

**Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Civil
Subdirección de Estudios de Posgrado**



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. 30 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



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

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



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66456
Tels. (81) 14424400 ext. 4448, 8329 4000 ext. 7216, 7234
www.ingenieriacivil.uanl.mx



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

Departamento Escolar y de Archivo
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente.-

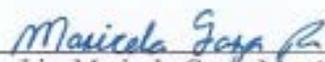
La Biblioteca Universitaria "Raúl Rangel Frías" hace constar la recepción del documento electrónico con la tesis titulada:

"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"

Investigación realizada por **Alejandro Barrón Duarte** para obtener el grado de **Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ingeniería Civil** de esta Universidad.

Sin más por el momento me es grato quedar a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

Atentamente.-
"Alere Flammam Veritatis"
Monterrey, Nuevo León a 23 de febrero de 2021


Lic. Maricela Garza Martínez
Procesamiento Documental



DIRECCIÓN DE
BIBLIOTECAS
Dirección de Bibliotecas
UANL
Procesamiento Documental

Comprobante de corrección de tesis

Dedicatoria

A mi padres y hermana, gracias por todo.

Agradecimientos

Gracias a mi familia, a mis padres Milena Duarte y Francisco Barrón por siempre estar y motivarme, a mi hermana Milena Barrón y mis abuelos, Martha, Cuxo, Ema y Ramón, siempre están en mi mente y corazón.

A mi asesora la Dra. Fabiola Yépez Rincón, por sus enseñanzas, apoyo, comentarios y recomendaciones durante todo este tiempo. Gracias por la confianza e invitación en la participación en proyectos de investigación.

A la M.C. Rita Bustamante Alcántara y a la M.C. Elizabeth Garza Martínez por sus comentarios, recomendaciones y aportes en esta investigación, fueron muy útiles para concluir.

A mis compañeros del Departamento de Geomática, Nelly, Andrea, Roberto, Diana y Diego, por adoptarme y apoyarme durante todo el proceso, dentro y fuera de lo académico.

A Andrea y Fernando, por el levantamiento en campo y el trabajo de oficina de los datos LIDAR.

A Ana, por tu apoyo y cariño, por compartir tu tiempo, escucharme y alentarme en todo momento.

A mi nueva familia, Yera, Ricky, Ana y Aldo, por esos días de café y buenos chistes. A mis amigos y jugadores, por acompañarme en mis vicios y tirar dados con toda la emoción posible.

A mis amigos, Wiza, Oso, Placa, Ángeles y Mike, gracias por siempre estar. A Lulú por acompañarme y compartir durante estos años.

Agradezco a las instituciones que hicieron esto posible, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto de Ingeniería Civil (IIC) de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por el apoyo financiero otorgado para manutención y colegiaturas, al sistema de transporte colectivo METRORREY y al Consejo Estatal de Transporte y Vialidad (CETyV) por la aportación de datos aquí analizados.

Muchas gracias a todos.

Índice

1.	Introducción.....	1
	1.1. Justificación	3
	1.2 Objetivo general.....	4
	1.2.1 Objetivos específicos.....	5
	1.3 Hipótesis	5
2.	Antecedentes y marco teórico.....	5
	2.1 Antecedentes	5
	2.2 Marco teórico	13
	2.2.1 Sensores remotos.....	15
	2.2.2 LIDAR.....	19
	2.2.3 Tipos de LIDAR.....	20
	2.2.4 Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT).....	21
	2.2.5 Sistemas de información geográfica.....	24
	2.2.6 Estructuras.....	25
3.	Materiales y métodos.....	26
	3.1 Área de estudio	26
	3.2 Equipo.....	31
	3.2.1 Escáner Terrestre.....	31
	3.2.2 Estación total topográfica.....	32
	3.2.3 DJI Inspire 2, cámara Zenmuse X4.....	33
	3.3 Desarrollo metodológico	34
	3.3.1 Levantamiento en campo.....	35
	3.3.1.1 GLS (Ground Laser Scanner).....	35
	3.3.1.1.1. Alineación de nube de puntos.....	37
	3.3.1.2 Levantamiento fotogramétrico aéreo con VANT.....	40
	3.3.2. Condiciones atmosféricas en la ZMM mediante datos del SIMA	42
	3.3.3. Índice de accesibilidad.....	43
	3.3.4. Mapeo de vulnerabilidad.....	55
4.	Resultados y discusiones.....	59

4.1 Levantamiento en campo.....	59
4.1.1. Escaneos GLS.....	59
4.2. Inspección visual.....	60
4.3 Condiciones atmosféricas	65
4.4 Análisis de accesibilidad	73
4.5 Modelo de vulnerabilidad	76
5. Conclusiones y recomendaciones.....	79
6. Referencias.....	80
7. Anexos.....	92

Lista de figuras

Figura 1. Población viviendo en zonas urbanas históricamente (Fuente: Gu, 2019).....	7
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).....	16
Figura 3. Espectro electromagnético, longitud de onda en metros (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).	18
Figura 4. Ejemplo de una nube de puntos obtenida con LIDAR terrestre (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).	20
Figura 5. Funcionamiento del LIDAR aéreo (Baek, N., Shin, W. S., & Kim, K. J., 2017).....	21
Figura 6. Clasificación de VANTs dependiendo del tipo de aeronave (Barrientos, A, et. al., 2007).....	22
Figura 7. Ejemplos de VANTs de: a) ala rotativa, b) ala fija (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).	22
Figura 8. Bombardero aéreo de Perley (Vila Rovira, O. 2011).....	23
Figura 9. Participación modal en la ZMM. Fuente: Encuesta Ciudadana “Así Vamos 2017,2018”.....	30
Figura 10. Razones por las que no se utiliza el transporte público. Fuente: Encuesta Ciudadana “Así Vamos 2018”.....	30
Figura 11. Proceso metodológico en 4 etapas.....	34
Figura 12. Metodología de levantamiento con VANT y LIDAR.....	35
Figura 13. Toma de datos en campo utilizando escáner.....	37
Figura 14. Segmento de la nube de puntos de la estructura del metro sin alinear.	37
Figura 15. Sección de nube de puntos alineada y georreferenciada.	38
Figura 16. Arriba, sección de la nube de puntos alineada, con asignación de color real y eliminación ruido. Abajo, los elementos de una columna (Escobedo, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).	39
Figura 17. Inspección y verificación a través de Google Earth (arriba) sirvieron para validar los deterioros superficiales en nube de puntos (abajo).	40
Figura 18. A) Vuelo programado para el levantamiento fotográfico y, B) fotografías tomadas por el VANT.....	41

Figura 19. 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.....	42
Figura 20. Metodología de análisis de accesibilidad. Fuente: Saghapour (2015).	45
Figura 21. Capas de modalidades de transporte, paradas/estaciones y manzanas utilizadas en el análisis de accesibilidad.	47
Figura 22. Capas de espacios públicos y vialidades utilizadas para el análisis de accesibilidad.	48
Figura 23. A) Líneas de metro, Ecovía y rutas urbanas de la ZMM, B) Localización de paradas con Google Earth Street View y C) Digitalización de paradas en Monterrey, San Nicolás de los Garza y Apodaca.....	48
Figura 24. A) Errores (>10,000) observados a corregir en el municipio de San Nicolás de los Garza en la capa de vialidades y B) Ejemplo de errores corregido, vialidades seccionadas por calle y ejemplo de obtención de ruta más cercana entre espacio público-parada/estación.	49
Figura 25. Obtención de distancias caminadas para EP hacia las estaciones de metro.....	50
Figura 26. Áreas de influencia de las paradas/estaciones de los 3 modos de transporte en el municipio de San Nicolás de los Garza para.	53
Figura 27. Ejemplo cálculo de densidad poblacional para áreas de influencia de Autobuses y AGEBs.	54
Figura 28. Diagrama metodológico final para el mapeo de la vulnerabilidad basado en 3 escenarios que dependen de la condición de la infraestructura...56	56
Figura 29. Ejemplo de áreas de influencia con valores de vulnerabilidad visibles en formato vectorial de columnas F-C1 y E-C29.	56
Figura 30. Áreas de influencia de columnas escaneadas con valores de vulnerabilidad en formato ráster.....	57
Figura 31. Concentración considerada como valor de vulnerabilidad en formato ráster del año 2018.	57
Figura 32. IATP con valores de vulnerabilidad (1-3, Excelente, Muy Bueno y Bueno) en formato ráster.	58
Figura 33. Nube de puntos limpia en formato RGB de la sección comprendida entre las estaciones Niños Héroe y Universidad.....	60
Figura 34. Ubicación de las columnas seleccionadas para su inspección mediante Google Earth.	62

Figura 35. Columna F-C1 (CI-1) con presencia de agrietamientos y hollín visibles a través de Street View de Google Earth y escaneos.....	63
Figura 36. Columna G-C3 con presencia de agrietamientos y hollín visibles a través de Street View de Google Earth y escaneos.....	64
Figura 37. Concentración de PM10 en el año 2017 (mediana). Datos de estaciones de monitoreo SIMA.	71
Figura 38. Concentración de PM10 en el año 2018 (máxima). Datos de estaciones de monitoreo SIMA.	71
Figura 39. Distribución del IATP en el municipio de San Nicolás de los Garza.	74
Figura 40. Proceso de obtención de modelo de vulnerabilidad del sistema de movilidad.....	77
Figura 41. Mapa de vulnerabilidad en el municipio de San Nicolás de los Garza del sistema de movilidad.....	77
Figura 42. Espacios públicos presentes en AGEB 10945.....	96
Figura 43. Cálculo de densidad poblacional considerando áreas de influencia, manzanas y población presente en AGEB 10945.....	97

Lista de mapas

- 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).....27
- Mapa 2.** Levantamiento línea 2 del metro, C. Francisco G. Bocanegra a Av. Nogalar. Fuente: Elaboración propia.36
- Mapa 3.** Ubicación estaciones de monitoreo SIMA. Fuente: Elaboración propia.43

Lista de tablas

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).	8
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	11
Tabla 3. Longitudes de onda del rango óptico del espectro electromagnético (Viera, González, 2014).	18
Tabla 4. Aplicaciones civiles de los VANTs (Barrientos, A., et.al. 2007).	23
Tabla 5. Municipios de la ZMM. Fuente: “Programa de Desarrollo Urbano de la Zona Metropolitana de Monterrey 2040” en el capítulo de cartografía.	27
Tabla 6. Configuración del escáner GLS-1500 en modo normal (Fuente: (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).	31
Tabla 7. Características de la ETT Leica TS02 (Fuente: (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).	32
Tabla 8. Características del drone DJI Inspire 2 y cámara Zenmuse X5 (Fuente: (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).	33
Tabla 9. Rangos y categorías del IATP.	44
Tabla 10. Datos requeridos y fuente de la información.	44
Tabla 11. Estadísticas en relación con la ZMM donde: PTA (min) es el Promedio de Tiempo a la estación de autobuses más cercana; PTE (min) Promedio de Tiempo a la estación de ecovía más cercana y PTM (min) Promedio de Tiempo a la estación del metro más cercana:	47
Tabla 12. Valores de vulnerabilidad para ráster de deterioros en columnas escaneadas.	55
Tabla 13. Valores de vulnerabilidad para ráster de IATP.	58
Tabla 14. Densidad de puntos por escaneo (Escobedo, A. N., Yépez Rincón, F. D., 2019).	59
Tabla 15. Agrietamientos y hollín localizados por columna a través de inspección visual. A= Trabe, B= Capitel, C= Columna, 1= Agrietamiento y 2= Hollín.	60
Tabla 16. Índice de aire y salud para PM 10 y PM 2.5 (NOM-172-SEMARNAT-2019).	66
Tabla 17. Capas utilizadas en la obtención del IATP.	73
Tabla 18. Porcentajes de áreas de influencia (AI) y población municipal con cobertura y acceso de los diferentes modos de transporte público.	75

Tabla 19. Cobertura por clasificación de vulnerabilidad en el municipio de San Nicolás de los Garza.....	78
Tabla 20. Frecuencia de servicio establecida por hora para cada modo de transporte.....	93
Tabla 21. Tiempo de recorrido de la ruta más cercana entre Espacio Público-Parada/Estación mediante SIG y cálculo de Average Waiting Time (AWT), Total Access Time (TAT) y Equivalent Frequency (EF) para autobuses urbanos.	94
Tabla 22. Tiempo de recorrido de la ruta más cercana entre Espacio Público-Parada/Estación mediante SIG y cálculo de Average Waiting Time (AWT), Total Access Time (TAT) y Equivalent Frequency (EF) para metro.....	94
Tabla 23. Tiempo de recorrido de la ruta más cercana entre Espacio Público-Parada/Estación mediante SIG y cálculo de Average Waiting Time (AWT), Total Access Time (TAT) y Equivalent Frequency (EF) para ecovía.	95
Tabla 24. Cálculo de WEF para los EP presentes en AGEB 10945.....	95
Tabla 25. Promedio de WEF presentes en AGEB 10945.....	96
Tabla 26. Obtención de densidad poblacional mediante áreas de influencia de para metro.	98
Tabla 27. Obtención de densidad poblacional mediante áreas de influencia de para metro.	100
Tabla 28. Valores obtenidos para IATP mediante ecuación 5.....	101

Lista de gráficas

Gráfica 1. Concentraciones anuales PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2015.....	66
Gráfica 2. Concentraciones anuales PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2015.....	67
Gráfica 3. Concentraciones anuales PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2016.....	67
Gráfica 4. Concentraciones anuales PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2016.....	68
Gráfica 5. Concentraciones anuales PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2017.....	68
Gráfica 6. Concentraciones anuales PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2017.....	69
Gráfica 7. Concentraciones anuales PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2018.....	69
Gráfica 8. Concentraciones anuales PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2018.....	70

Nomenclatura

AGEB	Área Geoestadística Básica
AU	Autobuses Urbanos
BRT	Bus Rapid Transit (BRT)
CETV	Consejo Estatal de Transporte y Vialidad
ETT	Estación Total
IATP	Índice de Accesibilidad al Transporte Público
GLS	Ground Laser Scanner
LIDAR	Detección de luz y Rango (<i>Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging</i>)
OSM	Open Street Map
SIG	Sistema de información geográfica
VANT/drone	Vehículo aéreo no tripulado
ZMM	Zona Metropolitana de Monterrey

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 sostenible.

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 (Bruegmann, R., 2015; Watson, V.; 2009, Rubiera Morollón et. al, 2016 y Gavrilidis, A. A. et al., 2019). 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, 2019), ya que 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 Burguess, 2019), por lo tanto, 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; Sandström 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). 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, basando su eficiencia 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; Mishra et al., 2012). En los últimos años la planeación urbana ha tomado un contexto de cualidad ambiental para considerar diferentes áreas que mejoren la calidad de vida. (Galicia, S. P., 2009). El crecimiento urbano descontrolado es evidencia de la falta de planeación adecuada a las necesidades particulares de cada ciudad, donde uno de gran importancia a considerar es el sistema de transporte, ya que los desplazamientos son parte de la vida cotidiana y productiva de las mismas. Es por esto que la movilidad urbana debe de ser capaz de conectar y brindar accesibilidad a los ciudadanos a través de 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, promoviendo un sistema activo y sostenible (Santos y De las Rivas Sanz, 2008; Ceder et al., 2009; Saghapour, T., Moridpour, S., & Thompson, R. G. 2016). Es de aquí donde se encuentra el término “*movilidad urbana sostenible*”, 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), procurando disminuir el impacto en la calidad del ambiente urbano (Chen, P., 2019), generando soluciones a través de un funcionamiento adecuado.

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 y del sistema de transporte urbano. 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). La infraestructura que compone el sistema de transporte público es variable, cada una tiene sus instalaciones, necesidades y servicios particulares, por lo que su operación, servicio, mantenimiento, entre otros, será diferente dependiendo de la modalidad de transporte. 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 relacionados a la movilidad urbana, cada uno aporta información específica representada en un modelo de vulnerabilidad final. En el primer modelo se obtiene información a través de sensores remotos de las condiciones físicas 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, mediante el cual podremos visualizar de manera conjunta las condiciones del área en estudio, conocer la situación y vulnerabilidad con base a la información de estos tres modelos, sirviendo como herramienta para la planeación urbana y toma de decisiones, planteando soluciones sostenibles. 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, 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).

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, conflictos sociales, entre otros. Conocer las condiciones de la infraestructura y sus servicios, en conjunto con los datos ambientales, puede generar interacciones importantes que permitan encontrar soluciones a las problemáticas actuales, reforzar los medios de transporte público y mejorar la movilidad urbana sostenible de la ciudad.

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

- Mapear y calcular un índice de accesibilidad del transporte público considerando la infraestructura y servicio del metro, autobuses urbanos y ecovía para la población del municipio de San Nicolás de los Garza a nivel AGEB a través de sistemas de información geográfica.
- Inspeccionar, mapear y evaluar la infraestructura en la sección de la línea 2 del metro correspondiente al municipio de San Nicolás de los Garza para determinar los riesgos potenciales a las condiciones de servicio mediante métodos no destructivos, ágiles y económicos como Google Earth, y sensores remotos (VANT y LIDAR).
- Mapear las emisiones de contaminantes (PM 10 y PM 2.5) en el área de estudio durante el periodo 2015-2018 con del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), para conocer el grado de exposición de la estructura y la población a la contaminación del aire.
- Integrar el modelo interactivo a través de un SIG para mapear la vulnerabilidad del sistema de movilidad urbana en el municipio de San Nicolás de los Garza 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 para detectar y prevenir problemáticas en la infraestructura de los sistemas de transporte urbano y sus servicios, 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; Lamela et al., 2011) 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 de este. 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 (Jordán Fuchs, R. et al., 2017).

Los problemas urbanos no son actuales, Sánchez 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).

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.

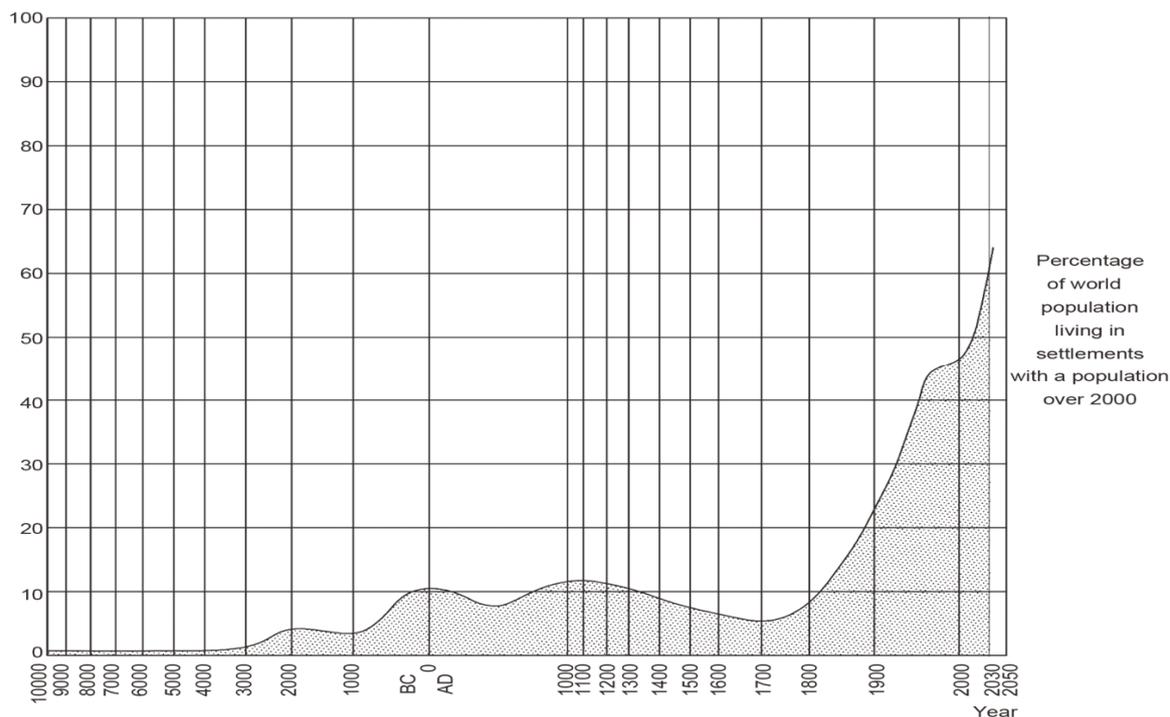


Figura 1. Población viviendo en zonas urbanas históricamente (Fuente: Gu, 2019).

El crecimiento descontrolado de las ciudades dispersa a las nuevas construcciones cuando no se considera una planeación urbana adecuada (Hamidi & Ewing, 2014; Nazarnia et al., 2016). 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, 2010). 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 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 PM_{2.5}, 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	NO _x	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 una planeación adecuada, por lo que la obtención de datos a través de tecnologías como sensores remotos, integración y manejo a través de SIG, permite generar información de interés, ya sea de la estructura, de servicio, de sus usuarios o de su entorno, siendo útiles para la toma de decisiones en los procesos de 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 Seminario-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).

Las tecnologías de sensores remotos en conjunto con los SIG se han desarrollado en diferentes áreas con intereses específicos, mientras que los expertos en sensores remotos se interesan más por el procesamiento de imágenes o datos y formar patrones de reconocimiento a ciertos problemas, 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 sensores remotos utilizan principalmente celdas o píxeles.

2.2 Marco teórico

Los planes de movilidad urbana sostenible buscan ofrecer una mejor calidad en los servicios, y para lograrlo es necesario utilizar recursos e información de manera más eficiente y en conjunto (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, ya sea a información física como a sus condiciones de servicio (frecuencias, tráfico, nivel de servicio, etc.), particularmente entre niveles administrativos (E. Arco, 2019), buscando al mismo tiempo reforzar con una planificación urbana eficiente, promoviendo ciudades compactas y evitando una expansión descontrolada e insostenible, ya que con esto los tiempos de traslado y emisión de contaminantes aumentan (Jordán Fuchs, R., 2017).

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). Es por esto que la urbanización sostenible es importante para afrontar estas problemáticas, ya que las ciudades son las

responsables del 60% al 80% del consumo energético mundial y del 70% de las emisiones mundiales de CO² (ONU-Hábitat, 2016).

La ZMM se concentra el 95% de la población del estado de Nuevo León, así como vivienda, industria, comercio y vehículos automotores, 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) (ProAire, 2016).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), 80% de la población mundial vive en lugares donde la contaminación atmosférica excede lo recomendado por ellos, aumentando el riesgo a padecer enfermedades cardiovasculares y pulmonares (OMS, 2016). 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. 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 François 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).

Una de las técnicas empleadas en esta investigación es la percepción remota o teledetección, la cual 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).

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 ejemplos 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).

La resolución es un factor muy importante al momento de obtener información mediante sensores remotos, 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 (Cardozo, O. D., & Da Silva, C. J. (2013):

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.

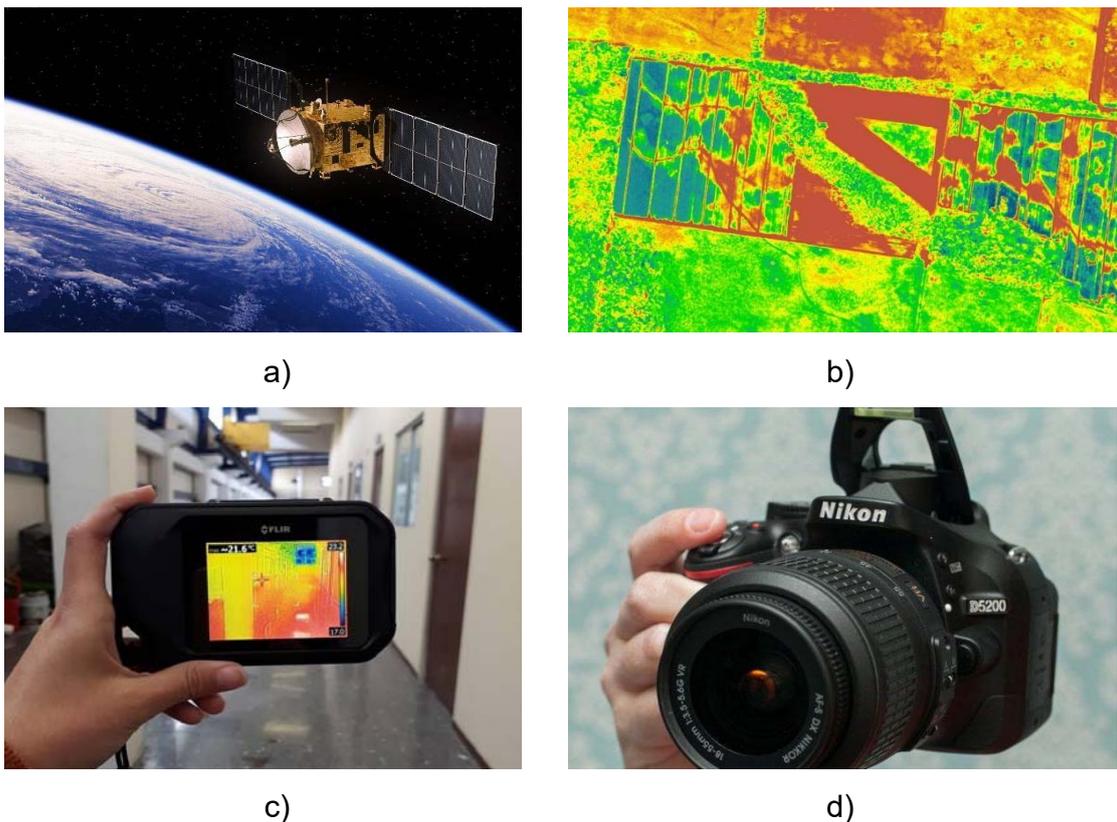


Figura 2. Diferentes subsistemas de sensores remotos. a) Satélite Landsat 7, b) imagen obtenida de un sensor multiespectral, c) cámara térmica, d) cámara fotográfica (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

Por otro lado, nos referimos a resolución espectral al número y anchura de las bandas espectrales que un sensor remoto puede identificar, 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 (IR) y las microondas son algunos rangos que forman parte del espectro electromagnético (Tabla 3).

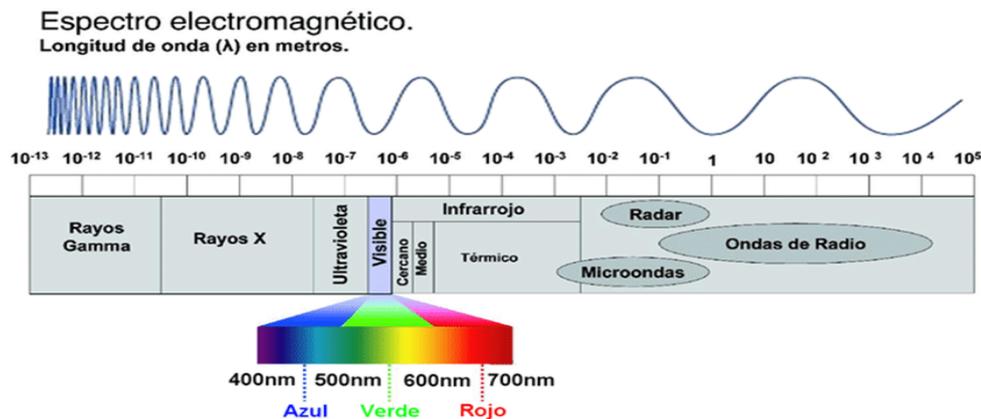


Figura 3. Espectro electromagnético, longitud de onda en metros (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

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 μ m - 1.1 μ m
IR de onda corta	1.1 μ m - 2.5 μ m
IR de onda media	2.5 μ m - 7 μ m
IR de onda larga	7 μ m - 15 μ m

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 de su posición (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 las bandas RGB (Red, Green and Blue, por sus siglas en inglés).

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).

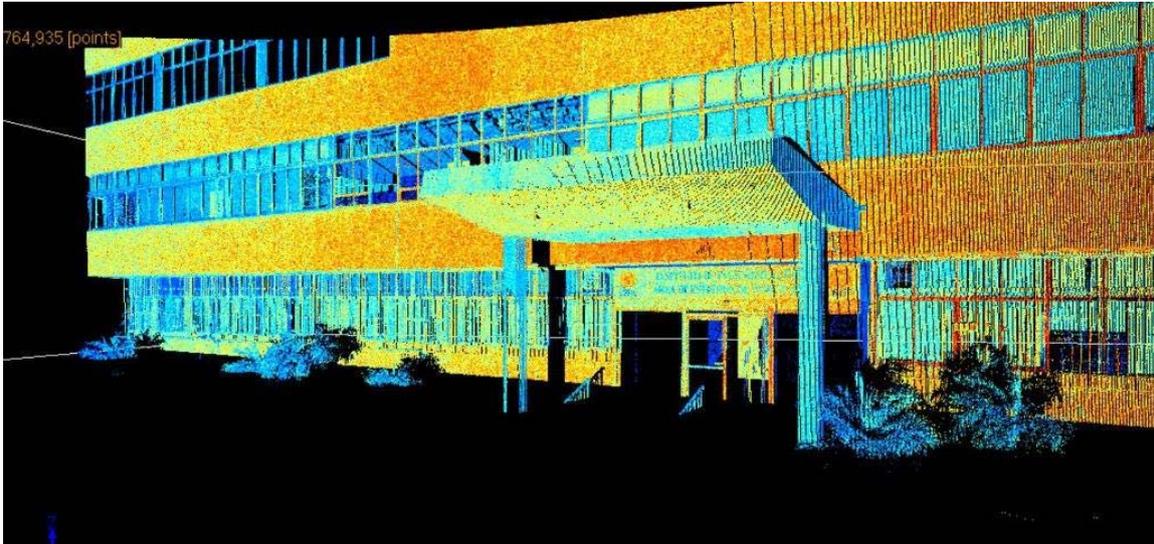


Figura 4. Ejemplo de una nube de puntos obtenida con LIDAR terrestre (Escobedo Tamez, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

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.

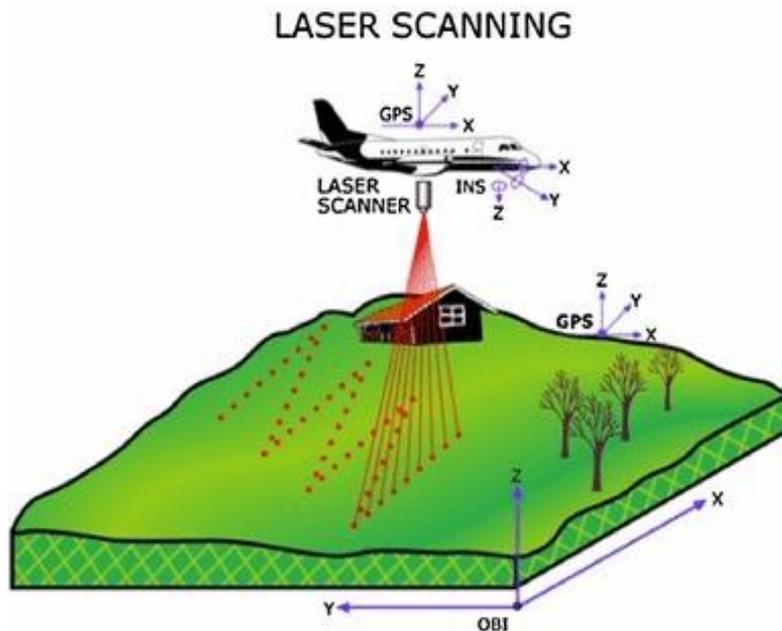


Figura 5. Funcionamiento del LIDAR aéreo (Baek, N., Shin, W. S., & Kim, K. J., 2017).

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 geoméricamente 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).

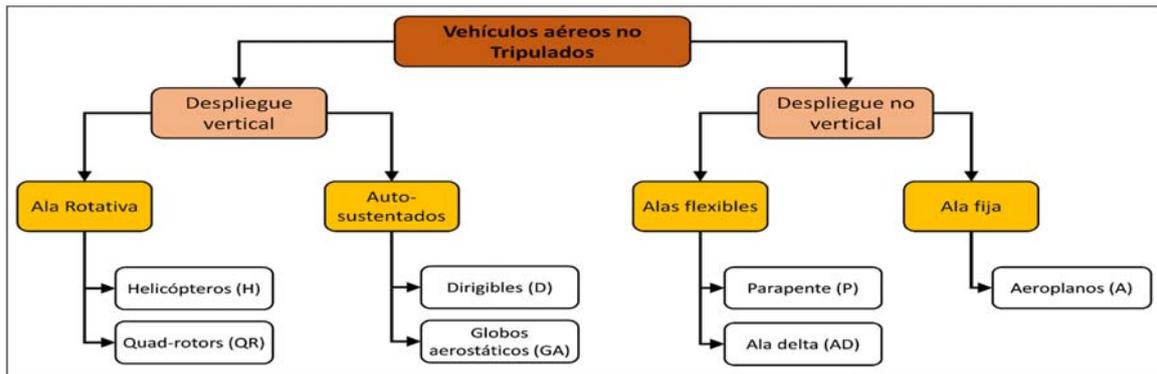


Figura 6. Clasificación de VANTs dependiendo del tipo de aeronave (Barrientos, A, et. al., 2007).



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 1898 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).

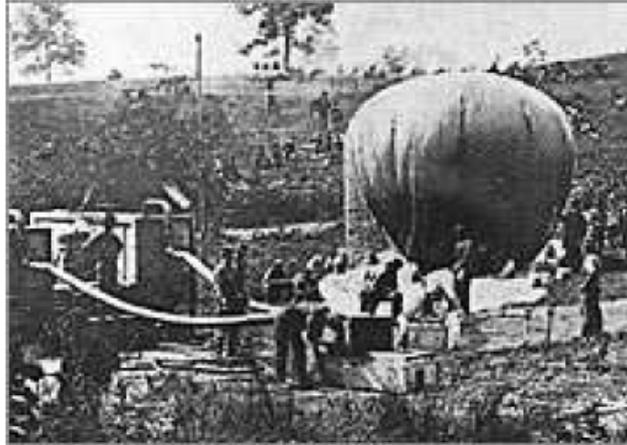


Figura 8. Bombardero aéreo de Perley (Vila Rovira, O. 2011).

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 4).

El principal aspecto por 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 hiperspectrales 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
Localización de recursos naturales	Pesca, minería
Transporte	Entrega de paquetería
Búsqueda y rescate	Nafragios, 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 primer 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 (Pérez-Gavilán, J. J., Aguirre, J., & Ramírez, L., 2018). 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.

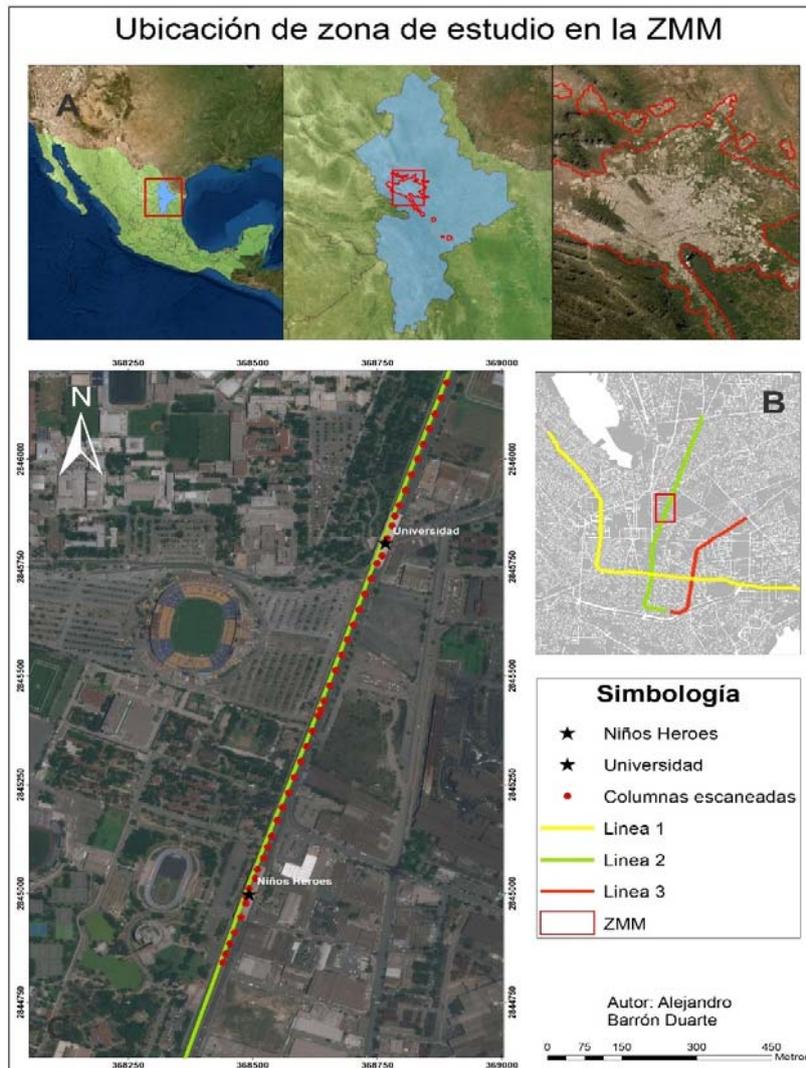
La combinación de concreto simple con refuerzo constituye lo que se llama concreto armado o reforzado. (Gutiérrez de López, L. 2003).

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 Km² (Tabla 5).

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).



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).

Tabla 5. 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 Cortines, 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 Transporte y Vialidad (CETyV), en el 2012 el 45.70% de la población utilizaba el automóvil como principal medio de transporte, mientras que la encuesta "Así Vamos 2018" indica que 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 (figura 9), razones por las cuales no se utiliza el transporte público (figura 10), como lo son 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 3, 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.

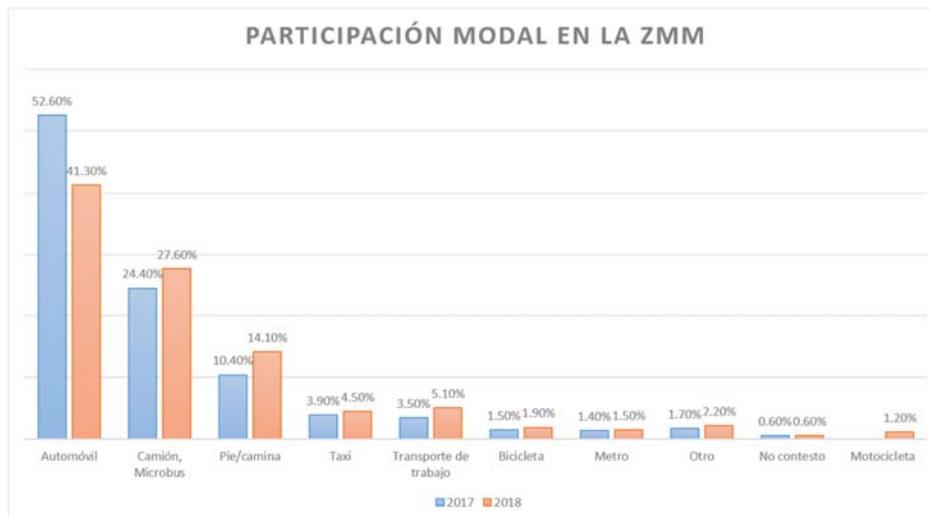


Figura 9. Participación modal en la ZMM. Fuente: Encuesta Ciudadana “Así Vamos 2017,2018”.

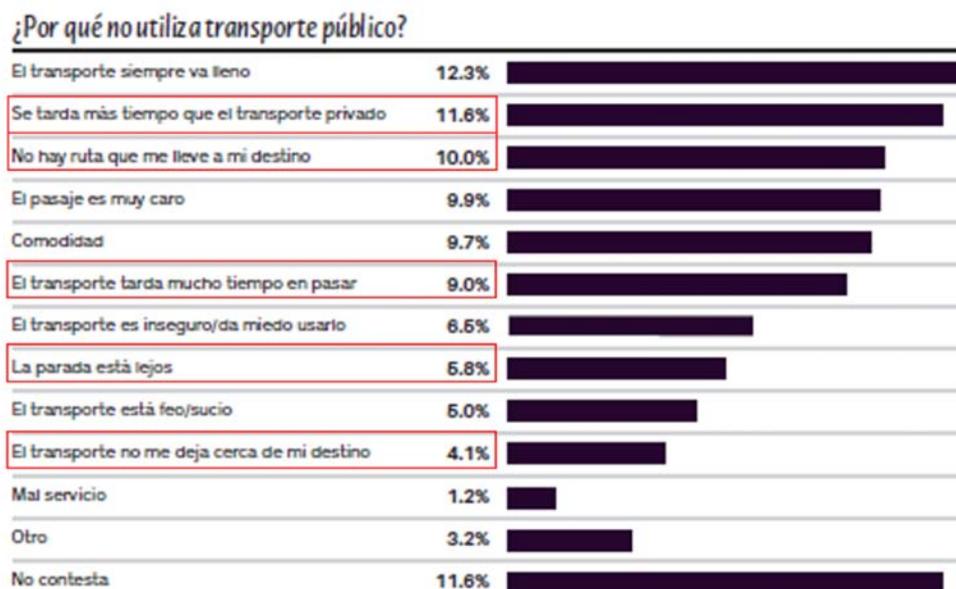


Figura 10. Razones por las que no se utiliza el transporte público. Fuente: Encuesta Ciudadana “Así Vamos 2018”.

Debido a la inversión de tiempo y recursos computacionales que implica el manejar un área con esta extensión, y considerando el 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, considerando que la metodología podrá ser aplicada posteriormente a diferentes municipios o a la ZMM en su totalidad.

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 6. 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 megapíxeles 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 6. 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 7.

Tabla 7. 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 X4

Se utilizó un dron DJI Inspire 2, integrado con una cámara Zenmuse X4 para la toma de fotografías aéreas de la estructura. El dron 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 8. Características del dron DJI Inspire 2 y cámara Zenmuse X4 (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.

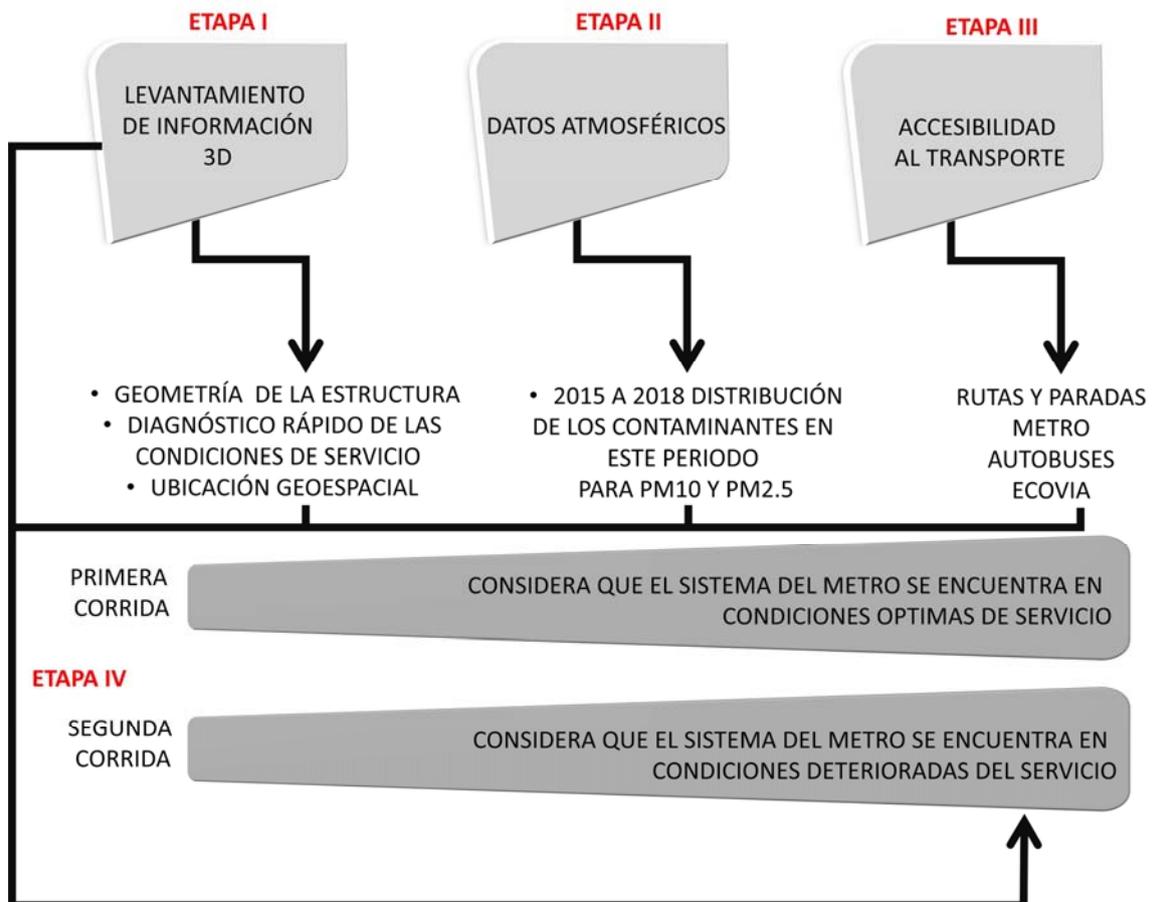


Figura 11. Proceso metodológico en 4 etapas

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.

3.3.1 Levantamiento en campo

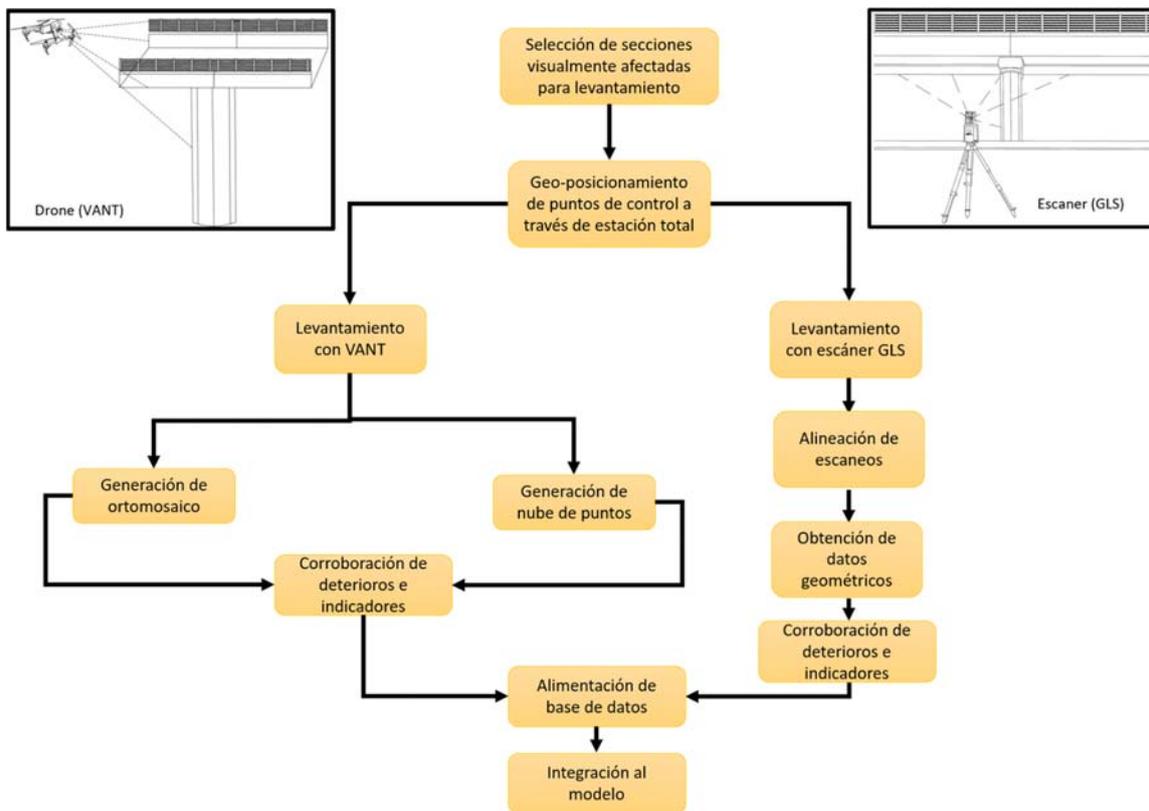


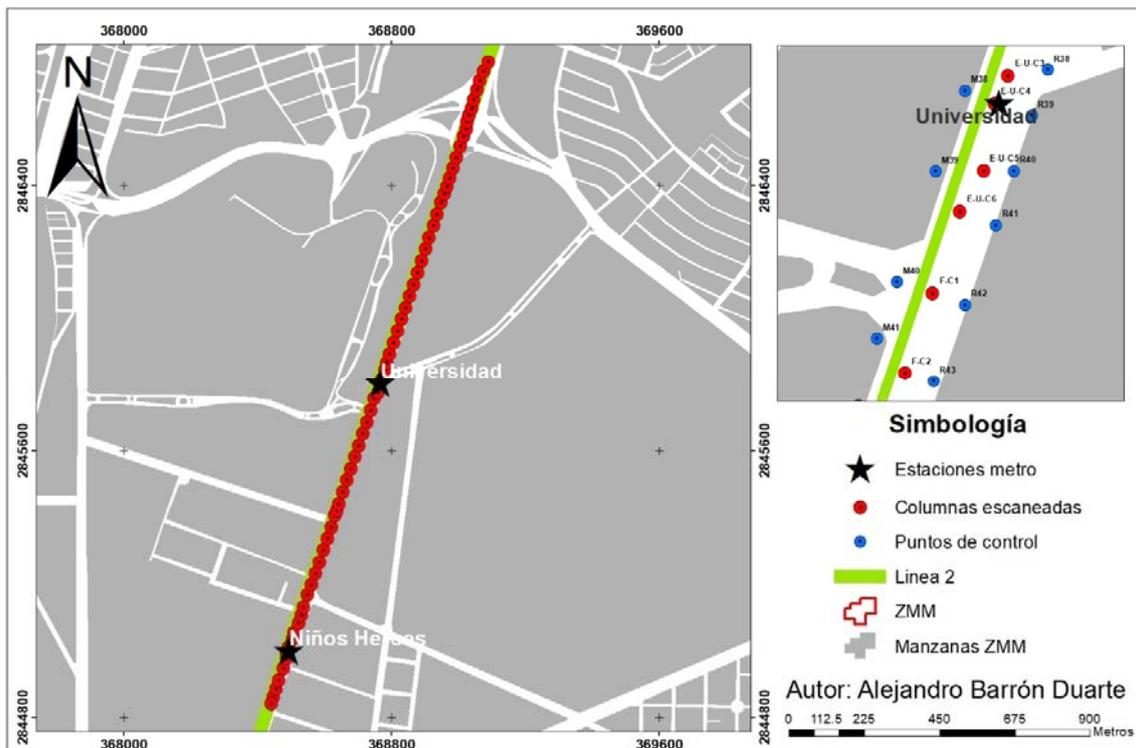
Figura 12. Metodología de levantamiento con VANT y LIDAR.

3.3.1.1 GLS (Ground Laser Scanner).

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 km (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 señalaron 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 m 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.

3.3.1.1.1. 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).

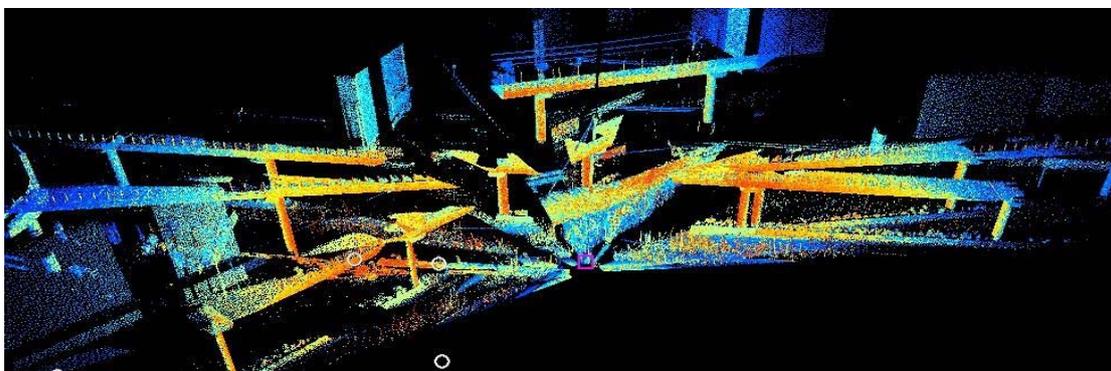


Figura 14. Segmento de la nube de puntos de la estructura del metro sin alinear.

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).

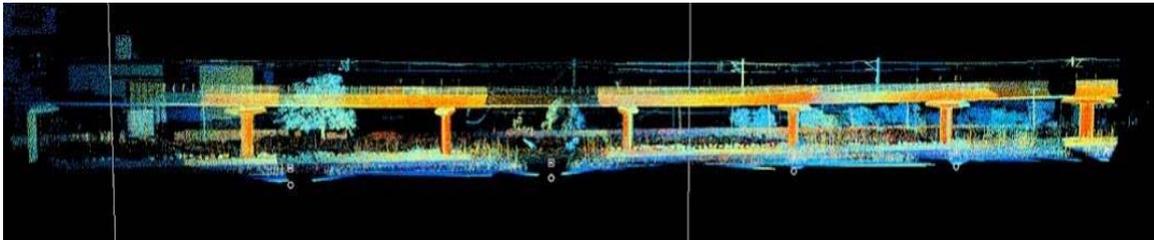


Figura 15. Sección de nube de puntos alineada y georreferenciada.

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. 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).

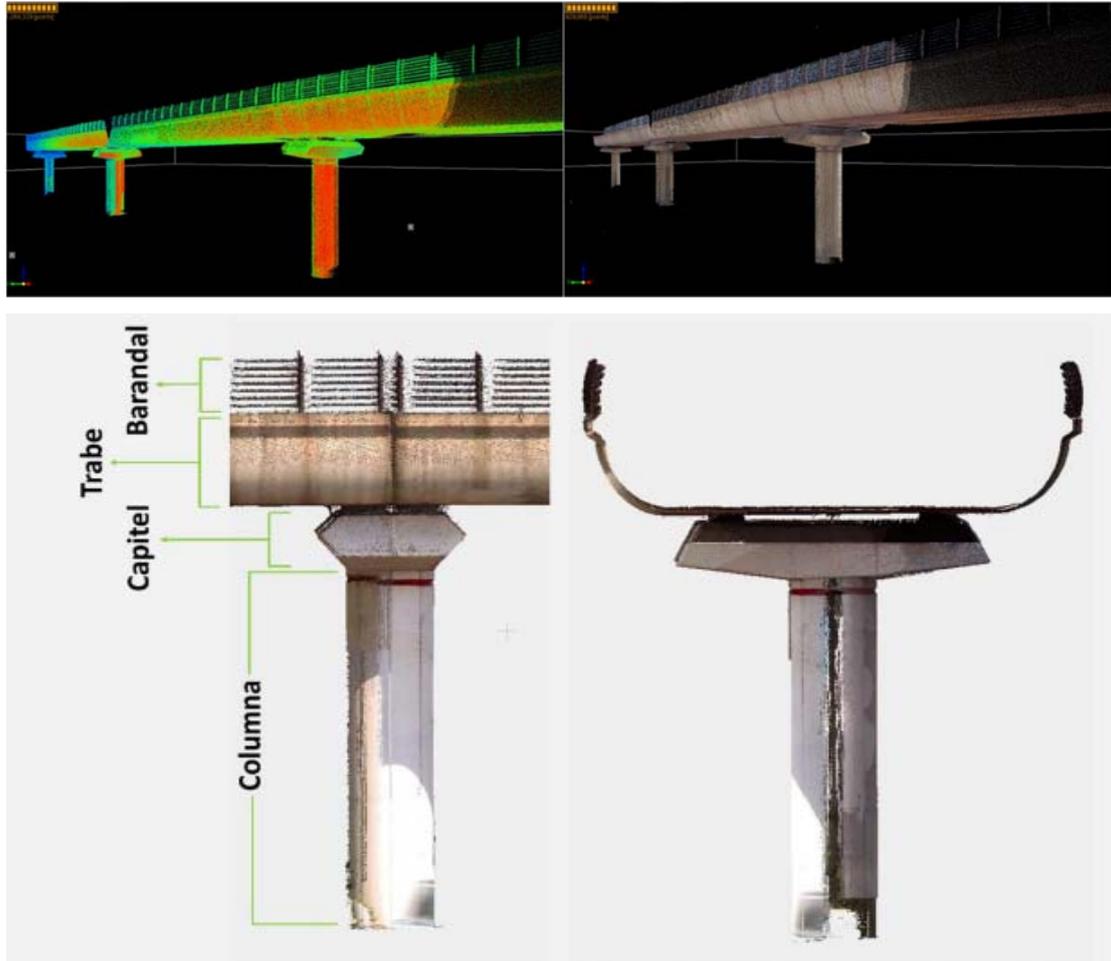


Figura 16. Arriba, sección de la nube de puntos alineada, con asignación de color real y eliminación ruido. Abajo, los elementos de una columna (Escobedo, A. N. & Yépez Rincón, F. D., 2019).

La inspección y validación con Google Earth (Figura 17) 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.

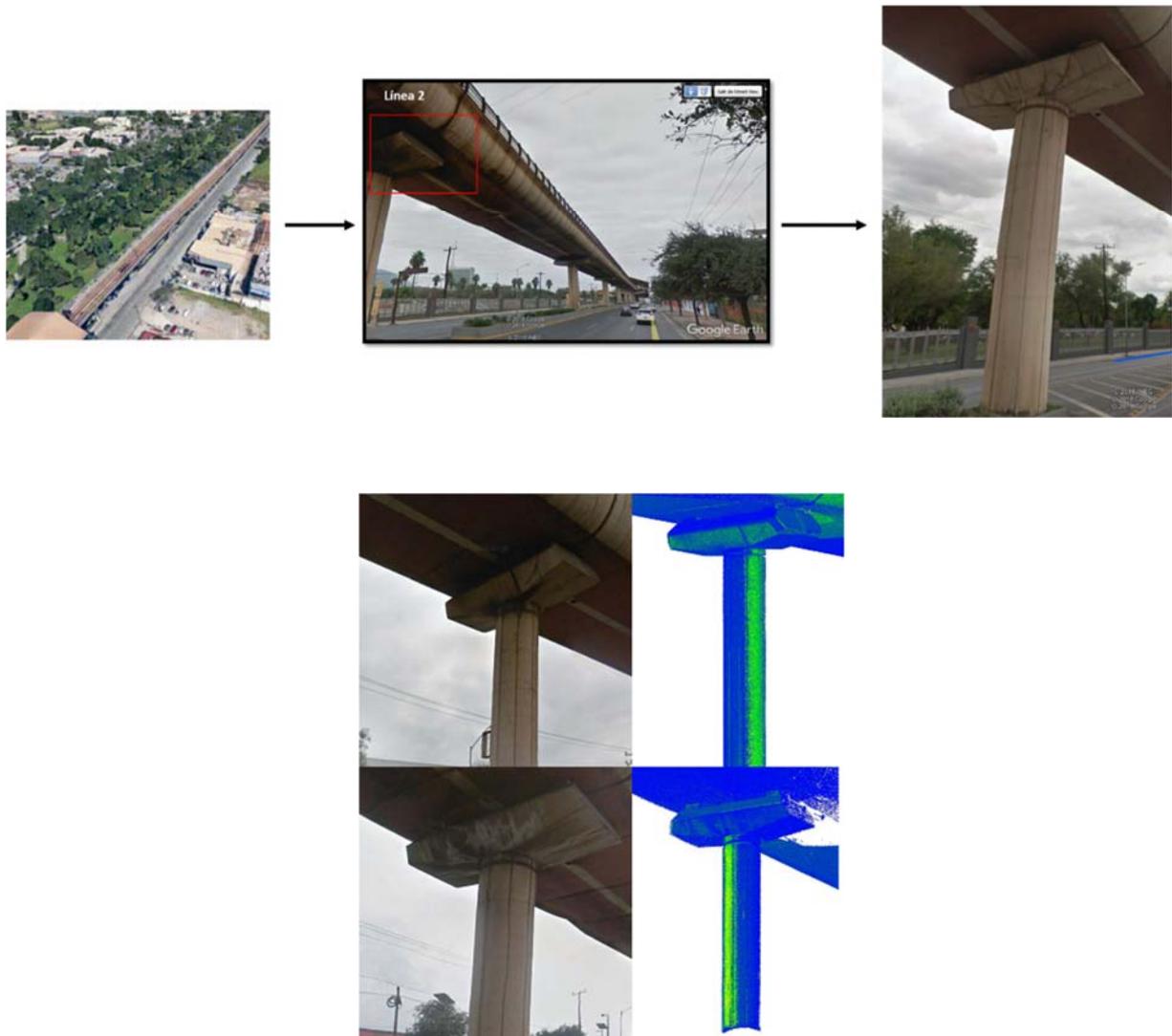
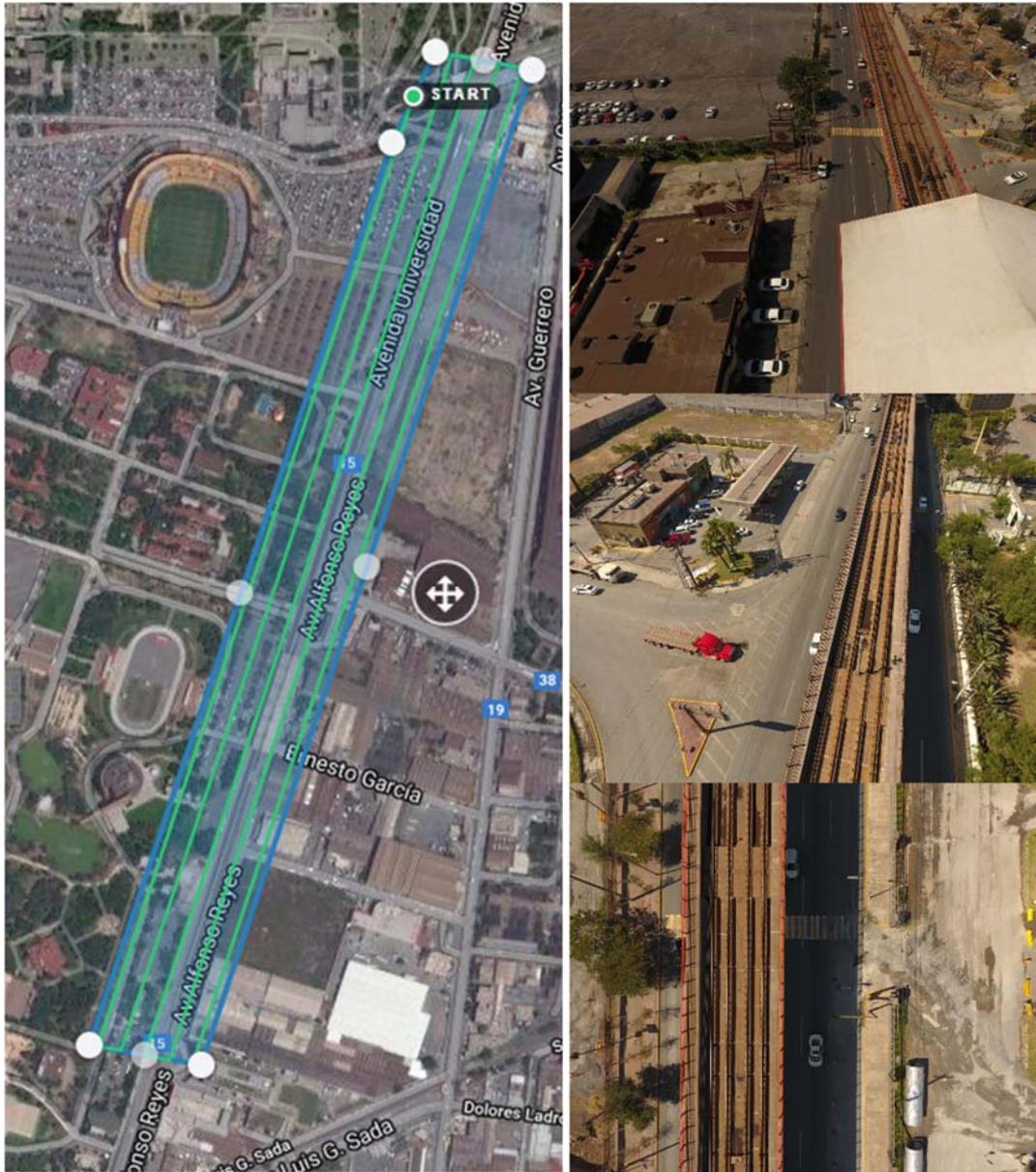


Figura 17. Inspección y verificación a través de Google Earth (arriba) sirvieron para validar los deterioros superficiales en nube de puntos (abajo).

3.3.1.2 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 18).



A)

B)

Figura 18. A) Vuelo programado para el levantamiento fotográfico y, B) fotografías tomadas por el VANT.

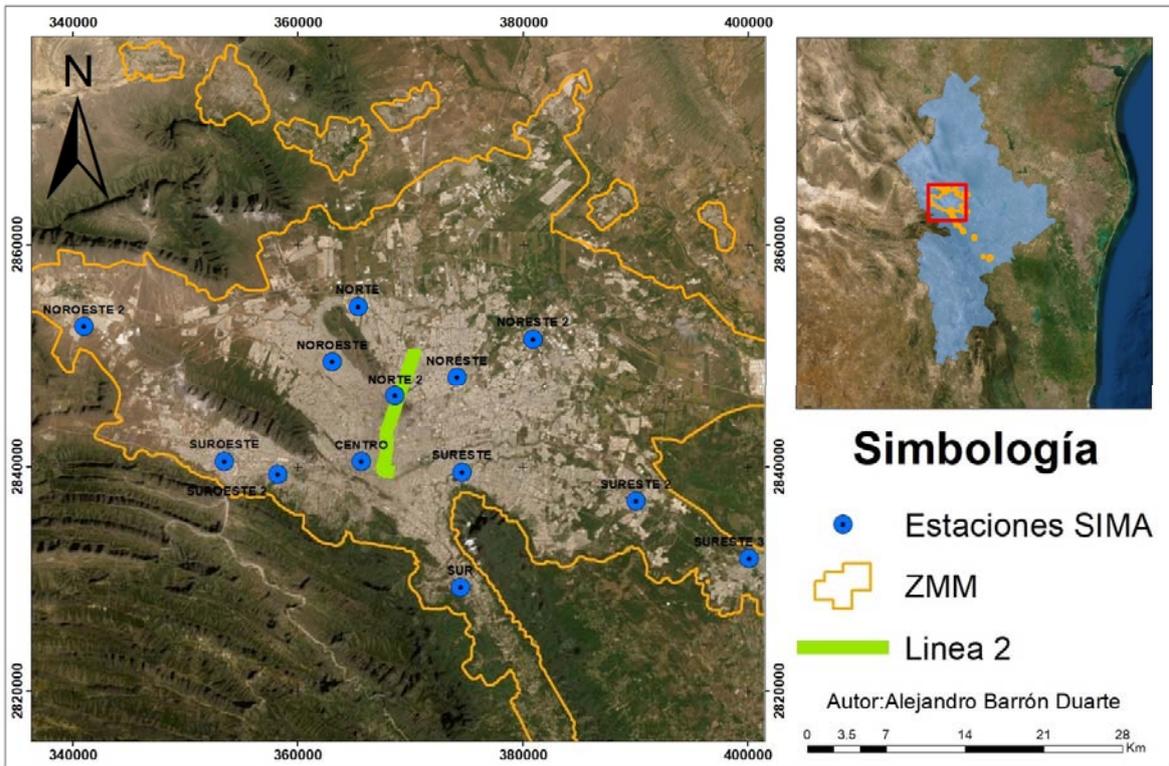
Con esta información se lograron visualizar los capiteles, sitios laterales y tráfico vehicular, barandales y situación de cableado y la acumulación de humedad de los rieles, entre otras características de la estructura y su entorno que pudieran comprometer las condiciones de servicio como se citan en la Figura 19.



Figura 19. 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) traveses 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 (PM_{2.5}). De los componentes registrados se realizó un análisis de tres, ozono, PM₁₀ y PM_{2.5}, 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 de accesibilidad al transporte público (IATP) para medir los niveles de accesibilidad al transporte público (Tabla 9) 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 9. Rangos y categorías del IATP.

Rangos	IATP Categorías
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 capas 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 alimentó 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 10 y Figura 20).

Tabla 10. 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

		(CETVYV)
Estaciones del metro	kmz	Infraestructura
Estaciones de la ecovía	shapefile	Elaboración propia por digitalización
Paradas de autobuses	kmz	Elaboración propia por digitalización

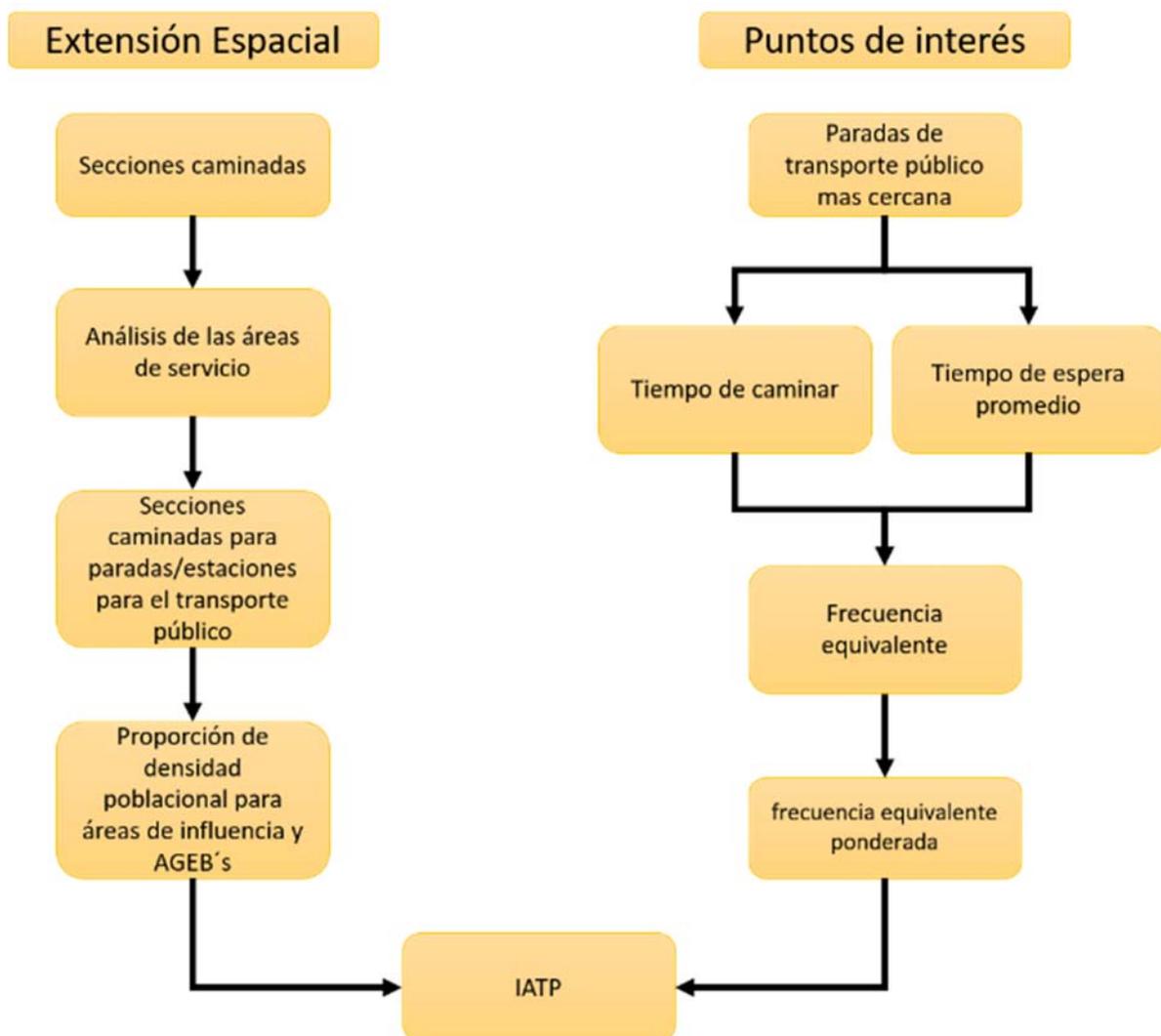


Figura 20. Metodología de análisis de accesibilidad. Fuente: Saghapour (2015).

El Índice de Accesibilidad al Transporte Público (IATP) requiere de datos iniciales para su obtención, basado en los siguientes cuatro puntos:

1. Se consideran tres modos de transporte público, metro, ecovía y autobuses, así como las rutas y estaciones/paradas de cada uno de ellos. Algunas capas de información fueron proporcionadas por el CETyV, mientras que otras fueron generadas en el Departamento de Geomática, del Instituto de Ingeniería Civil, de la Universidad Autónoma de Nuevo León. La figura 21 y 22 muestra la distribución del transporte público en el municipio de San Nicolás de los Garza, sus estaciones/paradas, así como las vialidades obtenidas a través de INEGI.
2. Los datos de frecuencia de servicio de cada modo de transporte, es decir, en un tiempo determinado el número de servicios que presta cada modo de transporte, los cuales para autobuses fueron proporcionados por el CETYV, mientras que para metro y ecovía 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.

La información anteriormente mencionada son las capas y datos que se requieren en el SIG de manera inicial para la obtención del IATP, posterior a esto se realizan una serie de operaciones que consideran los datos obtenidos en este primer proceso, las cuales se mencionan posteriormente. La tabla 11 nos muestra el número de AGEB, espacios públicos, estaciones/paradas de los modos de transporte y las rutas de camiones presentes en el municipio de San Nicolás de los Garza (figura 23) y el porcentaje que representa de toda la ZMM, así como los promedios de todas las AGEBs en minutos del tiempo que se toma en llegar a las estaciones/paradas.

Tabla 11. Estadísticas en relación con la ZMM donde: PTA (min) es el Promedio de Tiempo a la estación de autobuses más cercana; PTE (min) Promedio de Tiempo a la estación de ecovía más cercana y PTM (min) Promedio de Tiempo a la estación del metro más cercana:

Categoría	Número	Por ciento	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%	-	-	-

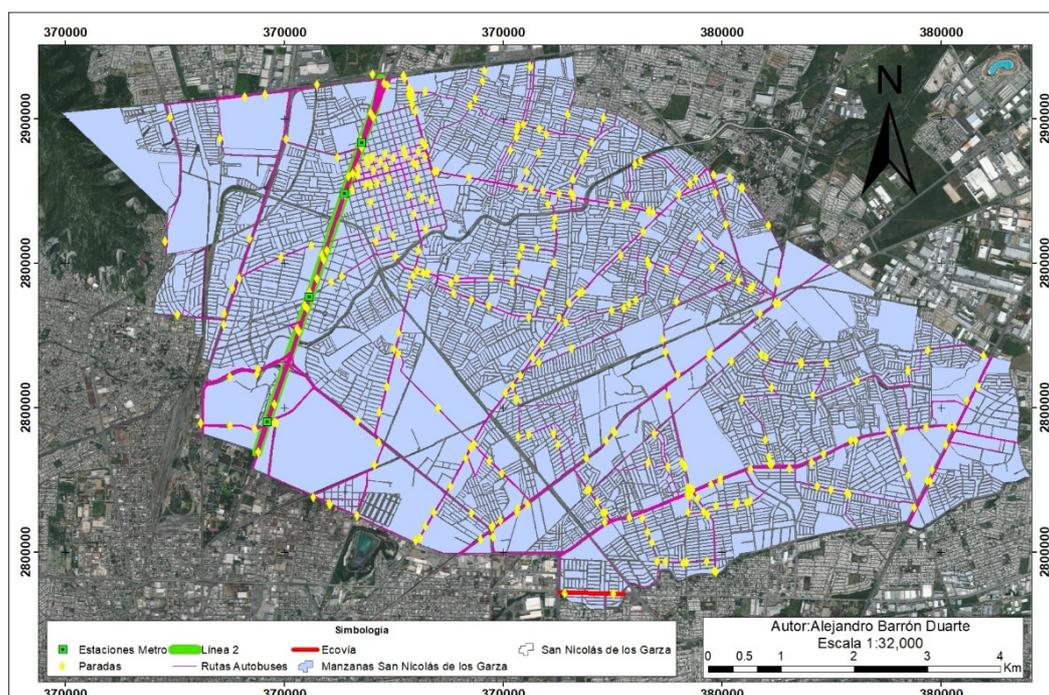


Figura 21. Capas de modalidades de transporte, paradas/estaciones y manzanas utilizadas en el análisis de accesibilidad.

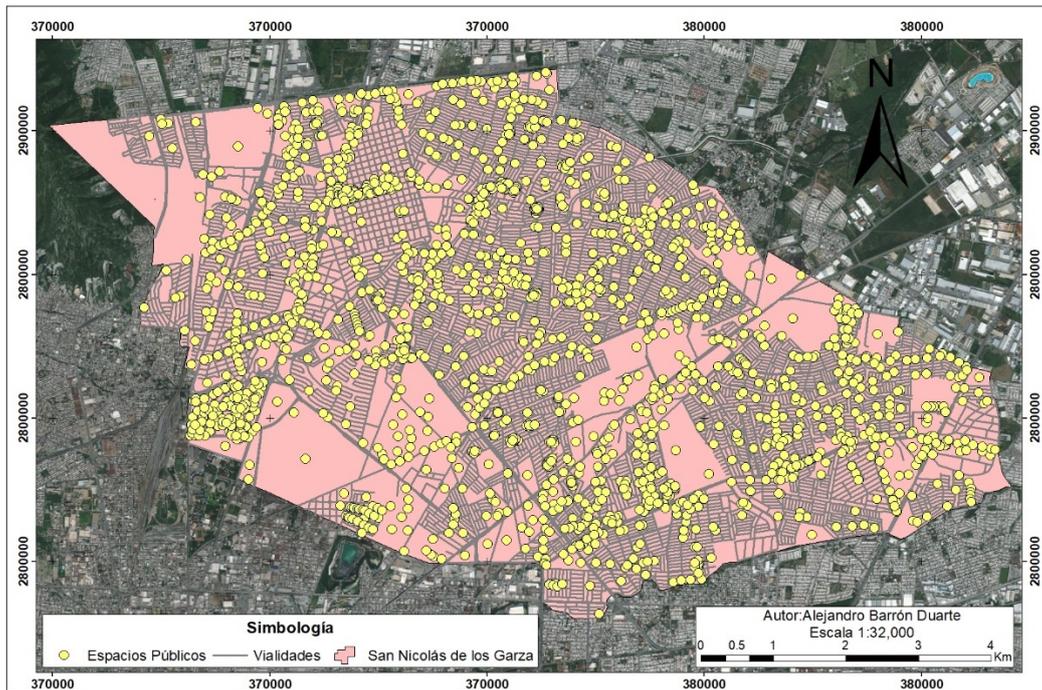


Figura 22. Capas de espacios públicos y vialidades utilizadas para el análisis de accesibilidad.

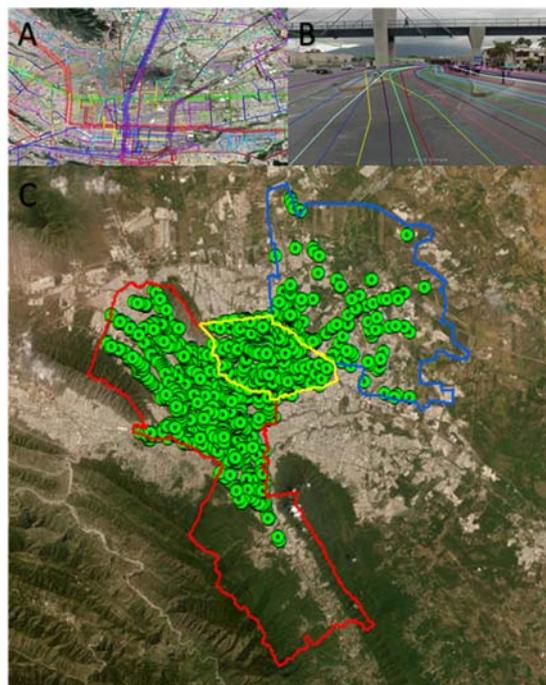


Figura 23. A) Líneas de metro, Ecovía y rutas urbanas de la ZMM, B) Localización de paradas con Google Earth Street View y C) Digitalización de paradas en Monterrey, San Nicolás de los Garza y Apodaca.

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 a la capa de vialidades utilizando la herramienta de análisis de redes del SIG. 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.

La figura 24 las correcciones que se deben realizar en la capa de vialidades del municipio de San Nicolás de los Garza, así como un ejemplo en una zona ya que estas correcciones fueron realizadas.

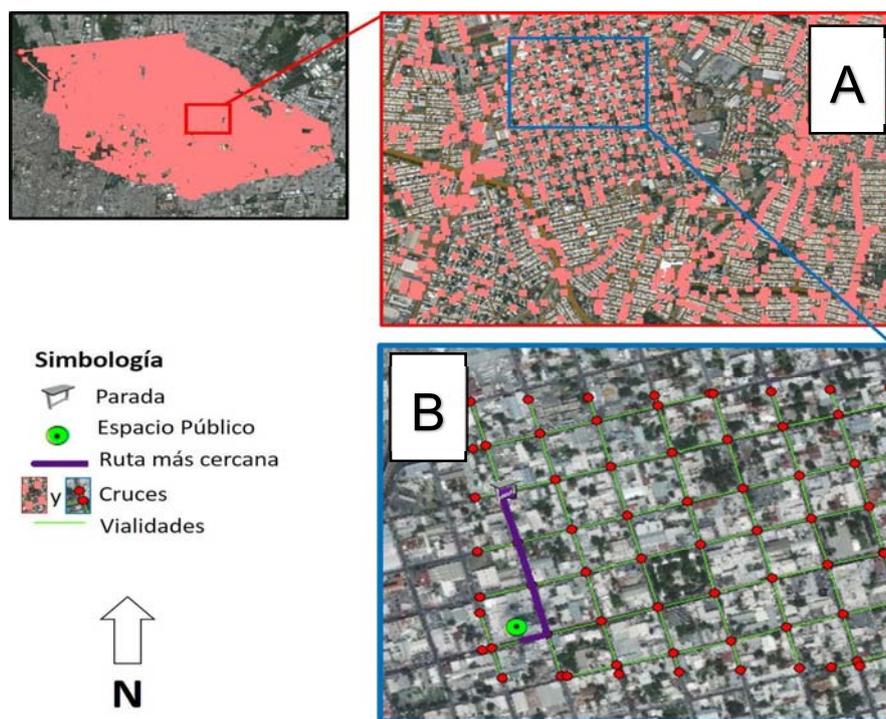


Figura 24. A) Errores (>10,000) observados a corregir en el municipio de San Nicolás de los Garza en la capa de vialidades y B) Ejemplo de errores corregido, vialidades seccionadas por calle y ejemplo de obtención de ruta más cercana entre espacio público-parada/estación.

Posterior a corregir o complementar la topología, se inició el proceso para calcular el IATP (Tabla 11). La primera parte consiste en la aplicación de las siguientes ecuaciones:

- Tiempo caminado (Walking Time, WT). Se refiere a la distancia Espacio Público (EP) y la parada/estación más cercana convertido a medidas de tiempo, considerando una velocidad al caminar de 4.80 km/h o 80m/min (London, 2010). Este dato se obtiene a través del análisis de redes en el SIG, donde para cada EP se obtiene la ruta más corta a la estación/parada más cercana, incluyendo las paradas de camión, estaciones de metro y estaciones de ecovía. Por ejemplo, en la figura 25 se muestran los 1811 EP y las 4 estaciones del metro presentes en el municipio de San Nicolás de los Garza, de igual manera la ruta más cercana entre cada uno de esos EP a la estación más cercana, siendo esta ruta trazada a través de la capa de vialidades.

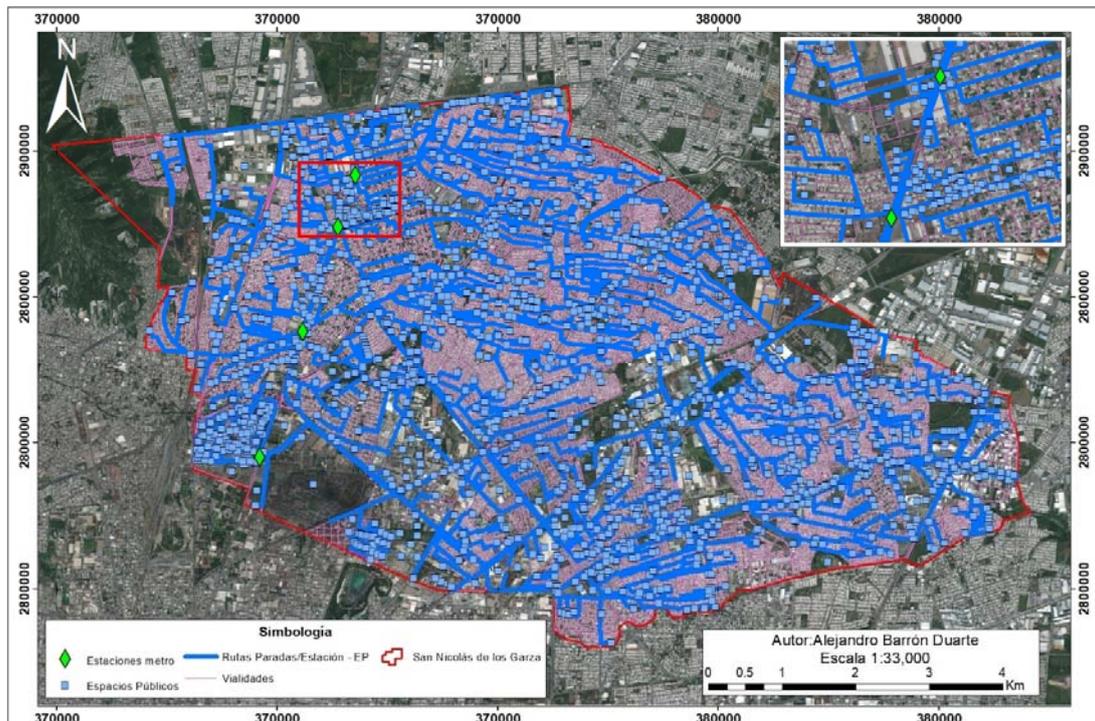


Figura 25. Obtención de distancias caminadas para EP hacia las estaciones de metro.

- Tiempo promedio de espera (Average Waiting Time, AWT). Se refiere al tiempo promedio entre llegar a la estación/parada 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).

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

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.

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

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.

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

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).

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

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 trasladada hacia las AGEBS mediante SIG, donde cada AGEB obtendrá la WEF de los EP presentes dentro de ella, obteniendo un promedio de cada una.

La segunda parte del proceso calcula la densidad poblacional a través de áreas de influencia de las paradas/estaciones de cada modo de transporte sobre 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 a través de la capa de vialidades (Figura 26).

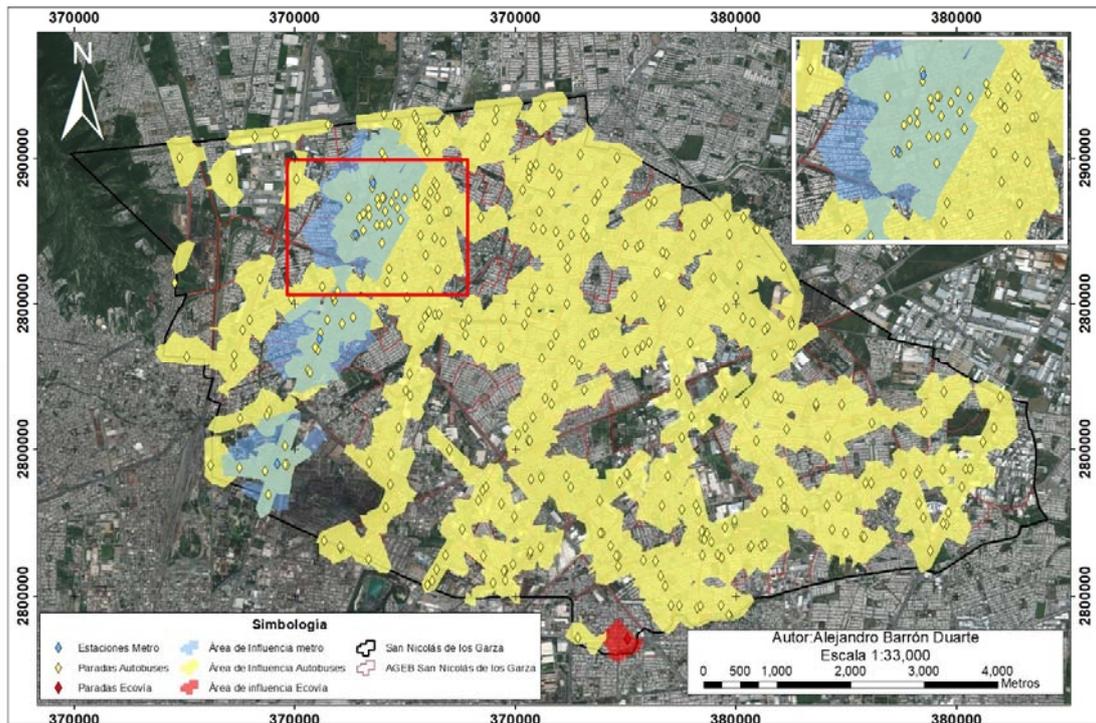


Figura 26. Áreas de influencia de las paradas/estaciones de los 3 modos de transporte en el municipio de San Nicolás de los Garza para.

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 sobreposición de una AGEB seleccionada considerando las distancias caminadas para las paradas de camiones. Para cada AGEB se considera su densidad (D_{AGEB}) y la densidad de del área de influencia perteneciente a dicha AGEB (D_B).

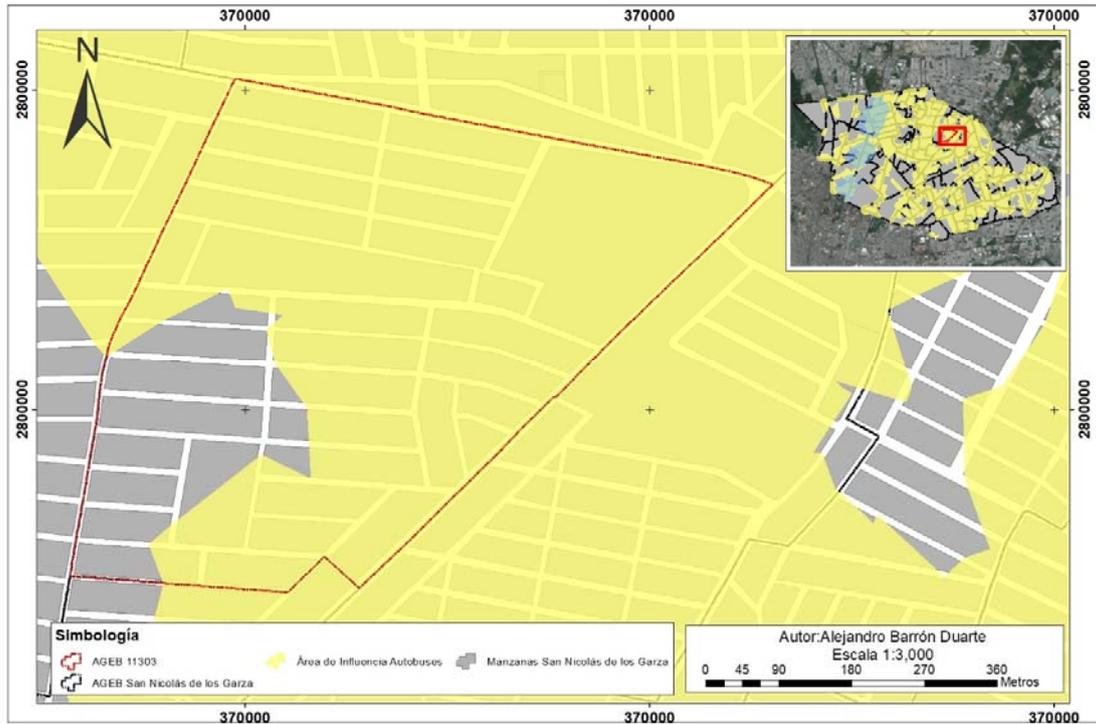


Figura 27. Ejemplo cálculo de densidad poblacional para áreas de influencia de Autobuses y AGEBs.

Por último, se debe calcular el índice 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 12, 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 13, Figura 32).

Tabla 12. Valores de vulnerabilidad para ráster de deterioros en columnas escaneadas.

Deterioro	Vulnerabilidad
Sin deterioro	0
Grietas u Hollín	2
Grietas y Hollín	3

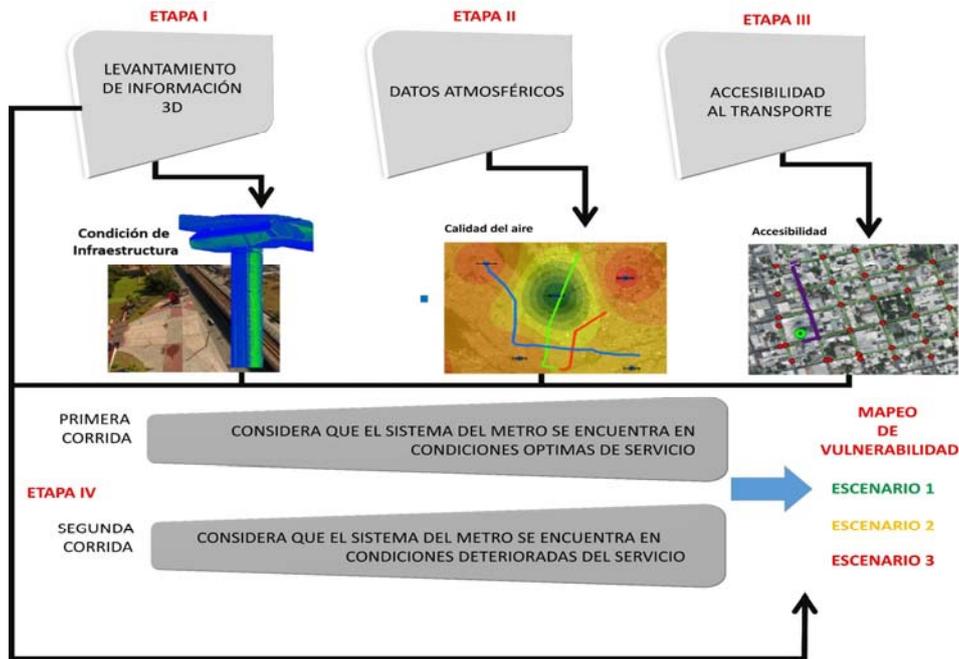


Figura 28. Diagrama metodológico final para el mapeo de la vulnerabilidad basado en 3 escenarios que dependen de la condición de la infraestructura.

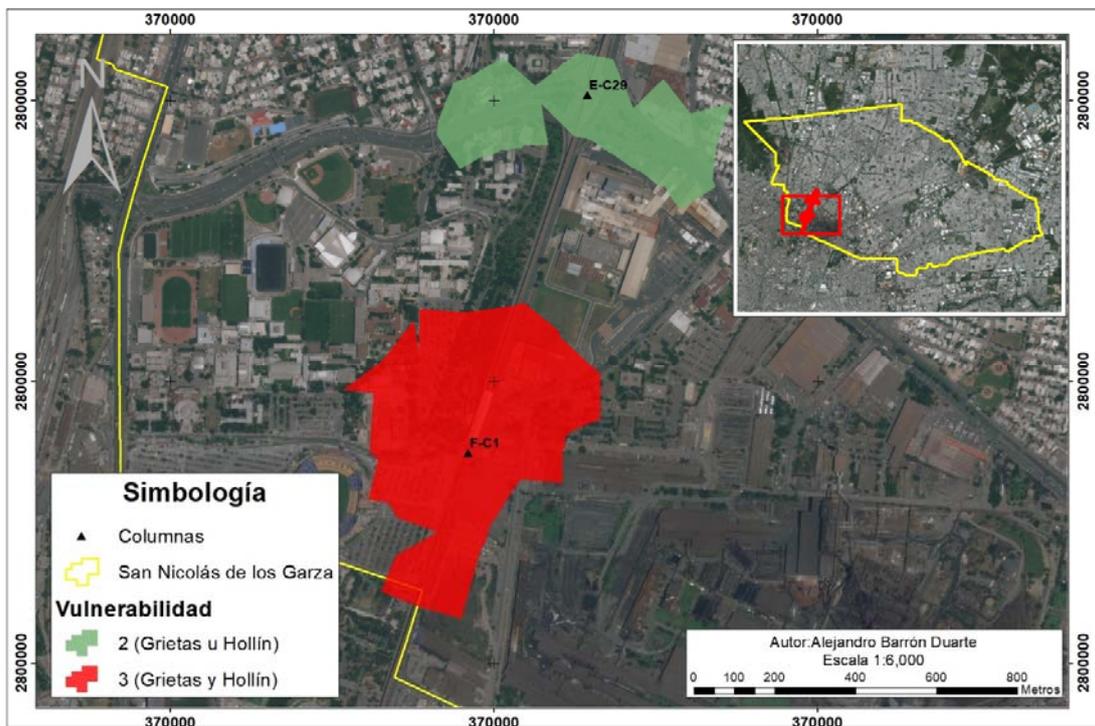


Figura 29. Ejemplo de áreas de influencia con valores de vulnerabilidad visibles en formato vectorial de columnas F-C1 y E-C29.

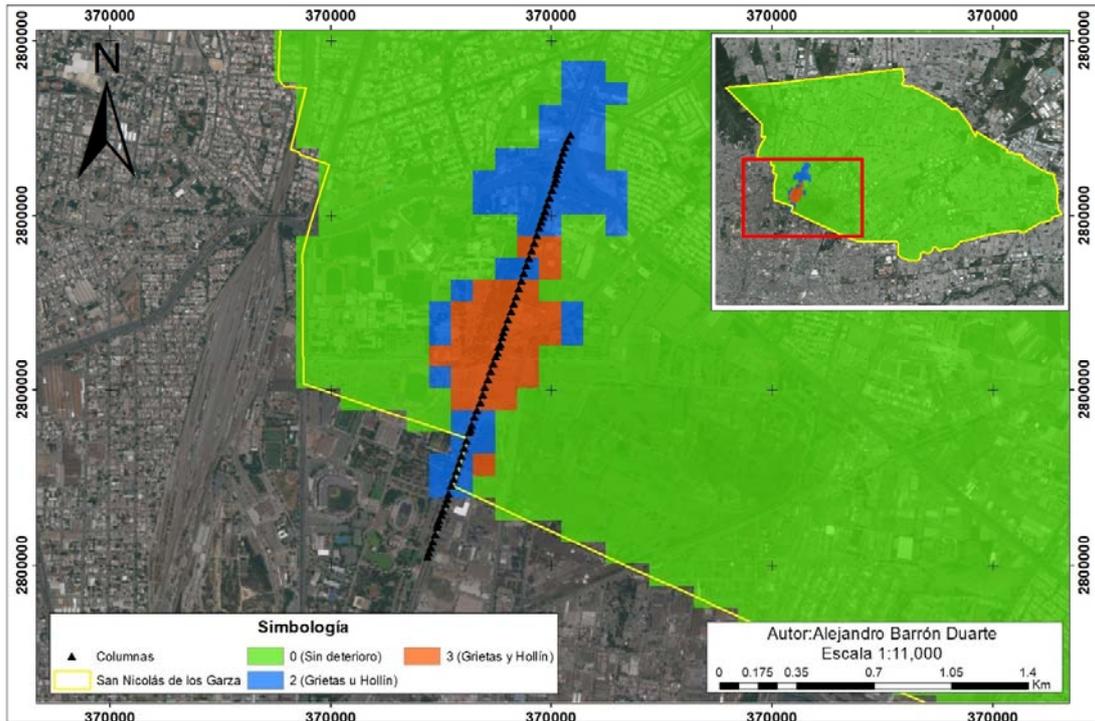


Figura 30. Áreas de influencia de columnas escaneadas con valores de vulnerabilidad en formato ráster.

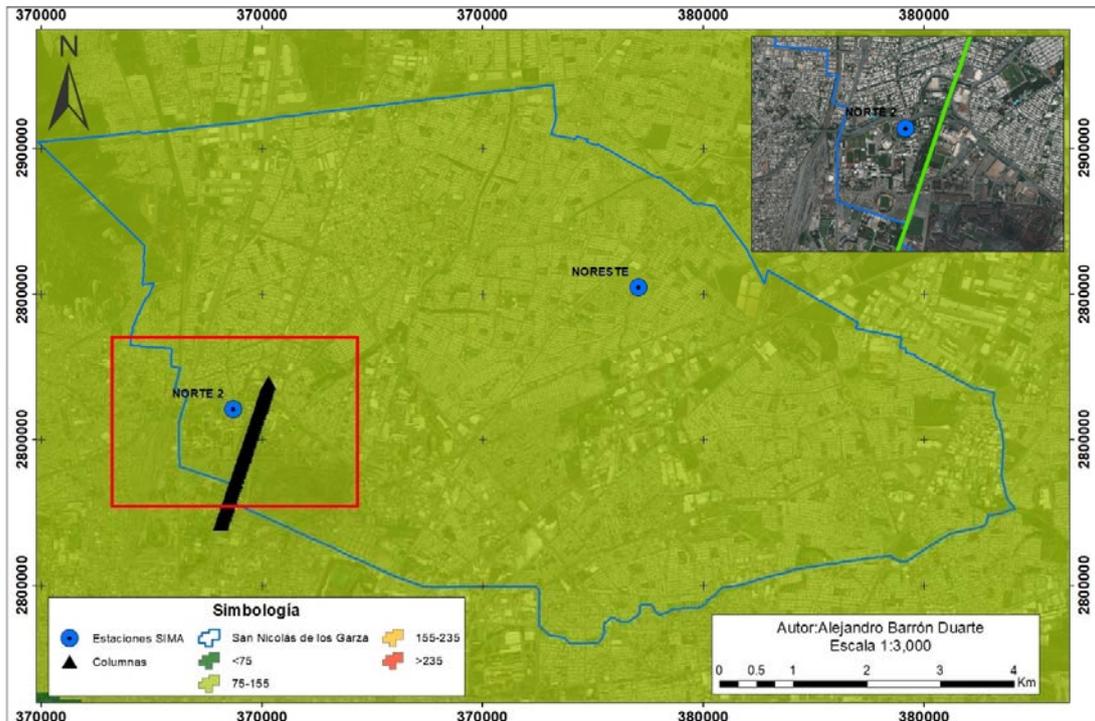
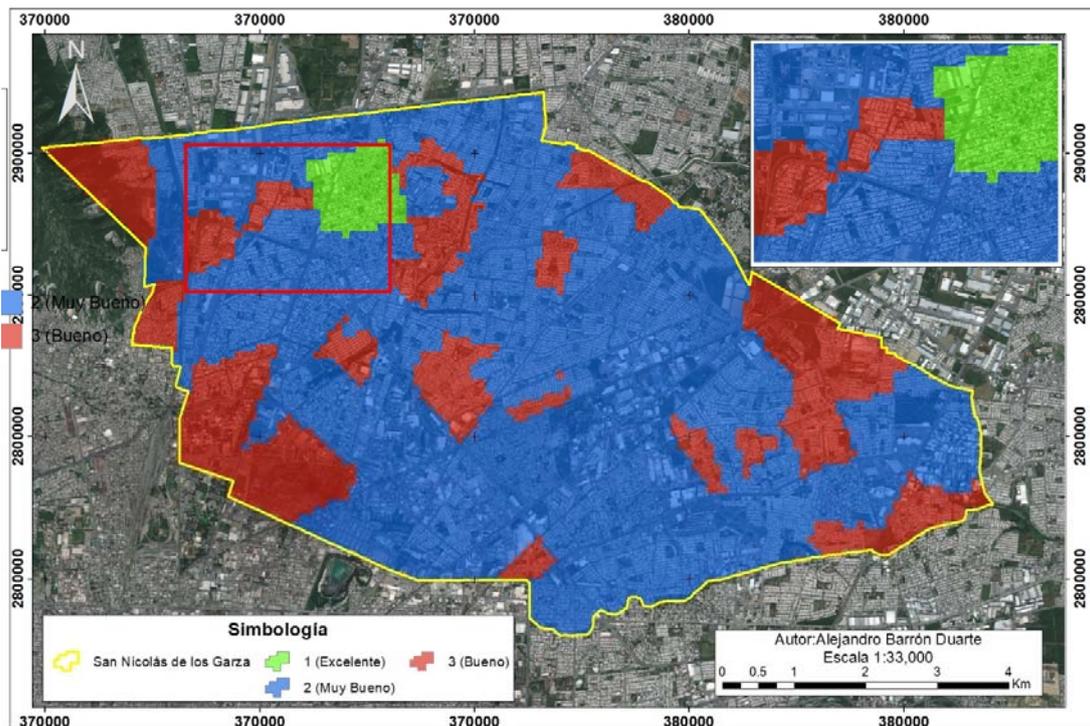


Figura 31. Concentración considerada como valor de vulnerabilidad en formato ráster del año 2018.

Tabla 13. Valores de vulnerabilidad para ráster de IATP.

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



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 para cada uno.

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

Escaneos	No. Puntos	Escaneos	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 66	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.

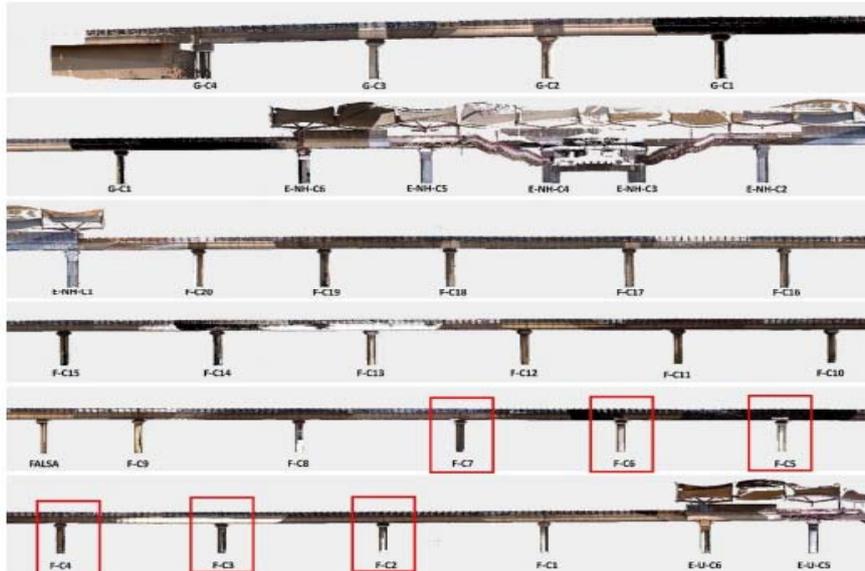


Figura 33. Nube de puntos limpia en formato RGB de la sección comprendida entre las estaciones Niños Héroes y Universidad.

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 15.

Tabla 15. 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					

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 34, Figura 35 y Figura 36). La nomenclatura es la especificada por el Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey.

Algunas columnas fuera del municipio en estudio presentan agrietamientos y hollín, incluso en la línea 1, sin embargo, las presentes en la línea 2 se encuentran fuera de la zona donde se realizaron los escaneos, por lo que a pesar de observar deterioros superficiales no se pueden corroborar mediante los escaneos.

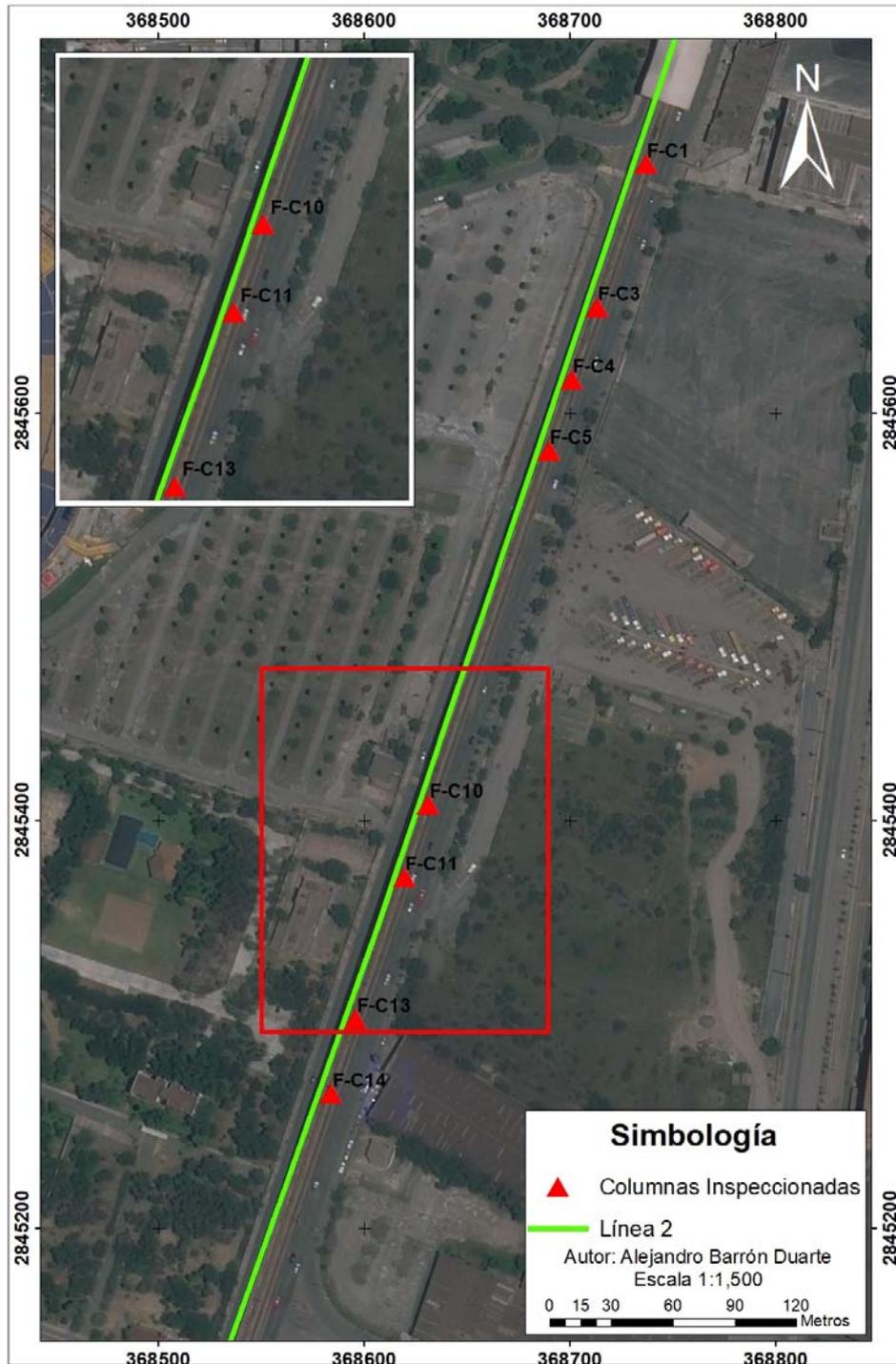


Figura 34. Ubicación de las columnas seleccionadas para su inspección mediante Google Earth.

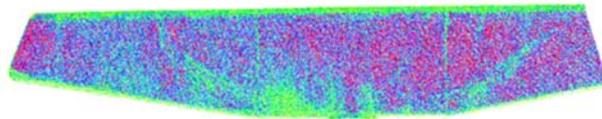


Figura 35. Columna F-C1 (CI-1) con presencia de agrietamientos y hollín visibles a través de Street View de Google Earth y escaneos.

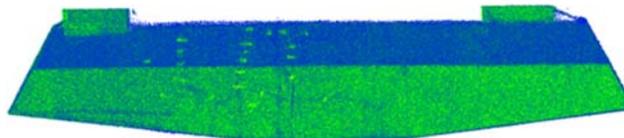


Figura 36. Columna G-C3 con presencia de agrietamientos y hollín visibles a través de Street View de Google Earth y escaneos.

- 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.

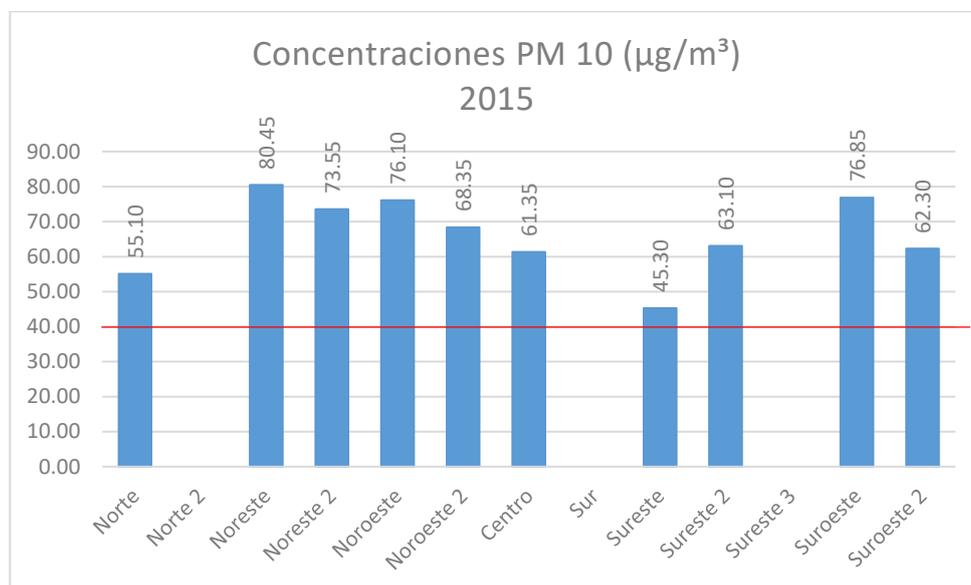
La inspección mediante Google Earth fue de utilidad para corroborar los deterioros observados en las nubes de puntos limpias, además de permitir evaluar de manera preliminar y visual secciones del metro que no se encontraban dentro del área de estudio.

4.3 Condiciones atmosféricas

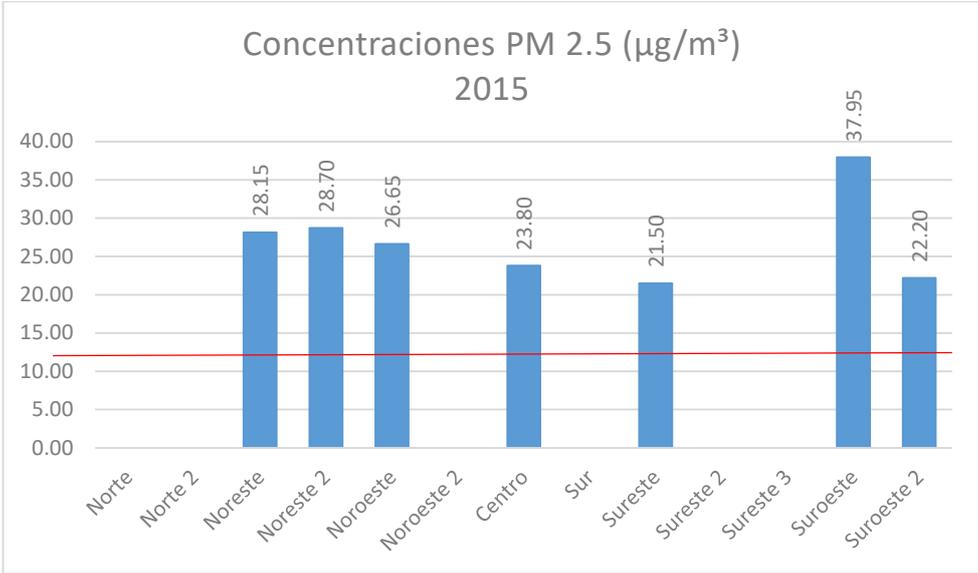
Se obtuvieron las concentraciones de manera mensual de las emisiones en las diferentes estaciones de monitoreo en la ZMM a través de los reportes generados por el SIMA, considerando la mediana de cada estación. Se realizó un análisis de PM10 y PM2.5 de manera anual, evaluando los límites máximos permisibles 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 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual, mientras que para partículas *PM2.5* un límite anual de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual. Sin embargo, SIMA considera el índice metropolitano de calidad del aire (IMECA), a través 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 16).

Tabla 16. Índice de aire y salud para PM 10 y PM 2.5 (NOM-172-SEMARNAT-2019).

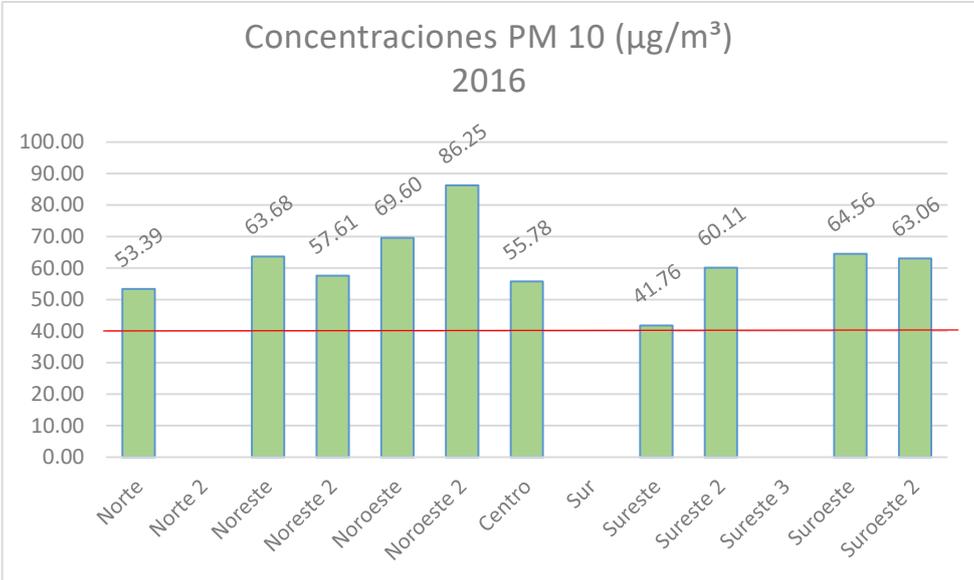
Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Intervalo de PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	Bajo	≤ 50	≤ 25
Aceptable	Moderado	>50 y ≤ 75	>25 y ≤ 45
Mala	Alto	>75 y ≤ 155	>45 y ≤ 79
Muy Mala	Muy Alto	>155 y ≤ 235	>79 y ≤ 147
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	≥ 235	≥ 147



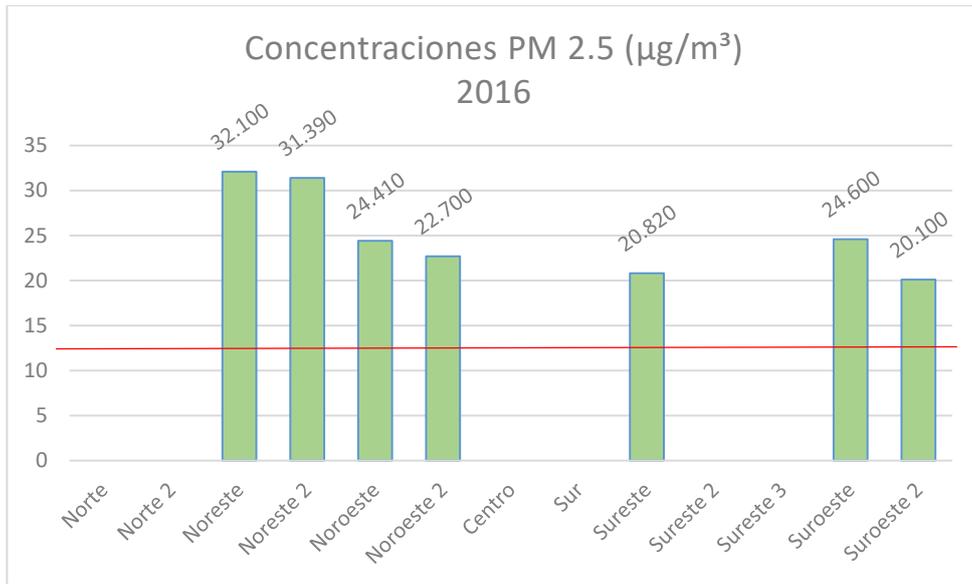
Gráfica 1. Concentraciones anuales PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el año 2015.



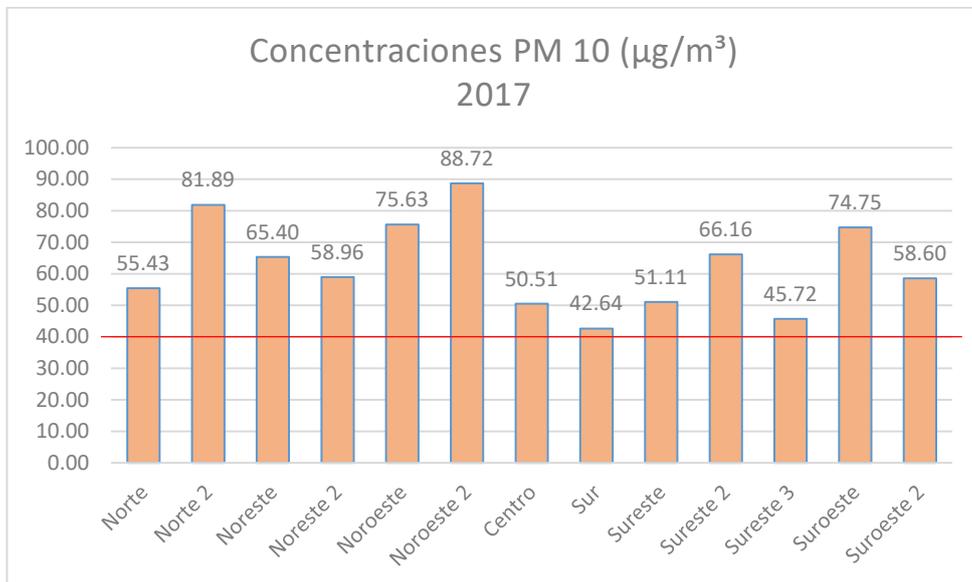
Gráfica 2. Concentraciones anuales PM 2.5 (µg/m³) en el año 2015.



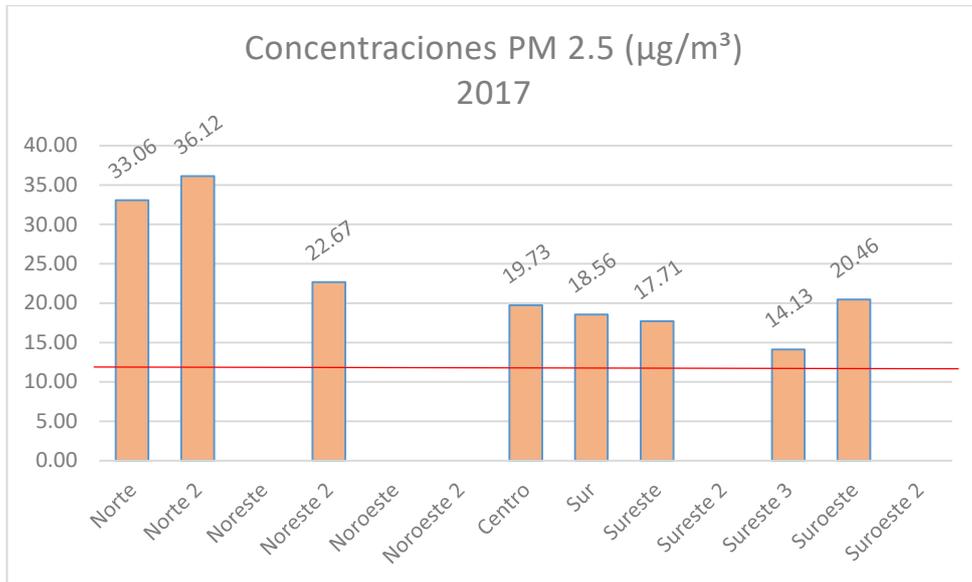
Gráfica 3. Concentraciones anuales PM 10 (µg/m³) en el año 2016.



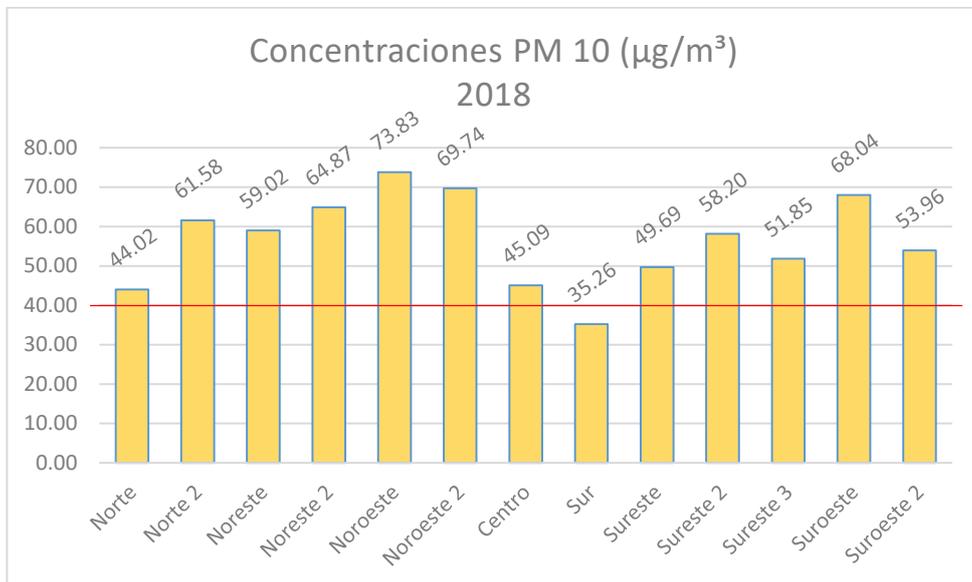
Gráfica 4. Concentraciones anuales PM 2.5 (µg/m³) en el año 2016.



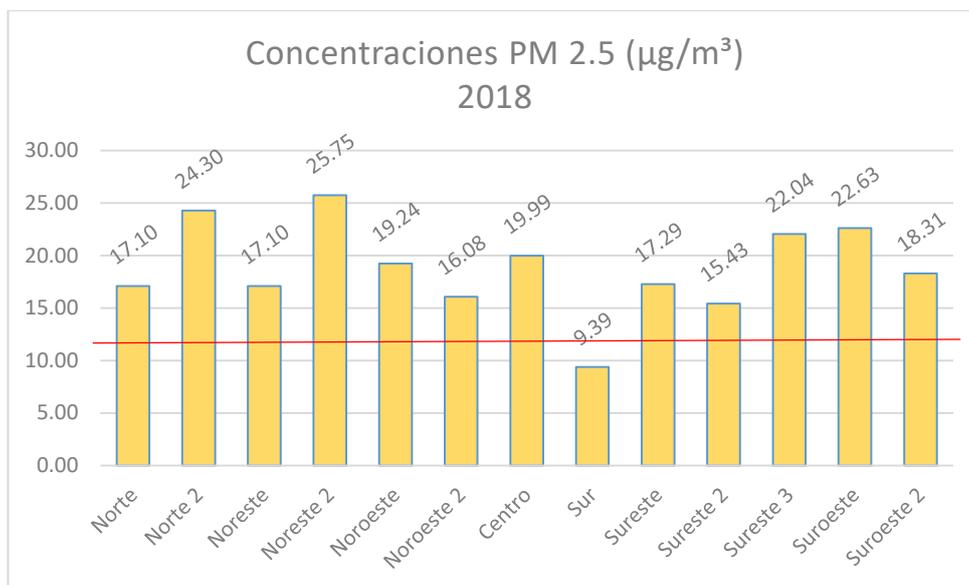
Gráfica 5. Concentraciones anuales PM 10 (µg/m³) en el año 2017.



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 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 un SIG, donde a través de un método de interpolación se generó un archivo en formato ráster con la información analizada de SIMA (Figura 37).

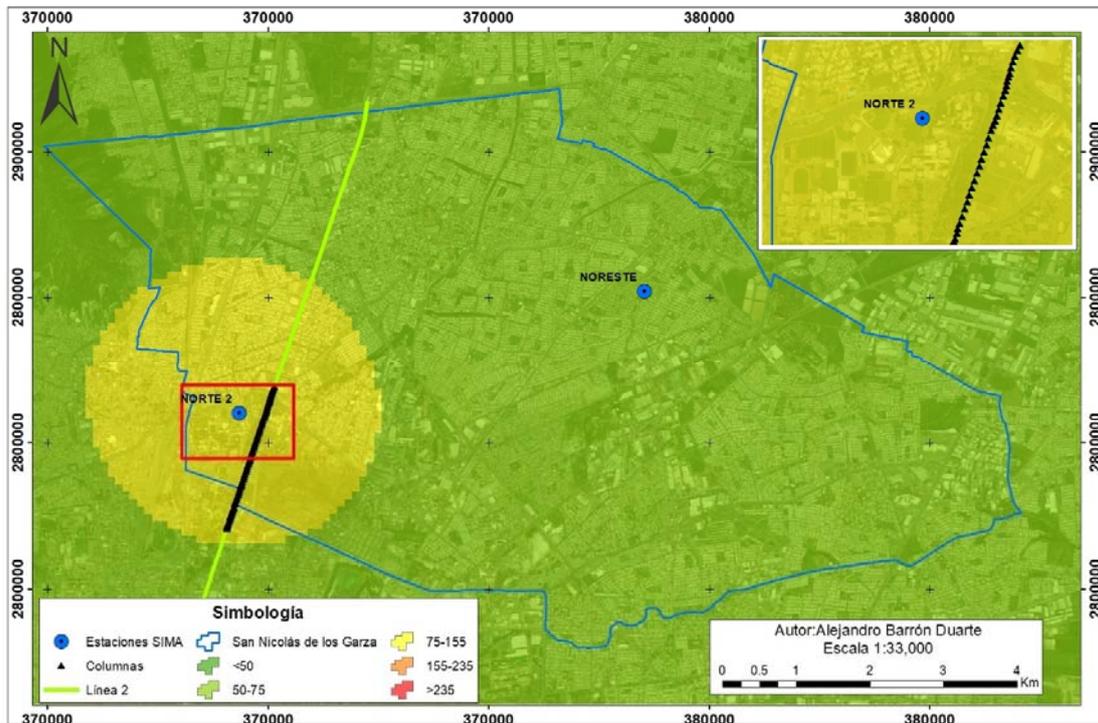


Figura 37. Concentración de PM10 en el año 2017 (mediana). Datos de estaciones de monitoreo SIMA.

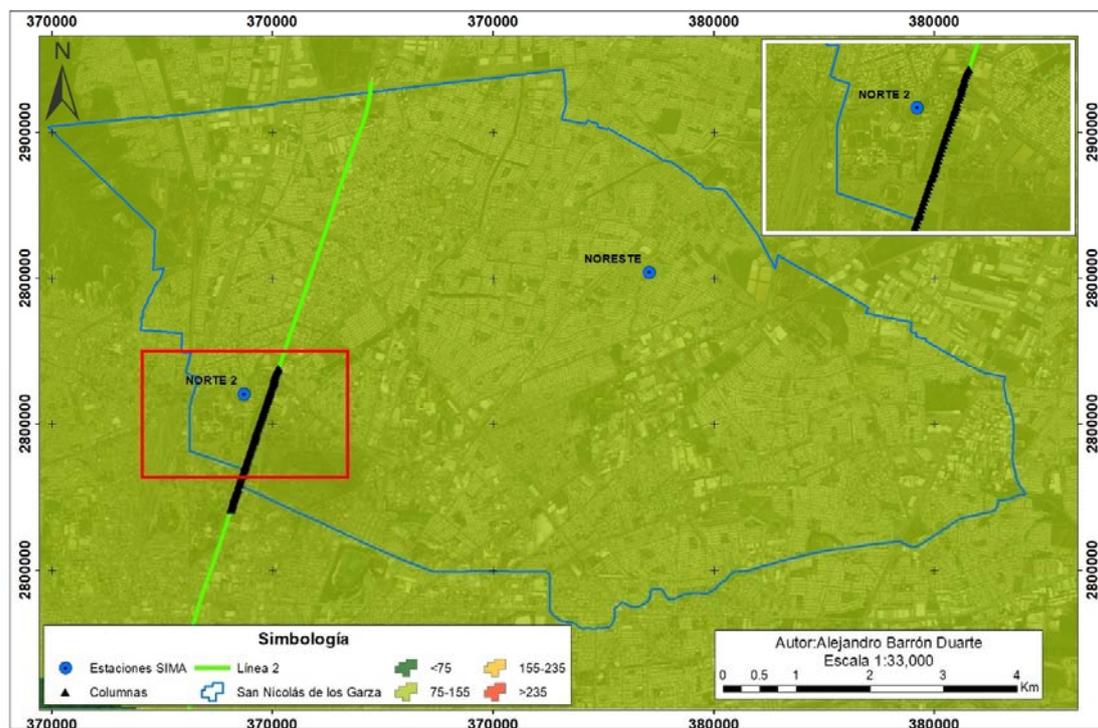


Figura 38. Concentración de PM10 en el año 2018 (máxima). Datos de estaciones de monitoreo SIMA.

La figura 38 muestra las concentraciones máximas de las 13 estaciones de monitoreo durante el año 2018, las cuales a pesar de no estar todas en el municipio de San Nicolás de los Garza, en el proceso de interpolación se consideraron todas, por lo que estos valores fueron considerados 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 PM 2.5, 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, por ejemplo, el hollín presente en la estructura pudiera ser generado por las emisiones presentes, desconocemos si este se encuentra compuesto por partículas que puedan afectar la vida útil o de servicio de la estructura, pero de ser así, ponemos en riesgo no solo el servicio, si no a la población. Reducir las emisiones generadas mejora la salud y previene enfermedades a la población, de igual manera, promover y mejorar la calidad de los transportes sostenibles ayuda a esto. 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 17), 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 17. 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

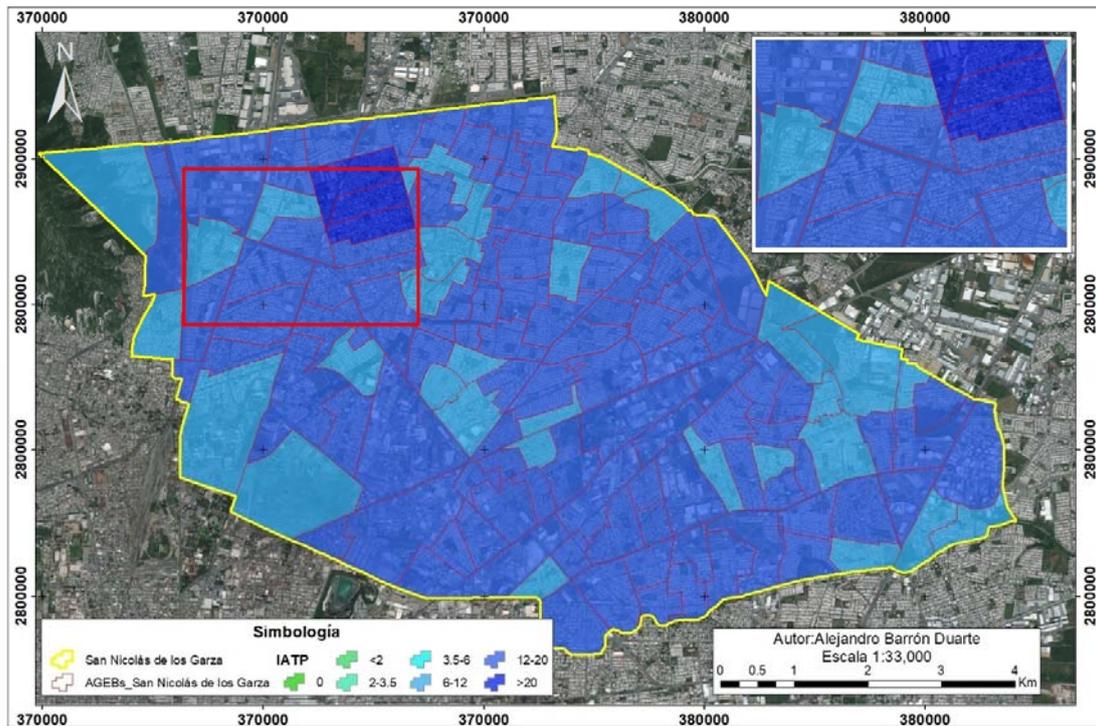


Figura 39. Distribución del IATP en el municipio de San Nicolás de los Garza.

Dentro del municipio de San Nicolás de los Garza se encuentran presentes 127 AGEBs que fueron consideradas en la obtención del IATP, de los cuales se obtuvo 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 18 mostramos las porciones de cobertura y de población con acceso al transporte público para cada modo considerando las áreas de influencia (AI) delimitadas en la obtención de IATP. Es importante mencionar que algunas áreas de interés se superponen 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 18. Porcentajes de áreas de influencia (AI) 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 de infraestructura y condiciones atmosféricas previos, de manera que 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 en el área escaneada el IATP obtenido es bueno, considerando que la zona cuenta con espacios públicos y paradas/estaciones de metro y autobuses se podría suponer que el IATP sería Muy bueno o Excelente, sin embargo, la densidad poblacional es muy baja, incluso nula, lo que hace a las AGEBS dentro de la zona menos accesibles ya que, al estar ubicados espacios

públicos en la zona como escuelas, empresas, tiendas de conveniencia, entre otras, la afluencia diaria de los mismos es alta, así como el uso de estas paradas/estaciones es alto, pero no su densidad poblacional es poca.

Por otro lado, tomando en cuenta que el municipio de San Nicolás de los Garza, cuenta con un IATP de bueno a excelente, lo que indica en parte que un mayor número de personas tiene accesibilidad al transporte público, el vínculo que podemos generar con las emisiones presentes son dos, por un lado fomentar y favorecer el uso del transporte público, de manera que un mayor número de personas los prefiera en lugar del transporte privado, ayudando a reducir las emisiones generadas por los mismos entre otras problemáticas, por otro lado, reducir las emisiones a través de un mayor uso del transporte público ayuda de manera directa a mejorar la salud y calidad de vida de la población. 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

A través de la integración de los 3 modelos anteriores mediante SIG, se obtuvo como resultado un mapa de vulnerabilidad del área de estudio. Se realizó una sumatoria de los valores de vulnerabilidad previamente establecidos para cada modelo 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 (Figura 41 y Tabla 19).

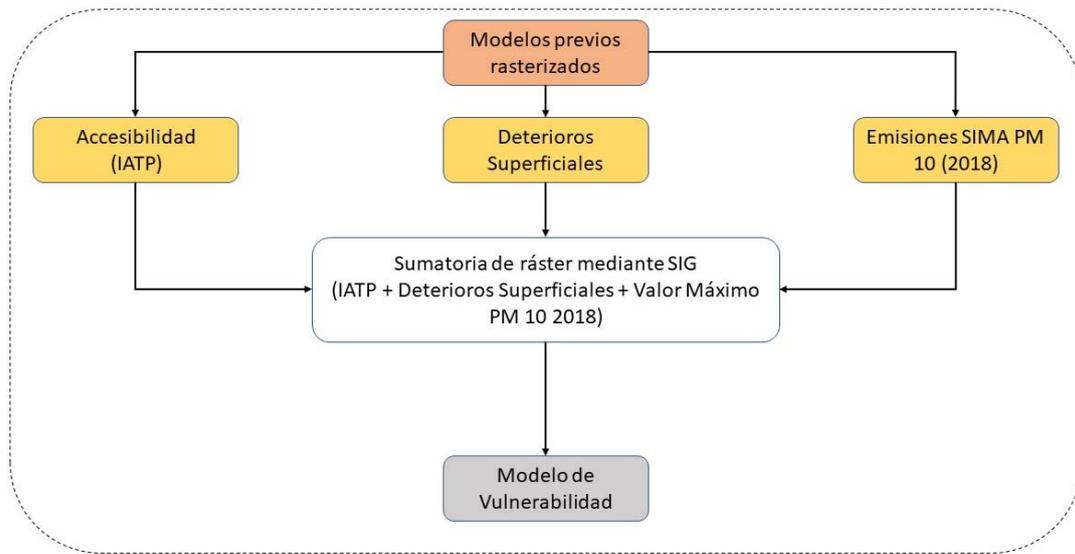


Figura 40. Proceso de obtención de modelo de vulnerabilidad del sistema de movilidad.

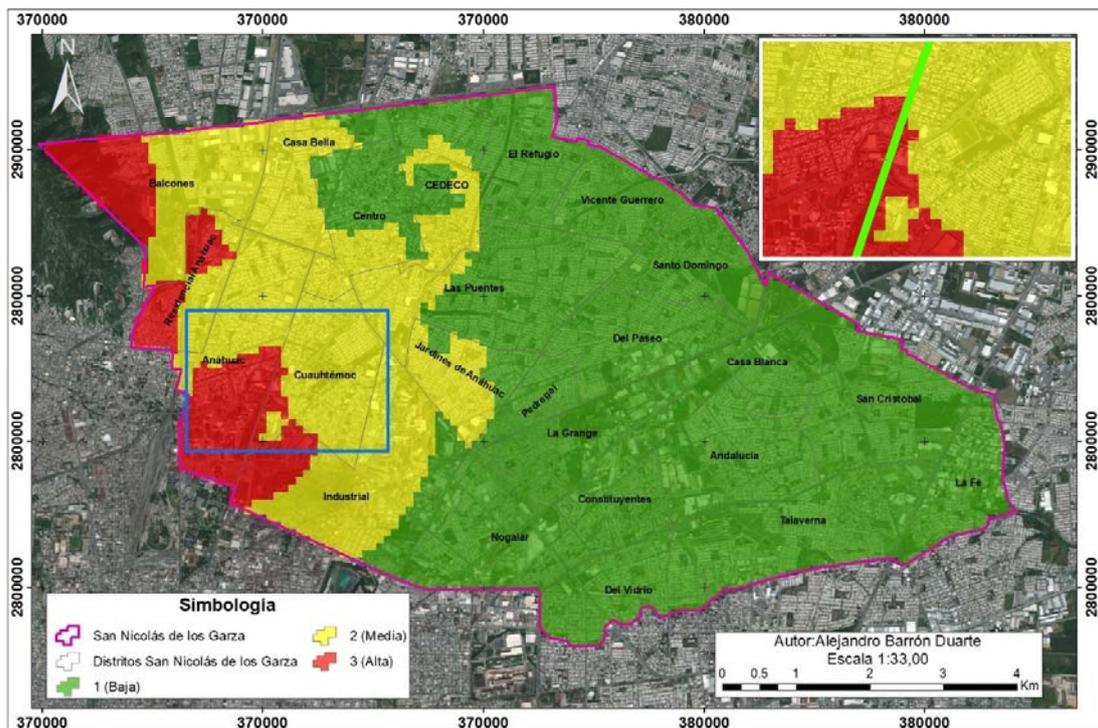


Figura 41. Mapa de vulnerabilidad en el municipio de San Nicolás de los Garza del sistema de movilidad.

Tabla 19. 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 más 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

Llevar a cabo una gestión urbana adecuada es necesario poner en práctica diferentes áreas de conocimiento, entre ellas la movilidad urbana, la cual implica 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. Por un lado, los sensores remotos son tecnologías avanzadas que permiten realizar observaciones de los objetos en estudio y generar datos con mayor rapidez y de gran calidad comparados con los métodos convencionales, mientras que los SIG permiten observar grandes cantidades de información en un solo espacio para su análisis y proporcionando una variedad de herramientas para el mismo.

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. De igual manera, 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 (Anexo B), y observando las concentraciones superficiales presentes en la estructura del metro (Figura 17 y Figura 34) podríamos suponer que en parte estas se deben a las concentraciones presentes en el área de estudio.

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, contando incluso con conectividad entre ellos, por lo que el IATP cambiaría al considerar los demás municipios, y por lo tanto AGEBS y demás capas colindantes consideradas 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, lo cual permite que la combinación de estos modos de movilidad (metro, ecovía y autobús urbano). El SIG permite crear una herramienta para el manejo de los datos generados y almacenados como una base de datos, en este caso esa herramienta es el mapa de vulnerabilidad del municipio de San Nicolás de los Garza. 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.
- Arco, E. (2019). *Geomatics for Mobility Management*.
- Astorga, A. y Rivero, P (2009). *Patología en las edificaciones*. Venezuela: Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgos.
- Baek, N., Shin, Ws. & Kim, K.J. Geometric primitive extraction from LiDAR-scanned point clouds. *Cluster Comput* 20, 741–748 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10586-017-0759-x>
- 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.
- Baranda, Bernardo "Principios de una Movilidad Urbana Sustentable", en Memoria Digital del II Seminario de Urbanismo Internacional, ponencia presentada el día 5 de marzo de 2006, Departamento de Evaluación del Diseño en el Tiempo, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México, D. F., 2006.
- Bruegmann, R. (2015). Urban sprawl. *International encyclopaedia of the social & behavioral sciences (Second Edi, Vol. 24)*.
- Cabello, J., & Paruelo, J. M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. *Revista ecosistemas*, 17(3).
- Cardozo, O. D., & Da Silva, C. J. (2013). 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.
- Ceder, A., Le Net, Y., & Coriat, C. (2009). Measuring public transport connectivity performance applied in Auckland, New Zealand. *Transportation Research Record*, 2111(1), 139-147.
- Chen, P. (2019). Visualization of real-time monitoring datagraphic of urban environmental quality. *Eurasip Journal on Image and Video Processing*, 2019(1), 1-9.
- 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.

- Chorley, W., Redding, R., & Fries, C. (1987). U.S. Patent No. 4,649,533. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- 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.
- Commissie, E. (2011). White paper, Roadmap to a single European Transport Area, Towards a competitive and resource efficient transport system. COM, 2011, 144.
- 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.
- de Freitas Miranda, H., & da Silva, A. N. R. (2012). Benchmarking sustainable urban mobility: The case of Curitiba, Brazil. *Transport Policy*, 21, 141-151.
- de Moraes, E. C. (2002). Capítulo 1 fundamentos de sensoriamento remoto.
- 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).
- Dickinson, H. J., & Calkins, H. W. (1988). The economic evaluation of implementing a GIS. *International Journal of Geographical Information System*, 2(4), 307-327.

- Elliot, A., Urry, J., 2010. Mobile Lives. Routledge, Oxford.
- 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](http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-LIDAR-data-.htm) ¿Qué son los datos LIDAR?
- Escobedo Tamez, A. N., & Yépez Rincón, F. D. (2019). Diseño y evaluación de un método de inspección no destructivo para ubicar y determinar características geométricas de zonas con agrietamientos en estructuras de concreto reforzado (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Ferrando, F. (2008). Santiago de Chile: antecedentes demográficos, expansión urbana y conflictos. *Revista de Urbanismo*, (18).
- Galicia, S. P. (2009). Temas de sustentabilidad en el urbanismo contemporáneo. Conclusiones del SUI.
- Gakenheimer, R. (1998). Los problemas de la movilidad en el mundo en desarrollo. *EURE (Santiago)*, 24, 33-52.
- Gandy, M. (2004). Rethinking urban metabolism: water, space and the modern city. *City*, 8(3), 363-379.
- Gavrilidis, A. A., Niță, M. R., Onose, D. A., Badiu, D. L., & Năstase, I. I. (2019). Methodological framework for urban sprawl control through sustainable planning of urban green infrastructure. *Ecological Indicators*, 96, 67-78.
- 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.

- González, M. E. P., & Rodríguez, P. G. (2006). Aplicaciones de la teledetección en hidrología. *Observatorio Medioambiental*, (9), 171-187.
- 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.
- Gudmundsson, H. (2004). Sustainable transport and performance indicators. *Issues in environmental science and technology*, 20, 35-64.
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*.
- Hamidi, S., & Ewing, R. (2014). A longitudinal study of changes in urban sprawl between 2000 and 2010 in the United States. *Landscape and urban planning*, 128, 72-82.
- INEGI. 2015. *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. SEDESOL, CONAPO, INEGI.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2016, México*. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. Diciembre 2017.
- 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.
- 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.

- Jordán Fuchs, R., Riffo Pérez, L., & Prado, A. (2017). Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: dinámicas y desafíos para el cambio estructural.
- Krabill, W. B., Collins, J.G., Link, L.E., Swift, R.R. y M.L. Butler. (1984). Airborne laser topographic mapping results. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50 (6), 685-694.
- Keeley, M., & Benton-Short, L. (2019). Summary and Best Practices. *Urban Sustainability in the US*, 313-316.
- 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.
- MEXICANOS, P., FEDERAL, G. D. D., DE MÉXICO, G. D. E., & DE GUANAJUATO, G. D. E. 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. Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos. -Secretaría de Salud.

- MEXICANOS, P., FEDERAL, G. D. D., DE MÉXICO, G. D. E., & DE GUANAJUATO, G. D. E. NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos. -Secretaría de Salud.
-
- Milgram, S. (1970). The experience of living in cities. *Science*, 167(3924), 1461-1468.
- Mishra, S., Welch, T. F., & Jha, M. K. (2012). Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(7), 1066-1085.
- Nazarnia, N., Schwick, C., & Jaeger, J. A. (2016). Accelerated urban sprawl in Montreal, Quebec City, and Zurich: Investigating the differences using time series 1951–2011. *Ecological indicators*, 60, 1229-1251.
- 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.
- OMS 2018 [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- OMS (Organización Mundial de Salud) (2016), “WHO Global Urban Ambient Air Pollution Database (Update 2016)” [en línea] http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/.
- 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.
- ONU-Hábitat (2016), “World Cities Report 2016” [en línea] <http://wcr.unhabitat.org/main-report/>. (2015), “Habitat III issue paper: 7- Municipal finance” [en línea] http://habitat3.org/wp-content/uploads/Habitat-III-Issue-Paper-7_Municipal_Finance-2.0_93810.pdf. (2014), *The State of African Cities 2014. Re-imagining sustainable urban transitions* [en línea] <https://unhabitat.org/books/>
- 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.
- Parra-Henao, G. J. (2010). Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores. *CES Medicina*, 24(2).
- Paton, D., & Johnston, D. (2001). Disasters and communities: vulnerability, resilience and preparedness. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 10(4), 270-277.
- Pedrotti, C. I. (2011). Reseña de "Territorio y ciudades en el noreste de México al inicio del siglo XXI" de García Ortega, Roberto, Socorro Arzaluz Solano y Jesús Manuel Fitch Osuna (coords.). *Economía, Sociedad y Territorio*, 11(35), 253-264.
- Pejić, M. (2013). Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection. *Tunnelling and underground space technology*, 37, 199-206.
- 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.
- 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.
- Pérez-Gavilán, J. J., Aguirre, J., & Ramírez, L. (2018). Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. *salud pública de México*, 60, 41-51.
- PSTyV. (2009). Plan Sectorial de Transporte y Vialidad del Área metropolitana de Nuevo León 2008-2030.
- 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.
- 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).
 - Roger Tomlinson and M. A. G. Toomey, "GIS and LIS in Canada," chapter 15 in *Mapping a Northern Land: The Survey of Canada 1947-1994*, Gerald McGrath and Louis Sebert, eds. (McGill-Queen's University Press, 1999).
 - Rosete, F., & 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.
 - Rubiera Morollón, F., González Marroquin, V. M., & Pérez Rivero, J. L. (2016). Urban sprawl in Spain: differences among cities and causes. *European Planning Studies*, 24(1), 207-226.
 - 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 Rodríguez, R., & Bonilla, A. (2007). Urbanización, cambios globales en el ambiente y desarrollo sustentable en América Latina (No. E50-1101). IAI, Sao José dos Campos, SP (Brasil) INE, México, DF (México) UNEP, Panamá (Panamá).
- 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.
- 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.
- Santos, L., & De las Rivas Sanz, J. L. (2008). Ciudades con atributos: conectividad, accesibilidad y movilidad. *Ciudades*, (11), 13-32.
- 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 Aire del Estado De Nuevo León, Proaire 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.
- Treviño Treviño, E. L. (1998). *Patología de las estructuras de concreto reforzado: reflexiones y recomendaciones* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- 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).
- Watson, V. (2009). 'The planned city sweeps the poor away...': Urban planning and 21st century urbanisation. *Progress in planning*, 72(3), 151-193.
- Wight, J. K. y MacGregor, J. G. (2009). *Reinforced Concrete, Mechanics and Design*. (5a ed.) EEUU: Pearson.
- Wong, B., Elias, W., & Shiftan, Y. (2012). Linking Daily Short-Term Activity-Travel Decision with Long-term Housing Choices: A Joint RP-SP based Econometric Approach 2 to Connect Daily Commuting Mode Choice and Long-Term Housing 3 Choice 4. *Choice*, 4(5), 6.

- 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. Cálculo de Índice de Accesibilidad al Transporte Público.

Ecuaciones

- **Tiempo Promedio de Espera (AWT, Average Waiting Time).** Se refiere al tiempo promedio entre llegar a la estación/parada y el tiempo de llegada del servicio deseado. Para cada modo de transporte, el AWT fue considerado como el intervalo entre servicios.

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

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 establecida en tabla A) a la parada/estación más cercana para el EP i .

- **Tiempo total de acceso (TAT, Total Access Time).** Posterior a la obtención del WT mediante SIG 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.

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

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

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

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

- **Frecuencia equivalente ponderada (WEF, Weighted Equivalent Frequency).** 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).

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

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).

Ejemplo 1. Se calculará el IATP para la AGEB 1904600010945. La tabla 20 muestra las frecuencias de servicio por cada modo de transporte establecidos por hora, mientras que la tabla 21, 22 y 23 muestran los resultados obtenidos del tiempo de traslado entre un EP y la parada/estación más cercana, así como el cálculo de las ecuaciones establecidas para los Espacios Públicos presentes en dicha AGEB.

Tabla 20. Frecuencia de servicio establecida por hora para cada modo de transporte.

Modo de Transporte	Frecuencia de Servicio
Autobuses	6.00
Metro	6.00
Ecovía	12.00

Tabla 21. Tiempo de recorrido de la ruta más cercana entre Espacio Público-Parada/Estación mediante SIG y cálculo de Average Waiting Time (AWT), Total Access Time (TAT) y Equivalent Frequency (EF) para autobuses urbanos.

ID	Ruta EP - Parada/Estación	Tiempo	AWT	TAT	EF
1	Hospital General de Zona #6 – San Nico11	2.16	5.00	7.16	4.19
2	Oxxo – San Nico 285	1.04	5.00	6.04	4.96
3	7-Eleven - San Nico 246	0.39	5.00	5.39	5.56
4	EP 301 - San Nico 11	6.74	5.00	11.74	2.56
5	EP 390 – San Nico 11	3.34	5.00	8.34	3.60
6	EP 588 – San Nico 11	6.60	5.00	11.60	2.59
7	EP 610 – San Nico 255	5.45	5.00	10.45	2.87
8	EP 611 – San Nico 10	5.59	5.00	10.59	2.83
9	EP 612 – San Nico 11	0.94	5.00	5.94	5.05
10	José de Jesús Martínez Martínez – San Nico 15	8.25	5.00	13.25	2.26
11	EP 1143 – San Nico 184	11.56	5.00	16.56	1.81
12	EP 1144 – San Nico 11	11.09	5.00	16.09	1.86

Tabla 22. Tiempo de recorrido de la ruta más cercana entre Espacio Público-Parada/Estación mediante SIG y cálculo de Average Waiting Time (AWT), Total Access Time (TAT) y Equivalent Frequency (EF) para metro.

ID	Ruta EP - Parada/Estación (Metro)	Tiempo	AWT	TAT	EF
1	Hospital General de Zona #6 – San Nicolás	2.04	5.00	7.04	4.26
2	Oxxo - Anáhuac	59.13	5.00	64.13	0.47
3	7-Eleven-San Nicolás	3.17	5.00	8.17	3.67
4	EP 301-San Nicolás	6.62	5.00	11.62	2.58
5	EP 390 – San Nicolás	3.23	5.00	8.23	3.64
6	EP 588 – San Nicolás	6.49	5.00	11.49	2.61
7	EP 610 – San Nicolás	6.05	5.00	11.05	2.71
8	EP 611 – San Nicolás	5.81	5.00	10.81	2.77
9	EP 612 – San Nicolás	0.83	5.00	5.83	5.15
10	José de Jesús Martínez Martínez – San Nicolás	8.39	5.00	13.39	2.24
11	EP 1143 – San Nicolás	11.92	5.00	16.92	1.77
12	EP 1144 – San Nicolás	10.97	5.00	15.97	1.88

Tabla 23. Tiempo de recorrido de la ruta más cercana entre Espacio Público-Parada/Estación mediante SIG y cálculo de Average Waiting Time (AWT), Total Access Time (TAT) y Equivalent Frequency (EF) para ecovía.

ID	Ruta EP - Parada/Estación	Tiempo	AWT	TAT	EF
	Hospital General de Zona #6 – San Nico 48 (Ecovía)	90.14	2.50	92.64	0.32
2	Oxxo – San Nico 48 (Ecovía)	90.83	2.50	93.33	0.32
3	7-Eleven – San Nico 48 (Ecovía)	87.21	2.50	89.71	0.33
4	EP 301-San Nico 48 (Ecovía)	89.70	2.50	92.20	0.33
5	EP 390 – San Nico 48 (Ecovía)	91.33	2.50	93.83	0.32
6	EP 588 – San Nico 48 (Ecovía)	94.33	2.50	96.83	0.31
7	EP 610 – San Nico 48 (Ecovía)	82.05	2.50	84.55	0.35
8	EP 611 – San Nico 48 (Ecovía)	85.23	2.50	87.73	0.34
9	EP 612 – San Nico 48 (Ecovía)	88.93	2.50	91.43	0.33
10	José de Jesús Martínez Martínez – San Nico 48 (Ecovía)	96.24	2.50	98.74	0.30
11	EP 1143 – San Nico 48 (Ecovía)	95.06	2.50	97.56	0.31
12	EP 1144 – San Nico 48 (Ecovía)	96.00	2.50	98.50	0.30

Como lo establece la ecuación 4 para el cálculo de WEF se considera $\alpha=1.00$ para el modo de transporte dominante el cual será el que tenga un valor mayor de EF y $\beta=0.500$ para los modos restantes.

Tabla 24. Cálculo de WEF para los EP presentes en AGEB 10945.

ID	Espacio Público	EF (Autobuses)	EF (metro)	EF (Ecovía)	Dominante	WEF
1	Hospital General de Zona #6	4.19	4.26	0.32	Metro	6.52
2	Oxxo	4.96	0.47	0.32	Autobuses	5.36
3	7-Eleven	5.56	3.67	0.33	Autobuses	7.56
4	EP 301	2.56	2.58	0.33	Metro	4.03
5	EP 390	3.60	3.64	0.32	Metro	5.60
6	EP 588	2.59	2.61	0.31	Metro	4.06
7	EP 610	2.87	2.71	0.35	Autobuses	4.40
8	EP 611	2.83	2.77	0.34	Autobuses	4.36
9	EP 612	5.05	5.15	0.33	Metro	7.84
10	José de Jesús Martínez Martínez	2.26	2.24	0.30	Autobuses	3.53
11	EP 1143	1.81	1.77	0.31	Autobuses	2.85

12	EP 1144	1.86	1.88	0.30	Metro	2.96
----	---------	------	------	------	-------	------

Una vez obtenida la WEF calculada para cada EP es trasladada hacia las AGEBs mediante SIG, considerando que hay más de un EP por AGEB, se considera el promedio de todas las WEF presentes en dicha AGEB (Figura 42 y tabla 25).

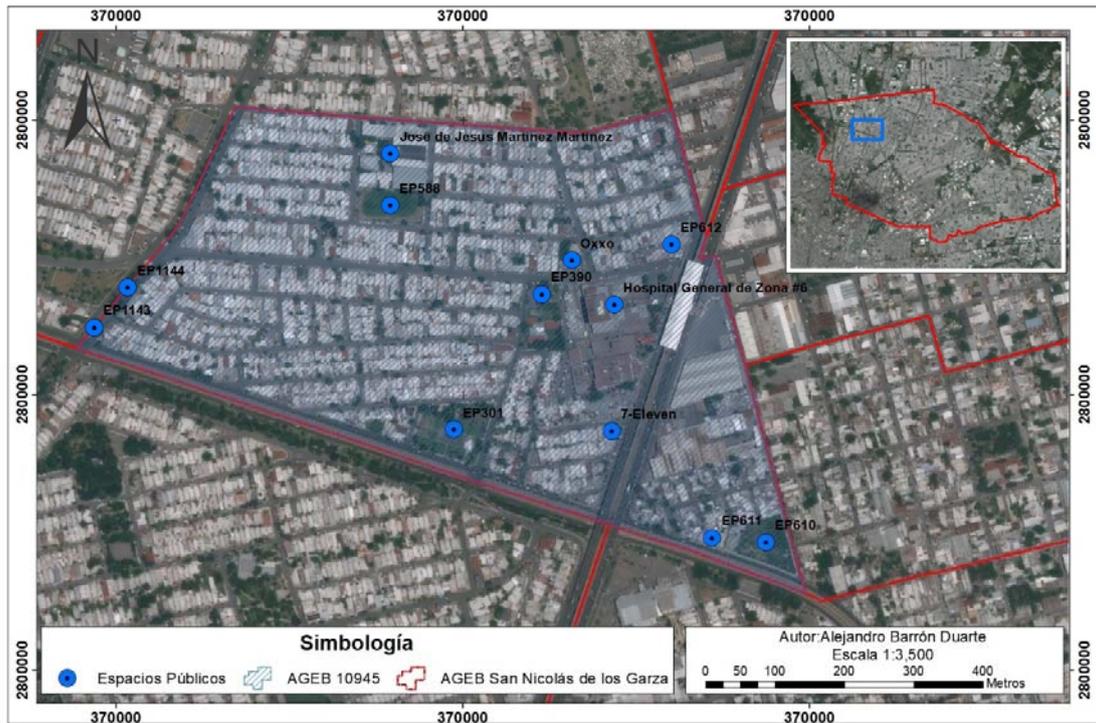


Figura 42. Espacios públicos presentes en AGEB 10945.

Tabla 25. Promedio de WEF presentes en AGEB 10945.

EP	WEF
Hospital General de Zona #6	6.52
Oxxo	5.36
7-Eleven	7.56
EP301	4.03
EP390	5.60
EP588	4.06
EP610	4.40
EP611	4.39
EP612	7.84
José de Jesús Martínez Martínez	3.53

EP1143	2.85
EP1144	2.96
Promedio	4.93

La segunda parte del proceso calcula la densidad poblacional a través de áreas de influencia de las paradas/estaciones de cada modo de transporte sobre 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 a través de la capa de vialidades (Figura 43, Tabla 26 y Tabla 27).

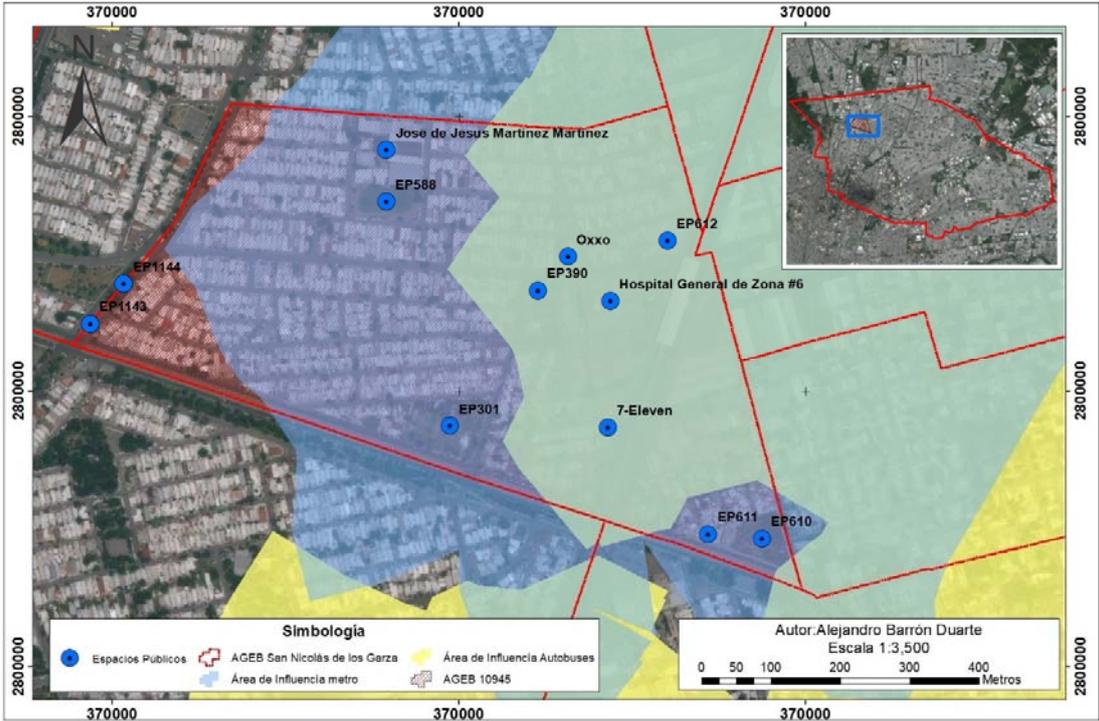


Figura 43. Cálculo de densidad poblacional considerando áreas de influencia, manzanas y población presente en AGEB 10945.

Tabla 26. Obtención de densidad poblacional mediante áreas de influencia de para metro.

Clave AGEB	Población AGEB	Área AGEB	Área Manzana (m ²)	Población Manzana	Área de influencia (m ²)	Proporción (%)	Población Estimada	Densidad área de influencia (Personas/km ²)	Densidad AGEB (Personas/km ²)
1904600010945	-	-	5187.919	85	5187.919	1.00	85	-	-
1904600010945	-	-	4411.961	61	4411.961	1.00	61	-	-
1904600010945	-	-	811.417	0	811.417	1.00	0	-	-
1904600010945	-	-	33460.589	195	33460.589	1.00	195	-	-
1904600010945	-	-	2213.280	35	2213.280	1.00	35	-	-
1904600010945	-	-	4086.142	78	4086.142	1.00	78	-	-
1904600010945	-	-	8436.631	0	8436.631	1.00	0	-	-
1904600010945	-	-	5367.053	93	5367.053	1.00	93	-	-
1904600010945	-	-	1325.667	64	1325.667	1.00	64	-	-
1904600010945	-	-	1515.722	66	1515.722	1.00	66	-	-
1904600010945	-	-	1455.783	46	1455.783	1.00	46	-	-
1904600010945	-	-	1565.255	89	1565.255	1.00	89	-	-
1904600010945	-	-	1845.967	53	1845.967	1.00	53	-	-
1904600010945	-	-	6578.778	0	6578.778	1.00	0	-	-
1904600010945	-	-	5147.970	114	4999.803	0.97	111	-	-
1904600010945	-	-	7696.340	88	202.700	0.03	2	-	-
1904600010945	-	-	6395.361	154	6395.361	1.00	154	-	-
1904600010945	-	-	7061.722	156	7061.722	1.00	156	-	-
1904600010945	-	-	8100.391	166	8100.391	1.00	166	-	-
1904600010945	-	-	7488.891	125	7488.891	1.00	125	-	-
1904600010945	-	-	2127.427	41	2127.427	1.00	41	-	-
1904600010945	-	-	2388.826	66	2388.826	1.00	66	-	-
1904600010945	-	-	2581.958	39	2581.958	1.00	39	-	-
1904600010945	-	-	5673.205	129	2519.169	0.44	57	-	-

1904600010945	-	-	8745.854	139	3973.014	0.45	63	-	-
1904600010945	-	-	4767.387	80	3870.527	0.81	65	-	-
1904600010945	-	-	7137.513	57	7137.513	1.00	57	-	-
1904600010945	-	-	7442.775	81	7442.775	1.00	81	-	-
1904600010945	-	-	7297.206	103	7297.206	1.00	103	-	-
1904600010945	-	-	9285.156	97	9285.156	1.00	97	-	-
1904600010945	-	-	8905.991	143	8905.991	1.00	143	-	-
1904600010945	-	-	8244.206	154	8244.206	1.00	154	-	-
1904600010945	-	-	7227.751	155	7227.751	1.00	155	-	-
1904600010945	-	-	6974.239	17	6974.239	1.00	17	-	-
1904600010945	-	-	9271.578	121	9271.578	1.00	121	-	-
1904600010945	-	-	7398.210	107	7398.210	1.00	107	-	-
1904600010945	-	-	9241.827	157	9241.827	1.00	157	-	-
1904600010945	-	-	14511.161	0	14511.161	1.00	0	-	-
1904600010945	-	-	9221.808	151	8764.472	0.95	144	-	-
1904600010945	-	-	8230.827	144	6535.144	0.79	114	-	-
1904600010945	-	-	7379.368	123	5178.943	0.70	86	-	-
1904600010945	-	-	8461.791	119	8461.791	1.00	119	-	-
1904600010945	-	-	36599.021	81	36599.021	1.00	81	-	-
Total	3972	427970.341	319267.925	972	298448.938	0.70	3646	12216	9281

Tabla 27. Obtención de densidad poblacional mediante áreas de influencia de para metro.

Clave AGEB	Población AGEB	Área AGEB	Área Manzana (m ²)	Población Manzana	Área de influencia (m ²)	Proporción (%)	Población Estimada	Densidad área de influencia (Personas/km ²)	Densidad AGEB (Personas/km ²)
1904600010945	-	-	5187.919	85	2296.354	0.44	38	-	-
1904600010945	-	-	811.417	0	811.417	1.00	0	-	-
1904600010945	-	-	33460.589	195	33460.589	1.00	195	-	-
1904600010945	-	-	2213.280	35	263.830	0.12	4	-	-
1904600010945	-	-	4086.142	78	39002.886	0.96	75	-	-
1904600010945	-	-	5367.053	93	5367.053	1.00	93	-	-
1904600010945	-	-	1325.667	64	113.106	0.09	5	-	-
1904600010945	-	-	1565.255	89	353.019	0.23	20	-	-
1904600010945	-	-	1845.967	53	1845.967	1.00	53	-	-
1904600010945	-	-	6578.778	0	216.179	0.03	0	-	-
1904600010945	-	-	8100.391	166	31.217	0.00	1	-	-
1904600010945	-	-	7488.891	125	1087.363	0.15	18	-	-
1904600010945	-	-	7137.513	57	7137.513	1.00	57	-	-
1904600010945	-	-	7442.775	81	7442.775	1.00	81	-	-
1904600010945	-	-	7297.206	103	7297.206	1.00	103	-	-
1904600010945	-	-	9285.156	97	8670.911	0.93	91	-	-
1904600010945	-	-	8905.991	143	5094.703	0.57	82	-	-
1904600010945	-	-	8244.206	154	4839.088	0.59	90	-	-
1904600010945	-	-	7227.751	155	4327.329	0.60	93	-	-
1904600010945	-	-	6974.239	17	6974.239	1.00	17	-	-
1904600010945	-	-	7398.210	107	3498.968	0.47	51	-	-
1904600010945	-	-	36599.021	81	36599.021	1.00	81	-	-
Total	3972	427970.341	184543.416	1978	141630.733	0.33	1248	8812	9281

- **Nota: Debido a que dentro de la AGEB no hay área de influencia de la Ecovía, las densidades son 0.**

Por último, se debe calcular el índice 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.

Para la AGEB 10945 será la siguiente (tabla I):

Tabla 28. Valores obtenidos para IATP mediante ecuación 5.

Clave	D_{AGEB}	WEF (Promedio)	$D_{Bautobuses}$	IATP (Autobuses)	D_{Bmetro}	IATP (Metro)	$D_{Beovía}$	IATP (Ecovía)	Σ IATP
10945	9281	4.93	8812	4.68	12216	6.48	0	4.93	16.10

- Autobuses:

$$IATP_{AGEB10945} = \left(\frac{8812}{9281} \right) * 4.93 = 4.68$$

- Metro:

$$IATP_{AGEB10945} = \left(\frac{12216}{9281} \right) * 4.93 = 6.48$$

- Ecovía:

$$IATP_{AGEB10945} = \left(1 + \frac{0}{9281} \right) * 4.93 = 4.93$$

En la tabla 28 se observan los rangos de clasificación del IATP, por lo que con un IATP igual a 16.10 para la AGEB 10945, esta cuenta con una accesibilidad considerada como *“Buena”*.