución espacial; esta puede ser alta o baja (Parra-Henao, G., 2010). Los sensores de alta resolución espacial son aquellos que captan información de la superficie de la tierra en áreas iguales o menores a 1 x 1 km, obteniendo un buen detalle que puede tener esta información, mientras que los sensores de baja resolución comprenden los que dan información de superficies mayores al kilómetro cuadrado. Existen varias áreas donde han sido empleados los sensores remotos, J.M. Paruelo en 2008 utilizó sensores a bordo de satélites de observación terrestre para caracterizar ecosistemas en España; C.M. Di Bella, G. Posse, M.E. Beget, M.A. Fischer, N. Mari

y S. Veron en Argentina (2008) han analizado diferentes productos obtenidos de sensores remotos, como imágenes satelitales, mediante las cuales buscan detectar y cuantificar las afectaciones por incendios e inundaciones en ciertas áreas, permitiendo evaluarlas y analizarlas en tiempo real y ayudar a la toma de medidas preventivas, así como caracterizar las condiciones en las que se encuentran; F. Rosete y G. Bocco (2013) en México utilizan los SIGs y la percepción remota para elaborar programas de manejo forestal comunitario, involucrando elaboración, ejecución, evaluación y actualización de información, mapas, textos, entre otros.

2.2.2 LIDAR

La tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*) es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de x, y, z. (Esri, 2016). Existen diversas aplicaciones, algunas de ellas son las representaciones cartográficas láser aéreas, estudios geológicos y como una alternativa para técnicas topográficas.

Los principales componentes de hardware del sistema LIDAR son un vehículo de recolección (avión, helicóptero, vehículo o trípode), sistema de escáner láser, GPS (Sistema de posicionamiento global) e INS (sistema de navegación por inercia), el cual mide la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema LIDAR.

El LIDAR es un sensor óptico el cual emite rayos láser hacia una superficie mientras este se mueve por una trayectoria específica. Una vez que el rayo láser alcanza la superficie este regresa al sensor LIDAR y es captado por los receptores, los cuales registran el tiempo de manera precisa desde que el rayo láser dejó el sistema hasta que regresa, calculando la distancia entre el sensor y la superficie con la que tuvo contacto el láser. Al combinar las distancias obtenidas con la información que proporciona el GPS e INS, se generan puntos tridimensionales georreferenciados con alta precisión de la superficie analizada.

Cada uno de los rayos láser generan un punto el cual contiene información georreferenciada x, y y z, los cuales además pueden contener otros atributos como número de devoluciones, ángulo y dirección de escaneo, tiempo del GPS, intensidad y RGB.

Posterior a la obtención de datos se debe realizar un postprocesado, el cual nos genera datos conocidos como nube de puntos, las cuales están conformadas por una gran cantidad de puntos georreferenciados con atributos que varían dependiendo del tipo de LIDAR con el que fueron obtenidos (figura 4).

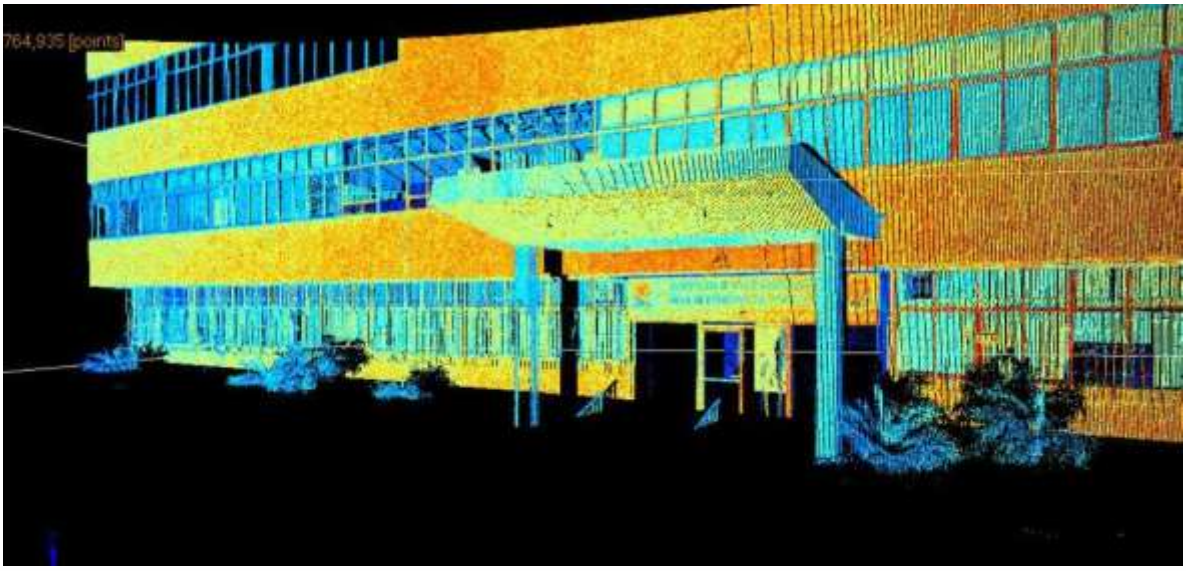


Figura 4. Ejemplo de una nube de puntos obtenida con LIDAR terrestre (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

2.2.3 Tipos de LIDAR

Existen dos tipos básicos de LIDAR: aéreo y terrestre.

- El LIDAR aéreo es instalado en un avión o helicóptero, emitiendo el rayo láser hacia el suelo y reflejándose al sensor en movimiento (figura 5). La principal ventaja de este tipo es que el área de cobertura es mayor y tiene acceso a lugares difíciles. Este puede ser utilizado para topografía y batimetría.
- Con el LIDAR terrestre se obtienen nubes de puntos densas y exactas que permiten identificar los objetos de manera muy precisa, este puede ser móvil o estático. El móvil es aquel donde el sensor se monta en un vehículo (automóvil, tren, barco), mientras que el estático el sensor es montado en un trípode en una ubicación precisa.

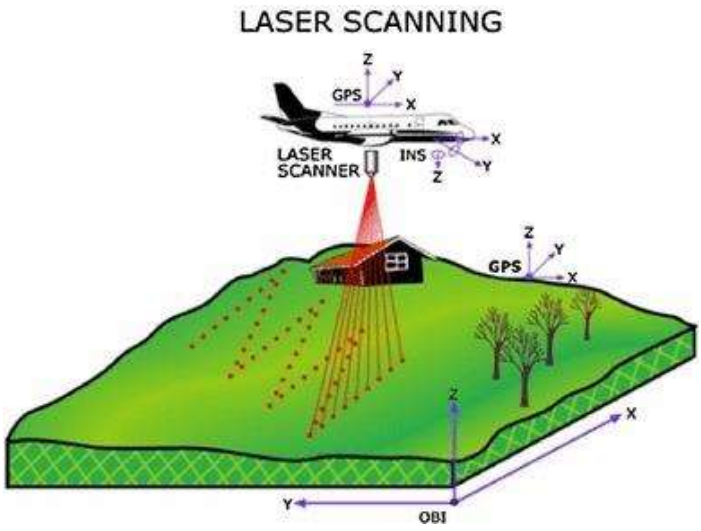


Figura 5. Funcionamiento del LIDAR aéreo (Baek, N., Shin, W. S., & Kim, K. J., 2017).

2.2.4 Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT).

Un sistema aéreo no tripulado es definido como un conjunto de elementos que hacen posible el vuelo de un VANT, incluyendo el equipo, comunicaciones y personal necesario para su control.

Los VANT, también llamados UAV (Unmanned Aerial Vehicle, por sus siglas en inglés), es una aeronave que no transporta un operador humano y puede ser controlado de manera remota o de forma automática a través de planes de vuelo previamente programados.

La principal característica de los VANTs es que cuentan con un piloto automático y sensores de navegación como GPS e IMU (Unidad de medición inercial) que les permite realizar planes de vuelo con gran precisión y obtener los datos necesarios para corregir geométricamente las imágenes obtenidas.

La principal manera de clasificar los VANTs es por el tipo de aeronave, distinguiendo las aeronaves de despliegue vertical y de despliegue no vertical (Figuras 6 y 7).

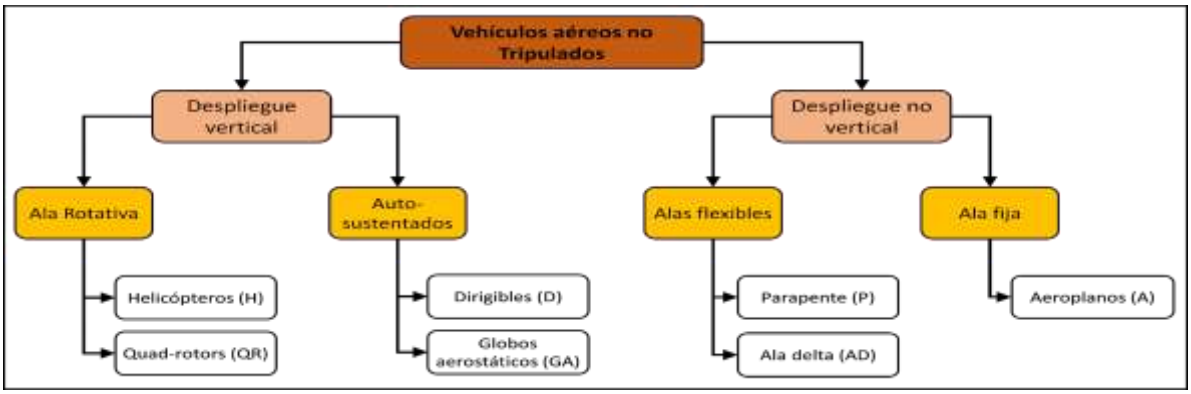


Figura 6. Clasificación de VANTs dependiendo del tipo de aeronave (Barrientos, A, et.al., 2007).

a) b)

Figura 7. Ejemplos de VANTs de: a) ala rotativa, b) ala fija (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

A través de la historia el principal uso que se le ha dado a los VANTs ha sido en el campo militar. Cuerno Rejado, C., Garcia Hernandez, L., Sanchez Carmona, A., Carrió Fernández, A., Sanchez Lopez, J. L. y Campoy Cervera, P. (2016) señalan a Nikola Tesla como el creador de la aviación no tripulada y del misil de crucero; quien en 1989 creó un vehículo naval llamado “Teleautomaton”, el cual fue capaz de moverse, detenerse, girar y enviar señales de radio. Por otro lado, Vila Rovira O. (2011) menciona la patente de un bombardero no tripulado por el inventor Charles Perley en 1863, el cual consistía en un globo aerostático que soltaba bombas encendidas al encontrarse en ciertas condiciones y calculadas considerando el viento y la distancia (Figura 8).

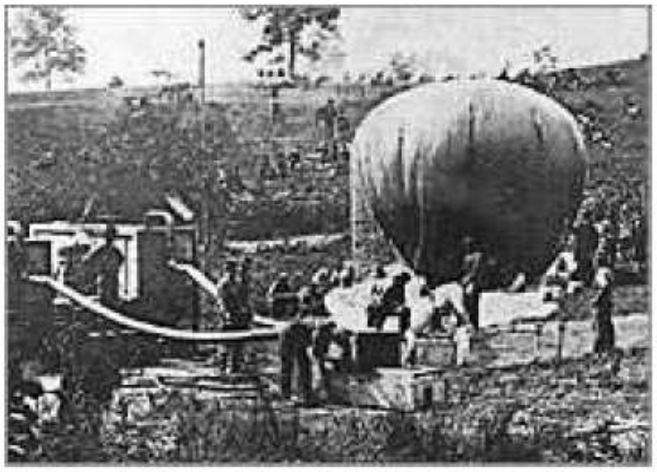


Figura 8. Bombardero aéreo de Perley (Vila Rovira, O. 2011).

Se han realizado avances e investigaciones en el campo civil en los últimos años referentes a VANTs, lo cual ha hecho que su uso tenga diferentes aplicaciones en distintas áreas, como fotografía, agricultura, climatología, vigilancia, construcción, etc. (tabla 2).

El principal aspecto a considerar de los VANTs es el sensor de obtención de datos que se le coloca, el cual puede ser uno o la combinación de varios, dependiendo del objetivo final del estudio que se realice. Por mencionar algunos ejemplos, tenemos cámaras fotográficas, sensores multiespectrales e hiperespectrales o sensores térmicos. La información obtenida a través de estos sensores puede ser corregida u ortorrectificada para realizar mediciones aéreas, crear ortofotografías, realizar cartografía a grandes escalas, etc.

Tabla 4. Aplicaciones civiles de los VANTs (Barrientos, A., et.al. 2007).

Aplicación	Ejemplo
Inspección de infraestructuras	Líneas eléctricas, oleoductos y gasoductos
Inspección de obra civil	Puentes, viaductos, presas
Vigilancia de fronteras	Inmigración ilegal, contrabando
Patrulla marítima	Inmigración ilegal, contrabando
Filmografía	Cine, reportaje fotográfico
Reconocimiento y toma de datos en desastres naturales	Huracanes, riadas, volcanes

Levantamiento de mapas	Topografía
Climatología	Toma de muestras y monitorización de partículas en aerosol, monitorización de contaminación atmosférica
Agricultura	Aplicación de fumigantes, análisis del estrés hídrico, agricultura de precisión
Intervención en desastres no naturales	Radioactivos, vertidos contaminantes (petróleo), incendios forestales
Enlace de comunicaciones	
Localización de recursos naturales	Pesca, minería
Transporte de paquetería	
Búsqueda y rescate	Naufragios, accidentes en montaña o zonas de difícil acceso

2.2.5 Sistemas de información geográfica.

El concepto de SIG tiene sus inicios por investigaciones en EUA, Canadá y Europa durante los años de 1950's, sin embargo, el primero SIG conocido fue el canadiense, desarrollado para el Canada Land Inventory (CLI, por sus siglas en inglés) en 1960 (Tomlinson and Toomey, 1999).

Diferentes definiciones de SIG han sido propuestas, cada una de ellas considerando diferentes aspectos. La mayoría de ellas consideran 3 principales componentes (Dickinson and Calkins, 1988): La tecnología SIG (hardware y software), la base de datos SIG (datos geográficamente relacionados) y la infraestructura SIG (personal, instalaciones y elementos de apoyo).

Tomlin en 1990 definió el SIG como "Una instalación para preparar, presentar, e interpretar hechos relacionados con la superficie de la tierra, una configuración entre equipo de cómputo diseñado específicamente para la adquisición, mantenimiento y uso de información cartográfica", viéndolo desde la perspectiva de la cartografía.

Por otro lado, Chorley (1987) lo define como "un sistema de manejo de datos computarizado para almacenar, editar, manipular, analizar y mostrar información georreferenciada, donde un usuario pueda observar diferentes características en el

mismo mapa, dando solución a problemáticas referentes a la relación espacial entre estas características, tales como proximidad, conectividad, contención, etc.

Por último, ESRI (1990), uno de los principales comerciantes de software SIG lo define como: “Una colección organizada de hardware y software computacional, datos geográficos, diseñado personalmente para eficientemente capturar, almacenar, actualizar, manipular, analizar, y mostrar todas las formas de información geográficamente referenciada”.

2.2.6 Estructuras

Las estructuras deben tener ciertos atributos, como funcionalidad, seguridad, durabilidad, factibilidad económica, entre otros, esto con el propósito de satisfacer las necesidades de la población (Treviño, E., 1998). Resistencia, rigidez y estabilidad son los tres elementos que componen la seguridad de las estructuras. La resistencia se refiere a la capacidad que tienen las estructuras de soportar cargas y deformaciones a las que son sometidas; rigidez se refiere a que en la estructura no deben existir comportamientos, como deformaciones y vibraciones, que causen incomodidad hacia los usuarios al utilizarla; mientras que la estabilidad es la capacidad de la estructura y todos sus elementos para mantenerse unidos y mantener su posición de origen a través de los años.

El ACI (American Concrete Institute) menciona que la durabilidad se refiere a la habilidad para resistir la acción del intemperismo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, y determina que el concreto durable debe mantener su forma original, calidad y características de servicio cuando es expuesto a este ambiente. El concreto es la mezcla de cemento, agua, aditivos, grava y arena (Gutiérrez de López, L. 2003¸ McCormac, J. C., & Russell, H. B. 2005). Las propiedades que brinda el concreto, como la capacidad de resistir grandes esfuerzos de compresión, lo hace ser un material muy frecuente en la construcción, sin embargo, no se desempeña bien ante otros tipos de esfuerzos, como la tensión (Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. 1992). El uso de acero permite resistir esfuerzos de tensión, generalmente en forma de barras que son colocadas en las zonas donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las acciones de servicio. El acero es una aleación de hierro compuesta por pequeñas cantidades de

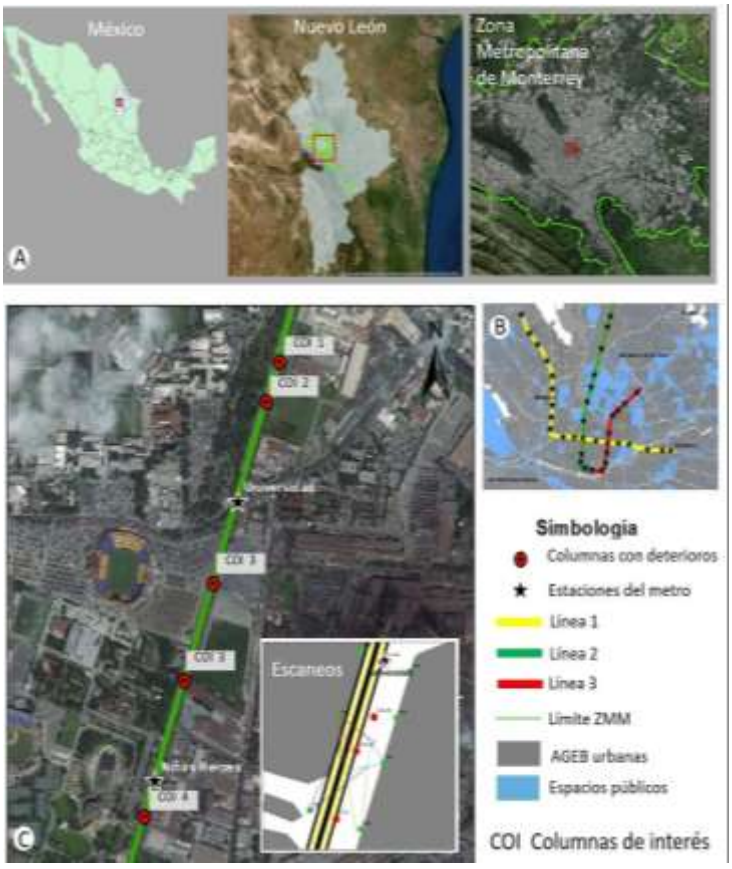
otros elementos, como lo es hierro combinado con un 1% aproximadamente de carbono, y que hecho ascua y sumergido en agua fría adquiere por el temple gran dureza y elasticidad, considerándose un material con gran resistencia.

La combinación de concreto simple con refuerzo constituye lo que se llama concreto armado o reforzado. (Gutiérrez de López, L. 2003).

3 Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

En la ZMM (Mapa 1A) actualmente su población asciende a más de 4.6 millones de habitantes (INEGI, 2015). La ZMM incluye a 18 municipios, los cuales corresponden a la delimitación actual de Zonas Metropolitanas 2015 (CONAPO, enero 2018). El área cubre una superficie total de 7,636.28 Km^2 (Tabla 4).



Mapa 1. Localización de estudio en el Área Metropolitana en el Noreste de México (A), las 3 líneas del metro (B) y la sección del área estudiada (C).

La ZMM cuenta con 3 modos de transporte público, metro, ecovía (BRT) y autobuses (Mapa 1B). El sistema de transporte Metrorrey es un sistema similar a un tren ligero que se compone de 3 líneas y 33 estaciones, 2 de las líneas en operación y la tercera en construcción, además de la ecovía, sistema de autobuses de Tránsito Rápido (BRT, por sus siglas en inglés) que incluye 30 km de carril confinado y 41 estaciones. La primera línea fue inaugurada en 1991 con una longitud de 18.82 km, 2 vías y 18 estaciones; la línea 2 en 1994 con una longitud de 13.750 km, dos vías y 13 estaciones, y la línea 3 se encuentra parada y se calcula que movilizará a 280 mil pasajeros. Este estudio se enfoca en el escaneo de 67 columnas localizadas en una sección de la línea 2 (Mapa 1C)

Tabla 4. Municipios de la ZMM. Fuente: "Programa de Desarrollo Urbano de la Zona Metropolitana de Monterrey 2040" en el capítulo de cartografía.

	Nombre del municipio	Clave geoestadística	Cobertura en km^2	Porcentaje
1	Abasolo	19001	47.43	0.62%
2	Apodaca	19006	237.88	3.12%
3	Cadereyta de Jiménez	19009	1140.08	14.93%
4	Carmen	19010	102.33	1.34%
5	Ciénega de Flores	19012	146.47	1.92%
6	García	19018	1039.7	13.62%
7	Gral. Escobedo	19021	151.19	1.98%
8	Gral. Zuazua	19025	184.75	2.42%
9	Guadalupe	19026	117.72	1.54%
10	Hidalgo	19047	170.04	2.23%
11	Juárez	19031	246.83	3.23%
12	Monterrey	19039	323.42	4.24%
13	Pesquería	19041	308.66	4.04%
14	Salinas Victoria	19045	1657.11	21.70%
15	San Nicolás de los Garza	19046	60.06	0.79%

16	San Pedro Garza García	19019	71.97	0.94%
17	Santa Catarina	19001	884.61	11.58%
18	Santiago	19006	746.03	9.77%

Por otro lado la ecovía son autobuses que circulan en carriles exclusivos a través de 30 km de vialidad por las avenidas de Lincoln y Ruiz Cortinez, mientras que las rutas de transporte urbano de SITRA tienen cobertura en la ZMM con 360 rutas.

En los últimos años se ha tenido un incremento en el parque vehicular, y un rezago de la infraestructura vial, específicamente para el transporte público, lo que lleva a generar problemas en las horas pico en avenidas principales, debido a la congestión, provocando parálisis en zonas estratégicas de la ZMM (PSTyV, 2009). Según cifras del Consejo Estatal de Tránsito y Vialidad (CETyV), en el 2012 el 45.70% de la población utilizaba el automóvil como principal medio de transporte, 5 años después, la encuesta “Así Vamos 2018” esta cifra aumentó a 52.60%. Por otra parte, el mismo CETyV reporta que el uso del transporte urbano disminuyó de 2005 a 2012 de 40.34% a 36.07%.

A través de la plataforma ciudadana “Cómo Vamos, Nuevo León”, se han realizado encuestas ciudadanas en diferentes años sobre la percepción que tiene la población en diferentes áreas, entre ellas “Desarrollo Sustentable”, donde se contemplan temas como movilidad, desarrollo urbano y medio ambiente, entre otros. Esta encuesta que refiere a las estadísticas de la ZMM y tiene representatividad a nivel estatal y municipal, en ella se muestran algunos datos de interés, tales como los principales motivos de viaje, participación modal, razones por las cuales no se utiliza el transporte público (figura 10), tiempos de traslado, frecuencia de viaje, entre otros.

Información como esta es la que podemos obtener de la encuesta, que si bien no es una encuesta origen-destino o especializada en temas de movilidad, nos permite ver las condiciones y el rumbo que está tomando la temática en el estado y en la ZMM, por ejemplo, como se resalta en la figura 10, el 40.50% de la razón por

la cual no se utiliza el transporte público está relacionado a problemas de accesibilidad, ya sea destinos, paradas/estaciones, frecuencia de servicio, etc., estos se pueden trasladar a posibles usuarios que de ser estas condiciones mejores podrían optar por modificar su modo de transporte favoreciendo una movilidad urbana sostenible en la ZMM.

Figura 9. Participación modal en la ZMM. Fuente: Encuesta Ciudadana "Así Vamos 2017,2018".

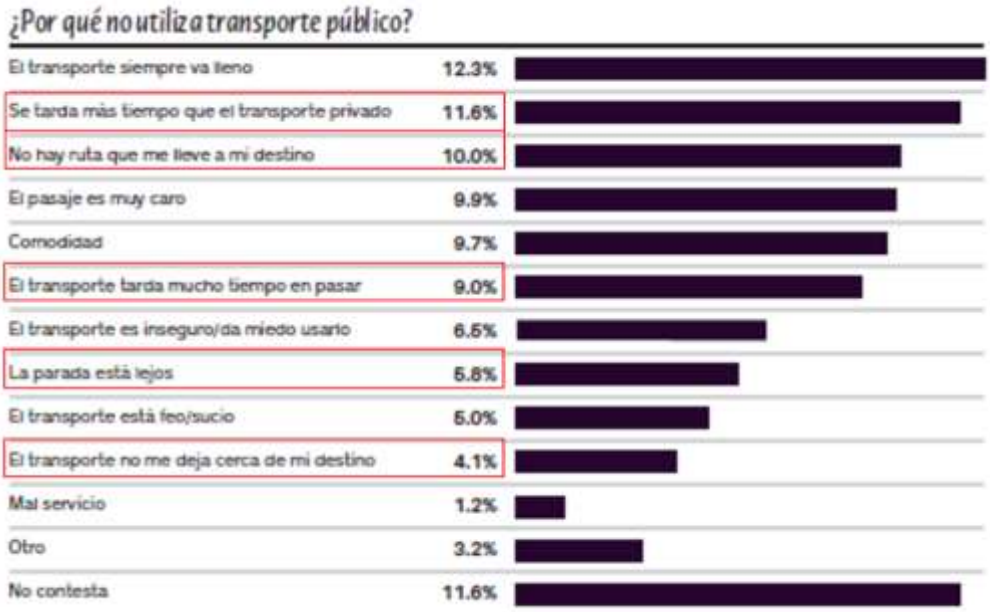


Figura 10. Razones por las que no se utiliza el transporte público. Fuente: Encuesta Ciudadana "Así Vamos 2018".

Debido a la inversión de tiempo y recursos computaciones que implica el manejar un área con esta extensión debido al nivel de detalle de los datos y los procesos de datos se seleccionó el municipio de San Nicolás de los Garza como caso de estudio.

3.2 Equipo

3.2.1 Escáner Terrestre

Se usó un escáner láser terrestre GLS-1500 de marca Topcon, para obtener nubes de puntos densas. La configuración del GLS-1500 (en modo normal) utilizado en el campo se muestra en la Tabla. El rango máximo medible del escáner es de 500 m (para objetos objetivo con 90% de reflectancia), y puede alcanzar una precisión de 4 mm en un rango de 150 m y 6 "de ángulo. (H&V). La velocidad de medición es de hasta 30,000 puntos por segundo. El láser es de tipo pulsado clase 1, con una longitud de onda de 1535 nanómetros, es seguro para los ojos e invisible. Tiene integrada una cámara digital con resolución de 2 megapixeles y un campo de visión horizontal de 16.5° y 22° vertical. El peso completo del equipo es de aproximadamente 50 kg, incluyendo el GLS, baterías, trípode, computadora de operación y objetivos 3D.

Tabla 3. Configuración del escáner GLS-1500 en modo normal (Fuente: (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

Parámetro	Característica
Rango máximo	
Reflectividad de 90%	330 m
Reflectividad de 18%	150 m
Rango mínimo	1 m
Precisión de un punto	
Distancia (de 1 a 150 m)	4mm
Ángulo (horizontal y vertical)	6"
Precisión de la superficie (de 1 a 150 m)	2 mm
Precisión de detección del objetivo	3" a 50 m
Rango de escaneo	30,000 puntos/segundo
Resolución de escaneo	

Tamaño de punto	< 6 mm de 1 a 40 m
Máxima densidad de la muestra	1 mm a 20 m
Campo de visión máximo (por escaneo)	
Horizontal	360°
Vertical	±35°
Láser	
Tipo	Pulsado (tiempo de vuelo)
Longitud de onda	1535nm (invisible, seguro para los ojos)
Clase	1
Cámara digital	
Campo de visión horizontal	16.5°
Campo de visión vertical	22°
Número de pixeles	2 megapixeles

3.2.2 Estación total topográfica

Se usó una estación total topográfica (ETT) Leica FlexLine plus TS02 para la ubicación de puntos de control. La medición de ángulos (horizontal y vertical) tiene una precisión de 3”, 5” o 7”. Se usó un prisma con un rango de 3.5 m y rango de la diana reflectante de 250 a 500 m para la medición de distancias. Las características de la estación total se encuentran en la tabla.

Tabla 4. Características de la ETT Leica TS02 (Fuente: (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

Parámetro	Característica
Medición angular (Hz, V)	
Precisión	3" / 5" / 7"
Método	Absoluto, continuo, diametral
Resolución en pantalla	0.1" / 0.1 mgon / 0.01 mil
Medición de distancias con prisma	
Rango prisma circular (Leica GPR1)	3.500 m
Rango diana reflectante (60 mm x 60 mm)	250 m / >500 m
Precisión	Preciso+: 1.5 mm+2.0 ppm Preciso rápido: 3.0 mm+ 2.0 ppm Tracking: 3.0 mm+2.0 ppm
Tiempo típico de medición	2.0 s
Objetivo	

Aumentos / Resolución	30 x / 3"
Campo de visión	1° 30' (1.66 gon), 2.7 m a 100 m
Rango de enfoque	1.7 m a infinito
Retículo	Iluminación, 10 niveles de brillo
Plomada Láser	
Tipo	Puntero láser, 5 niveles de brillo
Precisión de centrado	1.5 mm a 1.5 m

3.2.3 DJI Inspire 2, cámara Zenmuse X5

Se utilizó un drone DJI Inspire 2, integrado con una cámara Zenmuse X5 para la toma de fotografías aéreas de la estructura. El drone cuenta con 4 rotores, una distancia operativa máxima de 7000 metros alcanza una velocidad máxima de 26 m/s y tiene un peso de 3.44 kg con la batería incluida. Su tiempo máximo de vuelo es de 27 minutos y puede operar en un rango de temperatura de -20 a 40 °C. La cámara Zenmuse tiene una resolución de 20.8 MP y cuenta con estabilizador de imágenes.

Tabla 7. Características del drone DJI Inspire 2 y cámara Zenmuse X5 (Fuente: (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

Parámetro	Característica
VANT	
Número de rotores	4 rotores
Distancia operativa máxima	7000 m
Velocidad máxima	26 m/s
Banda de frecuencia	2.4 - 2.483 / 5.725 - 5.85 GHz
La velocidad máxima de ascenso	6 m/s
Velocidad máxima de descenso	4 m/s
Tiempo máximo de vuelo	27 min
Sistema sensor de obstáculos	Incluido
Sensor de distancia	Incluido
Sensores integrados	Infrarrojo (IR)
Cámara fotográfica	
Megapíxeles	20,8 MP
Pesos y dimensiones	
Peso (batería incluida)	3.44 kg
Condiciones ambientales	
Intervalo de temperatura operativa	-20 - 40 °C

3.3 Desarrollo metodológico

El proyecto fue dividido en diferentes etapas como se muestra en la Figura 11, donde cada uno implica una metodología específica.

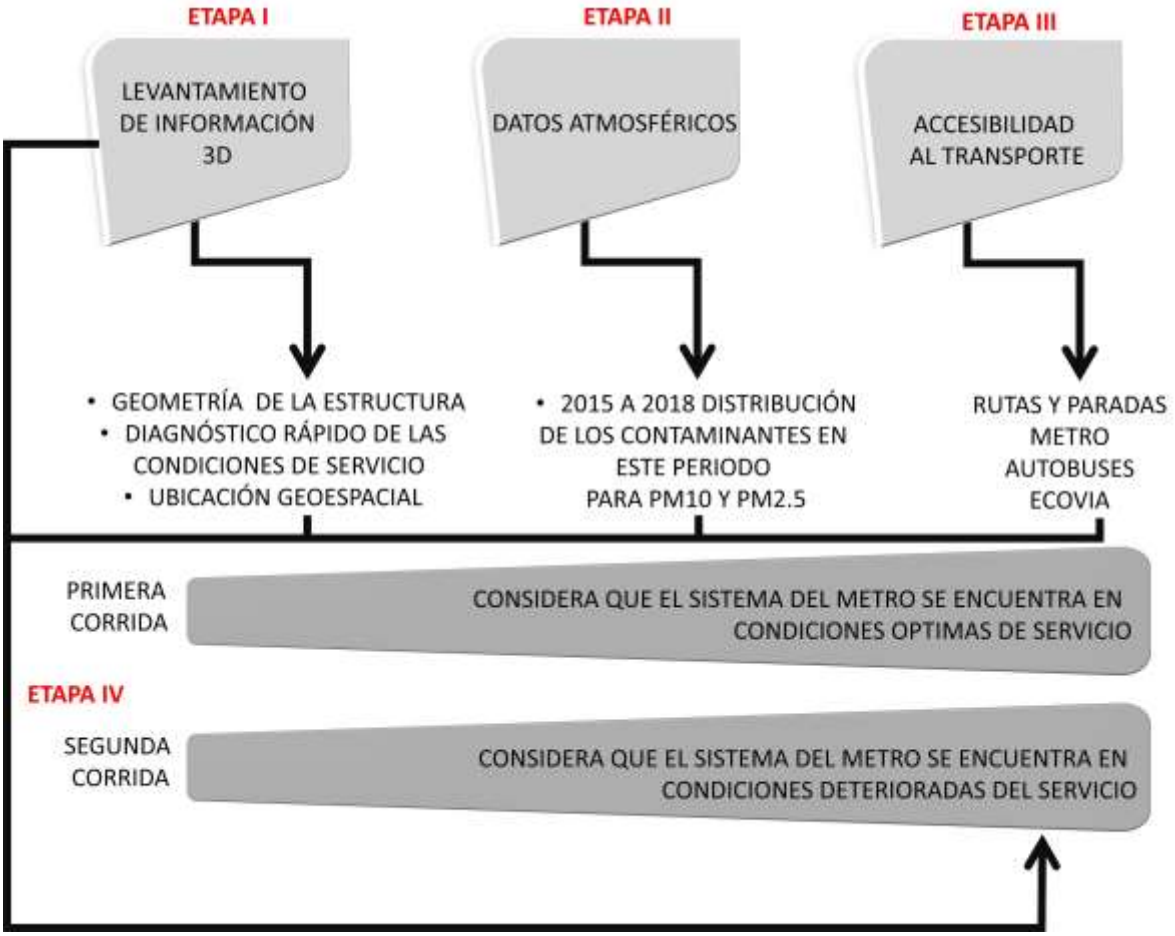


Figura 11. Proceso metodológico en 4 etapas.

1. La primera etapa es un levantamiento en campo realizado a través de sensores remotos, escáner láser LIDAR y VANT, así como su post proceso de la información que incluye preparación, limpieza y alineado. Posteriormente se realizó una inspección visual de la información que permitiera documentar la condición superficial de la infraestructura.
2. La segunda etapa consistió en la obtención de datos atmosféricos en la ZMM en los años de 2015 a 2018 a través de las estaciones del SIMA.
3. Una tercera etapa en la cual se realizó un análisis de accesibilidad mediante SIG para la obtención de un Índice de Accesibilidad al Transporte Público, con

base a una metodología existente implementada por Saghapour, T., Moridpour S. y R. Thompson en 2015.

4. Una cuarta y última etapa donde se integraron las tres etapas previas mediante un mapeo de vulnerabilidad de la zona en estudio.

A continuación, se describe de manera más detallada cada sección:

3.3.1 Levantamiento en campo

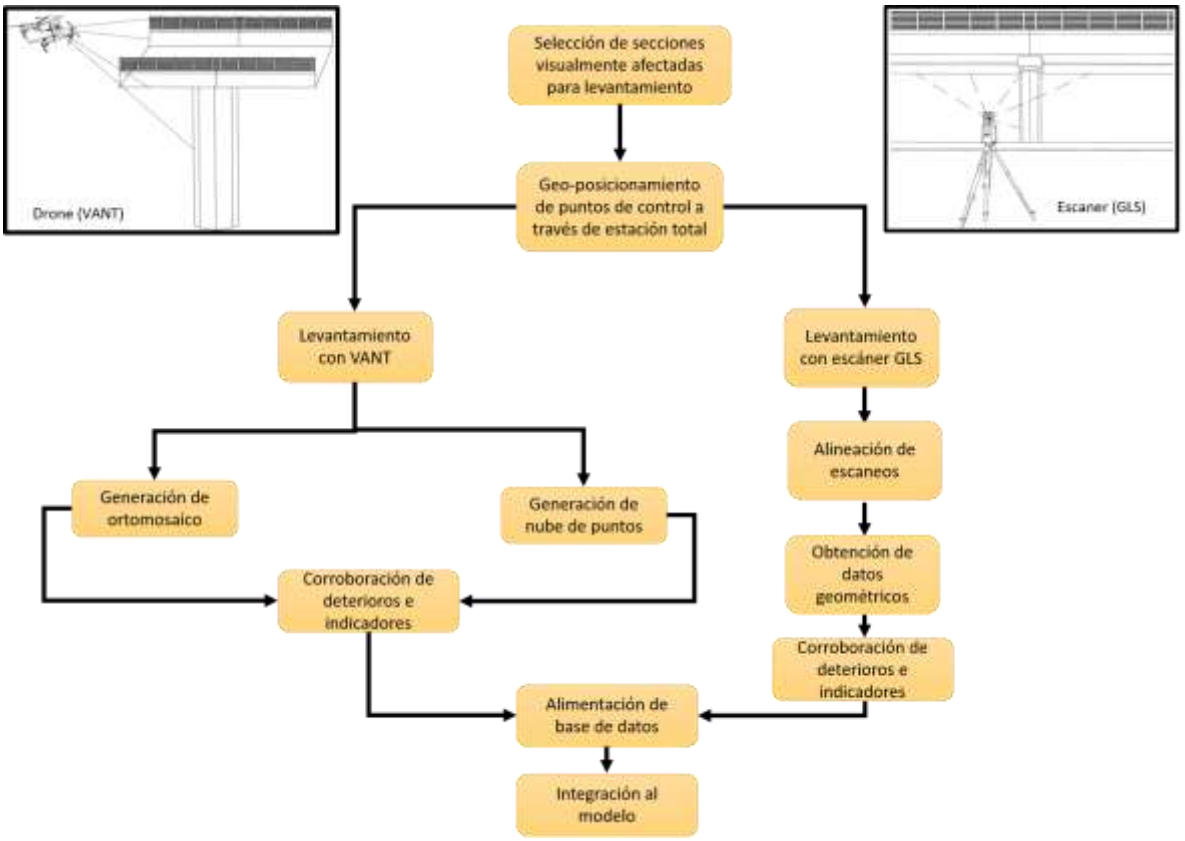
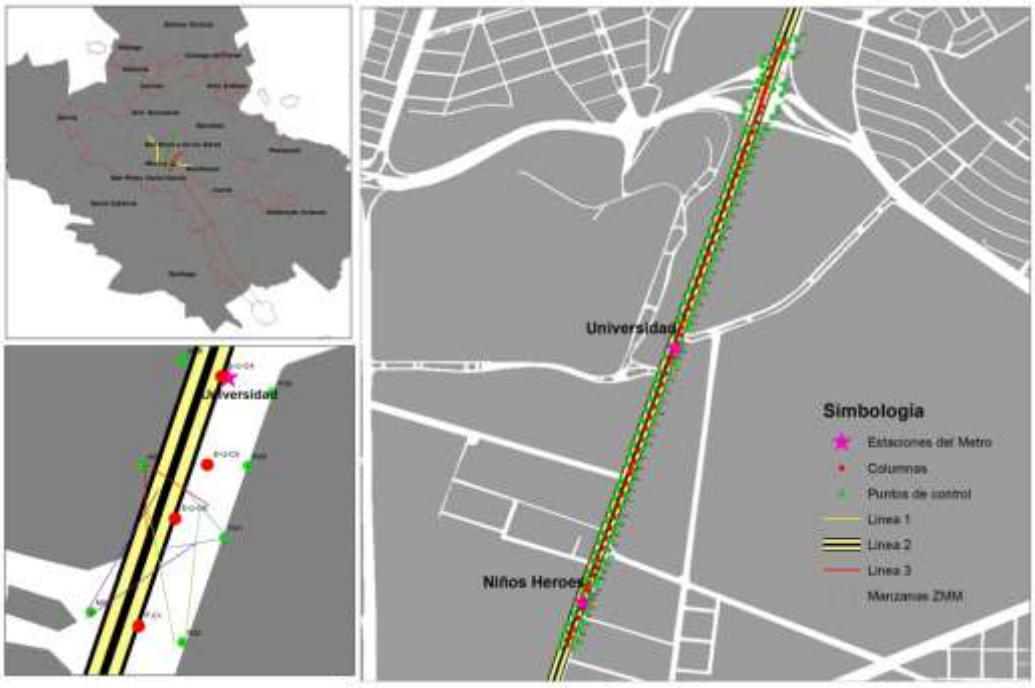


Figura 12. Metodología de levantamiento con VANT y LIDAR.

3.3.1.1 GLS (Ground Laser Escanner).

Se realizaron levantamientos con el escáner de la línea 2 del metro en su parte elevada, en los meses de mayo a septiembre de 2018. Esta zona comprende de la estación Niños Héroes hasta 800 m. antes de la estación Anáhuac, a la altura del Instituto de Ingeniería Civil, teniendo un total de 67 columnas escaneadas en una longitud de 2 kilómetros (Mapa 2).

Para la toma de datos en campo se utilizó una estación total topográfica Leica, con la cual se geoposicionaron puntos de control a ambos lados de la estructura del metro. De estos puntos se obtuvieron las coordenadas x, y, z y se señalizaron en las banquetas, esto con el objetivo de posicionar el escáner en puntos conocidos y poder referenciar los escaneos.



Mapa 2. Levantamiento línea 2 del metro, C. Francisco G. Bocanegra a Av. Nogalar. Fuente: Elaboración propia.

Los escaneos se realizaron colocando el escáner sobre las banquetas de Av. Universidad, a una distancia de entre 15 y 20 metros de la estructura del metro. Se mantuvo en el instrumento a una altura de aproximadamente 1,5 m a nivel de piso, y se programó una distancia de alcance de 100 m. Debido al complicado acceso de vistas por los ángulos se realizó un escaneo cada 50 m aproximadamente, con una

variación de 90 a 180 grados de barrido horizontal y 70 grados en vertical (la máxima del sensor) ajustando la resolución para todos los casos a 0.002 m (Figura 13).

Figura 13. Toma de datos en campo utilizando escáner.

3.3.1.2 Postproceso

3.3.1.2.1 Alineación de nube de puntos

Los datos obtenidos de los levantamientos con escáner son archivos nativos de Topcon importados a Scanmaster como un proyecto con extensión .prj.

Para poder visualizar completamente cualquier columna, se necesitan alinear diferentes escaneos que cubran toda la superficie de esta.

Para realizar la alineación de los escaneos fue necesario importar un archivo .txt que contuviera la información de ubicación de los puntos de control donde se posicionó el escáner.

Se importaron los archivos .prj de escaneos consecutivos, se observa que al abrirse estos archivos, los puntos generados de los escaneos no tienen un orden y parten todos de un mismo origen (Figura 14).

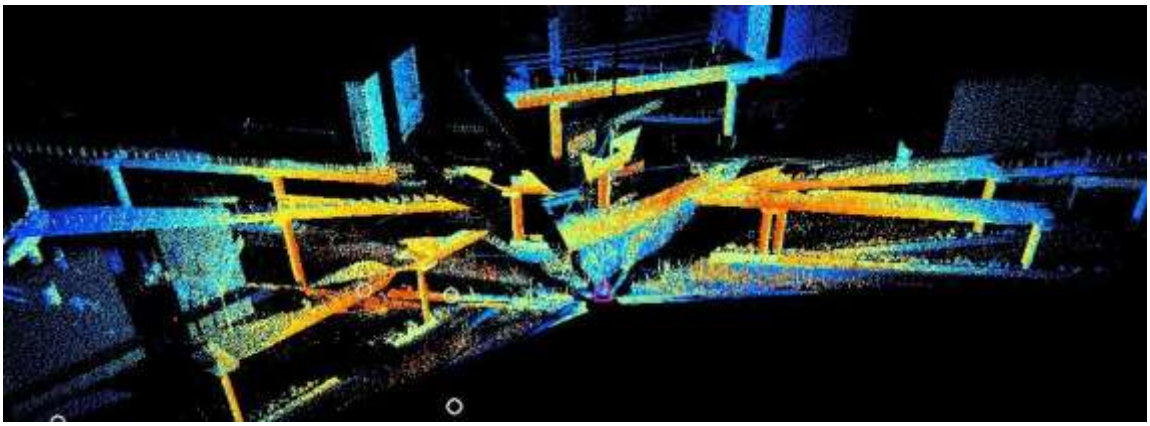


Figura 14. Segmento de la nube de puntos de la estructura del metro sin alinear.

Para alinear y georreferenciar las nubes de puntos se ingresó la información de las coordenadas de los puntos de control, las alturas del prisma y del escáner y se señaló para cada escaneo cuál fue el punto con el que se hizo referencia atrás. Al realizar los escaneos se recolecta información de objetos presentes en la zona (árboles, banquetas, postes, automóviles, etc.), por lo cual es necesario eliminar estos datos con el objetivo de visualizar y manejar de mejor manera los datos de interés, en este caso la estructura del metro (Figura 15).

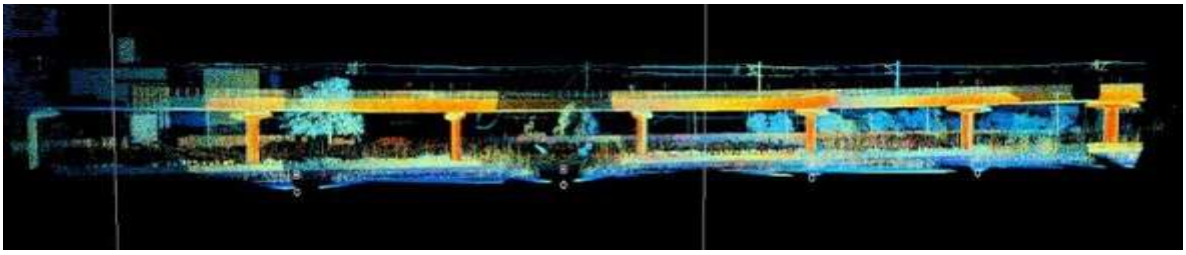


Figura 15. Sección de nube de puntos alineada y georreferenciada.

Una vez limpia la estructura se fusionó con los valores de RGB de las fotografías tomadas por el escáner (Figura 16). Con esta información se pudieron observar las condiciones del barandal, trabe, capitel y columnas de la estructura (Figura 16). Se procedió a inspeccionar la nube de puntos para identificar deterioros superficiales que pudieran ser captados, agrietamientos y hollín, siendo estos

verificados mediante Google Earth (Figura 17). Esto permite observar que la información generada mediante el escáner es confiable y observar las condiciones superficiales de las estructuras, realizar mediciones con gran precisión métrica (Figura 17).

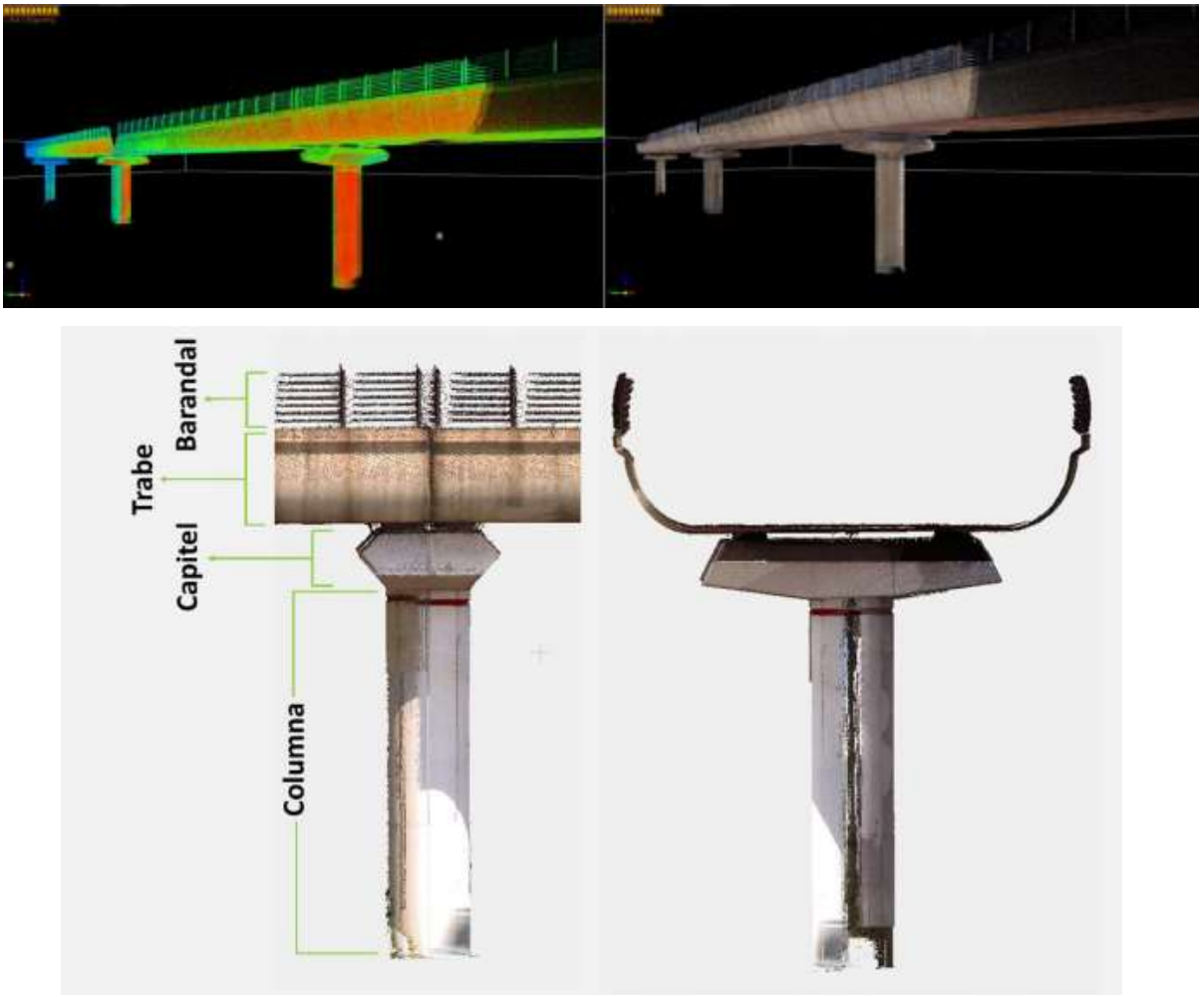


Figura 17. Arriba la sección de la nube de puntos que se alineó, asignó color real y eliminar ruido. Abajo, los elementos de una columna (Escobedo, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019)

La inspección y validación con Google Earth (Figura 18) permite identificar las diferencias de color en los niveles de intensidad. Esta característica de los datos fue estudiada por Escobedo, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019.

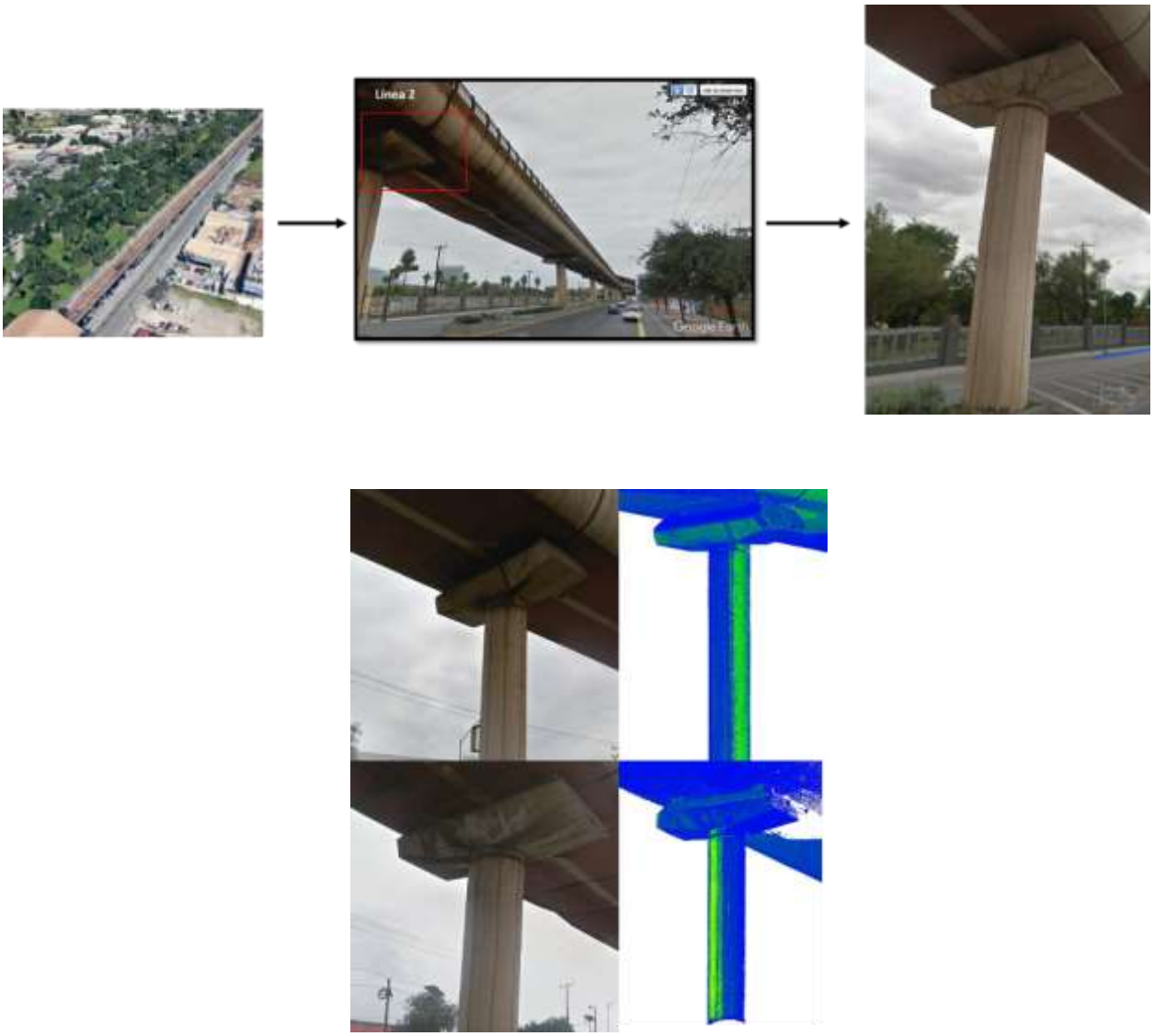
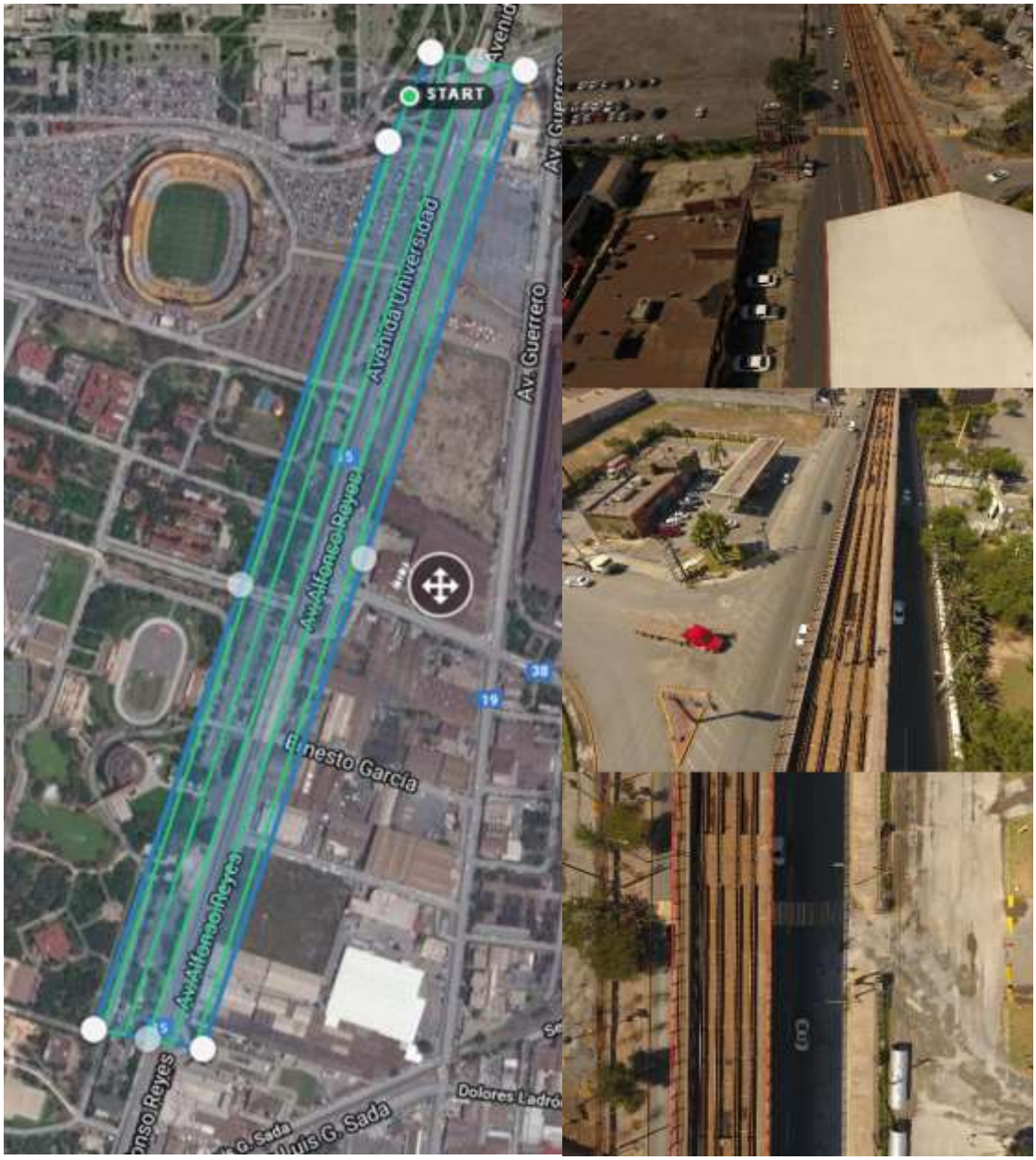


Figura 18. Inspección y verificación a través de Google Earth (arriba) sirvieron para validar los deterioros superficiales en nube de puntos (abajo).

3.3.1.3 Levantamiento fotogramétrico aéreo con VANT

La sección superior de la estructura fue respaldada con fotografías aéreas obtenidas con el VANT. Los vuelos fueron programados a 40 m de altura con velocidades de 13 km/h. El vuelo respetó el sobreposicionamiento de imagen en más de 75%. La programación de cada uno de los vuelos realizados en la sección superior fue realizada con el programa DroneDeploy (Figura 19).



A) B)

Figura 19. A) Vuelo programado para el levantamiento fotográfico y, B) fotografías tomadas por el VANT.

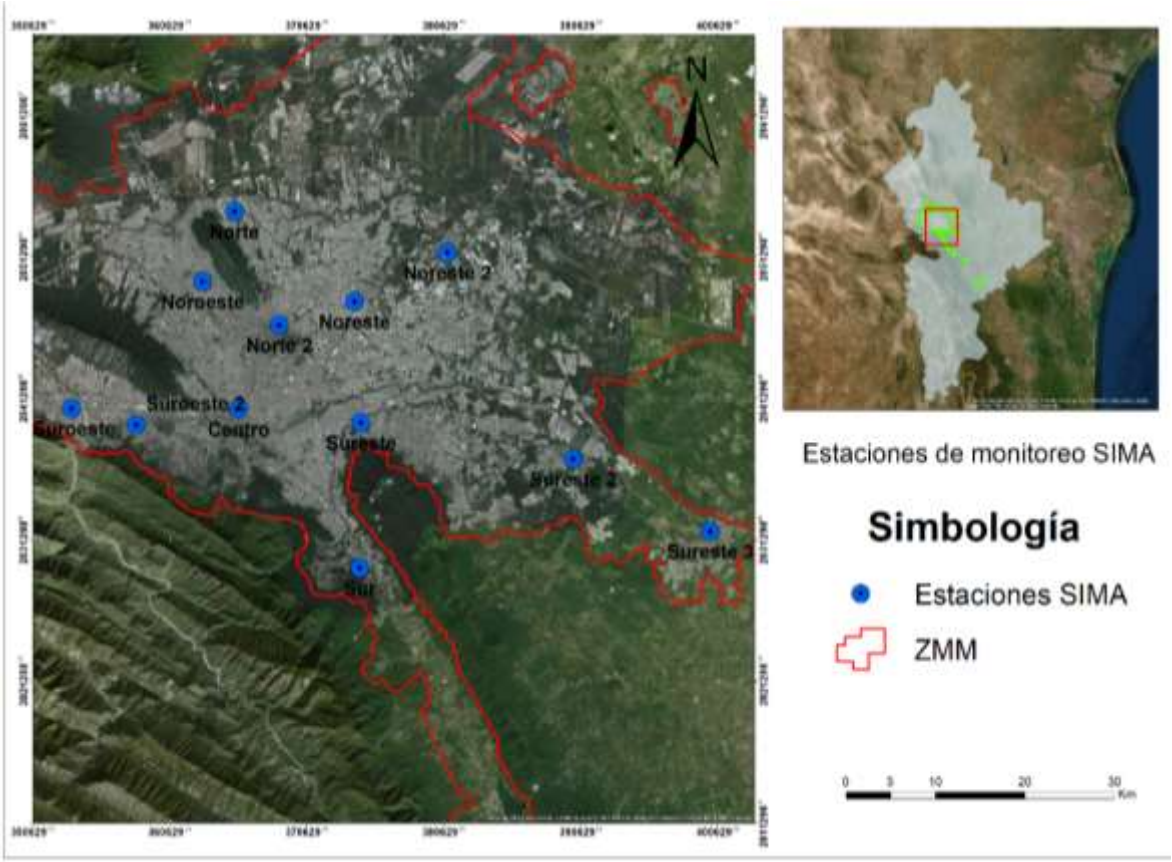
Con esta información se lograron visualizar los capiteles, sitios laterales y tráfico vehicular, barandales y situación de cableado y la acumulación de humedad de los rieles, entre otras características de la estructura y su entorno que pudieran comprometer las condiciones de servicio como se citan en la Figura 20.

Figura 20. Levantamientos aéreos para la toma de evidencias en (A) la sección preliminar en Av. Nogalar de una sección de la línea 2 del metro. (B) trabes con manchas y hollín; (C), vista lateral con elementos de infraestructura y vialidades y (D) carril del metro aéreo con acumulación de humedad.

3.3.2 Condiciones atmosféricas en la ZMM mediante datos del SIMA

Se obtendrán datos de diferentes años de las estaciones de monitoreo ambiental del SIMA situadas en diferentes áreas de la ZMM (Mapa 3) para conocer la distribución de las concentraciones de los contaminantes, monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO2), óxidos de Nitrógeno (NO2), ozono (O3), partículas

menores a 10 micrómetros (PM10) y partículas menores a 2.5 micrómetros (PM2.5). De los componentes registrados se realizó un análisis de tres, ozono, PM10 y PM2.5, revisando las concentraciones por cada estación a través de los meses en el periodo de 2015-2018.



Mapa 3. Ubicación estaciones de monitoreo SIMA. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Índice de accesibilidad

El análisis de accesibilidad se realizará a través de un SIG con base en una metodología implementada por Saghapour, T., Moridpour S. y R. Thompson en (2015). El método se basa en los modos de transporte y sus estaciones/paradas, así como espacios públicos y densidad poblacional. Se desarrolla un índice para medir los niveles de accesibilidad al transporte público (Tabla 8) el cual considera diferentes capas de información necesaria para la obtención del índice tales como espacios públicos, paradas/estaciones de transporte público (metro, autobuses y

ecovía), distancias, frecuencias de servicio, densidad poblacional, Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), entre otras. El flujo metodológico para esta etapa se muestra en la (Figura 21).

Tabla 8. Rangos y categorías del IATP.

Rangos	IATP Categorias
0	N/A
<2	Muy pobre
2-3.5	Pobre
3.5-6	Moderada
6-12	Buena
12-20	Muy buena
>20	Excelente

Para cada categoría seleccionada fue necesario crear o adaptar capa de información del área de estudio, las cuales en general fueron convertidas a formato shapefile con proyección cartográfica métrica WGS84 UTM Zona 14. El SIG se formó de las capas de espacios públicos, Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), modos de transporte público líneas del metro (1, 2 y 3), ecovía, rutas de autobuses urbanos, los cuales consideran la ubicación de las paradas/estaciones como puntos independientes (Tabla 9 y Figura 22).

Tabla 9. Datos requeridos y fuente de la información.

Categoría	Formato	Fuente
AGEB	shapefile	INEGI
Manzanas	shapefile	INEGI
Vialidades	shapefile	INEGI

Espacios públicos	shapefile	Open Street MAP
Rutas de camiones urbanos	kmz	Consejo Estatal de Transporte y Vialidad (CETYV)
Estaciones del metro	kmz	Infraestructura
Estaciones de la ecovía	shapefile	Elaboración propia por digitalización
Paradas de autobuses	kmz	Elaboración propia por digitalización

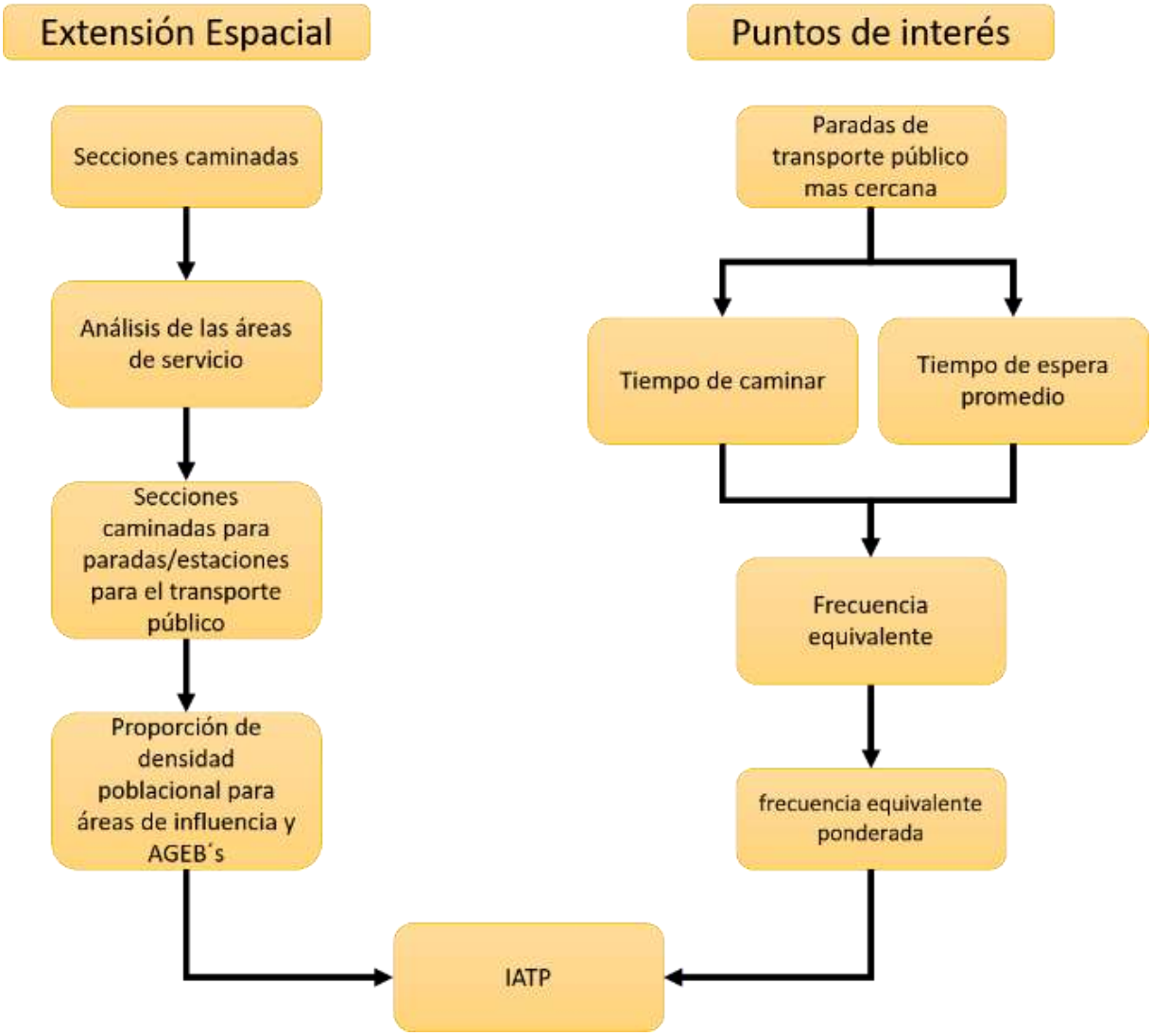


Figura 21. Metodología de análisis de accesibilidad. Fuente: Saghapour (2015).

El Índice de Accesibilidad al Transporte Público (IATP), es un método se basa en los siguientes cuatro puntos:

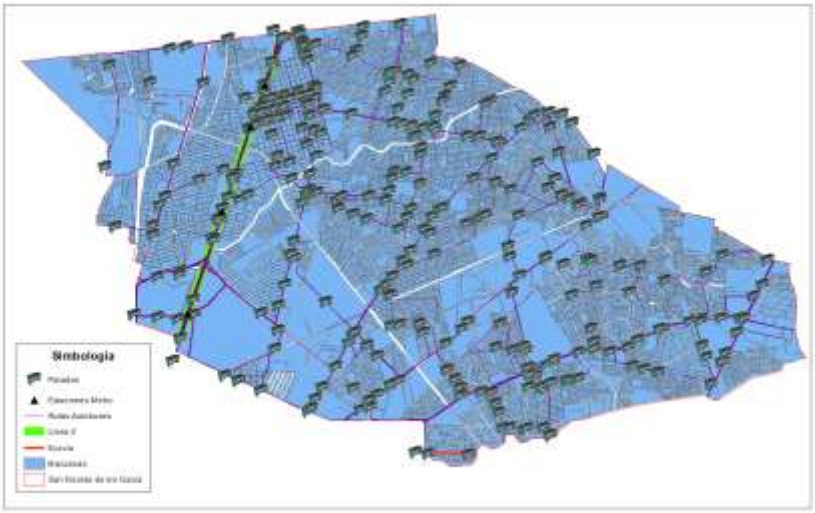
1. Los tres modos de transporte público considerados, el metro, ecovía y autobuses, así como las rutas y estaciones/paradas de cada uno de ellos. Algunas capas de información proporcionada por el CETYV, mientras que otra fue generada en el Departamento de Geomática, del Instituto de Ingeniería Civil, de la Universidad Autónoma de Nuevo León. La figura muestra la distribución del transporte público en la ZMM y el municipio de San Nicolás de los Garza. De igual manera las vialidades obtenidas a través de INEGI.
2. Los datos de frecuencia de servicio de cada modo de transporte, los cuales para autobuses fueron proporcionados por el CETYV, mientras que para metro y ecovia se consideraron las frecuencias establecidas en una aplicación llamada “Moovit”.
3. Una base de datos de espacios públicos, fue adaptada por el Departamento de Geomática, del Instituto de Ingeniería Civil, de la Universidad Autónoma de Nuevo León a partir de datos de INEGI y OSM (Open Street MAP). Estos incluyen parques, plazas, supermercados, entre otros.
4. Una base de datos de AGEBs para la ZMM obtenida a través de INEGI. Esta contiene información referente a la población obtenida en el censo de 2010.

Con la información se buscó analizar la accesibilidad de la población al transporte público a través de espacios públicos, densidad poblacional y distancias. En la tabla 10 se muestran

Tabla 10. Estadísticas solicitadas por el sistema donde: PTA es el Promedio de Tiempo a la estación de autobuses más cercana; PTE Promedio de Tiempo a la estación de ecovía más cercana y PTM Promedio de Tiempo a la estación del metro más cercana:

Categoría	**Número**	**Porciento**	**PTA**	**PTE**	**PTM**
AGEB	127	6.52%	-	-	-

Espacios públicos	1811	9.45%	-	-	-
Estaciones del metro	4	12.90%	-	-	72.990
Estaciones de la ecovía	1	2.56%	-	53.702	-
Paradas de autobuses	331	-	4.265	-	-
Rutas de camiones	134	37.22%	-	-	-



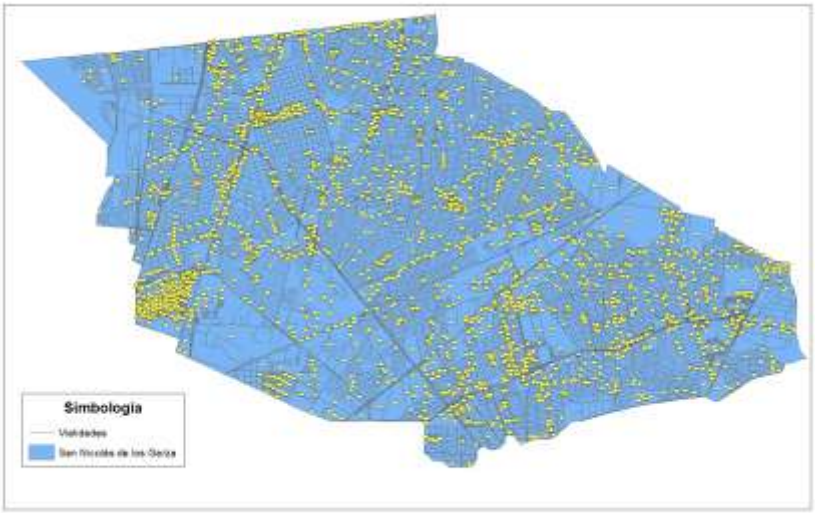


Figura 22. Capas utilizadas para el análisis de accesibilidad.

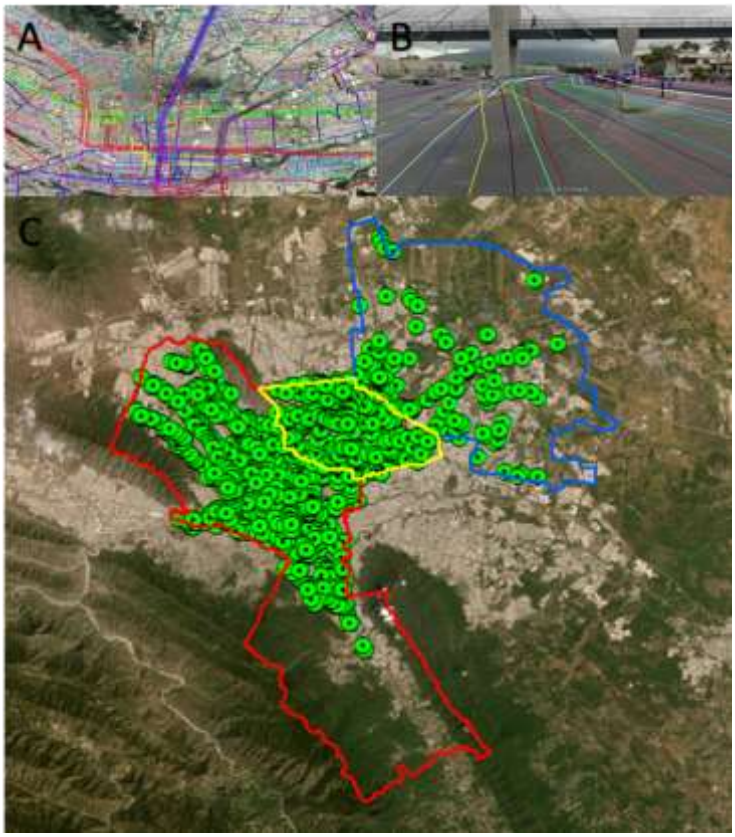


Figura 23. A)Proceso de edición de Líneas de metro, Ecovía y rutas urbanas, B) Localización de paradas con Google Earth Street View y C) Digitalización de paradas en Monterrey, San Nicolás de los Garza y Apodaca.

Previo al análisis de accesibilidad de los elementos y categorías, se realizó una corrección topológica, la cual se refiere a que las entidades de puntos, líneas y polígonos comparten una geometría coincidente. Las correcciones se realizaron utilizando análisis de redes. Esto se hace con la finalidad de obtener una capa de vialidades que cumpla con las condiciones reales de la infraestructura. Por lo que cada calle debe ser seccionada por cuadras que permitan al programa automatizar la circulación de los peatones a través de ella. Si la corrección es correcta, la herramienta es capaz de encontrar los giros que tiene como opción cada punto, para localizar rutas de traslado entre un espacio público y una parada/estación.

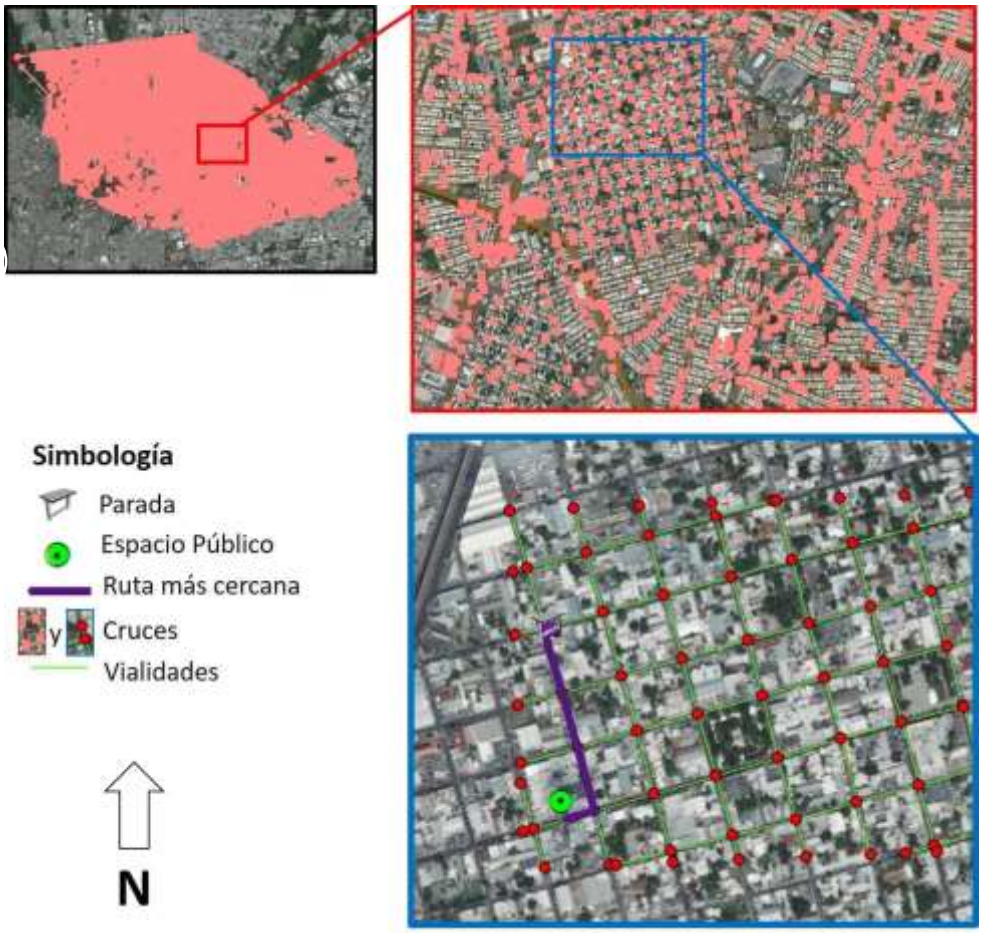


Figura 24. A) Errores (>10,000) observados a corregir en el municipio de San Nicolás de los Garza, B) Muestra cercana de errores y C) Ejemplo de errores corregido, vialidades seccionadas por calle y ejemplo de obtención de ruta más cercana entre espacio público-parada/estación.

Posterior a corregir o complementar la topología, se inició el proceso para calcular el IATP (Tabla 9). La primer parte consiste en la aplicación de las siguientes ecuaciones:

- Tiempo caminado (Walking Time, WT). Se refiere a la distancia de un Espacio Público (EP) convertido a medidas de tiempo, considerando una velocidad al caminar de 4.80 km/h o 80m/min (London, 2010). Estos datos se obtuvieron a través del análisis de redes para un EP a la parada/estación más cercana, incluyendo las paradas de camión, estaciones de metro y estaciones de ecovía (Figura 25).

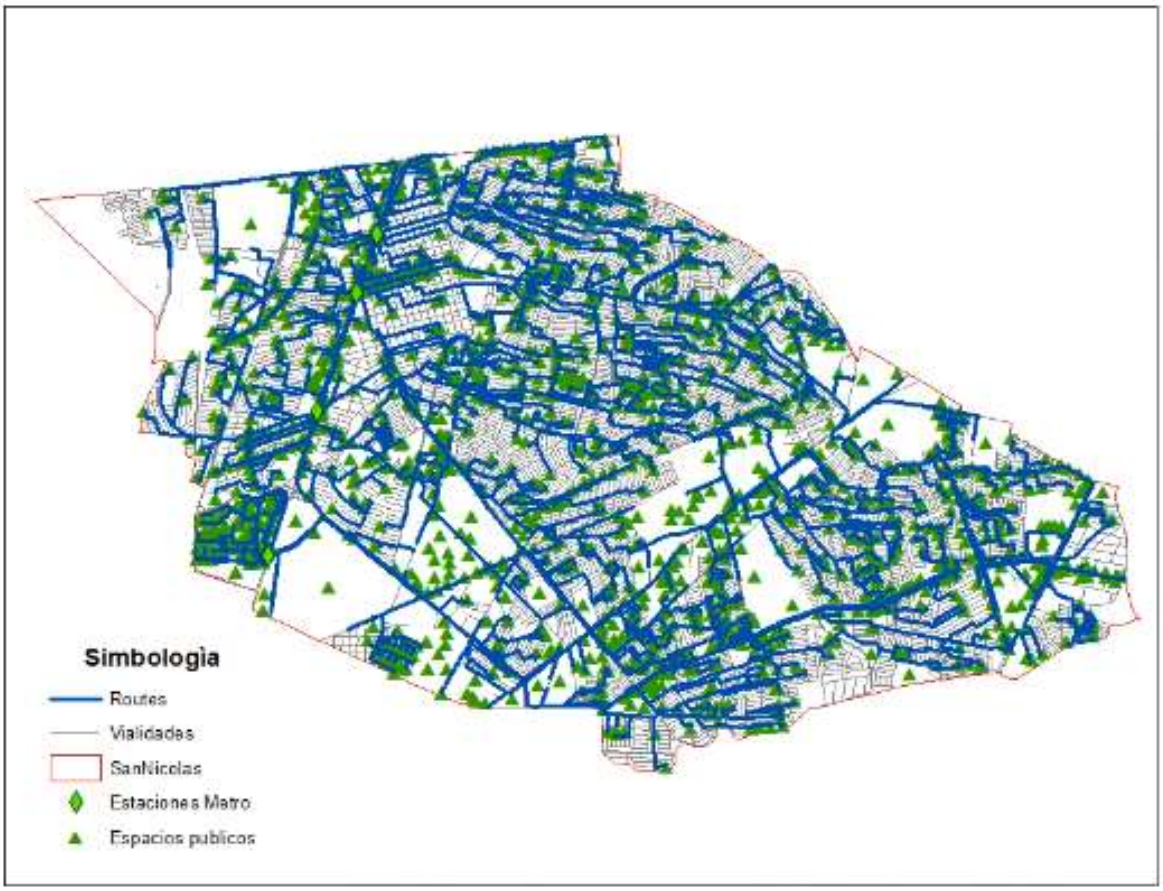


Figura 25. Distancias caminadas para estaciones de metro y espacios públicos.

- Tiempo promedio de espera (Average Waiting Time, AWT). Se refiere al tiempo promedio entre llegar a la parada/estación y el tiempo de llegada del servicio deseado. Para cada modo de transporte, el AWT fue considerado como el intervalo entre servicios. Por ejemplo para un modo de transporte que da servicio cada 5 min o 12 frecuencias por hora, el AWT será 2.50 min (Ecuación 1).

$$AWT = 0.5 * {}^{60}/_{F_{ij}} \qquad i = 1,2,3,\dots,n \qquad j = 1,2,3$$

donde AWT_{ij} es el tiempo promedio de espera (min) a la parada/estación más cercana del EP *i* para el modo de transporte *j* y F_{ij} es la frecuencia del modo *j* (definido como el número de servicios por hora) a la parada/estación más cercana para el EP *i*.

- Tiempo total de acceso (Total Access time, TAT). Posterior a la obtención del WT y AWT, el tiempo total de acceso (TAT) para un EP seleccionado a la parada/estación más cercana se debe calcular. Esto incluye los tiempos caminados del EP hacia la parada/estación y el tiempo promedio de espera. La ecuación 2 muestra su obtención.

$$TAT_{ij} = WT_{ij} + AWT_{ij} \qquad i = 1,2,3,\dots,n \qquad j = 1,2,3$$

donde TAT_{ij} es el tiempo total de acceso (min) del modo de transporte público *j* a la parada/estación del EP *i*.

- Frecuencia equivalente (Equivalent Frequency, EF). El TAT es convertido a una frecuencia equivalente utilizando la ecuación 3. Esta mide la disponibilidad de una ruta a un EP específico.

$$EF_{ij} = \frac{30}{TAT_{ij}} \qquad i = 1,2,3,\dots,n \qquad j = 1,2,3$$

donde EF_{ij} es la frecuencia equivalente del modo de transporte público *j* a la parada/estación del EP *i*.

- Frecuencia equivalente ponderada (Weighted equivalent frequency, WEF). Es calculada como la sumatoria de la EFs de los modos de transporte con una ponderación a favor del modo de transporte dominante (Ecuación 4).

$$WEF_{ij} = \alpha EF_{id} + \beta \sum_{i} \sum_{j \neq d} EF_{ij} \qquad i = 1,2,3,\dots,n \qquad j = 1,2,3$$

WEF_{ij} es la frecuencia equivalente ponderada del modo de transporte público *j* a la parada/estación del EP *i*, EF_{id} es la frecuencia equivalente del modo de transporte dominante a la parada/estación del EP *i,* α y β son los coeficientes considerados para la frecuencia equivalente del modo de transporte dominante y los otros modos de transporte, considerando para un EP *i* el modo dominante con una EF_{ij} mayor. α y β fueron definidos como 1 para el modo dominante y 0.5 para los otros dos modos (London, 2010).

Una vez obtenida la WEF calculada para cada EP es traslada hacia las AGEBs mediante SIG, donde cada AGEB obtendrá los EP presentes dentro de ella.

La segunda parte del proceso calcula la densidad poblacional a través de áreas de influencia, AGEB´s y manzanas. Se consideraron 400 m para acceder a las paradas de autobuses y ecovía y 800 m para acceder a las estaciones del metro mediante distancias caminadas (Figura 26).

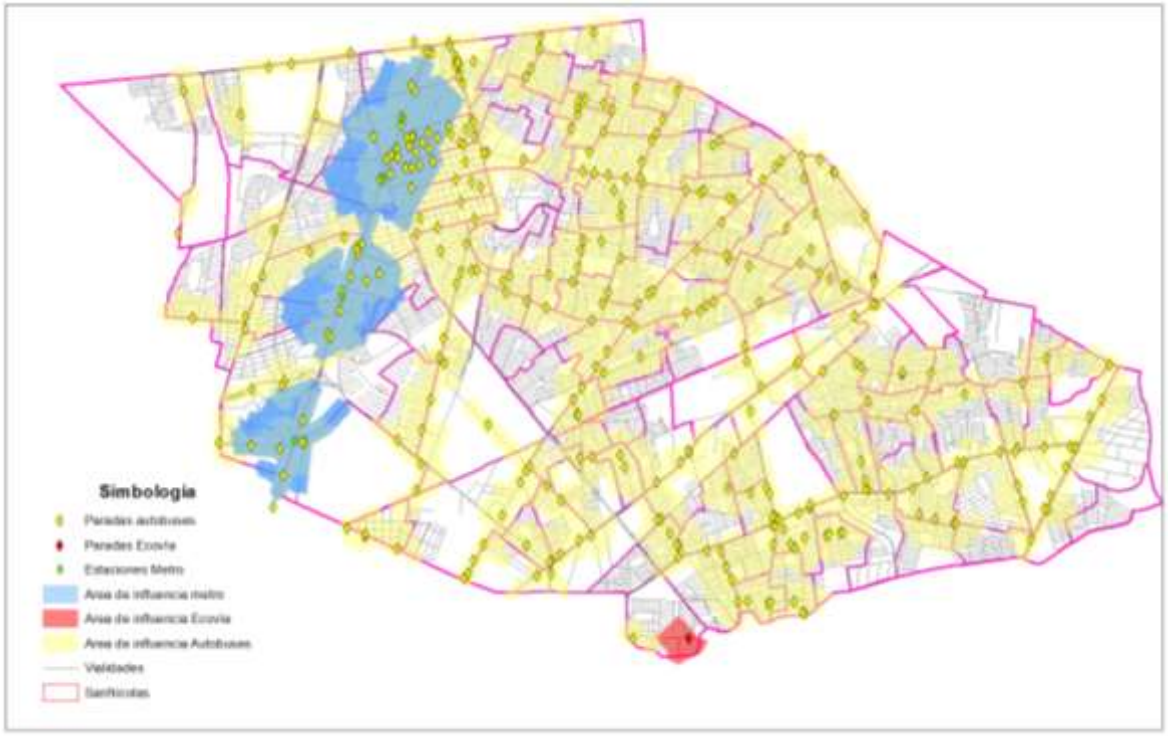


Figura 26. Áreas de influencia de los modos de transporte en el municipio de San Nicolás de los Garza.

Una vez obtenidas las áreas de influencia se sobreponen con las AGEBs, calculando la densidad poblacional basada en la porción del área de influencia sobrepuesta a las manzanas de dicha AGEB (asumiendo una distribución homogénea de la población sobre las manzanas). La figura 27 muestra la sobreposisicón de una AGEB seleccionada considerando las distancias caminadas para las paradas de camiones. Para cada AGEB su densidad (D_{AGEB}) y la densidad de del área de influencia perteneciente a dicha AGEB (D_B).

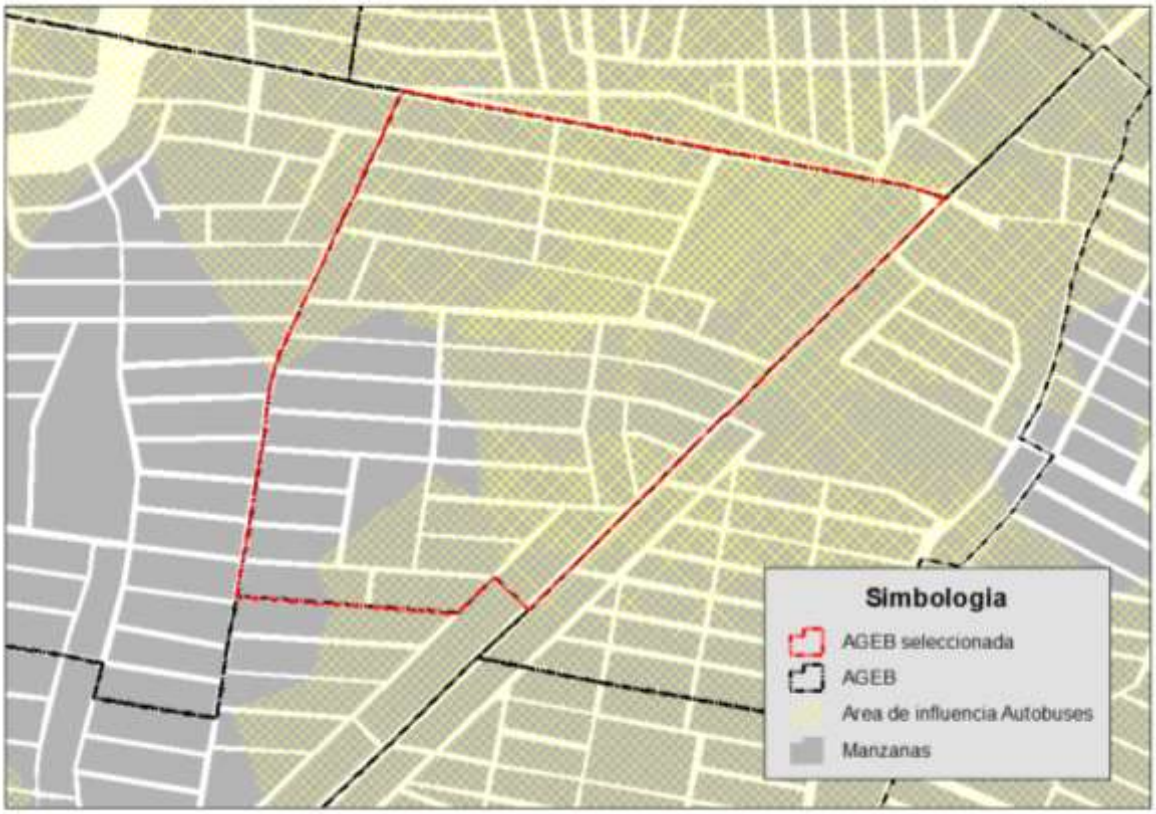


Figura 27. Calculo de densidad poblacional para áreas de influencia y AGEBs.

Por último se debe calcular el indicie IATP para cada AGEB como lo muestra la ecuación 5. El índice es una combinación de los valores de WEF y la densidad poblacional.

Si $D_{Bij} = 0$,

$$IATP_{AGEBi} = \sum_{j=1}^{3} \sum_{i=1}^{I} \left(1 + \frac{D_{Bij}}{D_{AGEBi}}\right) * WEF_{AGEBi}$$

Si $D_{Bij} \neq 0$,

$$IATP_{AGEBi} = \sum_{j=1}^{3} \sum_{i=1}^{I} \left(\frac{D_{Bij}}{D_{AGEBi}}\right) * WEF_{AGEBi}$$

donde $IATP_{AGEB}$ es el índice de accesibilidad para una AGEB dada y D_{Bij} es la densidad poblacional del área de influencia *i* para el modo de transporte *j*. D_{AGEB}, se refiere a la densidad poblacional de la AGEB, mientras WEF_{AGEB} es la frecuencia equivalente ponderada calculada para dicha AGEB.

3.3.4 Mapeo de vulnerabilidad

Para poder realizar el mapeo es necesario tener en su totalidad todos los procesos anteriores. Lo que se hará en esta etapa es integrar los datos generados mediante las diferentes metodologías dentro de un modelo en el SIG que permite documentar procesos de análisis espacial y realizar una, dos o hasta tres corridas que dependen de las condiciones de la infraestructura, o de los modos principales de transporte (Figura 28). Para esto se rasterizaron los modelos previos, dando valores para su posterior sumatoria. Para deterioros en columnas, se definió un área de influencia de 400 metros de cada columna, en las cuales se estableció como 2 si cuenta con uno de los deterioros visibles (grietas y hollín) o 3 si cuenta con ambos (Tabla 11, Figura 29 y Figura 30), en cuanto a calidad del aire se consideraron los valores obtenidos de la interpolación, los cuales van de 57 a 102 (Figura 31) y para accesibilidad con valores de 1 a 7 (Tabla 12, Figura 32).

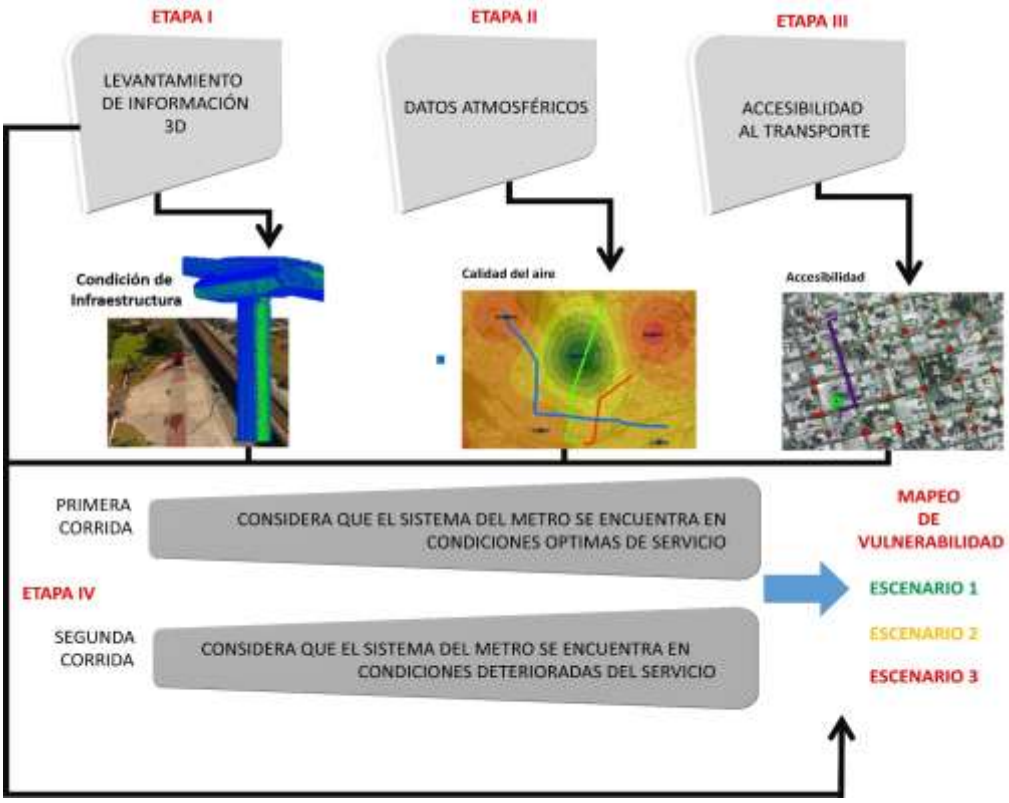


Figura 28. Diagrama metodológico final para el mapeo de la vulnerabilidad basado en 3 escenarios que dependen de la condición de la infraestructura.

Tabla 11. Valores de vulnerabilidad para raster de deterioros en columnas escaneadas.

Deterioro	Vulnerabilidad
Grietas u Hollín	2
Grietas y Hollín	3

Figura 29. Ejemplo de áreas de influencia con valores de vulnerabilidad visibles en formato vectorial de columnas F-C1 y E-C29.

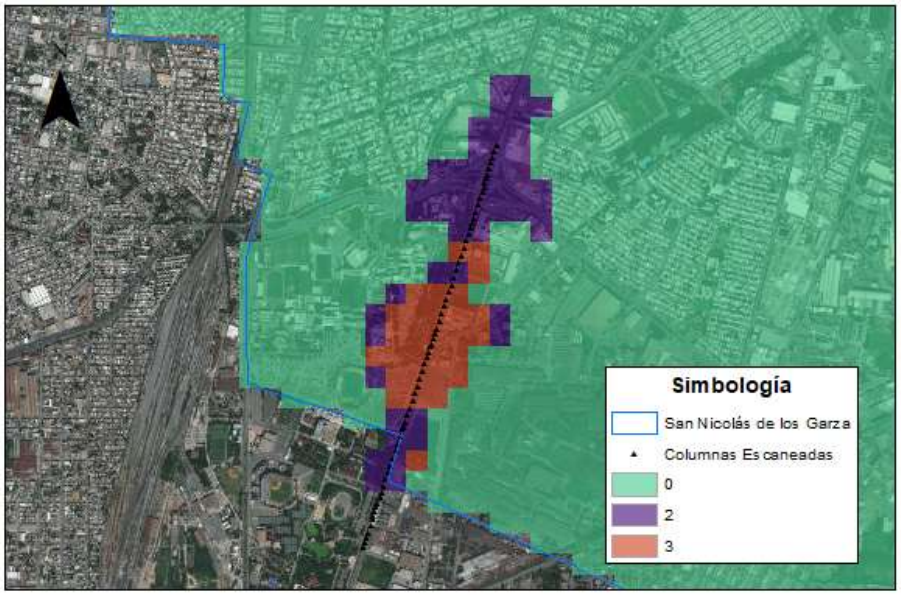


Figura 30. Áreas de influencia con valores de vulnerabilidad en formato raster.

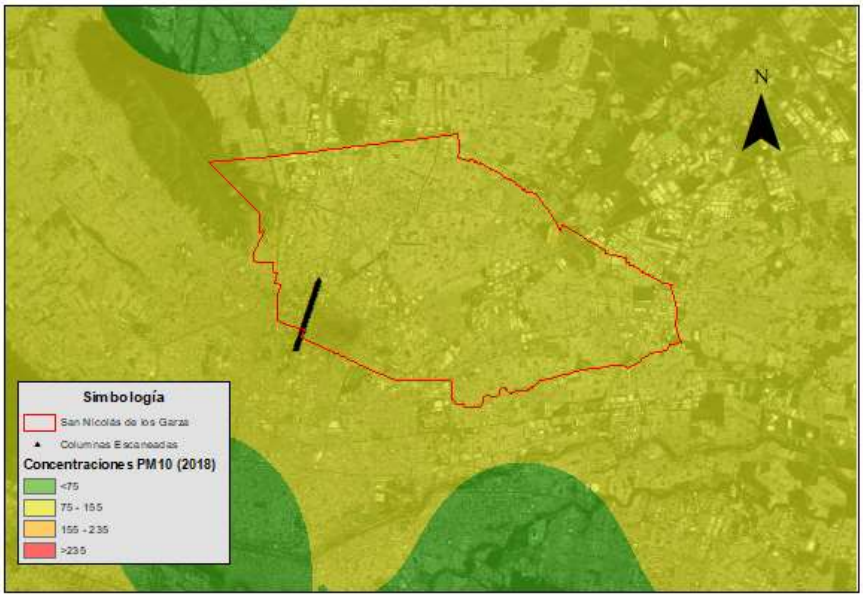


Figura 31. Concentración considerada como valor de vulnerabilidad en formato raster del año 2018.

Tabla 12. Valores de vulnerabilidad para raster de IATP.

Nivel de accesibilidad	Vulnerabilidad
Excelente	1
Muy buena	2
Buena	3
Moderada	4
Pobre	5
Muy Pobre	6
N/A	7

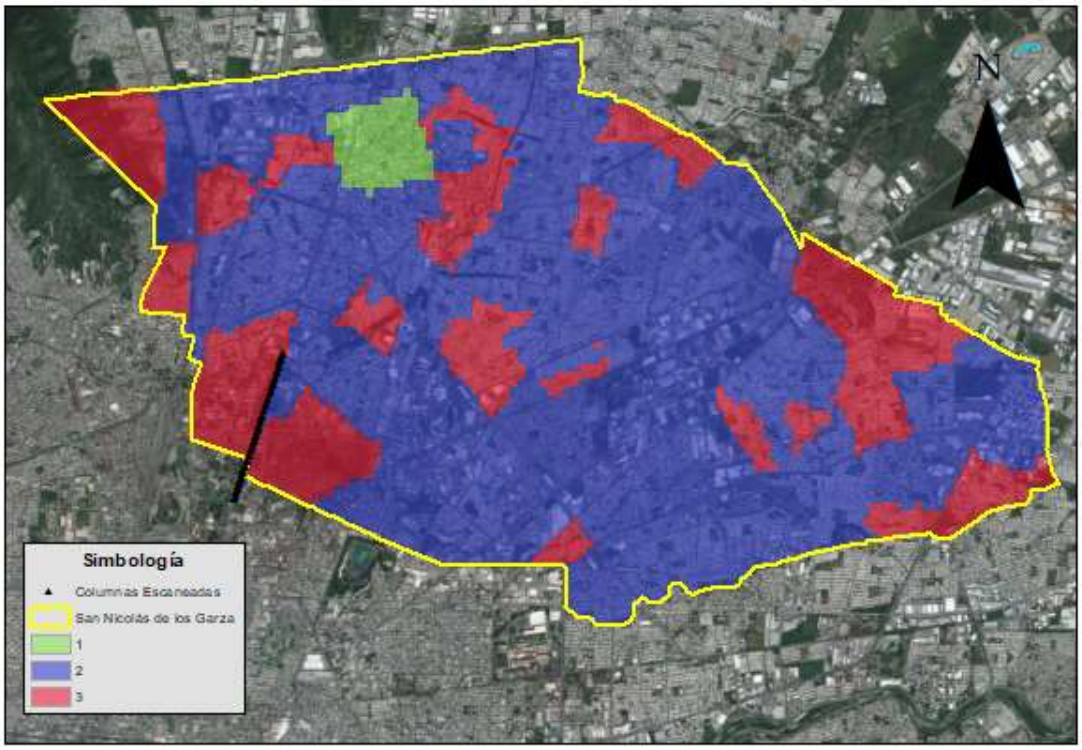


Figura 32. IATP con valores de vulnerabilidad en formato raster.

Posterior se realizó a través de SIG la integración de los 3 modelos rasterizados mediante la sumatoria entre ellos con base en los valores de vulnerabilidad definidos.

4 Resultados y discusiones

4.1 Levantamiento en campo

4.1.1 Escaneos GLS

Como producto del levantamiento en campo con LIDAR, se obtuvo una nube de puntos de los 67 escaneos correspondientes a 37 columnas del segmento entre las estaciones de metro Niños Héroes y Universidad. Los escaneos varían en densidad en la nube de puntos, van desde nubes de 1’400,000 puntos hasta 36,000,000, aproximadamente.

Tabla 13. Densidad de puntos por escaneo (Escobedo, A. N., Yépez Rincón, F. D., 2019).

Escaneo/s	No. Puntos	Escaneo/s	No. Puntos
M38	9,006,374	R36 R37	4,440,908
M39	1,862,812	R38 R40 R41	29,665,936
M40 M41 M42 M43	36,311,404	R42 R43 R44	35,788,789
M44	1,632,788	R45 R46 R47	7,804,085
M45	2,529,754	R48 R49 R50	9,905,947
M46 M47	16,215,377	R51	5,733,647
M48	11,851,453	R52	6,006,132
M49	2,988,305	R53	6,401,578
M50 M51	9,919,050	R54	4,083,698
M52	10,782,832	R55 R56	27,509,900
M53 M55 M56	17,755,162	R57 R58	13,581,469
M54	14,681,849	R59 R60	11,268,326
M57	1,489,781	R61	6,508,053
M58 M59	8,172,689	R62 R63 R64 R65 R66	43,474,353
M60	11,591,245	R67 R68	22,874,250
M61	16,219,749	R69 R70	12,385,275
M62	6,378,748		
M64 M63	10,738,189		
M65	22,377,864		
M66 M67 M68	21,969,499		

En la figura 33 observamos la nube de puntos alineada de la sección escaneada y con la nomenclatura en las columnas proporcionada por Metrorrey.

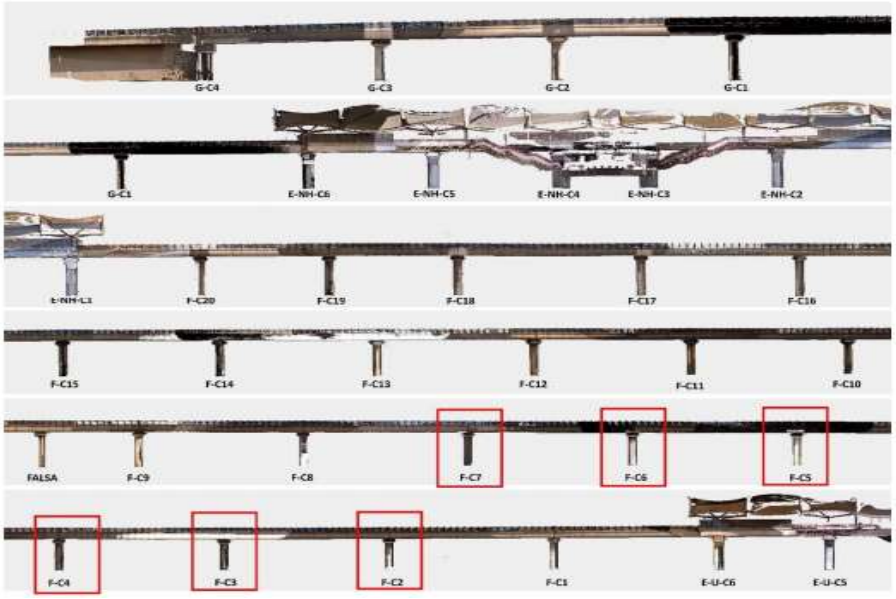


Figura 33. Nube de puntos limpia en formato RGB de la sección comprendida entre las estaciones Niños Héroes y Universidad.

4.2 Inspección visual

Con base en la inspección visual de los escaneos y el programa Google se localizaron los agrietamientos y hollín presente en la superficie de la estructura en los diferentes elementos de las columnas. Se documentó por columna a cada rango de altura en la siguiente tabla 14.

Tabla 14. Agrietamientos y hollín localizados por columna a través de inspección visual. A= Trabe, B= Capitel, C= Columna, 1= Agrietamiento y 2= Hollín.

No	Clave	Rango de alturas			No	Clave	Rango de alturas		
		A	B	C			A	B	C
1	G-C1 (ESTRIBO)	-	1	1	20	F-C11	1,2	1,2	1,2
2	G-C2	-	1	-	21	F-C10	1,2	1,2	1,2
3	G-C3	-	1	-	22	F-C9	1,2	1,2	1,2
4	G-C4	1	1	1	23	F-C8	1,2	1,2	1,2
5	E-NH-C6	-	1	-	24	F-C7	1,2	1,2	1,2
6	E-NH-C5	-	1	-	25	F-C6	1,2	1,2	1
7	E-NH-C4	-	1	1	26	F-C5	1,2	1,2	1
8	E-NH-C3	-	-	1	27	F-C4	1,2	1,2	1
9	E-NH-C2	-	1	1	28	F-C3	1,2	1,2	1
10	E-NH-C1	-	1	1	29	F-C2	1,2	1,2	1,2

11	F-C20	1,2	1,2	1	30	F-C1	1,2	1,2	1
12	F-C19	1,2	1,2	1	31	E-U-C6	1,2	1,2	1
13	F-C18	1,2	1	1	32	E-U-C6	1	1	1
14	F-C17	1	1	1	33	E-U-C6	1	1	1
15	F-C16	1,2	1,2	1	34	E-U-C6	1	1	1
16	F-C15	1,2	1,2	1	35	E-U-C6	1	1	1
17	F-C14	1,2	1,2	1,2	36	E-U-C6	1	1	1
18	F-C13	1,2	1,2	1,2	37	E-U-C6	1	1	1
19	F-C12	1,2	1,2	1,2					

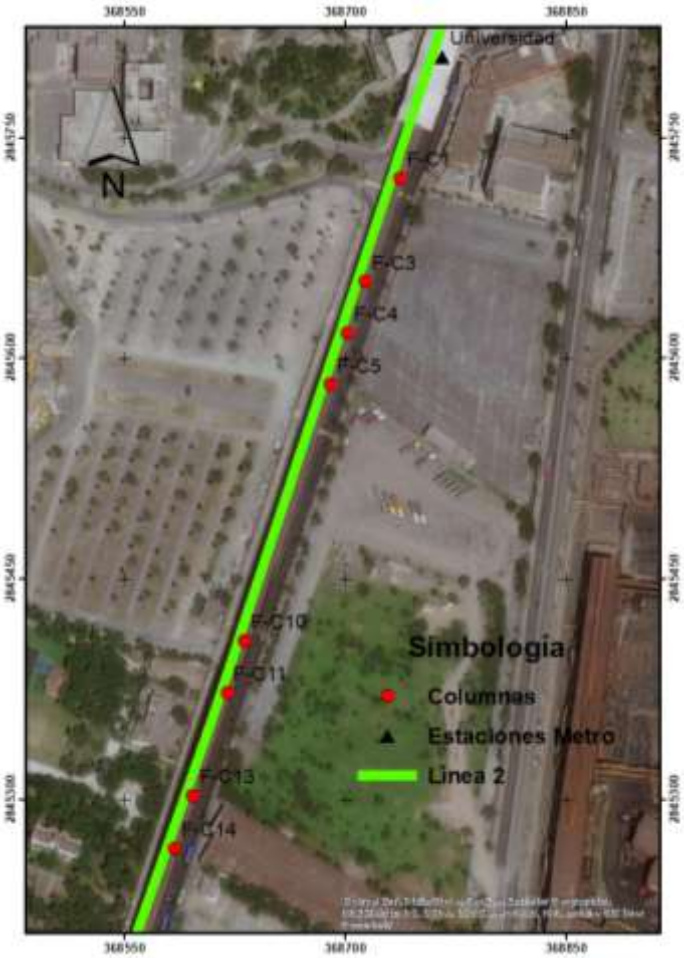


Figura 34. Ubicación de las columnas seleccionadas.

Se seleccionaron 8 columnas las cuales se observaba a través de Street View de Google Earth las que tenían mayor presencia de agrietamientos y hollín dentro del

municipio de San Nicolás de los Garza y entre las columnas escaneadas. Las columnas fueron F-C1(CI-1), F-C3 (CI-2), F-C4 (CI-3), F-C5 (CI-4), F-C10 (CI-5), F-11 (CI-6), F-C13 (CI-7) y F-C14 (CI-8) (Figura 30 y Figura 31). La nomenclatura es la especificada por el Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey.

Algunas columnas fuera del municipio en estudio presentan agrietamientos y hollín, sin embargo (Figura 35 y Figura 36).

Figura 35. Columna F-C1 (CI-1) con presencia de agrietamientos y hollín visibles a través de Street View de Google Earth y escaneos.

Figura 36. Columna G-C3 con presencia de agrietamientos y hollín visibles a través de Street View de Google Earth y escaneos.

- Discusiones

Levantamiento en campo e inspección visual.

En cuanto a la toma de datos en campo mediante el escáner terrestre, se realizaron durante varios meses para completar en su totalidad la zona estudiada. Esto debido a diferentes factores como la cantidad y duración de las baterías utilizadas por el escáner, limitando la cantidad de escaneos diarios, así como la cantidad de luz y clima, considerando que durante días nublados no era conveniente realizar los levantamientos ya que podría afectar los resultados obtenidos.

Posterior al levantamiento, se importó, alineo y limpiaron las nubes de puntos obtenidas de los levantamientos con el escáner terrestre, lo cual duró varios meses debido a la gran cantidad de puntos que contenía cada escaneo. Esto generó problemas al visualizar todos los puntos, se generaban zonas donde no existían puntos hasta aplicar un acercamiento, lo cual se debía a la capacidad del equipo para procesar la información. Estos datos fueron utilizados para localizar deterioros, hollín y agrietamientos sobre la estructura.

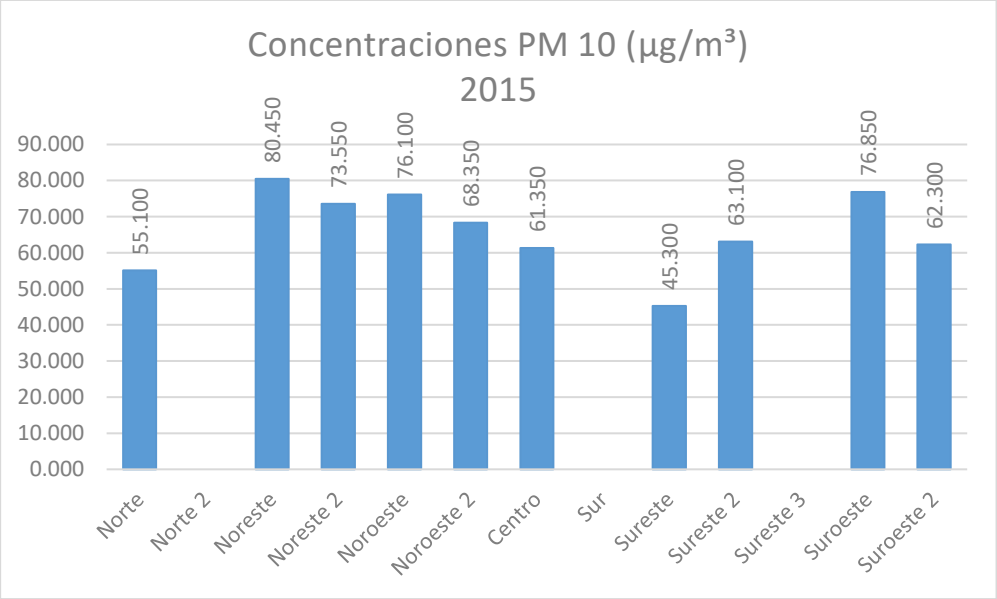
La inspección mediante Google Earth fue de utilidad para corroborar los deterioros observados en las nubes de puntos limpias, además de permitir evaluar de manera preliminar y visual secciones del metro que no se encontraban dentro del área de estudio.

4.3 Condiciones atmosféricas

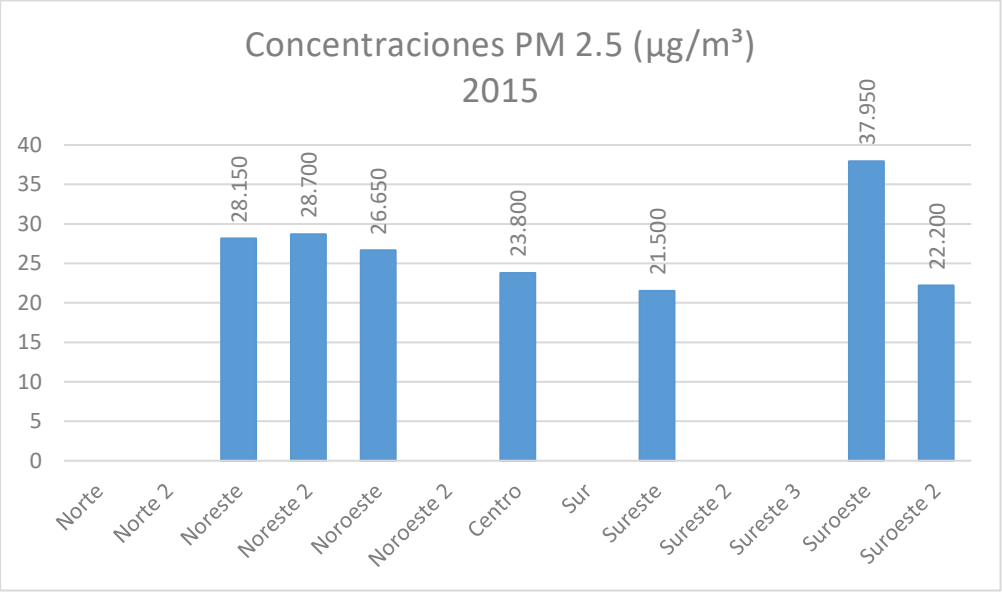
Se obtuvieron las concentraciones de manera mensual de las emisiones en las diferentes estaciones de monitoreo en la ZMM de manera mensual a través de los reportes generados por el SIMA, considerando la mediana de cada estación. Se realizó un análisis de PM10 y PM2.5 de manera anual, evaluando los límites máximos permisibles para estas consideradas en la Norma Oficial Mexicana “NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación”, la cual considera para partículas *PM10* un límite anual de *40 µg/m3*, como promedio anual, mientras que para partículas *PM2.5* un límite anual de *12 µg/m3*, como promedio anual. Sin embargo, SIMA considera el índice metropolitano de calidad del aire (IMECA), mediante el cual informan a la población los niveles de contaminación existentes mediante una escala según su capacidad de ocasionar molestias al ser humano. Dichos valores fueron obtenidos de la “NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud”, donde establecen la calidad del aire, nivel de riesgo asociado y las concentraciones (Tabla 15).

Tabla 15. Índice de aire y salud para PM 10 y PM 2.5 (NOM-172-SEMARNAT-2019).

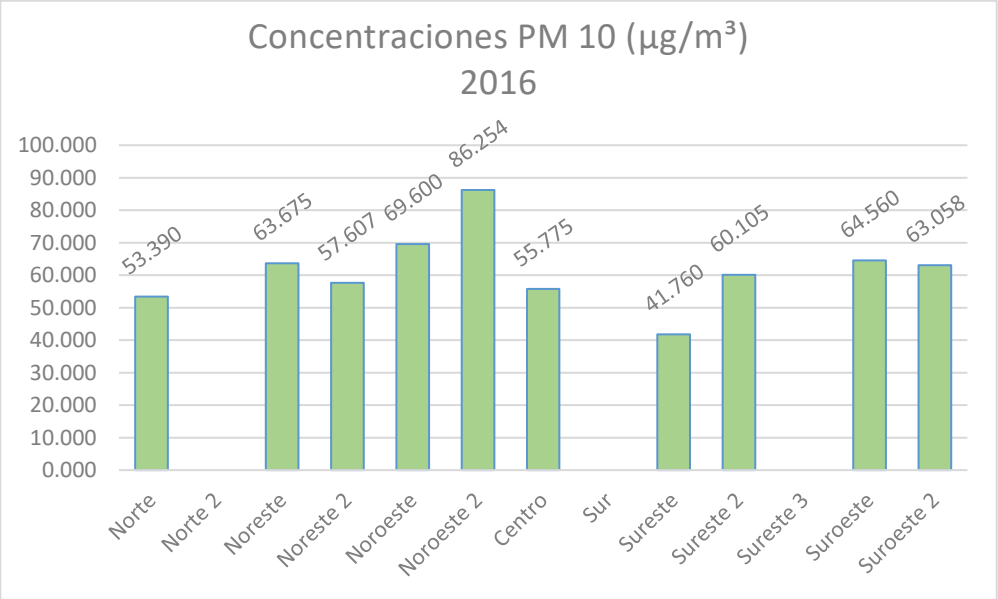
Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM 10 (µg/m3)	Intervalo de PM 2.5 (µg/m3)
Buena	Bajo	≤50	≤25
Aceptable	Moderado	>50 y ≤75	>25 y ≤45
Mala	Alto	>75 y ≤155	>45 y ≤79
Muy Mala	Muy Alto	>155 y ≤235	>79 y ≤147
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	≥235	≥147



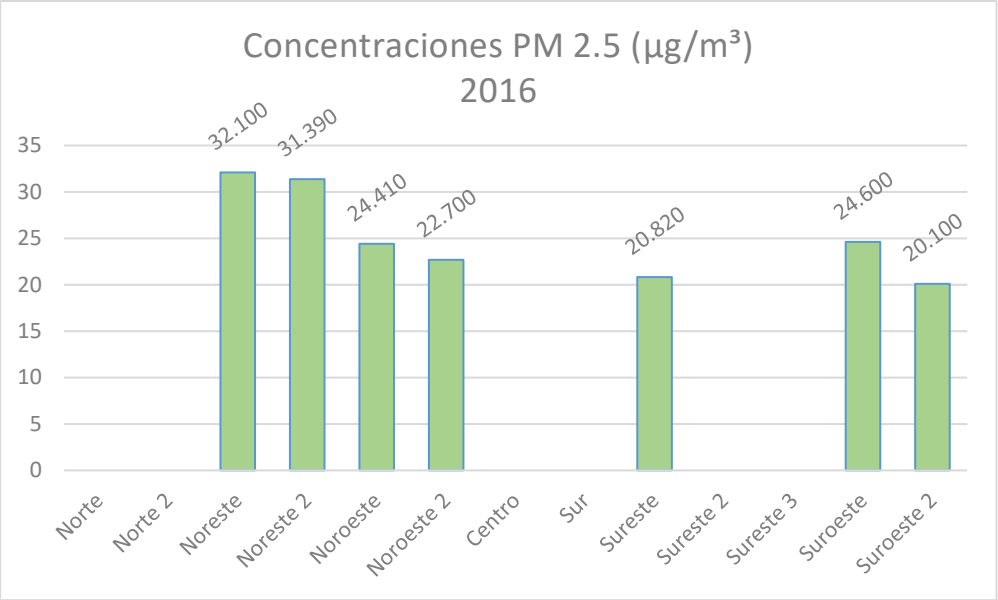
Gráfica 1. Concentraciones anuales PM 10 (µg/m³) en el año 2015.



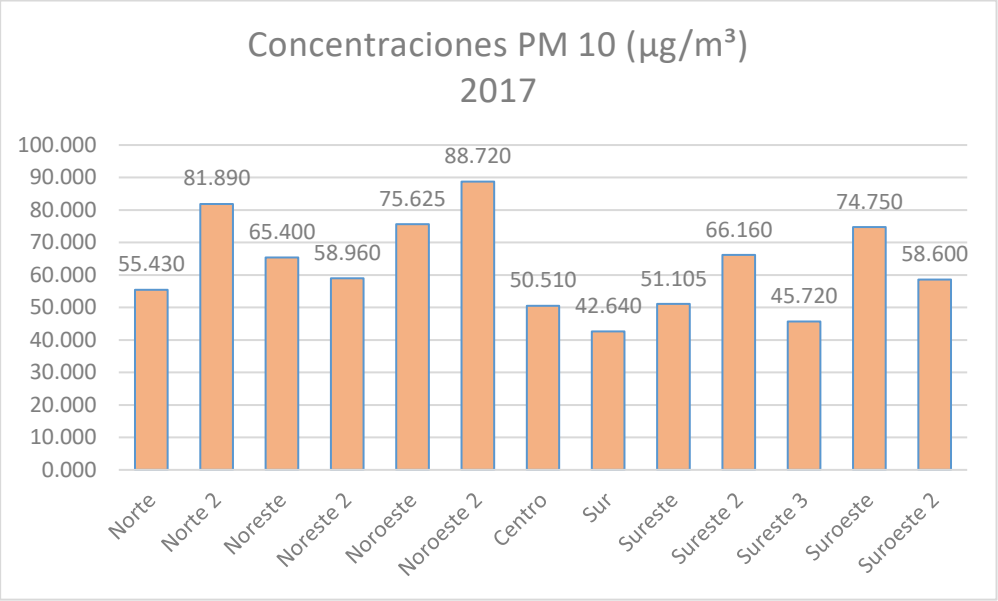
Gráfica 2. Concentraciones anuales PM 2.5 (µg/m³) en el año 2015.



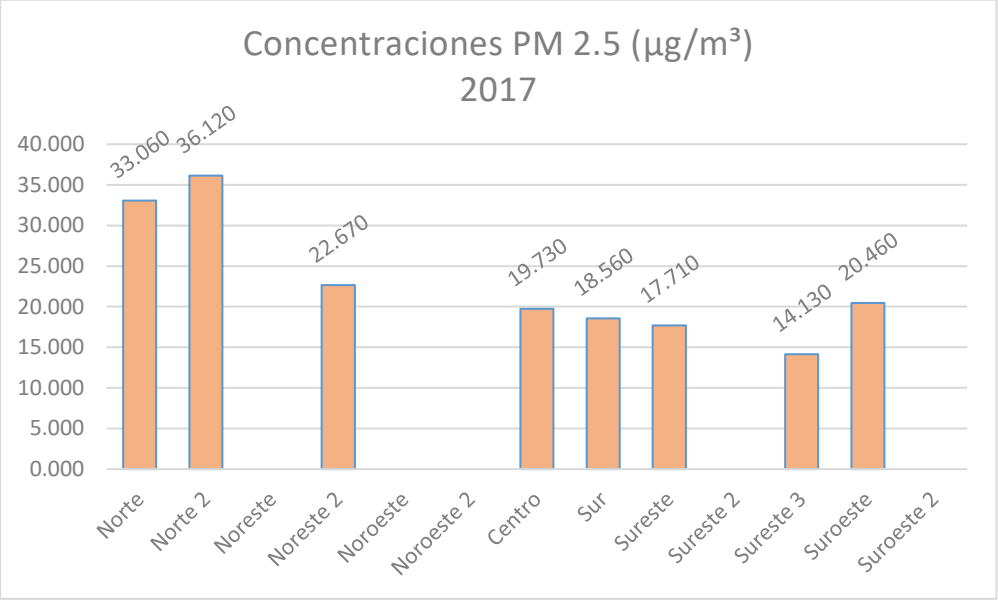
Gráfica 3. Concentraciones anuales PM 10 (µg/m³) en el año 2016.



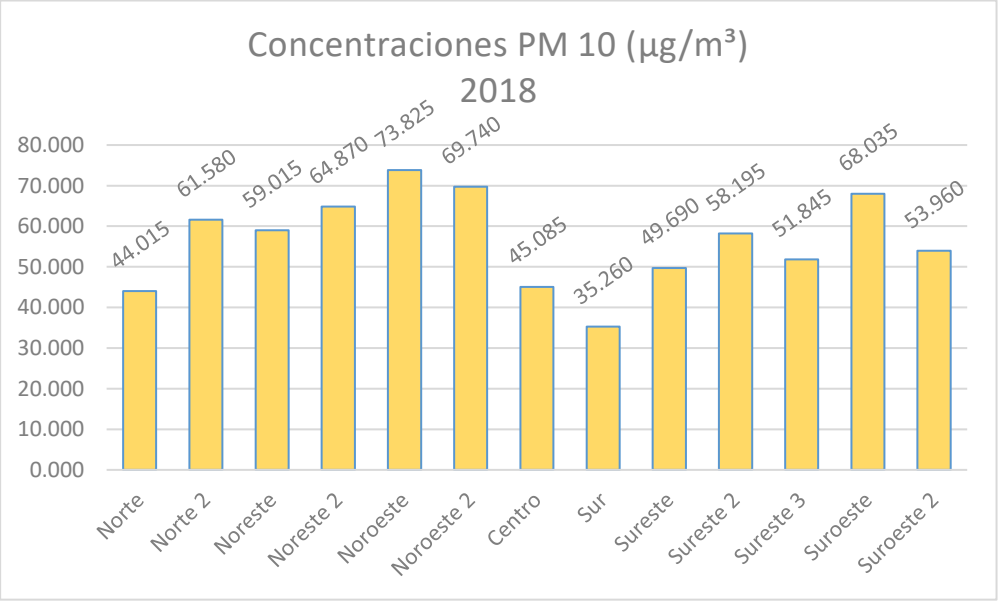
Gráfica 4. Concentraciones anuales PM 2.5 (µg/m³) en el año 2016.



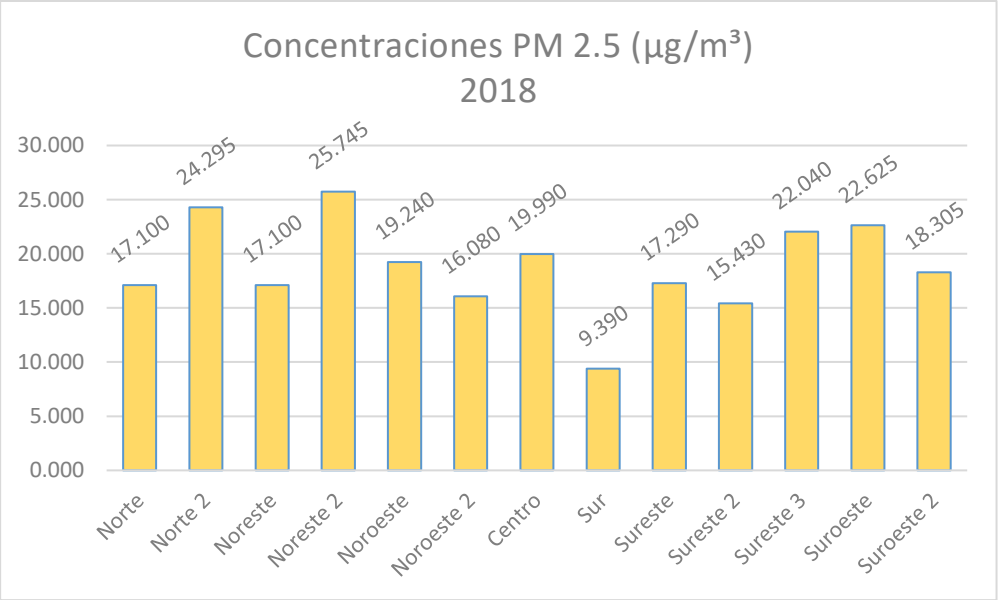
Gráfica 5. Concentraciones anuales PM 10 (µg/m³) en el año 2017.



Gráfica 6. Concentraciones anuales PM 2.5 (µg/m³) en el año 2017.



Gráfica 7. Concentraciones anuales PM 10 (µg/m³) en el año 2018.



Gráfica 8. Concentraciones anuales PM 2.5 (µg/m³) en el año 2018.

A través de la plataforma digital del SIMA se obtuvieron los reportes con los datos de emisiones en las estaciones de monitoreo ubicadas en la ZMM de 2015 a 2018 de manera mensual, lo cual permite observar los cambios en las concentraciones de las emisiones (Figura 21) y su comportamiento en la ZMM.

Algunas estaciones no muestran datos en algunos años, tanto para PM10 como PM2.5, por ejemplo, las estaciones Norte 2 (Universidad), Sur (Pueblo Serena) y Sureste 3 (Cadereyta), no muestran datos hasta en los años 2015-2017, incluso algunos meses de 2018, es hasta octubre 2018 cuando estas estaciones reportan concentraciones en todas sus estaciones.

En ambas emisiones, PM10 y PM2.5, observamos que las concentraciones promedio de todos los años analizados exceden el límite máximo permisible establecidos en la norma NOM-025-SSA1-2014, mientras que en IMECA la calidad del aire se establece entre Buena y Mala en todos los años para ambos parámetros.

Estos datos fueron transferidos a SIG, donde se utilizó un método de interpolación donde se generó un archivo en formato raster con la información analizada (Figura 37).

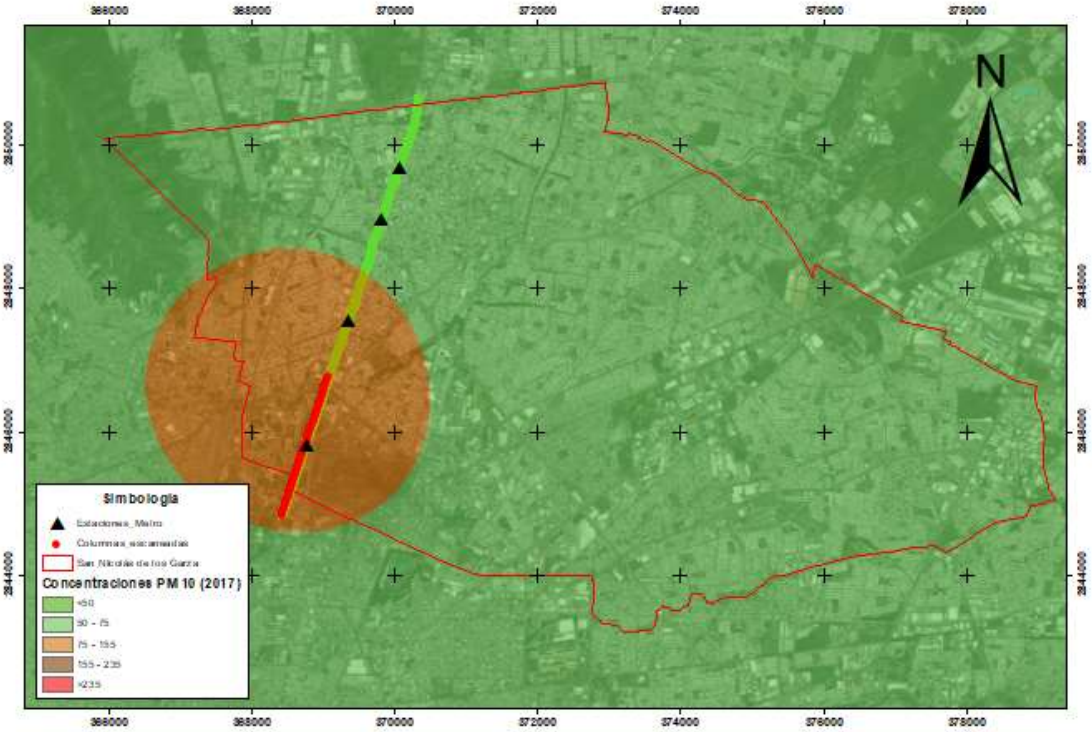


Figura 37. Concentración de PM10 en el año 2017 (mediana). Datos de estaciones de monitoreo SIMA.

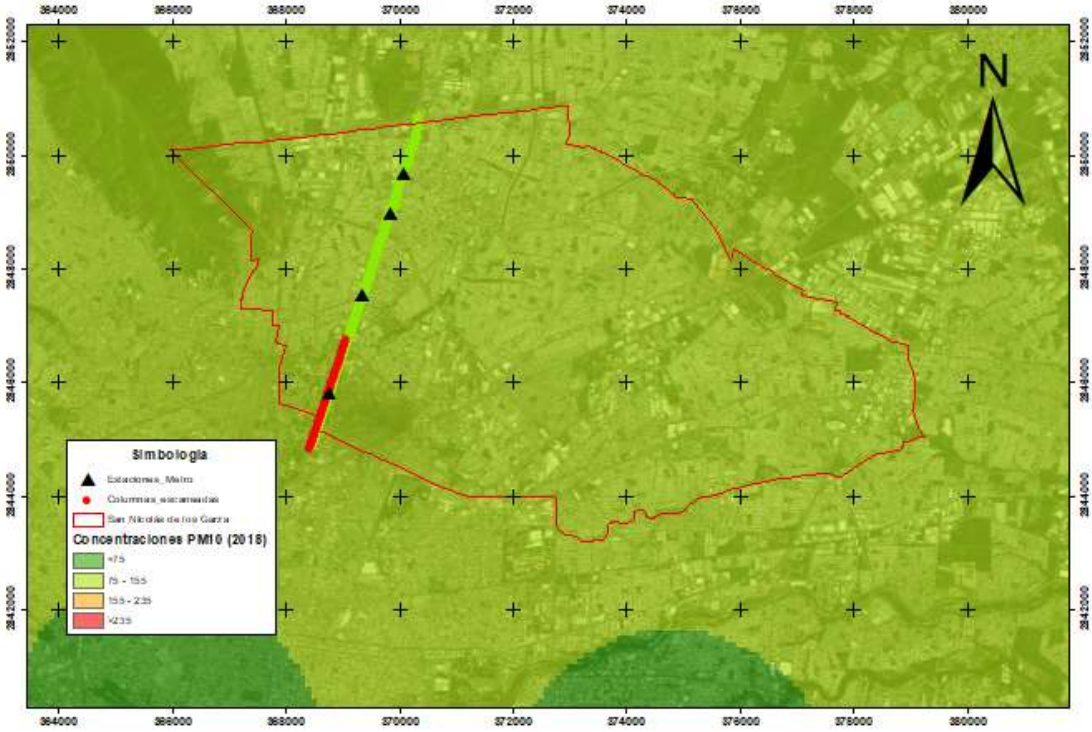


Figura 38. Concentración de PM10 en el año 2018 (máxima). Datos de estaciones de monitoreo SIMA.

La figura 38 muestra las concentraciones máximas de las 13 estaciones de monitoreo durante el año 2018, las cuales serán consideradas durante el mapeo de vulnerabilidad, esto con la intención de representar las condiciones menos favorables.

- Discusiones

Los reportes generados de los datos obtenidos en las estaciones de monitoreo SIMA fueron analizados de manera gráfica y espacial, siendo la principal limitante de esto es que en algunos años y algunas estaciones no se tenía registro de las concentraciones. Sin embargo se observó que la mediana de algunas estaciones sobrepasaba los límites máximos permisibles establecidos en las normas para PM 10 y PM2.5, al igual que considerado como un índice de calidad IMECA “Malo”, con un riesgo ”Alto” a la salud de la población.

Siendo el metro considerado como un transporte sostenible, ya que transporta una mayor cantidad de personas en menor tiempo, grandes distancias y de manera más económica, entre otras, podemos generar un vínculo directo con las condiciones de su estructura y las condiciones atmosféricas. Debería ser una herramienta que ayude a disminuir esta problemática, y el poner en riesgo sus condiciones de servicio sería aumentar la mala calidad atmosférica, ya que sus usuarios tendrían que utilizar otros transportes tal vez menos sostenibles y más contaminantes.

4.4 Análisis de accesibilidad

El resultado fue la obtención de un IATP en el municipio de San Nicolás de los Garza representado en las AGEBs (Figura 39), sin embargo para poder realizarlo fue necesario la integración de diferentes capas vectoriales (shape) (Tabla 13), de las cuales algunas no se encontraban disponibles, por lo que fue necesario solicitarlas o digitalizarlas. Cada una de estas capas representa una parte física de la ciudad, conteniendo incluso información como longitud, nombre, área, densidad poblacional, entre otras.

Tabla 13. Capas utilizadas en la obtención del IATP.

Shape	Unidad	Cantidad
Vialidades	ml	1,232,503.62
Espacios Públicos	Cantidad	1811
Paradas/estaciones	Cantidad	331
Rutas de transporte público	Cantidad	134
Área Geoestadística Básica	Cantidad-Ha	166-6006.37
Líneas del metro	ml	5508.15
Ecovía	ml	29.78
Municipio San Nicolás de los Garza	M2	6006.37

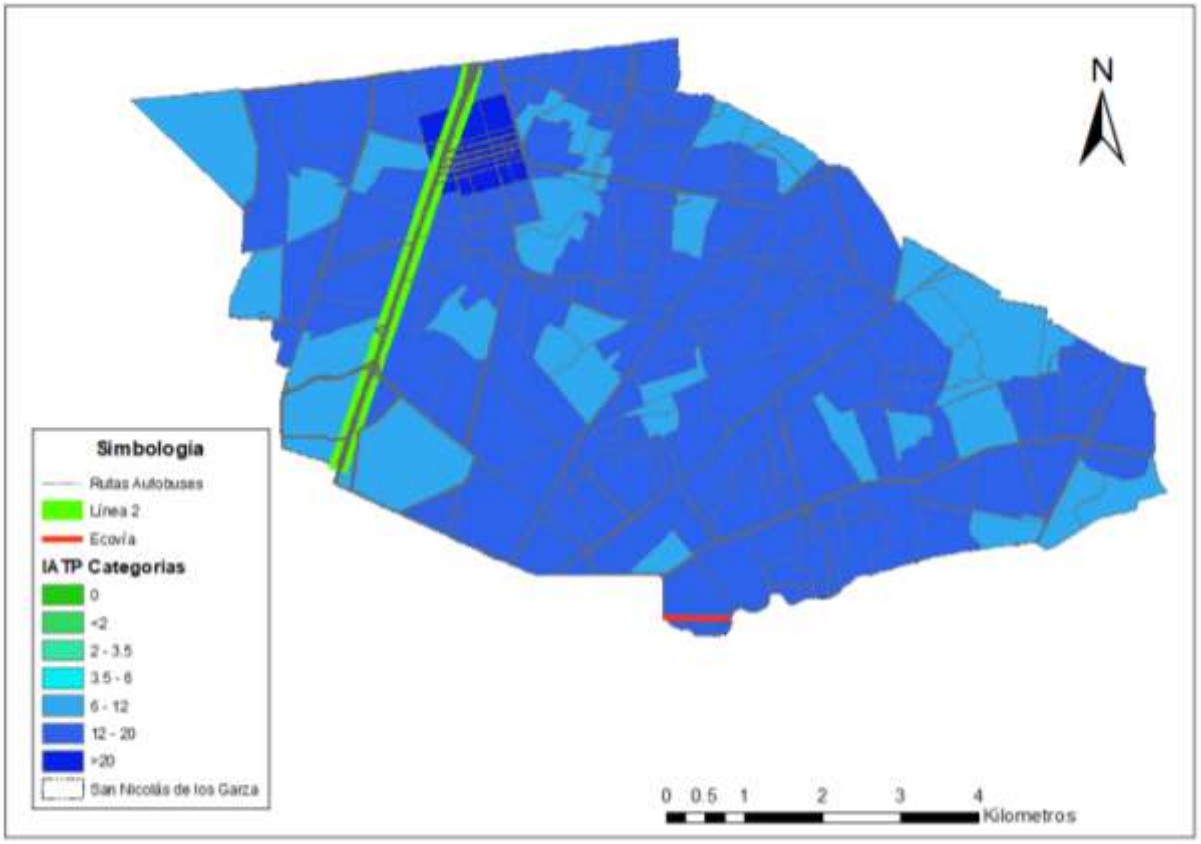


Figura 39. Distribución del IATP en el municipio de San Nicolás de los Garza.

Dentro el municipio de San Nicolás de los Garza se encuentran presentes 127 AGEBs que fueron consideradas en la obtención del IATP, de los cuales se

obtuve que el 3.15% (4) de estas cuentan con una accesibilidad *Excelente*, 72.44% (92) *Muy Buena* y 24.41% (31) como *Buena*.

En la tabla 14 mostramos las porciones de cobertura y de población con acceso al transporte público para cada modo. Es importante mencionar que algunas áreas de interés se sobreponen entre sí, entre diferentes modos de transporte e incluso dentro del mismo. Esto hace a las zonas de convergencia más accesibles que las demás al tener más de una porción presentes en ellas.

Tabla 14. Porcentajes de área y población municipal con cobertura y acceso de los diferentes modos de transporte público.

Modo de transporte	Área municipio (HA)	Área AI (HA)	Población Municipio	Población AI	% área	% Población
Autobuses	6006.376	2691.573	443,273	299358	44.8119	67.5335
Ecovía	6006.376	10.154	443,273	920	0.1609	0.2075
Metro	6006.376	364.448	443,273	17702	6.0676	3.9934

El principal reto en este proceso fue la obtención y generación de información necesaria, de la cual, a pesar de contar con algunas capas, estas debían ser corregidas y/o actualizadas para lograr que el proceso fuera adecuado. Sin embargo, tener datos como puntos de interés, rutas de autobuses, paradas/estaciones, entre otros, son de suma importancia a considerar dentro de cualquier estudio de accesibilidad.

El municipio cuenta en general con una buena accesibilidad, lo que nos muestra que la cobertura del transporte público es buena, sin embargo es importante resaltar, que a pesar de eso, el alcance del metro y ecovía es poca comparada con los autobuses.

El análisis de accesibilidad está directamente relacionado con la población, considerando las paradas/estaciones, espacios públicos y densidad poblacional. Sin embargo, podemos vincular la información obtenida con los datos previos,

relacionar la accesibilidad con las condiciones de la estructura, de manera que al observar deterioros en ella se pone en riesgo la accesibilidad de la población en esa zona. Observamos que el área escaneada la accesibilidad obtenida es buena, lo cual se debe en parte a que a pesar de contar con espacios públicos y paradas/estaciones, la densidad poblacional es muy baja, incluso nula, lo que las hace menos accesibles, pero al estar ubicados espacios públicos como escuelas, empresas, tiendas de conveniencia, entre otras, la afluencia diaria de los mismos, así como el uso de estas paradas/estaciones es alto, y a pesar de no ser residentes en la zona, les dan uso constante a estos, por lo que es población vulnerable en este sentido.

Por otro lado podemos vincular la accesibilidad con las condiciones atmosféricas, ya que al ser una zona con accesibilidad alta, indica que un mayor número de población está presente en ella, y si las condiciones atmosféricas son malas, mayor población se verá afectada, repercutiendo en su salud y calidad de vida. Al tener amplia cobertura el transporte público en sus 3 modalidades, estos son una herramienta importante para fomentar una movilidad sostenible en el municipio y en la ZMM, ya que con una evaluación detallada e integrada a planes de desarrollo, contemplando el vínculo, pros y contras, entre las diferentes áreas, se pueden generar propuestas importantes que den solución a problemáticas reales.

4.5 Modelo de vulnerabilidad

Se obtuvo como resultado un mapa de vulnerabilidad con la integración de los 3 modelos anteriormente mencionados mediante una sumatoria de los valores establecidos de vulnerabilidad (Figura 40) obteniendo valores de 79 a 90, estableciendo como baja vulnerabilidad valores menores a 83, media vulnerabilidad valores entre 83 y 86, y alta vulnerabilidad valores entre 86 y 90 (Tabla 15).

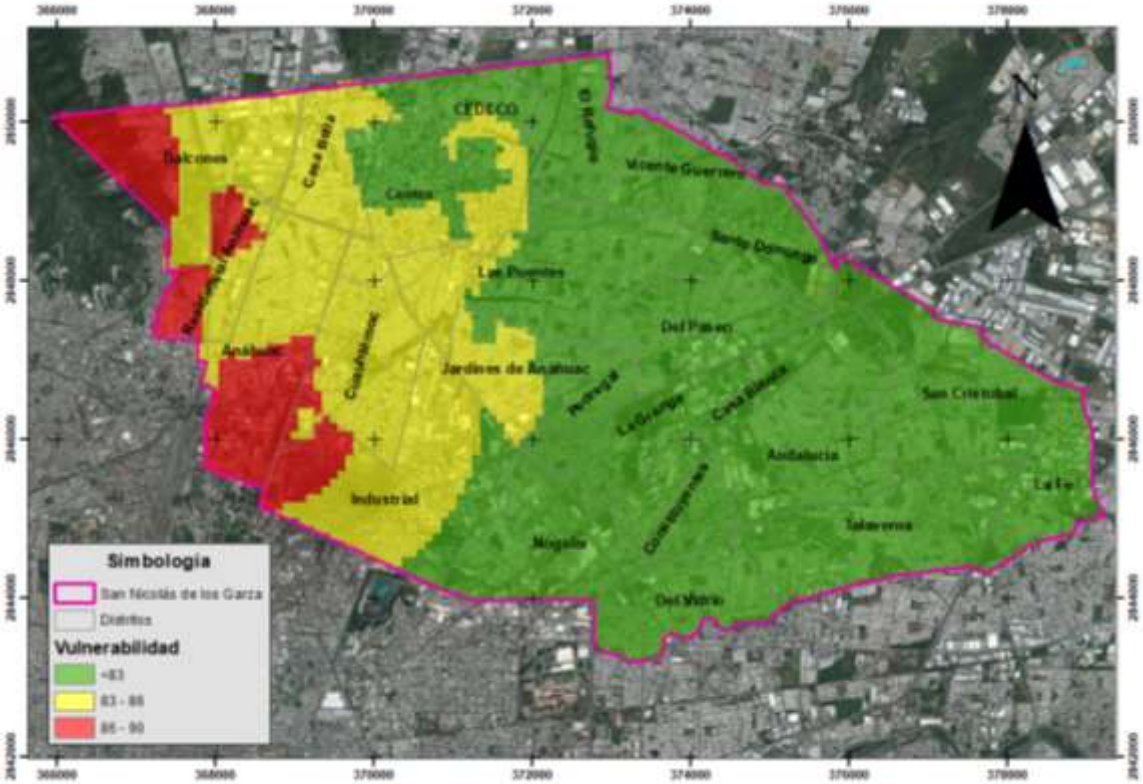


Figura 40. Mapa de vulnerabilidad en el municipio de San Nicolás de los Garza.

Tabla 15. Cobertura por clasificación de vulnerabilidad en el municipio de San Nicolás de los Garza.

Vulnerabilidad	Área (HA)	Población Municipio	% área	Población
Baja	3,907.03	443,273	65.047	288,340
Media	1605.32	443,273	26.72	118,473
Alta	484.52	443,273	8.07	35,758

Podemos observar que 5 distritos del municipio son las que presentan una vulnerabilidad alta, Anáhuac, Balcones, Cuauhtémoc, Industrial y Residencial Anáhuac, donde las columnas escaneadas se encuentran en su totalidad dentro de un área con vulnerabilidad alta.

Los resultados muestran la parte oeste del municipio con una vulnerabilidad alta, mientras que el resto con vulnerabilidad baja o media, lo cual no significa que no existan problemáticas, sino que es en esta zona donde cada modelo por separado tiene resultados menos favorables. Por ejemplo, la zona de escaneos por obvias razones se muestra con vulnerabilidad alta, al ser la que integra mayor información.

La integración de los tres modelos permite observar en conjunto la información obtenida en cada uno, permitiendo analizar más de un área a la vez, observando el vínculo entre estas y generando soluciones que involucren a todas.

Es importante mencionar que es un modelo el cual se alimentó con información de diferentes índoles, algunas públicas (INEGI) o solicitadas a instituciones gubernamentales (CETYV), así como generadas y/o actualizadas dentro del Departamento de Geomática, reforzando cada vez más la información en la base de datos, la cual sirvió no solo para esta investigación, sino también para futuras investigaciones, incluso de ayuda para la toma de decisiones del municipio y las diferentes áreas involucradas. Es información actualizable y escalable, que puede ser alimentada o transformada conforme cambia la situación, permitiendo mantener al día y de manera conjunta los datos.

5. Conclusiones y recomendaciones

Para llevar a cabo una gestión urbana adecuada es necesario poner en práctica diferentes áreas de conocimiento, siendo una de ellas, y de gran importancia, la movilidad urbana. Para desarrollar un plan de movilidad urbana se requiere de la aplicación de diversos datos específicos que muestren las condiciones actuales del sistema de movilidad en la ciudad, por ejemplo rutas de transporte, distribución de la población, infraestructura vial, entre otros, los cuales al integrarse permitan proponer soluciones óptimas para mitigar y prevenir problemáticas y buscar un desarrollo adecuado a corto, mediano y largo plazo.

Los SIG permiten observar grandes cantidades de información en un solo espacio, facilitando su análisis y dándonos un gran número de herramientas para el mismo, sin embargo, es importante mencionar que los datos obtenidos dependen de la calidad de la información con la que nosotros alimentamos las bases de datos,

además de que en caso de que esta información no exista o no se encuentre disponible, se debe invertir tiempo y recursos para generarla.

La información obtenida mediante sensores remotos resulta de gran utilidad, ya que son tecnologías avanzadas que nos permiten realizar observaciones de los objetos en estudio y generar datos con mayor rapidez y de gran calidad, los cuales son difícilmente accesibles de manera convencional.

En este estudio, los datos obtenidos permitieron generar un modelo 3D de la principal estructura de movilidad urbana, el metro, utilizando un escáner láser. Además en conjunto con una validación visual mediante Google Earth, se logró identificar deterioros superficiales presentes en la estructura, demostrando que es posible general una inspección de manera remota que proporcione información importante sobre las condiciones de la infraestructura de movilidad.

Los datos obtenidos del SIMA muestran el comportamiento que han tenido las emisiones de manera temporal y espacial en la ZMM del 2015 al 2018, observando que a pesar de tener una calidad buena en gran parte de la ZMM, algunos años e incluso meses para el área de estudio se presentaban calidades malas. El vincular estos datos con las condiciones del sistema de transporte público puede ser una herramienta importante para la planificación urbana y de movilidad, saber dónde es necesario reducir emisiones o donde mejorar la accesibilidad al transporte público, reduciendo el uso del vehículo privado.

En el IATP para el municipio de San Nicolás de los Garza se observa que su accesibilidad está catalogada de buena a excelente, si bien los 3 medios tienen presencia dentro del municipio, observamos que el dominante es el autobús, tanto por cobertura como número de paradas. Aunado a lo anterior, es importante mencionar que algunas rutas tienen conexión con otros municipios, al igual que las líneas del metro y ecovía, por lo que el IATP cambiaría al considerar los municipios, y por lo tanto AGEBs y demás capas consideradas colindantes en el análisis.

Es a través de la integración en SIG donde podemos observar la interacción de los modelos de accesibilidad, condición de la infraestructura y calidad del aire, que la combinación de modos de movilidad (metro, ecovía y autobús urbano) permite

que el municipio cuente con una accesibilidad buena a muy buena. Sin embargo las condiciones atmosféricas promedian anualmente en la zona como malas.

El SIG permite crear una herramienta para el manejo de los datos generados y almacenados como una base de datos. La sinergia de las distintas tecnologías permite, visualizar de manera gráfica el resultado y al ser una herramienta actualizable permite observar las condiciones actuales del área de estudio, proyectar posibles escenarios de utilidad para la toma de decisiones y generar proyectos y acciones que sirvan para mejorar la calidad de vida de la población.

6. Referencias

- Alam, M., Ahmed, F., 2013. Urban transport systems and congestion: a case study of Indian cities. Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific, 82, pp. 33-43.
- Astorga, A. y Rivero, P (2009). Patología en las edificaciones. Venezuela: Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgos.
- Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. Universidad politécnica de Madrid, Madrid.
- Batista, R., & Bustos, X. (2009). Sistema de información geográfica y teledetección. Determinación de vulnerabilidad urbana. Caso estado Vargas-Venezuela. Terra Nueva Etapa, 25(38), 167-190.
- Cabello, J., & Paruelo, J. M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. Revista ecosistemas, 17(3).
- Cardozo, O. D., & Da Silva, C. J. (2017). Aplicaciones urbanas de los sensores remotos. Geográfica digital, 10(20), 1-6.
- Carmichael, L., Townshend, T. G., Fischer, T. B., Lock, K., Petrokofsky, C., Sheppard, A., & Ogilvie, F. (2019). Urban planning as an enabler of urban health: Challenges and good practice in England following the 2012 planning and public health reforms. Land Use Policy, 84, 154-162
- Cass, N., Shove, E., & Urry, J. (2005). Social exclusion, mobility and access. *The sociological review*, *53*(3), 539-555.
- Chen, S., Truong-Hong, L., O'Keeffe, E., Laefer, D. F., & Mangina, E. (2018). Outlier detection of point clouds generating from low cost uavs for bridge inspection. In Proc. of The Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018.
- Cheng, Y.-H., Chen, S.-Y., 2015. Perceived accessibility,mobility, and connectivity of public transportation systems. Transp. Res. A Policy Pract. 77, 386–403.

- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial (Vol. 453). Madrid: Ediciones Rialp.
- Colwell, R. N. (1968). Remote sensing of natural resources. Scientific American, 218(1), 54-71.
- Consejo Estatal de Transporte y Vialidad. Comunicación Personal.
- Cuerno Rejado, C., Garcia Hernandez, L., Sanchez Carmona, A., Carrió Fernández, A., Sanchez Lopez, J. L., & Campoy Cervera, P. (2016). Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad. Dyna, 91(3), 282-288.
- Davis, K. (1965). The urbanization of the human population. *Scientific American*, *213*(3), 40-53.
- Dawood T., Zhu Z., Zayed T. (2018) Detection and Quantification of Spalling Distress in Subway Networks. In: Chau K., Chan I., Lu W., Webster C. (eds) Proceedings of the 21st International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate. Springer, Singapore.
- Delatte, N., Chen, S. E., Maini, N., Parker, N., Agrawal, A., Mylonakis, G., & Miller, R. (2003). Application of nondestructive evaluation to subway tunnel systems. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1845), 127-135.
- Di Bella, C. M., Posse, G., Beget, M. E., Fischer, M. D. L. A., Mari, N., & Verón, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. Revista Ecosistemas, 17(3).
- Encuesta ciudadana “Así Vamos 2017”, Disponible en: http://www.comovamosnl.org/.
- Environmental Systems Research Institute, 2016. http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-LIDAR -data-.htm ¿Qué son los datos LIDAR?
- Ferrando, F. (2008). Santiago de Chile: antecedentes demográficos, expansión urbana y conflictos. Revista de Urbanismo, (18).
- Gandy, M. (2004). Rethinking urban metabolism: water, space and the modern city. City, 8(3), 363-379.
- Gakenheimer, R. (1998). Los problemas de la movilidad en el mundo en desarrollo. EURE (Santiago), 24, 33-52.

- Gebhard, J. (2002) Introducción al procesamiento digital de imágenes. Cátedra de Aerofotointerpretación, FCN y M, UNLP. La Plata. MS
- Gil, P., Torres, F., & Ortiz Zamora, F. G. (2004). Detección de objetos por segmentación multinivel combinada de espacios de color.
- GOBIERNO DE NUEVO LEÓN. 2009. Plan Sectorial de Transporte y Vialidad del Área Metropolitana de Monterrey. Consejo Estatal de Transporte y Vialidad, Agencia para la Planeación del Desarrollo Urbano de NL, Metrorrey y Agencia Estatal del Transporte, Nuevo León.
- González-Dugo, M. P., Lorite, I. J., Gavilán, P., Berengena, J., Santos, C., & Serrano, A. (2007). Estimación de la evapotranspiración en zonas regables combinando datos de teledetección y estaciones meteorológicas. Resumen de los trabajos desarrollados por el grupo de riegos del IFAPA.
- Gopalakrishnan, K., Gholami, H., Vidyadharan, A., Choudhary, A., & Agrawal, A. (2018). Crack damage detection in unmanned aerial vehicle images of civil infrastructure using pre-trained deep learning model. International Journal for Traffic and Transport Engineering, 8, 1.
- Gu, C. (2019). Urbanization: Processes and driving forces. Science China Earth Sciences, 62(9), 1351-1360.
- Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción.
- INEGI. 2015. Delimitación de las zonas metropolitanas de México. SEDESOL, CONAPO.INEGI.
- Izquierdo, C., & María, J. (2008). Estudios sobre movilidad cotidiana en México. Scripta Nova, 12(273).
- Jiménez, J. J., Álvarez Vallejo, A., Hoyos Martínez, J. E. D., & Sánchez Arellano, L. I. (2010). Transporte y Movilidad en el Marco de la Sustentabilidad y Competitividad de la Ciudad Posmoderna. Quivera, 12(1).
- Jirón, P., & Mansilla, P. (2013). Atravesando la espesura de la ciudad: vida cotidiana y barreras de accesibilidad de los habitantes de la periferia urbana de Santiago de Chile. Revista de Geografía Norte Grande, (56), 53-74.
- González, M. E. P., & Rodríguez, P. G. (2006). Aplicaciones de la teledetección en hidrología. Observatorio Medioambiental, (9), 171-187.

- Jensen, J. R., & Cowen, D. C. (1999). Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. Photogrammetric engineering and remote sensing, 65, 611-622.
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). Diseño y control de mezclas de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Lagüela, S., Solla, M., Puente, I., & Prego, F. J. (2018). Joint use of GPR, IRT and TLS techniques for the integral damage detection in paving. Construction and Building Materials, 174, 749-760.
- Landgrebe, D. A. (2005). Signal theory methods in multispectral remote sensing (Vol. 29). John Wiley & Sons.
- Lerma, C., Mas, Á., Gil, E., Vercher, J., & Peñalver, M. J. (2014). Pathology of building materials in historic buildings. Relationship between laboratory testing and infrared thermography. *Materiales de Construcción*, *64*(313), 009.
- López-Granados, F. (2013). Uso de Vehículos Aéreos no tripulados (UAV) para la evaluación de la producción agraria. ambienta, (105), 40-52.
- Löw, M. (2008). The constitution of space: The structuration of spaces through the simultaneity of effect and perception. European Journal of Social Theory, 11(1), 25-49.
- McCormac, J. C., & Russell, H. B. (2005). Diseño de concreto reforzado. Alfaomega.
- Milgram, S. (1970). The experience of living in cities. Science, 167(3924), 1461-1468.
- Nishikawa, T., Yoshida, J., Sugiyama, T., & Fujino, Y. (2012). Concrete crack detection by multiple sequential image filtering. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 27(1), 29-47.
- Pan, Y., Dong, Y., Wang, D., Chen, A., & Ye, Z. (2019). Three-Dimensional Reconstruction of Structural Surface Model of Heritage Bridges Using UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. Remote Sensing, 11(10), 1204.
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. Revista Ecosistemas, 17(3).
- Park, R. E., & Burgess, E. W. (2019). The city. University of Chicago Press.
- Paton, D., & Johnston, D. (2001). Disasters and communities: vulnerability, resilience

and preparedness. Disaster Prevention and Management: An International Journal, 10(4), 270-277.

- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., & López-Granados, F. (2014). Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Revista de Teledetección, (42), 39-48.
- PNUMA. (2003). Asentamientos humanos en America Latina y el Caribe. Panama: PNUMA.
- Pryer, J, & Crook, N. (1998). Cities of Hunger: Urban Malnutrition in Developing Countries, Oxford: Oxfam.
- Pereira, B., Medeiros, P., Francke, T., Ramalho, G., Foerster, S., & De Araújo, J. C. (2019). Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density. Hydrological Sciences Journal, 64(1), 66-79.
- OMS 2018 https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health
- Onu, B., Surendran, S. S., & Price, T. (2014). Impact of inadequate urban planning on municipal solid waste management in the Niger Delta Region of Nigeria. Journal of sustainable Development, 7(6), 27.
- Qu, Z., Ju, F. R., Guo, Y., Bai, L., & Chen, K. (2018). Concrete surface crack detection with the improved pre-extraction and the second percolation processing methods. *PloS one*, *13*(7), e0201109.
- Rauber, É. R., Bordin, F., Anschau, M. M., Veronez, M. R., da Silveira Jr, L. G., & Framarim, C. (2018). Bibliographical analysis on the potential of the acquisition of multi and hyperspectral images by UAVs to help the inspection
- in bridges. Brazilian Journal of Geomatics, 6(1), 44-61.
- Roach, D. (2009). Real time crack detection using mountable comparative vacuum monitoring sensors. Smart structures and systems, 5(4), 317-328.
- Rodríguez, M. S. C. (2019). Urbanización y procesos locales en los pueblos del poniente de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Carta Económica Regional, (124), 57-81.

- Rodríguez Quintanilla, I. A. (2013). Percepción del usuario del transporte público con respecto a la calidad y al nivel de servicio ofertado en las zonas metropolitanas de Aix-en-Provence, Francia y Monterrey, México (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Rodríguez Chávez, Ó. E., Bautista, A., & Alberto, H. (2005). Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil (Bachelor's thesis, Facultad de Ingeniería).
- Sánchez-Jacobo, F. 2014. Sistema de Gestión de Puentes Carreteros: Seguimiento a los programas de reconstrucción conservación rutinaria y periódica de los puentes. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional. Zacatenco, Edo. De México. 154p.
- Sani S., J.C. (2015). Vehículos aéreos no tripulados-UAV para la elaboración de cartografía escalas grandes referidas al marco de referencia Sirgas-Ecuador (Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente).
- Sandström, U. G., Angelstam, P., & Khakee, A. (2006). Urban comprehensive planning–identifying barriers for the maintenance of functional habitat networks. Landscape and urban planning, 75(1-2), 43-57.
- Saghapour, T., Moridpour, S., & Thompson, R. G. (2016). Public transport accessibility in metropolitan areas: A new approach incorporating population density. Journal of Transport Geography, 54, 273-285.
- Sánchez-Jacobo, F. 2014. Sistema de Gestión de Puentes Carreteros: Seguimiento a los programas de reconstrucción conservación rutinaria y periódica de los puentes. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional. Zacatenco, Edo. De México. 154p.
- Sarkar, P. K., & Chalumuri, R. S. (2019). Smart Transportation System Citing Best Practices and its Relevance in Indian Cities. Indian Highways, 47(2).
- SEMARNAT. 2016. Semarnat, Programa De Gestión Para Mejorar la Calidad del Aíre del Estado De Nuevo León, Proaíre 2016-2025. Gobierno Del Estado De Nuevo León, Secretaría De Desarrollo Sustentable.
- Smith, T., Nelischer, M., & Perkins, N. (1997). Quality of an urban community: a framework for understanding the relationship between quality and physical

form. Landscape and Urban Planning, 39(2-3), 229-241.

- Stajano, F., Cvrcek, D., & Lewis, M. (2008, June). Steel, cast iron and concrete: Security engineering for real world wireless sensor networks. In International Conference on Applied Cryptography and Network Security (pp. 460-478). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Stren, R. (ed), (1995) Urban Research in the Developing World, 4 vols, Centre for Urban and Community Studies, University of Toronto.
- Sundar, M. L., Prasath, C. A., Rosario, H. E., & Tamilselvan, K. (2019). Urban Sprawl Mapping and Land Use Change Detection Analysis. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 9(1), 281-286.
- Unibazo Carrilo, M. (2010). Hacia una movilidad sostenible del Área Metropolitana de Concepción (AMC), Chile (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- UNICEF. (2012). Estado mundial de la infancia de 2012: Niñas y niños en un mundo urbano. México, D.F.
- Verbyla, D. L. (1995). Satellite remote sensing of natural resources (Vol. 4). CRC Press.
- Vergés, F. A. R., & Bocco, G. (2003). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. Gaceta ecológica, (68), 43-54.
- Viera-González, P.M. (2014) Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiors (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Vila Rovira, O. (2011). Modelización de aeronaves no tripuladas con Simulink (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Wight, J. K. y MacGregor, J. G. (2009). *Reinforced Concrete, Mechanics and Design.* (5a ed.) EEUU: Pearson.
- Yépez Rincón, F.D. 2013. Análisis Sinérgico de sensores remotos para la evaluación y monitoreo del territorio del AMM, su infraestructura urbana y uso de suelo. Tesis Doctorado en Ciencias de Ingeniería. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, NL.

- Yu, S. N., Jang, J. H., & Han, C. S. (2007). Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel. Automation in Construction, 16(3), 255-261.
- Yuste Martin, N., Vargas-Velasco, N., & Moya-Hernández, J. (2013). Teledetección Ambiental de Alta Resolución mediante aplicación de Vehículos Aéreos no tripulados. Sociedad española deficiencias forestales, 1-22.
- Zanni, E. (2008) Patología de la construcción y restauro de obras de arquitectura (1a ed.) Argentina: Brujas.
- Zhang, C. P., Zhang, D. L., Luo, J. J., WANG, M. S., & WU, J. P. (2009). Remote monitoring system applied to the construction of metro station undercrossing existing metro tunnel. Rock and Soil Mechanics, 6, 063.

7. Anexos

Anexo 1. Tablas con valores de intensidad para la construcción de histogramas.

Columna G-C2 Capa 1											
Muestra 1-1				Muestra 1-2				Muestra 1-3			
Class	Value	Class start	Class end	Class	Value	Class start	Class end	Class	Value	Class start	Class end
1	2	151.000	177.575	1	5	195.000	227.139	1	11	186.000	206.769
2	4	177.575	204.150	2	11	227.139	259.278	2	10	206.769	227.538
3	21	204.150	230.725	3	22	259.278	291.417	3	30	227.538	248.308
4	42	230.725	257.300	4	53	291.417	323.556	4	34	248.308	269.077
5	59	257.300	283.875	5	66	323.556	355.694	5	44	269.077	289.846
6	93	283.875	310.450	6	88	355.694	387.833	6	93	289.846	310.615
7	128	310.450	337.025	7	131	387.833	419.972	7	110	310.615	331.385
8	128	337.025	363.600	8	112	419.972	452.111	8	179	331.385	352.154
9	113	363.600	390.175	9	117	452.111	484.250	9	150	352.154	372.923
10	143	390.175	416.750	10	133	484.250	516.389	10	206	372.923	393.692
11	148	416.750	443.325	11	71	516.389	548.528	11	171	393.692	414.462
12	142	443.325	469.900	12	117	548.528	580.667	12	165	414.462	435.231
13	91	469.900	496.475	13	93	580.667	612.806	13	271	435.231	456.000
14	121	496.475	523.050	14	77	612.806	644.944	14	137	456.000	476.769
15	73	523.050	549.625	15	32	644.944	677.083	15	204	476.769	497.538
16	64	549.625	576.200	16	38	677.083	709.222	16	126	497.538	518.308
17	45	576.200	602.775	17	20	709.222	741.361	17	100	518.308	539.077
18	31	602.775	629.350	18	18	741.361	773.500	18	137	539.077	559.846
19	16	629.350	655.925	19	13	773.500	805.639	19	83	559.846	580.615
20	17	655.925	682.500	20	4	805.639	837.778	20	83	580.615	601.385
21	15	682.500	709.075	21	0	837.778	869.917	21	49	601.385	622.154
22	19	709.075	735.650	22	1	869.917	902.056	22	62	622.154	642.923
23	11	735.650	762.225	23	0	902.056	934.194	23	37	642.923	663.692
24	1	762.225	788.800	24	0	934.194	966.333	24	34	663.692	684.462
25	8	788.800	815.375	25	0	966.333	998.472	25	28	684.462	705.231
26	4	815.375	841.950	26	7	998.472	1030.611	26	15	705.231	726.000
27	0	841.950	868.525	27	6	1030.611	1062.750	27	11	726.000	746.769
28	1	868.525	895.100	28	5	1062.750	1094.889	28	22	746.769	767.538
29	0	895.100	921.675	29	1	1094.889	1127.028	29	10	767.538	788.308
30	0	921.675	948.250	30	0	1127.028	1159.167	30	8	788.308	809.077
31	0	948.250	974.825	31	2	1159.167	1191.306	31	4	809.077	829.846
32	0	974.825	1001.400	32	1	1191.306	1223.444	32	1	829.846	850.615
33	1	1001.400	1027.975	33	0	1223.444	1255.583	33	1	850.615	871.385
34	1	1027.975	1054.550	34	2	1255.583	1287.722	34	0	871.385	892.154
35	1	1054.550	1081.125	35	1	1287.722	1319.861	35	0	892.154	912.923
36	1	1081.125	1107.700	36	1	1319.861	1352.000	36	0	912.923	933.692
37	0	1107.700	1134.275					37	0	933.692	954.462
38	1	1134.275	1160.850					38	1	954.462	975.231
39	1	1160.850	1187.425					39	0	975.231	996.000
40	2	1187.425	1214.000					40	3	996.000	1016.769
								41	1	1016.769	1037.538
								42	1	1037.538	1058.308
								43	1	1058.308	1079.077
								44	0	1079.077	1099.846
								45	0	1099.846	1120.615
								46	0	1120.615	1141.385
								47	1	1141.385	1162.154
								48	2	1162.154	1182.923
								49	1	1182.923	1203.692
								50	0	1203.692	1224.462
								51	0	1224.462	1245.231
								52	2	1245.231	1266.000

p