

CORRESPONDENCIA ENTRE LAS METODOLOGÍAS MANUAL Y AUTOMÁTICA PARA LA MEDICIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS: PRIMERA ETAPA

INFORME FINAL



CONTRATO
INECC/LPN-001/2016

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD
AMBIENTAL



Preparado por:

Consultoría en Ingeniería de Proyectos
S. de R.L.

Elaborado para:

Instituto Nacional de Ecología y Cambio
Climático

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes-
Cuicuilco,
Del. Coyoacán, México, CDMX. C.P. 04530. Tel.
+52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404

07 de marzo de 2017

Directorio

Dra. María Amparo Martínez Arroyo

Directora General del INECC

Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa

Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

Dr. Arturo Gavilán García

Dirección de Investigación para el Manejo Sustentable de Sustancias Químicas, Productos
y Residuos

Biol. Salvador Blanco Jiménez

Subdirector de Investigación sobre Contaminación Atmosférica

Contenido

1. Resumen Ejecutivo	4
1. Executive Summary	7
2. Introducción	9
3. Justificación	10
4. Objetivos	11
5. Metodologías propuestas para comparaciones internacionales de metodologías de medición de partículas (PM ₁₀ y PM _{2.5}) y descripción de los métodos de comparación.	11
5.1. Selección de un Programa de Pruebas	14
5.1.1. Metodología de medición	14
5.1.2. Trazabilidad de las mediciones	14
5.1.3. Especificación de los programas de prueba	15
5.2. Programa de Prueba 3 (Método para Material Particulado)	15
5.3. Comparaciones realizadas a nivel internacional	16
6. Protocolo propuesto para la comparación de metodologías de medición automática y manual para PM _{2.5} y PM ₁₀	20
7. Protocolo de comparación de monitoreo manual y automático de PM ₁₀ y PM _{2.5} a nivel nacional mediante el protocolo propuesto (Primera etapa)	22
7.1. Análisis meteorológico a nivel nacional (temporalidad y representatividad)	22
7.2. Revisión de posibles Sistemas de Monitoreo Atmosférico (SMA). (Determinación de sitios de muestreo)	24
7.3. Definición de tipo de muestreo, tamaño de la muestra, calendario de muestreo y controles de calidad en el muestreo.	25
7.3.1. Descripción del equipo de muestreo de partículas	25
7.3.2. Tamaño de muestra	26
7.3.3. Calendario de muestreo	26
7.3.4. Controles de calidad en el muestreo	27
7.3.5. Adquisición de consumibles y refacciones	29
7.4. Determinación de Variables Claves	29
7.5. Manejo, limpieza y validación de las bases de datos hacia la determinación de la comparación de las metodologías de medición manual y automáticas de PM ₁₀ y PM _{2.5}	30
7.5.1. Registro y manejo de datos	30
7.5.2. Limpieza y validación de las bases de datos obtenida	30

7.6. Determinación de la comparación estadística entre las metodologías de medición automática y manual de PM_{10} y $PM_{2.5}$	31
7.6.1. Modelo de regresión lineal simple (simple linear model or straight-line regression). ...	31
7.6.2. Comparación estadística de las Mediciones con Equipos Manuales y Equipos Automáticos.	32
8. Resultados	33
8.1. Sitios seleccionados.....	33
8.1.1. Descripción geográfica y socioeconómica de cada ciudad	34
8.2. Equipos y sitios de muestreo seleccionados	38
8.3. Determinación de la comparación entre las metodologías de medición manual y automática de PM_{10} y $PM_{2.5}$	39
8.3.1. Salamanca	39
8.3.2. Guadalajara	45
8.3.3. Monterrey	51
8.3.4. Villahermosa.....	56
9. Conclusiones.....	60
10. Bibliografía	62
11. Anexos	
11.1. Anexo 1. Análisis Meteorológico	
11.2. Anexo 2. Cálculo de Promedio de 24 horas	
11.3. Anexo 3. Reportes de campo	
11.4. Anexo 4. Calibraciones	

Siglas y acrónimos

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Microgramos por metro cúbico
CINPRO	Consultoría en Ingeniería de Proyectos
CFR	Código de Reglamentación Federal de la EPA
CM	Método Candidato
CONAPO	Comisión Nacional de Población
EMAs	Estaciones meteorológicas automáticas
EPOC	Enfermedad pulmonar obstructiva - crónica
FEM	Métodos equivalentes
FRM	Métodos de referencia
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
NOM	Norma Oficial Mexicana
NMX	Norma Mexicana
NAAQSs	Normas de Estados Unidos Nacionales de Calidad del Aire Ambiental
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM ₁₀	Partículas suspendidas de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros
PM _{2.5}	Partículas suspendidas de diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SMA	Sistema de Monitoreo Atmosférico
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
USEPA	Agencia de protección ambiental de Estados Unidos de América

1. Resumen Ejecutivo

Los efectos de las partículas finas ($PM_{2.5}$) en la salud humana están bien documentados (Papa Et al., 2002). Con el fin de evaluar espacial y temporalmente el impacto de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , considerando esto se colocan redes de monitoreo en diversas partes de mundo, que midan las concentraciones de estos contaminantes. Los límites máximos de concentración de particulares se encuentran en las normas específicas de cada país o en las normas internacionales de la OMS (Organización Mundial de la Salud).

En este concepto los métodos de medición, estandarización e incertidumbre se vuelven un aspecto importante. De aquí que el poder comparar estos métodos (métodos de referencia y equivalencia) producirá una mejor certidumbre en las mediciones, comparabilidad y trazabilidad en los datos.

En el presente trabajo se desarrolló un protocolo de pruebas de esta comparación de metodologías para partículas que sea comparable con Estados Unidos y la Unión Europea y que sea específico para México. Dentro de los protocolos existen normatividad que especifican dichos métodos.

Las Normas de Estados Unidos Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQSs), que especifica el uso de cualquiera de los métodos de referencia (FRM) o métodos equivalentes (FEMS); el método de medición de referencia para el muestreo y análisis de PM_{10} , así como $PM_{2.5}$ que se establece en las normas EN12341 (EN12341, 1999) y EN14907 (ES 14907, 2005) de la Directiva Europea para la Calidad del Aire Ambiente y una Atmósfera más Limpia de Europa (2008/50/EC).

En México existe el proyecto de la norma NMX-AA-177-SCFI-2015 la cual tiene por objeto Establecer los métodos de referencia y equivalentes para medir la concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente que se realicen en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, públicas o privadas del país

El protocolo presente en este proyecto ayudará a la ejecución de la norma NMX-AA-177-SCFI-2015. Este protocolo permite comparar las mediciones obtenidas con métodos de referencia (muestreo manual) y los métodos equivalentes (muestreo automático), en diferentes regiones del país.

La figura 1 muestra el protocolo propuesto, dicho protocolo fue desarrollado en base a las experiencias internacionales, así como la realización de una primera etapa de medición en 4 sitios de muestreo (Salamanca, Guanajuato, Guadalajara, Jalisco, Monterrey, Nuevo León y Villahermosa, Tabasco), seleccionados considerando dos aspectos:

- a) Revisión de los Sistemas de Monitoreo Atmosférico (SMA) que cuentan con equipo de muestreo manual y automático de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como la población en los estados y la zona del país donde se ubica para seleccionar a los posibles candidatos.
- b) Formar parte de alguna de las tres zonas del país encontradas en el análisis meteorológico realizado.

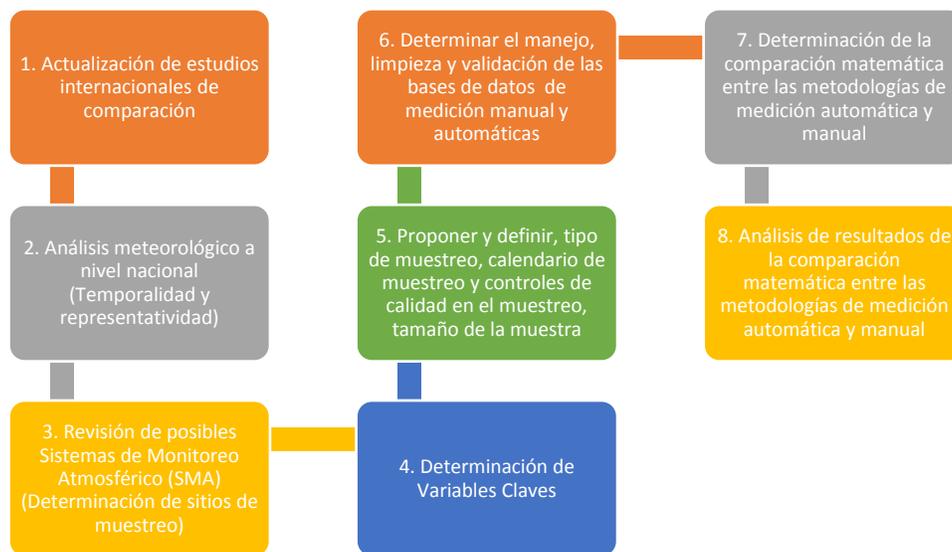


Figura 1. Protocolo propuesto para la comparación de metodologías manual y automática de PM_{2.5} y PM₁₀

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

Se propusieron dos métodos estadísticos para evaluar las metodologías manual y automática de PM₁₀ y PM_{2.5} las cuales son: Regresión lineal (método Paramétrico) y Prueba de medianas (método No Paramétrico).

La evaluación por medio de las pruebas No Paramétricas arroja que solo en el caso de Salamanca en la estación Cruz Roja donde se monitorea PM_{2.5}, con equipo automático (atenuación beta) y equipo manual de mediano volumen, se cuenta con evidencia estadística para asegurar que los equipos automáticos y manuales representan el mismo fenómeno, en el resto de las estaciones de las ciudades de Guadalajara, Monterrey, Tabasco y Salamanca (estación DIF) no hay evidencia estadística para asegurar que los equipos automáticos y manuales representan el mismo fenómeno.

Por otro lado, la representación gráfica de los "boxplot" refuerza la interpretación de las pruebas No Paramétricas, ya que el único caso en el que se traslapan las cajas de los gráficos es en Salamanca en la estación Cruz Roja donde se monitorea PM_{2.5}, en el resto de las estaciones se nota un corrimiento entre las cajas, que para fines prácticos implica que las concentraciones centrales (entre el percentil 25 y 75) de ambos equipos de medición no son comparables.

Con respecto al ajuste por mínimos cuadrados (regresión lineal), al comparar 100 µg/m³ registrados con equipo manual con su equivalente en el equipo automático por medio del ajuste lineal, se aprecia una **sobreestimación** en las mediciones de PM₁₀ del 93% en la estación Centro de Monterrey, del 71% en la estación Santa Fe de Guadalajara, del 36% en la estación Las Pintas de Guadalajara y del 30% en la estación DIF de Salamanca. Por otro

lado, se aprecia una **subestimación** en las mediciones de PM_{2.5} del 30% en la estación Centro de Monterrey y del 4% en la estación Cruz Roja de Salamanca.

Comparativo por cada 100 µg/m³ registrados con equipo manual y su equivalente en equipo automático

	Guadalajara		Monterrey		Salamanca	
	Las Pintas "PM10"	Santa Fe "PM10"	Centro "PM10"	Centro "PM2.5"	DIF "PM10"	Cruz Roja "PM2.5"
Equivalente con equipo automático*	136.2	170.8	192.8	69.6	130.3	96.2
Porcentaje	136%	171%	193%	70%	130%	96%

* a partir de la ecuación del ajuste lineal por mínimos cuadrados

Aun cuando se presentan los resultados obtenidos en las estaciones en Villahermosa Tabasco, la comparación entre el método de referencia (muestreo manual) y los métodos equivalentes (muestreo automático) no arrojan ninguna correlación con ninguna de las pruebas estadísticas realizadas.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo consideran las directrices que junto con el proyecto de norma NMX-AA-177-SCFI-2015, establecen los requisitos que deben tener los métodos de referencia y equivalencia para partículas en México, además de poder ser comparados con los determinados en la Unión Europea y Estados Unidos de Norteamérica.

1. Executive Summary

The effects of fine particles ($PM_{2.5}$) on human health are well documented (Papa et al., 2002). In order to evaluate spatially and temporally the impact of $PM_{2.5}$ and PM_{10} , considering this, monitoring networks are placed in different parts of the world to measure the concentrations of these pollutants. The maximum concentration limits of individuals are found in the specific regulations of each country or in the international standards of the World Health Organization (WHO).

In this concept measurement methods, standardization and uncertainty become an important aspect. Hence being able to compare these methods (reference methods and equivalence) will produce a better certainty in the measurements, comparability and traceability in the data.

In the present work, a protocol of tests of this comparison of methodologies for particles was developed that is comparable with the United States and the European Union and that is specific for Mexico. Within the protocols there are regulations that specify these methods.

The United States National Environmental Air Quality Standards (NAAQSs), which specifies the use of any of the reference methods (FRM) or equivalent methods (FEMS); The reference measurement method for the sampling and analysis of PM_{10} as well as $PM_{2.5}$ which is established in EN12341 (EN12341, 1999) and EN14907 (ES 14907, 2005) of the European Directive for Ambient Air Quality and A Cleaner Atmosphere in Europe (2008/50 / EC).

In Mexico, there is the draft of NMX-AA-177-SCFI-2015, which aims to establish reference methods and equivalents to measure the concentration of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particles in ambient air at stations of air quality monitoring, public or private in the country.

The protocol present in this project will assist in the implementation of NMX-AA-177-SCFI-2015. This protocol allows comparing the measurements obtained with reference methods (manual sampling) and equivalent methods (automatic sampling) in different regions of the country.

Figure 1 shows the proposed protocol. This protocol was developed based on international experiences, as well as the realization of a first stage of measurement in 4 sampling sites (Salamanca, Guanajuato, Guadalajara, Jalisco, Nuevo León and Villahermosa, Tabasco), selected considering two aspects:

- A) Review of the Atmospheric Monitoring Systems (SMA) that have manual and automatic sampling equipment PM_{10} and $PM_{2.5}$, as well as the population in the states and the area of the country where it is located to select the possible Candidates.
- B) To be part of one of the three zones of the country found in the meteorological analysis carried out.

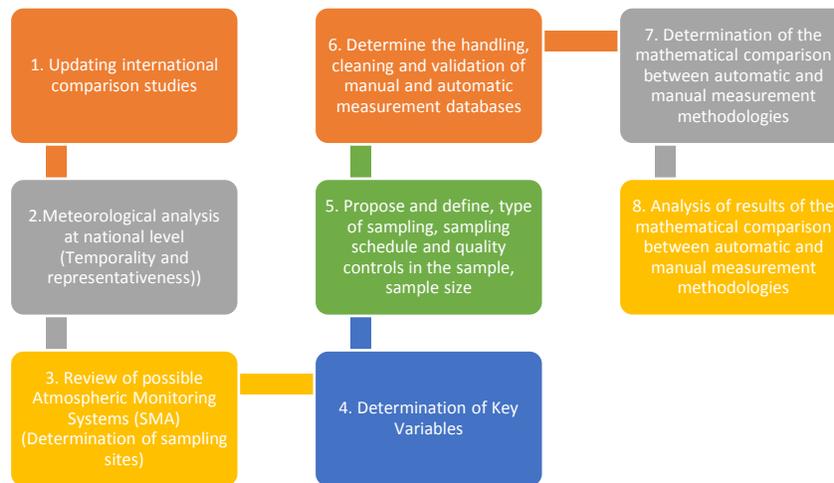


Figure 1. Proposed protocol for comparison of manual and automatic methodologies of PM_{2.5} and PM₁₀
Source: Prepared, CINPRO 2017

Two statistical methods were proposed to evaluate the manual and automatic methodologies of PM₁₀ and PM_{2.5}, which are: Linear regression (Parametric method) and Median test (nonparametric method).

The evaluation by non-parametric tests shows that only in the case of Salamanca in the Cruz Roja station where PM_{2.5} is monitored, with automatic equipment (beta attenuation) and manual equipment of medium volume, statistical evidence is available to ensure That automatic and manual equipment represent the same phenomenon, in the rest of the stations of the cities of Guadalajara, Monterrey, Tabasco and Salamanca (DIF station) there is no statistical evidence to ensure that automatic and manual equipment represent the same phenomenon.

On the other hand, the graphic representation of the "boxplot" reinforces the interpretation of the Non-Parametric tests, since the only case in which the graphic boxes are overlapped is in Salamanca at the Cruz Roja station where PM_{2.5} is monitored, In the rest of the stations there is a shift between the boxes, which for practical purposes implies that the central concentrations (between the 25th and 75th percentile) of both measuring devices are not comparable.

Regarding the least squares adjustment (linear regression), when comparing 100 µg / m³ recorded with manual equipment with its equivalent in the automatic equipment by means of the linear adjustment, an overestimation of PM₁₀ measurements of 93% in the station Monterrey Center, 71% in the Santa Fe station in Guadalajara, 36% in the Las Pintas station in Guadalajara and 30% in the DIF station in Salamanca. On the other hand, there is an underestimation of the PM_{2.5} measurements of 30% in the Centro de Monterrey station and 4% in the Cruz Roja station in Salamanca.

2. Introducción

Las partículas suspendidas están formadas por una mezcla compleja de componentes cuyas características físicas y químicas son muy variadas, que se da tanto en ambientes urbanos como en rurales. El potencial de que causen daños a la salud puede variar de acuerdo con su tamaño, su composición química y las fuentes de donde provienen. Sin embargo, hay evidencia muy robusta sobre los impactos negativos en la salud por la exposición aguda o crónica, basado en evidencias epidemiológicas y toxicológicas en todo el mundo. Sus efectos más documentados son la mortalidad y la hospitalización de pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), exacerbación de los síntomas y aumento de la necesidad de terapia en asmáticos, mortalidad y hospitalización de pacientes con enfermedades cardiovasculares, mortalidad y hospitalización de pacientes con diabetes mellitus, aumento del riesgo de infarto al miocardio, inflamación de los pulmones, inflamación sistémica, disfunción endotelial y vascular, desarrollo de aterosclerosis, aumento en la incidencia de infecciones y cáncer de pulmón (OMS, 2006).

De acuerdo al Informe Nacional de Calidad del Aire 2014 (INECC, 2015) se incluyeron 176 estaciones de monitoreo de las cuales 160 tienen capacidad para llevar a cabo la medición de partículas suspendidas respirables PM_{10} , de estas solo el 52% (83 estaciones) contaron con datos suficientes para poder evaluar el cumplimiento de la norma ambiental ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio anual). En cuanto a la fracción fina de las partículas denominadas $PM_{2.5}$, menores o iguales a 2.5 micras de diámetro, las $PM_{2.5}$ se cuenta con 79 estaciones a nivel nacional capaces de medir este parámetro, sin embargo, solo el 41% de estas contaron con información suficiente para comparar con la norma ambiental ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual), de las cuales tres de ellas registraron concentraciones superiores al valor normado.

Las zonas metropolitanas de Juárez, Monterrey, Toluca y Guadalajara, fueron las cuatro ciudades más contaminadas con PM_{10} en 2014. Mientras que para $PM_{2.5}$ las zonas de Tula-Tepeji, Toluca, Puebla, Ciudad de México y su zona conurbada, Salamanca, Mexicali, Tlajomulco de Zúñiga y Xalapa; son las que rebasaron la norma anual.

La información generada de partículas suspendidas en el país se realiza tanto con monitoreo manual de referencia, así como con monitores automáticos como método equivalente, la Norma NOM-035-SEMARNAT-1993 está tomando en cuenta en sus actualizaciones de forma regulatoria para solo llevar a cabo mediciones con metodologías totalmente aprobadas con base normativa. Sin embargo, la exacta correspondencia entre los métodos automáticos y manuales no se sabe en qué medida existan probables sesgos. En esto último radica la importancia de este proyecto, para dar a conocer datos más precisos en los programas de protección de la salud y del medio ambiente. Así mismo se aportará la metodología de comparación para que los sistemas de monitoreo de la calidad del aire del país realicen la comparación y prueba tanto de tecnologías vigentes como aquellas que se

desarrollen en el futuro, como lo es el proyecto de norma PROY-NMX-AA-177-SCFI-2015, el cual tiene por objeto Establecer los métodos de referencia y equivalentes para medir la concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente que se realicen en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, públicas o privadas.

3. Justificación

En México las Normas Oficiales que regulan la exposición de la población a contaminantes criterio, como la norma NOM-025-SSA1-2014 que indica los valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación; en ella se hace referencia en general a Normas Oficiales de procedimientos de medición de dichos contaminantes, en este caso la norma NOM-035-SEMARNAT-1993, que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. Es importante mencionar que todos los procedimientos actuales de medición de contaminantes atmosféricos son Normas Oficiales Mexicanas (NOM's), a diferencia de la matriz agua que son Normas Mexicanas (NMX), en el caso de la norma NMX-AA-177-SCFI-2015 va en la transición de cambio de acuerdo a la regulación metrológica nacional, pasando de NOM a NMX.

En particular, el Programa Nacional de Normalización de 2015, inicio la actualización de la Norma de medición de partículas suspendidas NOM-035-SEMARNAT-1993, actualmente es un proyecto de norma PROY-NMX-AA-177-SCFI-2015 e incluye las metodologías estandarizadas de medición de las partículas respirables de la fracción PM_{10} y $PM_{2.5}$. Con esta Norma se fortalecerá tanto al Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico como a los Sistemas de Monitoreo Atmosférico locales, obtener información confiable con criterios de control y aseguramiento en la calidad de las mediciones, y así mismo se propicie que los Sistemas de Monitoreo Atmosférico incluyan la medición de este contaminante, con una guía clara de procedimientos normalizados.

El presente estudio, pretende reforzar la implementación de la actualización de la NOM-035-SEMARNAT-1993 y a su vez evaluar y brindar elementos de juicio sobre la posible necesidad de ajuste a los valores de concentración de partículas suspendidas, que el muestreo automático instalado en el país proporciona con el fin de proteger la salud de la población conforme a la NOM-025-SSA1-2014.

4. Objetivos

Objetivo general

Desarrollar el factor de correspondencia de los métodos automáticos de monitoreo de partículas suspendidas con respecto a los métodos gravimétricos estandarizados para la determinación de las partículas suspendidas en aire ambiente.

Objetivos específicos

- I. Generar información de campo que fundamente la correspondencia entre el monitoreo automático y manual para la medición de partículas suspendidas, representativa del país.
- II. Proponer al menos dos metodologías estadísticas o numéricas de evaluación para la cuantificación y/o estimación de la comparación entre las diversas formas de medición automática y manual con el fin de determinar su correspondencia.
- III. Analizar los resultados del o los factores de correspondencia entre las metodologías de medición.
- IV. Desarrollar un protocolo de comparación aplicable a los sistemas de monitoreo de la calidad del aire del país.

5. Metodologías propuestas para comparaciones internacionales de metodologías de medición de partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) y descripción de los métodos de comparación.

Los efectos de las partículas (PM_{2.5} y PM₁₀) sobre la salud humana están bien documentados, esto conlleva a la medición de la calidad del aire en diferentes áreas, tanto urbanas como rurales en condiciones diferentes de altitud, temperatura, condiciones geográficas, etc.

Para realizar esta evaluación se debe contar con métodos aprobados y representativos que nos ayuden a comparar no solo entre sitios, sino también entre pruebas de medición, para ello tanto los Estados Unidos de América (U.S), como la Unión Europea (UE), tienen métodos de referencia y de equivalencia para distintos contaminantes, en la presente revisión se plantean las necesidades de los estudios que se han venido realizando.

En Estados Unidos y la Unión Europea han trabajado diferentes metodologías de comparación de métodos obedeciendo el principio de detección que cambia dependiendo del contaminante. De esta forma existen guías que aportan toda una metodología tanto para el análisis de laboratorio como para el muestreo y finalmente su análisis estadístico hacia la obtención de esta comparación.

Una de las partes iniciales es proponer métodos que se desvíen del método de referencia definido en las Directivas sobre la calidad del aire ambiente y elaborados en los métodos normalizados del país. En consecuencia, la responsabilidad de la emisión de la equivalencia del método candidato propuesto recae en la Autoridad Nacional Competente (En específico en la normatividad existente o en proceso).

La iniciativa de utilizar métodos «equivalentes» puede proceder de una Autoridad en Materia de Calidad del Aire en el País (una norma, por ejemplo) o de un laboratorio nacional o regional que realice mediciones de la calidad del aire relacionadas con la aplicación de las directivas sobre la calidad del aire ambiente. En este último caso, el laboratorio que propone el uso de un método deberá notificar a su Autoridad Ambiental correspondiente, y realizar una evaluación preliminar del método candidato.

Para iniciar un procedimiento de comparación es necesario considerar:

1. Criterio de incertidumbre.

Para asegurar que el método cumpla con los requisitos de captura de datos y cobertura de tiempo establecidos para las mediciones continuas / fijas; Por ejemplo, un método candidato para la medición de las concentraciones de dióxido de nitrógeno con el valor límite de 1 hora, deberá ser capaz de proporcionar una captura de datos del 90% o más para los resultados de medición promedio por hora, con el propósito de alcanzar la calidad de datos en la concentración de valor límite u objetivo para mediciones continuas o fijas del contaminante especificado. (EC, 2010).

2. Condiciones de limitación.

Es posible conceder condiciones específicas como regionales, la composición de la concentración, condiciones meteorológicas, etc.

En los casos en que el alcance de la equivalencia está restringido de alguna manera, el método equivalente sólo debe aplicarse sobre el rango de concentración de contaminantes y condiciones que fueron probadas para el cumplimiento. (EC, 2010).

Las condiciones deben incluir:

- A. Concentraciones, es decir, rangos de concentración del contaminante específico y especies interferentes cruzadas relevantes.
- B. Condiciones meteorológicas, es decir, rangos de temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento.
- C. Para Partículas: intervalos de fracciones de constituyentes específicos u otras características tales como tamaño o en particular cuando dicha información se utiliza como insumo en la metodología que garantice equivalencia en curso más allá de la demostración de equivalencia inicial.
- D. Condiciones geográficas, como en lugares específicos.

3. Extensión de las pruebas necesarias.

La categoría de las pruebas de equivalencia se especifica sobre la base de las diferencias entre el método de referencia y el método candidato.

Estas diferencias se separan en dos grupos (variaciones sobre un tema y metodologías diferentes) (EC, 2010).

Variaciones sobre un tema:

Las partes menores del método de referencia pueden ser modificadas dando como resultado "variaciones sobre un tema".

Ejemplos de "posibles variaciones" son:

El uso de diferentes convertidores para transformar dióxido de nitrógeno en óxido nítrico en analizadores de quimioluminiscencia; el uso de depuradores diferentes para el ozono; el uso de diferentes medios de muestreo / sustratos, por ejemplo, sorbentes y tipos de filtro; el uso de diferentes procedimientos para la recuperación de analito, por ejemplo, para la recuperación de benceno de tubos sorbentes y metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) de Material Particulado (PM). El uso de diferentes procedimientos analíticos, por ejemplo, modificaciones a la cromatografía separación para el análisis de benceno y PAH, y a las condiciones espectrométricas atómicas para análisis de metales; el uso de diferentes procedimientos de almacenamiento de filtros PM; el uso de cambiadores de filtros automáticos para muestreadores manuales de PM.

Metodologías diferentes:

Un método candidato puede basarse en un principio de medición diferente. Ejemplos posibles con diferentes principios son:

Sistemas automatizados de medición para el benceno usando la espectrometría ultravioleta como la detección técnica;

- Muestreo de material particulado utilizando una entrada de muestreo con características que difieren de las especificadas en las normas PM₁₀ y PM_{2.5} para el muestreador de referencia;
- Medición de materia particulado utilizando métodos automatizados;
- Utilización de técnicas de medición óptica in-situ para las partículas;
- Uso de diferentes técnicas analíticas para la medición de compuestos relevantes en la muestra extractos, por ejemplo, cromatografía líquida para benceno, plasma acoplado inductivamente – óptico, espectrometría de emisión para metales;
- Medición de gases y vapores mediante muestreo por difusión en lugar de muestreo por bombeo o Métodos automatizados;

- Medición automatizada de gases basándose en una técnica espectrométrica diferente, por ejemplo, una transformación Fourier espectrometría de infrarrojos (FTIR) para dióxido de azufre;
- Medición de gases mediante muestreo por bombeo en lugar de métodos automatizados.

5.1. Selección de un Programa de Pruebas

Se han elaborado cuatro programas de prueba diferentes para dos situaciones distintas:

1. Existen "referencias establecidas" para establecer la trazabilidad de las mediciones o la medida en que es posible cuantificar todas las contribuciones a la incertidumbre de medición a partir de las comparaciones a partir de las normas primarias de medición.
2. La metodología de medición es automatizada o manual, es decir, basada en muestreos y análisis separados.

5.1.1. Metodología de medición

Los procedimientos de prueba serán diferentes para los métodos automatizados y manuales para la medición de gases; para métodos automatizados, el método se probará más o menos como una "caja negra"(EC, 2010).

Para métodos manuales, los pasos separados en el procedimiento de medición estarán sujetos a la evaluación de la incertidumbre.

5.1.2. Trazabilidad de las mediciones

La existencia de Normas de medición o materiales de referencia certificados permite realizar pruebas de laboratorio. En el que estas normas y materiales pueden utilizarse para evaluar el sesgo de medición.

Para los compuestos gaseosos los resultados de la medida se pueden hacer totalmente rastreables a través de las normas de medición primarias existentes preparadas de acuerdo con la norma ISO 6142, ISO 6144 o ISO 6145.

Para la medición de partículas se presenta una situación más complicada ya que no hay estándares metrológicos o materiales de referencia para establecer la trazabilidad de las mediciones PM₁₀ y PM_{2.5}. Los resultados de las mediciones del volumen de la muestra y de la masa muestreada de la materia en forma de partículas pueden trazarse, pero no hay una norma primaria adecuada disponible para evaluar la contribución de otros componentes de incertidumbre del método de medición. Por lo tanto, la incertidumbre de cualquier método candidato debe determinarse con referencia a un muestreador de referencia de PM según

se especifica en la norma para PM₁₀, suponiendo que estos "muestreadores de referencia" son imparciales con respecto a la convención de tamaño de partícula aplicada.

5.1.3. Especificación de los programas de prueba

Existen seis programas de prueba definidos por el contaminante y tipo de medición, los cuales se presentan a continuación (EC, 2010):

- A. Programa de Pruebas 1 se refiere a métodos manuales para gases y vapores (benceno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono).
- B. Programa de Pruebas 1A: Programa de pruebas de laboratorio para las variaciones del método de referencia; Laboratorio y ensayo en campo para alternativas de muestreo por bombeo a métodos de referencia para otros contaminantes gaseosos.
- C. Programa de ensayo 1B: Programas de laboratorio y pruebas de campo para el muestreo por difusión análogos a los programas de ensayo.
- D. Programa de Pruebas 2 se refiere a sistemas de medición automáticos alternativos para gases y vapores, (Benceno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono), por ejemplo, utilizando otras técnicas espectrométricas.
- E. Programa de Pruebas 3 se refiere a metodologías alternativas para el monitoreo de material particulado. El programa de prueba 3 incluye la prueba de una entrada selectiva de tamaño, cuando ésta difiere de la del muestreador de referencia PM.**
- F. Programa de Pruebas 4 se refiere a la determinación de partículas específicas (metales y benceno).

Para el presente trabajo se tomó como referencia la prueba 3 para material particulado.

5.2. Programa de Prueba 3 (Método para Material Particulado)

Este programa describe un procedimiento para determinar si un método candidato (CM) es adecuado para ser considerado equivalente al método de referencia para la medición de partículas en el aire ambiente, utilizando sistemas de medición manuales o automatizados.

El enfoque descrito permite establecer relaciones con el método de referencia que se puede aplicar para "calibrar" el CM con el fin de cumplir con el objetivo de calidad de datos de incertidumbre. (EPA aplicables a los métodos equivalentes de Clase II y III para PM_{2.5} y PM_{10-2.5} (enmiendas a 40 CFR Parte 53_Federal Register, Vol. 71, página 61236, 17 de octubre de 2006) y (EC. 2010)

Los métodos candidatos pueden consistir en pares de instrumentos automáticos situados por separado, por ejemplo, con una fracción local no volátil proporcionada por un "instrumento local" y una fracción semi-volátil regional separada proporcionada por un "instrumento regional" cuyos resultados se combinan.

Los instrumentos locales deberán ser de la misma configuración y estarán sujetos a los mismos procedimientos de adquisición y procesamiento de datos.

Los ensayos de equivalencia se realizarán normalmente en dos partes: una prueba de laboratorio en la que se evaluarán las contribuciones de las distintas fuentes de incertidumbre de medición y una prueba de campo en la que el método candidato se someterá a prueba junto con el método estándar pertinente.

El procedimiento lleva los siguientes pasos:

1. Visión general del procedimiento de prueba
2. Programa de pruebas de laboratorio
3. Diferentes condiciones de pesaje
4. Programa de pruebas de campo
5. Condiciones experimentales
6. Requisitos para el control de calidad
7. Evaluación de los datos recopilados
8. Idoneidad de los conjuntos de datos
9. Comparación con el método estándar

5.3. Comparaciones realizadas a nivel internacional

A fin de evaluar espacial y temporalmente el impacto de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los U.S., la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA U.S.) opera una red Federal de Métodos de Referencia (FRM). El monitoreo de la calidad del aire de la atmósfera y sus efectos que determinan el cumplimiento de las **Normas de Estados Unidos Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQSs)**, se especifica en 40 CFR (Código de Reglamentación Federal de la EPA) parte 50, por lo general se requiere el uso de cualquiera de los métodos de referencia (FRM) o métodos equivalentes (FEMS), tal como se especifica en la Sección 2.1 del Apéndice C de la Parte 58. Este seguimiento de CFR 40 "cumplimiento". Los requisitos y procedimientos mediante los cuales los métodos de monitoreo del aire para los contaminantes son fijados por la EPA como FRM y los FEM y se establecen en CFR 40 parte 53. Este reglamento prescribe los procedimientos detallados para probar métodos candidatos, así como la técnica formal y los requisitos.

Los diversos tipos de métodos candidatos se describen a continuación. Las disposiciones y los requisitos de la Parte 53 que son aplicables a cada tipo de FRM y FEM.

A. Métodos de referencia (FRM)

1. *Métodos Manual de Referencia*

Sólo los métodos manuales que se especifican de forma única son métodos de referencia en la FRM.

B. Métodos equivalentes (FEM)

1. *Métodos Equivalentes Manual*

a. Métodos de equivalentes manuales pueden utilizar una técnica de muestreo, o un procedimiento analítico que es diferente de la especificada para el FRM correspondiente. Sin embargo, algunas de las especificaciones o requisitos de la FRM pueden aplicarse a un candidato FEM, dependiendo del tipo de método. En particular, dos tipos de FEM se definen para PM_{2.5} y PM_{10-2.5}, Clase I y Clase II.

2. *Métodos equivalentes automatizadas (analizadores)*

Posibles métodos automatizados pueden utilizar un principio de medición diferente y / o procedimiento de calibración a la especificada para FRM, y de otra manera pueden diferir sustancialmente de FRM. Sin embargo, algunas de las especificaciones o requisitos de la FRM pueden aplicarse a un candidato FEM, dependiendo del tipo o naturaleza del método. En particular, la clase III son candidatos de FEMs para PM_{2.5} y PM_{10-2.5}, métodos automatizados (analizadores).

La **Directiva Europea para la Calidad del Aire Ambiente y una Atmósfera más Limpia de Europa** (2008/50/EC) establece los valores límite para diferentes contaminantes, es decir, las concentraciones máximas de contaminantes en el aire para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos a la salud humana y / o el medio ambiente en su conjunto. Además de estos valores límites, se definen los objetivos de calidad de datos y los métodos de referencia (RM).

La directiva 2008/50/EC del estado (AQD) define los requerimientos sobre la calidad del aire que los Estados miembros aplicarán los métodos de medición de referencia y los criterios especificados en la Directiva.

El método de medición de referencia para el muestreo y análisis de PM₁₀, así como PM_{2.5} se establece en las normas EN12341 (EN12341, 1999) y EN14907 (ES 14907, 2005), respectivamente.

Los métodos de referencia para PM₁₀ y PM_{2.5} son gravimétricos. Las normas prescriben no sólo los métodos en sí mismos, sino también los criterios de diseño de entrada para las dos clases de tamaño, así como el almacenamiento y procedimiento de pesaje para los filtros.

Ha habido una serie de proyectos de investigación que se centran en la correlación de referencia y mediciones para PM_{2.5} y PM₁₀ algunos de estos esfuerzos se resumen en la Tabla 1, la cual muestra que existen variables factores claves (además del principio de funcionamiento del equipo a utilizar) que determinan la correspondencia de un método de referencia con uno equivalente, las cuales son producto del sitio a evaluar (Temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, altitud, geografía etc.), así como la temporalidad (anual, por estaciones del año, mensual, horaria etc.).

Tabla 1. Comparación de las correlaciones internacionales PM₁₀ y PM_{2.5}

Autor	Método de equivalencia	Área Geográfica	Contaminante	Tipo de correlación	Caracterización general estadística	Factor clave	Tamaño de muestra	Periodo
Rizzo et al.	TEOM	Región 5 de EPA (Illinois, Michigan, Wisconsin, Minnesota y NY)	PM ₁₀	Lineal	TEOM subestima FRM (temperatura - dependiente)	Temperatura		
Roxolana Kashuba & Peter A. Scheff	TEOM, BAM NEPHELOMETER	Región 5 de EPA (Illinois, Michigan, Wisconsin, Minnesota y NY)	PM ₁₀	Lineal, no lineal	TEOM (R ² tiene un rango de 0.79-0.93), Medidor Beta (R ² tiene un rango de 0.85- 0.93). Nefelómetro (R ² tiene un rango de 0.3 a 0.95)	Temperatura, estación y humedad		
Sioutas et al.	TEOM	Este de U.S. California México	PM ₁₀	Lineal	Bueno; COSTA ESTE (urbano) en verano - invierno Subestimado FRM	Estación, componente de semi volatilidad de las PM		
James J. Schwab	TEOM, FDMS, BAM	NY	PM ₁₀	Lineal	FDMS, medidas son 25% más alto que FRM	Estación, sesgo, diferencia de masa, el componente volátil de PM		
Olivier Le Bihan, et al.	Los 2 métodos candidatos fueron TEOM-FDMS (PM ₁₀ y PM _{2.5}) y monitor Beta MP101M-RST PM10SA. Directiva de calidad 99/30 / CE	Bobigny (95) (red de calidad del aire de París)	PM ₁₀ y PM _{2.5}	Regresión ortogonal	Ecuaciones lineales de regresión ortogonal son respectivamente MP-101M RST = 0,96 x Referencia + 1,09 y TEOM-FDMS = 0,95 x Referencia - 1,69	Temperatura y humedad	70 días para un total de 194 mediciones individuales	Enero a marzo 2005

Autor	Método de equivalencia	Área Geográfica	Contaminante	Tipo de correlación	Caracterización general estadística	Factor clave	Tamaño de muestra	Periodo
EPA 2011	TEOM gravimétrico	Seis regiones geográficas de Estados Unidos	PM _{2.5}	Regresión lineal	Los datos de SC atmosféricos indican un ligero sesgo general de los valores de SC para ser más altos que el FRM. Pero con una pendiente de sólo 0,66. intercepción de 1,67 µg/m ³		77.385 días de datos	2004 a 2007 Invierno - diciembre, enero, Febrero; Primavera - marzo, abril, Mayo; Verano - junio, Julio, Agosto; Otoño - septiembre, octubre, Noviembre
Instituto de Ciencias de la Tierra. Csic Barcelona 2005	Gravimétrico de referencia Tisch Environmental	Puerto Tarragona	PM ₁₀	Regresión lineal	y = 1.42x - 9.97 R2 = 0.90		40	22/09/04 A 24/03/05 No continuo
Instituto de Ciencias de La Tierra. Csic Barcelona 2005	Espectrómetro láser GRIMM 1107	Puerto Tarragona	PM ₁₀	Regresión lineal	Y= 121x R2= 0.88		40	22/09/04 A 24/03/05 No continuo
Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda, Valencia 2005	Gravimétrica, DIGITEL DA-80H (Norma EN-1234-1)	Estación de Burriana, Valencia	PM _{2.5}	Regresión lineal	y = 1,0217x + 1,744 R2 = 0,8555		27	02/12/2005 a 31/12/2005
Roxolana Kashuba and Peter A. Schef	TEOM, BAM NEPHELOMETER	Mayville, Grand Rapids, Chicago, IL East St. Louis, IL	PM _{2.5}	Regresión lineal	El patrón de nefelómetro. Con una baja correlación de 0.3050, incluyendo la humedad. El modelo aumenta la correlación más con la inclusión de Temperatura (r \ sim 0,5952	Temperatura y humedad	Mayville, (22,051) Grand Rapids, (20,006) Chicago, IL (7489) East St. Louis, IL (7,017)	01/01 2000 a 12/31/2002 Dependiendo el sitio

6. Protocolo propuesto para la comparación de metodologías de medición automática y manual para PM_{2.5} y PM₁₀

El protocolo presente en este proyecto ayudará a la ejecución de la norma NMX-AA-177-SCFI-2015, la cual tiene por objeto Establecer los métodos de referencia y equivalentes para medir la concentración de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente que se realicen en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, públicas o privadas del país. Este protocolo permite comparar las mediciones obtenidas con métodos de referencia (muestreo manual) y los métodos equivalentes (muestreo automático), en diferentes regiones del país.

Este protocolo propuesto considera las experiencias internacionales de la Unión Europea y de Estados Unidos de Norte América, para poder comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo. La Figura 2 muestra el diagrama del protocolo.

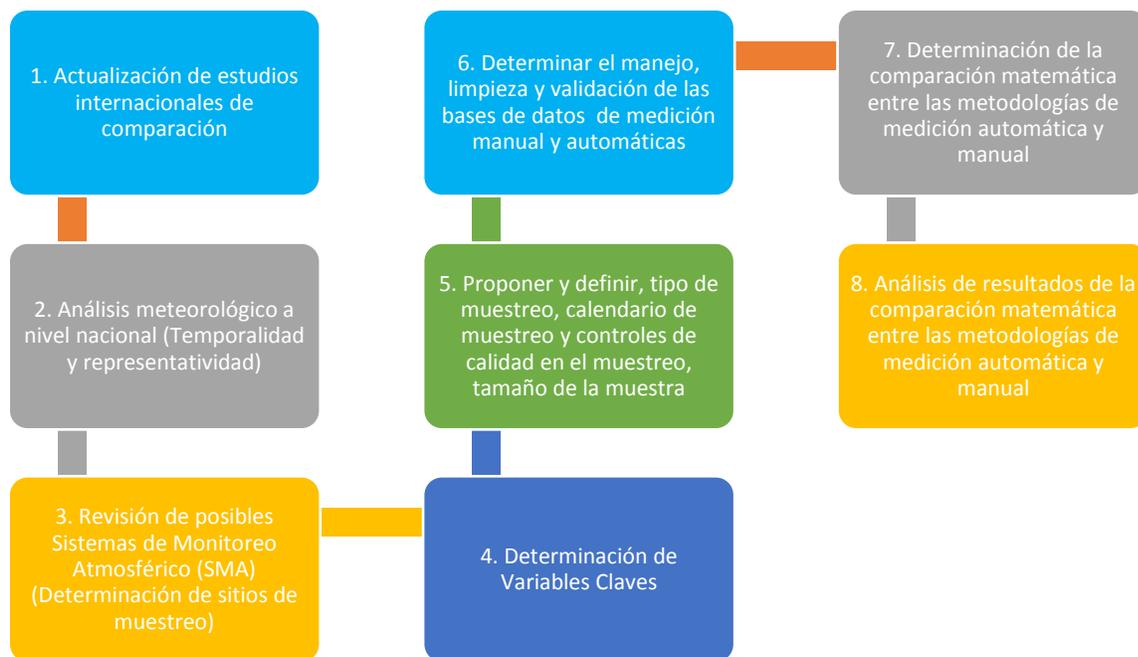


Figura 2. Protocolo propuesto para la comparación de metodologías manual y automática de PM_{2.5} y PM₁₀
Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

1. La actualización de estudios internacionales es indispensable ya que nos proporciona la comparabilidad no solo con el método de medición, sino con sitios y variables claves de todo el país.
2. Análisis meteorológico a nivel nacional: es necesario realizar dicho análisis para poder identificar las variables claves y el alcance que puedan derivar de dicho estudio (periodo de muestreo), así como su relación en la medición.
3. Revisión de posibles Sistemas de Monitoreo Atmosférico (SMA): Considerando que cada estado a nivel nacional tiene condiciones diferentes de equipamiento y de número de

sitios, es conveniente una vez delimitada las variables claves, que sitios geográficos son convenientes para cubrir la cobertura deseada o planteada.

4. Determinación de Variables Claves: estas variables Claves son definidas considerando si existe en los puntos anteriores, como análisis meteorológicos, periodo de muestreo y cobertura. Por ejemplo, temperatura, humedad relativa, sitio geográfico.
5. Proponer y definir, tipo de muestreo, calendario de muestreo y controles de calidad en el muestreo, tamaño de la muestra, este paso contempla:
 - a. Visita inicial a los sitios escogidos para dar mantenimiento de equipos, activación de equipos, calibración de equipos automáticos y manuales, y capacitación a los operarios en los sistemas.
 - b. También se debe definir el tipo de muestreo (diario, cada dos días, horario), que se define dependiendo de los equipos a comparar, generalmente en esta comparación de automático y manual de partículas se realiza considerando la forma como se realiza el monitoreo manual (horario cada 3 días). El tamaño de la muestra se definirá con el tipo de muestreo, el periodo definido en el análisis meteorológico y las variables claves.
6. Determinar el manejo, limpieza y validación de las bases de datos de medición manual y automáticas de PM_{10} y $PM_{2.5}$: esto debe considerar manejo de muestras bases de datos, Registro y manejo de datos, Limpieza y validación de las bases de datos obtenida.
7. Determinación de la comparación matemática entre las metodologías de medición automática y manual: Se recomienda dos métodos de análisis estadístico que proporcione reducción de incertidumbre. Lo más recomendado son las pruebas paramétricas como la regresión lineal.
8. Análisis de resultados de la comparación matemática entre las metodologías de medición automática y manual. Esto debe considerar resultados de:
 - a. Determinar el transporte de partículas por la meteorología en la región de estudio.
 - b. Determinar la comparación de ambas metodologías con los dos métodos estadísticos.

7. Protocolo de comparación de monitoreo manual y automático de PM₁₀ y PM_{2.5} a nivel nacional mediante el protocolo propuesto (Primera etapa)

La primera fase del protocolo es la actualización bibliográfica de los estudios similares, es este caso se realizó búsqueda bibliográfica, de diferentes protocolos y métodos de muestreo, así como la obtención de la correlación en diferentes periodos, coberturas y sitios de muestreo.

7.1. Análisis meteorológico a nivel nacional (temporalidad y representatividad)

Este análisis tuvo como objeto realizar la evaluación inicial que es necesaria para la ubicación de los sitios de muestreo donde se llevará a cabo el presente proyecto, la información es del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el año 2013.

La cobertura es de 187 estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) distribuidas en los 31 Estados y la Ciudad de México, registran promedios de cada 10 minutos de las variables Velocidad del viento, Dirección del viento, Presión atmosférica, Temperatura, Humedad relativa, Radiación solar y Precipitación. Las ubicaciones de las estaciones se observan en la figura 3.

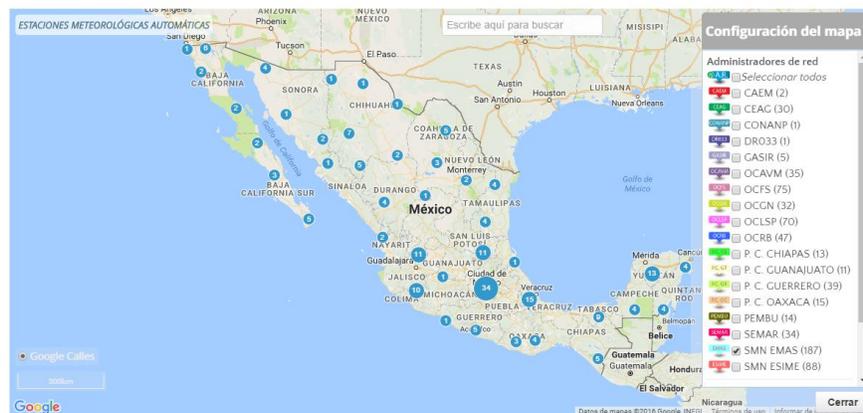


Figura 3. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas automáticas del SMN.

Fuente: SMN

Como objetivo se planteó la identificación de diferentes zonas meteorológicas en la República Mexicana a partir de las variables Presión atmosférica, Temperatura y Humedad Relativa.

A partir de los registros promedio de cada 10 minutos se generaron los promedios horarios (con la restricción de contar con al menos el 75% de registros por hora). Se consideraron las EMAS que durante el año 2013 contaron con al menos el 75% de registros horarios, para contar con un mínimo de suficiencia anual. De las 187 EMAS con que cuenta el SMN se emplearon 165 estaciones que cuentan con suficiencia de datos.

Se representó gráficamente el promedio de la Presión Atmosférica por EMA y se identificó diferencias en la altitud.

Así mismo se representó gráficamente el promedio de la Humedad Relativa y de la Temperatura por EMA.

Se proponen tres regiones caracterizadas por la Presión Atmosférica, la Humedad Relativa y la Temperatura. Con respecto a la Presión Atmosférica se plantean: menores que 760 mb, entre 760 y 850 mb y mayor que 850 mb.

Las figuras 4 a 6 muestran el comportamiento de todas las estaciones con respecto a tres variables meteorológicas analizadas.

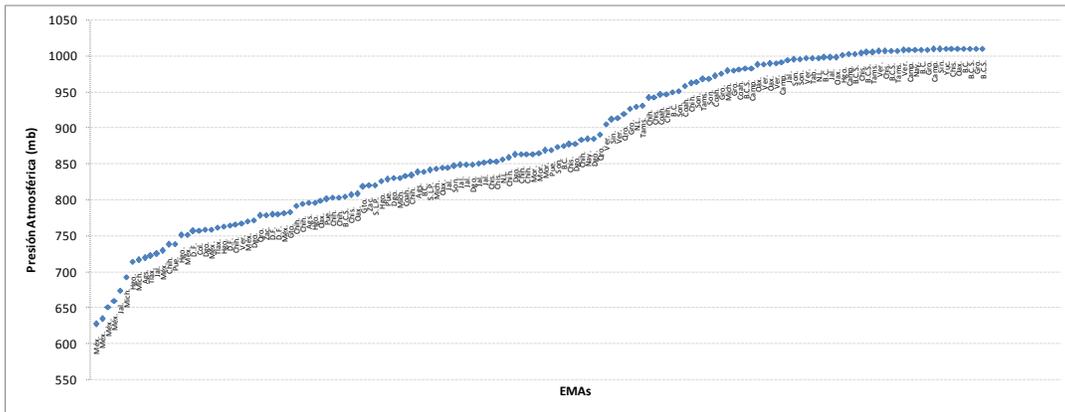


Figura 4. Representación de la Presión Atmosférica por EMA

Fuente: Elaboración Propia CINPRO 2017. Con información de SMA.

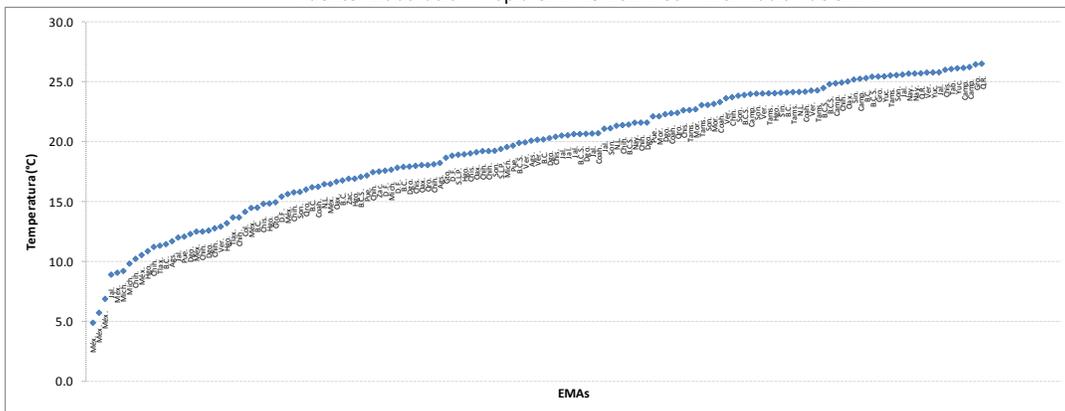


Figura 5. Representación de la Humedad Relativa por EMA

Fuente: Elaboración Propia, CINPRO 2017. Con información de SMA.

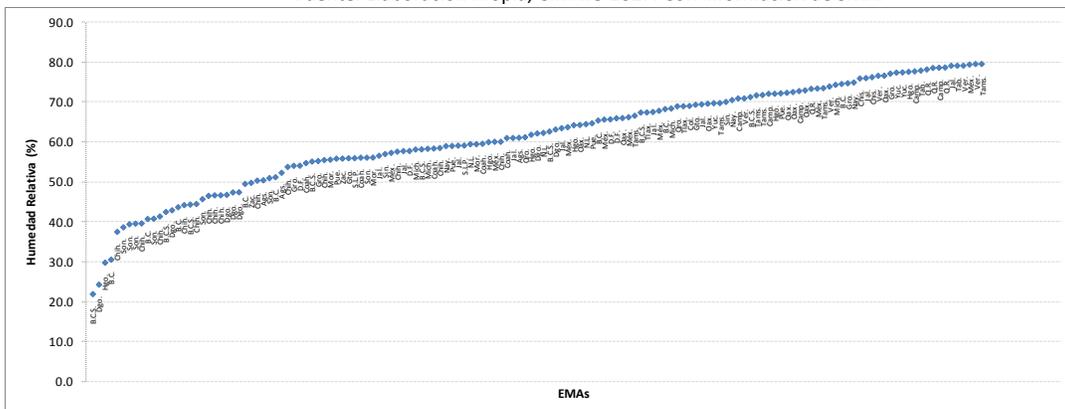


Figura 6. Representación de la Temperatura por EMA

Fuente: Elaboración Propia, CINPRO 2017. Con información de SMA.

- e) Considerando esto se obtuvo a los estados de Guanajuato, Jalisco, Nuevo León y Tabasco (ver figura 7 y 8). A los cuales se les realizó una invitación a participar en el Proyecto a través de comunicación telefónica y vía oficio. La tabla 2 muestra el tipo de equipo con lo que cuenta cada estado y sitio elegido, así como la población y el tipo de región.

Tabla 2. Resumen de SMA que participan en el desarrollo del proyecto.

Estado	PM ₁₀ a	PM _{2.5} a	PM ₁₀ m	PM _{2.5} m	Población (hab)	Zona país
Guanajuato	√	√	√	√	5,853,677	Bajío
Jalisco	√		√		7 844 830	Bajío
Nuevo León	√	√	√	√	5 119 504	Norte
Tabasco	√		√		2,395,272	Sur

a = equipo automático, m = equipo manual

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA.

7.3. Definición de tipo de muestreo, tamaño de la muestra, calendario de muestreo y controles de calidad en el muestreo.

El proyecto contempla la operación simultánea en campo de equipos de medición automática y manual de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en 4 ciudades de la república, con el fin de proponer un factor de correspondencia para el ajuste de datos conforme a los métodos de referencia normalizados.

Se tuvieron 1 o 2 sitios de muestreo por ciudad; durante 3 meses en el período de diciembre 2016 a febrero de 2017, obteniendo muestreos con equipo manual de 24 horas cada tercer día durante todo el período de acuerdo al calendario de muestreo de la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica, por sus siglas en inglés); esperando obtener un total de aproximadamente 30 muestras de muestreo manual para cada uno de los sitios de partículas PM₁₀ y en los casos donde fue posible contar con equipo para partículas PM_{2.5}.

En el caso de los muestreos de partículas con equipo automático se obtuvieron datos horarios generados por cada uno de los equipos tanto de partículas PM₁₀ y algunos sitios con PM_{2.5}; durante todo el período de estudio (diciembre 2016 a febrero 2017).

7.3.1. Descripción del equipo de muestreo de partículas

Para el **muestreo automático** de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), los principios de operación comúnmente utilizados en México son:

Equipo de Atenuación de Radiación Beta

En este método másico para la medición de partículas el material es recolectado del aire ambiente por medio de una cinta. La intensidad de los rayos beta es medida después de que éstos son atenuados por el material particulado. La intensidad es relacionada con la masa del material particulado depositada en la cinta, después de haber efectuado las respectivas correcciones debidas a la absorción de la cinta.

El Carbono-14 o el Prometio-147 son utilizados como fuentes Beta en niveles apropiados de radiación, para los cuales no se requiere licencia. Posteriormente tales radiaciones son detectadas con un centelleador plástico.

Microbalanza de Elemento Oscilante (TEOM).

Este sistema de medición utiliza un filtro intercambiable montado al final de un tubo hueco afilado. El extremo ancho del tubo es fijo. El elemento afilado vibra en su frecuencia natural; el aire de muestreo se pasa a través del filtro, en donde se depositan las partículas. La frecuencia de vibración natural disminuye conforme aumenta la masa de material particulado en el filtro, mientras la electrónica del equipo monitorea esta frecuencia.

Este equipo basa su lectura considerando la relación física entre la masa depositada en el filtro y la frecuencia de vibración del elemento. El cambio en tiempo real de la masa es combinado con la exactitud del flujo controlado, con el ánimo de garantizar una medición precisa de la concentración del material particulado depositado.

El tamaño de partículas a monitorear depende de los fraccionadores de cada equipo, que son colocados en la entrada de muestra. Éstos aprovechan la dinámica de las partículas para que, a cierta velocidad de flujo, las partículas de mayor tamaño sean impactadas en algún sistema de retención y no lleguen hasta el filtro.

Para el **muestreo manual** de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, se utilizaron muestreadores de alto volumen (marcas Wedding y Andersen), mismos que operan a un flujo de 1.13 m³/min. La duración de cada muestreo fue de 24 +/- 2 horas. Se utilizaron filtros de cuarzo de 8 x10", de 2 micrómetros de poro, operando un equipo por fracción de partículas en cada sitio de muestreo.

Dependiendo de la infraestructura con que cuentan los SMA, se tuvieron equipos de muestreo manual de partículas de mediano volumen como lo es el BGI; el cual utiliza filtros de 47 mm de teflón.

7.3.2. Tamaño de muestra

El tamaño de muestra por sitio fue de 30 muestras de muestreo manual de 24 horas, considerando que el periodo fue de aproximadamente 3 meses (época de seca fría) y se muestrea cada 3 días. El muestreo automático de partículas fue diario durante los 3 meses de muestreo obteniendo datos horarios en cada una de las estaciones de monitoreo incluidas en el estudio.

7.3.3. Calendario de muestreo

A continuación, se presenta el calendario de muestreo de diciembre de 2016 a febrero de 2017 (Figura 9), mismo que contiene las actividades que se realizaron en campo por los técnicos de monitoreo de partículas, los muestreos con equipo manual se realizaron cada tercer día de acuerdo al calendario de muestreo de la USEPA. Mientras que el monitoreo automático se realizó de manera continua durante todo el periodo de muestreo de diciembre 2016 a febrero de 2017.

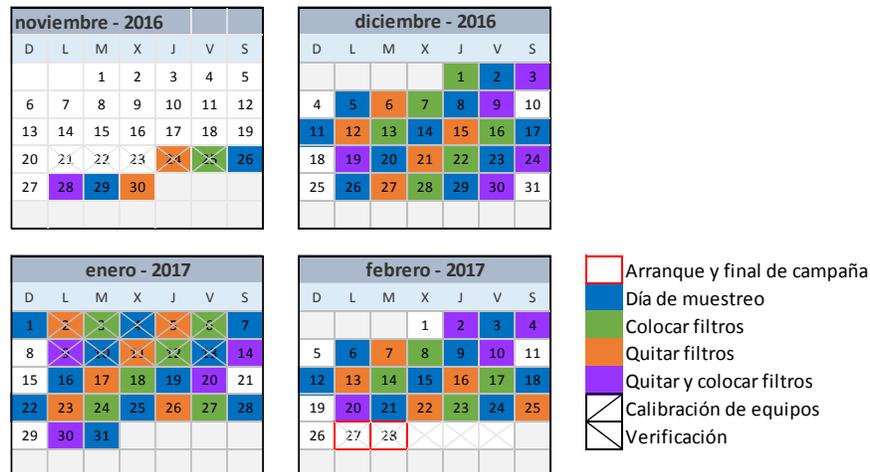


Figura 9. Calendario de muestreo.
Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017.

La verificación y auditoría en campo, se llevó a cabo inicialmente una revisión y calibración de los equipos de muestreo manual y automático a considerar en cada SMA, y en los casos donde fue necesario se rehabilitaron o repararon algunos equipos para su funcionamiento dentro del proyecto, esto con la finalidad de obtener datos válidos y con los menores errores posibles (Ver anexos 3, 4 y 5); se realizó una calibración al inicio, y una más al final del muestreo en el mes de febrero. En este sentido se requirió del apoyo del INECC para realizar la gestión con las redes para poder realizar esta actividad.

7.3.4. Controles de calidad en el muestreo

El muestreo manual de partículas está compuesta por 3 fases:

- Pre-muestreo: actividades de preparación de filtros y medios previos al inicio del muestreo.
- Muestreo: Comprende todas las actividades de toma de muestra que se desarrollan en campo en cada uno de los sitios que se trabajaron en esta estudio.
- Post-muestreo: Son las actividades que se llevan en laboratorio con la muestra tomada.

Análisis de gravimetría, evaluación de parámetros de calidad y preparación de los medios de colección

Las muestras colectadas se analizaron mediante gravimetría para determinar la concentración de las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Los pesajes de los filtros pre y post-muestreo se realizaron en laboratorio de gravimetría, empleando una microbalanza analítica (SARTORIUS LA 130S-F, con una resolución mínima de 0.1 mg, precisión: 0.1 mg).

El control de calidad en laboratorio incluyó: (1) acondicionamiento durante 24 horas antes y después del monitoreo a una temperatura de 22°C (±3°C) y una humedad relativa de 40% (±5%); (2) uso de pulsera y tapete antiestáticos, para quitar las cargas electrostáticas; (3) calibración del equipo (que es efectuada cada año por un laboratorio acreditado), verificación con pesas

calibradas E1 y verificación con pesas calibradas de trabajo en cada pesaje (diario). Se usa el 5% de los filtros como blancos de laboratorio.

Los factores a evaluar, siguiendo protocolos internacionales fueron, la definición de los controles de temperatura y humedad, el tiempo de acondicionamiento, el tiempo pertinente de almacenamiento de los filtros, y se cuantificó la incertidumbre en el pesaje y acondicionamiento de los medios de colección para su máxima reducción. Se consideraron blancos de laboratorio durante el desarrollo del proyecto y se cuantificaron los parámetros de validación de la técnica según la norma ISO-17025.

Los blancos de laboratorio para el acondicionamiento y pesaje de filtros de acuerdo al procedimiento interno “Preparación y pesaje de filtros en el monitoreo atmosférico de alto volumen”, se utiliza un filtro blanco por sesión de pesaje de 20 filtros, por lo que de acuerdo con el número programado de muestras se evaluaron y reportaron las variaciones estadísticas en el pesaje y en las condiciones de temperatura y humedad relativa del laboratorio.

Manejo de muestras

Todas las muestras de los equipos manuales obtenidas en filtros se retiraron lo más pronto posible después de terminar su periodo de muestreo, todas deberían de ser manejadas con cuidado, sin tocarlas con las manos y guardarlas en sus correspondientes cubiertas o medios de transporte, resguardando dichas muestras en un sitio adecuado para su posterior envío al laboratorio vía mensajería o con el técnico en campo que realizó las calibraciones.

En el caso de los datos obtenidos del muestreo automático en la mayoría de los sitios se envía la información directamente al sistema de control de la red de monitoreo quien se encarga de recopilar, validar y enviar la información a CINPRO para ser incluida en el análisis. A excepción de Villahermosa que se obtuvo la información de manera manual cuestionando directamente al dataloger del equipo para poder obtenerla y enviarla a CINPRO para su validación e inclusión en el estudio.

Mantenimiento de Equipos y Calibración

El mantenimiento de los equipos garantiza la continuidad en la toma de muestras en los SMA; por lo anterior se realizó un estricto programa de mantenimiento preventivo y correctivo en cada uno de los sitios de muestreo. De todos los mantenimientos realizados se generó un informe de resultados (Anexo 3).

Por cada visita al lugar durante el muestreo manual de partículas cada tercer día:

- Se verificó el nivel del flujo de los altos volúmenes antes y después del muestreo.
- Se verificó el contador de tiempo antes y después del muestreo.

En las visitas iniciales y finales a los sitios de realizaron las siguientes actividades:

- Se llevó a cabo la calibración del muestreador.
- Limpiar de todo polvo el área del cabezal (inlet) de muestreo.

- Verificar el número de horas de operación desde el último cambio de escobillas. En su caso hacer el cambio de las mismas.
- Inspeccionar el estado de todos los empaques, reponer si se encuentran con desgastes excesivos.
- Operación del registrador de flujo.
- Realizar el procedimiento de calibración (Anexo 4).

En el caso del muestreo automático, en la visita inicial se realizó limpieza y mantenimiento a cada uno de los equipos; así como se llevaron a cabo las calibraciones de los mismos. En la visita final a cada uno de los sitios se realizó una verificación de flujos como parte del control de calidad de las mediciones por parte de personal de CINPRO; ver evidencia fotográfica en el Anexo 5.

7.3.5. Adquisición de consumibles y refacciones

Durante el proyecto se realizó la adquisición de distintas refacciones para la reparación y mantenimiento de los equipos que operaron en las distintas estaciones de monitoreo del país donde se realizaron mediciones.

Entre estos consumibles y refacciones se encuentran:

1. Filtros Cuarzo 8x10", cajas de 25 filtros
2. Papelería
3. Motores para Hivol
4. Controladores de flujo volumétrico G10557 PM10
5. Escobillas modelo B2 para muestreadores de Hi-Vol
6. Programador de arranque y paro manual para Hi-Vol G70
7. Indicador de tiempo transcurrido modelo G901
8. Graficas circulares modelo G106
9. Empaques de neopreno para marco sujetador de filtro
10. Silicón atomizado
11. Así como consumibles, materiales y mano de obra para instalaciones eléctricas.

7.4. Determinación de Variables Claves

La determinación de variable claves en este caso se definió:

1. Temperatura
2. Humedad Relativa
3. Radiación Solar
4. Presión barométrica
5. Periodo meteorológico (Seca fría o seca caliente), para el presente estudio se utilizó el periodo seca fría.

Esta variable al fijarlas se pretende que no cause incertidumbre o variación por ellas en la correlación que se obtenga de comparación entre método manual y automático de partículas.

7.5. Manejo, limpieza y validación de las bases de datos hacia la determinación de la comparación de las metodologías de medición manual y automáticas de PM₁₀ y PM_{2.5}

7.5.1. Registro y manejo de datos

Antes del trabajo en campo, y durante el proceso de cargar filtros en sus correspondientes medios de muestreo se debe de anotar los datos en una bitácora personal además de las hojas de campo correspondiente a fecha, lugar, número de filtro, fracción de la partícula, contadores, flujo inicial y final, condiciones meteorológicas del lugar, entre otras. Durante los periodos de muestreo se deberá de observar y en su caso anotar cualquier actividad extraordinaria o fenómeno natural.

Las conformaciones de las bases de datos se realizaron en formato Excel por uno de los técnicos de CINPRO de forma inmediata posterior al muestreo realizado; esta base de datos fue supervisada por personal de CINPRO.

7.5.2. Limpieza y validación de las bases de datos obtenida

Las bases de datos obtenidas con el monitoreo automático de partículas se validaron siguiendo los lineamientos de validación del INECC, los cuales contemplan:

1. Banderas
2. Bitácoras de operación
3. Cortes de energía
4. Valores constantes y/o no esperados
5. Suficiencia de información
6. Consistencia de datos $PM_{2.5}/PM_{10} < 1$

La limpieza y validación también se realizó para las bases históricas de las variables meteorológicas (temperatura, presión barométrica, radiación solar, humedad relativa y viento), considerando que son las variables que influyen más fuertemente al análisis de comparación. Dichas bases de datos fueron tratadas con los mismos lineamientos de validación que las bases de monitoreo automático.

En el caso del muestreo manual de partículas se partió de la información enviada por los sitios de muestreo en hojas de campo, resultado del muestreo manual, información que se capturo, valido y calculo las concentraciones reales del muestreo utilizando los reportes del pesaje de filtros del laboratorio.

Finalmente se obtuvieron bases validadas, identificando fracción de la partícula, fecha, sitio de muestreo, concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en formato Excel para posterior análisis estadístico.

7.6. Determinación de la comparación estadística entre las metodologías de medición automática y manual de PM₁₀ y PM_{2.5}.

Una vez obtenida las bases de datos validadas, se procede a la obtención del modelo matemático de correspondencia o comparación de metodologías de medición automática y manual de PM₁₀ y PM_{2.5}.

7.6.1. Modelo de regresión lineal simple (simple linear model or straight-line regression).

Desde un enfoque estadístico la metodología adecuada para comparar dos equipos de medición de cualquier índole es el modelo de regresión lineal simple¹, debido a que busca identificar un ajuste lineal entre dos fenómenos. En el caso de la comparación de mediciones de equipos para la medición de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en aire ambiente, el propósito es comparar las mediciones de métodos de referencia (Alto Volumen para PM₁₀ y TEOM para PM_{2.5}) contra las mediciones de métodos equivalentes.

La metodología de regresión lineal simple se basa en modelar la variable respuesta "Y" como función de la variable "X, por tal motivo lo que se busca modelar es la relación $Y = f(X)$, es decir, la respuesta Y es una función de las mediciones de X, en el caso lineal la función que se desea ajustar es del tipo $(\beta_0 + \beta_1 X$, donde β_0 es la ordenada al origen y β_1 es la pendiente).

En específico para la comparación de equipos de medición de partículas, la ecuación a analizar es:

$$\text{Método equivalente} = \beta_0 + \beta_1 \text{ Método de referencia}$$

Si el método equivalente registra valores similares al método de referencia, esto se traduce en obtener $\beta_0 = 0$ y $\beta_1 = 1$.

En otro caso, se deberá sugerir la corrección de las mediciones del método equivalente para obtener la comparabilidad entre ambos métodos, es decir, si $\beta_0 \neq 0$ o $\beta_1 \neq 1$, la corrección se puede dar con la siguiente ecuación:

$$(\text{Método equivalente} - \beta_0) / \beta_1 = \text{Método de referencia}$$

De tal manera que las mediciones corregidas se expresarían como:

$$\text{Método equivalente}_{(\text{corregido})} = \beta^*_0 + \beta^*_1 \text{ Método de referencia}$$

donde $\beta^*_0 = 0$ y $\beta^*_1 = 1$.

Debe aclararse que se determinara esta ecuación por sitio de muestreo.

¹ En el caso específico se usará un ajuste por mínimos cuadrados el cual es similar al ajuste de regresión, con la diferencia que en el primero no hay un supuesto de distribución normal y por ende no se pueden generar intervalos de confianza, sin embargo, el propósito del análisis en este caso es identificar si la pendiente es uno y la ordenada al origen es cero.

7.6.2. Comparación estadística de las Mediciones con Equipos Manuales y Equipos Automáticos.

Se pueden comparar dos conjuntos de datos que no cuenten con la misma cantidad de datos, es decir que no estén apareados, con el propósito de identificar si la mediana de ambos grupos es similar. Para esto se emplea una prueba estadística No Paramétrica² denominada **Prueba de la Mediana**. La idea atrás de esta prueba es: si los dos grupos de datos cuentan con medianas iguales, la proporción de casos de cada grupo que es mayor o menor a la mediana global son iguales. De esta forma las hipótesis a contrastar son: Hipótesis nula (H_0): mediana del grupo A = mediana del grupo B y la hipótesis alternativa (H_1): mediana del grupo A \neq mediana del grupo B.

Para fines prácticos, en el caso del comparativo de equipos de muestreos de partículas las hipótesis se traducen en: H_0 : mediana de las mediciones automáticas = mediana de los muestreos manuales; para cada tamaño de partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$).

Otra prueba estadística No Paramétrica de utilidad para comparar dos grupos de datos es la **Prueba de Mann-Whitney**, la cual se emplea para comparar dos conjuntos de datos continuos e independientes, con tamaños de muestra diferentes. Las hipótesis a contrastar son: Hipótesis nula (H_0): no hay diferencias entre los dos grupos y la hipótesis alternativa (H_1): sí hay diferencias entre los dos grupos.

De esta manera la combinación de ambas pruebas se puede interpretar de la siguiente manera:

Prueba de la Mediana	Prueba de Mann-Whitney	
	Rechaza H_0	No se rechaza H_0
Rechaza H_0	Los dos conjuntos de datos no tienen relación entre sí	En caso de no contar con datos suficientes se puede dar esta respuesta.
No se rechaza H_0	Las poblaciones no son las mismas, pero la mediana coincide.	Esta es la respuesta que esperamos se cumpla en todos los casos, para confirmar que los equipos automáticos y manuales miden lo mismo.

En las comparaciones de equipos manuales y automáticos se realizaron estas pruebas en cada una de las tres ciudades de estudio para identificar su comportamiento.

Por otro lado, de manera visual, se representa el comportamiento de la comparación entre mediciones automáticas y manuales por medio de gráficos "boxplot", los cuales muestran de forma paralela la distribución de los registros en el mismo periodo. Con la intención de mostrar patrones similares si los equipos registran concentraciones iguales.

²En una prueba No Paramétrica no es necesario contar con el supuesto de conocer la función de distribución de los datos.

8. Resultados

8.1. Sitios seleccionados

Los estados seleccionados de la República Mexicana fueron Guanajuato, Jalisco, Nuevo León y Tabasco, dentro de cada estado las ciudades donde se realizó el muestro son: Salamanca, Guadalajara, Monterrey y Villahermosa, ver el mapa con la distribución de los sitios de muestreo (Figura 10). En la Tabla 3 se presenta la ubicación de las estaciones de monitoreo participantes en el presente proyecto.

Estos sitios fueron seleccionados debido a los siguientes:

1. Forma parte de los sitios que cuentan con equipo de material particulado.
2. Es parte de los sitios climáticos encontrados según el análisis de temperatura, presión barométrica y humedad relativa en el sitio.

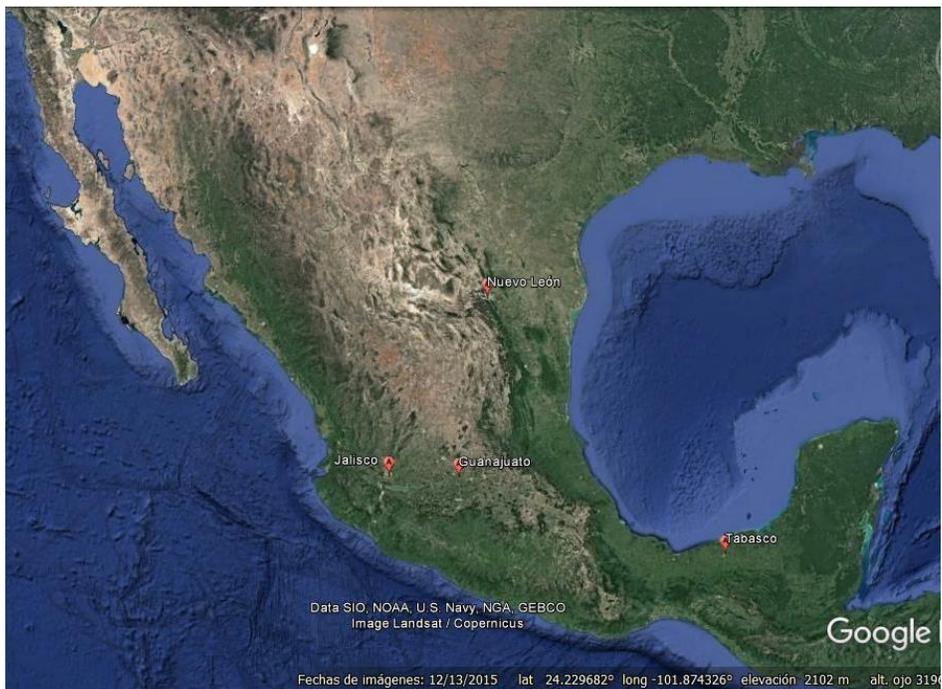


Figura 10. Ubicación de los sitios de muestreo en la República Mexicana.

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Google maps 2017

Tabla 3. Ubicación de los sitios de muestreo.

Estado	Estación	Dirección	Coordenadas geográficas
Guanajuato	DIF	Irapuato s/n, Guanajuato, 36700 Salamanca, Gto.	20.56, -101.2 1721 msnm
Guanajuato	Cruz Roja	Avenida Faja de Oro esquina Ezequiel Ordóñez No. 100, Salamanca, Gto.	20.58, -101.2 1721 msnm
Jalisco	Santa Fe	Avenida Concepción #115, Concepción del Valle, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco	20°31'44", -103°22'37" 1541 msnm
Jalisco	Las Pintas	Calle Martínez, entre Dionisio Salazar y Brigido Pérez, Col. Las Pintas, El Salto, Jalisco	20°34'36", -103°19'35" 1543 msnm
Nuevo León	Obispado	Calle 5 de mayo No. 2001, Col. Nuevo Obispado CP: 64040 Monterrey, Nuevo León	25.68, -100.34 560 msnm
Tabasco	Instituto Tecnológico de Villahermosa (ITVH)	Carretera Villahermosa-Frontera Km. 3.5, Ciudad Industrial, 86010 Villahermosa, Tab.	18.023, -92.904 8 msnm
Tabasco	Secretaría de Educación de Villahermosa Tabasco (SET)	Gregorio Méndez s/n Águila, Gil y Saenz 86080 Villahermosa, Tab.	17.987, -92.939 21 msnm

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de los SMA.

Las ciudades de Salamanca y Guadalajara pertenecen a la región climática con presión barométrica de 760 a 850 mb; mientras que las ciudades de Monterrey y Tabasco pertenecen a la región climática con presión barométrica mayor a 850 mb.

8.1.1. Descripción geográfica y socioeconómica de cada ciudad

Salamanca, Guanajuato

Salamanca es una ciudad del estado de Guanajuato con una población de 5,864,016, Habitantes, la ciudad de Salamanca cuenta con 171,559 habitantes según el CONAPO.

El municipio de Salamanca cuenta con una extensión territorial de 774 Km² y se ubica dentro del estado de Guanajuato, en lo que es llamado El Corredor Industrial del Bajío. Este corredor se encuentra asentada en un valle rodeado de grandes cerros.

Salamanca colinda al norte con los municipios de Guanajuato, Dolores Hidalgo y San Miguel de Allende al oeste con los municipios de Irapuato y Pueblo Nuevo, al sur con los municipio de Valle de Santiago y Jaral del Progreso, al este con los municipios de Cortázar, Juventino Rosas y Villagrán.

La principal industria en esta ciudad es la Refinería Ing. Antonio Manuel Amor (RIAMA), el principal impulso para el progreso de esta ciudad.

También se encuentra varias industrias dedicadas a la petroquímica, que ha dado lugar a numerosas empresas de autotransporte y servicios a la industria petroquímica. La ubicación de los sitios muestreados se ven en la Figura 11.



Figura 11. Ubicación de los sitios de muestreo en Salamanca, Guanajuato.

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Google maps 2017

Guadalajara, Jalisco

Guadalajara es capital y urbe más poblada del estado de Jalisco. Se localiza en el occidente de México, al centro de Jalisco, en la zona geográfica conocida como Valle de Atemajac, forma parte de la zona metropolitana de Guadalajara, junto con otros ocho municipios. Su territorio limita al norte con los municipios de Zapopan e Ixtlahuacán del Río, al oriente con Tonalá y Zapotlanejo, al sur con San Pedro Tlaquepaque y al occidente con Zapopan. Se ubica en la macro-región de El Bajío, específicamente en el Bajío Occidente o Centro Occidente (México).

El número de habitantes reportado por la CONAPO en el estado de Jalisco en 2016 es de 8,022,181, de los cuales 1,513,498 habitantes se encuentran en el municipio de Guadalajara esto representa el 19% del Estado

El clima de la ciudad es templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media. La primavera es la estación más seca y cálida; la temporada de lluvias tiene lugar entre mayo y octubre, presentándose tormentas con intensa actividad eléctrica y fuertes vientos y en ocasiones granizo en esta temporada las máximas son de 26 °C.

La economía de Guadalajara está activa en los tres sectores económicos (actividades económicas) que son el Primario, Secundario y Terciario. Las actividades primarias se basan en el tránsito y comercio de ganado bovino, porcino, ovino, caprino, equino, avícola. El sitio muestreado se observa en la figura 12.

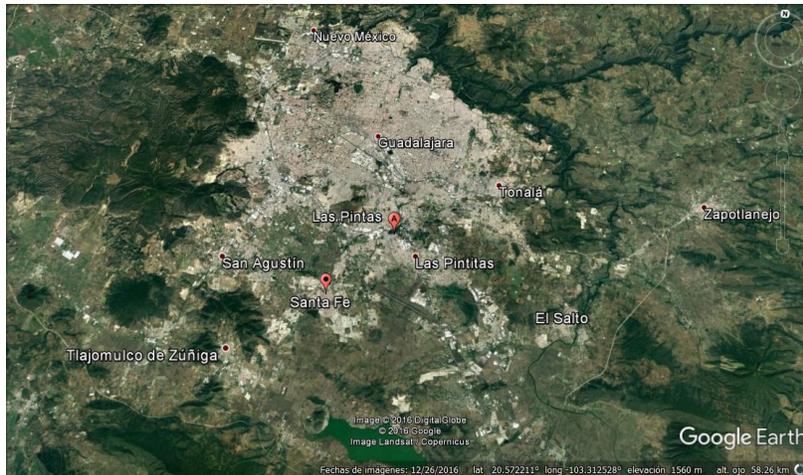


Figura 12. Ubicación de los sitios de muestreo en Guadalajara, Jalisco.

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Google maps 2017

Monterrey, Nuevo León

Monterrey es la capital y ciudad más poblada del estado de Nuevo León, Monterrey es una de las ciudades más desarrolladas de México, tiene una gran cultura e historia, sin mencionar que es además un centro de negocios, industrial y económico muy importante.

Monterrey tiene una economía fuerte por ser la base de muchas empresas nacionales e internacionales como Cemex, Oxxo, FEMSA, Grupo Alfa entre otras, por lo que es llamada La Capital Industrial de México. Es la segunda ciudad de México con mejor economía con un PIB de 122 896 dólares en 2014.

El número de habitantes reportado por la CONAPO en el estado de Nuevo León en 2016 es de 5,157,780 de los cuales 1,193,631 habitantes se encuentran en el municipio de Monterrey esto representa el 23% del Estado. Los sitios de muestreados se observan en la figura 13.



Figura 13. Ubicación del sitio de muestreo en Monterrey, Nuevo León.

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Google maps 2017

Villahermosa, Tabasco

Villahermosa es la ciudad capital del estado de Tabasco y la cabecera del municipio de Centro. Concentra la mayor población urbana del estado.

La ciudad se encuentra conurbada con otras seis localidades pertenecientes al municipio de Centro: Villa Ocuilzapotlán, Villa Macultepec, Villa Parrilla primera Sección, Villa Playas del Rosario, Ixtacomitán, Anacleto Canabal y Río Viejo, así como tres localidades del vecino municipio de Nacajuca: Bosques de Saloya, La Selva y Pomoca. Los municipios de Nacajuca y Centro conforman la Zona Metropolitana de Villahermosa.

El número de habitantes reportado por la CONAPO en el estado de Tabasco en 2016 es de 2,409,876, de los cuales 698,793 habitantes se encuentran en el municipio del Centro esto representa el 29% del Estado.

La economía de la ciudad de Villahermosa, gira en torno a la industria petrolera, al ser centro de operaciones regional de la empresa petrolera nacional Petróleos Mexicanos, quien ha instalado en la ciudad a dos de sus principales subsidiarias como son: Pemex Exploración y Producción, y Pemex Gas y Petroquímica Básica, además del Centro Administrativo de la región sur. Desde esta ciudad, PEMEX controla la exploración, producción y distribución del petróleo y gas natural de los campos petroleros productores ubicados en la región sureste del país.

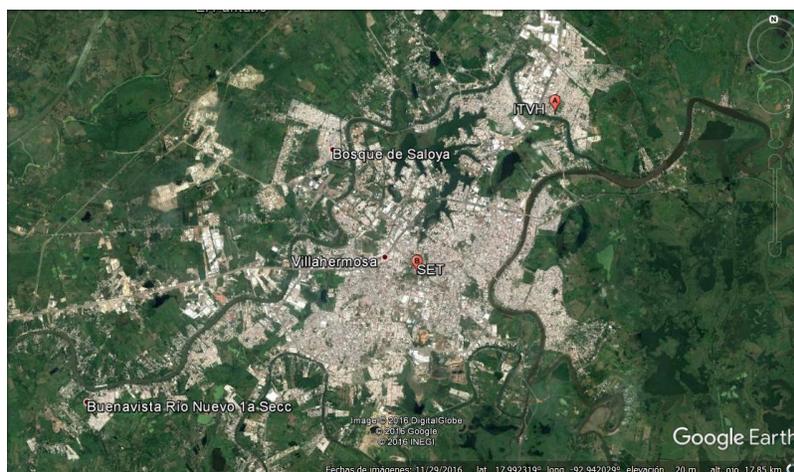


Figura 14. Ubicación de los sitios de muestreo en Villahermosa, Tabasco.

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Google maps 2017

Al igual que la mayor parte del estado de Tabasco, el clima en Villahermosa es cálido-húmedo-seco. La temperatura durante la primavera puede llegar a superar los 40° C con una humedad relativa superior al 90%, durante el corto invierno el clima es mucho más seco y las temperaturas son mucho más bajas. La figura 14 muestra los sitios de muestreo en Villahermosa, Tabasco.

8.2. Equipos y sitios de muestreo seleccionados

En la Tabla 4 se presentan los equipos y la fracción de partículas muestreada en cada uno de los sitios de muestreo en los diferentes estados de la República Mexicana. Así como el número de muestras del muestreo manual a obtener en cada uno de los sitios por fracción de partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}, en los sitios donde corresponda).

Tabla 4. Equipos de muestreo por sitio.

Red de monitoreo	Estación	Equipo PM ₁₀ automático	Equipo PM _{2.5} automático	Equipo PM ₁₀ manual	Equipo PM _{2.5} manual	Número de muestras obtenidas
Guanajuato (Salamanca)	DIF	MetOne BAM1020		Andersen - PM10 Alto volumen		31
	Cruz Roja		THERMO FH62C14		BGI PQ200 - Medio volumen	31
Jalisco (Guadalajara)	Santa Fe	MetOne BAM1020	----	Weeding & Associates - PM10 Alto Volumen	----	25
	Las Pintas	Thermo Scientific TEOM 1400a	----	Weeding & Associates - PM10 Alto Volumen	----	25
Nuevo León (Monterrey)	Obispado	MetOne BAM1020	THERMO FH62C14	Weeding & Associates - PM10 Alto Volumen	Weeding & Associates - Tish – PM2.5 Alto Volumen	23
Tabasco (Villahermosa)	ITVH	THERMO FH62C14	----	Andersen - PM10 Alto volumen ciclónico	----	29
	SET	MetOne BAM1020	----	Andersen - PM10 Alto volumen volumétrico	----	29

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017.con información de red de monitoreo de cada Estado 2017

De acuerdo a la tabla anterior, la mayoría de los equipos automáticos utilizados en este estudio, tienen el principio de operación de atenuación beta, a excepción del equipo ubicado en el sitio “Las Pintas” que cuenta con TEOM (tapered element oscillating microbalance). En el caso del muestreo manual de partículas la mayoría son equipos de alto volumen, a excepción del equipo ubicado en la estación “Cruz roja” que se trata de un equipo manual de medio volumen).

A todos los equipos se les realizó mantenimiento y calibración al inicio del proyecto y al final para asegurar el buen funcionamiento de los mismos (Ver Anexos 3, 4 y 5).

En el caso de las estaciones ubicadas en las ciudades de Guadalajara, Monterrey y Villahermosa, se tuvieron que rehabilitar los equipos de muestreo manual de partículas al inicio de la campaña, ya que aun cuando la red contaba con ellos estos no estaban operando. En el caso de Tabasco los equipos tanto manuales como automáticos de muestreo de partículas se encontraban deshabilitados por lo que realizaron mantenimientos mayores para su rehabilitación.

8.3. Determinación de la comparación entre las metodologías de medición manual y automática de PM₁₀ y PM_{2.5}

El resultado obtenido en cada ciudad se inició con la evaluación de la meteorología y su influencia con el material particulado en el sitio se presenta en el Anexo 1 de análisis meteorológico.

A continuación, se presenta por ciudad el análisis realizado hacia la determinación de la comparación entre los métodos de medición.

8.3.1. Salamanca

Análisis meteorológico

El análisis de los parámetros meteorológicos de 2014 a 2016 mostro que existen dos épocas del año, en donde dicho parámetro cambia significativamente.

Mensualmente se presentan diferencias en la meteorología, en el caso de la temperatura sus máximos valores se registran en el mes de mayo y los menores durante enero, se marcan dos temporadas: de abril a octubre, y de noviembre a marzo. En el caso de la humedad relativa los máximos valores se registran en el mes de julio y los menores en abril, las dos temporadas que se marcan en este caso cubren de junio a diciembre y de enero a mayo. Los cambios en la presión barométrica son tan pequeños que no determinan variaciones entre los meses. En el caso de la radiación solar los máximos valores se registran en mayo y los menores en diciembre, no son evidentes las épocas debido a que presenta un crecimiento paulatino de enero a mayo y posteriormente un decrecimiento de junio a diciembre (ver figura 15).

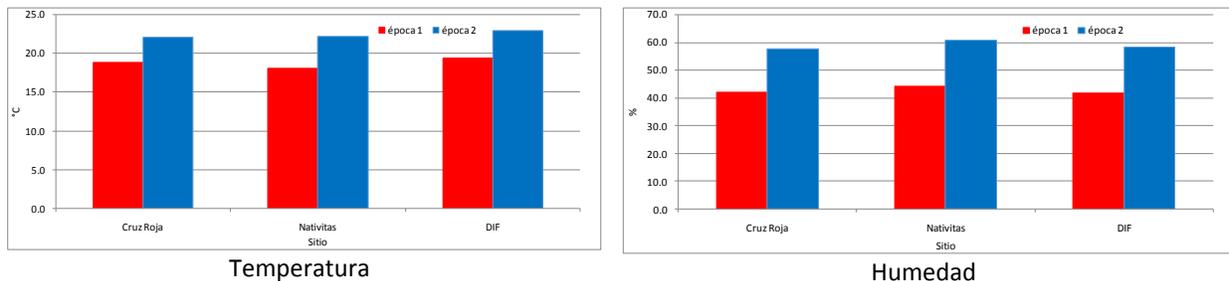


Figura 15. Comportamiento por épocas y sitio de la ciudad de Salamanca de temperatura y humedad relativa.

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. con información de SMA.

El análisis de las variables dirección y velocidad del viento, se realizó con respecto a las rosas de viento, utilizando la escala de Beaufort de la intensidad del viento (Calma³, Ventolina, Brisa muy débil, Brisa Ligera, Brisa moderada, Brisa fresca y Brisa fuerte) Tabla 5, y considerando 8 categorías de la dirección del viento: N-norte, NE-noreste, E-este, SE-sureste, S-sur, SW-suroeste, W-oeste y NW-noroeste (ver Tabla 6).

³Registro de vientos menores a 1 nudos (0.51 m/s) o la ausencia de todo movimiento perceptible del aire.

Tabla 5. Extracto de la escala de Beaufort de la intensidad del viento.

Beaufort Número	Velocidad de viento			Fuerza del viento
	Nodos	MPH	KPH	
0	< 1	< 1	< 1	Calma
1	1-3	1-3	1-5	Aire ligero
2	4-6	4-7	6-11	Brisa ligera
3	7-10	8-12	12-19	Suave brisa
4	11-16	13-18	20-28	Brisa moderada
5	17-21	19-24	29-38	Brisa fresca
6	22-27	25-31	39-49	Fuerte brisa

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017.con información de SMA.

Tabla 6.Categorías de la dirección del viento.

Rango de la dirección del viento (grados)	Categoría
0 a 22.5	N
22.5 a 67.5	NE
67.5 a 112.5	E
112.5 a 157.5	SE
157.5 a 202.5	S
202.5 a 247.5	SW
247.5 a 292.5	W
292.5 a 337.5	NW
337.5 a 360	N

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017.con información de SMA.

El viento predominante en los dos sitios proviene del Este, la máxima intensidad en Cruz Roja se registró en 12.5 m/s, con un 3% de calma y en el caso de DIF la máxima intensidad se registró de 11 m/s, con un 5.5% de calma (Figura 16).

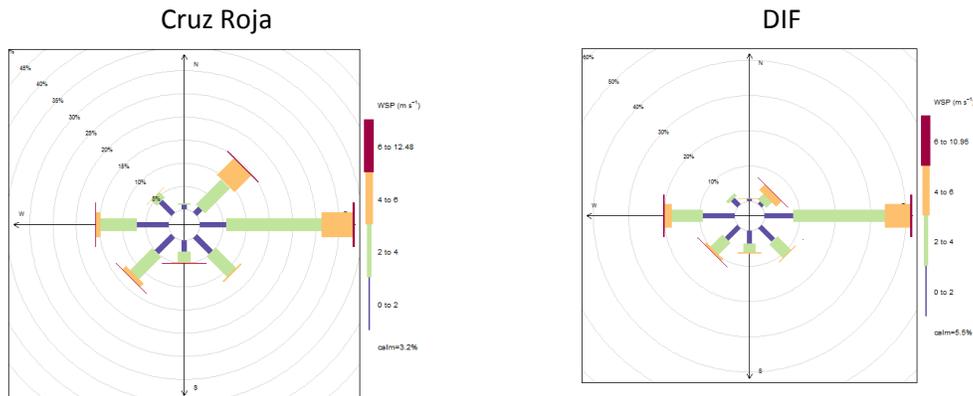


Figura 16.Rosas de Viento para los Sitios en la ciudad de Salamanca (2014-2016)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017.con información de SMA.

Anualmente se mantiene el mismo patrón, con el viento predominante en los tres sitios proviene del Este, con un abanico del Noreste al Oeste en el caso de Cruz Roja y principalmente del Este y Oeste en el caso de DIF (ver Anexo 1. Análisis meteorológico).

Se realizó un análisis de la procedencia de las partículas por dirección del viento por sitio de muestreo en Salamanca, la figura 17 muestra por sitio la procedencia de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ producto del viento.

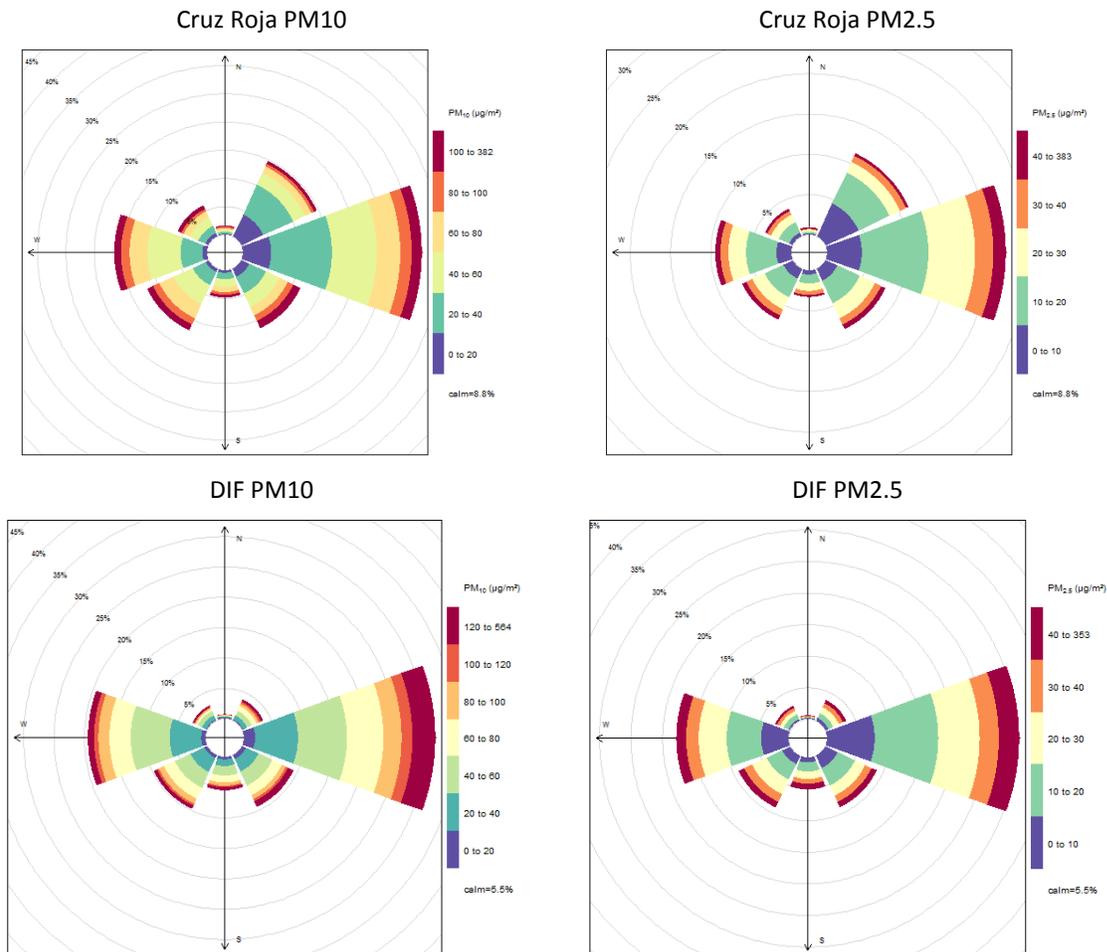


Figura 17. Procedencia de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ producto del viento en tres diferentes sitios en Salamanca

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. con información de SMA.

El comportamiento horario de la procedencia de las partículas por el viento se presenta en el Anexo 1. (Análisis meteorológico).

Comparativo mediciones de PM₁₀ y PM_{2.5} con equipo manual y automático en Salamanca

Se contó con una cobertura de más del 90% de los registros horarios de PM₁₀ y PM_{2.5} en los sitios, del 89% de los muestreos de PM_{2.5} en Cruz Roja y del 64% de los muestreos de PM₁₀ en DIF (Tabla 7).

Tabla 7. Porcentaje de registros horarios o muestreos realizados por sitios en la ciudad de Salamanca

	Cruz Roja	Cruz Roja	DIF	DIF	Cruz Roja	DIF
Registros horarios o muestreos (%)	PM10 aut	PM2.5 aut	PM10 aut	PM2.5 aut	PM2.5 man	PM10 man
	2751 (99.7%)	2554 (92.5%)	2700 (97.8%)	2736 (99.1%)	35 (89.7%)	25 (64.1%)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

A partir de los registros horarios de PM₁₀ y PM_{2.5} se obtuvo el promedio de 24 horas⁴ y se comparó con los muestreos de 24 de los equipos manuales. En el Anexo 2 se muestra cómo se obtuvo el promedio de 24 horas.

Con estos resultados el comparativo se realizó entre los promedios de 24 horas de los registros (Anexo 2. Obtención de promedio de 24 horas por ciudad y sitios de muestreo) horarios y los muestreos de los sitios Cruz Roja (PM_{2.5}) y DIF (PM₁₀), que son los único que cuentan con ambas mediciones para su comparación (ver tabla 8).

Tabla 8. Concentración del promedio de 24 horas de PM₁₀ y PM_{2.5} en µg/m³

Número de muestra	Cruz Roja	Cruz Roja	Cruz Roja	DIF	DIF	DIF
	PM10 aut	PM2.5 aut	PM2.5 man	PM10 aut	PM2.5 aut	PM10 man
1	35.4	15.0	14.2	66.6	15.2	30.1
2	75.1	17.9	21.0	80.8	22.6	47.1
3	83.1	28.2	26.6	80.7	20.7	47.1
4	46.7	11.5	11.9	56.2	14.9	37.0
5	84.1	28.7	27.8	142.8	37.8	86.6
6	48.1	21.1	19.7	74.7	19.9	56.0
7	75.6	24.0	20.5	103.1	28.5	72.5
8	77.6	29.9	26.5	93.5	29.5	61.1
9	35.4	15.5	11.7	68.5	12.3	42.0
10	65.7	25.0		98.2	27.2	
11	84.3	35.8		118.3	41.8	
12	30.5	13.1		57.5	15.1	
13	108.5	83.9		154.2	75.2	
14	109.0	38.3	38.0	156.2	50.9	118.0
15	71.0	28.6	22.5	120.5	34.4	80.9
16	58.6	24.6	21.4	103.7	29.5	77.7
17	72.8	26.1	27.8	104.7	28.6	72.9
18	76.3	23.9	23.7		26.1	65.7
19	57.2	16.9	15.5	75.7	24.8	66.9
20	69.4	19.1	22.2	83.2	27.5	73.6
21	69.8	20.4	17.4	65.1	20.7	53.3
22	76.0	21.7	18.7	86.1	23.1	62.6
23	81.9		17.8	107.3	37.0	72.8

⁴ con la restricción de contar al menos con 18 horas con registros (75%)

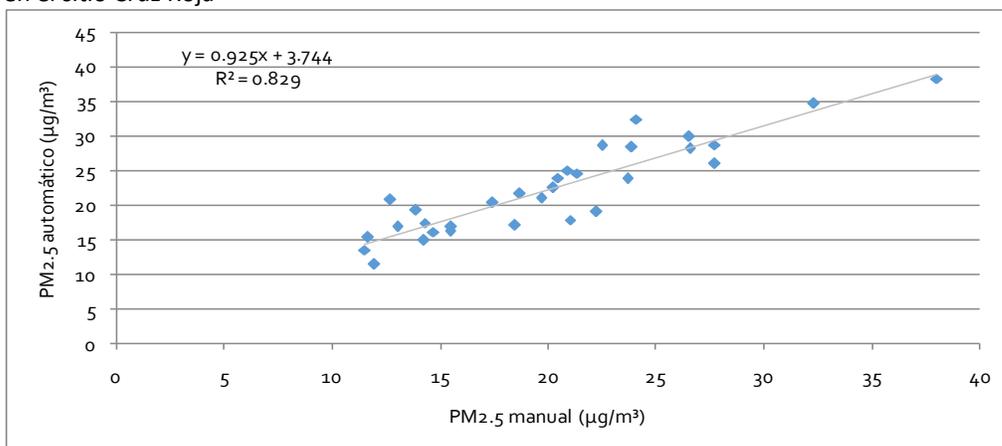
Número de muestra	Cruz Roja	Cruz Roja	Cruz Roja	DIF	DIF	DIF
	PM10 aut	PM2.5 aut	PM2.5 man	PM10 aut	PM2.5 aut	PM10 man
24	44.9		17.0	59.1	25.4	41.3
25	63.3	25.0	20.9	68.3	23.8	54.3
26	79.1	32.5	24.1	111.3	28.4	79.6
27	90.7	34.7	32.3	125.4	41.1	95.1
28	73.0	21.4	1.0	89.8	33.7	68.6
29	44.9	11.2	7.0	41.3	10.2	31.8
30	50.3	17.5	14.3	77.5	20.8	
31	61.1	17.2	18.5	77.9	22.5	
32	60.7	19.3	13.9	82.1	21.7	
33	76.5	28.4	23.9	109.7	28.4	
34	40.8	17.0	13.0	49.5	16.5	
35	43.6	20.8	12.7	69.3	18.2	
36	34.9	16.3	15.5	42.3	19.3	
37	29.5	13.6	11.5	46.1	14.2	
38	34.6	16.1	14.7	56.6	14.9	
39	46.4	22.5	20.3	52.7	16.3	

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

Regresión lineal.

La comparación obtenida de la regresión lineal se presenta en la figura 18, la cual muestra una desviación entre los registros automáticos y manuales. En el caso de Cruz Roja sin embargo la variación captada por el ajuste lineal es mayor al 80%, mientras que en el caso del DIF la variación es menor al 60%, esto indica alguna imprecisión en los datos automáticos. Por otro lado, el ajuste lineal de Cruz Roja muestra un sesgo de $3.744 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ordenada al origen) y una pendiente cercana a uno (0.925) que refleja una subestimación del equipo automático del 4%. En el caso del DIF el sesgo es mayor, de $9.420 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una pendiente superior a uno (1.209) que refleja una sobreestimación del equipo automático del 30%. Lo ideal es que el ajuste lineal arroje una pendiente de uno y una ordenada al origen de cero, con una variación cercana a uno (R^2).

PM_{2.5} en el sitio Cruz Roja



PM₁₀ en el sitio DIF

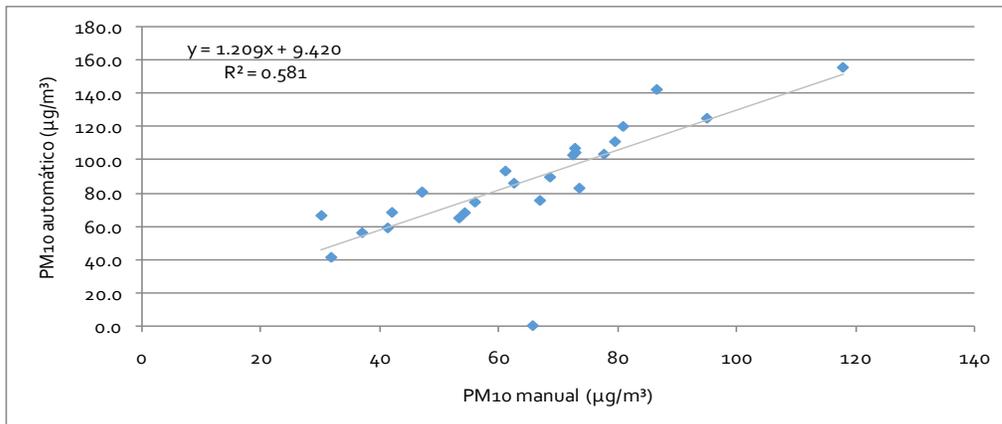


Figura 18. Comparativo del método de medición manual y automático para PM₁₀ y PM_{2.5} por sitio para la ciudad de Salamanca

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

En la figura 18, en el DIF, por cada 100 µg/m³ de PM₁₀ que se registren con el equipo manual se estarían registrando 120 µg/m³ con el equipo automático, además de tener un ligero sesgo de 9.420 µg/m³, ya que al registrar cero µg/m³ con el equipo manual se registran 9.420 µg/m³ con el equipo automático.

Como se aprecia en la figura 18, en la Cruz Roja, por cada 100 µg/m³ de PM_{2.5} que se registren con el equipo manual se estarían registrando 92.5 µg/m³ con el equipo automático, además de tener un ligero sesgo de 3.744 µg/m³, ya que al registrar cero µg/m³ con el equipo manual se registran 3.744 µg/m³ con el equipo automático.

Comparación con las Pruebas No Paramétricas

La figura 19 muestra los diagramas de caja para la prueba

Estación	Comparativo de PM10 automático con PM10 manual	
	Prueba de la Mediana	Prueba de Mann-Whitney
DIF	Se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.006, es decir, sí hay diferencias en la mediana de los dos tipos de medición.	Se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.000, es decir, las mediciones provienen de poblaciones diferentes.

Se reporta el nivel de significancia (p-value) en cada prueba, lo cual representa el nivel con el cuál la hipótesis nula sería rechazada. En el caso de valores menores a 0.05, hay evidencias para rechazar la Hipótesis nula (H₀).

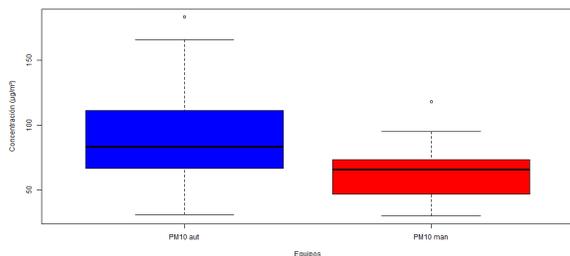
En una prueba No Paramétrica no es necesario contar con el supuesto de conocer la función de distribución de los datos.

Estación	Comparativo de PM2.5 automático con PM2.5 manual	
	Prueba de la Mediana	Prueba de Mann-Whitney
Cruz Roja	No se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.168, es decir, no hay diferencias en la mediana de los dos tipos de medición.	No se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.190, es decir, las mediciones provienen de la misma población.

Se reporta el nivel de significancia (p-value) en cada prueba, lo cual representa el nivel con el cuál la hipótesis nula sería rechazada. En el caso de valores menores a 0.05, hay evidencias para rechazar la Hipótesis nula (H₀).

En una prueba No Paramétrica no es necesario contar con el supuesto de conocer la función de distribución de los datos.

DIF "PM10"



Cruz Roja "PM2.5"

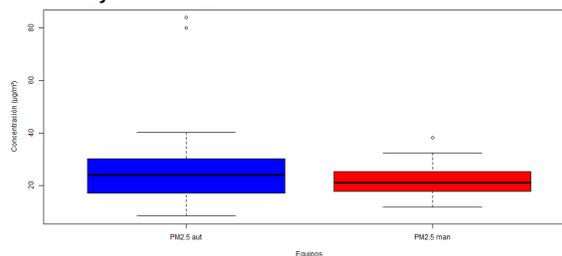


Figura 19. Representación gráfica de los "boxplot"

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

8.3.2. Guadalajara

Análisis meteorológico

Se realizó el análisis de la meteorología en dos sitios de Guadalajara (Las Pintas y Santa Fe), para tres años (2104, 2015 y 2106), en las variables Velocidad del viento -WS (metros por segundo-m/s), Dirección del viento -WD (grados azimuth-°), Temperatura ambiente -TEMP (grados celsius-°C), Humedad relativa -HR (porcentaje-%), Presión barométrica -PBAR (milímetros de mercurio-mmHg), Radiación solar -RADSOL (watts por metro cuadrado- w/m²), Precipitación pluvial -PP (milímetros-mm). La mayoría de las variables meteorológicas cuenta con más del 80% de registros por año, lo que permite un análisis más confiable por la cantidad de información (Tabla 9), sin embargo, en el caso de la Presión barométrica y la Precipitación pluvial no se cuenta con suficientes registros para poder analizar el comportamiento de estas variables, por lo cual no se incluyen en el análisis. Cabe comentar que solo la Radiación solar, la Velocidad y Dirección del viento se registraron en ambos sitios, mientras que la Temperatura ambiente y la Humedad relativa solo se registraron en Las Pintas.

Tabla 9.Registros y porcentaje anual de variables meteorológicas en Guadalajara, 2014 a 2016.

Estación	Variable meteorológica	Año			Total
		2014	2015	2016	
Las Pintas	Velocidad del viento (WS)	8714 (99.47%)	8681 (99.1%)	8777 (99.92%)	26172 (99.5%)
	Dirección del viento (WD)	8714 (99.47%)	8681 (99.1%)	8777 (99.92%)	26172 (99.5%)
	Temperatura ambiente (TEMP)	8714 (99.47%)	8681 (99.1%)	8777 (99.92%)	26172 (99.5%)
	Humedad relativa (HR)	8714 (99.47%)	8681 (99.1%)	8777 (99.92%)	26172 (99.5%)
	Presión barométrica (PBAR)	1 (0.01%)	8681 (99.1%)	1 (0.01%)	8683 (33.01%)
	Radiación solar (RADSOL)	8714 (99.47%)	8681 (99.1%)	8777 (99.92%)	26172 (99.5%)
	Precipitación Pluvial (PP)	8714 (99.47%)	8682 (99.11%)	1 (0.01%)	17397 (66.14%)
Santa Fe	Velocidad del viento (WS)	8744 (99.82%)	8728 (99.63%)	8753 (99.65%)	26225 (99.7%)
	Dirección del viento (WD)	8744 (99.82%)	8728 (99.63%)	8753 (99.65%)	26225 (99.7%)
	Radiación solar (RADSOL)	4433 (50.61%)	8728 (99.63%)	8753 (99.65%)	21914 (83.31%)
	Precipitación Pluvial (PP)	2160 (24.66%)	8734 (99.7%)	0 (0%)	10894 (41.42%)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA.

Mensualmente se presentan diferencias en la meteorología, en el caso de la temperatura sus máximos valores se registran en el mes de mayo y los menores durante enero, se marcan dos temporadas: de abril a septiembre y de octubre a marzo. (ver figura 20)

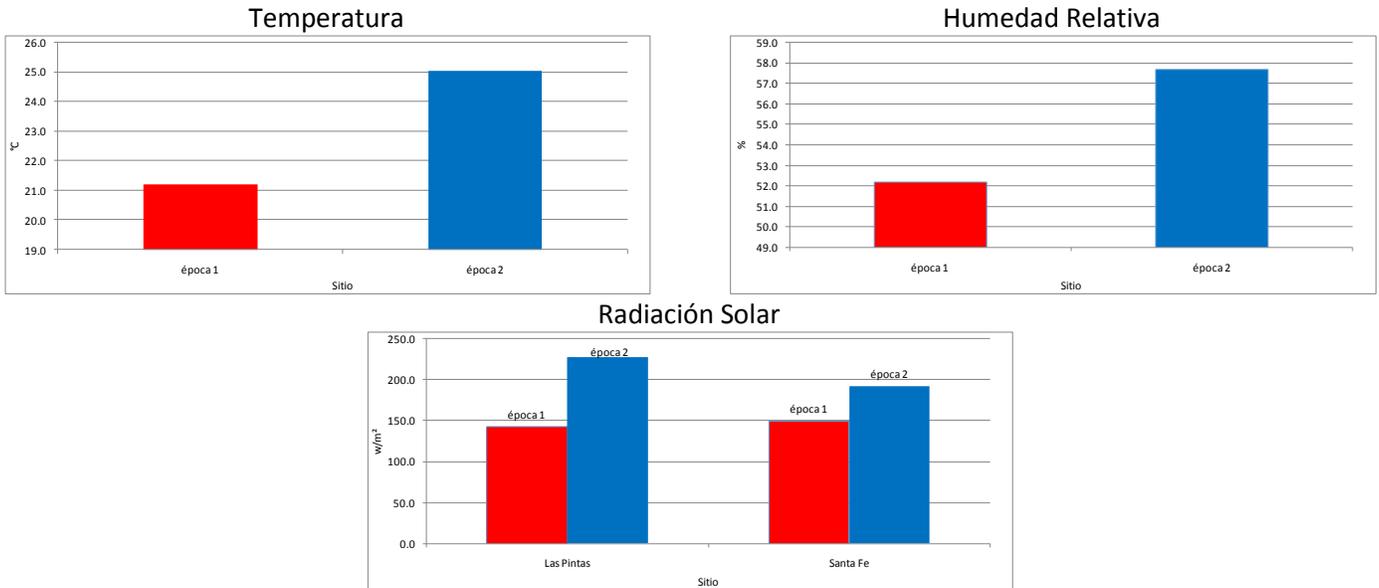


Figura 20. Comportamiento por épocas (2014-2016)
Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA

El análisis horario se encuentra en el Anexo 1.

El viento predominante en los dos sitios es del Oeste (W), la máxima intensidad en Las Pintas se registró de 9.3 m/s, con un 27% de calma, en el caso de Santa Fe la máxima intensidad se registró de 7.3 m/s, con un 43% de calma (Figura 21). El resultado de las rosas de viento horario se presenta en el Anexo 1.

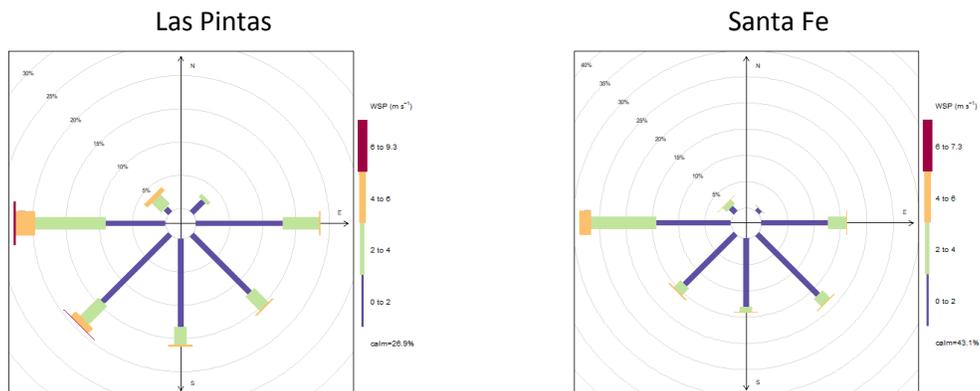


Figura 21. Rosas de viento (2014-2016)
Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA.

Se realizó un análisis de la procedencia de las partículas por dirección del viento, en el caso de las PM₁₀ se identifica que las mayores concentraciones (mayor a 150 µg/m³) se registran en toda la

zona sur, y las direcciones de donde provienen más concentraciones son el suroeste (SW) y sur (S). En la figura 22 se presenta las rosas de vientos de los dos sitios para PM₁₀.

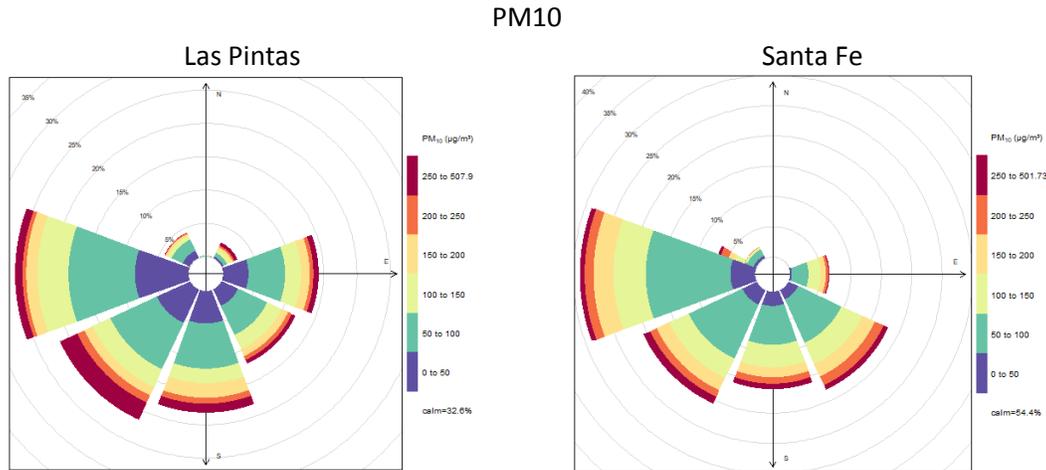


Figura 22. Rosas de viento durante la campaña de muestreo

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA.

Las PM_{2.5} presentan un comportamiento similar a las PM₁₀, se identifica que las mayores concentraciones (mayor a 50 µg/m³) se registran en toda la zona sur (ver figura 23).

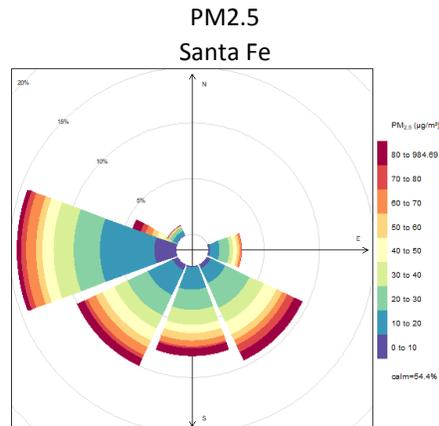


Figura 23. Rosas de viento durante la campaña de muestreo

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA.

El comportamiento horario de la procedencia de las partículas por el viento se presenta en el Anexo 1. (Análisis meteorológico).

*Comparativo mediciones de PM₁₀ y PM_{2.5} con equipo manual y automático en Guadalajara.
Regresión Lineal*

Se contó con una cobertura del 99.7% de los registros horarios de PM₁₀ en la estación Las Pintas, el 98.5% de los registros horarios de PM₁₀ en la estación Santa Fe, el 28% de los registros horarios de PM_{2.5} en la estación Santa Fe, el 100% de los muestreos de PM₁₀ en las dos estaciones. No se contó con registros horarios de PM_{2.5} en Las Pintas ni muestreos, por lo que sólo se analizará PM₁₀ en Guadalajara, La tabla 10 muestra estos porcentajes.

Tabla 10. Porcentaje de registros horarios o muestreos realizados por sitios en la ciudad de Guadalajara

	Las Pintas	Las Pintas	Santa Fe	Santa Fe	Las Pintas	Santa Fe
Registros horarios o muestreos (%)	PM10 aut	PM2.5 aut	PM10 aut	PM2.5 aut	PM10 man	PM10 man
	1675 (99.7%)	0 (0%)	1657 (98.5%)	477 (28.4%)	24 (100%)	24 (100%)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

A partir de los registros horarios de PM₁₀ se obtuvo el promedio de 24 horas⁵ y se comparó con los muestreos de 24 de los equipos manuales. En el Anexo 2 se muestra cómo se obtuvo el promedio de 24 horas.

Se obtuvo el comparativo, determinando los promedios de 24 horas de los registros horarios y los muestreos (ver tabla 11).

Tabla 11. Concentración del promedio de 24 horas de PM₁₀ y PM_{2.5} en µg/m³

Número de muestras	Las Pintas	Las Pintas	Santa Fe	Santa Fe	Santa Fe
	PM10 aut	PM10 man	PM10 aut	PM2.5 aut	PM10 man
1	74.3	46.2	67.5	13.6	39.1
2	150.9	115.1	124.6	34.9	77.4
3	100.2	72.5	100.8	28.2	57.3
4	117.3	83.4	128.3	29.3	74.7
5	96.8	70.6	84.3	24.2	46.8
6	114.6	82.0	119.5	35.1	63.4
7	71.6	53.7	110.1		69.1
8	132.8	88.8	184.1		104.8
9	76.6	55.1	103.3		59.8
10	89.8	64.8	100.4		57.9
11	47.1	34.0	46.0		27.6
12	142.7	93.1	121.1		58.9
13	82.2	55.6	78.5		60.6
14	74.6	56.1	77.1		48.4
15	112.6	78.6	111.4		68.6
16	61.8	43.5	82.2		49.3
17	70.6	57.5	75.1		51.6
18	50.9	40.8	71.7		49.3
19	54.1	37.5	97.1		60.7
20	75.7	67.6	101.1		60.4
21	75.5	52.9	86.1		49.2
22	82.7	72.4	102.7		59.4
23	64.7	52.2	68.8		42.3
24	85.6	76.2	108.9		64.7

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

⁵ con la restricción de contar al menos con 18 horas con registros (75%)

Regresión lineal

El hecho de no contar con muestreos de $PM_{2.5}$ implica que no se puede realizar un comparativo en ninguna de las dos estaciones.

La comparación obtenida de la regresión lineal se presenta en la figura 24, la cual muestra una desviación entre los registros automáticos y manuales. En el caso de las dos estaciones Las Pintas y Santa Fe la variación captada por el ajuste lineal es mayor al 90%, lo que representa una buena comparación entre los registros. Por otro lado, el ajuste lineal de Las Pintas muestra un sesgo de $0.745 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ordenada al origen) y una pendiente mayor a uno (1.369) que refleja una sobrestimación del equipo automático del 36%. En el caso de Santa Fe el sesgo es mayor, de $4.324 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una pendiente superior a uno (1.751) que refleja una sobreestimación del equipo automático del 70%. Lo ideal es que el ajuste lineal arroje una pendiente de uno y una ordenada al origen de cero, con una variación cercana a uno (R^2).

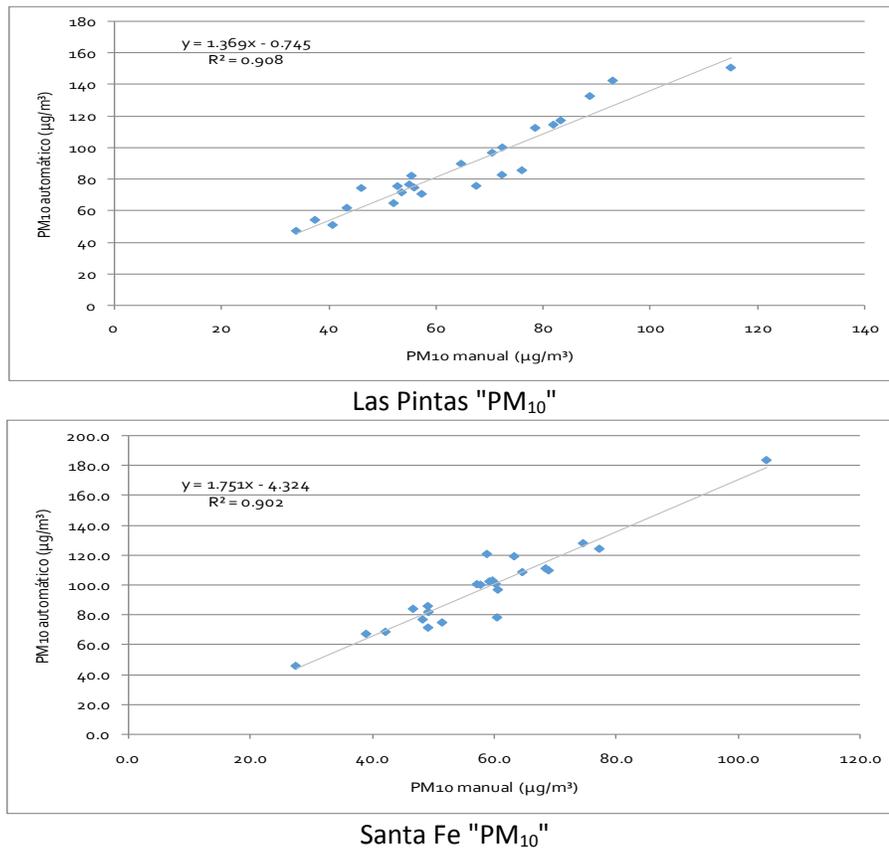


Figura 24. Comparativo del método de medición manual y automático para PM_{10} por sitio para la ciudad de Guadalajara

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

Como se aprecia, en Las Pintas, por cada 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} que se registren con el equipo manual se estarían registrando 136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el equipo automático, además de tener un ligero sesgo de 0.745 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ya que al registrar cero $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el equipo manual se registran -0.745 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el equipo automático

Como se aprecia, en Santa Fe, por cada 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} que se registren con el equipo manual se estarían registrando 175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el equipo automático, además de tener un sesgo de -4.324 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ya que al registrar cero $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el equipo manual se registran -4.324 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el equipo automático.

Comparación mediante las Pruebas No Paramétricas

Estación	Comparativo de PM_{10} automático con PM_{10} manual	
	Prueba de la Mediana	Prueba de Mann-Whitney
Las Pintas	Se rechaza la hipótesis H_0 con un nivel de significancia de 0.011, es decir, <i>sí hay diferencias en la mediana de los dos tipos de medición.</i>	Se rechaza la hipótesis H_0 con un nivel de significancia de 0.000, es decir, <i>las mediciones provienen de poblaciones diferentes.</i>
Santa Fe	Se rechaza la hipótesis H_0 con un nivel de significancia de 0.000, es decir, <i>sí hay diferencias en la mediana de los dos tipos de medición.</i>	Se rechaza la hipótesis H_0 con un nivel de significancia de 0.000, es decir, <i>las mediciones provienen de poblaciones diferentes.</i>

La figura 25 muestra los diagramas de cajas de la prueba.

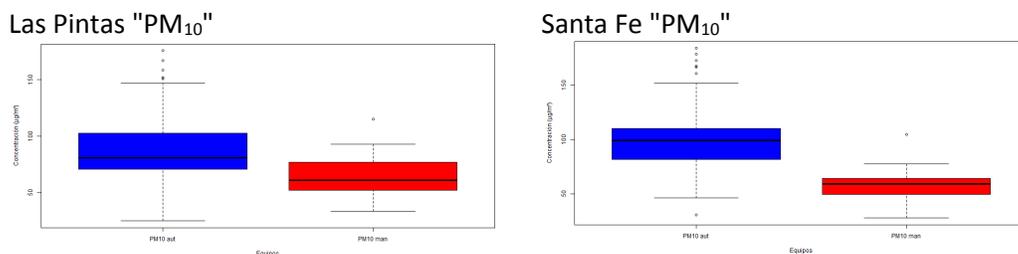


Figura 25. Representación gráfica de los "boxplot"

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

8.3.3. Monterrey

Análisis meteorológico

Se realizó el análisis de la meteorología en un sitio de Monterrey (Centro), para tres años (2104, 2015 y 2106), en las variables Velocidad del viento - WS (metros por segundo-m/s), Dirección del viento - WDR (grados azimut-°), Temperatura ambiente - TOUT (grados celsius-°C), Humedad relativa - HR (porcentaje-%), Presión barométrica - PRS (milímetros de mercurio-mmHg), Radiación solar - SR (Kilowatts por metro cuadrado-Kw/m²), Precipitación pluvial - RAINF (milímetros por hora-mm/hr). Se cuenta con más del 90% de registros por año, lo que permite un análisis más confiable por la cantidad de información (Tabla 12).

Tabla 12. Registros y porcentaje anual de variables meteorológicas en Monterrey, 2014 a 2016.

Año	Presión barométrica (PRS)	Precipitación pluvial (RAINF)	Humedad relativa (HR)	Radiación solar (SR)	Temperatura ambiente (TOUT)	Velocidad del viento (WS)	Dirección del viento (WDR)
2014	8406 (96%)	8614 (98.3%)	8560 (97.7%)	8531 (97.4%)	8571 (97.8%)	8569 (97.8%)	8420 (96.1%)
2015	8258 (94.3%)	8628 (98.5%)	8537 (97.5%)	8537 (97.5%)	8467 (96.7%)	8586 (98%)	8260 (94.3%)
2016	8703 (99.1%)	8720 (99.3%)	8701 (99.1%)	8555 (97.4%)	8713 (99.2%)	8702 (99.1%)	8718 (99.2%)
Total	25367 (96.4%)	25962 (98.7%)	25798 (98.1%)	25623 (97.4%)	25751 (97.9%)	25857 (98.3%)	25398 (96.6%)

En el caso de Monterrey se pueden identificar dos épocas, la figura 26 muestra los parámetros meteorológicos en las dos temporadas identificadas en el año de noviembre a marzo y de abril a octubre.

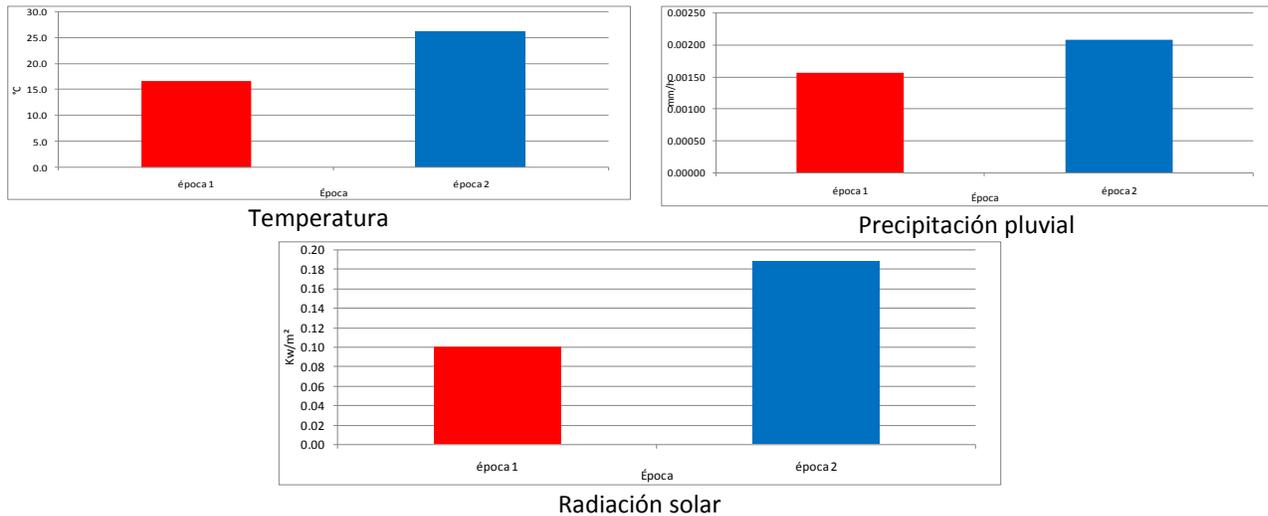


Figura 26. Comportamiento por épocas (2014-2016)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA.

El análisis horario se encuentra en el Anexo 1.

El análisis de velocidad y dirección de viento se realizó con respecto a las rosas de viento, utilizando la escala de Beaufort. La figura 27 muestra la rosa de viento para Monterrey centro. El resultado de las rosas de viento horario se presenta en el Anexo1.

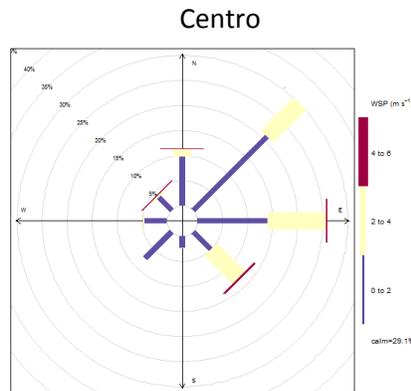


Figura 27. Rosa de viento (2014-2016)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA.

Se realizó un análisis de la procedencia de las partículas por dirección del viento

En el caso de las PM_{10} se identifica que las mayores concentraciones (mayor a $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se registran en todas las direcciones del viento, y las direcciones de donde provienen más concentraciones son el noreste (NE), este (E) y oeste (W) (Figura 28).

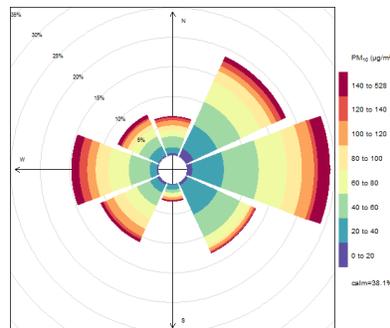


Figura 28. Procedencia de las partículas PM_{10} producto del viento en tres diferentes sitios en Monterrey

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA,

Las $PM_{2.5}$ presentan un comportamiento similar a las PM_{10} , se identifica que las mayores concentraciones (mayor a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se registran en todas las direcciones del viento, y las direcciones de donde provienen más concentraciones son el noreste (NE), este (E) y oeste (W) (ver figura 29).

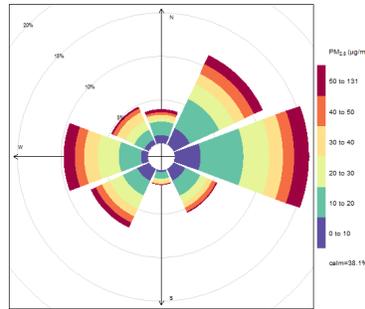


Figura 29. Procedencia de las partículas PM_{2.5} producto del viento en tres diferentes sitios en Monterrey
Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA

El comportamiento horario de la procedencia de las partículas por el viento se presenta en el Anexo 1. (Análisis meteorológico).

Comparativo mediciones de PM₁₀ y PM_{2.5} con equipo manual y automático en Monterrey

Se contó con una cobertura del 99% de los registros horarios de PM₁₀, el 51% de los registros horarios de PM_{2.5}, el 100% de los muestreos de PM₁₀ y el 91% de los muestreos de PM_{2.5}. La tabla 13 muestra estos porcentajes.

Tabla 13. Porcentaje de registros horarios o muestreos realizados por sitios en la ciudad de Monterrey

	PM10 aut	PM2.5 aut	PM10 man	PM2.5 man
Registros horarios o muestreos (%)	1597 (99.3%)	824 (51.2%)	23 (100%)	21 (91.3%)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

A partir de los registros horarios de PM₁₀ y PM_{2.5} se obtuvo el promedio de 24 horas⁶ y se comparó con los muestreos de 24 de los equipos manuales. En el Anexo 2 se muestra cómo se obtuvo el promedio de 24 horas.

Se obtuvo el comparativo, determinando los promedios de 24 horas de los registros horarios y los muestreos, (ver tabla 14).

Tabla 14. Concentración del promedio de 24 horas de PM₁₀ y PM_{2.5} en µg/m³

Número de muestra	PM2.5 aut	PM10 aut	PM2.5 man	PM10 man
1		57.4	7.8	13.7
2	17.6	81.6	13.4	33.2
3		37.0	18.6	20.1
4	31.8	112.3	23.0	58.6
5	26.4	76.0	20.7	32.4
6	36.9	84.9	13.6	37.3
7		45.2	8.7	20.8
8		59.8	18.6	31.5
9		34.0	8.1	16.5
10		55.3	15.7	31.0

⁶ con la restricción de contar al menos con 18 horas con registros (75%)

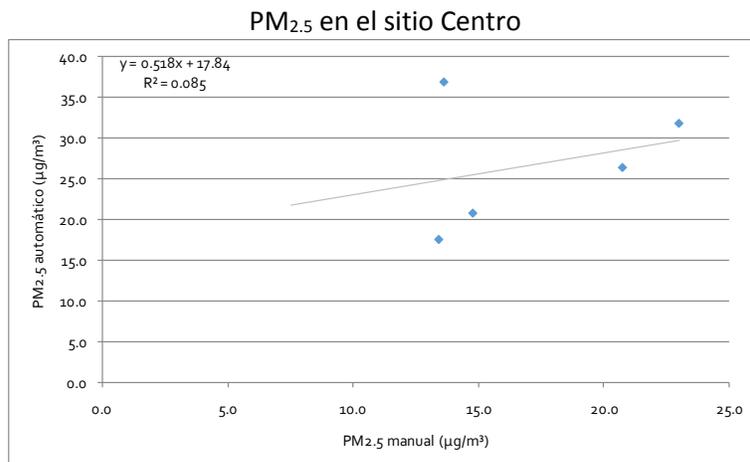
Número de muestra	PM2.5 aut	PM10 aut	PM2.5 man	PM10 man
11		35.6	10.0	20.0
12		59.5	11.7	27.4
13		56.2	17.7	31.3
14		35.4	7.6	15.7
15		51.3	14.0	23.7
16		42.1	13.1	24.0
17		38.8	14.0	20.0
18		24.2		14.2
19		66.7		32.3
20		47.8	18.2	25.8
21		38.5	15.0	19.7
22		53.3	20.4	31.1
23	20.8	84.5	14.8	40.2
24			7.8	13.7

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

Regresión lineal

El hecho de no contar con registros en ambos equipos de PM_{2.5} para cada día implica que no se puede realizar un comparativo real entre ambos, sin embargo, con la información que se tiene hasta el momento se aprecia en la representación gráfica una desviación entre los registros automáticos y manuales, el ajuste lineal no es confiable pues se capta menos del 10% de la variación (0.085). Se recomienda cubrir una temporada mayor de muestreos en espera de contar con los registros automáticos del mismo período.

En el caso de PM₁₀ el contar con datos completos facilita la comparación y el hecho de que la variación captada por el ajuste lineal es mayor al 80% es adecuado para el comparativo, sin embargo, el ajuste lineal muestra un sesgo de 4.858 µg/m³ (ordenada al origen) y una pendiente mayor a uno (1.879), lo cual se interpreta como una sobreestimación cercana al 90% del equipo automático con respecto al manual. Lo ideal es que el ajuste lineal arroje una pendiente de uno y una ordenada al origen de cero, con una R² cercana a uno.



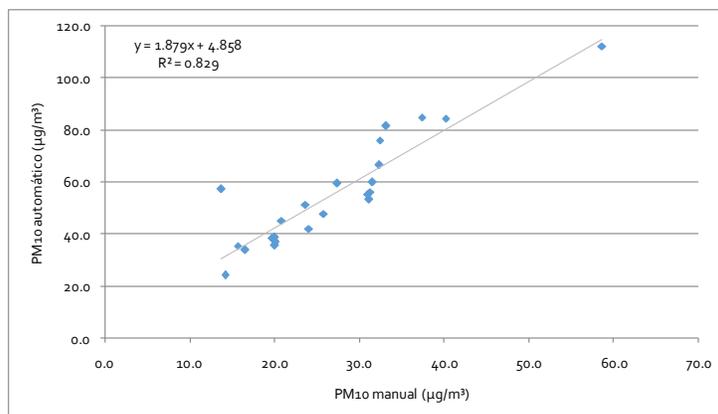


Figura 30. Comparativo del método de medición manual y automático para PM₁₀ y PM_{2.5} por sitio para la ciudad de Monterrey

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

Como se aprecia en la figura 30, por cada 100 µg/m³ de PM₁₀ que se registren con el equipo manual se estarían registrando 188 µg/m³ con el equipo automático, casi el doble, además de tener un ligero sesgo de 4.858 µg/m³, ya que al registrar cero µg/m³ con el equipo manual se registran 4.858 µg/m³ con el equipo automático.

Comparación con las Pruebas No Paramétricas

Estación	Comparativo de PM10 automático con PM10 manual	
	Prueba de la Mediana	Prueba de Mann-Whitney
Centro	Se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.005, es decir, <i>sí hay diferencias en la mediana de los dos tipos de medición.</i>	Se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.000, es decir, <i>las mediciones provienen de poblaciones diferentes.</i>

Se reporta el nivel de significancia (p-value) en cada prueba, lo cual representa el nivel con el cual la hipótesis nula sería rechazada. En el caso de valores menores a 0.05, hay evidencias para rechazar la Hipótesis nula (H₀).

Estación	Comparativo de PM2.5 automático con PM2.5 manual	
	Prueba de la Mediana	Prueba de Mann-Whitney
Centro	Se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.005, es decir, <i>sí hay diferencias en la mediana de los dos tipos de medición.</i>	Se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.000, es decir, <i>las mediciones provienen de poblaciones diferentes.</i>

Se reporta el nivel de significancia (p-value) en cada prueba, lo cual representa el nivel con el cual la hipótesis nula sería rechazada. En el caso de valores menores a 0.05, hay evidencias para rechazar la Hipótesis nula (H₀).

La figura 31 muestra el diagrama de cajas de la prueba

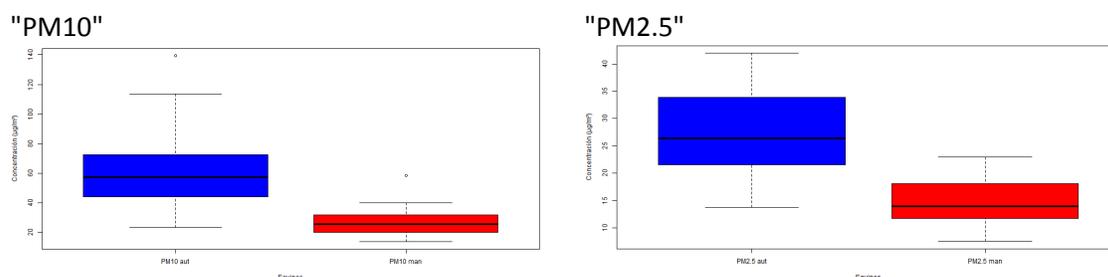


Figura 31. Representación gráfica de los "boxplot"

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

8.3.4. Villahermosa

Análisis meteorológico

El análisis de los parámetros meteorológicos de octubre de 2016 a abril de 2017 no es suficiente para determinar las características del clima de la región, sin embargo, se presentan los resultados.

El análisis de las variables dirección y velocidad del viento, se realizó con respecto a las rosas de viento, utilizando la escala de Beaufort de la intensidad del viento (Calma⁷, Ventolina, Brisa muy débil, Brisa Ligera, Brisa moderada, Brisa fresca y Brisa fuerte) Tabla 5, y considerando 16 categorías de la dirección del viento: N-norte, NNE-nornoreste, NE-noreste, ENE-estenoreste, E-este, ESE-estesureste, SE-sureste, SSE-sursureste, S-sur, SSW-sursuroeste, SW-suroeste, WSW-oestesuroeste, W-oeste, WNW-oestenoroeste, NW-noroeste, NNW-nornoroeste (ver Tabla 15).

Tabla 15. Categorías de la dirección del viento.

Rango de la dirección del viento (grados)	Categoría
0 a 11.25, 348.75 a 360	N
11.25 a 33.75	NNE
33.75 a 56.25	NE
56.25 a 78.75	ENE
78.75 a 101.25	E
101.25 a 123.75	ESE
123.75 a 146.25	SE
146.25 a 168.75	SSE
168.75 a 191.25	S
191.25 a 213.75	SSW
213.75 a 236.25	SW
236.25 a 258.75	WSW
258.75 a 281.25	W
281.25 a 303.75	WNW
303.75 a 326.25	NW
326.25 a 348.75	NNW

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA

Los resultados de la rosa de viento no son suficientes para dar alguna descripción del comportamiento (Figura 32).

⁷Registro de vientos menores a 1 nudos (0.51 m/s) o la ausencia de todo movimiento perceptible del aire.

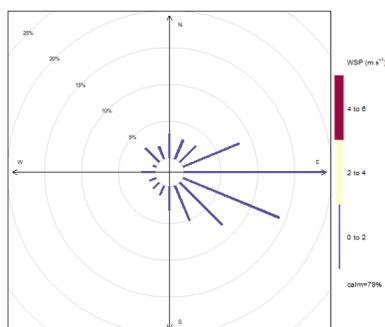


Figura 32. Rosas de Viento para la ciudad de Tabasco (oct. 2016-abr. 2017)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017. Con información de SMA

Comparativo mediciones de PM₁₀ y PM_{2.5} con equipo manual y automático en Tabasco

Se contó con una cobertura de más del 90% de los registros horarios de PM₁₀ en los sitios SET e ITVH, del 55.2% de los muestreos de PM₁₀ en SET y del 75.8% de los muestreos de PM₁₀ en ITVH.

Tabla 16. Porcentaje de registros horarios o muestreos realizados por sitios en la ciudad de Tabasco

	SET	ITVH	SET	ITVH
Registros horarios o muestreos (%)	PM ₁₀ aut 1,855 (90.93%)	PM ₁₀ aut 2,039 (99.95%)	PM ₁₀ man 16 (55.2%)	PM ₁₀ man 22 (75.8%)

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017.

A partir de los registros horarios de PM₁₀ se obtuvo el promedio de 24 horas⁸ y se comparó con los muestreos de 24 de los equipos manuales. En el Anexo 2 se muestra cómo se obtuvo el promedio de 24 horas.

Con estos resultados el comparativo se realizó entre los promedios de 24 horas de los registros (Anexo 2. Obtención de promedio de 24 horas por ciudad y sitios de muestreo) horarios y los muestreos de los sitios SET e ITVH para PM₁₀.

Tabla 17. Concentración del promedio de 24 horas de PM₁₀ en µg/m³

Número de muestra	SET	ITVH	SET	ITVH
	PM ₁₀ aut	PM ₁₀ aut	PM ₁₀ man	PM ₁₀ man
1		41.6		57
2	21.5	37.9		58
3		24.4	12	13
4	10.9	25.9	14	18
5	9.9	23.9		15
6	69.2	54.7		47
7	33.7	53.8	25	35
8	31.9	43.1		27
9	37.3	47.4		
10	14.1	25.3		25
11	16.3	24.8		
12	13.4	24.1		

⁸ con la restricción de contar al menos con 18 horas con registros (75%)

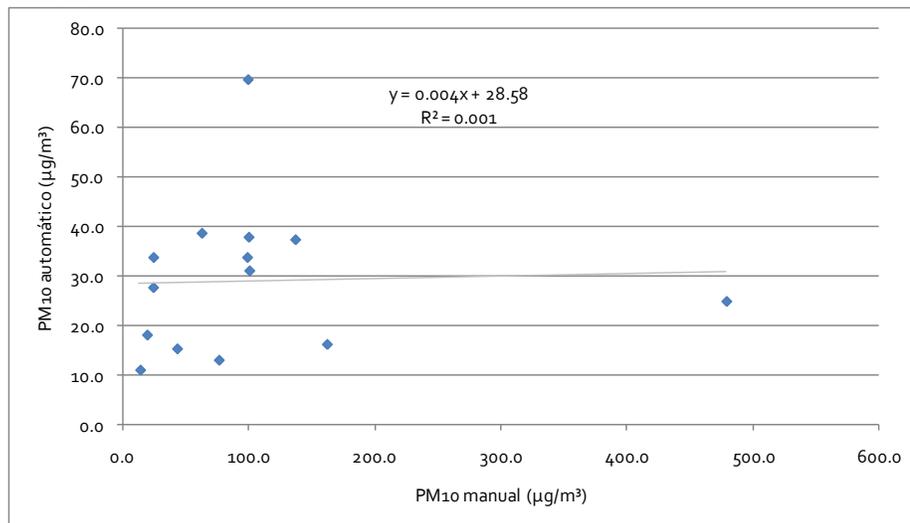
Número de muestra	SET	ITVH	SET	ITVH
	PM ₁₀ aut	PM ₁₀ aut	PM ₁₀ man	PM ₁₀ man
13	26	38.5		20
14	15.2	34.1	43	22
15	40.7	43.8		
16	32.9	43.6		
17	31	45.4	101	49
18	37.3	44.1	137	23
19	37.8	47.3	100	55
20	38.6	44.2	63	30
21	16.1	30.0	162	106
22	12.9	24.0	77	106
23	24.8	28.6	479	21
24		23.4	112	21
25	18	24.0	20	33
26	20	27.2		
27	27.6	35.1	25	
28	33.7	36.8	99	32
29	69.7	47.5	100	53
30		41.6		57

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

Regresión lineal.

La comparación obtenida de la regresión lineal se presenta en la Figura 33, la cual muestra una desviación entre los registros automáticos y manuales. La variación captada por el ajuste lineal es menor al 1% en ambos casos (SET e ITVH), esto indica alguna imprecisión en los datos automáticos. Por otro lado, el ajuste lineal de SET e ITVH muestra un sesgo entre 28 y 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (ordenada al origen de 28.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SET y de 34.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en ITVH) y una pendiente cercana a cero que refleja una nula estimación del equipo automático (0.004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SET y de 0.037 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en ITVH). Lo ideal es que el ajuste lineal arroje una pendiente de uno y una ordenada al origen de cero, con una variación cercana a uno (R^2).

PM₁₀ en el sitio SET



PM₁₀ en el sitio ITVH

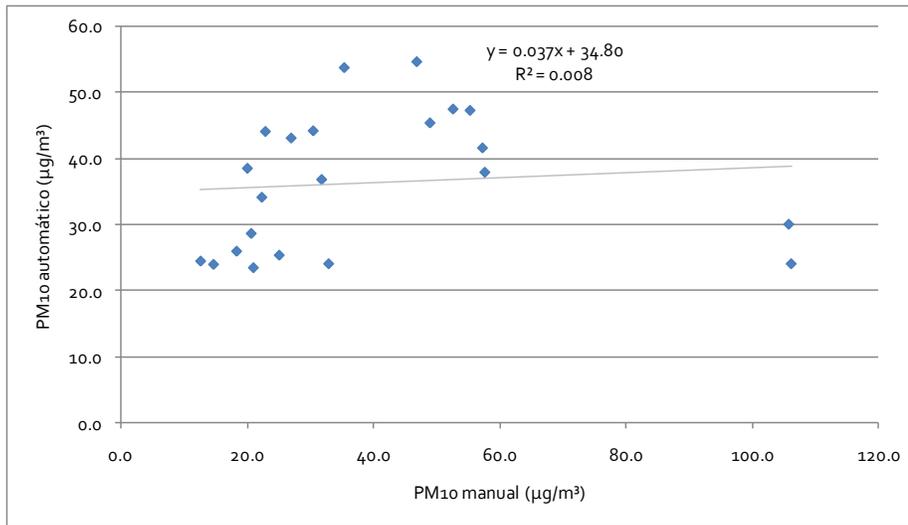


Figura 33. Comparativo del método de medición manual y automático para PM₁₀ y PM_{2.5} por sitio para la ciudad de Tabasco

Fuente: Elaboración Propia. CINPRO 2017

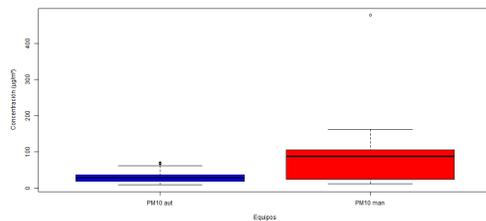
Comparación con las Pruebas No Paramétricas

Estación	Comparativo de PM ₁₀ automático con PM ₁₀ manual	
	Prueba de la Mediana	Prueba de Mann-Whitney
SET	No se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.169, es decir, no hay diferencias en la mediana de los dos tipos de medición.	Se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.001, es decir, las mediciones provienen de poblaciones diferentes.
ITVH	No se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.504, es decir, no hay diferencias en la mediana de los dos tipos de medición.	No se rechaza la hipótesis H ₀ con un nivel de significancia de 0.611, es decir, las mediciones provienen de la misma población.

Se reporta el nivel de significancia (p-value) en cada prueba, lo cual representa el nivel con el cuál la hipótesis nula sería rechazada. En el caso de valores menores a 0.05, hay evidencias para rechazar la Hipótesis nula (H₀).

En una prueba No Paramétrica no es necesario contar con el supuesto de conocer la función de distribución de los datos.

SET "PM₁₀"



ITVH "PM₁₀"

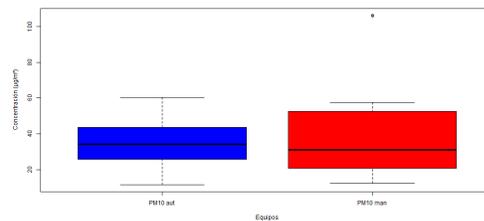


Figura 34. Representación gráfica de los "boxplot"

9. Conclusiones

Se generó información de campo en 4 ciudades del país, Salamanca Guanajuato, Guadalajara Jalisco, Monterrey Nuevo León, y Villahermosa Tabasco; con equipo manual y automático de partículas fracción respirable; abarcando distintas zonas climáticas del país. De acuerdo al análisis meteorológico nacional las ciudades de Salamanca y Guadalajara se ubican en la región con presión barométrica de 760 a 850 mb, mientras que las ciudades de Monterrey y Villahermosa se ubican en la región climática con presión barométrica mayor a 850 mb.

Se proponen dos metodologías estadísticas para evaluar la correspondencia entre el muestreo manual y automático de PM₁₀ y PM_{2.5}: la Regresión lineal (método Paramétrico) y Prueba de medianas (método No Paramétrico).

La evaluación por medio de las pruebas No Paramétricas arroja que tan solo en el caso de Salamanca en la estación Cruz Roja donde se monitorea PM_{2.5}, con equipo automático (atenuación beta) y equipo manual de mediano volumen, se cuenta con evidencia estadística para asegurar que los equipos automáticos y manuales representan el mismo fenómeno, en el resto de las estaciones de las ciudades de Guadalajara, Monterrey, Salamanca (DIF) y Villahermosa no hay evidencia estadística para asegurar que los equipos automáticos y manuales representan el mismo fenómeno.

Por otro lado, la representación gráfica de los "boxplot" refuerza la interpretación de las pruebas No Paramétricas, ya que el único caso en el que se traslapan las cajas de los gráficos es en Salamanca en la estación Cruz Roja donde se monitorea PM_{2.5}, en el resto de las estaciones se nota un corrimiento entre las cajas, que para fines prácticos implica que las concentraciones centrales (entre el percentil 25 y 75) de ambos equipos de medición no son comparables.

Con respecto al ajuste por mínimos cuadrados (regresión lineal), al comparar 100 µg/m³ registrados con equipo manual con su equivalente en el equipo automático por medio del ajuste lineal, se aprecia una **sobreestimación** en las mediciones de PM₁₀ del 93% en la estación Centro de Monterrey, del 71% en la estación Santa Fe de Guadalajara, del 36% en la estación Las Pintas de Guadalajara y del 30% en la estación DIF de Salamanca. Por otro lado, se aprecia una **subestimación** en las mediciones de PM_{2.5} del 30% en la estación Centro de Monterrey y del 4% en la estación Cruz Roja de Salamanca.

Factores de correspondencia, comparativo por cada 100 µg/m³ registrados con equipo manual (método gravimétrico) y su equivalente en equipo automático, por sitio.

	Guadalajara			Monterrey		Salamanca		
	Las "PM10"	Pintas	Santa "PM10"	Fe	Centro "PM10"	Centro "PM2.5"	DIF "PM10"	Cruz Roja "PM2.5"
Equivalente con equipo automático*		136.2		170.8	192.8	69.6	130.3	96.2
Porcentaje		136%		171%	193%	70%	130%	96%

* a partir de la ecuación del ajuste lineal por mínimos cuadrados

Aun cuando se presentan los resultados obtenidos en las estaciones IVTH y SET en Villahermosa Tabasco, la comparación entre el método de referencia (muestreo manual de PM_{10}) y los métodos equivalentes (muestreo automático de PM_{10}) no arrojan ninguna correlación con ninguna de las pruebas estadísticas realizadas.

La norma NMX-AA-177-SCFI-2015 en México mediante el protocolo propuesto en el presente trabajo; es compatible con las NAAQSs y las directrices europeas para la Calidad del Aire Ambiente y una Atmósfera más Limpia (EC); que especifican el uso de cualquiera de los métodos de referencia y métodos equivalentes.

Durante el desarrollo del proyecto se concluyó que es vital el buen funcionamiento de los equipos tanto manual como automático para obtener datos válidos para la correspondencia entre ambas metodologías y muestreo.

Desafortunadamente hay muchas carencias y área de oportunidad en los SMA del país como son: falta de capacitación a los operarios, falta de recursos monetarios y falta de personal para la operación de los SMA.

Se debe tomar en cuenta; periodos más grandes de muestreo, que permitan considerar diferentes periodos climáticos y mayor robustez de análisis. En el presente trabajo se consideró tener las tres zonas que nos proporciona el análisis meteorológico, pero es importante contar con más sitios de muestreo, para evitar invalides y tener representatividad.

Se recomienda reforzar las redes con equipo manual y capacitación a personal para una futura etapa o para la operación del día a día en los SMA. Así como, que la federación refuerce el muestreo manual y automático de $PM_{2.5}$ en el país ya que actualmente hay muy poco equipo instalado.

10. Bibliografía

Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda, Valencia. Informe Relativo a la Intercomparación del Equipo Automático de Medida de Partículas PM2.5 Frente a Método Equivalente al de Referencia (Gravimetría) en la estación de Burriana, Cod. 12032001. Valencia 2005.

CONAPO <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico>

Council Directive 96/62/EC of 27 September 1996 on ambient air quality assessment and management.

Council Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air.

Dickinson Gibbons, Jean and Chakraborti, Subhabrata. 2003. Nonparametric Statistical Inference. Fourth Edition, Revised and Expanded. Statistics: A DEKKER series of Textbooks and Monographs.

EC, 2010. Guide Demonstration of equivalence of ambient air monitoring methods » - Report by an EC Working group on Guidance for the Demonstration of Equivalence (January 2010).

Kingdom, 2012. Department for Environment, Food and Rural Affairs; Scottish Executive; Welsh Government; and Department of the Environment in Northern Ireland. Fine Particulate Matter (PM2.5) in the United.

EPA. Equating Semi-Continuous (SC) PM2.5 Mass Monitor Measurement Values with Federal Reference Method (FRM) PM2.5 Monitor Measurement Values. Final Report 2011.

EPA. U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National Exposure Research Laboratory Human Exposure and Atmospheric Sciences Division Process Modeling. GUIDELINES FOR APPLICANTS; REFERENCE AND EQUIVALENT METHOD APPLICATIONS. 2011

EPA. ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, Chapter I , Chap 50, 53 y 58. e-CFR data is current as of September 21, 2016.

Página de internet

http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?gp=&SID=2158e989dc7383181582143cbdf64a8&mc=true&tpl=/ecfrbrowse/Title40/40CIsu_bchapC.tpl

HAL Id: ineris-00972545, Demonstration of equivalence of PM automated monitoring methods: results of the 1st measurement campaign on a parisian urban background air quality station, 2014.

James J. Schwab , Henry D. Felton , Oliver V. Rattigan & Kenneth L. Demerjian (2006) New York State Urban and Rural Measurements of Continuous PM_{2.5} Mass by FDMS, TEOM, and BAM, Journal of the Air & Waste Management Association, 56:4, 372-383.

Instituto de Ciencias de la Tierra, “Jaume Almera” Csic. Inter-Comparación de Equipos Automáticos de Medida de PM Utilizados en el puerto de Tarragona con el Método de Referencia. Barcelona, 2005.

INEC, 2015. Informe Nacional de Calidad del Aire 2014, México. 242 pp.

Ilmatieteen laitos, Meteorologiska Institutet, Finnish Meteorological Institute. Demonstration of the equivalence of PM_{2.5} and PM₁₀ measurement methods in Helsinki 2007–2008.

Instituto de Ciencias de la Tierra. Csic. Inter-Comparación de Equipos Automáticos de Medida de PM Utilizados en el Puerto de Tarragona con el Método De Referencia. Barcelona 2005

Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993 Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.

Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. DOF: 20/08/2014.

Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. D.O.F. 16 de julio de 2012.

Olivier Le Bihan, et al. Demonstration of equivalence of PM automated monitoring methods: results of the 1st measurement campaign on a parisian urban background air quality station. 2006.

OMS, 2006. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

Roxolana Kashuba & Peter A. Scheff (2008) Nonlinear Regression Adjustments of Multiple Continuous Monitoring Methods Produce Effective Characterization of Short-Term Fine Particulate Matter, Journal of the Air & Waste Management Association, 58:6, 812-820, DOI: 10.3155/1047-3289.58.6.812

Secretaría de Economía, 2016. Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-177-SCFI-2015. Que establece los métodos de referencia y equivalentes para la medición de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en aire ambiente.