Relación entre PM₁₀ y Condiciones de Accesibilidad Territorial Urbana en Manizales (Colombia)

Diego A. Escobar⁽¹⁾, Sebastian Martínez⁽¹⁾ y Carlos A. Moncada⁽²⁾

(1) Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Colombia.

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Colombia.

(e-mail: daescobarga@unal.edu.co; semartinezca@unal.edu.co; camoncadaar@unal.edu.co).

Recibido May. 24, 2016; Aceptado Jul. 29, 2016; Versión final Ago. 15, 2016, Publicado Dic. 2016

Resumen

Se ha estudiado la relación existente entre la concentración de material particulado PM₁₀ y las condiciones de accesibilidad territorial urbana con datos provenientes de seis estaciones de monitoreo, ubicadas geoespacialmente en la ciudad de Manizales, en Colombia. Se realiza interpolación de los datos de la estación por el método Ponderación Inversa de la Distancia (IDW, Inverse Distance Weigthing) y se relaciona con el cálculo de la Accesibilidad Media Global, que se obtiene de acuerdo a un modelo geo estadístico (Kriging Ordinario). Se obtuvieron resultados concluyentes sobre la relación entre los puntos de influencia de la concentración de material particulado con los sectores que requieren mayores y menores tiempos medios de viaje. Finalmente se analiza la población, área y vivienda que se encuentran afectadas por concentraciones de material particulado en los tiempos promedios de viajes en la totalidad de la ciudad.

Palabras clave: IDW; PM₁₀; monitoreo; accesibilidad; geo estadística

Relationship between PM₁₀ and Conditions of Urban Territorial Accessibility in Manizales (Colombia)

Abstract

The relationship between particulate matter PM₁₀ and the conditions of urban territorial accessibility are studied. The information analyzed includes data from six monitoring stations of the Manizales 'city in Colombia. The Inverse Distance Weigthing (IDW) method of interpolation is applied to the stations' data to calculate the influence of the particulate matter on the city area. The interpolation is related with calculations of the Global Accessibility Average obtained from a Kriging Ordinary geostatistical model. Conclusive results were obtained about the relation between PM₁₀ concentrations with sectors that require higher or lower values of mean travel time. Finally, areas, housing and population affected by particulate matter concentrations are analyzed in their average travel time of whole city.

Keywords: IDW; PM₁₀; monitoring, accessibility, geostatistics

INTRODUCCIÓN

Manizales se localiza en la región centro occidente de Colombia, sobre la cordillera central (2150 m.s.n.m.); en ésta, habitan aproximadamente 410,000 personas incluyendo el municipio contiguo de Villamaría – Caldas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), el contar con aire limpio y de buena calidad es un requisito básico en la búsqueda del bienestar y preservación de la salud de los seres humanos. Sin embargo, la contaminación del aire de las ciudades sigue representando una amenaza importante para la salud mundial. Está comprobado que la conurbación de Manizales y Villamaría actualmente es vulnerable dada la inhalación del contaminante en forma de Material Particulado - PM₁₀ (Periódico el Tiempo, 2016), siendo clasificada como la tercer área conurbada más contaminada de Colombia. En la Figura 1 se observa la distribución geoespacial de las estaciones de monitoreo de PM₁₀ en el sector de estudio.

La concentración de Material Particulado (PM₁₀) se le atribuye a las partículas cuyo diámetro es menor a 10 micras (Cortes J. de la Paz, 2013), las cuales representan uno de los contaminantes de mayor impacto y perjuicio a nivel mundial; dado que es una de las causas asociadas a la producción de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en los seres humanos. Dicho contaminante se genera en cierta medida por la combustión de fosiles que regularmente producen los vehículos que circulan en las ciudades; de acuerdo con esto, la concentración de contaminantes es un indicador de la disminución de la calidad del aire (CONPES 3550, 2008) en las áreas urbanas. Una etapa fundamental en este tipo de investigaciones es la vigilancia y control de los contaminantes para ciudades en desarrollo, donde se proporcionan indicativos de donde serán los lugares convenientes para ubicar las estaciones de monitoreo o donde hay sobrevaloración de sitios estudiados. En este sentido, la evaluación de la concentración de material particulado se constituye como una de las prioridades, si se desea que el aire respirable sea predominantemente limpio en un lugar específico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Actualmente, el conocimiento de contaminantes PM₁₀ para la ciudad de Manizales es bastante limitado dada la carencia de estaciones de monitoreo en zonas de gran participación industrial y de tráfico pesado (Gonzalez, 2012). Diversos estudios han demostrado el fuerte impacto asociado a la concentración de material particulado en las vías respiratorias y esto a su vez, asociado con el aumento de niveles de mortalidad y morbilidad en la población (Gupta et al., 2007). Las emisiones de material particulado se combinan comúnmente con dióxido de azufre (SO₂) y así representan un grave riesgo para la salud de la población, ya que estas partículas ingresan libremente por las vías respiratorias ocasionando enfermedades (Gómez et al., 2003).

Fig. 1. Estaciones de monitoreo PM₁₀ en Manizales

Por otra parte, se involucra el análisis de accesibilidad territorial urbana para detallar la infraestructura vial y la movilización vehicular que aporta de manera significativa a la contaminación en las principales ciudades. La accesibilidad territorial urbana debe ser reconocida como una necesidad primaria (Halden, 2011), pues por medio de ésta, es posible vislumbrar las variadas posibilidades que existen para desarrollar actividades (salud, educación, empleo, etc.) relacionándose con la forma como se movilizan los vehículos que usualmente generan concentraciones de material particulado. Lo anterior está directamente asociado con que la mayoría de los países desarrollados han definido como uno de los objetivos en transporte, el incremento del acceso a servicios y necesidades básicas primarias buscando disminuir cada vez más la diferencia en las clases sociales (Jones, 2011).

A lo largo de la historia del planeamiento urbano y regional, el concepto de “accesibilidad” ha sido bastante importante, se conocen aplicaciones desde la segunda década del siglo pasado, siendo usado para estudios de planeación económica regional y de localización (Batty, 2009). Este término, ha sido estudiado en otros campos de la ciencia como: turismo (Kastenholz et al., 2012), análisis demográfico (Kotavaara, 2011), análisis de cohesión social (López et al., 2008), sostenibilidad (Vega, 2011), desarrollo económico (Mackinnon et al., 2008), operatividad de modos de transporte (Escobar & García, 2012), servicios bibliotecarios (Higgs, 2013), y en áreas del conocimiento que superan la barrera de lo tangible como las redes sociales (Sailer et al., 2012). Por otra parte, a través de un análisis de accesibilidad es posible determinar la facilidad de comunicación que existe, o puede existir, entre diferentes sectores, comunidades o actividades, a través del uso de uno o variados modos de transporte (Morris et al. 1978).

Usando un SIG y mediante la aplicación de geoestadística, se generaron las curvas de accesibilidad territorial urbana, las cuales son base para el análisis de cobertura espacial con relación a las variables área, población y viviendas. La facilidad de comprensión de la información que proporcionan los SIG, se sustenta en el uso de algoritmos (Zhang et al., 2009) como el de caminos mínimos, por ejemplo. Un análisis geoespacial permite entonces conocer las características de accesibilidad ofrecidas por una red de transportes, que a su vez es la que proporciona acceso a las actividades a diferentes grupos de individuos. En Latinoamérica, el término accesibilidad ha sido poco abordado, desconociéndose el inmenso potencial que posee este tipo de metodologías, a pesar de ello, actualmente se poseen ejemplos reales de aplicación de análisis de accesibilidad a escala regional (Escobar et al., 2013) y a escala urbana (Botero et al., 2011; Escobar et al., 2012; Escobar et al., 2015; Younes et al., 2016). En los siguientes capítulos se aborda la metodología aplicada, el modelo de medición, se discuten los principales resultados de la investigación y se presentan las conclusiones.

METODOLOGÍA

La Figura 2 muestra un esquema conceptual de la metodología aplicada, la cual se resume en cuatro etapas principales, a saber: 1) Actualización y validación de las características operativas de la red de infraestructuras del transporte para los cálculos de accesibilidad territorial urbana y recopilación de los datos anuales para la concentración de Material Particulado en las estaciones de monitoreo; 2) Geoespacialización de las estaciones de monitoreo y valor promedio anual para los años 2012, 2013, 2014 y 2015 de PM₁₀ (µg/m³); 3) Cálculo de la Accesibilidad territorial urbana; y 4) Análisis de Relación entre Accesibilidad Territorial Urbana y Material Particulado. A continuación se describen de manera detallada cada una de las etapas de la metodología:

Etapas 1. Actualización y validación de características operativas de la red de infraestructuras del transporte para los cálculos de Accesibilidad Global y recolección y/o copilación de los datos anuales para la concentración de material particulado en las estaciones de monitoreo: En esta etapa se tomó como información primaria la red de infraestructuras del transporte de la ciudad de Manizales (pública y privada), así mismo, se instalaron equipos GPS en diferentes modos (auto, taxi, motocicleta, camión y transporte público urbano). Se contó con una base de 45 automotores pertenecientes a los diferentes modos, los cuales tomaron más de 18 millones de datos de posicionamiento global durante seis meses consecutivos, información que fue base para la validación de la red. El grafo validado se usó para el cálculo de la Accesibilidad territorial urbana a partir de los datos de velocidad de operación establecidos en el Plan de Movilidad vigente (Alcaldía de Manizales, 2011) mediante el cálculo de caminos mínimos entre cada par de nodos; entendiéndose como camino mínimo, el “la ruta más corta”, medida en tiempo, entre cada par de puntos origen-destino. El grafo actual está compuesto por más de 13,000 arcos y más de 8,750 nodos.

Posteriormente, se tomó información pública de las estaciones de monitoreo, de las cuales cuatro (4) son operadas por la organización Corpocaldas (Velasco, 2013, 2014, 2015) y las dos (2) restantes operadas por la Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales; las seis (6) estaciones de monitoreo suministraron datos en formato .csv con valores mensuales de PM₁₀ (µg/m³). Con dicha base de datos, se logró calcular un valor representativo anual, para luego comparar con la normativa vigente Colombiana.

Fig. 2. Metodología aplicada

Tabla 1. Evolución de los límites máximos permisibles para PM₁₀ de acuerdo a la normativa colombiana (Res-610, 2010), (Res-601, 2006). TE: Tiempo de exposición

Año	Límite máximo permisible PM ₁₀ (µg/m ³)		Norma aplicada
	TE anual	TE 24 horas	
2006 a 2008	70	150	Resolución 601 de 2006
2009 y 2010	60	150	Resolución 601 de 2006 y 610 de 2010
2011 (Actual)	50	100	Resolución 610 de 2010 (OI-2. OMS)

Etapas 2. Geoespacialización de las estaciones de monitoreo y valor promedio anual para los años 2012, 2013, 2014 y 2015 de PM₁₀ (µg/m³): La segunda etapa se relaciona con la georeferenciación de las estaciones de monitoreo; a partir de la información recolectada, se calculan los valores para cada año de la concentración de material particulado anual. Se seleccionó para el caso Manizales realizar la interpolación del método del Ponderación Inversa de la Distancia o *IDW* (*Inverse Distance Weighting*), método geoestadístico que permite realizar cálculos de interpolación para escasos datos de monitoreo (Phatarapon et al., 2015); se pasó al uso del software ArcGIS® y la ayuda de las herramientas internas de Spatial Analyst® y Geostatistical Analyst® del aplicativo ArcMap® de ESRI.

Etapas 3. Cálculo de la Accesibilidad Territorial Urbana: La tercera etapa es la relacionada con el cálculo de la Accesibilidad Territorial Urbana ofrecida por la red de infraestructuras de transporte actual en la ciudad de Manizales; ésta accesibilidad se analizó a partir del vector de tiempo medio de viaje (Tvi), obteniéndose las curvas isócronas que para los diferentes sectores de la ciudad se obtienen al usarse la red de infraestructuras del transporte de la ciudad.

Etapas 4. Análisis de Relación entre Accesibilidad Territorial Urbana y Material Particulado: En esta etapa se calcula la intersección entre las interpolaciones realizadas para PM₁₀ de un modelo determinista (IDW), versus la interpolación realizada en el modelo geoestadístico de Kriging ordinario para el caso de los tiempos medios de viaje; este análisis permite establecer la relación entre la concentración de material particulado y las curvas isócronas ofrecidas por la red de infraestructuras del transporte, en intervalos de acceso cada 5 minutos.

FORMULACIÓN DEL MODELO

Para el cálculo de la concentración de material particulado PM₁₀ en el área de estudio, se establece el modelo determinista que es utilizado para la interpolación multivariada con un conjunto de puntos dispersos conocidos. Los valores asignados a los puntos con valor desconocido se calculan con una media ponderada de los datos disponibles entre los puntos conocidos; siguiendo las expresiones (1) y (2) y relacionando las variables de entrada según la variable a interpolar. El método recurre a un promedio ponderado aplicado según la inversa distancia a cada punto conocido (Phatarapon et al., 2015).

$$u(x) = \sum_{i=0}^N \frac{w_i(x)u_i}{\sum_{j=0}^N w_j(x)} \quad (1)$$

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (2)$$

Donde, los valores de $u(x)$ son los puntos desconocidos que son estimados por el método, $w_i(x)$ son funciones de ponderación propias del modelo determinístico utilizado IDW, u_i son los valores de los puntos conocidos de las estaciones de monitoreo, X es la interpolación para los puntos desconocidos, X_i es la interpolación para los puntos conocidos, d es la distancia de los puntos conocidos X_i a los puntos desconocidos X ; N son los números de puntos conocidos y p son los parámetros de potencia utilizada en la interpolación que será el principal factor de estimación de IDW. Los valores p se determinan mediante la minimización del error que será el valor estadístico que se calcula por medio de la validación cruzada. En la validación cruzada se elimina cada punto promedio y comparado con el valor pronosticado para cada ubicación; por consiguiente será la potencia óptima el valor que proporcione el menor error en la interpolación.

Para el cálculo de la accesibilidad territorial urbana desde todos los nodos hacia todos los nodos de la red de infraestructura de transportes, se tienen los datos de velocidad de operación establecidos en el Plan de Movilidad vigente (Alcaldía de Manizales, 2011), lo cual permitió calcular los tiempos medios de viaje para cada segmento de red. El modelo que a continuación se formula, se basa en el propuesto por Shen (2002). De acuerdo con lo anterior, la Accesibilidad Territorial Urbana se analizó a partir del vector tiempo medio de viaje (Tv_i), el cual representa el tiempo promedio de viaje desde el nodo i hasta los demás nodos de la red. En el cálculo se utilizó un algoritmo del SIG que permite calcular la menor impedancia (Caminos Mínimos) entre un nodo específico y los demás nodos de la red, conformando una matriz unimodal de impedancias. A través de esta matriz y conociendo la velocidad de operación promedio de cada arco, se elaboró la matriz de tiempos promedios mínimos de viaje, en la que se minimiza el tiempo medio de viaje entre todos y cada uno de los nodos que conforman la red en estudio. Una vez determinada la matriz de tiempos promedios mínimos de viaje, se obtuvo el vector de tiempo promedio de viaje Tv_i (Ver expresión (3)). Donde Tv_i = tiempo de viaje mínimo promedio entre el nodo i y los demás nodos de la red n = número de nodos de la red.

$$\overline{T}_{vi} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{vi}}{(n-1)}, \text{ siendo } i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (3)$$

Donde, T_{vi} = tiempo de viaje mínimo promedio entre el nodo i y los demás nodos del grafo; n = número total de nodos del grafo.

El vector de Tiempos Mínimos de Viaje está representado por una matriz de tamaño $[n_x 1]$, la cual se relaciona con las coordenadas (longitud y latitud) de cada nodo de la red generándose una nueva matriz de tamaño $[n_x 3]$. El modelo geoestadístico Kriging ordinario con semivariograma lineal fue el escogido para la predicción de la variable TMV a lo largo y ancho de la ciudad. Kriging Ordinario es un método geoestadístico utilizado para la estimación de valores desconocidos acerca de valores conocidos; con la creación de un semivariograma a partir de los puntos conocidos y con relación al parámetro de ponderación de semivarianza media y así calcular los puntos desconocidos; la ecuación fundamental y básica del método donde z será el valor estimado para los puntos de interpolación es (Ver expresión (4)).

$$Z_0 = \sum_{i=1}^S Z_x w_x \quad (4)$$

Donde Z_0 es el valor a estimar, Z_x son los valores de los puntos conocidos, W_x es la correlación o pesos de los puntos conocidos respecto a los puntos y S son los números de puntos conocidos.

Para la semivarianza media se tiene que h es la distancia entre puntos, n son números pares de puntos que se definen según la distancia y z son los valores de puntos conocidos (Phatarapon et al., 2015) (Ver expresión (5)).

$$f(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

La metodología aplicada toma las velocidades de operación promedio de los arcos que componen la red, lo cual se establece como un efecto simplificador con relación a la aplicación del modelo propuesto, ya que se está homogenizando el tiempo medio de viaje de todos los modos de transporte en un solo valor; esta situación debe tenerse en cuenta al momento de tomarse los resultados del presente modelo como base en procesos de planificación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para mayor claridad en la presentación, los resultados se presentan y analizan en tres bloques: i) análisis de concentración de pm₁₀ en la ciudad de Manizales; ii) accesibilidad territorial urbana ofrecida por la red vial actual; y iii) análisis comparativo de accesibilidad territorial urbana y PM₁₀.

Análisis de Concentración de PM₁₀ en la ciudad de Manizales.

En la Tabla 2 se muestran los valores calculados para cada año uno de los años de monitoreo y las coordenadas específicas para cada estación, posteriormente, se realizó la interpolación de los valores de concentración con la ayuda del software ArcGIS® mediante las herramientas geoestadísticas de cálculo para aplicar el modelo determinista de IDW.

Tabla 2. Valores de PM10 anuales para cada estación y su ubicación específica.

Id	Nombre Estación	Años				Longitud	Latitud
		2012	2013	2014	2015		
		PM ₁₀ (µg/m ³)					
1	Estación Liceo	45	45	37	40	75°30'38,06" W	5°4'5,12" N
2	Estación Gobernación	29	25	24	24	75°31'1,61" W	5°4'6,28" N
3	Estación UN Palogrande	27	23	22	30	75°29'28,03" W	5°3'23,87" N
4	Estación Milán	34	38	31	34	75°29'1,25" W	5°3'0,51" N
5	Estación Agustinos	32	26	26	28	75°31'11,14" W	5°4'11,38" N
6	Estación UN Nubia	28	28	19	24	75°28'21,85" W	5°1'51,84" N

De acuerdo con los parámetros de interpolación descritos anteriormente, se pueden evidenciar los resultados en las figuras con las interpolaciones expresadas gráficamente para cada uno de los años en cuestión, las cuales se muestran en la Fig. 3. A partir de los cálculos obtenidos, se identifica una significativa variación en el análisis año tras año, observándose una evolución ascendente en términos de concentración de Material Particulado. Esto, considerando la normativa colombiana cuyo límite permisible actual es de 50 (µg/m³) el cual ubica a la ciudad de Manizales dentro de los parámetros legales vigentes en Colombia. No obstante, comparando estos valores obtenidos con los reportados en ciudades de mayor población, se detecta la existencia de un problema de emisiones de material particulado que debería llamar la atención de las autoridades locales.

Según fuentes de la OMS (Organización Mundial de la Salud) de acuerdo con sus directrices establecieron valores para los diferentes rangos de material particulado como lo son para PM_{2.5} de 10 µg/m³ de media anual y 25 µg/m³ de media en 24 horas. A su vez, fijaron un valor para PM₁₀ de 20 µg/m³ de media anual y de 50 µg/m³ de media en 24 horas (Centro de Prensa OMS, 2014). En la figura 4 se observan las variaciones de la concentración de material particulado en un contexto mundial de diferentes ciudades y su comparación con el registro en la ciudad de Manizales para el año 2012.

Accesibilidad Territorial Urbana ofrecida por la red vial actual.

Se realizó el cálculo de accesibilidad territorial urbana ofrecida por la red de infraestructuras del transporte de la ciudad de Manizales, a partir de la aplicación de un modelo geoestadístico (Kriging Ordinario) el cual

tiene como variable a interpolar z (tiempo promedio de viaje). A esto, se le adicionan los valores de coordenadas espaciales de acuerdo con cada uno de los puntos para así realizar la ponderación en caminos mínimos.

Fig. 3. Concentración de material particulado para cada uno de los años en estudio; a. 2012, b. 2013, c. 2014 y d. 2015

Fig. 4. Variación de PM_{10} en ciudades principales del mundo en relación a Manizales. Datos de WHO (Organización Mundial de la Salud).

En la Fig. 5 se observan los resultados de Accesibilidad Territorial Urbana para el año 2015; se observa un rango de variación de las curvas de entre 25 minutos y 70 minutos; la curva de 25 minutos se localiza a lo largo de un importante corredor de movilidad, así como en un sector donde confluyen corredores de movilidad transversales (sentido occidente – oriente) y troncales (sentido norte – sur). Así mismo, se

identifica que los mayores tiempos medios de viaje se dan hacia la periferia, con mayores tiempos al occidente que al oriente. La configuración de las curvas isócronas que expresan la accesibilidad territorial urbana, representan los tiempos medios de viaje que deben ser invertidos por los habitantes para acceder a las diferentes zonas de la ciudad de acuerdo a las características físicas y operativas de la red de infraestructuras del transporte (Zhang i Gao, 2009).

Fig. 5. Accesibilidad Territorial Urbana para la ciudad de Manizales de acuerdo a la red de infraestructuras del transporte para el año 2015.

Análisis comparativo de Accesibilidad Territorial Urbana y PM_{10} .

De acuerdo con los patrones de desplazamiento de las personas en la ciudad de Manizales, y según las condiciones operativas de la red de infraestructuras del transporte, se calculó la accesibilidad territorial urbana con el fin de encontrar la relación entre tiempos medios de viaje y los valores registrados de PM_{10} . Los valores de PM_{10} interpolados se intersecaron con las curvas de accesibilidad territorial urbana, para atribuir los valores de área, población y vivienda (Alcaldía de Manizales, 2011) a los rangos de PM_{10} y tiempos promedios de viaje. De acuerdo con lo anterior, se graficaron los porcentajes acumulados de área, población y vivienda (Alcaldía de Manizales, 2011) versus los tiempos medios de viajes; luego se compararon cada uno de los intervalos de tiempo con valores interpolados de PM_{10} ; en la Fig. 6 se observa gráficamente el comportamiento de la variable con respecto al área, población y vivienda con los tiempos medios de viaje.

En la Fig. 7 se observan los intervalos de tiempos medios de viaje relacionándolos con cada uno de los años interpolados de PM_{10} . De manera general, los promedios de PM_{10} tuvieron su máximo valor para cada intervalo de tiempo en el año 2012, y se mantuvo de manera decreciente hasta el año 2014, para finalmente en el año 2015 volverse ascendente y ubicarse en cierta medida con valores menores o iguales a los hallados en el año 2013. De acuerdo con los valores para cada año en todos los rangos de tiempos, se cumple la normativa colombiana, pero difieren en la normativa internacional promovida por la Organización Mundial de la Salud (Periódico el Tiempo, 2016); los registros tenidos en cuenta para el presente estudio arrojan que la concentración de material particulado para la ciudad de Manizales se mantiene estable entre rangos de 25 a 35 ($\mu g/m^3$), siendo uno de los principales contaminantes y una de las principales causas en la disminución de la calidad del aire para la ciudad de Manizales (Giraldo, 2016).

Posteriormente se comparan los valores de la Fig. 6, donde se tiene que para un porcentaje de cobertura para población y vivienda del 50%, se deben invertir de 25 a 30 minutos de tiempo medio de viaje, por otra parte, el 50% del área se encuentra cubierta por tiempos de viaje de 30 a 35 minutos. Luego se trasladan los rangos de tiempo a la Fig. 7 siendo posible comparar las concentraciones de PM_{10} registradas y los valores de tiempos medios de viaje para cada uno de los años estudiados.

Fig. 6. Porcentaje acumulado de cobertura de población, área y vivienda.

Fig. 7. Concentración de material particulado en relación a la curvas de tiempo promedio de viaje.

Para el año 2015, se tiene que para los 25 minutos en tiempo medio de viaje, el valor promedio de material particulado es mayor que para un tiempo de 35 minutos; para 50% del área cubierta que está en 35 minutos, se tiene un valor promedio de PM_{10} de $28 \mu g/m^3$; el 50% de la población y vivienda se cubre con un tiempo promedio de viaje inferior o igual a los 30 minutos para los cuales se registran valores de PM_{10} entre 29 y $33 \mu g/m^3$ con referencia al año 2015; mostrando valores acordes a la normativa vigente colombiana; pero de acuerdo la norma internacional estos valores sobrepasan la concentración máxima anual permitida que es de $20 \mu g/m^3$ (Centro de Prensa OMS, 2014).

El parque automotor en la ciudad de Manizales está aumentando a una tasa promedio del 11% anual y a su vez, el uso del vehículo privado como modo de transporte llega al 37% (Motocicleta 27% y Automóvil 10%) (Unimédios, 2015). Teniendo en cuenta que los vehículos de combustión interna constituyen uno de los mayores causantes de valores elevados en la propagación del material particulado (Giraldo, 2016) y que la cantidad de emisiones dependen en cierta medida de la velocidad de operación (Keuken et al., 2010), los resultados arrojados por la presente investigación se consieran un comienzo importante para realizar un análisis más detallado, en el cual se estudie la influencia de la velocidad en la concentración de material particulado para la ciudad de Manizales.

DISCUSIÓN FINAL

Para los tiempos promedio de viaje pronosticados por el modelo geoestadístico y relacionados en toda la red de infraestructura vial, se obtuvo que en los sectores que refieren menores tiempos (30 minutos o menos), se observan los rangos donde se presentan mayores niveles de contaminación, lo cual explicaría

la gran influencia por parte de los vehículos que circulan en la densa red del centro de la ciudad; de igual forma, teniendo en cuenta el mismo parámetro de medida, para los tiempos promedio de viaje mayores a 60 minutos, los cuales se ubican en la periferia de la ciudad (sur, noroccidente), se registran los valores más bajos de concentración PM₁₀, con baja desviación en relación a los valores altos; la baja dispersión de los datos analizados de la concentración de material particulado para un amplio rango de tiempos medios de viaje, sugiere que no existe una relación directa entre estas dos variables.

Se deberían reubicar las estaciones de monitoreo con el fin de cubrir zonas de la vía panamericana (sur) y el sector industrial (noroccidente), y así mejorar la regulación, vigilancia y control frente a la medida ponderada de PM₁₀. Una mejor distribución de las estaciones de monitoreo sería una acción eficiente, en relación al área en estudio y a los modelos deterministas utilizados, ya que proporcionarían mayor confiabilidad en los valores o rangos arrojados para los lugares específicos de relevancia, como lo son zonas de la vía panamericana donde se concentra gran cantidad de flujo vehicular y la zona industrial de la ciudad (El sector de Maltería) donde operan la mayoría de las fábricas de la ciudad.

Por otro lado, se encontró que en las zonas donde se concentra el tráfico pesado, como la zona industrial del sector de Maltería, la vía panamericana y la zona entre los barrios Fátima y Malhabar, que es un tránsito obligado para un porcentaje significativo del transporte público, carecen de estaciones que midan la concentración del material particulado, lo cual produce una deficiencia en el cálculo de valores para estas zonas; por consiguiente se propone implementar estaciones de monitoreo en estos lugares, para facilitar una mejora en la evaluación y estudio de los contaminantes para la ciudad de Manizales.

Es de resaltar que la concentración de material particulado considera las emisiones de todo tipo de partículas de diámetro menor a diez micras, es por ello que también se deberá tener en cuenta que en los valores del documento se encuentran intrínsecas las concentraciones originadas por la cercanía al Volcán Nevado del Ruiz, el cual presenta una actividad frecuente, ya que las partículas viajan a través del aire y alguna de ellas seguramente se captaron en las estaciones de monitoreo.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos, la ciudad de Manizales, cumple con la normativa vigente colombiana, pero reporta resultados deficientes con relación a los parámetros mundiales establecidos por la Organización Mundial de la Salud.

Se propone la reubicación de estaciones de monitoreo que permitan cubrir zonas de la vía panamericana (sur) y la zona industrial (noroccidente), y así mejorar la regulación, vigilancia y control frente a la medida ponderada de PM₁₀.

Para los tiempos promedio de viaje establecidos por el modelo geoestadístico, se obtuvo que en los sectores con menores tiempos (30 minutos o menos), se observan los rangos donde se presentan mayores niveles de contaminación.

Para el caso de la ciudad de Manizales los sectores con menores tiempos medios de viaje (más accesibles) se encuentran en la zona centro, lo cual podría explicar, en algún porcentaje, la gran influencia por parte de los vehículos que circulan en la densa red vial del centro de la ciudad.

En las zonas donde se concentra el tráfico pesado, como la zona industrial del sector de Maltería, la vía panamericana y la zona entre los barrios Fátima y Malhabar, carecen de estaciones que midan la concentración del material particulado, situación que no permite tener resultados más aproximados a la realidad en sectores donde la influencia de este tipo de automotores seguramente es de gran importancia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, quienes se vincularon al mismo a través del semillero de investigación en Movilidad Sostenible.

REFERENCIAS

Alcaldía de Manizales, Secretaría de Tránsito y Transporte, *Plan de Movilidad de la ciudad de Manizales 2010 – 2040*. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. Manizales, Colombia (2011)

Batty, M., *Accessibility: in search of a unified theory*, doi: 10.1068/b3602ed, Environment and Planning B: Planning and Design, 36, pp. 191-194, (2009)

Botero, R., Murillo, J. y Jaramillo, C., *Decision strategies for evaluating pedestrian accessibility*, <http://www.scielo.org.co/>, ISSN: 0012-7353, Revista Dyna, 78 (168), pp. 28-35 (2011)

Centro de Prensa OMS., *Calidad del aire (exterior) y salud.*, (en la web: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/> acceso: 24 de abril 2016), (2014)

CONPES 3550., Lineamientos para la formulación de la política integral de salud ambiental con énfasis en los componentes de calidad de aire, calidad de agua y seguridad química en Colombia. Bogotá, Colombia, (2008)

Cortés, J., *Evaluación de la contaminación atmosférica en el aire ambiente de Manizales por COP_s y PM₁₀*., Tesis Magister en Ingeniería – Ingeniería Química., Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, FIA., (2013)

Escobar, D., García, F. y Tolosa, R., *Análisis de Accesibilidad Territorial a Nivel Regional*, 1ª Edición, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Manizales, Colombia (2013)

Escobar, D., García, F. y Tolosa, R., *Diagnóstico de la Movilidad urbana de Manizales*, 1ª Edición, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Manizales, Colombia (2012)

Escobar, D; Tapasco, O. y Giraldo, J., *Medición de Desempeño del Sistema de Transporte Cable Aéreo de la Ciudad de Manizales en Colombia, usando Tres Enfoques: Analítico, Simulado y de Accesibilidad Urbana*, doi: 10.4067/S0718-07642015000600020. Inf. Tecnol. [online]. 26(6), 199-210 (2015).

Giraldo, E., *cof cof, el aire que perjudica* (en la web: <http://www.lapatria.com/salud/cof-cof-el-aire-que-perjudica-251100#sthash.ddReskui.dpuf> acceso: 20 de abril 2016), Periódico la Patria, (2016)

Gómez, A., Henao E., y Molina, F., Evaluación de las partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables (PM₁₀) en la zona de Guayabal, Medellín, Colombia, Revista Facultad de Ingeniería, 30, pp. 24-33, (2003)

González, C., *Calidad del aire en la zona centro y oriente de la ciudad de Manizales: influencia del material particulado (PM₁₀) y lluvia ácida.*, Tesis Magister en Ingeniería – Ingeniería Química., Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales., FIA., (2012)

Gupta, A.K., Karar, K. y Srivastava, A., Chemical mass balance source apportionment of PM₁₀ and TSP in residential and industrial sites of an urban region of Kolkata, India, Journal of Hazardous Materials, 142, pp. 279–287, (2007)

Halden, D., *The use and abuse of accessibility measures in UK passenger transport planning*, doi:10.1016/j.rtbm.2011.05.001, Transportation Business & Management, 2, 12-19, (2011)

Higgs, G., Langford, M. y Fry, R., *Investigating variations in the provision of digital services in public libraries using network-based GIS models*, doi:10.1016/j.lisr.2012.09.002, Library & Information Science Research, 35 (1), 24-32, (2013)

Jones, P., *Developing and applying interactive visual tools to enhance stakeholder engagement in accessibility planning for mobility disadvantaged groups*, doi:10.1016/j.rtbm.2011.08.001, Transportation Business & Management, 2, 29-41, (2011)

Kastenholz, E., Eusébio, C., Figueiredo, E. y Lima, J., *Accessibility as Competitive Advantage of a Tourism Destination: The Case of Lousã*, in *Field Guide to Case Study Research in Tourism, Hospitality and Leisure* (Advances in Culture, Tourism and Hospitality Research, Volume 6, K.F. Hyde, C. Ryan and A.G. Woodside (ed.), doi: 10.1108/S1871-3173(2012)0000006023, Emerald Group Publishing Limited, 369-385, (2012)

Keuken, M., Jonkers, S., Wilmink, I., Wesseling J., *Reduced NO_x and PM₁₀ emissions on urban motorways in The Netherlands by 80 km/h speed management.*, ScienceDirect, Science of the Total Environment 408 (2010) 2517–2526., (2010)

Kotavaara, O., Antikainen, H. y Rusanen, J., *Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970–2007*, doi:10.1016/j.jtrangeo.2010.10.013 Journal of Transport Geography, 19 (4), 926-935, (2011)

- López, E., Gutierrez, J. y Gómez, G., *Measuring regional cohesion effects of large-scale transport infrastructure investment: an accessibility approach*, doi: 10.1080/09654310701814629, *European Planning Studies*, 16 (2), 277–301, (2008)
- Mackinnon, D., Pirie, G. y Gather, M., *Transport and economic development*. In R. Knowles, J. Shaw, & I. Docherty, Editors, *Transport Geographies: Mobilities, Flows and Spaces* (10-28). Blackwell Publishers, Oxford, (2008)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial., *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire: Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Bogotá, Colombia, (2010)
- Morris, J., Dumble, P. y Wigan, M., *Accessibility indicators in transport planning*, doi:10.1016/0191-2607(79)90012-8, *Transportation Research, A*, 13, 91-109, (1978)
- Periódico el Tiempo., *El aire de la capital de Caldas es el tercero más contaminado del país (en la web: <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/contaminacion-del-aire-en-manizales-genera-debate-sobre-uso-de-la-bicicleta-y-transporte-publico/16571905> acceso: 25 de abril 2016)*, Periódico el Tiempo, (2016)
- Phatarapon V., Pongtep P., Suparda K y Nuchananporn P. A comparison of Spatial Interpolation Methods for predicting concentrations of Particle Pollution (PM10). *International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS)* Volume 3, Issue 4 (2015) ISSN 2320–4087 (Online), (2015)
- Res-601., *Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia*, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 1-13, Bogotá, Colombia, (2006)
- Res-610., *Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia*, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 1-8, Bogotá, Colombia, (2010)
- Sailer, K., Marmot, A. y Penn, A., *Spatial Configuration, Organisational Change and Academic Networks*. ASNA 2012 – Conference for ‘Applied Social Network Analysis’, Zürich, Suiza 4 a 7 Septiembre (2012)
- Shen, G., *Measuring Accessibility of Housing to Public–community Facilities Using Geographical Information Systems*, doi: 10.1111/1467-940X.00056, *Review of Urban & Regional Development Studies* 14(3), 235-255 (2002)
- Unimedios, *Movilidad en Manizales, problema de vehículos y peatones (en la web: <http://www.manizales.unal.edu.co/index.php/noticias/39-ano-2015/4561-movilidad-en-manizales-problema-de-vehiculos-y-peatones> acceso: 10 de mayo 2016)*, Agencia de Noticias UN., (2015)
- Vega, A., *A multi-modal approach to sustainable accessibility in Galway*, doi: 10.1080/20429843.2011.9727923, *Regional Insights*, 2(2), 15-17, (2011)
- Velasco, M., *Informe de calidad del aire*, CORPOCALDAS, Subdirección de Recursos Naturales., (2013)
- Velasco, M., *Informe sistema de vigilancia de calidad del aire*, CORPOCALDAS, Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental., (2014)
- Velasco, M., *Informe sistema de vigilancia de calidad del aire*, CORPOCALDAS, Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental., (2015)
- WHO, *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. Summary of risk assessment*, (2006)
- Younes, C.; Escobar, D. y Holguín, J., *Equidad, Accesibilidad y Transporte. Aplicación explicativa mediante un Análisis de Accesibilidad al Sector Universitario de Manizales (Colombia)*, doi: 10.4067/S0718-07642016000300010. *Inf. Tecnol.* [online]. 27(3), 107-118 (2016).
- Zhang, H. y Gao, Z., *Bilevel programming model and solution method for mixed transportation network design problem*, doi: 10.1007/s11424-009-9177-3, *Journal of Systems Science and Complexity*, 22 (3), 446-459, (2009)